



Sveučilište u Zagrebu

Geodetski fakultet

Luka Zalović

RAZVOJ METODE UMJERIVANJA KAMERE RUČNIH MJERNIH MOBILNIH SUSTAVA

DOKTORSKI RAD

Mentor:
prof. dr. sc. Siniša Mastelić-Ivić

Zagreb, 2026.



University of Zagreb

Faculty of Geodesy

Luka Zalović

**DEVELOPMENT OF A CAMERA
CALIBRATION METHOD FOR HANDHELD
MOBILE MAPPING SYSTEMS**

DOCTORAL THESIS

Supervisor:
prof. dr. sc. Siniša Mastelić-Ivić

Zagreb, 2026.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEODETSKI FAKULTET



Na temelju članka 19. Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu i Odluke br.: 1_349_11 Fakultetskog vijeća Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, od 26. 10. 2017. godine (klasa: 643-03/16-07/03), uređena je obaveza davanja „Izjave o izvornosti“ diplomskog rada / specijalističkog rada / doktorskog rada koji se vrednuju na diplomskom studiju, specijalističkom studiju i poslijediplomskom doktorskome studiju geodezije i geoinformatike, a u svrhu potvrđivanja da je rad izvorni rezultat rada studenta te da taj rad ne sadržava druge izvore osim onih koji su u njima navedeni.

IZJAVLJUJEM

Izjavljujem da je moj diplomski rad / specijalistički rad / doktorski rad izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi tog rada nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Datum:

Ime i prezime:

I. AUTOR

Ime i prezime:	Luka Zalović
Datum i mjesto rođenja:	9. rujna 1994., Čakovec
Sadašnje zaposlenje:	Geo-centar d.o.o.

II. DOKTORSKI RAD

Naslov:	Razvoj metode umjerivanja kamere ručnih mjernih mobilnih sustava
Broj stranica:	
Broj slika:	68
Broj tablica:	34
Broj bibliografskih podataka:	155 + 23 URL-a
Ustanova i mjesto gdje je rad izrađen:	Sveučilište u Zagrebu – Geodetski fakultet, Zagreb
Znanstveno područje:	Tehničke znanosti
Znanstveno polje:	Geodezija
Mentor:	Prof. dr. sc. Siniša Mastelić-Ivić
Oznaka i redni broj rada:	

III. OCJENA I OBRANA

Datum prihvatanja teme Odlukom Senata Sveučilišta u Zagrebu:	18. veljače 2025.
Datum sjednice Fakultetskog vijeća na kojoj je doktorski rad prihvaćen:	
Sastav povjerenstva koje je ocijenilo doktorski rad:	
Datum obrane doktorskog rada:	
Sastav povjerenstva pred kojim je branjen doktorski rad:	

Zahvala

Sažetak

Mobilni sustavi za kartiranje integriraju različite senzore radi prikupljanja velikih količina prostornih podataka u pokretu. Najčešći podaci prikupljeni ovim sustavima uključuju 3D laserske skenove (oblake točaka) i orijentirane fotografije. Mobilni sustavi za kartiranje najčešće su implementirani kao zemaljski sustavi (montirani na platforme poput automobila) ili zračni sustavi (montirani na zrakoplove ili helikoptere). Unatoč izuzetnim mogućnostima takvih sustava, u današnje je vrijeme sve izraženija potreba za izmjerom objekata i prostora kojima je nepraktično ili nemoguće pristupiti koristeći uobičajene pokretne platforme poput automobila ili zrakoplova. Stoga se posljednjih godina intenzivno razvijaju ručni mobilni sustavi temeljeni na SLAM tehnologiji (eng. *Simultaneous Localization and Mapping*). Ovaj revolucionarni koncept omogućuje navigaciju mobilnog sustava kroz prostor bez potrebe za velikim, teškim i skupim senzorima ili tradicionalnim pokretnim platformama. Takvi su sustavi dovoljno maleni i lagani da ih korisnik može nositi u ruci prilikom izmjeri. Jedan od značajnih izazova u realizaciji ručnih mobilnih sustava jest integracija kamere za potrebe prikupljanja orijentiranih fotografija. Takve fotografije imaju višestruku primjenu. Osim što se koriste kao vizualno sredstvo za potrebe analize prostornih podataka, fotografije služe i za prijenos boje na 3D skenove (kolorizaciju), kao i za neposrednu izmjeru koordinata točaka skeniranih objekata, koristeći koncept tzv. monoskopskog kartiranja. Za dobivanje orijentiranih fotografija nužno je provesti umjerivanje kamere, odnosno uspostavu veze između koordinatnog sustava kamere i koordinatnog sustava navigacijske jedinice ručnog mobilnog sustava. Takva se veza realizira određivanjem relativnih kalibracijskih parametara: položajnih i kutnih odnaka (eng. *offset*) između dva koordinatna sustava. Iako postoji velik broj metoda umjerivanja kamere za potrebe mobilnih sustava za kartiranje, sve su inicijalno razvijene za potrebe mobilnih sustava na automobilima i letjelicama te nisu prilagođene ručnim mjernim mobilnim sustavima. U ovom je istraživanju predstavljena nova metoda umjerivanja koja je u potpunosti prilagođena ručnim mobilnim sustavima sa fiksno montiranim eksternim kamerama. Ista se bazira na trajektoriji ručnog mobilnog sustava i fotogrametrijskoj obradi panoramskih fotografija uz primjenu sfernog modela kamere. Metoda je testirana za potrebe umjerivanja tvornički integrirane kamere čija je vremenska sinkronizacija unaprijed realizirana, kao i za potrebe umjerivanja kamere koja nije tvornički integrirana (korisnički integrirana) te nema unaprijed realiziranu vremensku sinkronizaciju. Za te je potrebe razvijena prilagođena metoda vremenske sinkronizacije kojom je omogućeno dobivanje točnih vremenskih trenutaka ekspozicije. Analizirana je

ponovljivost novo razvijene metode za obje kamere, njezina točnost u usporedbi s tvorničkim podacima kalibracije (za tvornički integriranu kameru), kao i brzina te fleksibilnost postupka u odnosu na alternativne metode. Uz to, provedeni su neovisni testovi za kontrolu točnosti izračunatih relativnih kalibracijskih parametara, kao i procjenu pogreške vremenske sinkronizacije za korisnički integriranu kameru. Time je omogućena empirijska analiza kvalitete umjerivanja te donošenje zaključaka o primjenjivosti, brzini, objektivnosti i točnosti predložene metode.

Ključne riječi: ručni mjerni mobilni sustavi, SLAM tehnologija, umjerivanje kamere, vremenska sinkronizacija, sferni model kamere

Abstract

Mobile mapping systems integrate multiple sensors to collect large volumes of spatial data while in motion. The most common data acquired by these systems include 3D laser scans (point clouds) and oriented images. Mobile mapping systems are typically implemented as terrestrial systems (mounted on platforms such as vehicles) or aerial systems (mounted on aircraft or helicopters). Despite the advanced capabilities of such systems, there is an increasing need for surveying objects and spaces that are impractical or impossible to access using conventional mobile platforms such as vehicles or aircraft. Consequently, handheld mobile mapping systems based on SLAM technology (Simultaneous Localization and Mapping) have been intensively developed in recent years. This revolutionary concept enables navigation of a mobile system through space without the need for large, heavy, and expensive sensors or traditional mobile platforms. Such systems are sufficiently small and lightweight to be carried by the operator during data acquisition. One of the major challenges in the development of handheld mobile mapping systems is the integration of a camera for the acquisition of oriented images. These images have multiple applications: in addition to serving as a visual tool for spatial data analysis, they are used for coloring 3D point clouds (colorization) and for the direct measurement of point coordinates on scanned objects using the concept of monoplottting. To obtain oriented images, camera calibration is required, i.e., the establishment of a relationship between the camera coordinate system and the coordinate system of the navigation unit of the handheld mobile mapping system. This relationship is defined by determining relative calibration parameters, namely translational and rotational offsets between the two coordinate systems. Although numerous camera calibration methods exist for mobile mapping applications, they were primarily developed for vehicle-based and airborne mobile mapping systems and are not adapted to handheld mobile mapping systems. This research presents a new camera calibration method fully adapted to handheld mobile mapping systems with fixed-mounted external cameras. The method is based on the trajectory of the handheld mobile mapping system and the photogrammetric processing of panoramic images using a spherical camera model. The method was tested for the calibration of a factory-integrated camera with pre-established time synchronization, as well as for the calibration of a non-factory-integrated (user-integrated) camera without predefined time synchronization. For this purpose, a dedicated time synchronization method was developed, enabling the determination of accurate exposure timestamps. The repeatability of the newly developed method was analyzed for both cameras, along with its accuracy in comparison to

factory calibration data (for the factory-integrated camera) and its efficiency and flexibility relative to alternative methods. In addition, independent tests were conducted to verify the accuracy of the estimated relative calibration parameters and to assess the time synchronization error for the user-integrated camera. This enabled an empirical evaluation of calibration quality and the formulation of conclusions regarding the applicability, efficiency, objectivity, and accuracy of the proposed method.

Keywords: handheld mobile mapping systems, SLAM technology, camera calibration, time synchronization, spherical camera model

SADRŽAJ

POPIS TABLICA	XIII
POPIS SLIKA.....	XVI
1. UVOD	1
1.1. CILJEVI I HIPOTEZE ISTRAŽIVANJA.....	3
1.2. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA I OČEKIVANI ZNANSTVENI DOPRINOSI	4
1.3. STRUKTURA DOKTORSKOG RADA	6
2. SLAM ALGORITMI I TEHNOLOGIJA.....	9
2.1. SENZORI ZA SLAM	9
2.1.1. Vizualni senzori.....	10
2.1.2. LiDAR senzori	11
2.1.3. Inercijalna mjerna jedinica (IMU).....	12
2.2. MATEMATIČKA OSNOVA I RJEŠAVANJE SLAM PROBLEMA.....	13
2.2.1. Struktura probabilističkog pristupa SLAM problemu.....	15
2.2.2. SLAM utemeljen na proširenom Kalman filtru	17
2.2.3. SLAM utemeljen na filtru čestica	19
2.2.4. SLAM utemeljen na grafu.....	20
2.3. MOBILNI MJERNI SUSTAVI TEMELJENI NA SLAM TEHNOLOGIJI.....	22
2.3.1. Mobilni mjerni sustavi u formi ruksaka	24
2.3.2. Mobilni mjerni sustavi u formi kolica.....	24
2.3.3. Ručni mjerni mobilni sustavi	25
3. KAMERE RUČNIH MJERNIH MOBILNIH SUSTAVA.....	26
3.1. PANORAMSKI SUSTAVI I FOTOGRAFIJE.....	27
3.1.1. Glavni parametri panoramskog sustava	28
3.1.2. Optičke arhitekture panoramskih sustava	30
3.2. KONSTRUIRANJE PANORAMSKIH FOTOGRAFIJA	34
3.2.1. Modeli transformacija fotografija	35
3.2.2. Distorzije leće.....	38
3.2.3. Postupci poravnanja fotografija	39
3.2.4. Izjednačenje bloka i uklanjanje paralakse.....	43
3.2.5. Odabir kompozitne površine i stapanje fotografija	45
4. UMJERIVANJE KAMERE RUČNIH MJERNIH MOBILNIH SUSTAVA.....	48

4.1. DEFINICIJA KOORDINATNIH SUSTAVA I RELACIJA MEĐU NJIMA	48
4.1.1. Transformacija između b-sustava i m-sustava	50
4.1.2. Transformacija između s-sustava i b-sustava.....	50
4.1.3. Transformacija između b-sustava i c-sustava.....	51
4.2. VREMENSKA SINKRONIZACIJA SENZORA	52
4.3. PRIMJENA ORIJENTIRANIH PANORAMSKIH FOTOGRAFIJA	55
4.3.1. Primjena za potrebe vizualizacije i razumijevanja scene	55
4.3.2. Monoskopsko kartiranje	57
4.3.3. Bojanje točaka (kolorizacija) 3D laserskih skenova	59
4.4. POSTOJEĆE METODE UMJERIVANJA KAMERA MJERNIH MOBILNIH SUSTAVA.....	61
4.4.1. Metode bazirane na mjernim metama	62
4.4.2. Metode bazirane na značajkama	63
4.4.3. Metode bazirane na 3D uklapanju.....	64
4.4.4. Metode bazirane na predikciji kretanja senzora	65
4.4.5. Metode bazirane na ovisnosti.....	66
4.4.6. Ograničenja postojećih metoda umjerivanja	67
5. RAZVOJ NOVE METODE UMJERIVANJA KAMERE	69
5.1. KALIBRACIJSKI SKEN.....	70
5.1.1. Odabir područja za kalibracijski sken	71
5.1.2. Postavljanje mjernih meta	72
5.1.3. Sinkronizacija vremena kamere u kontekstu kalibracijskog skena.....	74
5.2. OBRADA PODATAKA KALIBRACIJSKOG SKENA.....	76
5.2.1. SLAM obrada laserskog skena.....	77
5.2.2. Konstruiranje panoramskih fotografija	78
5.2.3. Detekcija statičkih položaja u trajektoriji.....	81
5.2.4. Izračun koordinata mjernih meta u m-sustavu	83
5.2.5. Detekcija mjernih meta na fotografijama.....	84
5.2.6. Sinkronizacija vremena korisnički integrirane kamere	86
5.2.7. Izračun inicijalnih položaja i rotacija panoramskih fotografija	89
5.3. IZRAČUN RELATIVNIH KALIBRACIJSKIH PARAMETARA	92
5.3.1. Algoritmi rekonstrukcije scene iz gibanja za sferni model kamere	92
5.3.2. Uvoz fotografija u Agisoft Metashape i inicijalne postavke.....	94

5.3.3.	Fotogrametrijska obrada panoramskih snimaka.....	97
5.3.4.	Izračun izjednačenih položaja i rotacija panoramskih fotografija	99
5.3.5.	Izračun relativnih kalibracijskih parametara translacije.....	100
5.3.6.	Izračun relativnih kalibracijskih parametara rotacije	102
6.	TESTIRANJE I PRIMJENA RAZVIJENE METODE UMJERIVANJA	
	KAMERE	104
6.1.	KORIŠTENA MJERNA OPREMA	105
6.1.1.	GeoSLAM ZEB-Horizon – ručni mjerni mobilni sustav	105
6.1.2.	GeoSLAM ZEB-Vision – tvornički integrirana kamera	106
6.1.3.	Insta360 X3 – korisnički integrirana kamera	108
6.2.	ISPITIVANJE OPTIMALNOG PRISTUPA KALIBRACIJSKOM SKENU ZA POTREBE	
	UMJERIVANJA KAMERE	109
6.2.1.	Lokacija izvođenja kalibracijskog skena.....	110
6.2.2.	Ispitivanje utjecaja duljine trajanja kalibracijskog skena.....	111
6.2.3.	Ispitivanje utjecaja broja i rasporeda orijentacijskih točaka	112
6.2.4.	Ispitivanje utjecaja preklopa između uzastopnih panoramskih snimaka	113
6.3.	ANALIZA TOČNOSTI I PRECIZNOSTI RELATIVNIH KALIBRACIJSKIH PARAMETARA...	115
6.4.	NEOVISNA TERENSKA VERIFIKACIJA TOČNOSTI UMJERIVANJA I VREMENSKE	
	SINKRONIZACIJE	116
6.4.1.	Lokacija terenskog ispitivanja.....	117
6.4.2.	Određivanje referentnih točaka geodetskom mjernom stanicom.....	118
6.4.3.	Provođenje testnih skenova.....	120
6.4.4.	Određivanje koordinata metodom monoskopskog kartiranja	124
7.	TEORIJSKA ANALIZA, REZULTATI I VERIFIKACIJA METODA	
	UMJERIVANJA I SINKRONIZACIJE	126
7.1.	TEORIJSKA ANALIZA MOGUĆNOSTI I OGRANIČENJA METODA.....	127
7.1.1.	Teorijska analiza točnosti predstavljene metode vremenske	
	sinkronizacije	127
7.1.2.	Teorijska analiza točnosti metode umjerivanja kamere	128
7.1.3.	Teorijska analiza točnosti monoskopskog kartiranja	130
7.2.	EKSPERIMENTALNE ANALIZE OPTIMALNOG KALIBRACIJSKOG SKENA.....	134
7.2.1.	Analiza utjecaja trajanja kalibracijskog skena	134
7.2.2.	Analiza utjecaj broja i rasporeda orijentacijskih točaka.....	136

7.2.3. Analiza utjecaja preklopa između panoramskih snimaka	138
7.3. EKSPERIMENTALNA ANALIZA PRECIZNOSTI I TOČNOSTI RELATIVNIH KALIBRACIJSKIH PARAMETARA	140
7.3.1. Ocjena točnosti i preciznosti umjerivanja ZEB-Vision kamere.....	141
7.3.2. Ocjena preciznosti umjerivanja Insta360 kamere	145
7.4. ANALIZA TOČNOSTI METODE UMJERIVANJA KAMERE PRIMJENOM MONOSKOPSKOG KARTIRANJA	147
7.4.1. Analiza rezultata monoskopskog kartiranja za ZEB-Vision kameru.....	149
7.4.2. Analiza rezultata monoskopskog kartiranja za Insta360 kameru.....	153
7.5. ANALIZA TOČNOSTI METODE VREMENSKE SINKRONIZACIJE PRIMJENOM MONOSKOPSKOG KARTIRANJA	157
7.5.1. Točnost vremenske sinkronizacije ZEB-Vision kamere.....	160
7.5.2. Točnost vremenske sinkronizacije Insta360 X3 kamere.....	163
8. ZAKLJUČAK	166
LITERATURA	171
MREŽNE ADRESE	185
PRILOZI	188
PRILOG 1: KOORDINATE TOČAKA MREŽE TVRTKE GEO-CENTAR.....	189
PRILOG 2: KOORDINATE REFERENTNIH TOČAKA ODREĐENIH NA PROČELJIMA ZGRADA MJERNOM STANICOM	190
PRILOG 3: KOORDINATE TOČAKA PROČELJA ODREĐENE MONOSKOPSKIM KARTIRANJEM PRIMJENOM ZEB-VISION KAMERE, KORIŠTENE U ANALIZI TOČNOSTI METODE UMJERIVANJA KAMERE.....	191
PRILOG 4: KOORDINATE TOČAKA PROČELJA ODREĐENE MONOSKOPSKIM KARTIRANJEM PRIMJENOM INSTA360 X3 KAMERE, KORIŠTENE U ANALIZI TOČNOSTI METODE UMJERIVANJA KAMERE.....	195
PRILOG 5: KOORDINATE TOČAKA PROČELJA ODREĐENE MONOSKOPSKIM KARTIRANJEM PRIMJENOM ZEB-VISION KAMERE, KORIŠTENE U ANALIZI TOČNOSTI METODE VREMENSKE SINKRONIZACIJE.....	199
PRILOG 6: TRAJEKTORIJA ZEB-VISION KAMERE ZA LINEARNI SEGMENT KORIŠTEN U ANALIZI TOČNOSTI METODE VREMENSKE SINKRONIZACIJE	205

PRILOG 7: KOORDINATE TOČAKA PROČELJA ODREĐENE MONOSKOPSKIM KARTIRANJEM PRIMJENOM INSTA360 X3 KAMERE, KORIŠTENE U ANALIZI TOČNOSTI METODE VREMENSKE SINKRONIZACIJE.....	207
PRILOG 8: TRAJEKTORIJA INSTA360 X3 KAMERE ZA LINEARNI SEGMENT KORIŠTEN U ANALIZI TOČNOSTI METODE VREMENSKE SINKRONIZACIJE	213

POPIS TABLICA

Tablica 3.1. Modeli 2D transformacija i njihove glavne karakteristike	36
Tablica 4.1. Pregled hardverskih metoda sinkronizacije senzora mobilnih mjernih sustava	53
Tablica 4.2. Pregled metoda softverske sinkronizacije senzora mobilnih mjernih sustava	54
Tablica 4.3. Prednosti i nedostaci postojećih metoda umjerivanja kamere.....	68
Tablica 5.1. Parametri koji utječu na pouzdanost SLAM algoritama i kvalitete prikupljenih fotografija.....	72
Tablica 5.2. Prikaz detekcije mikro-pomaka pomoću promjene u pikselnim koordinatama centra mjerne mete. Na prve četiri slike nema signifikantnih promjena u pikselnim koordinatama, dok na slici broj 5 nastupa mikro-pomak koji se očituje značajnom promjenom u koordinatama	87
Tablica 6.1. Trajanje i broj korištenih orijentacijskih točaka za svaki kalibracijski sken.	112
Tablica 6.2. Pregled šest scenarija preklopa između panoramskih snimaka korištenih za analizu utjecaja preklopa na određivanje relativnih kalibracijskih parametara	114
Tablica 6.3. Prikaz parametara kalibracijskih skenova korištenih za procjenu točnosti i preciznosti relativnih kalibracijskih parametara.....	115
Tablica 6.4. Prikaz parametara koji utječu na nesigurnost monoskopskog kartiranja i načini njihove kontrole	121
Tablica 6.5. Ocjena točnosti georeferenciranja testnih skenova, izražena pogreškama po koordinatnim osima za svaku referentnu točku.....	123
Tablica 7.1. Prikaz teoretskih vrijednosti svih parametara koji utječu na nesigurnost monoskopskog kartiranja za obje korištene kamere.....	132
Tablica 7.2. Nesigurnost monoskopskog kartiranja za obje korištene kamere na udaljenostima od 5 do 20 m, izračunata korištenjem parametara iz tablice 7.1.	133
Tablica 7.3. Tvorničke vrijednosti relativnih kalibracijskih parametara za ZEB-Vision kameru	135
Tablica 7.4. Relativni kalibracijski parametri i njihova ocjena točnosti dobiveni u testnim kalibracijskim skenovima	135
Tablica 7.5. Pogreške izračunatih relativnih kalibracijskih parametara u odnosu na referentne vrijednosti.....	135

Tablica 7.6. Prikaz izračunatih relativnih kalibracijskih parametara i pripadnih ocjena točnosti za svaki od definiranih scenarija rasporeda i broja orijentacijskih točaka. Scenariji sa nepovoljnim rasporedom točaka označeni su crvenom bojom.....	137
Tablica 7.7. Prikaz pogrešaka relativnih kalibracijskih parametara za svaki definirani scenarij.....	137
Tablica 7.8. Izračunati relativni kalibracijski parametri i pripadna ocjena točnosti za svaki korišteni scenarij preklopa između panorama.....	139
Tablica 7.9. Prikaz pogrešaka relativnih kalibracijskih parametara u odnosu na referentne vrijednosti, izračunate za svaki scenarij preklopa između panorama	139
Tablica 7.10. Relativni kalibracijski parametri izračunati u svrhu procjene točnosti i preciznosti umjerivanja ZEB-Vision kamere	142
Tablica 7.11. Statistička analiza točnosti umjerivanja ZEB-Vision kamere	142
Tablica 7.12. Statistička analiza preciznosti umjerivanja ZEB-Vision kamere	143
Tablica 7.13. Relativni kalibracijski parametri izračunati u svrhu procjene preciznosti umjerivanja Insta360 kamere.....	146
Tablica 7.14. Statistička analiza preciznosti umjerivanja Insta360 kamere	146
Tablica 7.15. Teoretska nesigurnost monoskopskog kartiranja na različitim udaljenostima, u slučaju snimanja fotografija u statičkom položaju.....	149
Tablica 7.16. Statistički pokazatelji točnosti monoskopskog kartiranja za ZEB-Vision kameru, izraženi za sve udaljenosti, kao i za dva zasebna razreda udaljenosti	150
Tablica 7.17. Empirijski izračun medijana pogrešaka na karakterističnim udaljenostima za ZEB-Vision kameru	151
Tablica 7.18. Ocjena ponovljivosti određivanja koordinata iste referentne točke za ZEB-Vision kameru.....	153
Tablica 7.19. Statistički pokazatelji točnosti monoskopskog kartiranja za Insta360 kameru, izraženi za sve udaljenosti, kao i za dva zasebna razreda udaljenosti	154
Tablica 7.20. Empirijski izračun medijana pogrešaka na karakterističnim udaljenostima za Insta360 kameru	155
Tablica 7.21. Ocjena ponovljivosti određivanja koordinata iste referentne točke za Insta360 kameru	156
Tablica 7.22. Statistički pokazatelji točnosti i preciznosti monoskopskih mjerenja za ZEB-Vision kameru.....	161

Tablica 7.23. Statistički pokazatelji točnosti i preciznosti monoskopskih mjerenja za Insta360 kameru	164
--	-----

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Primjeri različitih vrsta kamera: a) monokularne (URL 1), b) stereo (URL 2) i c) RGB-D (URL 3).....	11
Slika 2.2. Primjeri mehaničkog LiDAR senzora (a) i sustava čvrstog stanja (b) (URL 4).....	11
Slika 2.3. IMU senzor (URL 5)	12
Slika 2.4. Prikaz robota koji se kreće kroz prostor te određuje svoj položaj provodeći opažanja prema značajkama iz okoline (Durrant-Whyte i Bailey 2006).....	13
Slika 2.5. Analogija mreže opruga. Značajke su povezane oprugama koje opisuju korelacije između njih. Kako se robot kreće kroz okolinu, krutost (čvrstoća) opruga odnosno korelacije se povećavaju (crvene veze postaju deblje) (Durrant-Whyte i Bailey 2006).....	16
Slika 2.6. Prikaz načina rada EKF-SLAM algoritma. Kako se robot kreće kroz prostor (isprekidana linija) i opaža značajke (8 točaka), nesigurnost položaja robota i značajki raste (elipse pogrešaka). U trenutku kada robot ponovno opaža prvu značajku, nesigurnost njegovog položaja, kao i položaja značajki, se smanjuje (Stachniss i dr. 2016).....	18
Slika 2.7. Ilustracija grafa koji je temelj metoda grafičke optimizacije. Segment a) prikazuje opažanje prema prvoj značajki, segment b) kretanje robota od prvog do drugog položaja, a segment c) prikazuje kako graf izgleda nakon nekoliko promjena položaja robota (Stachniss i dr. 2016)	21
Slika 2.8. Podjela mjernih mobilnih sustava temeljenih na SLAM tehnologiji: a) MMS u formi ruksaka (URL 6), b) MMS u formi kolica (URL 7), c) ručni MMS (URL 8)	23
Slika 3.1. Prikaz različitih načina integracije kamere kod ručnih mjernih mobilnih sustava: a) sustav sa internim kamerama (URL 9), b) sustav sa eksternom kamerom (URL 8), c) sustav bez kamere (URL 10)	27
Slika 3.2. Arhitekture panoramskih sustava čiji je razvoj potpomognut novim optičkim tehnologijama (Gao i dr. 2022).....	28
Slika 3.3. Prikaz dviju kamera koje kreiraju panoramu na različite načine: a) kamera koja snima panoramu koristeći rotaciju oko svoje osi (URL 11), b) sustav više kamera koje istovremeno snimaju fotografije (URL 12)	31

Slika 3.4. Prikaz snimke snimljene sustavom ribljeg oka (a) te snimke snimljene sa panomorfnim sustavom (b) (Thibault i Artonne 2006)	32
Slika 3.5. Prikaz fotografije snimljene katadioptričkim sustavom (a) i fotografije snimljene korištenjem sustava temeljenog na panoramskim prstenastim lećama (b) (Yang i dr. 2021)	33
Slika 3.6. Puna panorama kreirana korištenjem monocentričnog sustava (a) (Olivas i dr. 2015) te fotografija snimljena hiper-hemisfernom lećom (b) (Gao i dr. 2022).....	34
Slika 3.7. Grafički prikaz centralne projekcije, uz predočenje odnosa između vidnog polja θ i žarišne duljine f te trodimenzionalnih i dvodimenzionalnih koordinata p i x (Szeliski, 2006).....	37
Slika 3.8. Grafički prikaz modela radijalne distorzije: jastučasta (lijevo) i bačvasta distorzija (desno) (URL 13).....	38
Slika 3.9. Ključne točke dobivene primjenom SIFT metode na paru fotografija (a), uklanjanje pogrešno detektiranih ključnih točaka primjenom RANSAC algoritma (b) i prikaz panorame konstruirane korištenjem ispravno detektiranim i povezanim zajedničkih značajki (c) (Brown i Lowe 2003)	42
Slika 3.10. Preslikavanje 3D točke u cilindrične (a), odnosno sferne koordinate (b) (Szeliski, 2006).....	46
Slika 3.11. Tehnika višerezolucijskog stapanja na primjeru spajanja fotografija naranče i jabuke (URL 14).....	47
Slika 4.1. Prikaz koordinatnih sustava senzora ručnog mjernog mobilnog sustava.....	49
Slika 4.2. Prikaz oblaka točaka (lijevo) i korespondentne panoramske fotografije (desno), uz intuitivan prikaz smjernog kuta kamere.....	56
Slika 4.3. Prednost fotografije (desno) u odnosu na laserski sken (lijevo) za potrebe razumijevanja snimljene scene. Fotografija omogućuje korisniku intuitivniji i prirodniji način pregleda objekata od interesa.....	56
Slika 4.4. Grafički prikaz metode monoskopskog kartiranja koja koristi orijentiranu fotografiju i DSM kako bi odredila koordinate točke definirane na fotografiji pomoću slikovnih koordinata (dos Santos i dr. 2010).....	57
Slika 4.5. Usporedba istog segmenta oblaka točaka prikazanog pomoću realne boje (lijevo) i pomoću intenziteta LiDAR senzora (desno).....	59

Slika 4.6. Mjerne mete s crno-bijelim uzorcima kakve se često koriste u svrhe umjerivanja. Razlika u izmjerenom intenzitetu između crnih i bijelih segmenata omogućuje automatsku detekciju središta mete (URL 15).....	63
Slika 4.7. Izdvajanje linije neba na fotografiji i laserskom skenu. Lijeva fotografija prikazuje originalnu sliku, srednja fotografija prikazuje binarnu sliku (crni pikseli predstavljaju objekte, a bijeli nebo), dok desna fotografija prikazuje laserski sken prikazan pomoću intenziteta (Hofmann i dr. 2014).	64
Slika 4.8. Registracija dvaju oblaka točaka primjenom ICP algoritma. Da bi povezivanje bilo uspješno, nužno je postojanje preklopa između dva oblaka točaka (URL 16).	65
Slika 4.9. Vizualizacija problema kalibracije ruka-oko. Cilj je pronaći transformaciju X (matrica sa relativnim kalibracijskim parametrima) korištenjem poznatih transformacija A_{ij} između različitih položaja (i, j) te B_{ij} između opaženih promjena u slikama (Zalović i dr. 2024).	65
Slika 4.10. Koeficijent korelacije intenziteta lasera i sivih tonova fotografije raste kako se približava ispravnom kalibracijskom parametru (u ovom slučaju kutu kalibracije nagiba – „pitch“) (Pandey i dr. 2014).....	67
Slika 5.1. Prikaz ploče za georeferenciranje (a) (URL 17), kao i njezine primjene za potrebe postavljanja na mjernu metu na vertikalnoj površini (b). Ploča se postavlja na način da centar otvora koincidira sa centrom mete	74
Slika 5.2. Segment panoramske slike dobivene razdvajanjem panoramskog videozapisa na zasebne sličice. Snimak prikazuje mjernu metu postavljenu u neposrednoj blizini ručnog mobilnog sustava, a koja se koristi kako bi se detektirao inicijalni mikro-pomak kamere	75
Slika 5.3. Oblak točaka (prikazan pomoću intenziteta) i trajektorija (crvena linija) mobilnog sustava nakon uspješne SLAM obrade.....	78
Slika 5.4. Prikaz fotografija prikupljenih pomoću kamere sa dvostrukom lećom tipa riblje oko. Fotografija a) prikupljena je prednjom, a fotografija b) stražnjom lećom. Fotografija c) predstavlja panoramu konstruiranu iz fotografija a) i b) .	79
Slika 5.5. Primjer tekstualnog zapisa trajektorije ručnog mjernog mobilnog sustava	81
Slika 5.6. Prikaz sučelja Python skripte za detekciju statičnih položaja u trajektoriji	82
Slika 5.7. Prikaz položajnih odnaka između referentne točke mobilnog sustava i referentne točke ploče za georeferenciranje	83
Slika 5.8. Prikaz rezultata automatizirane detekcije centra crno-bijele kružne mete	88

Slika 5.9. Prikaz grafova rotacija koji omogućuju vizualnu kontrolu detektiranog trenutka mikro-pomaka ručnog mobilnog ustava. Crvena vertikalna linija označava detektirani trenutak pomaka.	89
Slika 5.10. Prikaz sučelja Python skripte za izračun inicijalnih položaja i rotacija fotografija (sličica) snimljenih korisnički integriranom kamerom.....	91
Slika 5.11. Prikaz prostorne točke M koja se projicira na jediničnu sferu u točku m (a) te epipolarne geometrije za sferne panoramske fotografije (b) (Pagani i Stricker 2011)	93
Slika 5.12. Prikaz postavki modela kamere u Agisoft Metashape programu.....	95
Slika 5.13. Prikaz definicije lokalnog koordinatnog sustava kamere u Agisoft Metashape programu (URL 18).....	95
Slika 5.14. Prikaz maskirane panoramske fotografije	96
Slika 5.15. Rezultat fotogrametrijske obrade primjenom SfM algoritama – rijedak oblak točaka i orijentirane panoramske fotografije	98
Slika 5.16. Automatski detektirane mjerne mete, povezane sa korespondentnim koordinatama u Agisoft Metashape programu. Mete su označene tzv. markerima te prikazane zajedno sa veznim točkama	99
Slika 6.1 Komponente GeoSLAM ZEB-Horizon ručnog mjernog mobilnog sustava	106
Slika 6.2. GeoSLAM ZEB-Vision kamera prije (desno) i nakon postavljanja na GeoSLAM ZEB-Horizon mobilni sustav (lijevo) (URL 8).....	107
Slika 6.3. Prikaz nosača izrađenog za postavljanje Insta360 kamere na ZEB-Horizon....	108
Slika 6.4. Prikaz mikrolokacije izvođenja kalibracijskih skenova. Slika lijevo prikazuje područje na satelitskoj snimci (izvor: Google Earth), dok slika desno prikazuje isto područje snimljeno iz zraka	110
Slika 6.5. Prikaz područja obuhvata svakog od pet kalibracijskih skenova (izvor: Google Earth)	111
Slika 6.6. Ilustracija rasporeda orijentacijskih točaka za svaki od šest ispitanih scenarija. Siva pozadina predstavlja zid, dok tamniji pravokutnici prikazuju stupove zgrade. Crveni krugovi predstavljaju orijentacijske točke.....	113
Slika 6.7. Prikaz trajektorije kalibracijskog skena snimljenog za potrebe analize utjecaja preklopa između panoramskih snimaka na kvalitetu umjerivanja kamere (izvor: Google Earth).....	114
Slika 6.8. Prikaz područja provođenja neovisnog ispitivanja točnosti razvijenih metoda umjerivanja i sinkronizacije kamere. Na slici a) (izvor: Google Earth)	

prikazan je prostorni obuhvat testnog poligona, dok slika b) prikazuje panoramsku fotografiju testne staze i pripadajućih zgrada.	117
Slika 6.9. Topcon GT-703 mjerna stanica (URL 23)	118
Slika 6.10. Prikaz položaja dvaju stajališta instrumenta te točaka mreže tvrtke Geocentar korištene za orijentaciju mjerne stanice metodom kombiniranog presjeka	119
Slika 6.11. Prikaz referentnih točaka određenih mjernom stanicom na pročelju sjeverne (a) i južne zgrade (b).....	119
Slika 6.12. Slika a) prikazuje putanju testnih skenova (žuta linija), točke geodetske mreže korištene za georeferenciranje skenova te položaja stativa, dok slika b) prikazuje četiri smjera u koje je mjerni sustav sa kamerom orijentiran prilikom postavljanja na stativ (izvor: Google Earth)	124
Slika 6.13. Tlocrtni prikaz problema određivanja dubine pri monoskopskom kartiranju rubova prozorskih otvora. Slika a) prikazuje kako mala pogreška u smjeru zrake može rezultirati projekcijom točke na pogrešnu plohu unutar otvora. Slika b) vizualizira kako se definiranjem lokalne fasadne ravnine (zelena linija) projekcija točke ograničava na stvarnu plohu fasade, čime se uklanjaju pogreške dubine	125
Slika 7.1. Grafički prikazi teoretske nesigurnosti monoskopskog kartiranja za ZEB-Vision (a) i Insta360 (b) u odnosu na udaljenost od kamere	133
Slika 7.2. Točkasti prikaz relativnih kalibracijskih parametara translacije (a) i rotacije (b) s referentnim vrijednostima (puna linija) i aritmetičkim sredinama (iscrtkana linija).....	144
Slika 7.3. Prikaz sučelja Python skripte izrađene za analizu i usporedbu referentnih i monoskopskih koordinata.....	148
Slika 7.4. Graf empirijskog rasta pogreške monoskopskog kartiranja s udaljenošću (a) te isti graf uspoređen sa teoretskim modelom nesigurnosti monoskopskog kartiranja (b) za ZEB-Vision kameru	151
Slika 7.5. Grafički prikaz raspodjele 3D pogrešaka monoskopskog kartiranja po panoramama za ZEB-Vision kameru, nazvanima prema referentnim smjerovima – istok (I), jug (J), sjever (S) i zapad (Z)	152
Slika 7.6. Graf empirijskog rasta pogreške monoskopskog kartiranja s udaljenošću (a) te isti graf uspoređen sa teoretskim modelom nesigurnosti monoskopskog kartiranja (b) za Insta360 kameru	155

Slika 7.7. Grafički prikaz raspodjele 3D pogrešaka monoskopskog kartiranja po panoramama za Insta360 kameru, nazvanima prema referentnim smjerovima – istok (I), jug (J), sjever (S) i zapad (Z)	156
Slika 7.8. Grafičko sučelje Python skripte za procjenu točnosti vremenske sinkronizacije.....	159
Slika 7.9. Grafički prikaz iznosa pogrešaka u smjeru gibanja ZEB-Vision kamere kroz vrijeme (a) te raspodjele apsolutnih vrijednosti pogrešaka (b).....	162
Slika 7.10. Grafički prikaz iznosa pogrešaka u smjeru gibanja Insta360 kamere kroz vrijeme (a) te raspodjele apsolutnih vrijednosti pogrešaka (b).....	165

1. UVOD

Mobilni sustavi za kartiranje (*eng. MMS – Mobile Mapping System*) su mjerni sustavi koji integriraju više senzora kako bi omogućili prikupljanje velike količine podataka u pokretu ([Løvås 2017](#)). Senzori koji se najčešće integriraju su GNSS (*eng. Global Navigation Satellite Systems*) prijemnik visoke točnosti, inercijalna mjerna jedinica (*eng. IMU – Inertial Measurement Unit*) te jedan ili više LiDAR (*eng. Light Detection and Ranging*) senzora (laserskih skenera). Uz navedeno, vrlo se često dodaje jedna ili više kamera za potrebe generiranja panoramskih snimaka visoke rezolucije ([MacKenzie Ellum 2001](#)). Zahvaljujući integraciji velikog broja senzora, kao i preciznoj sinkronizaciji vremena te kalibraciji istih, omogućeno je prikupljanje georeferenciranih 3D oblaka točaka (skenova) i orijentiranih 2D panoramskih fotografija, bez potrebe da sustav bude stacionaran. Takav pristup kartiranju od izuzetnog je značaja jer je omogućio da se mobilni sustavi montiraju na pokretne platforme kao što su automobili ili letjelice te iskoriste za izuzetno brzo kartiranje gradova i infrastrukture na neinvazivan način ([El-Sheimy 2005](#)). Mobilni sustavi na automobilima nazivaju se zemaljskim mobilnim sustavima (*eng. Land-based MMS*), dok se sustavi na letjelicama nazivaju zračnim mobilnim sustavima za kartiranje (*eng. Air-based MMS*).

Unatoč izuzetnim mogućnostima takvih mobilnih sustava za kartiranje, ni zračni ni zemaljski sustavi nisu primjereni za izmjere šumskih područja, podzemnih objekata te uskih ili zatvorenih prostora. Razlog tomu leži u nemogućnosti ili nepraktičnosti direktnog pristupa navedenim objektima, što zbog ograničenja pokretnih platformi na koje su ti sustavi montirani, što zbog ograničene dostupnosti GNSS signala na navedenim lokacijama ([Chio i Hou 2021](#)). Upravo se iz navedenih razloga u posljednjih nekoliko godina sve više pažnje posvećuje razvoju ručnih mjernih mobilnih sustava ([Lauterbach i dr. 2015](#)). Ručni mobilni sustavi se koriste na način da ih operater nosi u ruci kroz prostor koji je predmet izmjere. Oni iz praktičnih razloga moraju biti što manji, lakši i mobilniji, što podrazumijeva određene kompromise u vidu integracije mjernih senzora. Konkretno, ručni sustavi najčešće ne integriraju GNSS prijemnik te koriste manje, lakše i ekonomičnije LiDAR, IMU i slikovne senzore. Takvi se kompromisi nastoje kompenzirati pomoću naprednih SLAM (*eng. Simultaneous Localization and Mapping*) algoritama koji omogućuju preciznu rekonstrukciju trajektorije mobilnog sustava korištenjem podataka laserskog skenera i IMU senzora, bez obzira na njihovu nešto nižu kvalitetu ([Bosse i dr. 2012](#)). Dodavanje SLAM algoritama mobilnim sustavima predstavlja bitan tehnološki iskorak u području mobilnog

kartiranja, budući da isti omogućuje realizaciju mjernih sustava koji su ekonomski prihvatljivi, lagani i izuzetno mobilni, te u konačni proizvode precizne i pouzdane izlazne podatke (Durrant-Whyte i Bailey 2006).

Kako bi se podaci ručnih mobilnih sustava mogli efikasno iskoristavati, nužno je da omoguće prikupljanje orijentiranih fotografija. Orijentirane fotografije su one koje imaju poznate parametre vanjske orijentacije, odnosno 3D koordinate (X, Y, Z) i 3D rotacije (Eulerovi kutovi ϕ , θ i ψ) izražene u koordinatnom sustavu kartiranja (*m-sustav*; *eng. mapping frame*) (Rau i dr. 2011). Takve fotografije su izuzetno važno vizualno sredstvo prilikom identifikacije i preciznog definiranja položaja određenih objekata koje bi bilo teško ili nepraktično očitati korištenjem isključivo oblaka točaka. Nadalje, orijentirane fotografije u kombinaciji sa oblakom točaka omogućuju definiranje 2D slikovnih koordinata točke na fotografiji koju je, zahvaljujući poznatim parametrima unutarnje i vanjske orijentacije, moguće projicirati izravno na oblak točaka, čime se direktno dobivaju 3D koordinate u *m-sustavu*. Navedeni se pristup naziva monoskopsko kartiranje (*eng. monoplottting*) (dos Santos i dr. 2010). Monoskopski pristup je izuzetno iskoristiv prilikom rada s 3D podacima jer omogućuje direktno definiranje 3D točaka koristeći fotografije umjesto oblaka točaka, što doprinosi bržem i pouzdanijem kreiranju proizvoda izmjere. Konačno, orijentirane fotografije omogućuju kolorizaciju, odnosno dodjeljivanje RGB (*eng. Red Green Blue*) vrijednosti prikupljenim 3D točkama, što je u mnogim aplikacijama važno radi dobivanja ispravnog dojma o realnom izgledu terena i objekata (Vechersky i dr. 2018).

Bitan preduvjet za dobivanje orijentiranih fotografija je uspješno umjerivanje (kalibracija – *eng. calibration*) kamere mobilnog sustava. Konkretno, u slučaju mobilnih sustava sa fiksno montiranim senzorima, umjerivanje podrazumijeva određivanje relativnih kalibracijskih parametara, odnosno položajnih i kutnih odnaka (*eng. offset*) između koordinatnog sustava kamere (*c-sustav*; *eng. camera frame*) i koordinatnog sustava navigacijske jedinice mobilnog sustava (*b-sustav*; *eng. body frame*) (Gopaul i dr. 2016). Uz umjerivanje kamere, neophodno je provesti i vremensku sinkronizaciju uspostavom standardnog vremenskog okvira, a s ciljem određivanja točnih trenutaka ekspozicije kamere (Rau i dr. 2011). Tvornički integrirane kamere u pravilu imaju realiziranu vremensku sinkronizaciju između senzora, dok u slučaju korištenja korisnički integriranih kamera, vremenska sinkronizacija može predstavljati značajan izazov.

Metode umjerivanja kamere kod ručnih mobilnih sustava još uvijek su nedovoljno istražene. Većina dosad istraženih i poznatih metoda prikladna je za zemaljske i zračne mobilne sustave. Unatoč tome, neke od tih metoda, ili njihova kombinacija, mogle bi se iskoristiti za potrebe određivanja kalibracijskih parametara kod ručnih mobilnih sustava. Prema dostupnoj literaturi, metode kalibracije kamere kod mobilnih sustava generalno se mogu podijeliti na metode bazirane na mjernim metama (*eng. target based*), metode bazirane na značajkama (*eng. feature based*), metode bazirane na 3D uklapanju (*eng. 3D alignment based*), metode bazirane na predikciji kretanja senzora (*eng. motion based*) i metode bazirane na ovisnosti (*eng. dependence based*) (Pentek i dr. 2020).

U slučaju ručnih mjernih mobilnih sustava sa fiksno montiranim panoramskim kamerama, umjerivanje kamere nužno je provoditi s vremena na vrijeme, budući da će prilikom učestalog korištenja doći do promjene relativnih kalibracijskih parametara (Gopaul i dr. 2016). Takva promjena može predstavljati značajan problem za određivanje točnog položaja i rotacija (parametara vanjske orijentacije) fotografije u prostoru (Rau i dr. 2011), što će rezultirati otežanom manipulacijom i iskorištavanjem prikupljenih podataka (Vechersky i dr. 2018). S obzirom na ograničenja postojećih metoda umjerivanja, razvidno je da postoji potreba za novom metodom koja je posebno prilagođena jedinstvenim zahtjevima ručnih mjernih mobilnih sustava za kartiranje. Novi pristup trebao bi biti jednostavan za implementaciju i čestu primjenu od strane krajnjeg korisnika, objektivan te uzimati u obzir specifične karakteristike ručnih mobilnih sustava.

1.1. Ciljevi i hipoteze istraživanja

Cilj ovog istraživanja je razviti novu metodu umjerivanja kamere prilagođene ručnim mjernim mobilnim sustavima za kartiranje. Predložena metoda kombinira principe metoda baziranih na mjernim metama i metoda predikcije kretanja senzora, te se temelji na trajektoriji ručnog mjernog mobilnog sustava i fotogrametrijskoj obradi panoramskih snimki uz primjenu SfM (*eng. Structure from Motion*) algoritama i sfernog modela kamere. Uz to, ispitat će se može li se predložena metoda iskoristiti za potrebe umjerivanja kamere koja nije tvornički integrirana na ručni mobilni sustav te nema poznate parametre unutarnje orijentacije, kao ni realiziranu vremensku sinkronizaciju navigacijskih senzora i kamere. Za potrebe umjerivanja takve kamere razvit će se prilagođena metoda sinkronizacije vremena koja ne zahtjeva vezu između kamere i ručnog mobilnog sustava.

Hipoteze istraživanja su:

1. Razvijena metoda može se iskoristiti za umjerivanje tvornički integrirane kamere ručnog mjernog mobilnog sustava.
2. Razvijena metoda može se iskoristiti za umjerivanje kamere koja nije tvornički integrirana na ručni mjerni mobilni sustav.

1.2. Metodologija istraživanja i očekivani znanstveni doprinosi

U svrhu realizacije istraživanja u okviru ovoga doktorskog rada koriste se podaci ručnog mjernog mobilnog sustava u kombinaciji sa dvije različite panoramske kamere. Obje panoramske kamere koriste sustav dvojne leće tipa riblje oko (*eng. fish-eye*) koje simultano prikupljaju ultra-širokokutne fotografije (vidno polje veće od 200°). Koristeći dvije širokokutne fotografije čija se vidna polja u određenom postotku preklapaju, moguće je konstruirati pravokutne 360° panoramske fotografije kakve se standardno koriste u kombinaciji sa 3D podacima mobilnih sustava za kartiranje. Prva korištena kamera je tvornički integrirana na ručni mobilni sustav te njezine leće imaju poznate parametre unutarnje orijentacije (žarišna duljina, koordinate glavne točke i koeficijenti distorzije). Uz to, vremenska sinkronizacija za navedenu kameru je tvornički realizirana. Druga panoramska kamera je kamera za potrošačko tržište (*eng. consumer-grade*) koja se primarno ne koristi u mjerne, već u fotografske svrhe. Leće takve kamere nemaju unaprijed određene parametre unutarnje orijentacije te vremenska sinkronizacija za takvu kameru nije unaprijed realizirana. Cilj korištenja dviju različitih kamera jest utvrditi je li predložena metoda umjerivanja iskoristiva neovisno o tome radi li se o tvornički integriranoj kameri sa poznatim parametrima unutarnje orijentacije i tvornički realiziranom vremenskom sinkronizacijom, ili o kameri koja nije tvornički integrirana te nema realiziranu vremensku sinkronizaciju. Važan dio ovog rada bit će upravo definiranja točnog vremena ekspozicije druge kamere u odnosu na vremenski okvir ručnog mobilnog sustava, bez uspostave ikakve veze (žične ili bežične) između senzora. Isto se namjerava postići registracijom početnog pomaka (trzaja) ručnog mobilnog sustava nakon procesa inicijalizacije, koristeći IMU mjerenja i pikselne koordinate centra mjerne mete detektirane na prikupljenim fotografijama.

Središnji dio istraživanja je razvoj optimalnog pristupa provođenju tzv. kalibracijskog skena. Kalibracijski sken podrazumijeva prikupljanje 3D skenova i 2D fotografija, čime su definirana tri različita koordinatna sustava: koordinatni sustav kartiranja (m-sustav),

koordinatni sustav navigacijske jedinice mobilnog sustava (b-sustav) i koordinatni sustav kamere (c-sustav). Kako bi se dobili 3D podaci sa orijentiranim panoramskim fotografijama u m-sustavu, nužno je uspostaviti vezu između c-sustava i b-sustava određivanjem relativnih kalibracijskih parametara: 3 parametra translacije (dx , dy i dz) i 3 parametra rotacije ($d\phi$, $d\theta$ i $d\psi$). Takve translacije i rotacije predstavljaju položajne i kutne odmake između c-sustava i b-sustava te omogućuju direktan izračun položaja i rotacija panoramskih fotografija u m-sustavu. Kako bi kalibracijski sken bio uspješan, potrebno je definirati testno područje koje mora zadovoljiti određene uvjete. S obzirom na to kako postoji stanovita sličnost u načinu na koji SLAM i fotogrametrijski SfM algoritmi funkcioniraju, testno područje mora sadržavati fiksne, čvrste te geometrijski i teksturo raznolike oblike i strukture. Nadalje, kako bi se osiguralo prikupljanje kvalitetnih fotografija koje je moguće iskoristiti u fotogrametrijske svrhe, nužno je dobro osvjetljenje, kao i dovoljno prostora za definiranje potrebnog preklopa između istih. Konačno, testno područje mora omogućiti jednostavno postavljanje mjernih meta na koje je moguće direktno postaviti ručnu jedinicu mobilnog sustava prilikom kalibracijskog skena.

Za potrebe izračuna relativnih kalibracijskih parametara, koristi se prilagođena metoda umjerivanja bazirana na mjernim metama i predikciji kretanja senzora. Ona uključuje fotogrametrijsku obradu panoramskih fotografija prikupljenih prilikom kalibracijskog skena uz primjenu SfM algoritama posebno prilagođenim panoramskim fotografijama konstruiranim iz ultra-širokokutnih (*fish-eye*) fotografija. Model kamere koji se pritom koristi je tzv. sferni model kamere. Inicijalni položaji i rotacije panoramskih fotografija definiraju se pomoću položaja i rotacija ručnog mobilnog sustava za dani vremenski trenutak ekspozicije dviju ultra-širokokutnih fotografija. Kako bi se izračunali položaji i rotacije fotografija u m-sustavu, ključan dio fotogrametrijske obrade jest uvođenje orijentacijskih točaka, odnosno koordinata mjernih meta. Njihove koordinate u m-sustavu moguće je odrediti direktnim postavljanjem ručne jedinice mobilnog sustava na iste u trajanju od nekoliko sekundi, uz primjenu algoritma za detekciju statičnih položaja u trajektoriji mobilnog sustava. Navedene je točke nužno označiti i na fotografijama, što je moguće automatizirati korištenjem meta sa poznatim uzorkom te prikladnih algoritama za prepoznavanje i detekciju istih. Odabirom identičnih točaka na skenu i na fotografijama osigurana je transformacija položaja i rotacija fotografija u koordinatni sustav kartiranja (m-sustav). Izlazni rezultat fotogrametrijske obrade su dva seta podataka: položaji i rotacije fotografija bez uračunatih položajnih i kutnih odmake, te položaji i rotacije fotografija sa

uračunatim odmacima. Provođenjem regularnog izjednačenje posrednih mjerenja uz primjenu metode najmanjih kvadrata, moguće je jednoznačno odrediti položajne i kutne odmake (relativne parametre kalibracije), kao i ocjenu točnosti istih.

Testiranje i validacija metode kalibracije panoramskih kamera razvijene u okviru ovoga doktorskog rada obavlja se na implementacijskoj razini, odnosno na razini konačnog proizvoda: izračunatih relativnih kalibracijskih parametara za obje korištene kamere. U tu svrhu, višestrukim umjeravanjem istih kamera ispituje se ponovljivost implementirane metodologije, s ciljem utvrđivanja rezultira li metoda umjeravanja jednakim ili približno jednakim rezultatima. Nadalje, validacija točnosti izračunatih relativnih kalibracijskih parametara za tvornički integriranu kameru provodi se usporedbom sa inicijalnim, tvornički izračunatim parametrima dobivenih od proizvođača. U konačnici, neovisno ispitivanje točnosti izračunatih relativnih parametara kalibracije za obje kamere provodi se empirijski pomoću prikupljenih laserskih skenova i panoramskih fotografija ručnog mobilnog sustava. Time se utvrđuje u kojoj mjeri se 3D koordinate definirane na orijentiranim panoramskim fotografijama (uz primjenu monoskopskog kartiranja) poklapaju sa ekvivalentnim koordinatama definiranim pomoću laserskog skena, te koji parametri i u kojoj mjeri utječu na točnost takvog kartiranja. Ovakav pristup omogućuje neovisnu ocjenu točnosti razvijene metode za umjeravanje kamera ručnih mobilnih sustava za kartiranje.

Očekivani znanstveni doprinosi ovoga znanstvenog istraživanja su:

1. Usavršavanje metode umjerivanja kamere posebno prilagođene ručnim mjernim mobilnim sustavima.
2. Razvoj metode koju je moguće primijeniti za umjerivanje kamere neovisno o vrsti integracije na ručni mjerni mobilni sustav.
3. Razvoj prilagođene metode sinkronizacije vremena za kameru koja nije tvornički integrirana na ručni mjerni mobilni sustav.

1.3. Struktura doktorskog rada

Doktorski rad strukturiran je u osam sadržajno povezanih osnovnih poglavlja. U nastavku se daje sažet pregled sadržaja pojedinog poglavlja doktorskog rada.

Poglavlje 1 donosi uvod u temu doktorskog rada te obrazlaže motivaciju za provedbu predmetnog znanstvenog istraživanja. U okviru poglavlja definirani su ciljevi i hipoteze

istraživanja, opisana je primijenjena metodologija te su navedeni očekivani znanstveni doprinosi rada.

Poglavlje 2 daje teorijski pregled SLAM algoritama i tehnologije s posebnim naglaskom na njihovu primjenu u mobilnim mjernim sustavima. Opisani su osnovni senzori koji se koriste u SLAM sustavima, matematička osnova rješavanja SLAM problema te najčešći algoritamski pristupi, uključujući metode temeljene na Kalmanovu filtru, filtru čestica i grafičkim optimizacijama.

Poglavlje 3 posvećeno je kamerama ručnih mjernih mobilnih sustava. U poglavlju se razmatraju panoramski slikovni sustavi, njihove optičke arhitekture i osnovni parametri, kao i postupci konstruiranja panoramskih fotografija. Poseban naglasak stavljen je na fotogrametrijske aspekte panoramskih snimaka, modele transformacija i distorzija te njihovu primjenu u mjerne svrhe.

Poglavlje 4 obrađuje problematiku umjerivanja kamere ručnih mjernih mobilnih sustava. Definirani su relevantni koordinatni sustavi i njihove međusobne relacije, razmotrena je problematika vremenske sinkronizacije senzora te su opisane mogućnosti primjene orijentiranih panoramskih fotografija za vizualizaciju, kolorizaciju oblaka točaka i monoskopsko kartiranje. Nadalje, dan je pregled postojećih metoda umjerivanja kamera mobilnih sustava uz isticanje njihovih ograničenja u kontekstu ručnih sustava.

Poglavlje 5 predstavlja razvoj nove metode umjerivanja kamere prilagođene ručnim mjernim mobilnim sustavima. Detaljno je opisan koncept kalibracijskog skena, obrada prikupljenih podataka te postupak izračuna relativnih kalibracijskih parametara. Poseban naglasak stavljen je na primjenu sfernog modela kamere, fotogrametrijsku obradu panoramskih snimaka te vremensku sinkronizaciju korisnički integrirane kamere.

Poglavlje 6 posvećeno je testiranju i praktičnoj primjeni razvijene metode umjerivanja kamere. Opisana je korištena mjerna oprema, provedeni eksperimenti usmjereni na ispitivanje optimalnog pristupa kalibracijskom skenu te analiza utjecaja pojedinih parametara na kvalitetu umjerivanja.

Poglavlje 7 donosi teorijsku i eksperimentalnu analizu točnosti i preciznosti razvijene metode umjerivanja i metode vremenske sinkronizacije. U poglavlju su prikazani rezultati

neovisne terenske verifikacije relativnih kalibracijskih parametara i vremenske sinkronizacije, kao i analiza točnosti monoskopskog kartiranja za obje korištene kamere.

Poglavlje 8 predstavlja zaključak doktorskog rada, u kojem se sintetiziraju rezultati provedenih istraživanja i raspravlja o postavljenim hipotezama.

2. SLAM ALGORITMI I TEHNOLOGIJA

Simultana lokalizacija i kartiranje (*eng. SLAM – Simultaneous Localization and Mapping*) predstavlja temeljnu metodu u suvremenoj robotici, osmišljenu za autonomno kreiranje karte okoline dok se istovremeno prati položaj mobilne platforme ([Jiang i dr. 2019](#)). Iako je pojam SLAM prvi put formaliziran 1986. godine, njegov razvoj je evoluirao kroz razne matematičke i algoritamske pristupe, uključujući primjene metode najmanjih kvadrata, proširenog Kalman filtra, filtra čestica te grafičkih metoda optimizacije ([Durrant-Whyte i Bailey 2006](#), [Cadena i dr. 2016](#)). Ova tehnologija omogućava sustavima opremljenim različitim senzorima, kao što su kamere, LiDAR i IMU senzori, da kontinuirano prikupljaju podatke iz okoline, istovremeno kompenzirajući pogreške nastale zbog šuma senzora i nelinearnosti mjerenja.

SLAM se razvija kao odgovor na izazove autonomne navigacije u okruženjima gdje tradicionalni GNSS sustavi ne mogu osigurati pouzdano pozicioniranje i navigaciju. Kombinacija različitih senzora omogućuje preciznu fuziju podataka, što rezultira robusnim modelima okoline koji se koriste za navigaciju i planiranje putanje. Povijesni razvoj SLAM-a bilježi prelazak s inicijalnih metoda temeljnih na odometrij prema sofisticiranim pristupima koji integriraju statističke filtre i optimizacijske tehnike ([Montemerlo i dr. 2002](#), [Agarwal i dr. 2013](#)). Različiti algoritamski pristupi pokazuju evoluciju sustava od jednostavnih lineariziranih modela do kompleksnih grafičkih struktura, gdje se značajke okoline koriste za umanjivanje kumulativnih pogrešaka ([Grisetti i dr. 2010](#), [Stachniss i dr. 2016](#)). Napredak u računalnim tehnologijama i dostupnost novih senzora značajno su unaprijedili sposobnost SLAM sustava da se prilagode zahtjevnim uvjetima terenskog rada. Unatoč brojnim izazovima, kao što su nelinearnost funkcija, šum u mjerenjima i računska složenost optimizacije, današnji SLAM sustavi predstavljaju pouzdano rješenje za autonomnu navigaciju i kartiranje.

2.1. Senzori za SLAM

Osnovu SLAM sustava čine različiti senzori koji prikupljaju podatke o prostoru, pružajući informacije potrebne za precizno određivanje položaja i rekonstruiranje okoline. Senzorska fuzija, odnosno kombinacija podataka iz više izvora, omogućuje nadopunjavanje pojedinačnih ograničenja svakog senzora te rezultira robusnijim i pouzdanijim sustavom. Senzori koji se najčešće koriste za SLAM potrebe su LiDAR, IMU i RGB kamere (vizualni

senzori), ali postoji potencijal za korištenje i drugih senzora, kao što su GNSS prijemnici, dubinske kamere, multispektralne kamere, magnetski senzori i termalni senzori. U istraživačkim radovima najveću zastupljenost i primjenu imaju LiDAR i vizualni senzori (Cadena i dr. 2016).

Uloga senzora je višestruka – oni pružaju kako geometrijske, tako i semantičke informacije, što je ključno za razumijevanje kompleksnosti okoline. Primjena SLAM-a obuhvaća širok spektar područja, od autonomnih vozila do robotskih sustava za unutarnju navigaciju, pri čemu je prilagodba senzora specifičnim uvjetima okoline od izuzetne važnosti. Precizan odabir i integracija senzora omogućuju umanjivanje pogrešaka prilikom mjerenja te poboljšavaju ukupnu učinkovitost sustava. Stoga je temeljito razumijevanje karakteristika pojedinih senzora ključno za razvoj naprednih SLAM rješenja (Jakopec i dr. 2023).

2.1.1. Vizualni senzori

Vizualni senzori, najčešće u obliku kamera, igraju ključnu ulogu u SLAM sustavima, zahvaljujući svojoj sposobnosti prikupljanja bogatih informacija o okolini. Oni omogućuju ne samo registraciju geometrijskih značajki, već i semantičku interpretaciju scene, što pomaže u prepoznavanju objekata i identifikaciji značajki (Debeunne i Vivet 2020). Kamere su pogodne zbog svoje kompaktnosti, male potrošnje energije i relativno niske cijene, što ih čini idealnima za primjenu na mobilnim platformama (Jakopec i dr. 2023). Uz primjenu monokularnih, stereo, i RGB-D (eng. *Red Green Blue – Depth*) kamera (slika 2.1), vizualni senzori pružaju podatke o boji, teksturi i, u određenoj mjeri, dubinskim informacijama. Međutim, performanse ovih senzora značajno ovise o uvjetima osvjetljenja, pa se u slabim ili izrazito jakim svjetlosnim uvjetima mogu pojaviti poteškoće u interpretaciji slike. Problemi poput zamućenja, niskog kontrasta ili refleksija također mogu utjecati na točnost prepoznavanja značajki. Napredne tehnike obrade slike i algoritmi za detekciju značajki kontinuirano se razvijaju kako bi se prevladali navedeni izazovi. Kombinacija različitih tipova kamera često se koristi za povećanje robusnosti sustava, omogućujući nadopunu informacija iz više izvora. Metode dubokog učenja (eng. *Deep Learning*) sve se češće primjenjuju u procesu ekstrakcije značajki, čime se dodatno poboljšava preciznost vizualnog SLAM-a. Kao rezultat, vizualni senzori ostaju jedan od najčešće korištenih izvora podataka u modernim SLAM sustavima (Wang i dr. 2019).



Slika 2.1. Primjeri različitih vrsta kamera: a) monokularne ([URL 1](#)), b) stereo ([URL 2](#)) i c) RGB-D ([URL 3](#))

2.1.2. LiDAR senzori

LiDAR senzori koriste lasersko zračenje za precizno mjerenje udaljenosti do objekata u okolini, čime omogućuju stvaranje vrlo detaljnih 3D modela prostora ([Jakopec i dr. 2023](#)). Ovi senzori pružaju izravne i precizne informacije o geometrijskim oblicima, što je posebno važno za točno kartiranje okoline ([Zaffar i dr. 2018](#)). Tehnologija LiDAR-a omogućuje prikupljanje velikog broja točaka (*oblak točaka*, eng. *point cloud*), čime se postiže visoka gustoća prikupljenih podataka. LiDAR senzori se općenito dijele na mehaničke sustave i na LiDAR čvrstog stanja (eng. *SSL - solid-state LiDAR*), pri čemu svaki tip ima svoje specifične prednosti i ograničenja ([slika 2.2](#)) ([Van Nam i Gon-Woo 2021](#)). Mehanički sustavi, koji koriste rotacijske mehanizme, omogućuju pokrivanje širokog vidnog polja, dok SSL nudi kompaktiji dizajn i nižu potrošnju energije.



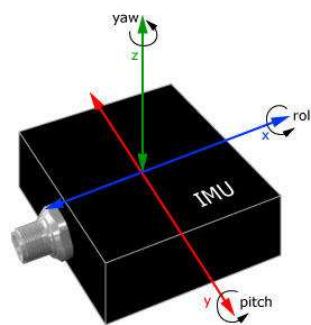
Slika 2.2. Primjeri mehaničkog LiDAR senzora (a) i sustava čvrstog stanja (b) ([URL 4](#))

Vrlo bitna karakteristika LiDAR sustava je visoka preciznost mjerenja (najčešće centimetarska), koja je neophodna za većinu praktičnih aplikacija. Unatoč svojoj preciznosti, na performansu LiDAR senzora mogu utjecati atmosferski uvjeti poput magle, kiše ili jakog sunca, što ponekad rezultira smanjenom pouzdanosti podataka. Napredak u algoritmima za obradu podataka pomaže u filtriranju šuma i korekciji mogućih grešaka. Integracija podataka iz LiDAR-a s podacima drugih senzora, kao što su kamere ili IMU, omogućuje komplementarnu obradu i poboljšava ukupnu učinkovitost SLAM sustava. Kao rezultat,

LiDAR senzori ostaju ključni element u sustavima koji zahtijevaju visoku preciznost i brzu obradu podataka (Xu i Zhang 2021, Xu i dr. 2022).

2.1.3. Inercijalna mjerna jedinica (IMU)

Inercijalne mjerne jedinice (IMU) su neizostavan dio mnogih SLAM sustava jer omogućuju kontinuirano praćenje kretanja platforme putem mjerenja ubrzanja i kutne brzine (slika 2.3). Ova vrsta senzora raspolaže isključivo informacijama o unutarnjem stanju mjernog sustava, bez direktnog doticaja s objektima u prostoru. To znači da se IMU senzori ne mogu koristiti za direktno kartiranje okoline, već isključivo kao navigacijski senzori (Jakopec i dr. 2023). Generalno se mogu podijeliti na IMU senzore sastavljene od akcelerometara i žiroskopa, te IMU senzore koji uz akcelerometre i žiroskope integriraju magnetometre, čime se osigurava sveobuhvatna informacija o dinamici i orijentaciji sustava (Ahmad i dr. 2013). Visoka frekvencija mjerenja IMU-a omogućuje praćenje brzih promjena u kretanju, što je ključno za stabilnost i preciznost navigacije. No, zbog inherentnog šuma i akumulacije pogrešaka tijekom vremena, IMU senzori su skloni tzv. *drift* efektu, što može degradirati točnost dugoročnog pozicioniranja (Ahmad i dr. 2013). Kako bi se izbjegli ovi problemi, podaci iz IMU-a često se kombiniraju s informacijama iz drugih senzora, poput vizualnih ili LiDAR senzora. Proces kalibracije i korekcije *drift* efekta ključno je područje istraživanja u modernim SLAM rješenjima. Napredak u tehnologiji senzora smanjuje razinu šuma i povećava stabilnost mjerenja, čime se poboljšava ukupna pouzdanost sustava. Dodatno, korištenje sofisticiranih algoritama za fuziju podataka omogućuje kompenzaciju pogrešaka u stvarnom vremenu. Sveobuhvatna upotreba IMU-a, zajedno s drugim senzorskim informacijama, rezultira pouzdanim SLAM sustavom sposoban za rad u zahtjevnim okruženjima.



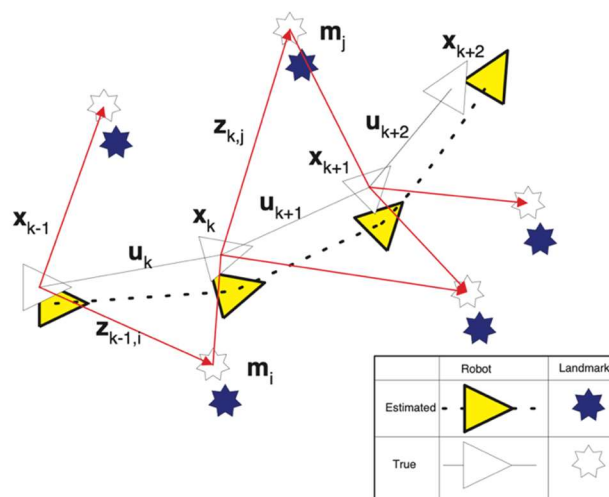
Slika 2.3. IMU senzor (URL 5)

2.2. Matematička osnova i rješavanje SLAM problema

SLAM predstavlja proces u kojem mobilni robot istovremeno konstruira kartu okoline te koristi tu kartu za određivanje vlastitog položaja i orijentacije. Pritom vrijedi pretpostavka da u okolini od interesa postoje geometrijske značajke čije položaje robot može odrediti koristeći mjerenja (opažanja) integriranih senzora (Torma i dr. 2010). U ovom pristupu, putanja kretanja robota i položaji ključnih značajki iz okoline procjenjuju se u stvarnom vremenu, bez potrebe za unaprijed definiranim informacijama o okolini.

Pretpostavimo da se robot kreće kroz nepoznat prostor te provodi mjerenja prema značajkama iz okoline koristeći integrirane senzore, kao što je prikazano na slici 2.4. Tada je u vremenskom trenutku k moguće definirati sljedeće veličine (Durrant-Whyte i Bailey 2006):

- x_k – vektor stanja koji opisuje položaj i rotaciju (trajektoriju) robota u prostoru
- u_k – relativni pomak (odometrija) robota između stanja u trenutku $k - 1$ i stanja u trenutku k
- m_i – vektor koji opisuje položaj i -te značajke čija se stvarna lokacija smatra vremenski nepromjenjiva
- z_k – opažanje (mjerenje) položaja i -te značajke u trenutku k



Slika 2.4. Prikaz robota koji se kreće kroz prostor te određuje svoj položaj provodeći opažanja prema značajkama iz okoline (Durrant-Whyte i Bailey 2006).

Uz to, nužno je definirati i sljedeće skupove:

- $X_{0:k} = \{x_0, x_1, \dots, x_k\} = \{X_{0:k-1}, x_k\}$: skup lokacija (stanja) robota
- $U_{0:k} = \{u_1, u_2, \dots, u_k\} = \{U_{0:k-1}, u_k\}$: skup relativnih pomaka robota
- $m = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$: skup svih značajki okoline
- $Z_{0:k} = \{z_1, z_2, \dots, z_k\} = \{Z_{0:k-1}, z_k\}$: skup svih mjerenja prema značajkama

U probabilističkoj formulaciji SLAM problema, cilj je rekurzivno aproksimirati zajedničku *a posteriori* distribuciju stanja robota i položaja značajki P (Durrant-Whyte i Bailey 2006):

$$P(x_k, m \mid Z_{0:k}, U_{0:k}, x_0) \quad (2.1)$$

Ova distribucija kvantificira nesigurnost procjene stanja robota (x_k) i značajki okoline (m), uzimajući u obzir sva prethodna opažanja $Z_{0:k}$ i relativne pomake $U_{0:k}$. Temeljni elementi ovog pristupa su model gibanja, za koji se pretpostavlja da slijedi Markovljev proces (Rabiner 1989), te model opažanja, pri čemu se opažanja smatraju uvjetno neovisnima s obzirom na definiranu kartu i trenutno stanje robota. Model gibanja, koji opisuje promjenu stanja robota, definiran je kao:

$$P(x_k \mid x_{k-1}, u_k), \quad (2.2)$$

dok model opažanja, koji opisuje vjerojatnost opažanja značajke pri danom stanju robota i položaju značajki, glasi:

$$P(z_k \mid x_k, m) \quad (2.3)$$

Rekurzivno rješenje SLAM problema dobiva se primjenom Bayesovog teorema (Durrant-Whyte i dr. 2003) u dva koraka. Prvo se provodi tzv. vremensko ažuriranje (*eng. time-update*):

$$\begin{aligned} & P(x_k, m \mid Z_{0:k-1}, U_{0:k}, x_0) \quad (2.4) \\ &= \int P(x_k \mid x_{k-1}, u_k) \times P(x_{k-1}, m \mid Z_{0:k-1}, U_{0:k-1}, x_0) dx_{k-1} \end{aligned}$$

Nakon vremenskog ažuriranja slijedi ažuriranje mjerenja (*eng. measurement update*):

$$P(x_k, m \mid Z_{0:k}, U_{0:k}, x_0) = \frac{P(z_k \mid x_k, m) P(x_k, m \mid Z_{0:k-1}, U_{0:k}, x_0)}{P(z_k \mid Z_{0:k-1}, U_{0:k})} \quad (2.5)$$

Ovim sekvencijalnim pristupom, sustav iterativno poboljšava preciznost procjene položaja značajki i robota, čime se postiže sve veća konzistentnost u generiranju karte okoline (Durrant-Whyte i Bailey 2006).

2.2.1. Struktura probabilističkog pristupa SLAM problemu

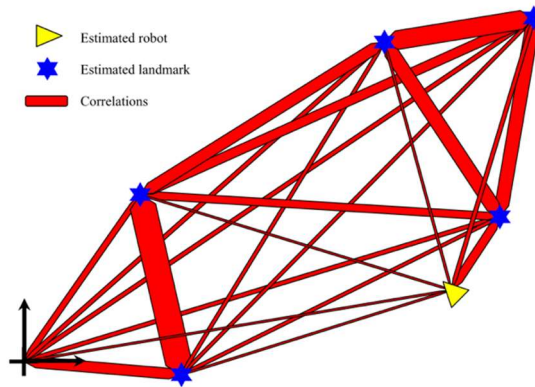
Struktura probabilističkog pristupa problemu simultane lokalizacije i kartiranja temelji se na zajedničkoj *a posteriori* distribuciji stanja robota i značajki, koja se može zapisati pomoću izraza:

$$P(x_k, m \mid z_k) \quad (2.6)$$

Ova distribucija ilustrira međusobnu ovisnost između položaja robota x_k i karte značajki m , pri čemu opažanja z_k izravno ovise o obje varijable. Budući da su opažanja funkcija obje komponente, nije moguće faktorizirati zajedničku distribuciju u obliku:

$$P(x_k, m \mid z_k) \neq P(x_k \mid z_k) P(m \mid z_k), \quad (2.7)$$

bez gubitka konzistentnosti u procjeni položaja značajki (Smith i Cheesman 1987). Pogreške u procjeni položaja značajki primarno proizlaze iz nesigurnosti u lokaciji robota prilikom prikupljanja opažanja, što rezultira visokim korelacijama među procjenama pojedinih značajki. Kao posljedica toga, relativni položaji između parova značajki, primjerice $m_i - m_j$, mogu se odrediti sa znatno većom preciznošću nego što to dopuštaju marginalne distribucije pojedinačnih značajki. Povećanjem broja opažanja dolazi do monotonog jačanja korelacija među procjenama, što rezultira postupnim "učvršćivanjem" zajedničke distribucije $P(m)$. Ovaj fenomen konceptualno se može usporediti s mrežom opruga, gdje svako novo opažanje učvršćuje veze između značajki, čime se poboljšava preciznost relativnih odnosa na kreiranoj karti (slika 2.5). Integrirani pristup kartiranju i lokalizaciji omogućuje sustavu kumulativno smanjenje nesigurnosti, što rezultira kartom s visokom razinom konzistentnosti. U teorijskom smislu, kontinuirana akumulacija opažanja koja se mogu smatrati "gotovo neovisnima" dovodi do toga da se preciznost međusobnih odnosa među značajkama postupno „učvršćuje“, čime se postiže stanje u kojem je točnost lokalizacije robota ograničena isključivo kvalitetom senzorskih mjerenja (Durrant-Whyte i Bailey 2006).



Slika 2.5. Analogija mreže opruga. Značajke su povezane oprugama koje opisuju korelacije između njih. Kako se robot kreće kroz okolinu, krutost (čvrstoća) opruga odnosno korelacije se povećavaju (crvene veze postaju deblje) (Durrant-Whyte i Bailey 2006).

Rješavanje probabilističkog problema simultane lokalizacije i kartiranja zahtijeva pronalaženje prikladnih reprezentacija modela opažanja (formula 2.2) i modela gibanja (izraz 2.3) koji omogućavaju učinkovitu i konzistentnu računsku obradu *a priori* i *a posteriori* distribucija (izraz 2.4 i 2.5) (Durrant-Whyte i Bailey 2006). U te su svrhe definirane tri glavne SLAM paradigme, na kojima se temelje svi ostali pristupi rješavanju SLAM problema (Stachniss i dr. 2016):

- SLAM utemeljen na proširenom Kalman filtru (eng. *Extended Kalman Filter SLAM – EKF SLAM*)
- SLAM utemeljen na filtru čestica (eng. *Particle Filter based SLAM – PF SLAM*)
- SLAM utemeljen na grafu (eng. *Graph-Based Optimization SLAM*)

Prvi pristup, poznat kao EKF SLAM, povijesno je najranije rješenje u robotici, no njegova upotreba sve je rjeđa zbog ograničenih računskih karakteristika i problema kod detekcije podudarnosti značajki. PF SLAM koristi neparametarske statističke tehnike filtriranja, poznate kao filtri čestica, te se pokazao kao popularan pristup, budući da pruža drugačiji pogled na rješavanje problema podudarnosti značajki. SLAM utemeljen na grafu bazira se na grafičkim reprezentacijama i uspješno primjenjuje nelinearne optimizacijske metode u rješavanju SLAM problema. Zahvaljujući dostupnosti visokoučinkovitih metoda kao što su prepoznavanja i zatvaranje petlji, ova je metoda najučestalija i danas je temelj za gotovo sve novitete vezane uz SLAM (Jakopec i dr. 2023).

2.2.2. SLAM utemeljen na proširenom Kalman filtru

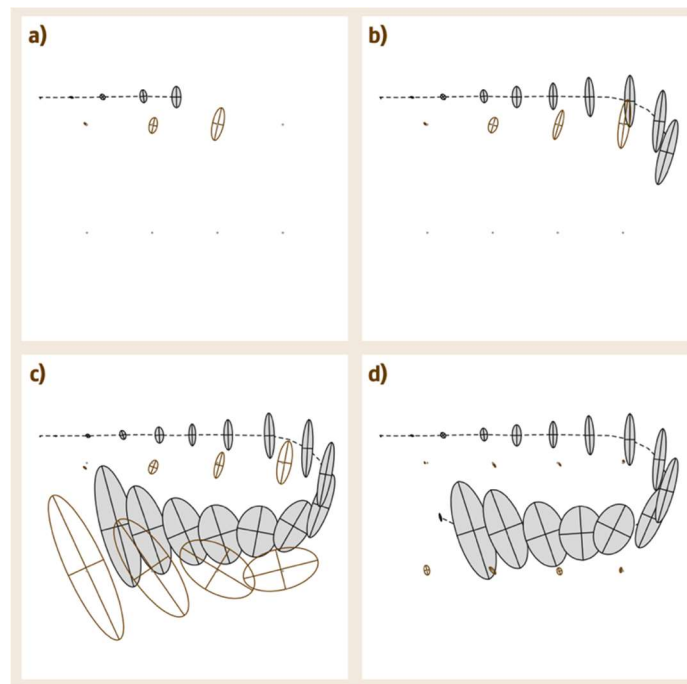
Prošireni Kalman Filter (EKF) predstavlja jedan od najranijih i najutjecajnijih pristupa rješavanju SLAM problema. Ova metoda inicijalno je predstavljena kao način procjene položaja robota i karakterističnih značajki u okolini unutar jedinstvenog stanja koje opisuje i položaj robota i lokacije značajki (Smith i dr. 1987, Smith i dr. 1990). Temelji se na linearizaciji nelinearnih funkcija gibanja i opažanja kroz razvoj u Taylorov red, što omogućava primjenu standardnog Kalmanovog filtra na nelinearne sustave. Pri tome, EKF pretpostavlja Gaussovu razdiobu, što znači da je *a posteriori* distribuciju stanja robota i položaja značajki moguće definirati izrazom:

$$P(x_k, m \mid Z_k, U_k) = \mathcal{N}(\mu_k, \Sigma_k), \quad (2.8)$$

gdje $\mathcal{N}$ označava normalnu razdiobu, vektor μ_k sadrži najbolje procjene (srednju vrijednost) položaja (stanja) robota, kao i procjene lokacija značajki u trenutku k , dok je Σ_k matrica kovarijanci koja predstavlja procijenjenu nesigurnost položaja robota i opaženih značajki (Stachniss i dr. 2016). Kako se robot kreće kroz prostor, EKF SLAM algoritam kontinuirano ažurira vektor stanja te matricu kovarijanci na temelju opažanja značajki.

Način rada EKF-SLAM algoritma zorno je prikazan na slici 2.6. Robot započinje navigaciju kroz prostor, koristeći inicijalni položaj kao ishodište koordinatnog sustava. Kako se kreće, nesigurnost njegovog stanja (trajektorije) se postepeno povećava, što je na slici prikazano pomoću elipsi pogrešaka. Isto tako, robot opaža prostorne značajke te ih kartira uz određenu nesigurnost, koja sadrži pogrešku mjerenja te pogrešku određivanja vlastitog položaja. Uzročno-posljedično, nesigurnost položaja značajki se povećava s vremenom. Kada robot ponovno opaža prvu značajku (onu koju je vidio na početku putanje), dolazi do naglog smanjenja nesigurnosti položaja robota i položaja značajki, kao što je vidljivo na slici 2.6.d. Ovaj fenomen proizlazi iz korelacija koje su izražene unutar matrice kovarijanci Gaussove *a posteriori* distribucije. Budući da je većina nesigurnosti u procjenama položaja ranije opaženih značajki posljedica nesigurnosti u procjenama položaja samog robota, te kako se ta nesigurnost zadržava tijekom vremena, procjene položaja tih značajki međusobno su korelirane (Stachniss i dr. 2016). Kada robot stekne nove informacije o svom položaju, te se informacije propagiraju kroz kartu okoline do prethodno opaženih značajki. Upravo je taj učinak vjerojatno najvažnija karakteristika *a posteriori* distribucije u okviru SLAM-a

(Dissanayake i dr. 2001). Informacija koja doprinosi boljoj lokalizaciji robota širi se kroz kartu te posljedično poboljšava lokalizaciju ostalih značajki unutar nje.



Slika 2.6. Prikaz načina rada EKF-SLAM algoritma. Kako se robot kreće kroz prostor (isprekidana linija) i opaža značajke (8 točaka), nesigurnost položaja robota i značajki raste (elipse pogrešaka). U trenutku kada robot ponovno opaža prvu značajku, nesigurnost njegovog položaja, kao i položaja značajki, se smanjuje (Stachniss i dr. 2016)

Jedan od najvećih nedostataka EKF pristupa je skalabilnost. Kako broj značajki raste, zahtjevi za računalnim resursima brzo postaju prepreka praktičnoj primjeni. Radi ublažavanja ovih problema, razvijene su različite varijante poput podjele na podmape (eng. *submap decomposition*) (Guivant i Nebot 2001, Leonard i Feder 1999) te primjene proširenog filtera informacija (eng. *Extended Information Filter*) (Thrun i dr. 2002, Walter i dr. 2007). Uz ograničenja vezana uz skalabilnost, EKF se suočava s poteškoćama u slučaju nepoznatih podudarnosti između opaženih značajki (eng. *data association problem*). Podudarnost značajki podrazumijeva da algoritam može uspješno odrediti „identitet“ opažane značajke, odnosno da može povezati kojoj značajki sa karte odgovara trenutno opažana značajka. Da bi se smanjila mogućnost pogrešaka, obično se koriste različite strategije, kao što su grupiranje značajki prema vidljivim karakteristikama ili održavanjem preliminarne liste značajki koje se dodaju u kartu okoline tek nakon određenog broja opažanja (Bailey 2002).

Unatoč izazovima, EKF i njegove varijante uspješno su primijenjene na širok spektar praktičnih situacija uključujući podvodne, zračne i kopnene sustave (Stachniss i dr. 2016). Ipak, zbog svojih ograničenja, EKF danas često ustupa mjesto naprednijim metodama poput grafičkih tehnika optimizacije (SLAM utemeljen na grafu) ili pristupima zasnovanim na filtru čestica. Iako grafičke metode nude veću skalabilnost i bolju preciznost kod velikih i složenih okruženja, EKF ostaje važan zbog svoje intuitivne formulacije i povijesnog značaja u razvoju metoda za simultanu lokalizaciju i kartiranje.

2.2.3. SLAM utemeljen na filtru čestica

Metode temeljene na filtru čestica predstavljaju neparametarski pristup u kojem se *a posteriori* distribucija stanja robota aproksimira skupom ponderiranih čestica, pri čemu svaka čestica predstavlja hipotezu o putanji robota te pripadajuću procjenu karte okoline. U klasičnom pristupu metoda temeljenih na filtru čestica, dimenzionalnost zajedničkog prostora putanje i karte je vrlo visoka. Kako se broj značajki povećava, klasičan pristup brzo postaje računalno neodrživ (Stachniss i dr. 2016). Odgovor na taj problem predstavljen je u formi algoritma pod nazivom FastSLAM (Montemerlo i dr. 2002), koji je temelji na primjeni Rao-Blackwellisation filtera (Doucet i dr. 2000). Ova tehnika iskorištava činjenicu da, pod uvjetom da je putanja robota poznata, procjene položaja značajki postaju međusobno uvjetno neovisne i mogu se modelirati kao niz niže-dimenzionalnih Gaussovih distribucija. Stoga se *a posteriori* distribucija može razložiti kao (Montemerlo i dr. 2002):

$$P(x_k, m \mid z_{1:k}, u_{1:k}) = P(x_{1:k} \mid z_{1:k}, u_{1:k}) \prod_n P(m_n \mid x_{1:k}, z_{1:k}), \quad (2.9)$$

gdje m_n predstavlja položaj n -te značajke. U okviru FastSLAM algoritma, svaka čestica sadrži uzorak putanje $x_k^{[t]}$ te skup lokalnih procjena za značajke, modeliranih Gaussovima distribucijama s parametrima srednje vrijednosti $\mu_{k,n}^{[t]}$ i kovarijacijom $\Sigma_{k,n}^{[t]}$. Proces ažuriranja započinje prediktivnim korakom, gdje se nova pozicija čestice uzorkuje iz modela gibanja prema izrazu:

$$x_k^{[t]} \sim P(x_k \mid x_{k-1}^{[t]}, u_k), \quad (2.10)$$

pri čemu u_k predstavlja odometrijske podatke (relativne pomake), s time da je u obzir uzeta i slučajna varijabilnost koja odražava nesigurnost u kretanju robota. Nakon toga se primjenjuje korak ažuriranja u kojem se nove senzorske informacije (opažanja) integriraju u

postojeće procjene stanja, čime se prilagođavaju vjerojatnosti pojedinačnih čestica te se svakoj od njih dodjeljuje težina (*eng. weight*) izražena kao (Stachniss i dr. 2016):

$$\omega_k^{[t]} = \mathcal{N}(z_{k,n} \mid x_k^{[t]}, \mu_{k,n}^{[t]}, \Sigma_{k,n}^{[t]}) \quad (2.11)$$

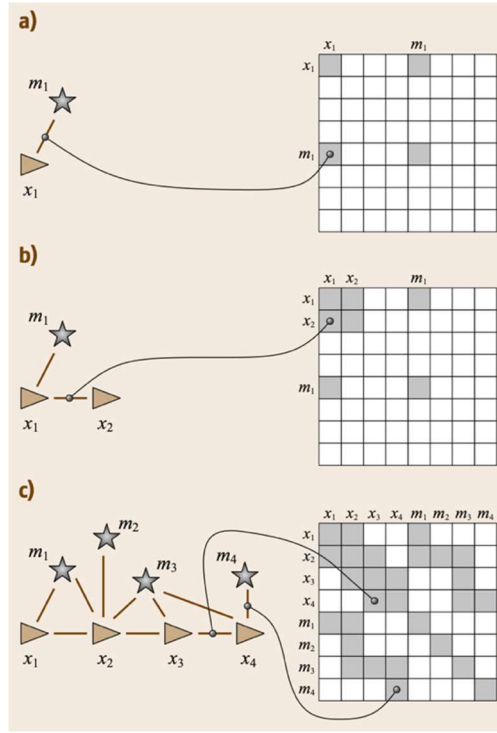
Izraz FastSLAM potječe upravo iz ideje dekompozicije problema – umjesto da se direktno aproksimira cijeli zajednički prostor, uzorkuje se samo putanja robota, dok se procjene značajki, koje su uvjetno nezavisne, računaju analitički u obliku niza niže-dimenzionalnih Gaussovih distribucija. Time se postiže značajno smanjenje računalne složenosti, budući da se glavni problem visoke dimenzionalnosti svodi na niz ažuriranja koja se mogu provoditi paralelno i efikasno. Nadalje, poboljšani pristupi FastSLAM-a koriste modificirane prijedlog-distribucije (*eng. proposal distribution*), gdje se nova pozicija čestice uzorkuje iz integrirane distribucije koja uzima u obzir i odometrijske podatke i senzorska mjerenja, što rezultira preciznijim uzorkovanjem i smanjenjem potrebnog broja čestica (Montemerlo i dr. 2002).

Prednosti metoda temeljenih na filtru čestica, a time i FastSLAM-a, uključuju sposobnost modeliranja multi modalnih distribucija, što omogućava održavanje više istovremenih hipoteza o putanji robota te fleksibilno rješavanje problema podudarnosti (asocijacije) senzorskih podataka. S druge strane, glavni nedostaci leže u eksponencijalnom porastu broja potrebnih čestica s povećanjem dimenzionalnosti problema te u riziku od gubitka raznolikosti skupa čestica (*eng. particle depletion*) uslijed čestih operacija uzorkovanja. Unatoč tim izazovima, FastSLAM predstavlja važan okvir za aproksimaciju kompleksnih distribucija u realnom vremenu, uspješno balansirajući između preciznosti i računalne efikasnosti kroz inteligentnu dekompoziciju problema i korištenje analitičkih ažuriranja za procjenu značajki (Montemerlo i dr. 2002, Stachniss i dr. 2016).

2.2.4. SLAM utemeljen na grafu

Metode optimizacije temeljene na grafu (grafičke metode) predstavljaju metodološki pristup u kojem se problem simultane lokalizacije i kartiranja formulira kao nelinearni optimizacijski problem definiran preko rijetkog grafa čvorova, gdje čvorovi predstavljaju položaje robota i značajke okoline, dok rubovi predstavljaju mjerenja proizašla iz odometrije i senzorskih opažanja (slika 2.7) (Stachniss i dr. 2016). U ovom pristupu, svaki par uzastopnih položaja x_{k-1} i x_k povezan je rubom koji kodira informacije iz odometrijskih podataka, dok se rubovi između položaja robota i značajki m_i dodaju prilikom senzorskog

opažanja, stvarajući time skup ograničenja koja se mogu kvadratno modelirati pomoću funkcija kretanja $g(\cdot)$ i funkcija mjerenja $h(\cdot)$.



Slika 2.7. Ilustracija grafa koji je temelj metoda grafičke optimizacije. Segment a) prikazuje opažanje prema prvoj značajki, segment b) kretanje robota od prvog do drugog položaja, a segment c) prikazuje kako graf izgleda nakon nekoliko promjena položaja robota (Stachniss i dr. 2016)

Matematički se problem formulira pronalaženjem konfiguracije grafa koja maksimizira logaritamsku vjerojatnost *a posteriori* distribucije, odnosno rješenja koje zadovoljava (Stachniss i dr. 2016):

$$(X_K^*, m^*) = \underset{X_K, m}{\operatorname{argmax}} \log P(X_K, m | Z_K, U_K), \quad (2.12)$$

pri čemu X_K^* i m^* označavaju optimalno ili najvjerojatnije rješenje SLAM problema, dok K predstavlja ukupno trajanje kretanja robota. Pod Gausovim pretpostavkama, logaritam distribucije P se može zapisati kao zbroj kvadratnih oblika:

$$\log P(X_K, m | Z_K, U_K) = \text{const} + \sum_k [x_k - g(x_{k-1}, u_k)]^T R_k^{-1} [x_k - g(x_{k-1}, u_k)] + \sum_k [z_k - h(x_k, m)]^T Q_k^{-1} [z_k - h(x_k, m)], \quad (2.13)$$

gdje R i Q predstavljaju matrice kovarijanci koje opisuju nesigurnost u funkcijama kretanja $g(\cdot)$ i mjerenja $h(\cdot)$. Ovakav pristup rezultira optimizacijskim problemom nad rijetkim

sustavom jednadžbi čije se rješenje može postići pomoću direktnih metoda poput metode Cholesky (Touchette i dr. 2016) ili QR dekompozicije (Dellaert i dr. 2005), ali i iterativnih metoda kao što su gradijentni spust (*eng. gradient descent*) (Moulay i dr. 2019) ili konjugirani gradijent (*eng. conjugate gradient*) (Dellaert i dr. 2010).

Prednosti ovog pristupa ogleda se u njegovoj visokoj skalabilnosti, budući da količina potrebne memorije raste linearno s brojem čvorova, za razliku od EKF metoda koje zahtijevaju kvadratno zauzeće memorije zbog gustih matrica kovarijanci. Također, mogućnost ponovne linearizacije tijekom optimizacije omogućuje preciznija rješenja, a fleksibilnost integracije različitih tipova mjerenja doprinosi robusnosti sustava u dinamičkim uvjetima. Grafički pristup, uz primjenu suvremenih algoritama za rijetku optimizaciju (*eng. sparse optimization*), omogućuje i uštede u računalnim resursima, što je ključno za primjene u realnom vremenu. Nadalje, razvoj inkrementalnih i hibridnih metoda, koje kombiniraju lokalno filtriranje s globalnom optimizacijom, dodatno poboljšava učinkovitost sustava, omogućavajući kontinuirano ažuriranje modela tijekom dugotrajne navigacije (Stachniss i dr. 2016).

Unatoč značajnim prednostima, grafičke optimizacijske tehnike imaju i svoje nedostatke. Optimizacijski postupak može biti računalno zahtjevan, osobito u velikim grafovima s brojnim petljama, a pronalaženje optimalnih veza kod problema asocijacije podataka formalno je težak, što može dovesti do nekonzistentnih karata u slučaju pogrešnih asocijacija. Osjetljivost na inicijalizaciju također je značajan faktor, budući da loše početne procjene mogu otežati konvergenciju optimizacijskog algoritma (Carlone i dr. 2011, Grisetti i dr. 2012). Unatoč tim izazovima, grafičke optimizacijske tehnike iznimno su iskoristive za izradu preciznih karata primjenom SLAM pristupa, a njihova sposobnost da se prilagode raznim vrstama mjerenja čini ih ključnim u suvremenim sustavima simultane lokalizacije i kartiranja. Ovaj pristup ne samo da omogućuje matematički elegantno modeliranje složenih odnosa između promatranih podataka, već i pruža praktična rješenja koja se mogu skalirati i prilagoditi potrebama autonomne navigacije u stvarnom svijetu, čime postaje temeljna paradigma u modernoj robotici.

2.3. Mobilni mjerni sustavi temeljeni na SLAM tehnologiji

Mobilni mjerni sustavi (MMS) temeljeni na SLAM tehnologiji predstavljaju inovativan pristup prikupljanju preciznih 3D podataka u realnom vremenu, osobito u okruženjima gdje

je dostupnost GNSS signala ograničena. Razvoj naprednih algoritama i miniaturizacija senzora omogućili su implementaciju sustava koji kombiniraju LiDAR, kamere, IMU te, gdje je primjenjivo, GNSS, čime se postiže visoka točnost pozicioniranja i izrada digitalnih modela okoline. Ova tehnologija omogućuje kontinuirano praćenje kretanja uređaja i simultanu rekonstrukciju geometrije prostora, čime se umanjuje akumulacija pogrešaka i omogućuje brza prilagodba promjenjivim uvjetima na terenu ([Elhashash i dr. 2022](#)).

Povijesno gledano, razvoj MMS-a potaknut je sve većom potrebom za točnim i ažurnim geoprostornim podacima u raznim područjima primjene – od urbanog planiranja i građevinske inspekcije, do očuvanja kulturne baštine i autonomnih sustava vožnje. Napredak u tehnologiji senzora omogućio je njihovu veću dostupnost, čime su značajno smanjeni operativni troškovi, a sami mobilni sustavi postali su fleksibilniji i primjenjiviji. Primjena MMS-a temeljenih na SLAM tehnologiji značajno je proširila mogućnosti terenskog snimanja u urbanim, unutarnjim i prirodnim okruženjima, koja su oduvijek predstavljala izazov u pogledu prikupljanja preciznih podataka. Razvoj SLAM algoritama omogućio je realizacije novih vrsta mjernih mobilnih sustava, koji se značajno razlikuju od tradicionalnih sustava kakvi se montiraju na pokretne platforme kao što su automobil ili letjelica. Upravo su SLAM algoritmi pripomogli značajnom smanjenju veličine i težine MMS-ova, čime je po prvi puta omogućeno da se, umjesto montiranja na uobičajene pokretne platforme, kroz područje izmjere MMS pokreće pomoću kolica ili prenosi u ruci ili na leđima ([Nocerino i dr. 2017](#), [Maset i dr. 2021](#)). Različite realizacije mobilnih sustava temeljenih na SLAM algoritmima prikazane su na slici 2.8.



Slika 2.8. Podjela mjernih mobilnih sustava temeljenih na SLAM tehnologiji: a) MMS u formi ruksaka ([URL 6](#)), b) MMS u formi kolica ([URL 7](#)), c) ručni MMS ([URL 8](#))

2.3.1. Mobilni mjerni sustavi u formi ruksaka

Mobilni mjerni sustavi u formi ruksaka (*eng. Backpack Mobile Mapping System*) sustavi dizajnirani su za nošenje na leđima te integriraju više senzora poput LiDAR-a, IMU-a i, u nekim slučajevima, GNSS prijemnika, čime omogućuju visoku preciznost pozicioniranja u složenim okruženjima ([slika 2.8.a](#)). Ovi sustavi primjenjuju napredne SLAM algoritme kako bi kontinuirano rekonstruirali 3D model okoline tijekom kretanja, unatoč privremenom gubitku GNSS signala. Integracija različitih senzora u jedinstvenu platformu omogućuje robusnu fuziju podataka, što rezultira smanjenjem grešaka i povećanom pouzdanosti rezultata, čak i prilikom dugačkih skenova. Zahvaljujući svojoj prenosivosti, takvi sustavi su posebno primjenjivi u urbanim sredinama, zatvorenim prostorima i područjima s ograničenom dostupnošću satelitskih signala. Sustavi ove vrste omogućuju brzo snimanje velikih površina uz relativno nisku razinu operativnih zahtjeva. Njihova konstrukcija osigurava optimalnu raspodjelu težine, što je ključno za dugotrajne terenske operacije. Unatoč činjenici da sustavi u formi ruksaka nude visoku mobilnost i točnost, izazovi u ergonomiji, kao i održavanje stabilnosti kalibracije senzora ostaju predmetom istraživanja. Rezultati aktualnih istraživanja pokazuju da sustavi u formi ruksaka mogu postići centimetarsku točnost, što je usporedivo s klasičnim geodetskim metodama terenskog snimanja ([Nocerino i dr. 2017](#)).

2.3.2. Mobilni mjerni sustavi u formi kolica

Mobilni mjerni sustavi u formi kolica (*eng. Trolley-based Mobile Mapping System*) osmišljeni su za primjenu u unutarnjim okruženjima, pri čemu se kolica koriste radi povećanja stabilnosti tijekom snimanja ([slika 2.8.b](#)). Integriraju slične senzorske komponente kao i sustavi u formi ruksaka (s izuzetkom GNSS-a te dodatkom odometra u nekim realizacijama), no njihova fiksna montaža omogućava značajno smanjenje vibracija tijekom kretanja. Zbog svoje konstrukcije, takvi sustavi omogućuju kontinuirano i kontrolirano kretanje kroz prostrane unutarnje prostore poput trgovačkih centara, muzeja ili bolnica. Njihova stabilnost pridonosi visokoj razlučivosti prikupljenih podataka te smanjenju šuma u izlaznim 3D skenovima. Sustavi ove vrste često se koriste u aplikacijama gdje je potrebna detaljna dokumentacija unutarnjih prostora s naglaskom na preciznu rekonstrukciju arhitektonskih elemenata. S druge strane, njihova upotreba može biti ograničena u vrlo uskim ili neravnim prostorima te na stepenicama. Unatoč tome, primjeri implementacija pokazuju da su ovakvi sustavi vrlo učinkoviti u integriranju podataka iz više

senzora, čime se postiže konzistentan i pouzdan 3D prikaz okoline, čija točnost može biti na centimetarskoj, pa čak i na sub-centimetarskoj razini. Rezultati usporednih studija ističu prednosti sustava u formi kolica u smislu stabilnosti i preciznosti u usporedbi s drugim mobilnim platformama ([Nocerino i dr. 2017](#)).

2.3.3. Ručni mjerni mobilni sustavi

Ručni mjerni mobilni sustavi (*eng. Handheld Mobile Mapping System*) dizajnirani su za ručno držanje i korištenje, pružajući iznimnu fleksibilnost i mobilnost prilikom terenskog snimanja. Ovi sustavi su iznimno kompaktni i lagani, što ih čini idealnima za primjene u teško dostupnim ili vrlo dinamičnim okruženjima. Primjena SLAM tehnologije u ručnim sustavima omogućuje precizno pozicioniranje i simultanu rekonstrukciju 3D skena čak i bez podrške GNSS signala. Njihova prenosivost omogućuje brzo snimanje i inspekciju objekata, što je osobito važno u područjima poput kulturne baštine, građevinske inspekcije i urbanog planiranja. Međutim, zbog ručne uporabe i povećane vibracije prilikom rada, ručni sustavi često bilježe nešto veći stupanj varijabilnosti u podacima, što zahtijeva sofisticirane algoritme za filtriranje šuma i korekciju pogrešaka. Uz to, potreba za realizacijom što manjih, kompaktnijih i lakših ručnih jedinica može rezultirati ograničenjima u pogledu trajanja baterije i kvalitete integriranih senzora. Bez obzira na navedene izazove, ove platforme pružaju značajne operativne prednosti u situacijama kada je brzina prikupljanja podataka ključna. Studije usporedbe s referentnim tehnikama potvrđuju da ručni sustavi mogu postići razinu točnosti konkurentnu mobilnim mjernim sustavim u formi ruksaka i kolica, uz istovremeno smanjenje troškova i vremena terenskih operacija ([Maset i dr. 2021](#)). Uz to, za razliku od svih ostalih vrsta mobilni mjernih sustava, ručne sustave karakterizira neovisnost o tipu pokretne platforme. Iako su izvorno zamišljeni da se nose u ruci operatera, ručne mjerne sustave je moguće integrirati i na druge pokretne platforme, kao što su ruksaci, kolica, automobili, letjelice itd.

3. KAMERE RUČNIH MJERNIH MOBILNIH SUSTAVA

Generalno gledano, vizualni senzori (RGB kamere) se na SLAM mjerne mobilne sustave mogu integrirati u svrhu:

- SLAM navigacije mjernog mobilnog sustava (tzv. vizualni SLAM)
- kolorizacije (bojanja), vizualizacije i efikasnijeg iskorištavanja 3D podataka

Ovo istraživanje će se fokusirati isključivo na integraciju kamera na ručnim mjernim mobilnim sustavima za potrebe kolorizacije, vizualizacije i efikasnijeg iskorištavanja 3D podataka.

U pogledu načina integracije kamere na ručni mjerni mobilni sustav, u praksi postoje tri različita pristupa ([Zalović i dr. 2024](#)):

1. Ručni mobilni sustavi sa jednom ili više unutarnjih (internih) kamera
2. Ručni mobilni sustavi sa vanjskom (eksternom) kamerom
3. Ručni mobilni sustavi bez kamere

Odabir načina integracije kamere na ručni mjerni mobilni sustav zahtijeva pomno planiranje od strane proizvođača. S obzirom na to da bi ručni mobilni sustavi po definiciji morali biti što manji i lakši, neki proizvođači izbjegavaju integraciju kamera ([slika 3.1.c](#)) zbog neizbježnog povećanja mase, kao i smanjenja mobilnosti ručnog mobilnog sustava. S druge strane, određeni se proizvođači zbog navedenih izazova odlučuju na integraciju malih slikovnih senzora i optičkih elemenata niže kvalitete, što u konačnici može rezultirati fotografijama upitne upotrebljivosti. Jedan od najpopularnijih načina integracije kamera na ručne sustave podrazumijeva korištenje vanjske (eksterne) kamere koju je moguće brzo postaviti i ukloniti sa sustava, ovisno o potrebi ([slika 3.1.b](#)). Ovaj pristup je izuzetno fleksibilan i daje korisniku mogućnost da koristi kameru samo kada je ona potrebna. Uz to, kako nisu ograničene dimenzijama i oblikom kućišta ručnog mobilnog sustava, eksterne kamere najčešće imaju kvalitetnije optičke elemente i slikovne senzore u odnosu na integrirane kamere ([Zalović i dr. 2024](#))



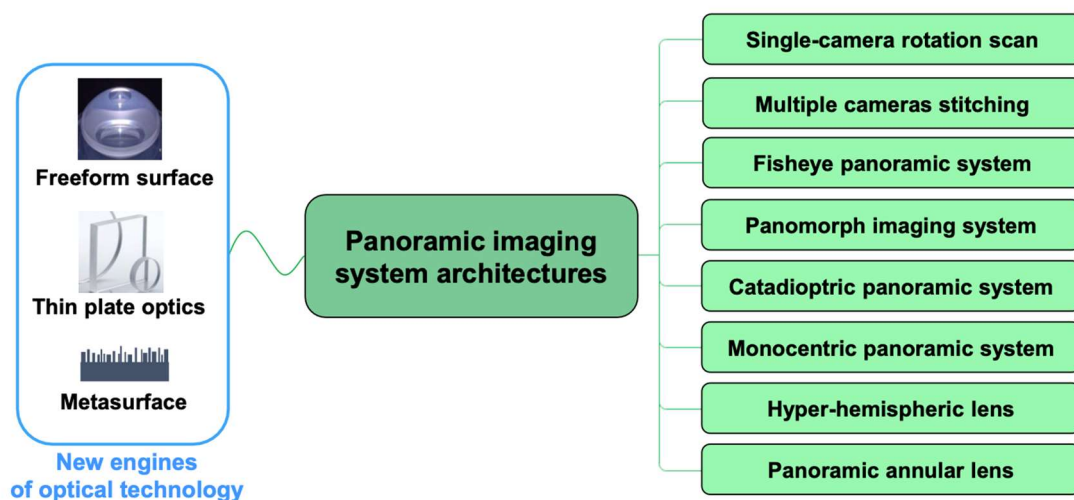
Slika 3.1. Prikaz različitih načina integracije kamere kod ručnih mjernih mobilnih sustava: a) sustav sa internim kamerama ([URL 9](#)), b) sustav sa eksternom kamerom ([URL 8](#)), c) sustav bez kamere ([URL 10](#))

Primarna uloga kamera na mobilnim mjernim sustavima je prikupljanja visoko-rezolucijskih fotografija ili videozapisa pri visokoj frekvenciji snimanja (*eng. high-frame rate*) ([Elhashash i dr. 2022](#)). U slučaju prikupljanja videozapisa, frekvencija snimanja najčešće iznosi 30-60 sličica u sekundi (*eng. FPS – frames per second*), te se u naknadnoj obradi podataka prikupljeni videozapisi razdvajaju na zasebne fotografije (sličice) temeljem definirane udaljenosti (jedna sličica svakih n metara) ili vremena (jedna sličica svakih n sekundi) ([Vechersky i dr. 2018](#)). Ukoliko se prikupljaju fotografije, interval ekspozicije kamere može se definirati na temelju vremena (ekspozicija svakih n sekundi) ili prijeđene udaljenosti (ekspozicija svakih n metara). Neovisno o načinu prikupljanja ili generiranja fotografija, cilj je konstruirati tzv. 360° panoramske fotografije koje, za razliku od uobičajenih fotografija sa uskim vidnim poljem (*eng. narrow FOV – field of view*), omogućuju bolju percepciju i razumijevanje okoline i objekata od interesa ([Gao i dr. 2022](#)).

3.1. Panoramski sustavi i fotografije

Veliki tehnološki napredak proteklih godina doveo je do povećane potrebe za unapređenjem tradicionalnih sustava snimanja fotografija, pretežito zbog njihovog ograničenog vidnog polja snimanja. Sustavi za panoramsko fotografiranje omogućuju snimanje širokog vidnog polja te bilježe znatno više informacija o okolini u jednom kadru, što ih čini izuzetno korisnima u primjenama poput navigacije, autonomne vožnje i mobilnog kartiranja. Glavni izazovi u dizajnu panoramskih sustava leže u postizanju visoke rezolucije, umanjivanju optičkih aberacija i eliminaciji tzv. slijepih točaka (*eng. blind spots*), što su ključni uvjeti za točnu percepciju i interpretaciju scena ([Gao i dr. 2022](#)). U posljednjem desetljeću, koncept panoramskog snimanja doživio je značajan napredak zahvaljujući inovacijama poput optike tankih ploča (*eng. thin plate optics*), slobodno-oblikovanih površina (*eng. freeform surfaces*)

i metapovršina (*eng. metasurfaces*), koji su značajno unaprijedili performanse različitih optičkih arhitektura (slika 3.2) (Rolland i dr. 2021, Shalaginov i dr. 2020). Za uspješnu analizu najkorištenijih optičkih arhitektura te principa na kojima rade, nužno je poznavanje i razumijevanje glavnih parametara panoramskih sustava.



Slika 3.2. Arhitekture panoramskih sustava čiji je razvoj potpomognut novim optičkim tehnologijama (Gao i dr. 2022)

3.1.1. Glavni parametri panoramskog sustava

Prilikom razvoja panoramskih sustava za snimanje, specifični parametri imaju presudnu ulogu u određivanju performansi i učinkovitosti sustava. Glavni parametri koji se moraju uzeti u obzir uključuju kut snimanja ili vidno polje (FoV), valnu duljinu, otvor blende (*eng. F-number*), žarišnu duljinu (*eng. focal length*), rezoluciju, kvalitetu slike te volumen sustava (Gao i dr. 2022). Budući da panoramski sustavi imaju široku primjenu u području autonomne vožnje, robotske navigacije i snimanja prostora u svrhu računalne obrade, ovi parametri izravno utječu na njihovu primjenu i učinkovitost.

Vidno polje (FoV) jedan je od najvažnijih parametara, a definira se kutom koji se formira između dviju krajnjih točaka vidljivosti optičkog sustava. Panoramski sustavi obično imaju FoV veći od 180° , omogućujući snimanje šire okoline bez potrebe za dodatnim pokretima kamere ili spajanjem slika, za razliku od tradicionalnih sustava koji često imaju FoV manji od 90° . Neki od takvih sustava su riblje oko (*eng. fisheye*), katadioptrički sustavi (*eng. catadioptric panoramic system*) i panoramske prstenaste leće (*eng. panoramic annular lens*),

koji, zahvaljujući širokom vidnom polju (180° ili više), omogućujući holističku percepciju okruženja (Thibault i dr. 2005).

Valna duljina određuje spektar u kojem sustav snima, bilo da je riječ o vidljivom spektru (400 – 700 nm), infracrvenom (IR; 700 nm – 1 mm) ili ultraljubičastom (UV; 10 – 400 nm). Dok je većina panoramskih sustava dizajnirana za vidljivi spektar (Gao i dr. 2022), postoje i sustavi koji snimaju u IR i UV području, čime se proširuje percepcija okruženja izvan ljudskog vida, što je posebno korisno u specijaliziranim primjenama poput vojne tehnologije i sigurnosnog nadzora (Powell 1996, Wang i dr. 2011).

Otvor blende panoramskog optičkog sustava definira omjer između žarišne duljine i promjera ulazne pupile (Greivenkamp 2004). Veći otvor blende omogućuje veći protok svjetla i bolju kvalitetu snimanja u uvjetima slabog osvjetljenja te višu rezoluciju sustava. Međutim, sustavi s većim otvorom blende imaju manju dubinu polja, što zahtijeva posebnu pažnju prilikom dizajna panoramskog sustava (Robinson 2016).

Žarišna duljina optičkog sustava definira se kao udaljenost između optičkog središta leće ili sustava leća i žarišta (*eng. focal point*), odnosno točke u kojoj se zrake svjetlosti koje ulaze paralelno s optičkom osi sustava sjedinjuju nakon prolaska kroz leću (Goodman 1996). Žarišna duljina izravno utječe na povećanje ili smanjenje objekta na senzoru: dulje žarišne duljine rezultiraju većom slikom na senzoru, što omogućuje detaljnije snimanje, ali istodobno zahtijeva i veće senzore. Kraće žarišne duljine omogućuju kompaktnije sustave, ali smanjuju mogućnost detaljnog prikaza. Stoga, prilikom dizajniranja panoramskog sustava, mora se odabrati optimalna žarišna duljina kako bi se postigla željena rezolucija i veličina sustava (Bettonvil 2005, Goodman 1996).

Rezolucija panoramskih sustava izražava se brojem horizontalnih i vertikalnih piksela senzora. Viša rezolucija omogućava detaljniju percepciju prostora, što je nužno za precizne aplikacije poput računalnog vida (*eng. computer vision*), autonomne navigacije i mobilnog kartiranja (Lenz i Lenz 1994, Warren 2008). Međutim, rezolucija sustava ne ovisi samo o broju piksela senzora, već i o optičkoj rezoluciji koju određuje kvaliteta objektiva, odnosno njegova sposobnost razlučivanja detalja. Važno je uzeti u obzir i veličinu piksela senzora; manji pikseli mogu povećati prostornu rezoluciju, ali istodobno smanjuju osjetljivost senzora na svjetlo, što zahtijeva balansiranje između razlučivosti i performansi u uvjetima slabog osvjetljenja.

Kvaliteta slike panoramskih sustava ovisi o kontroli optičkih aberacija, kao što su sferne aberacije, astigmatizam, koma, zakrivljenost polja i kromatske aberacije (Greivenkamp 2004). Precizna kontrola ovih aberacija tijekom dizajna osigurava visoku kvalitetu slike, što se obično procjenjuje preko spot dijagrama ili funkcije modulacije prijenosa (*eng. MTF - Modulation Transfer Function*) (Gao i dr. 2022). Važna je i relativna iluminacija, koja bi trebala biti jednolika kako bi slike bile pogodne za daljnju računalnu obradu i interpretaciju (Tsyganok i dr. 2021).

Volumen ili kompaktnost sustava ključan je faktor posebno u primjenama gdje prostor i težina predstavljaju ograničenje, primjerice kod robotskih platformi ili autonomnih vozila. Kompaktnost sustava često se izražava omjerom između maksimalnog promjera sustava i promjera slike na senzoru (Luo i dr. 2017). Suvremeni panoramski sustavi teže ka miniaturizaciji, koristeći tehnologije poput slobodno-oblikovanih površina, metapovršina i optike tankih ploča, kako bi se postigle visoke performanse u što manjem volumenu (Yang i dr. 2021, Shalaginov i dr. 2019).

Prilikom dizajniranja panoramskih sustava potrebno je razmotriti i uravnotežiti ove ključne parametre kako bi se ostvario optimalan sustav koji ispunjava zahtjeve specifičnih primjena.

3.1.2. Optičke arhitekture panoramskih sustava

Razvoj različitih optičkih arhitektura potaknut je, osim potrebom za proširenjem vidnog polja, i različitim aplikacijama koje zahtijevaju primjenu panoramskih fotografija. Pregled postojećih arhitektura panoramskih sustava pokazuje raznolikost u pristupima i izvedbama, s različitim karakteristikama, prednostima i ograničenjima.

Prva arhitektura temelji se na rotacijskom skeniranju jednom kamerom (*eng. single-camera rotation scan*), pri čemu se panoramska slika realizira mehaničkom rotacijom kamere oko svoje osi (slika 3.3.a). Ova metoda prikladna je za snimanje statičnih scena zbog vremenskog kašnjenja između pojedinih snimaka koje mogu dovesti do nepravilnosti u snimci dinamičnih objekata (Gao i dr. 2022). Osim toga, ovaj pristup zahtijeva vrlo precizne mehaničke sustave kako bi se osigurala stabilnost slike tijekom rotacije.

Drugi pristup koristi višestruke kamere za istovremeno snimanje (slika 3.3.b) i programsko spajanje snimaka u jedinstvenu panoramu (*eng. multiple cameras stitching*). Ovaj pristup omogućuje snimanje dinamičnih scena u realnom vremenu, no zahtijeva preciznu kalibraciju

kamera i napredne algoritme za umanjivanje grešaka spajanja koje nastaju zbog razlika u optičkim parametrima i postavkama pojedinih kamera (Yuan i dr. 2010). Glavni nedostatak ove metode je kompleksnost sustava, veći troškovi te poteškoće u kalibraciji i održavanju.

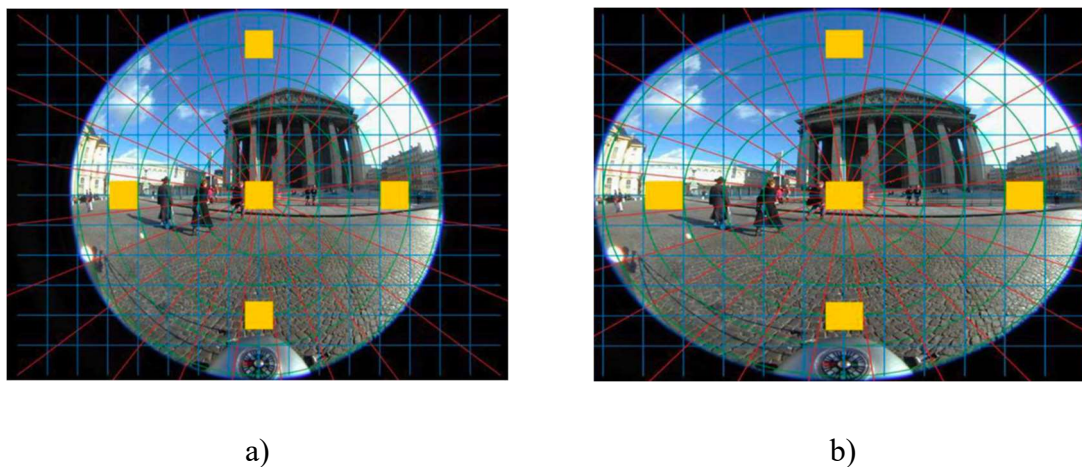


Slika 3.3. Prikaz dviju kamera koje kreiraju panoramu na različite načine: a) kamera koja snima panoramu koristeći rotaciju oko svoje osi (URL 11), b) sustav više kamera koje istovremeno snimaju fotografije (URL 12)

Panoramski sustavi tipa riblje oko predstavljaju ultra-širokokutne optičke sustave, budući da koriste optičke elemente koji omogućuju snimanje vidnog polja šireg od 180° (slika 3.4.a), što eliminira potrebu za spajanjem velikog broja snimaka. Dovoljno je spojiti samo dvije takve snimke kako bi se dobilo vidno polje od 360° . Karakteristična izvedba sustava ribljeg oka uključuje više negativnih meniskusnih leća koje omogućavaju kompresiju ulazne svjetlosti i njeno usmjeravanje prema senzoru kroz dodatne korektivne leće (Gao i dr. 2022). Njihova prednost je jednostavnost konstrukcije, pouzdanost, niski troškovi i mogućnost snimanja u realnom vremenu bez dodatnih programskih algoritama. Međutim, ovaj tip optike podrazumijeva značajne optičke distorzije koje se povećavaju približavanjem rubovima vidnog polja, često dosežući vrijednosti od 15 do 20% (Thibault i dr. 2005). Također, zbog specifične konstrukcije, sustavi ribljeg oka mogu imati problem s neravnomjernom rezolucijom slike, gdje se razlučivost smanjuje prema rubovima slike. Stoga, primjena naprednih algoritama za korekciju distorzija i poboljšanje kvalitete slike predstavlja ključan aspekt njihove praktične primjene (Sahin i Tanguay 2018, Thibault i dr. 2005).

Panomorfni sustavi koriste anamorfne optičke elemente za prilagodbu rezolucije i bolje iskorištavanje senzora. Specijalno oblikovani optički elementi omogućuju kontrolu distribucije rezolucije slike tako da se veći broj piksela usmjerava prema zonama od posebnog interesa, poput središta slike ili kritičnih dijelova scene (slika 3.4.b) (Thibault i Artonne 2006). Zbog te specifičnosti, panomorfni sustavi idealni su za sigurnosne aplikacije

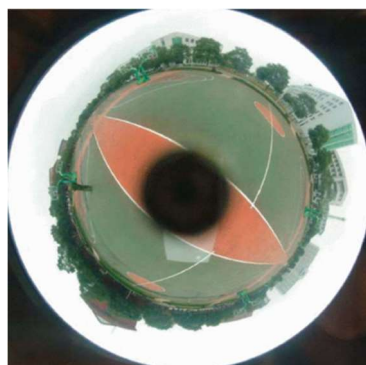
i sustave pomoći vozačima, gdje je važna detaljna razlučivost objekata u ključnim područjima (Thibault i dr. 2014).



Slika 3.4. Prikaz snimke snimljene sustavom ribljeg oka (a) te snimke snimljene sa panomorfnim sustavom (b) (Thibault i Artonne 2006)

Katadioptrički panoramski sustavi integriraju reflektivne i refraktivne optičke elemente, što rezultira kompaktnijom izvedbom u odnosu na čisto refraktivne sustave (Kweon i dr. 2005, Wang i dr. 2022). Ovi sustavi koriste konkavne ili konveksne reflektivne elemente koji usmjeravaju panoramsku sliku prema senzoru kroz korektivnu refraktivnu grupu leća. Iako u usporedbi sa sustavom ribljeg oka ima manji broj prednjih leća, zbog načina postavljanja reflektivnih elemenata često dolazi do formiranja slijepog područja u središtu slike (slika 3.5.a) (Gao i dr. 2022). Zbog svoje kompaktnosti, katadioptrički sustavi često se primjenjuju u mobilnoj robotici, bespilotnim letjelicama i sustavima nadzora gdje je prostor za ugradnju ograničen (Wu i dr. 2019).

Panoramske prstenaste leće koriste katadioptričke optičke elemente inspirirane strukturom očiju morskih školjki (Gao i dr. 2022). Omogućuju široko panoramsko snimanje u izuzetno kompaktnom obliku, s potencijalnim slijepim područjima koja se mogu eliminirati korištenjem polarizacijskih filtera ili drugih naprednih tehnika (slika 3.5.b). Zbog svoje veličine i performansi idealne su za nadzor, autonomnu navigaciju, medicinske endoskopske sustave i druga područja gdje je prostorna učinkovitost ključna (Zhou i dr. 2020, Gao i dr. 2022).



a)



b)

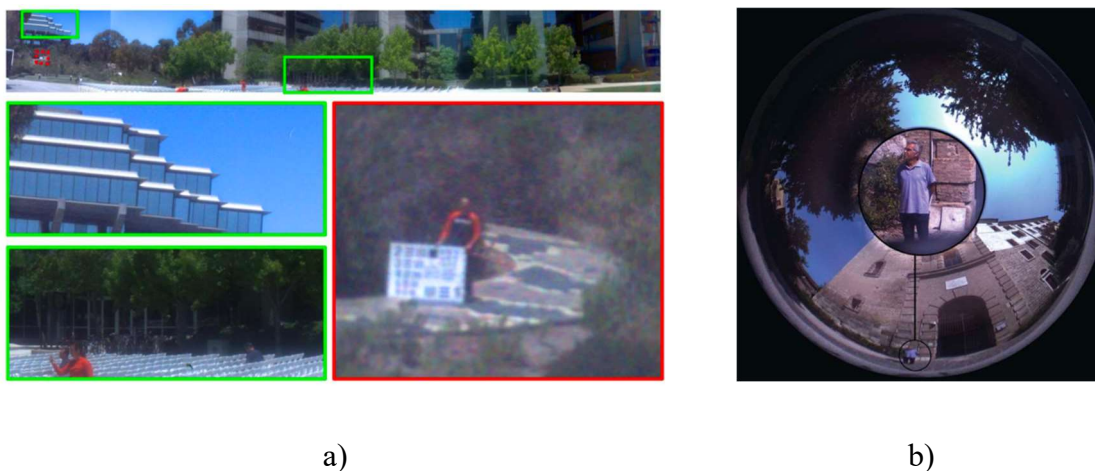
Slika 3.5. Prikaz fotografije snimljene katadioptričkim sustavom (a) i fotografije snimljene korištenjem sustava temeljenog na panoramskim prstenastim lećama (b) (Yang i dr. 2021)

Monocentrični sustavi, inspirirani strukturom očiju insekata, koriste sferno simetrične optičke elemente kako bi učinkovito smanjili optičke aberacije poput kome i astigmatizma (Gao i dr. 2022). Iako postižu vrlo široko vidno polje uz visoku kvalitetu slike i nisku distorziju (slika 3.6.a), zahtijevaju specijalizirane zakrivljene senzore ili vlaknaste prijenosnike slike za ispravno fokusiranje. Primjenjuju se u situacijama gdje je potrebna ekstremna kvaliteta slike s minimalnim izobličenjima, kao što su visokoprecizna promatranja u znanstvenim istraživanjima i sofisticiranim nadzornim sustavima (Huang i dr. 2020).

Hiper-hemisferne leće dizajnirane su za snimanje ekstremno širokog vidnog polja do $360^\circ \times 260^\circ$ (slika 3.6.b) (Gao i dr. 2022). Njihova optička arhitektura obično uključuje kombinaciju refraktivnih i reflektivnih optičkih elemenata, poput polukružnih ili sferičnih leća, te konkavnih i konveksnih ogledala. Zbog toga mogu postići kontinuirano panoramsko snimanje, ali istovremeno imaju i centralnu slijepu točku koja proizlazi iz same konfiguracije sustava. Unatoč tome, zbog ekstremno širokog vidnog polja, hiper-hemisferične leće pogodne su za primjene poput astronomskih istraživanja, navigacijskih sustava te sustava nadzora okoliša gdje je potrebna kontinuirana prostorna pokrivenost velikog područja (Pernechele 2018).

Unatoč velikom broju različitih panoramskih optičkih arhitektura, u kontekstu ručnih mjernih mobilnih sustava najčešće se primjenjuju kamere s ribljim okom. Njihova primjena temelji se na iznimno širokom vidnom polju bez slijepih točaka, kompaktnim dimenzijama

i maloj masi, kao i relativno niskoj cijeni u odnosu na složenije optičke sustave (Gao i dr. 2022, Thibault i dr. 2005, Pernechele 2018).



Slika 3.6. Puna panorama kreirana korištenjem monocentričnog sustava (a) (Olivas i dr. 2015) te fotografija snimljena hiper-hemisfernom lećom (b) (Gao i dr. 2022)

3.2. Konstruiranje panoramskih fotografija

Konstruiranje panoramskih fotografija (*eng. panoramic image stitching*) je postupak spajanja više fotografija koje djelomično prikazuju isti prostor u jednu kontinuiranu, širokokutnu sliku. Temelji se na postupcima poravnanja fotografija (*eng. image alignment*), pri čemu se utvrđuju odnosi između pojedinačnih snimaka koje imaju određeni stupanj preklapanja (Szeliski 2006).

U praksi postoje dva osnovna pristupa problemu poravnanja fotografija (Brown i Lowe 2003):

- direktni pristup (*eng. direct methods*), koji se temelji na izravnom uspoređivanju intenziteta piksela na preklapljenim dijelovima slika (Szeliski i Kang 1995)
- pristup temeljen na značajkama (*eng. feature-based methods*), koji se oslanja na identificiranje specifičnih lokalnih značajki koje su robusne na promjene položaja, rotacije, mjerila i osvjetljenja (Zoghلامي i dr. 1997)

Dok prvi pristup uspoređuje intenzitete piksela kroz optimizaciju te zahtijeva precizne inicijalne procjene položaja fotografija, drugi pristup koristi prepoznatljive točke ili značajke koje omogućavaju brže, robusnije te preciznije poravnanje, pogotovo u uvjetima prisutne paralakse ili kretanja unutar scene (Szeliski 2006). Uz to, pristupi temeljeni na značajkama

omogućuju automatsku detekciju preklopa između fotografija, što je izuzetno važno u slučaju „neuređenog“ skupa fotografija koje nemaju inicijalne podatke o položaju (Brown i Lowe 2003).

Potrebno je uzeti u obzir kako za uspješnu konstrukciju panorame samo poravnanje fotografija nije dovoljno. Ključni koraci tog procesa generalno obuhvaćaju odabir prikladnog matematičkog modela transformacije, utvrđivanje točnih parametara koji opisuju prostorne odnose između fotografija, poravnanje fotografija uz primjenu globalne optimizacije, odabir referentne kompozitne plohe za projekciju panorame (ravnina, valjak, sfera itd.) te stapanje fotografija (*eng. blending*), čime se izbjegavaju problemi poput zamućenja (*eng. blurring*), dvostrukih prikaza (*eng. ghosting*) ili razlika u ekspoziciji (Szeliski 2006).

3.2.1. Modeli transformacija fotografija

Za postizanje visoke preciznosti u procesu poravnanja i spajanja slika, neophodno je uspostaviti matematički dosljedne odnose koji preslikavaju slikovne koordinate jedne fotografije u slikovne koordinate druge fotografije. To se postiže formuliranjem transformacijskih modela koji opisuju promjene u položaju, orijentaciji, mjerilu te, u složenijim slučajevima, perspektivnim iskrivljenjima (Szeliski 2006). Ovi modeli omogućuju sustavno kompenziranje pomaka nastalih zbog različitih položaja i rotacija kamere, čime se osigurava dosljednost u rekonstruiranim panoramama.

U kontekstu dvodimenzionalnih (2D) transformacija, preslikavanje između dvije slike može se opisati kroz niz parametarskih modela, pri čemu se svaki model odnosi na specifične fizičke attribute transformacije i zadovoljava određena ograničenja u očuvanju geometrijskih svojstava. Kao najosnovniji model, translacija predstavlja jednostavno jednolično pomicanje svih slikovnih elemenata za konstantan vektorski pomak. Nastavno na to, transformacija koja kombinira rotaciju i translaciju definira se kao 2D transformacija čvrstog tijela (rigidna ili euklidska), a koja čuva euklidske udaljenosti između točaka. Model skalirane rotacije proširuje rigidnu transformaciju uključivanjem uniformnog skaliranja (promjene mjerila), čime se uvećava ili smanjuje veličina objekta bez gubitka kutne geometrije. Afina transformacija predstavlja općenitiju klasu preslikavanja koja, uz rotacije i promjene mjerila, dopušta i elastična iskrivljenja, dok se pritom paralelnost linija zadržava. Konačno, u slučajevima kada dolazi do značajnih perspektivnih efekata, najopćenitiji model

preslikavanja je projektivna transformacija ili homografija, koja je značajna po svojoj sposobnosti očuvanja ravnih linija (Szeliski 2006). Pregled opisanih modela 2D transformacija dan je u tablici 3.1.

Tablica 3.1. Modeli 2D transformacija i njihove glavne karakteristike

Model transformacije	Broj stupnjeva slobode gibanja	Očuvane veličine prilikom transformacije
Translacija	2	Orijentacija
Euklidska transformacija	3	Duljine
Skalirana rotacija	4	Kutovi
Afina transformacija	6	Paralelnost
Homografija	8	Ravne linije

Iako jednostavni 2D transformacijski modeli mogu biti dovoljni za poravnanje slika ravnih površina ili prizora snimljenih s velikih udaljenosti, u općem slučaju, gdje je scena trodimenzionalna, primjena preciznijih i kompleksnijih transformacijskih modela postaje nužna. Trodimenzionalni modeli omogućuju matematičko opisivanje stvarne geometrije snimanja prizora, uzimajući u obzir perspektivne projekcije, položaje kamera u prostoru, njihove međusobne orijentacije te optičke karakteristike objektiva (Szeliski 2006).

Temeljni koncept u analizi 3D gibanja i poravnanja fotografija jest model centralne projekcije. Ovaj model simulira idealnu kameru bez optičkih izobličenja, pri čemu je svaka točka prostora $p = (X, Y, Z)$ projicirana na dvodimenzionalnu ravninu fotografije slikovnim koordinatama $x = (x, y)$. Matematička veza između koordinata točke prostora i njenih slikovnih koordinata opisana je projekcijskim jednadžbama:

$$x = f \frac{X}{Z}, \quad y = f \frac{Y}{Z}, \quad (3.1)$$

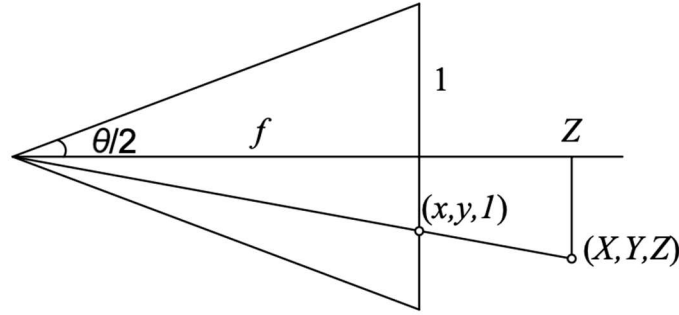
gdje je f žarišna duljina kamere (slika 3.7), definirana u normaliziranim koordinatama slikovne ravnine, uz pretpostavku jedinične polu-širine senzora. Tada se veza između žarišne duljine i vidnog polja θ kamere može zapisati izrazom:

$$f^{-1} = \tan \frac{\theta}{2} \quad (3.2)$$

Ovaj temeljni model centralne projekcije može biti zapisan u homogenim koordinatama kao matrična jednadžba, korištenjem 3×4 projekcijske matrice P :

$$\tilde{x} \sim P\tilde{p}, \quad (3.3)$$

gdje je $\tilde{x} = (x, y, I)$ dvodimenzionalna homogena koordinata, a $\tilde{p} = (X, Y, Z, I)$ trodimenzionalna homogena koordinata točke scene (Szeliski 2006).



Slika 3.7. Grafički prikaz centralne projekcije, uz predložanje odnosa između vidnog polja θ i žarišne duljine f te trodimenzionalnih i dvodimenzionalnih koordinata p i x (Szeliski, 2006)

U praktičnim uvjetima snimanja, položaj i rotacija kamere u trenutku ekspozicije nisu nužno poznati te je potrebno uvesti općeniti model koji uključuje promjene položaja (translacija) te orijentacije (rotacija) kamere u prostoru. Takav općeniti transformacijski model definiran je pomoću rigidne 3D transformacije i projekcijske matrice:

$$\tilde{x} \sim K[R \mid t] \tilde{p}, \quad (3.4)$$

pri čemu je K matrica parametara unutarnje orijentacije kamere (kalibracijski parametri kamere), dok su R i t parametri rotacije i translacije kamere koji definiraju njen položaj i orijentaciju u odnosu na globalni koordinatni sustav. Matrica K pritom se općenito definira kao gornje-trokutasta matrica, s parametrima koji uključuju žarišnu duljinu, koordinate glavne točke (optičkog središta fotografije) i distorzijske parametre (Hartley i Zisserman 2004).

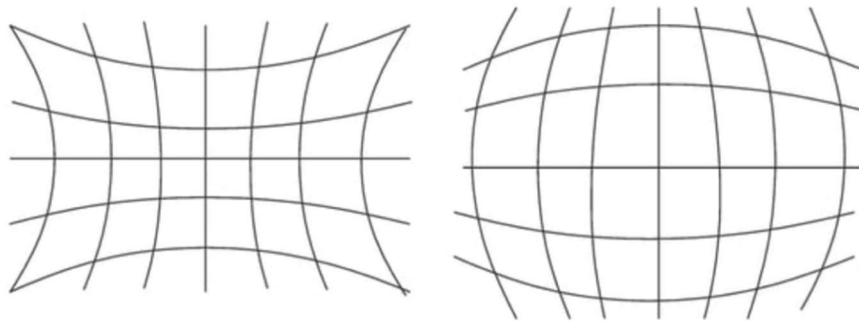
3.2.2. Distorzije leće

Jedna od važnih karakteristika širokokutnih leća jest ta da su njihove fotografije opterećene radijalnom distorzijom, pri čemu se točke udaljene od centra slike pomiču prema van (bačvasta distorzija - eng. *barrel distortion*) ili prema unutra (jastučasta distorzija - eng. *pincushion distortion*) (slika 3.8). Najjednostavniji polinomijalni model te distorzije izražava pomak točke (x, y) kao funkciju radijalne udaljenosti $r^2 = x^2 + y^2$:

$$x' = x(1 + \kappa_1 r^2 + \kappa_2 r^4), y' = y(1 + \kappa_1 r^2 + \kappa_2 r^4), \quad (3.5)$$

gdje su κ_1 i κ_2 koeficijenti radijalne distorzije (Brown 1971). Kompleksniji modeli distorzije također uključuju i tangencijalnu distorziju, no njihovo je korištenje za komercijalne potrebe ograničeno (Slama 1980).

Parametri κ se obično određuju tzv. metodom ravnih linija (eng. *plumb-line method*), koja podrazumijeva korištenje snimaka koje sadrže linije za koje se pretpostavlja da su u stvarnosti ravne. Prilagođavanjem κ vrijednosti, postiže se da takve linije postanu geometrijski ravne i na snimci (Brown 1971). Alternativno, koeficijenti radijalne distorzije mogu se procijeniti u procesu poravnanja više fotografija koje se međusobno preklapaju (Sawhney i Kumar 1999).



Slika 3.8. Grafički prikaz modela radijalne distorzije: jastučasta (lijevo) i bačvasta distorzija (desno) (URL 13)

Parametri κ se upotrebljavaju za opisivanje radijalne distorzije širokokutnih leća kakve se koriste za potrebe fotogrametrije ili u panoramskim sustavima više kamera za istovremeno snimanje. Međutim, za potrebe leća tipa riblje oko, u praksi se češće koristi korekcijska funkcija koja je opisana polinomom trećeg stupnja:

$$r_s = (a * r_c^3 + b * r_c^2 + c * r_c + d) * r_c, \quad (3.6)$$

gdje su a , b i c parametri radijalne distorzije leće, parametar d opisuje linearno mjerilo slike, a izrazi r_s i r_c predstavljaju udaljenost piksela do centra izvorne, odnosno ispravljene (korigirane) slike (Dersch 1999). Konverzija između parametara κ i parametara a , b , c i d je moguća uz poznavanje visine i širine snimljene fotografije u pikselima.

Postavljanje vrijednosti na način da je $d=1$, a parametri a , b i c jednaki nuli, neće izazvati nikakvu promjenu na izvornoj slici. Ako se promijeni vrijednost parametra d , proporcionalno će se povećati ili smanjiti dimenzije fotografije. Ostali parametri (a , b , c) uvode različite vrste izobličenja. Konkretno, negativne vrijednosti parametara djeluju tako da udaljenije dijelove slike udaljavaju od centra, čime se ispravljaju efekti bačvaste distorzije. Pozitivne vrijednosti, nasuprot tome, imaju obrnut učinak: udaljene dijelove slike približavaju centru te tako neutraliziraju efekt jastučaste distorzije. Parametar a najviše utječe na rubne dijelove slike, dok parametar b ima ujednačenije djelovanje prema središtu. Ovisno o potrebama, moguće je u jednoj slici kombinirati ispravke za obje vrste izobličenja. Primjerice, ako rubni dijelovi pokazuju bačvasto izobličenje, a centralni dijelovi jastučasto, optimalno je odabrati negativnu vrijednost za parametar a i pozitivnu vrijednost za parametar b (Dersch 1999).

3.2.3. Postupci poravnanja fotografija

Poravnanje fotografija čini temeljnu komponentu algoritama za konstrukciju panoramskih snimaka. Ključni izazov u ovom kontekstu jest određivanje transformacijskih parametara koji opisuju međusobni odnos dviju ili više fotografija, kako bi se one mogle dovesti u prostornu sukladnost. Dva dominantna pristupa ovom problemu su direktne metode i metode temeljene na značajkama, od kojih svaki pristup nudi specifične prednosti i nedostatke ovisno o vrsti podataka i zahtjevima primjene (Brown i Lowe 2003).

Direktne metode poravnanja temelje se na minimizaciji neke funkcije greške koja uspoređuje intenzitete piksela između dvije slike. Najjednostavnija i najčešće korištena metrika je suma kvadrata razlika (*eng. SSD - Sum of Squared Differences*), definirana kao:

$$E_{SSD}(u) = \sum_i [I_1(x_i + u) - I_0(x_i)]^2, \quad (3.7)$$

gdje u predstavlja translacijski pomak, I_0 referentnu sliku, a I_1 pomaknutu sliku (Szeliski 2006). Kod velikih pomaka, koristi se hijerarhijski pristup temeljen na piramidalnoj reprezentaciji slike (Quam 1984, Anandan 1989), kojim se poravnanje procjenjuje postupno,

od grubih do finih razina rezolucije. Za postizanje sub-pikselne preciznosti koristi se optimizacija temeljena na razvoju u Taylorov red, poznata kao Lucas-Kanade algoritam (Lucas i Kanade 1981), u kojem se parametri pomaka iterativno ažuriraju rješavanjem sustava linearnih jednadžbi oblika:

$$A\Delta u = b, \quad (3.8)$$

gdje je A tzv. Hessian matrica aproksimirana iz gradijenata slike, veličine koja opisuje smjer i brzinu promjene intenziteta piksela u slici, a b je vektor pogreške ponderiran gradijentom.

U slučajevima kada slike sadrže velike translacije, rotacije ili promjene mjerila, Fourierove metode pružaju učinkovit način globalnog poravnanja, budući da iskorištavaju činjenicu kako se pomak u prostornoj domeni manifestira kao linearna promjena faze u frekvencijskoj domeni (Kuglin i Hines 1975), što omogućuje upotrebu fazne korelacije za pronalaženje maksimalnog preklapanja:

$$\mathcal{F}\{E_{PC}(u)\} = \frac{I_0(f)I_1^*(f)}{\|I_0(f)\|\|I_1(f)\|}, \quad (3.9)$$

gdje su:

- $\mathcal{F}\{E_{PC}(u)\}$: Fourierova transformacija fazne korelacije
- $I_0(f)I_1(f)$: Fourierove transformacije dviju slika (ili dijelova slike)
- $I_1^*(f)$: kompleksno konjugirana vrijednost Fourierove transformacije druge slike.

Metode poravnanja temeljene na značajkama češće se koriste u praksi, jer omogućuju stabilnost i robusnost poravnanja čak i u uvjetima značajne paralakse, pomicanja objekata i promjenama ekspozicije. Ove metode uključuju tri glavna koraka (Szeliski 2006):

1. detekcija ključnih točaka (*eng. keypoints*)
2. opis značajki (deskripcija)
3. uspostava korespondencija između slika.

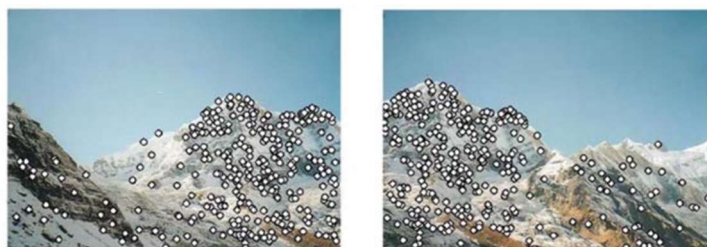
Detekcija ključnih točaka provodi se pomoću tzv. detektora, koji omogućuju robusno prepoznavanje lokalno jedinstvenih područja slike. Klasični pristupi, poput Harrisovog detektora (Harris i Stephens 1988), učinkoviti su u detekciji uglova, no ograničeni su na jedinstveno mjerilo i slabo tolerantni na geometrijske transformacije. Novije metode, kao

što su DoG (*eng. Difference of Gaussian*) detektor (Lindeberg 1990, Lowe 2004) i višeskalne varijante Harrisovog detektora (Mikolajczyk i Schmid 2004, Schmid i dr. 2000), uvode invarijantnost na promjene mjerila i affine transformacije, čime značajno povećavaju ponovljivost i pouzdanost detekcije u kompleksnijim uvjetima snimanja. Takvi pristupi danas se smatraju standardom za potrebe i automatske konstrukcije panoramskih prikaza.

Nakon što su u slici detektirane stabilne i ponovljive ključne točke, potrebno je opisati njihovu lokalnu okolinu na način koji omogućuje robusno uparivanje među različitim slikama. U tu svrhu koriste se deskriptori značajki – numerički vektori koji kodiraju informacije o teksturi, orijentaciji i kontrastima oko ključne točke (Lowe 2004). Dobar deskriptor mora biti invarijantan na skaliranje, rotaciju, promjene osvjetljenja i parcijalne affine transformacije, kako bi omogućio usporedbu značajki snimljenih iz različitih perspektiva ili pod različitim uvjetima (Mikolajczyk i Schmid 2005). Jedna od najraširenijih i najuspješnijih metoda u tom kontekstu je SIFT (*eng. Scale-Invariant Feature Transform*) (Lowe 2004), koja kombinira višeskalnu detekciju točaka s lokalnim histogramima orijentacija gradijenata kako bi stvorio deskriptore otporne na širok raspon transformacija (slika 3.9.a). Alternativni pristupi SIFT-u uključuju algoritme kao što su SURF (*eng. Speeded-Up Robust Features*) (Bay i dr. 2008) i ORB (*eng. Oriented FAST and Rotated BRIEF*) (Rublee i dr. 2011), koji su razvijeni s ciljem povećanja brzine i smanjenja računalne složenosti uz zadržavanje prihvatljive robusnosti. SURF koristi integralne slike i valične funkcije za brže izvlačenje značajki, dok ORB kombinira binarne deskriptore i brze detektore kako bi omogućio učinkovitu primjenu u „*real-time*“ sustavima.

Konačno, kada su ključne točke otkrivene i opisane deskriptorima, sljedeći ključni korak u procesu registracije slika jest uspostava korespondencija, tj. određivanje koji parovi značajki iz različitih slika predstavljaju istu fizičku lokaciju u sceni (Szeliski 2006). Ovaj korak je presudan za pouzdano poravnanje slika, jer se svi naknadni izračuni, uključujući procjenu transformacija i konstrukciju panorame, temelje na ispravnim parovima značajki. Proces uparivanja započinje računanjem udaljenosti između deskriptora. Svaka značajka iz jedne slike uspoređuje se s potencijalnim kandidatima u drugoj slici, pri čemu se koristi metrika prikladna za tip deskriptora: za realne (npr. SIFT, SURF) koristi se najčešće Euklidska udaljenost (Lowe 2004), dok se za binarne deskriptore (npr. ORB) koristi Hammingova udaljenost (Rublee i dr. 2011). Za svaku značajku traži se najbliži susjed, no kako bi se smanjio broj lažnih podudaranja, često se primjenjuje dodatni kriterij kao što je omjerni

test (Lowe 2004), koji zahtijeva da je najbolji kandidat znatno bolji od drugoplasiranog. Budući da lokalna sličnost nije uvijek dovoljna za točnu identifikaciju parova (zbog simetrije, šuma ili ponavljajućih uzoraka), koristi se i geometrijska verifikacija. Najčešći pristup je RANSAC (eng. *Random Sample Consensus*) (Fischler i Bolles 1981), robustan statistički algoritam koji iz niza podudaranja nasumično odabire podskup točaka, na temelju kojeg procjenjuje transformaciju između slika (npr. homografiju), a zatim identificira podudaranja koja su u skladu s tom transformacijom. Time se pouzdano uklanjaju podudaranja koja su lokalno slična, ali globalno nekonzistentna. Nakon filtriranja, zadržavaju se samo geometrijski dosljedni parovi, koji se koriste za izračunavanje konačne transformacije između slika (slika 3.9.b).



a)



b)



c)

Slika 3.9. Ključne točke dobivene primjenom SIFT metode na paru fotografija (a), uklanjanje pogrešno detektiranih ključnih točaka primjenom RANSAC algoritma (b) i prikaz panorame konstruirane korištenjem ispravno detektiranim i povezanim zajedničkih značajki (c) (Brown i Lowe 2003)

Usporedba direktnih i metoda temeljenih na značajkama pokazuje komplementarne prednosti. Direktne metode nude visoku preciznost u uvjetima kada je dostupna dobra početna procjena i kada nema značajnih promjena u sceni, ali su osjetljive na promjene osvjetljenja i pokretne objekte. S druge strane, metode temeljene na značajkama su robusnije na te perturbacije te omogućuju automatsko otkrivanje preklopa među slikama, čak i kada nisu unaprijed sortirane (Brown i Lowe 2003). U praksi se često koristi kombinacija oba pristupa, gdje značajke pružaju inicijalnu globalnu transformaciju, dok se direktnim metodama provodi lokalna optimizacija, čime se postiže robusnost i visoka točnost.

3.2.4. Izjednačenje bloka i uklanjanje paralakse

U kontekstu konstruiranja panoramskih fotografija, postizanje globalne konzistencije geometrijskih odnosa među višestrukim slikama predstavlja ključni izazov. Dok lokalna poravnanja između parova slika omogućuju grubu usklađenost, one su nedovoljne za konstrukciju vizualno i geometrijski ispravnih panoramskih prikaza. Potrebno je implementirati globalnu optimizaciju svih parametara transformacije kako bi se umanjile kumulativne pogreške i osiguralo koherentno poravnanje svih prikupljenih fotografija koje čine panoramu (Szeliski i Shum 1997). Takva se globalna konzistentnost postiže postupcima kao što su izjednačenje bloka (*eng. bundle adjustment*) i uklanjanje paralakse (Szeliski 2006).

Izjednačenje bloka je nelinearni postupak minimizacije pogrešaka reprojekcije (*eng. reprojection error*), kojim se simultano optimiziraju parametri unutarnje i vanjske orijentacije kamere te, prema potrebi, položaji 3D točaka u snimljenoj sceni (Triggs i dr. 2000). U slučaju konstruiranja panorame, kada su slike pretežno snimljene s fiksne pozicije uz rotaciju kamere, optimizacija se svodi na određivanje optimalnih rotacija (i eventualno žarišnih duljina) svih uključenih slika. Pretpostavi li se da je svaka slika definirana parametrima rotacije R i parametrima unutarnje orijentacije kamere K , cilj optimizacije je minimizirati ukupnu pogrešku reprojekcije između svih preklapajućih slika. Formalno, za skup ključnih točaka između slika i i j , pogreška se može modelirati kao:

$$E_{ij} = \sum_k \left\| x_j^{(k)} - H_{ij} x_i^{(k)} \right\|^2, \quad (3.10)$$

gdje je $H_{ij} = K_j R_j R_i^{-1} K_i^{-1}$ homogena transformacija između fotografija. Globalna pogreška se tada može definirati kao:

$$E_{\text{global}} = \sum_{(i,j)} E_{ij} \quad (3.11)$$

Budući da se radi o nelinearnoj funkciji pogreške, njezina minimizacija provodi se iterativnim numeričkim metodama, najčešće varijantama algoritma Levenberg–Marquardt (Triggs i dr. 2000, Hartley i Zisserman 2004).

Drugi bitan aspekt globalnog poravnanja višestrukih fotografija je rješavanje problema paralakse. Paralaksa predstavlja jedan od ključnih problema pri poravnanju slika, posebice u kontekstu konstrukcije panorame gdje se pretpostavlja da su sve scene projicirane s jednog optičkog centra. Paralaksa se pojavljuje kao posljedica razlike u relativnim pozicijama 3D točaka u sceni u odnosu na više gledišta, što je posebno izraženo kod objekata na različitim dubinama. Posljedično, točke koje bi trebale biti usklađene na temelju rigidne transformacije prikazuju pomake, što dovodi do lokalnih geometrijskih pogrešaka, dvostrukih prikaza te zamućenja (Szeliski 2006). U idealnom slučaju savršene rotacije kamere oko optičkog centra, sve točke scene, neovisno o njihovoj dubini (udaljenosti od kamere), projiciraju se dosljedno putem rotacijske transformacije. U takvom slučaju ne dolazi do paralakse, jer nema translacije kamere koja bi mijenjala perspektivu (Hartley i Zisserman 2004). Geometrijska relacija između dviju slika tada se može izraziti već spomenutom rotacijskom homografijom:

$$H_{ij} = K_j R_j R_i^{-1} K_i^{-1}. \quad (3.12)$$

Međutim, u stvarnim uvjetima snimanja često dolazi do neželjenih translacija, čak i vrlo malih, koje uzrokuju paralaksu. Problem je dodatno izražen kod scena koje sadrže objekte na različitim dubinama, jer bliže točke tada doživljavaju vidljive pomake u odnosu na udaljene. Kako bi se ti učinci modelirali i uklonili, koristi se model ravnine i paralakse (Irani i Anandan 1998). U ovom modelu pretpostavlja se postojanje dominantne ravnine scene, definirane homografijom, dok se preostali pomaci interpretiraju kao paralaktički pomaci. Ostale napredne tehnike za eliminaciju paralakse uključuju višeravninski model, gdje se različite regije slike transformiraju neovisno, pretpostavljajući različite dominantne ravnine (Irani i dr. 1998), te deformacijske modele kao što su optički tok (*eng. optical flow*) i lokalna deformacija slike (*eng. local image warping*) koje omogućuju prilagodbu lokalnim paralaktičkim pomacima bez potrebe za eksplicitnim modeliranjem 3D scene (Davis 1998, Uyttendaele i dr. 2001).

3.2.5. Odabir kompozitne površine i stapanje fotografija

Nakon što su slike uspješno poravnate uz provedenu globalnu optimizaciju i uklanjanje paralakse, završni korak u konstrukciji panoramske slike jest kompozicija. Taj proces uključuje preslikavanje pojedinih slika na zajedničku geometrijsku površinu te njihovo međusobno stapanje kako bi se uklonili diskontinuiteti i stvorio vizualno koherentan prikaz.

Izbor površine na koju će se sve slike preslikati određuje kvalitetu završne panorame. Iako je moguće koristiti ravninu kao projekcijsku površinu, u većini slučajeva, posebice kada se kamera rotirala oko statične točke, koriste se cilindrična ili sferna površina (Szeliski i Shum 1997). Projekcija točke na cilindričnu površinu (slika 3.10.a) jediničnog radijusa određena je kutom θ i visinom h , gdje vrijedi odnos:

$$\sin \theta, h, \cos \theta \propto (x, y, f) \quad (3.13)$$

Temeljem toga, preslikavanje svake točke (x, y) iz izvorne slike na točku (x', y') definira se kao:

$$x' = f \cdot \tan^{-1}\left(\frac{x}{f}\right), \quad y' = f \cdot \frac{y}{\sqrt{x^2 + f^2}}, \quad (3.14)$$

gdje je f efektivna žarišna duljina kamere. Ova transformacija čuva vertikalne linije i smanjuje horizontalne distorzije u centralnom području slike, što je osobito korisno kod panoramskih nizova s malim horizontalnim preklapanjem (Szeliski 2006).

U slučajevima kada panorama obuhvaća i vertikalne rotacije kamere (npr. kod panoramskih glava s dva stupnja slobode), prikladnije je koristiti sfernu projekciju (slika 3.10.b). Projekcija na sfernu površinu uključuje dva kuta, θ i φ , te se izražava preko sljedeće relacije:

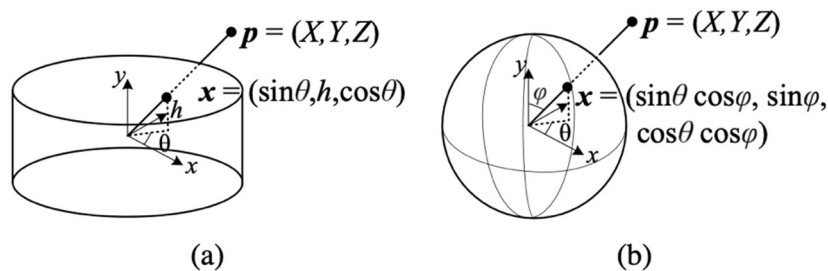
$$\sin \theta \cos \varphi, \sin \varphi, \cos \theta \cos \varphi \propto (x, y, f) \quad (3.15)$$

Tada se točka (x, y) iz izvorne slike preslikava u točku (x', y') na način da vrijedi:

$$x' = f \cdot \tan^{-1}\left(\frac{x}{f}\right), \quad y' = f \cdot \tan^{-1}\left(\frac{y}{\sqrt{x^2 + f^2}}\right) \quad (3.16)$$

Sferna projekcija omogućuje stvaranje panorama koje pokrivaju puni kut gledanja u horizontalnom i vertikalnom smjeru, odnosno tzv. sferne panorame. Time se izbjegavaju

deformacije koje nastaju pri preslikavanju sfernih podataka na sliku u ravnini (Szeliski 2006).



Slika 3.10. Preslikavanje 3D točke u cilindrične (a), odnosno sferne koordinate (b) (Szeliski, 2006)

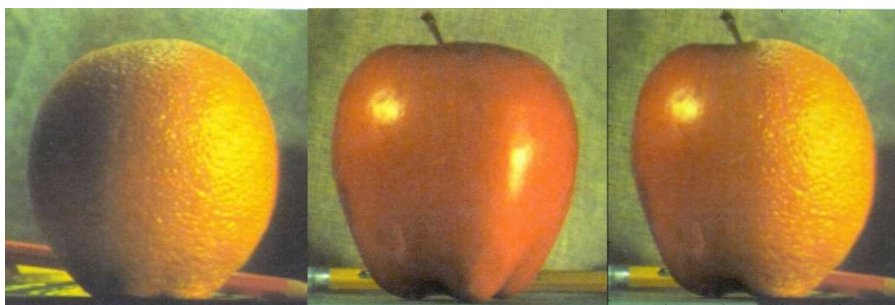
Nakon što su sve slike projicirane na zajedničku kompozitnu površinu, u regijama gdje se one međusobno preklapaju pojavljuju se vidljivi prijelazi. Razlike u ekspoziciji, kontrastu, boji, kao i male greške u poravnanju, mogu dovesti do očitih diskontinuiteta i narušiti vizualni dojam panorame. Da bi se to izbjeglo, koristi se proces stapanja slika, čija je svrha ostvariti glatke prijelaze između različitih izvora i stvoriti homogenu panoramsku sliku.

Jedan od osnovnih pristupa temelji se na prostornom postupnom prijelazu (Milgram 1975) pri čemu se doprinos svake slike smanjuje prema rubovima i povećava prema sredini slike. Ovakav pristup, poznat kao linearno stapanje (*eng. linear feathering*), jednostavan je za implementaciju i često se koristi u inicijalnim fazama spajanja slika. Međutim, u situacijama kada slike imaju značajne razlike u osvjetljenju ili sadržaju, linearno stapanje nije dovoljno, što rezultira time da prijelazi ostaju vidljivi, a mogu se pojaviti i artefakti poput zamućenja ili neprirodnih rubova (Davis 1998).

Za robusnije rezultate koristi se metoda višerezolucijskog stapanja (*eng. multiresolution blending*) (Burt i Adelson 1983). Ova tehnika temelji se na dekompoziciji svake slike u niz razina, gdje svaka razina opisuje određenu skalu prostorne frekvencije. Na taj način slika se razlaže na globalne komponente niske frekvencije, koje određuju opći izgled tonova i ekspozicije, te lokalne komponente visoke frekvencije, koje sadržavaju rubove i fine detalje. Višerezolucijsko stapanje donosi višestruke prednosti. Na nižim razinama omogućuje postupno usklađivanje velikih struktura u slici, čime se smanjuju nepravilnosti u svjetlini i boji. Na višim razinama, gdje dominiraju lokalni rubovi i teksture, stapanje se provodi na način koji očuva oštrinu i jasnoću slike (slika 3.11). Time se sprječava zamućivanje koje bi

inače nastalo kod jednostavnog interpoliranja između izvornih slika ([Burt i Adelson 1983](#), [Szeliski 2006](#)).

Zbog svoje učinkovitosti i prilagodljivosti, višerezolucijsko stapanje danas predstavlja standardnu metodu u sustavima za automatsko spajanje panoramskih slika. Njegova sposobnost da ujednači osvjetljenje i istovremeno očuva lokalne detalje ključna je za stvaranje estetski prihvatljivih i tehnički korektnih panorama.



Slika 3.11. Tehnika višerezolucijskog stapanja na primjeru spajanja fotografija naranče i jabuke ([URL 14](#))

4. UMJERIVANJE KAMERE RUČNIH MJERNIH MOBILNIH SUSTAVA

Kod ručnih mjernih sustava opremljenih kamerama, kao i kod drugih mobilnih mjernih sustava, cilj je prikupiti panoramske snimke koje obuhvaćaju cjelokupan vidni prostor okoline. Međutim, kako bi se snimljene slike mogle iskoristiti u geoinformacijskom kontekstu, nužno ih je orijentirati, odnosno pridružiti im položaj i rotaciju u odnosu na referentni koordinatni sustav (El-Sheimy 2005). Orijentirane fotografije su one koje imaju poznate parametre vanjske orijentacije, tj. položaj središta projekcije i rotaciju optičke osi u trenutku ekspozicije (Rau i dr. 2011). Takve se slike mogu koristiti u nizu zadataka koji zahtijevaju prostornu korespondenciju između slike i objektnog prostora. Najčešće primjene uključuju vizualizaciju i dobivanje bolje predodžbe o skeniranom prostoru, pridruživanje boje točkama laserskih skenova (kolorizaciju) (Vechersky i dr. 2018) te monoskopsko kartiranje (*eng. monoplottting*), pri čemu se iz jedne slike i poznatog 3D modela površine rekonstruira geometrija scene (dos Santos 2010).

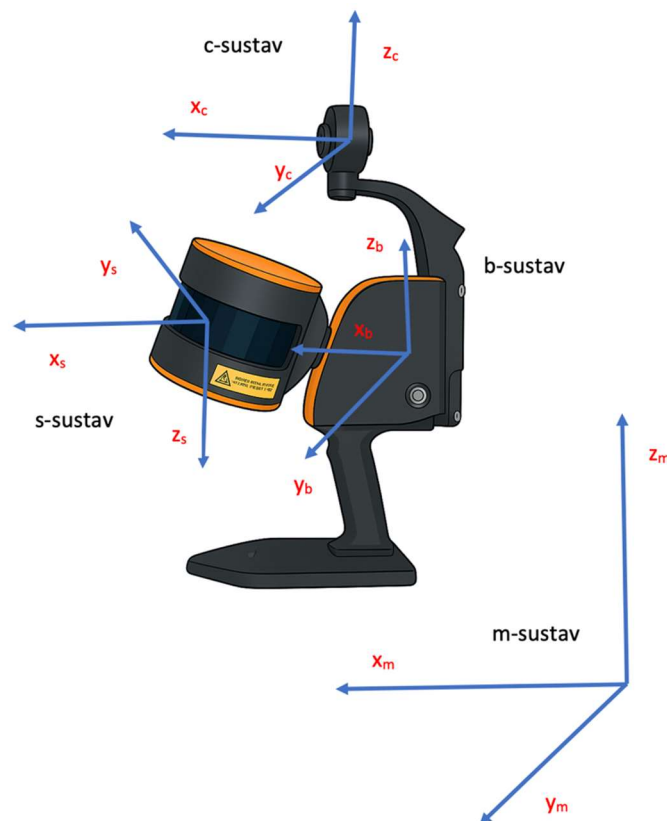
U slučaju ručnih mjernih mobilnih sustava sa fiksno montiranom kamerom, pretpostavlja se kako je trajektoriju mjernog mobilnog sustava moguće transformirati u trajektoriju kamere pomoću fiksne 6-parametarske transformacije (Vechersky i dr. 2018). Parametri takve transformacije određuje se primjenom postupka umjerivanja kamere te omogućuju direktnu orijentaciju prikupljenih panoramskih fotografija (El-Sheimy 2005, Rau i dr. 2011). Kako bi umjerivanje kamere i direktna orijentacija fotografija bili izvedivi, realizacija vremenske sinkronizacije svih senzora mjernog mobilnog sustava je ključna. To podrazumijeva uspostavu referentnog vremenskog okvira na koji se odnose opažanja navigacijskih i mjernih senzora, kao i trenutci ekspozicije kamere (Rau i dr. 2011). Tek kada su senzori mobilnog sustava pravilno sinkronizirani, moguće je provesti pouzdano umjerivanje kamere te izračun parametara vanjske orijentacije svake snimke, čime je omogućena primjena panoramskih snimaka u svrhu prostorne analize, vizualizacije i kartiranja.

4.1. Definicija koordinatnih sustava i relacija među njima

Mobilni mjerni sustavi integriraju više senzorskih komponenti, pri čemu svaka djeluje u vlastitom lokalnom koordinatnom sustavu. Radi precizne prostorne integracije podataka, nužno je definirati odnos među tim koordinatnim sustavima i uspostaviti konzistentne

transformacije. U ovom radu koristi se sljedeća terminološka konvencija za označavanje pojedinih koordinatnih sustava ([slika 4.1](#)):

- c-sustav (*eng. camera frame*): lokalni koordinatni sustav kamere, čije se ishodište nalazi u optičkom centru objektiva, a orijentacija je definirana prema proizvođačkoj specifikaciji
- b-sustav (*eng. body frame*): koordinatni sustav inercijalne mjerne jedinice (IMU), ujedno referentni okvir za sve transformacije među sensorima; njegovo ishodište najčešće se poklapa s centrom mase platforme ili točkom unutar kućišta IMU-a
- s-sustav (*eng. scanner frame*): koordinatni sustav laserskog skenera, s ishodištem u projekcijskoj točki LiDAR senzora i orijentacijom definiranoj prema proizvođačkoj specifikaciji (npr. os X u smjeru skeniranja, os Z prema dolje)
- m-sustav (*eng. mapping frame*): globalni ili lokalni koordinatni sustav, u kojem se izražavaju svi izlazni mjerni podaci



Slika 4.1. Prikaz koordinatnih sustava senzora ručnog mjernog mobilnog sustava

4.1.1. Transformacija između b-sustava i m-sustava

Kod konvencionalnih mobilnih mjernih sustava postavljenima na vozilima ili letjelicama, transformacija između b-sustava i m-sustava ostvaruje se integracijom GNSS i IMU senzora. GNSS senzor osigurava globalno pozicioniranje, dok IMU omogućuje visoku vremensku rezoluciju orijentacijskih podataka. Fuzijom tih opažanja, najčešće primjenom proširenog Kalmanovog filtera, dobiva se navigacijsko rješenje u kojem su položaj i rotacija b-sustava izraženi u m-sustavu (El-Sheimy 2005, Rau i dr. 2011).

Nasuprot tome, kod ručnih mjernih mobilnih sustava, zbog prostorne ograničenosti i zahtjevnih okruženja, integracija GNSS senzora često nije izvediva ili praktična. Posljedično, m-sustav u tim slučajevima ne predstavlja apsolutni geodetski okvir, već se definira kao lokalni referentni sustav koji je uspostavljen u odnosu na početni položaj i orijentaciju b-sustava. Uobičajeno je da se ishodište m-sustava poklapa s početnom pozicijom IMU-a, pri čemu se orijentacija m-sustava inicijalno usklađuje s koordinatnim sustavom platforme (b-sustav), tako da njegove osi preuzimaju smjer orijentacije platforme u trenutku inicijalizacije (Rau i dr. 2011, Lauterbach i dr. 2015). Takva lokalna definicija omogućuje dosljedno praćenje gibanja sustava i transformaciju podataka drugih senzora (npr. kamere, LiDAR-a) u jedinstven referentni okvir, bez potrebe za globalnim koordinatama.

4.1.2. Transformacija između s-sustava i b-sustava

U SLAM sustavima temeljenim na LiDAR senzorima, relacija između s-sustava i b-sustava definirana je fizičkom ugradnjom senzora u sklop mobilne platforme. Uobičajeno je da proizvođač tijekom tvorničkog umjerivanja (kalibracije) određuje inicijalnu transformaciju između tih koordinatnih sustava. Ta transformacija uključuje tri translacijska parametra (*eng. lever-arm*) i tri rotacijska parametra (*eng. boresight angle*) koji su pohranjeni unutar sustava i primjenjuju se kao nominalne vrijednosti tijekom inicijalne obrade (Lauterbach i dr. 2015, Pentek i dr. 2020).

U postupku SLAM obrade, spomenuta transformacija predstavlja početnu aproksimaciju odnosa između senzora, koja se zatim dodatno optimizira. Korištenjem tehnika poput registracije uzastopnih skenova (*eng. scan-to-scan; local scan registration*) ili poravnanja s akumuliranom kartom okoline (*eng. scan-to-map; global map registration*), kao i kroz minimizaciju pogrešaka između preklapajućih oblaka točaka, SLAM algoritmi iterativno

poboljšavaju procjenu relativnog položaja i rotacija LiDAR senzora unutar tijela sustava (Cadena i dr. 2016, Bosse i Zlot 2009, Zhang i Singh 2014). Ova optimizacija ne samo da korigira moguća tvornička odstupanja, već i doprinosi stabilnosti i točnosti cjelokupne prostorne rekonstrukcije, osobito pri dugotrajnim autonomnim kretanjima bez GNSS potpore.

4.1.3. Transformacija između b-sustava i c-sustava

U svrhu orijentacije panoramskih fotografija snimljenih kamerom u m-sustavu, potrebno je definirati transformaciju između c-sustava i b-sustava. Ova transformacija omogućuje prijenos navigacijskih podataka (položaj i rotacija IMU-a) na položaj i rotaciju kamere, te je ključna za izračunavanje parametara vanjske orijentacije fotografija.

Transformacija se modelira kao rigidna 6-parametarska transformacija koja uključuje:

- vektor translacije r_{bc} , koji opisuje translaciju između b-sustava i c-sustava izraženu u b-sustavu, a koji se sastoji od 3 komponente: dx, dy, dz
- matricu rotacije R_{bc} , koja opisuje rotaciju iz b-sustava u c-sustav

Za dani trenutak ekspozicije, položaj kamere u m-sustavu računa se prema izrazu:

$$p_c = p_b + R_b r_{bc}, \quad (4.1)$$

gdje je:

- p_b – položaj IMU-a u m-sustavu
- R_b – rotacija IMU-a (b-sustava) u m-sustav
- p_c – položaj kamere u m-sustavu

Rotacija kamere u m-sustav izračunava se kompozicijom:

$$R_c = R_b R_{bc}, \quad (4.2)$$

čime se dobiva konačna orijentacija c-sustava u m-sustavu. Ove transformacije čine temelj direktne orijentacije fotografija, pri kojoj se položaj i rotacija slike izvode bez potrebe za kontrolnim točkama, već isključivo na temelju navigacijskih mjerenja te poznatih relacija među sensorima (Rau i dr. 2011, El-Sheimy, 2005).

Komponente vektora translacije (dx , dy i dz) i matrice rotacije ($d\phi$, $d\theta$ i $d\psi$) još se nazivaju i relativni kalibracijski parametri, koji se jednoznačno definiraju postupkom umjerivanja kamere.

4.2. Vremenska sinkronizacija senzora

Vremenska sinkronizacija senzora jedan je od ključnih preduvjeta za točnu fuziju podataka u mobilnim mjernim sustavima, osobito u sustavima temeljenima na SLAM algoritmima. Sinkronizacija podrazumijeva usklađivanje vremenskih oznaka podataka različitih senzora, najčešće LiDAR-a, inercijalne mjerne jedinice (IMU) i kamere, kako bi se osigurala korespondencija podataka u istom vremenskom trenutku (Furgale i dr. 2013). Kod ručnih mjernih mobilnih sustava, sinkronizacija ekspozicije kamere s LiDAR-om ili IMU-om od posebne je važnosti, jer omogućuje točno pozicioniranje i orijentaciju slika u prostoru, što je preduvjet za njihovu uporabu u vizualizaciji, kolorizaciji oblaka točaka ili semantičkoj segmentaciji (Vechedsky i dr. 2018, Levinson i Thrun 2010). Metode sinkronizacije mogu se grubo podijeliti na hardverske i softverske, pri čemu svaka skupina uključuje više tehnoloških pristupa s različitim razinama preciznosti, kompleksnosti i primjenjivosti (Furgale i dr. 2013, Peynot i dr. 2009).

Među hardverskim metodama najčešće je korištena sinkronizacija pomoću PPS (*eng. Pulse Per Second*) signala koji se generira iz GNSS prijemnika i omogućuje sinkronizaciju više senzora prema UTC vremenu na razini mikro sekunde (Peynot i dr. 2009). Drugi čest mehanizam uključuje okidačke impulse (*eng. trigger impulse*), odnosno električni signal koji se istovremeno šalje svim sensorima, prisiljavajući ih na istodobno očitavanje. Ova metoda osigurava preciznost, ali zahtijeva fizičku povezanost senzora i podršku na razini upravljačke jedinice (Furgale i dr. 2013, Rehder i dr. 2016). Treći pristup temelji se na zajedničkom taktomjeru ili vremenskom referentnom satu, gdje svi senzori generiraju svoje vremenske oznake prema istom vremenskom izvoru, čime se eliminira relativni pomak među njima. Ovakvi sustavi često koriste IEEE 1588 *Precision Time Protocol* (PTP), koji omogućuje sinkronizaciju satova preko lokalne mreže (LAN) s točnosti na razini mikro sekunde (IEEE Std 1588™-2008). Pregled hardverskih metoda sinkronizacije, kao i njihovih prednosti, nedostataka i očekivanim točnostima dan je u tablici 4.1.

Tablica 4.1. Pregled hardverskih metoda sinkronizacije senzora mobilnih mjernih sustava

Metoda	Prednosti	Nedostaci	Točnost
PPS (Pulse Per Second)	Vrlo visoka točnost; globalna sinkronizacija	Zahtijeva GNSS prijemnik i satelitsku vidljivost	$< 1 \mu\text{s}$
Okidački impuls	Visoka točnost i determinističko ponašanje	Fizičko ožičenje, upravljačka jedinica s podrškom	$< 1 \text{ ms}$
Zajednički taktomjer / PTP (IEEE 1588)	Visoka točnost preko lokalne mreže; skalabilnost	Zahtijeva PTP podršku i konfiguraciju mreže	$\sim 1 \mu\text{s} - 1 \text{ ms}$

S druge strane, softverske metode sinkronizacije sve se češće koriste u mobilnim, modularnim i istraživačkim platformama koje nemaju mogućnost hardverskog povezivanja senzora. Najjednostavniji pristup temelji se na usklađivanju vremenskih oznaka (*eng. timestamp matching*), gdje se podatkovni zapisi senzora poravnavaju prema najbližim vremenskim oznakama. Međutim, ova metoda je osjetljiva na neusklađene satove i promjenjivo kašnjenje, stoga se često kombinira s interpolacijom podataka, gdje se mjerenja jednog senzora (npr. LiDAR-a) interpoliraju na vremenske zapise drugog (npr. kamere), što je osobito korisno pri visokoj frekvenciji podataka ([Rehder i dr. 2016](#)).

Naprednije metode uključuju analizu kinematičkih signala. Primjer takve metode podrazumijeva korištenje kuta rotacije oko Z osi (*eng. yaw-rate*) LiDAR-a i kamere za korelaciju vremenskih tokova bez eksplicitnih vremenskih oznaka ([Vechersky i dr. 2018](#)). Sličan pristup koristi se i kod metode vizualne sinkronizacije, gdje se sinkronizacija ostvaruje pomoću detekcije zajedničkih vizualnih događaja (npr. marker u pokretu, promjena svjetlosnih uvjeta itd.) ([Smid i Matas 2019](#), [Grammatikopoulos i dr. 2022](#)).

U višemodalnim sustavima, poput onih koji uključuju sliku, zvuk i inerciju, koristi se metoda međumodalnog usklađivanja događaja (*eng. cross-modal event matching*), gdje se podudaranje sinkronih događaja (npr. pljesak koji se detektira i u audio signalu i kao iznenadni pomak u IMU-u) koristi za procjenu vremenskog pomaka ([Fridman i dr. 2016](#)). Još jedan važan pristup je *offline* kalibracija vremenskih odnosa, pri čemu se poznato kašnjenje (latencija) između senzora procjenjuje statistički, često u sklopu sustava za vremensko-prostornu kalibraciju ([Furgale i dr. 2013](#)). Konačno, u SLAM sustavima

temeljenima na grafu (grafičkim optimizacijskim tehnikama), vremenska sinkronizacija se može modelirati kao dodatna varijabla u postupku SLAM obrade, što omogućuje istovremeno računanje vremenskih pomaka i prostornih transformacija (Rehder i dr. 2016).

Sve navedene metode softverske sinkronizacije, zajedno sa njihovim prednostima, nedostacima te očekivanim točnostima pregledno su navedene u tablici 4.2.

Tablica 4.2. Pregled metoda softverske sinkronizacije senzora mobilnih mjernih sustava

Metoda	Prednosti	Nedostaci	Točnost
Usklađivanje vremenskih oznaka	Jednostavna i brza implementacija	Osjetljiva na <i>drift</i> i neprecizne satove	10–100 ms
Interpolacija vremenskih oznaka	Poboljšava usklađenost kod viših frekvencija	Gruba aproksimacija, ovisi o frekvenciji podataka	5–50 ms
Kinematička analiza	Ne zahtijeva sinkronizirane oznake; djeluje retroaktivno	Ovisna o dinamičnosti gibanja	5–20 ms
Vizualna sinkronizacija	Jednostavna za implementaciju i <i>offline</i> upotrebu	Nije robusna u svim uvjetima, ručna priprema scene.	10–50 ms
Međumodalno usklađivanje događaja	Ne zahtijeva sinkronizirane satove; fleksibilnost	Osjetljivo na detekciju događaja	10–50 ms
Kalibracija vremenskog kašnjenja	Nije potrebna dodatna oprema; primjenjiva retroaktivno	Ovisna o kvaliteti i količini podataka	1–10 ms
Optimizacija u SLAM grafu	Visoka točnost, zajednička obrada sa prostornim transformacijama	Računalno zahtjevnja; zahtijeva veće količine podataka	< 10 ms

4.3. Primjena orijentiranih panoramskih fotografija

Rad i učinkovito iskorištavanje 3D laserskih skenova prikupljenih mobilnim mjernim sustavima zahtijevaju određeno iskustvo i odgovarajuću razinu stručnosti korisnika. U tom kontekstu, orijentirane panoramske fotografije mogu značajno pridonijeti povećanju učinkovitosti i kvalitete izrade konačnih proizvoda izmjere. Njihova primjena omogućuje bolju vizualizaciju prikupljenih podataka, ubrzava identifikaciju i interpretaciju detalja u prostoru te olakšava cjelovito razumijevanje izmjerene scene. Osim vizualne potpore, orijentirane panoramske fotografije mogu se koristiti i za određivanje 3D koordinata točaka primjenom principa monoskopskog kartiranja. Uz to, one služe i kao izvor informacija za kolorizaciju 3D laserskih podataka, čime se geometrijskim modelima pridodaje dodatna razina prostorne interpretacije putem boje, što uvelike poboljšava preglednost i jasnoću prikaza rezultata.

4.3.1. Primjena za potrebe vizualizacije i razumijevanja scene

Panoramske fotografije predstavljaju vrijedan dodatak u radu s 3D podacima jer pružaju ključnu vizualnu komponentu koja često izostaje u geometrijski bogatim, ali vizualno apstraktnim oblacima točaka. Ta se komponenta posebno očituje u činjenici da fotografija ne predstavlja samo nasumičan prikaz određenog dijela scene, već je i orijentirana u prostoru, tj. sadrži informaciju o točnom položaju i rotaciji kamere u trenutku snimanja. Zahvaljujući takvoj prostornoj definiranosti, korisniku se omogućuje pregled scene iz točno određene perspektive, analogno iskustvu koje omogućuju sustavi kao što je *Google Street View*. Fotografije se prikazuju iz stvarne pozicije snimanja, a dodatna vrijednost leži u dostupnosti podataka o kutovima rotacije kamere. To uključuje i smjerni kut (rotaciju oko Z-osi u m-sustavu), odnosno smjer u kojem je kamera bila usmjerena. Upravo ta komponenta ima ključnu ulogu u interpretaciji sadržaja slike jer omogućuje korisniku da točno poveže prikazani vizualni sadržaj s odgovarajućim dijelom izmjerenog prostora ([slika 4.2](#)).

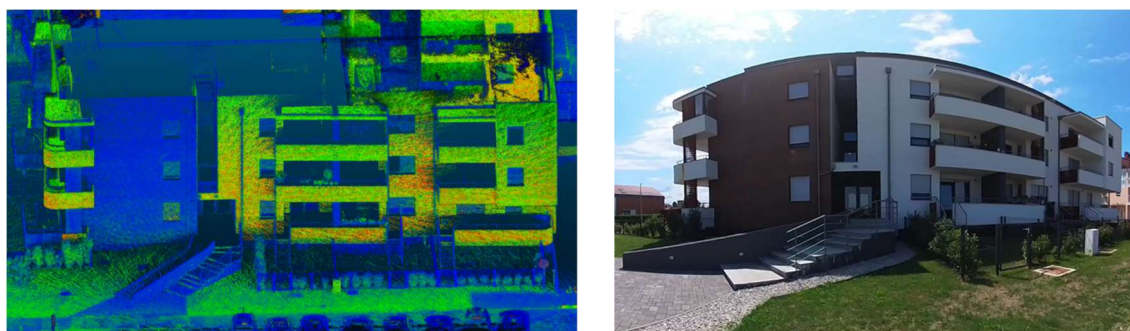
Orijentirane panoramske fotografije izravno doprinose lakšoj i preciznijoj interpretaciji scene. One omogućuju bolju identifikaciju objekata i prostora, što je osobito važno tijekom izrade CAD podloga, kada se donose ključne odluke o tome koji elementi prostora se vektoriziraju, a koji se isključuju iz konačnog modela. Mogućnost naknadnog pregleda prostora iz autentične perspektive snimanja znatno olakšava rješavanje nejasnoća i dilema

koje bi se u protivnom mogle razriješiti isključivo ponovnim izlaskom na teren (Ćosić i dr. 2022).



Slika 4.2. Prikaz oblaka točaka (lijevo) i korespondentne panoramske fotografije (desno), uz intuitivan prikaz smjernog kuta kamere

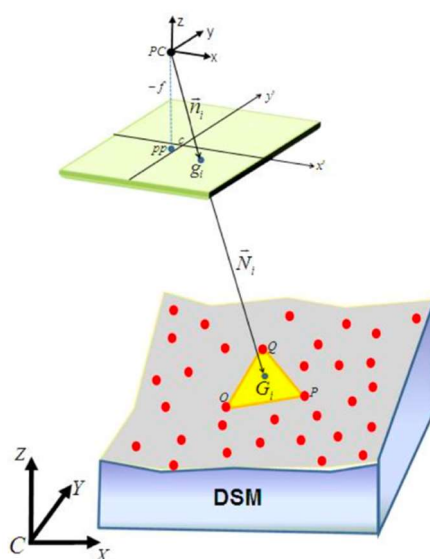
Konačno, dodatna prednost panoramskih fotografija ogleda se u jednostavnosti njihove vizualizacije. Za razliku od oblaka točaka, koji unatoč prostornoj točnosti često zahtijevaju specijalizirani softver i naprednije stručno znanje za interpretaciju, panoramske slike nude visoku razlučivost, neposredan vizualni prikaz scene i intuitivno korisničko iskustvo (slika 4.3). Upravo ta dostupnost i preglednost čine ih izuzetno korisnim alatom u svakodnevnoj geodetskoj praksi, kako za pregled i validaciju terenskih podataka, tako i za donošenje tehnički utemeljenih odluka u kasnijim fazama obrade.



Slika 4.3. Prednost fotografije (desno) u odnosu na laserski sken (lijevo) za potrebe razumijevanja snimljene scene. Fotografija omogućuje korisniku intuitivniji i prirodni način pregleda objekata od interesa.

4.3.2. Monoskopsko kartiranje

Monoskopsko kartiranje (*eng. monoplottting*) označava proces određivanja trodimenzionalnih koordinata točaka na temelju jedne slike i poznate informacije o geometriji terena, obično u obliku digitalnog modela površine (*eng. DSM – Digital Surface Model*) (slika 4.4). Za razliku od stereoskopskih metoda koje se oslanjaju na paralaksu između dviju slika, monoskopsko kartiranje koristi projekcijski pravac iz kamere prema točki na slici i računa njegov presjek s DSM-om kako bi rekonstruirao 3D koordinatu (Habib i Abdelgawdy 2007).



Slika 4.4. Grafički prikaz metode monoskopskog kartiranja koja koristi orijentiranu fotografiju i DSM kako bi odredila koordinate točke definirane na fotografiji pomoću slikovnih koordinata (dos Santos i dr. 2010)

U klasičnom modelu s perspektivnom kamerom (*eng. frame camera*) primjenjuje se kolinearni model, koji podrazumijeva da se točka iz prostora projicira kroz perspektivni centar na ravnu slikovnu (projekcijsku) ravninu (Mikhail i dr. 2001). Pritom se koristi orijentirana fotografija, odnosno ona sa određenim parametrima vanjske orijentacije (položaj i rotacija fotografije u prostoru). Također, pretpostavlja se da su parametri unutarnje orijentacije kamere poznati. Svaka točka slike (definirana slikovnim koordinatama x' i y') može se transformirati u 3D pravac pomoću poznate žarišne duljine f i rotacijske matrice M , definirane pomoću parametara vanjske orijentacije fotografije. Pravac se u objekt prostoru (*eng. object space*) definira kao (dos Santos i dr. 2010):

$$\vec{G}_t = \vec{PC} + t \cdot \vec{N}_t, \quad (4.3)$$

gdje je vektor $\overrightarrow{PC} = (X_c, Y_c, Z_c)$ položaj perspektivnog centra, $\overrightarrow{N}_l$ normirani vektor smjera, a t parametar duž pravca koji određuje na kojoj udaljenosti od kamere pravac presijeca DSM. Vektor $\overrightarrow{N}_l$ dobiva se transformacijom iz slikovnog koordinatnog sustava:

$$\overrightarrow{N}_l = M^T \cdot \frac{1}{\sqrt{(x'_i - x_0)^2 + (y'_i - y_0)^2 + f^2}} \cdot \begin{bmatrix} x'_i - x_0 \\ y'_i - y_0 \\ -f \end{bmatrix}, \quad (4.4)$$

gdje su x_0 i y_0 koordinate glavne točke kamere. Konačne 3D koordinate računaju se određivanjem presjeka ovog pravca s ravninom definiranom trima susjednim točkama iz DSM-a. Presjek se računa rješavanjem opće jednadžbe ravnine ($AX + BY + CZ = 0$), čime se dobiva parametar t koji se uvrštava natrag u jednadžbu pravca.

U slučaju sfernih panoramskih fotografija, klasični kolinearni model nije primjenjiv. Kod takvih se sustava slika formira na zamišljenoj jediničnoj sferi oko centra projekcije, pri čemu svaki piksel jednoznačno definira smjer gledanja, tj. jedinični vektor u prostoru (Geyer i Daniilidis 2000, Scaramuzza i dr. 2006). Umjesto toga, svaka točka slike (u, v) izražena u pikselima, interpretira se kao kut azimuta θ i kut elevacije φ prema jednadžbama (Habib i Aldelgawy 2007):

$$\theta = 2\pi \cdot \frac{u}{W} - \pi, \quad \varphi = \pi \cdot \left(\frac{v}{H} - \frac{1}{2} \right), \quad (4.5)$$

gdje su W i H širina i visina panoramske slike. Iz tih kutova izračunava se jedinični vektor smjera pogleda (Habib i Aldelgawy 2007, Geyer i Daniilidis 2000):

$$\overrightarrow{d}_s = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \cdot \sin(\varphi) \\ \sin(\varphi) \\ \cos(\varphi) \cdot \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Ovaj vektor zatim može biti transformiran u globalni koordinatni sustav korištenjem rotacijske matrice R koja opisuje orijentaciju panoramske kamere u prostoru:

$$\overrightarrow{d}_w = R \cdot \overrightarrow{d}_s \quad (4.7)$$

Pravac projekcije ponovno ima oblik:

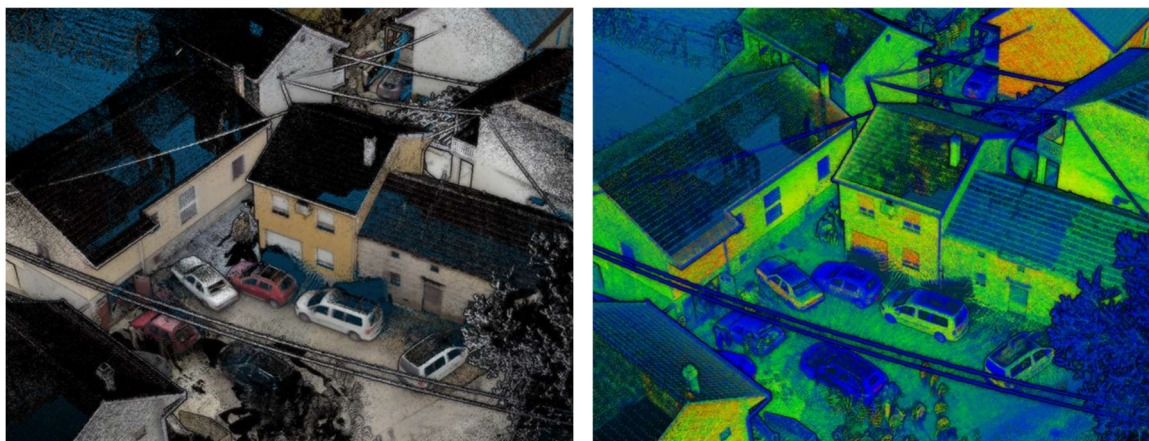
$$\vec{G} = \vec{C} + t \cdot \overrightarrow{d}_w, \quad (4.8)$$

gdje je $\vec{C}$ položaj panoramske kamere, a presjek s DSM-om se računa istim principom kao i kod kolinearnog modela, najčešće numerički.

Iako osnovna geometrijska ideja ostaje ista (definiranje 3D pravca iz točke na slici i njegovo presijecanje s DSM-om), matematički model projekcije za panoramske kamere u potpunosti je drugačiji u odnosu na kolinerani model, te zahtijeva preciznu definiciju kutnih odnosa i pravilno određene parametre unutarnje orijentacije kamera koje čine panoramski sustav.

4.3.3. Bojanje točaka (kolorizacija) 3D laserskih skenova

Kolorizacija oblaka točaka predstavlja proces pridruživanja informacija o boji (tipično u RGB formatu) svakoj pojedinoj točki unutar trodimenzionalnog oblaka točaka, s ciljem unaprjeđenja vizualne interpretacije i povećanja primjenjivosti podataka u kontekstima poput vizualizacije, semantičke segmentacije te stvaranja teksturiranih modela. Iako je geometrijska preciznost laserskih skenera neosporna, LiDAR senzori ne prikupljaju podatke o reflektiranoj boji površine, zbog čega oblak točaka ostaje manje informativan za ljudsku i strojnu interpretaciju ([slika 4.5](#)). Stoga se vrlo često pribjegava integraciji podataka s kamere koja, u trenutku snimanja okoline, bilježi RGB informacije koje je moguće pripisati odgovarajućim 3D točkama ([Vechedsky i dr. 2018](#)).



Slika 4.5. Usporedba istog segmenta oblaka točaka prikazanog pomoću realne boje (lijevo) i pomoću intenziteta LiDAR senzora (desno)

Osnovni princip kolorizacije temelji se na geometrijskoj projekciji 3D točaka iz oblaka u slikovni prostor kamere (*eng. image space* – ravnina senzora kamere). Svaka točka u globalnom koordinatnom sustavu (m-sustav) se transformira u koordinatni sustav kamere primjenom poznatih parametra vanjske orijentacije (rotacije i translacije), a zatim se koristi

perspektivna projekcija kako bi se odredile dvodimenzionalne koordinatne komponente piksela $x = [u, v]^T$ na slici (formula 3.4).

Sama geometrijska projekcija 3D točaka u slikovni prostor ne jamči točan rezultat jer se njome ne provjerava je li neka točka vidljiva iz perspektive kamere. Vidljivost predstavlja jedan od ključnih izazova u kolorizaciji jer kamera i LiDAR vrlo često nisu koaksijalni niti prostorno bliski, posebno u slučajevima gdje je kamera naknadno montirana na sustav. To znači da značajan broj točaka može biti zaklonjen s pozicije kamere, iako su mjerene LiDAR senzorom. Ukoliko bi se na njih bez provjere projicirala slika, može doći do pojave tzv. „proboja boje“ (*eng. bleeding*), gdje se pozadinska boja pogrešno pridruži zaklonjenim objektima (Vechersky i dr. 2018). Da bi se to spriječilo, koristi se algoritam za provjeru vidljivosti, odnosno za uklanjanje skrivenih točaka (*eng. Hidden Point Removal - HPR*) (Katz i dr. 2007, Katz i Tal 2013). Taj algoritam reflektira točke kroz sfernu refleksijsku funkciju, a potom detektira one točke čije refleksije pripadaju konveksnom omotaču rezultirajućeg skupa. Takve se točke tada klasificiraju kao vidljive. Opća forma refleksijske funkcije može se prikazati kao:

$$F(\vec{q}) = \frac{f(\|\vec{q}\|)}{\|\vec{q}\|}, \quad (4.9)$$

gdje $\vec{q}$ označava vektor točke u odnosu na kameru, a $f(\cdot)$ je monotonno padajuća refleksijska funkcija (Katz i Tal 2013). U svojoj osnovnoj verziji HPR koristi linearnu refleksijsku funkciju, no kasnije varijante uvode eksponencijalnu funkciju koja je invarijantna na promjene mjerila i time robusnija na razlike u veličini objekata u oblaku točaka.

Jednom kada su određene vidljive točke, za svaku je potrebno odrediti boju. No, zbog kretanja sustava (posebice kod ručnih mobilnih sustava), točka može biti vidljiva na više uzastopnih fotografija te pri različitim kutovima, ekspoziciji i udaljenostima. Pridruživanje boje na temelju samo jednog promatranja (npr. najbližeg vremenski) može biti nepouzdan i podložno šumu, osobito u slučajevima refleksivnih površina ili lokalne netočnosti u SLAM-u (Vechersky i dr. 2018). Stoga se koristi robusno usrednjavanje više opažanja, pri čemu se ona akumuliraju i ponderiraju. Jedna od učinkovitih metoda temelji se na sekvencijalnoj procjeni aritmetičke sredine i kovarijance RGB vrijednosti pomoću Gaussove razdiobe:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N w_i x_i}{\sum_{i=1}^N w_i}, \quad \Sigma = \frac{\sum_{i=1}^N w_i (x_i - \mu)(x_i - \mu)^T}{\sum_{i=1}^N w_i}, \quad (4.10)$$

gdje je x_i kandidat boje (RGB vektor) u trenutku i , a w_i težina pridružena tom opažanju, koja može ovisiti o udaljenosti kamere, kutu promatranja ili pouzdanosti detekcije. Ovakav pristup omogućuje bržu obradu i značajno smanjuje memorijske zahtjeve jer nije potrebno pohraniti sve pojedinačne boje. Preferencijalno se vrednuju opažanja iz manjih udaljenosti jer pogreške u projekciji imaju manji utjecaj na boju u blizini, a SLAM sustavi najčešće pokazuju bolju relativnu nego apsolutnu točnost (Cadena i dr. 2016).

Iako je kolorizacija konceptualno jednostavna, u praksi je podložna brojnim pogreškama. Primjerice, sinkronizacija vremena između kamere i LiDAR senzora predstavlja osnovni preduvjet za točnost. Pogrešno procijenjeni vremenski pomaci mogu uzrokovati sistematske greške gdje se boja dodaje objektima koji su se već pomaknuli. Nadalje, loše definirani relativni kalibracijski parametri (naročito kutovi rotacije) dovode do konstantnih pomaka između slike i geometrije. Konačno, reflektirajuće površine, poput stakla i metala, dodatno otežavaju kolorizaciju jer laserska zraka može prodrijeti kroz njih, dok kamera snima njihovu refleksiju. Unatoč izazovima u ispravnoj implementaciji, kolorizacija znatno unapređuje informativnost i čitljivost oblaka točaka te je nezaobilazan korak u obradi podataka mobilnih sustava za kartiranje.

4.4. Postojeće metode umjerivanja kamera mjernih mobilnih sustava

Kao što je ranije navedeno, ključan preduvjet za dobivanje orijentiranih fotografija jest uspješno umjerivanje kamere mjernog mobilnog sustava za kartiranje. To podrazumijeva jednoznačno određivanje relativnih kalibracijskih parametara, tj. translacijskih i kutnih pomaka između c-sustava i b-sustava mobilnog sustava.

Budući da komercijalni ručni mjerni mobilni sustavi temeljeni na SLAM tehnologiji predstavljaju relativno novu tehnološku kategoriju, većina dosad poznatih metoda umjerivanja kamera nije izravno primjenjiva na ovu vrstu sustava. Razlozi za to prvenstveno leže u njihovim specifičnim konstrukcijskim i radnim značajkama, kao što su nestabilnije geometrijske konfiguracije senzora, veći stupanj slobode gibanja operatera te potencijalno ograničeni broj referentnih mjernih značajki u radnom okruženju (Nocerino i dr. 2017, Cadena i dr. 2016, Durrant-Whyte i Bailey 2006).

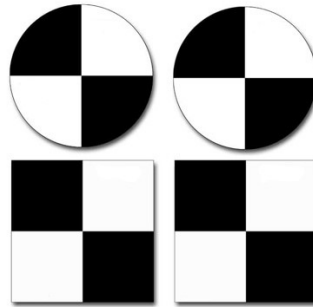
Unatoč navedenim ograničenjima, kombinacija postojećih metoda umjerivanja, uz odgovarajuće prilagodbe parametara i postupaka, mogla bi se potencijalno iskoristiti za potrebe umjerivanja kamera ručnih mjernih mobilnih sustava. Takav pristup zahtijevao bi sustavnu evaluaciju pogodnosti svake metode u odnosu na specifične karakteristike ručnih sustava, kao i razvoj hibridnih rješenja koja bi osigurala dostatnu razinu točnosti i ponovljivosti rezultata. Postojeće metode umjerivanja kamere mjernih mobilnih sustava mogu se podijeliti na:

1. Metode bazirane na mjernim metama (*eng. target-based*)
2. Metode bazirane na značajkama (*eng. feature-based*)
3. Metode bazirane na 3D uklapanju (*eng. 3D alignment-based*)
4. Metode bazirane na predikciji kretanja senzora (*eng. motion-based*)
5. Metode bazirane na ovisnosti (*eng. dependence-based*)

4.4.1. Metode bazirane na mjernim metama

Metode bazirane na mjernim metama svakako su najpoznatije i najbolje istražene. Iste podrazumijevaju korištenje umjetnih mjernih meta poznatog oblika ili uzorka. Najčešće se koriste dvodimenzionalni crno-bijeli uzorci u obliku križeva, meta ili šahovnica ([slika 4.6](#)). Određeni autori prikazali su uspješnu implementaciju trodimenzionalnih meta kao što su trobridi ([Gong i dr. 2013](#)) i poligonalne ploče ([Park i dr. 2014](#)). Neovisno o realizaciji mjerne mete, metoda umjerivanja temelji se na pronalaženju identičnih točaka (u ovom slučaju mjernih meta) na prikupljenim slikama i laserskim skenovima. Uspješno pronalaženje dovoljnog broja identičnih točaka na oba skupa podataka omogućuje postupak matematičkog izjednačenja i direktnog jednoznačnog izračuna relativnih kalibracijskih parametara. Razlog korištenja upravo mjernih meta poznatog oblika i uzorka leži u činjenici da su fotografije i skenova dva fundamentalno različita formata podataka. Prije svega, fotografija je izvorno dvodimenzionalni, dok je laserski sken trodimenzionalni podatak. Nadalje, fotografija ne sadrži podatak o mjerilu snimljenog objekta, dok laserski sken sadrži. Konačno, rezolucija fotografije obično je viša u odnosu na rezoluciju skena ([Mishra i Zhang. 2012](#)). Zbog navedenih je razloga vrlo teško definirati metodu za jednoznačan i precizan odabir identičnih točaka na fotografiji i skenu. Mjerne mete poznatog oblika i uzorka značajno olakšavaju, a do velike mjere i automatiziraju, postupak odabira navedenih identičnih točaka. Najveći nedostaci ovakvim metoda su potreba za odabirom, pripremom i postavljanjem mjernih meta te zahtjev za korištenjem programskih alata koji će

automatizirano (ili polu-automatizirano) detektirati mjerne mete i pronaći identične točke na fotografijama i skenovima. Svakako je nužno napomenuti da uspješnost ove metode ovisi o kvaliteti i rezoluciji korištenih senzora, što u slučaju ručnih mjernih mobilnih sustava može predstavljati značajan izazov.

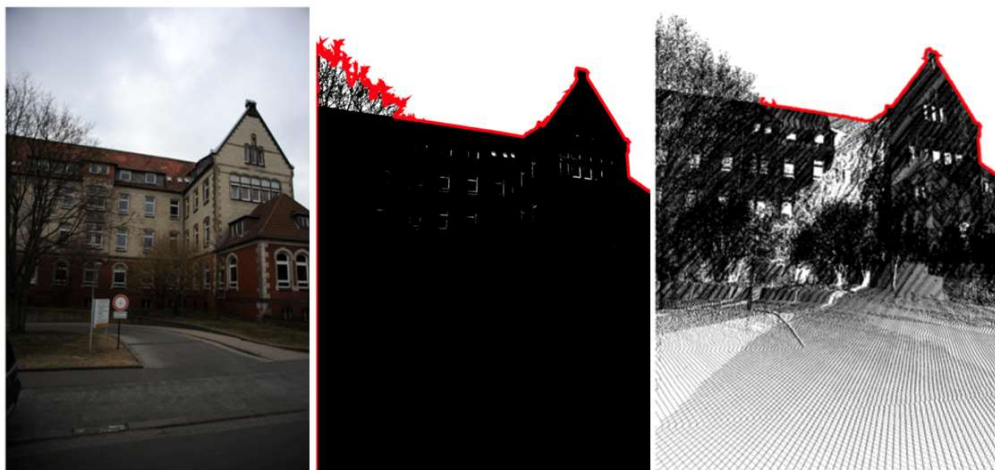


Slika 4.6. Mjerne mete s crno-bijelim uzorcima kakve se često koriste u svrhe umjerivanja. Razlika u izmjerenom intenzitetu između crnih i bijelih segmenata omogućuje automatsku detekciju središta mete ([URL 15](#)).

4.4.2. Metode bazirane na značajkama

Metode bazirane na značajkama objekata nastoje izračunati relativne kalibracijske parametre na način da detektiraju i povežu zajedničke karakteristične točke, linije ili oblike na 3D skenu i fotografijama. Za razliku od metoda baziranim na metama, karakteristike na kojima se temelje ove metode nisu umjetne mete. Dostupna literatura navodi kako su najčešće korištene značajke linije cesta i ravnine zgrada ([Cui i dr. 2017](#)), no neki su autori prezentirali uspješno umjerivanje pomoću oblika automobila ([Li i dr. 2017](#)), pa čak i linije neba, odnosno horizonta ([Hofmann i dr. 2014](#)) ([slika 4.7](#)). Neovisno o tipu značajke, većina ovakvih metoda bazira se na jednom ili na kombinaciji sljedećih pristupa ([Pentek i dr. 2020](#)):

- izdvajanje 3D karakteristika iz podataka laserskog skenera i fotogrametrijski rekonstruiranog 3D modela
- izdvajanje 3D karakteristika iz podataka laserskog skenera te 2D podataka iz fotografija
- izrada 2D slike iz podataka laserskog skenera te izdvajanje istih 2D karakteristika na oba seta podataka



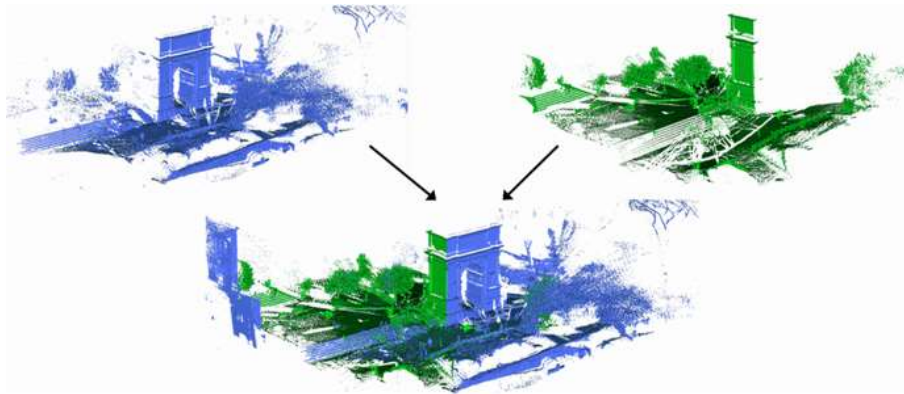
Slika 4.7. Izdvajanje linije neba na fotografiji i laserskom skenu. Lijeva fotografija prikazuje originalnu sliku, srednja fotografija prikazuje binarnu sliku (crni pikseli predstavljaju objekte, a bijeli nebo), dok desna fotografija prikazuje laserski sken prikazan pomoću intenziteta (Hofmann i dr. 2014).

Metode bazirane na značajkama dobro su prilagođene situacijama u kojima postoji dobar raspored i vidljivost značajki koje se koriste za umjerivanje, kao što su urbani krajolici i izgrađena područja. S druge strane, takve metode najčešće daju lošije rezultate u prirodnim krajolicima i područjima s izraženom vegetacijom. Konačno, točnost same metode izuzetno ovisi o kvaliteti izdvajanja karakteristika na oba seta podataka, što u slučaju ručnih mobilnih sustava može predstavljati prepreku, ponajviše zbog niže kvalitete slikovnih i laserskih senzora koje isti najčešće integriraju.

4.4.3. Metode bazirane na 3D uklapanju

Metode bazirane na 3D uklapanju koriste tzv. „Cloud to cloud“ metodu registracije (poravnanja) dvaju 3D oblaka točaka kako bi odredile parametre vanjske orijentacije kamere (Pentek i dr. 2020). U tom procesu, prvi oblak točaka je onaj dobiven laserskim senzorom, dok je drugi potrebno izračunati fotogrametrijskom 3D rekonstrukcijom na temelju prikupljenih fotografija. Registracija oblaka točaka podrazumijeva primjenu dobro poznatog ICP (eng. *Iterative Closest Point*) algoritma, koji omogućuje precizno poravnanje fotogrametrijskog oblaka točaka u odnosu na 3D sken mobilnog sustava (Abayowa i dr. 2015) (slika 4.8). Metode bazirane na 3D uklapanju su precizne i daju pouzdane podatke u velikom broju situacija, međutim one su bolje prilagođene zračnim mobilnim sustavima. Razlog tomu jest činjenica da pouzdanost fotogrametrijske rekonstrukcije izuzetno ovisi o uzdužnim i poprečnim preklapima između fotografija, koje je izuzetno teško postići s tla, a jednostavno iz zraka. Također, metode bazirane na 3D uklapanju zahtijevaju inicijalno grubo

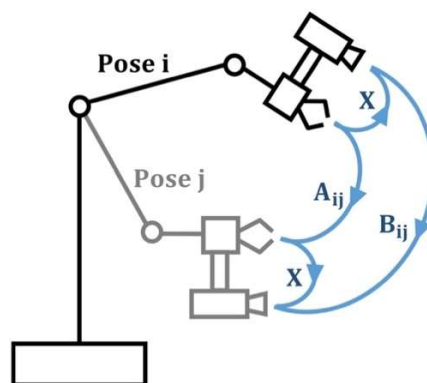
poravnanje između dva oblaka točaka te su izuzetno vremenski zahtjevne zbog potrebe za rekonstrukcijom gustog 3D oblaka točaka iz fotografija.



Slika 4.8. Registracija dva oblaka točaka primjenom ICP algoritma. Da bi povezivanje bilo uspješno, nužno je postojanje preklopa između dva oblaka točaka ([URL 16](#)).

4.4.4. Metode bazirane na predikciji kretanja senzora

Metode bazirane na predikciji kretanja senzora nastoje izračunati relativne kalibracijske parametre koristeći saznanja o kretanju čvrsto montiranih (*eng. rigidly mounted*) senzora na pokretnoj platformi ([Pentek i dr. 2020](#)). Čvrsto montiranje senzora podrazumijeva da je relativni odmak između senzora uvijek isti, bez obzira na kretanje platforme. Ove su metode usko povezane s problematikom pod nazivom ruka–oko kalibracija (*eng. hand-eye calibration*) ([slika 4.9](#)), gdje je kamera („oko“) kruto montirana na hvataljku robota („ruka“). Cilj kalibracije ruka–oko jest procijeniti nepoznatu transformaciju između koordinatnih sustava kamere i hvataljke na temelju gibanja koja izvrši hvataljka te gibanja kamere, pri čemu se potonje procjenjuje iz snimljenih slika ([Tsai i Lenz 1989](#)).

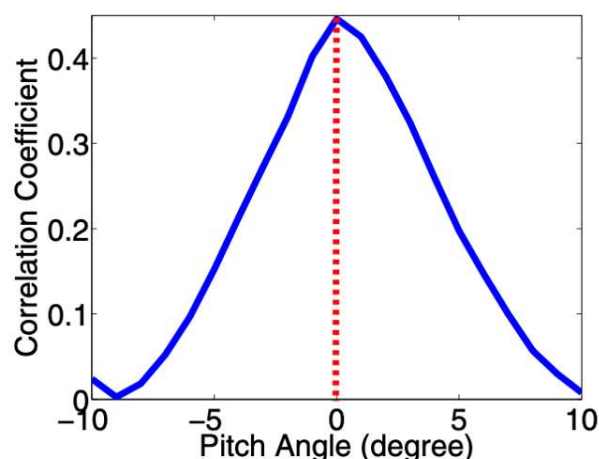


Slika 4.9. Vizualizacija problema kalibracije ruka-oko. Cilj je pronaći transformaciju X (matrica sa relativnim kalibracijskim parametrima) korištenjem poznatih transformacija A_{ij} između različitih položaja (i, j) te B_{ij} između opaženih promjena u slikama ([Zalović i dr. 2024](#)).

U ranijim istraživanjima, glavno ograničenje ovih metoda bila je potreba za korištenjem mjernih markera (meta) kako bi se procijenilo kretanje kamere (Shiu i dr. 1989, Wang 1992). Novija istraživanja potvrđuju iskoristivost vizualne odometrije i SfM algoritama kako bi se prevladalo to ograničenje (Schmidt 2005). Najčešći pristup metoda baziranih na predikciji kretanja senzora je procjena kretanja laserskog senzora pomoću ICP algoritma, dok se predikcija kretanja kamere ostvaruje praćenjem karakterističnih točaka na fotografijama. Prednosti ovih metoda su da ne zahtijevaju preklop između podataka laserskog i slikovnog senzora, kao i činjenica da ne trebaju inicijalne vrijednosti parametara kalibracije. S druge strane, iste podrazumijevaju veliku količinu kretanja kako bi se ustanovilo točno kretanje senzora, kao i preciznu vremensku sinkronizaciju oba senzora, što ih može učiniti nepraktičnima za primjenu kod ručnih mobilnih sustava.

4.4.5. Metode bazirane na ovisnosti

Metode bazirane na ovisnosti nastoje procijeniti parametre vanjske orijentacije kamere temeljem sličnosti signala laserskog skenera i optičkih fotografija. Najčešće je taj signal izražen u dvodimenzionalnom prostoru, stoga je preduvjet za korištenje ovakvih metoda generiranje 2D slike iz podataka laserskog senzora, na način da se laserski podaci interpoliraju i projiciraju u ravninu fotografije (Wang i dr. 2012). Temeljna pretpostavka metoda baziranih na ovisnosti je da su dva signala, od kojih je prvi dobiven pomoću laserskog, a drugi pomoću slikovnog senzora, na neki način korelirani (slika 4.10). Primjer takvog signala je refleksivnost kod laserskih senzora te siva skala dobivena iz RGB fotografija. Prema trenutno dostupnim istraživanjima i literaturi, ove metode su testirane na sensorima koji se koriste za potrebe tradicionalnih zemaljskih i zračnih mobilnih sustava, kao i na manjim 2D laserskim profilnim sensorima (*eng. 2D profiler*) i jednostavnim slikovnim sensorima. U oba slučaja je dokazano kako te metode mogu biti izuzetno brze, pouzdane i automatizirane. S druge strane, iste imaju i nekoliko značajnih nedostataka. Aktualna istraživanja potvrđuju potrebu za izuzetno uskim područjem pretraživanja, što znači da su ograničene na optimizaciju već precizno određenih relativnih kalibracijskih parametara (Pandey i dr. 2014). Konačno, pojave kao što su nejednolično osvjetljenje ili sjene mogu imati značajan utjecaj na korelaciju između korištenih signala, što može rezultirati podacima varijabilne kvalitete.



Slika 4.10. Koeficijent korelacije intenziteta lasera i sivih tonova fotografije raste kako se približava ispravnom kalibracijskom parametru (u ovom slučaju kutu kalibracije nagiba – „pitch“) (Pandey i dr. 2014)

4.4.6. Ograničenja postojećih metoda umjerivanja

Iako su postojeće metode umjerivanja kamere izuzetno iskoristive u praksi, nijedna od njih ne odgovara u potpunosti specifičnim potrebama ručnih mjernih mobilnih sustava. Zbog njihove male mase, ograničenih dimenzija, niže kvalitete senzora te izrazito promjenjive dinamike kretanja, takvi sustavi zahtijevaju pristupe koji se razlikuju od onih razvijenih za vozila ili letjelice. U nastavku je predstavljen sustavan pregled ograničenja koja pojedine metode čine neprikladnima za primjenu u kontekstu ručnih mobilnih sustava (Zalović i dr. 2024):

1. Metode bazirane na mjernim metama – zahtijevaju upotrebu umjetnih meta koje je potrebno pažljivo pripremiti i postaviti na terenu. Takva procedura može biti logistički zahtjevna i vremenski neefikasna, što umanjuje praktičnost i fleksibilnost. Dodatno, niža rezolucija senzora kod ručnih mjernih sustava može otežati pouzdano prepoznavanje meta i usklađivanje istih točaka u različitim skupovima podataka.
2. Metode bazirane na značajkama – dobro funkcioniraju u urbanim okruženjima gdje su dostupne brojne geometrijski jasne strukture, no u prirodnim ili vizualno siromašnim područjima njihova primjena postaje upitna. Ručni mobilni sustavi često rade upravo u takvim nepredvidivim uvjetima, pri čemu niža kvaliteta senzora dodatno otežava ekstrakciju značajki potrebnih za pouzdanu kalibraciju.
3. Metode bazirane na 3D uklapanju – ovise o kvaliteti fotogrametrijske rekonstrukcije oblaka točaka, kao i preklopu između prikupljenih fotografija. Uz to, ove metode su računski intenzivne i zahtijevaju početno grubo poravnanje između

fotogrametrijskog oblaka točaka i laserskog skena, što ih čini neprikladnima za čestu primjenu.

4. Metode bazirane na predikciji kretanja senzora - iako ne zahtijevaju preklop između podataka kamere i LiDAR senzora, ovise o točnosti vremenske sinkronizacije i količini gibanja (kretanja) mobilnog mjernog sustava kako bi se relativni kalibracijski parametri mogli pouzdano procijeniti. Međutim, nepravilna i nepredvidiva gibanja koja su tipična za ručne mobilne sustave često onemogućuju postizanje potrebne stabilnosti.
5. Metode bazirane na ovisnosti – iako su privlačne zbog brzine i potencijala za automatizaciju, izrazito su osjetljive na promjene svjetlosnih uvjeta. Sjene, neujednačeno osvjetljenje ili refleksije mogu značajno narušiti korelaciju između laserskih i slikovnih signala. Dodatni problem predstavlja usko definiran prostor pretrage parametara, što zahtijeva vrlo točne inicijalne procjene kalibracijskih parametara.

Sve predstavljene metode umjerivanja, zajedno sa njihovim prednostima i nedostacima, prikazane su u tablici 4.3.

Tablica 4.3. Prednosti i nedostaci postojećih metoda umjerivanja kamere

Metoda	Prednosti	Nedostaci
Metode bazirane na mjernim metama	Točne i računski efikasne	Detekcija meta usred kvalitete senzora
Metode bazirane na značajkama	Efikasne u urbanim okruženjima	Ekstrakcija značajki ograničena kvalitetom senzora
Metode bazirane na 3D uklapanju	Automatizirano poravnanje oblaka točaka	Preklop između slika; računski zahtjevne
Metode bazirane na predikciji kretanja senzora	Ne trebaju inicijalno poravnanje podataka senzora	Potreba za velikom količinom gibanja
Metode bazirane na ovisnosti	Brze i automatizirane	Utjecaj sjena i osvjetljenja na rezultate

5. RAZVOJ NOVE METODE UMJERIVANJA KAMERE

U prethodnom poglavlju dan je sustavan pregled postojećih metoda umjerivanja kamera u sklopu mobilnih mjernih sustava, pri čemu su analizirane njihove prednosti i ograničenja s posebnim naglaskom na njihovu primjenjivost u kontekstu ručnih mobilnih sustava. Iako se navedene metode odlikuju visokom pouzdanošću te širokom primjenom u različitim tehničkim i istraživačkim područjima, one se u slučaju ručnih mobilnih sustava suočavaju s nizom specifičnih izazova. Među najznačajnijima ističu se nelinearno i neregularno kretanje sustava, niža kvaliteta ugrađenih senzora te potreba za relativno čestim postupcima ponovnog umjerivanja, do koje dolazi zbog redovnog korištenja sustava ili u slučaju uklanjanja te ponovnog postavljanja kamere na ručni mobilni sustav. Dodatno, metoda umjerivanja predviđena za ručne mobilne sustave trebala bi biti dovoljno jednostavna i intuitivna za provedbu od strane krajnjeg korisnika, budući da se u ovom slučaju umjerivanje, za razliku od standardnih mobilnih sustava, ne obavlja u laboratorijskim ili strogo kontroliranim uvjetima, već u realnim i dinamičnim okruženjima.

Polazeći od ovih činjenica, kao i od sve šire primjene ručnih mjernih sustava temeljenih na SLAM tehnologiji, jasno se očituje potreba za razvojem specijalizirane metode umjerivanja kamere, dizajnirane isključivo za ovu kategoriju sustava. Takva metoda mora uvažiti specifičnosti ručnih platformi, uključujući mogućnost njihovog izravnog postavljanja na kontrolne točke, odsutnost zahtjeva za integracijom na pokretne platforme te činjenicu da kamere ugrađene u ručne sustave uglavnom ne posjeduju visoku rezoluciju ni znatna memorijska opterećenja. Upravo te značajke čine ih osobito pogodnima za brzo, automatizirano i računalno manje zahtjevno fotogrametrijsko procesiranje.

S obzirom na navedene zahtjeve, u nastavku se predstavlja novo razvijena metoda umjerivanja kamere, posebno oblikovana za potrebe SLAM ručnih mjernih mobilnih sustava s fiksno montiranom eksternom panoramskom kamerom. Riječ je o hibridnom pristupu koji integrira metodu baziranu na uporabi mjernih meta s metodom baziranom na predikciji kretanja senzora. Središnji dio metode čini kombinacija trajektorije ručnog mobilnog sustava s fotogrametrijskom obradom panoramskih snimaka, pri čemu se primjenjuju algoritmi rekonstrukcije scene iz gibanja (*eng. Structure from Motion - SfM*) te sferni model kamere. Na temelju SLAM trajektorije određuju se inicijalni položaji i rotacije fotografija, kao i

koordinate mjernih meta koje potom služe kao orijentacijske točke u postupku fotogrametrijskog procesiranja. Metoda se zasniva na tri osnovna koraka:

1. Kalibracijski sken (inicijalno prikupljanje podataka)
2. Obrada prikupljenih podataka
3. Izračun relativnih kalibracijskih parametara

U nastavku poglavlja slijedi detaljno obrazloženje svakog pojedinog segmenta nove metode umjerivanja. Razvijena metoda umjerivanja kamere u ovom poglavlju predstavlja središnji dio istraživanja te je izravno usmjerena na provjeru postavljenih hipoteza.

5.1. Kalibracijski sken

Prvi korak u predloženoj metodi umjerivanja kamere ručnih mobilnih sustava je tzv. kalibracijski sken. On obuhvaća inicijalno prikupljanje podataka, odnosno laserskih skenova i panoramskih fotografija, koji se potom koriste za izračun relativnih kalibracijskih parametara. Ti parametri definiraju transformaciju između koordinatnog sustava kamere (c-sustava) i koordinatnog sustava navigacijske jedinice mobilnog sustava (b-sustava). Za potrebe ovog istraživanja, relativni kalibracijski parametri označavaju se na sljedeći način:

- dx – translacija duž X osi b-sustava
- dy – translacija duž Y osi b-sustava
- dz – translacija duž Z osi b-sustava
- $d\varphi$ – rotacija (Eulerov kut) oko X osi b-sustava
- $d\theta$ – rotacija (Eulerov kut) oko Y osi b-sustava
- $d\psi$ – rotacija (Eulerov kut) oko Z osi b-sustava

Kao što je istaknuto u poglavlju 4, polazišna pretpostavka jest da se pomoću navedenih relativnih kalibracijskih parametara može jednoznačno transformirati trajektorija ručnog mobilnog sustava u trajektoriju kamere. Na taj je način, za svaki trenutak ekspozicije, moguće jednoznačno definirati položaj i rotaciju fotografije u koordinatnom sustavu kartiranja (m-sustavu).

Kako bi se navedeni parametri mogli pouzdano izračunati, nužno je inicijalno prikupljanje laserskih podataka i panoramskih fotografija na unaprijed pripremljenom području pogodnom za umjerivanje. Takvo područje mora zadovoljiti jasno definirane uvjete kako bi

se osiguralo da postupak umjerivanja rezultira stabilnim i točnim kalibracijskim parametrima.

5.1.1. Odabir područja za kalibracijski sken

S obzirom na to da je potrebno prikupiti i laserske skenove i fotografske zapise, područje na kojem se provodi umjerivanje mora biti promišljeno odabrano kako bi istodobno zadovoljilo zahtjeve oba tipa podataka.

Rad s ručnim mobilnim sustavima temeljenima na SLAM-u pretpostavlja okolinu pogodnu za pouzdanu lokalizaciju i kartiranje: prostor mora sadržavati dostatan broj geometrijski raznolikih i jasno definiranih oblika (osobito vertikalnih izgrađenih struktura) te biti lišen pokretnih objekata koji bi uvodili nedosljednosti u mjerenje (npr. ljudi, vozila). Dodatno, potrebno je izbjegavati visoko-reflektirajuće i transparentne površine (ogledala, stakla i sl.) jer mogu degradirati kvalitetu povratnog laserskog signala i destabilizirati SLAM rješenje.

S druge strane, kvaliteta fotografija primarno ovisi o uvjetima osvjetljenja. Stoga se umjerivanje preporučuje izvoditi u vanjskim, otvorenim i dobro osvijetljenim prostorima, po mogućnosti uz ujednačeno, difuzno osvjetljenje koje smanjuje zasićenje i jake sjene. Budući da se prikupljene fotografije planiraju koristiti za fotogrametrijsko procesiranje, potrebno je osigurati preklap među snimkama te odabrati okolinu s dovoljno teksturno raznolikih obilježja koja omogućuju robusnu softversku detekciju značajki. Kao i kod SLAM-a, fotogrametrijska obrada temeljena na algoritmima rekonstrukcije scene iz gibanja bit će otežana u prisutnosti staklenih i zrcalnih površina te pokretnih objekata, zbog čega takve scene valja svesti na minimum. Konačno, poželjno je održavati ujednačene fotografske postavke (ekspozicija, ISO, balans bijele) kako bi se osigurala radiometrijska konzistentnost skupa podataka i smanjio utjecaj zamućenja uslijed gibanja.

Parametri relevantni za rad sa SLAM tehnologijom i parametrizaciju snimanja kamerom sažeto su prikazani u tablici 5.1. U skladu s navedenim, područje predviđeno za umjerivanje treba zadovoljiti sljedeće kriterije:

- vanjski prostor sa ujednačenim, stabilnim osvjetljenjem
- prisutnost izgrađenih, osobito vertikalnih struktura raznolike geometrije i teksture
- izostanak pokretnih objekata i prolaznika tijekom snimanja

- minimalna prisutnost stakla, ogledala i drugih visoko reflektirajućih ili transparentnih površina

Dodatni aspekti, poput veličine područja, preporučenog trajanja snimanja, geometrije trajektorije ručnog mobilnog sustava te ciljanog stupnja preklopa među fotografijama detaljno su razmotreni u 6. i 7. poglavlju, gdje se daju smjernice za optimizaciju navedenih parametara u skladu s ciljevima umjerivanja.

Tablica 5.1. Parametri koji utječu na pouzdanost SLAM algoritama i kvalitete prikupljenih fotografija

Parametar	SLAM (laserski sken)	Kamera (fotogrametrija)
Geometrija prostora	Potreban dostatan broj različitih geometrijskih oblika	Potrebna teksturna raznolikost objekata i površina za ekstrakciju značajki
Pokretni objekti	Ne smiju biti prisutni (ljudi, vozila, životinje)	Ne smiju biti prisutni jer otežavaju primjenu SfM algoritama
Reflektirajuće površine	Izbjegavati stakla, ogledala i druge visoko-reflektirajuće objekte	Izbjegavati stakla, ogledala i druge visoko-reflektirajuće objekte
Osvjetljenje	Nije presudno ukoliko se SLAM temelji na LiDAR-u	Kritično – poželjno difuzno i ujednačeno prirodno svjetlo
Prostor snimanja	Otvoreni ili zatvoreni prostori	Isključivo otvoreni prostori
Radiometrijska konzistentnost	Nije relevantno	Nužne ujednačene postavke kamere

5.1.2. Postavljanje mjernih meta

Središnji dio kalibracijskog skena čini priprema i postavljanje umjetnih mjernih meta. One se u fotogrametrijskoj obradi panoramskih fotografija koriste kao orijentacijske točke te omogućuju transformaciju trajektorije mjernog mobilnog sustava u trajektoriju kamere. Matematički gledano, za definiranje transformacije dovoljne su tri orijentacijske točke, no u praksi je uvijek preporučljivo koristiti veći broj meta radi povećanja stabilnosti i robusnosti rješenja. Mjerne je mete potrebno jednoliko rasporediti po području u kojem se provodi

kalibracijski sken, pri čemu je nužno osigurati njihovu dobru vidljivost na što većem broju prikupljenih panoramskih fotografija. Dodatno, važno je voditi računa da mjerne mete ne budu postavljene u jednoj liniji niti unutar iste ravnine te da njihova pozicija omogućuje fizičko postavljanje ručnog mobilnog sustava izravno na njih.

Izravno postavljanje mobilnog sustava na orijentacijske točke predstavlja ključni element cijelog postupka. Manualno definiranje diskretne točke na oblaku točaka često je nedovoljno precizno za potrebe umjerivanja, budući da ovisi o vizualnoj interpretaciji i može biti opterećeno subjektivnom pogreškom. Čak i metode automatskog prepoznavanja centra mete na oblaku točaka nerijetko daju ograničene rezultate, ponajprije zbog viših razina šuma karakterističnih za laserske senzore integrirane u ručne mobilne sustave. Tipične vrijednosti šuma za takve LiDAR senzore iznose približno 1–3 cm na udaljenosti od 10 m, što je višestruko više od tradicionalnih terestričkih laserskih skenera, kod kojih je šum mjerenja u pravilu svega 1–2 mm na istoj udaljenosti. Stoga je razvidno da je za potrebe umjerivanja nužno osigurati pouzdaniji način definiranja koordinata mjernih meta na oblaku točaka.

Mnogi komercijalno dostupni ručni mobilni sustavi opremljeni su tzv. pločom za georeferenciranje ([slika 5.1.a](#)). Radi se o postolju koje primarno omogućuje sustavu stabilno uspravno stajanje, no ima i izrazito važnu sekundarnu funkciju. Naime, ploča sadrži kružni otvor koji omogućuje da se mobilni sustav precizno postavi na geodetsku točku (npr. bolcnu ili marker) na način da centar otvora koincidira s centrom točke ([slika 5.1.b](#)). Poznavanjem položajnih odnaka između referentne točke mobilnog sustava (najčešće ishodišta b-sustava, odnosno IMU-a) i centra ploče za georeferenciranje, moguće je jednoznačno odrediti koordinate točke u globalnom m-sustavu na koju je sustav bio postavljen.

Za ispravno određivanje koordinate točke dovoljno je osigurati da mobilni sustav ostane statičan određeni broj sekundi. Na taj način moguće je u trajektoriji pouzdano detektirati segmente s približno nultom brzinom (tzv. statičke položaje), čime se definiraju koordinate mjernih meta. Važno je naglasiti da je mjerne mete moguće, pa čak i poželjno zbog bolje vidljivosti na fotografijama, postavljati na vertikalne površine, budući da SLAM sustavi nisu ograničeni smjerom ili iznosom rotacije ([slika 5.1.b](#)). Konačno, definiranje položaja centra mjernih meta na snimljenim panoramskim fotografijama moguće je u potpunosti automatizirati u slučaju korištenja crno-bijelih meta poznatog uzorka.

Kombinacijom metoda izravnog postavljanja mobilnog sustava na mjerne mete, automatizirane detekcije statičkih položaja u trajektoriji te automatizirane detekcije crno-bijelih mjernih meta na fotografijama omogućuje se precizno definiranje koordinata orijentacijskih točaka u m-sustavu, kao i efikasno određivanje pikselnih koordinata centra mete na fotografijama. Time su predstavljeni ključni preduvjeti za konačan izračun relativnih kalibracijskih parametara.

Navedeni principi čine osnovu metodologije, dok su dodatni aspekti, uključujući optimalan broj i raspored točaka, kao i preporučeni oblik mjernih meta, detaljno razrađeni u 6. i 7. poglavlju.



a)



b)

Slika 5.1. Prikaz ploče za georeferenciranje (a) ([URL 17](#)), kao i njezine primjene za potrebe postavljanja na mjernu metu na vertikalnoj površini (b). Ploča se postavlja na način da centar otvora koincidira sa centrom mete

5.1.3. Sinkronizacija vremena kamere u kontekstu kalibracijskog skena

Jedan od temeljnih preduvjeta za svako umjerivanje kamere jest poznavanje točnog vremena ekspozicije te njegovo usklađivanje s vremenskim oznakama ostalih senzora. Bez precizne sinkronizacije vremena okidanja fotografija ili snimanja videozapisa s referentnim vremenom ručnog mobilnog mjernog sustava, nemoguće je osigurati ispravno orijentirane panoramske snimke.

U slučajevima korištenja tvornički integrirane kamere, tj. kamere koju je proizvođač sustava projektirao i implementirao kao sastavni dio hardverske i softverske arhitekture, vremenska je sinkronizacija u pravilu unaprijed osigurana. Takvi sustavi najčešće se temelje na

hardverskim metodama sinkronizacije (poglavlje 4.2), čime se korisnika u potpunosti oslobađa potrebe dodatnih postupaka. Tijekom izvođenja kalibracijskog skena s tvornički integriranom kamerom, vremensko usklađivanje ne zahtijeva posebnu pažnju korisnika.

S druge strane, brojni ručni mobilni mjerni sustavi nemaju integriranu kameru ili raspolazu kamerom čije tehničke značajke nisu dostatne za složenije primjene. U takvim je slučajevima moguće koristiti korisnički integriranu, tj. naknadno dodanu fiksno montiranu kameru. Budući da ovakva rješenja ne uključuju tvornički implementiranu vremensku sinkronizaciju, odgovornost za njezinu realizaciju u potpunosti prelazi na korisnika.

U sklopu ovog istraživanja razvijena je nova metoda vremenske sinkronizacije, osmišljena s ciljem da omogući pouzdano umjerivanje neovisno o vrsti korištene kamere. Predloženi pristup temelji se na softverskom, hibridnom modelu koji kombinira kinematičku analizu i vizualnu sinkronizaciju (poglavlje 4.2) Načelo metode zasniva se na usklađivanju vremena kamere s referentnim vremenom mobilnog sustava putem detekcije inicijalnog pomaka uređaja neposredno nakon završetka procesa inicijalizacije. Pretpostavlja se da u trenutku kada korisnik započinje snimanje, dolazi do naglog mikro-pomaka prilikom podizanja uređaja. Taj se pomak identificira dvostrukim postupkom:

1. analizom IMU mjerenja, gdje se bilježi prijelaz iz statičkog u dinamičko stanje
2. analizom videozapisa s kamere, gdje se promjena prepoznaje kroz naglu promjenu pikselnih koordinata centra mjerne mete postavljene u vidnom polju tijekom inicijalizacije ([slika 5.2](#)).



Slika 5.2. Segment panoramske slike dobivene razdvajanjem panoramskog videozapisa na zasebne sličice. Snimak prikazuje mjernu metu postavljenu u neposrednoj blizini ručnog mobilnog sustava, a koja se koristi kako bi se detektirao inicijalni mikro-pomak kamere

Za uspješnu provedbu ove metode potrebno je ispuniti nekoliko tehničkih preduvjeta. Prije svega, mjerna meta mora biti statična i jasno vidljiva kameri. Udaljenost kamere od mete može varirati, ali razlučivost snimke mora biti dovoljna za preciznu identifikaciju njezina centra. Nadalje, zbog ograničene vremenske rezolucije intervalnog snimanja fotografija (npr. jedne fotografije u sekundi), mikro-pomak nije moguće pouzdano detektirati tim pristupom. Stoga je nužno koristiti videozapis s visokom frekvencijom snimanja (npr. 60 sličica u sekundi). Povećanje broja sličica, međutim, dovodi do smanjenja prostorne razlučivosti pojedinačnih snimaka izdvojenih iz inicijalnog videozapisa, zbog čega je potrebno odabrati optimalan kompromis između vremenske i prostorne razlučivosti. Konačno, preporučuje se automatizirana detekcija centra mete na svakoj sličici videozapisa. Time se izbjegavaju pogreške povezane s ručnim označavanjem i povećava preciznost određivanja trenutka kada dolazi do značajnog pomaka.

Detaljan opis metoda detekcije mikro-pomaka na temelju IMU podataka i videozapisa, kao i analiza razine točnosti sinkronizacije koja se može postići u ovisnosti o frekvenciji snimanja, dan je u narednim poglavljima.

5.2. Obrada podataka kalibracijskog skena

Nakon uspješnog provođenja kalibracijskog skena, korisnik raspolaže neobrađenim mjerenjima ručnog mobilnog sustava (sirovi laserski sken) te pripadajućim fotografijama ili videozapisima. Dodatno, u slučaju korištenja korisnički integrirane kamere, pretpostavlja se da je prilikom inicijalizacije mobilnog sustava u njezinom vidnom polju bila postavljena mjerna meta. Time se omogućuje usklađivanje vremena kamere s referentnim vremenom ručnog sustava. Nadalje, vrijedi i pretpostavka da je korisnik tijekom snimanja sustav postavio na najmanje tri orijentacijske točke (mjerne mete), čime je osigurana jednoznačna transformacija trajektorije mobilnog sustava u trajektoriju kamere.

Postupak umjerivanja kamere nastavlja se obradom prikupljenih podataka, koja obuhvaća sljedeće korake:

- SLAM obradu laserskog skena
- konstruiranje panoramskih fotografija
- detekciju statičkih položaja u trajektoriji
- izračun koordinata mjernih meta u m-sustavu

- detekciju mjernih meta na fotografijama
- sinkronizaciju vremena korisnički integrirane kamere
- izračun inicijalnih položaja i rotacija panoramskih fotografija

Tek nakon uspješnog dovršetka svih navedenih faza moguće je pristupiti konačnom izračunu relativnih kalibracijskih parametara.

5.2.1. SLAM obrada laserskog skena

Većina suvremenih komercijalno dostupnih ručnih mobilnih SLAM sustava temelji se na algoritmima koji primjenjuju metode grafičke optimizacije (SLAM temeljen na grafu, poglavlje 2.2.4). Slijedom toga, u nastavku se daje pregled postupaka SLAM procesiranja kod ručnih sustava koji se oslanjaju na grafičke metode.

Sirovi podaci ručnih mobilnih LiDAR sustava sastoje se od sekvenci laserskih zraka, mjerenja inercijalnih senzora te pomoćnih informacija poput intenziteta refleksije. Prvi korak u SLAM obradi je vremenska sinkronizacija i korekcija gibanja (*eng. deskewing*), čime se osigurava da su sve točke ujednačeno prostorno usklađene (Zhang i Singh 2014). Istodobno se provodi filtriranje šuma, uklanjanje dinamičkih objekata kada je moguće te smanjenje gustoće točaka (*eng. downsampling*) radi smanjenja računske složenosti (Cadena i dr. 2016). Time se priprema niz konzistentnih točaka spremnih za postupke lokalne registracije (lokalni SLAM).

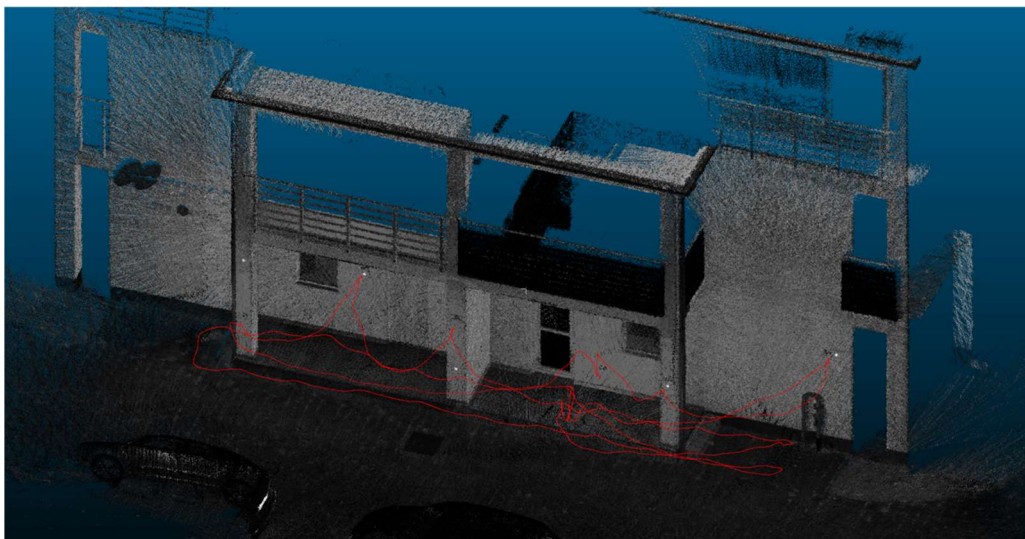
U fazi lokalnog SLAM-a gradi se kratkoročna odometrija i podmape. Novi ključni okvir registrira se u odnosu na prethodni ili na akumuliranu podmapu, najčešće metodama poput ICP (Besl i McKay 1992) ili NDT (*eng. Normal Distributions Transform*) (Magnusson 2009). Odabir ključnih okvira temelji se na kretanju i promjeni scene, dok IMU podaci pomažu u predikciji položaja, stabiliziraju poravnanja i smanjuju *drift* (Zhang i Singh 2014). Ishod ove faze su relativne transformacije između uzastopnih položaja i lokalne podmape koje sažimaju okolni prostor.

Sljedeći korak u obradi je globalni SLAM, koji rješava problem akumuliranog *drifta* kroz optimizaciju faktorskog grafa, u kojem čvorove čine položaji uređaja, a rubove faktori izvedene iz lokalne odometrije, IMU-a i detektiranih zatvaranja petlji (Grisetti i dr. 2010). Petlje se prepoznaju pomoću deskriptora scene (Kim i Kim 2018), a potom se geometrijski verificiraju dodatnom registracijom. Njihovo uključivanje u graf omogućuje globalnu

redistribuciju pogrešaka, pri čemu se optimizacija provodi nelinearnim metodama ili inkrementalnim pristupima (Kaess i dr. 2012). Rezultat je globalno usklađena trajektorija koja uklanja akumulirane pogreške i vraća konzistenciju na cijeloj mapi (slika 5.3).

Konačni oblak točaka rekonstruira se tako da se svi skenovi transformiraju u koordinatni sustav kartiranja prema optimiziranoj trajektoriji. U ovoj fazi često se primjenjuje dodatno filtriranje preklapanja između podmapa, a pojedinim se točkama mogu pridružiti težine temeljene na procjeni nesigurnosti (Cadena i dr. 2016). Time se dobiva jedinstven i konzistentan oblak točaka koji vjerno opisuje skenirani prostor (slika 5.3).

Vrlo je važno naglasiti da je kod komercijalno dostupnih ručnih mobilnih mjernih sustava cjelokupni postupak obrade u potpunosti automatiziran, pri čemu korisnik ima minimalan utjecaj na konačni ishod procesiranja. Time se osigurava ponovljivost i jednostavnost uporabe u terenskim uvjetima, ali se istodobno smanjuje mogućnost prilagodbe algoritamskih parametara specifičnim scenarijima. Različiti proizvođači implementiraju vlastite (*eng. proprietary*) varijante algoritama, no temeljna načela obrade u pravilu se oslanjaju na ranije opisane koncepte, uključujući grafički SLAM, robusne metode registracije i globalne deskriptore scene.



Slika 5.3. Oblak točaka (prikazan pomoću intenziteta) i trajektorija (crvena linija) mobilnog sustava nakon uspješne SLAM obrade

5.2.2. Konstruiranje panoramskih fotografija

Konstruiranje panoramskih fotografija u kontekstu mobilnih mjernih sustava najčešće se temelji na kamerama s dvostrukom lećom tipa riblje oko, pri čemu se za svaku leću prikuplja

zasebna hemisferna projekcija okoline (slika 5.4). U slučaju tvornički integriranih kamera, parametri unutarnje orijentacije obje leće unaprijed su poznati jer se provodi umjerivanje tijekom proizvodnje. To omogućuje geometrijsku korekciju distorzija koje nastaju zbog projekcije leće, nakon čega se provodi konstruiranje panorame. Iako su poznati parametri unutarnje orijentacije temeljna osnova za transformaciju hemisfernih projekcija u jedinstvenu panoramu, u postupak se uobičajeno uključuje i poravnanje temeljeno na značajkama (poglavlje 3.2.3). Ovakav hibridni pristup osigurava da se lokalne nedosljednosti, primjerice na prijelazima između dviju hemisfera, dodatno kompenziraju, čime se dobiva konzistentna sferna panorama koja u potpunosti obuhvaća vidno polje kamere.



a)



b)



c)

Slika 5.4. Prikaz fotografija prikupljenih pomoću kamere sa dvostrukom lećom tipa riblje oko. Fotografija a) prikupljena je prednjom, a fotografija b) stražnjom lećom. Fotografija c) predstavlja panoramu konstruiranu iz fotografija a) i b)

Kod korisnički integriranih kamera princip je sličan, no parametri unutarnje orijentacije najčešće nisu izravno dostupni korisniku. Proizvođači kamera u svojim softverskim rješenjima za konstruiranje panorama obično koriste unaprijed definirane parametre specifične za pojedini model kamere, kojima se provodi osnovna geometrijska korekcija. Budući da takvi parametri ne mogu pokriti sve varijacije u proizvodnji i uvjetima snimanja, konstruiranje panorame dodatno se oslanja na poravnanje temeljeno na značajkama. Time se postiže hibridna metoda u kojoj se najprije provodi transformacija dvostrukih projekcija leća tipa riblje oko u sfernu domenu, a zatim se slike dodatno usklađuju prepoznavanjem i podudaranjem značajki u zonama preklapanja. Rezultat takvog postupka je također sferna panorama koja vjerno prikazuje prostor u punom kutu gledanja, iako korisniku formalna kalibracija unutarnje orijentacije nije dostupna.

Kao što je već navedeno, u slučaju korištenja korisnički integrirane kamere očekuje se prikupljanje videozapisa, primarno radi sinkronizacije vremena kamere sa vremenom ručnog mobilnog sustava (poglavlje 5.1.3). Konkretno se radi o videozapisu u dvostruko projekciji leće tipa riblje oko, koji se najprije transformira u panoramski video primjenom opisane metode konstruiranja panorama. Kako bi se takav video mogao integrirati s trajektorijom mobilnog sustava, potrebno ga je razdvojiti na pojedinačne sličice. Za te je potrebe razvijena vlastita Python skripta koja omogućuje korisniku da definira parametar n , pri čemu se iz videa izdvaja svaka n -ta sličica. Na taj način korisnik može prilagoditi gustoću izdvojenih slika specifičnim zahtjevima analize. Primjerice, odabirom $n=1$ dobiva se cjelokupni niz sličica, dok veće vrijednosti n rezultiraju rjeđim nizom slika koje ipak ostaju vremenski pravilno raspoređene. Tako se osigurava fleksibilna kontrola nad volumenom generiranih podataka uz očuvanje konzistentnosti u vremenskoj domeni.

Pri konstruiranju panorame iz videozapisa važno je napomenuti da sve oblike stabilizacije slike – bilo optičke, elektroničke ili digitalne – treba isključiti. Takvi algoritmi naknadno mijenjaju orijentaciju svake sličice u odnosu na senzor kamere, čime se narušava stvarni prostorno-vremenski odnos između snimljenih slika i trajektorije mobilnog sustava. Budući da metode vremenske sinkronizacije i umjerivanja kamere u ovom radu pretpostavljaju konzistentnost unutarnje i vanjske orijentacije kroz sve sličice, svaka automatska korekcija kadra može uzrokovati pogreške u orijentaciji panoramskih slika.

5.2.3. Detekcija statičkih položaja u trajektoriji

Tijekom kalibracijskog skeniranja ručni mobilni mjerni sustav postavlja se statički na svaku pojedinu mjernu metu, pri čemu se koristi ploča za georeferenciranje. Na svakoj meti sustav se zadržava unaprijed definirano vremensko razdoblje, čime se omogućuje pouzdana identifikacija statičkih položaja unutar rekonstruirane trajektorije te izračun referentnih koordinata mjernih meta u m-sustavu. Iako duljina statičkog intervala nije strogo definirana, preporučuje se da on bude dovoljno dug da se jasno razlikuje od slučajnih statičkih segmenata koji nastaju tijekom kretanja operatera (primjerice kratkih zaustavljanja od jedne do dvije sekunde). Kao optimalan raspon pokazuje se zadržavanje sustava u statičkom položaju od približno četiri do sedam sekundi, što omogućuje pouzdanu detekciju, a pritom ne produžuje značajno ukupno trajanje kalibracijskog postupka.

Nakon prikupljanja terenskih podataka i provedene SLAM obrade laserskog skena, dobiva se trajektorija ručnog mobilnog mjernog sustava. Iako se trajektorija može zapisivati u različitim formatima, uobičajeno sadrži najmanje sljedeće informacije:

- vremenski trenutak (vrijeme) najčešće izražen u sekundama
- položajne koordinate mobilnog sustava (x, y, z)
- rotacije mobilnog sustava (izražene Eulerovim kutovima ili kvaternionima)

Takav zapis omogućuje potpuno definiranje trajektorije bilo kojega mobilnog mjernog sustava. Primjer zapisa trajektorije u tekstualnom obliku prikazan je na [slici 5.5](#).

```
traj.txt
//world_time x y z q0 q1 q2 q3 r g b nx ny nz roll pitch yaw
1749385967.77485 0.0156368042153629 0.0170066605750409 -0.000151393777129708 0.694979171323149 0.124141201464116
-0.130294136998607 0.696143915717019 0 0 0 -0.00318582705207149 0.935261301911857 0.353943706897204 -0.00946892996721551
-0.361784422508338 1.57420266331678
1749385967.78085 0.015770062470385 0.0168689188813792 -0.000202801697011695 0.695028842647899 0.124121460473796
-0.130248439288701 0.696106396321879 0 0 0 -0.00305754187475049 0.935294792972898 0.353856329144287 -0.00940627077974674
-0.361690998669103 1.57406538271824
1749385967.79283 0.0159123402268591 0.0167318905550489 -0.000250164562827696 0.695108320752693 0.124087753326748
-0.130187949093858 0.696044359078807 0 0 0 -0.00285330378938431 0.93534299099076 0.353730614821428 -0.00932748894141371
-0.361556591361164 1.57384686009247
1749385967.8049 0.0160641964572309 0.0165918147128724 -0.000294897552723531 0.695139227780325 0.124093958483358
-0.130073337355511 0.696033814105396 0 0 0 -0.00276428693781106 0.935398185441265 0.353585341029456 -0.00913600964806817
-0.361401280580211 1.57375151628944
1749385967.81086 0.016214961159022 0.0164529936641017 -0.00033663236232935 0.695159932980431 0.124085450013991
-0.129947850227549 0.696038091554412 0 0 0 -0.00271093734693895 0.935466311205912 0.353405477345085 -0.00895694250939044
-0.361209002717417 1.57369427162259
1749385967.82283 0.0163484368892883 0.0163128997645086 -0.000373651672911347 0.695206662924408 0.124022544139429
-0.129878260978207 0.696015618859211 0 0 0 -0.00261220874138757 0.935533726750914 0.353227720425566 -0.00892760619360957
-0.361018990749797 1.57358853179839
1749385967.83492 0.0164674391386548 0.0161607150748591 -0.000409158896293204 0.695263647259043 0.123930774112025
-0.129872668889046 0.695976087536904 0 0 0 -0.0024992480560988 0.935583305764868 0.353097198704888 -0.00902912836655114
-0.360879479184298 1.57346764649017
1749385967.84099 0.0165734048767805 0.0159887652522674 -0.00044751712629269 0.695278536428662 0.123823421984413
-0.129941885579258 0.695967401048207 0 0 0 -0.00251103389937746 0.935602694142653 0.353045738427429 -0.00928512835037728
-0.360824476535737 1.5734801881027
```

Slika 5.5. Primjer tekstualnog zapisa trajektorije ručnog mjernog mobilnog sustava

Za potrebe detekcije statičkih položaja u rekonstruiranoj trajektoriji kalibracijskog skena razvijena je Python skripta s minimalističkim korisničkim sučeljem (slika 5.6). Ulaz predstavlja tekstualna datoteka trajektorije mobilnog sustava koja sadrži vremenske oznake, trodimenzionalne koordinate (x, y, z) i rotacije u obliku kvaterniona (q_w, q_x, q_y, q_z) . Podaci se poduzorkuju i filtriraju, a statički intervali detektiraju se usporedbom uzastopnih točaka na temelju euklidske udaljenosti:

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2}, \quad (5.1)$$

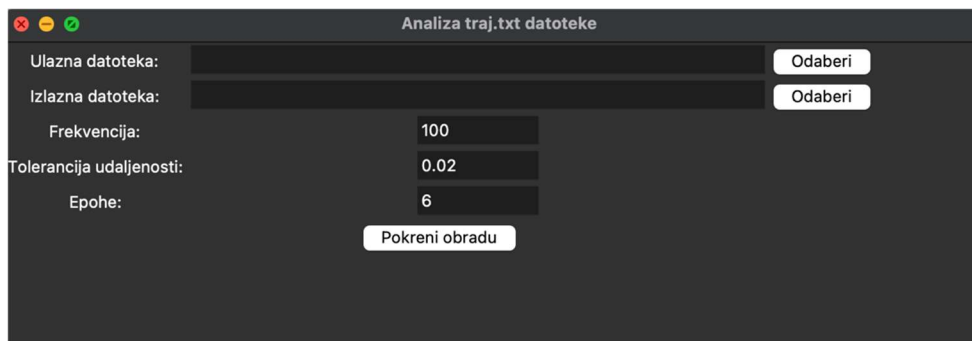
pri čemu se interval klasificira kao statičan ako vrijedi $d_i \leq d_{tol}$, gdje je d_{tol} unaprijed definirana prostorna tolerancija (primjerice 1 cm). Segment se prihvaća kao valjan kada broj uzastopnih uzoraka zadovoljava zadani prag.

Za svaki prihvaćeni statički segment računa se reprezentativna točka pomoću medijana koordinata. Procjena prosječne rotacije temelji se na metodi vlastitog vektora (*eng. eigenvector method*) za usrednjavanje kvaterniona (Markley i dr. 2007). Od skupa kvaterniona $\{q_k\}$ definira se simetrična matrica:

$$M = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N q_k q_k^T, \quad (5.2)$$

a prosječni kvaternion definira se kao vektor koji odgovara najvećoj vlastitoj vrijednosti matrice M . Time se dobiva stabilna i robusna procjena rotacije koja minimizira devijacije unutar promatranog segmenta.

Uz koordinate i rotacije, bilježe se i vremenske oznake početka i kraja statičkog intervala (t_1, t_2) te njegovo trajanje $\Delta t = t_2 - t_1$. Rezultati se zapisuju u izlaznu datoteku te su na taj način spremni za izračun konačnih koordinata mjernih meta.



Slika 5.6. Prikaz sučelja Python skripte za detekciju statičnih položaja u trajektoriji

5.2.4. Izračun koordinata mjernih meta u m-sustavu

Nakon što su u trajektoriji identificirani statični položaji, moguće je pristupiti određivanju koordinata centara mjernih meta u koordinatnom sustavu kartiranja (m-sustavu). Za provedbu takvog postupka nužno je transformirati koordinate detektiranih statičkih položaja s referentne točke ručnog mobilnog sustava, koja je u pravilu definirana u središtu inercijalne mjerne jedinice, na referentnu točku ploče za georeferenciranje. Transformacija se može provesti jedino ako je poznat položajni odmak između referentne točke IMU-a i referentne točke ploče, izražen u b-sustavu (slika 5.7). Taj odmak uobičajeno određuje proizvođač sustava, te je za većinu komercijalno dostupnih ručnih mobilnih sustava naveden u službenoj tehničkoj dokumentaciji.



Slika 5.7. Prikaz položajnih odmakâ između referentne točke mobilnog sustava i referentne točke ploče za georeferenciranje

Za potrebe transformacije koordinata statičkih položaja na ploču za georeferenciranje razvijena je nova Python skripta. Ulaz skripte čini skup statičnih položaja dobiven prethodno opisanom skriptom. Za svaki položaj zadane su koordinate referentne točke mobilnog sustava $p_i = (x_i, y_i, z_i)$ te pripadna rotacija u obliku jediničnog kvaterniona $q_i = [w_i, x_i, y_i, z_i]$. Kao što je već navedeno, poznavanje položajnog odmakâ $o = (o_x, o_y, o_z)$, definiranog u b-sustavu između referentne točke senzora i referentne točke ploče za georeferenciranje, nužno je za uspješan izračun.

Svaki statični trenutak izdvojen iz trajektorije moguće je transformirati u koordinate centra ploče za georeferenciranje pomoću izraza:

$$p'_i = p_i + R(q_i) o, \quad (5.3)$$

pri čemu $R(q_i)$ označava rotacijsku matricu koja preslikava vektore iz b-sustava u m-sustav. Rotacijska matrica iz kvaterniona $q = [w, x, y, z]$ dana je standardnim zatvorenim oblikom:

$$R(q) = \begin{bmatrix} 1 - 2(y^2 + z^2) & 2(xy - wz) & 2(xz + wy) \\ 2(xy + wz) & 1 - 2(x^2 + z^2) & 2(yz - wx) \\ 2(xz - wy) & 2(yz + wx) & 1 - 2(x^2 + y^2) \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Skripta provodi izračun tako da vektor položajnog odmak o , zadanog u b-sustavu, rotira u m-sustav, a zatim ga pribraja izvornom statičkom položaju p_i . Primjenom jednadžbe 5.3 po svim statičnim položajima dobiva se niz koordinata $\{p'_i\}$ koje jednoznačno opisuju položaje referentne točke ploče za georeferenciranje, odnosno koordinate centara mjernih meta u m-sustavu.

5.2.5. Detekcija mjernih meta na fotografijama

Kako bi se uspješno provela transformacija trajektorije mobilnog sustava u trajektoriju kamare, nužno je na panoramskim fotografijama prikupljenima tijekom kalibracijskog skena označiti centre svih mjernih meta. To je moguće napraviti manualno, ali time je takav postupak dugotrajniji i može dovesti do varijabilne točnosti, što može negativno utjecati na točnost umjerivanja. S obzirom na to da su u ovom radu, a za potrebe umjerivanja, primarno korištene kružne mete ([slika 5.2](#)), u nastavku je dan pregled postupka detekcije centra crno-bijele kružne mete.

Automatska detekcija središta crno-bijele mete predstavlja temeljni postupak u nizu fotogrametrijskih aplikacija. Osnovni cilj takve detekcije jest pouzdano i precizno određivanje položaja središta kružnih meta, pri čemu se očekuje subpikslna točnost i robusnost na varijacije u osvjetljenju, kontrastu i distorzijama leće. Postupak se u pravilu sastoji od nekoliko uzastopnih faza koje počinju procesiranjem slike i završavaju validacijom detektiranog centra.

Prvi korak tipično uključuje pretvorbu ulazne slike u sivu skalu, čime se reduciraju podaci i povećava kontrast između mete i pozadine. Konverzija se provodi ponderiranjem kanala u

skladu s ljudskom percepcijom boje. U slučaju neujednačenog osvjetljenja primjenjuju se metode izjednačavanja kontrasta poput CLAHE algoritma (*eng. Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization*), dok se u situacijama kada kamera ima poznate parametre unutarnje orijentacije prethodno provodi i ispravak radijalnih i tangencijalnih distorzija leće, budući da one mogu uzrokovati sustavna odstupanja između stvarnog i izmjerene položaja centra kružnice ([Gonzalez i Woods 2008](#)).

Sljedeća faza je segmentacija, odnosno izdvajanje mete od pozadine. Najčešće se koristi binarizacija slike, bilo globalna ili adaptivna, koja je pogodna kod varijabilnih uvjeta osvjetljenja. Nakon binarizacije često se primjenjuju morfološke operacije kako bi se uklonili šum i nepotpuni rubovi. Dobivene komponente analiziraju se metodama prepoznavanja povezanih komponenti ili pronalaženja kontura. Za svaku potencijalnu metu računaju se osnovne mjere, poput površine A , opsega P te kružnosti C , definirane izrazom:

$$C = \frac{4\pi A}{P^2}, \quad (5.5)$$

pri čemu vrijednosti bliže jedinici ukazuju na veću sličnost savršenoj kružnici. Ovakvi pokazatelji koriste se za filtriranje nepravilnih objekata i odabir kandidata čija je geometrija u skladu s očekivanim oblikom mete ([Zunić i dr. 2010](#)).

Nakon što je meta izdvojena, centroid se može inicijalno procijeniti korištenjem površinskih momenata slike. Za binarnu funkciju $f(x, y)$ koja poprima vrijednost 1 za piksele unutar objekta, a 0 za piksele u pozadini, momenti se definiraju kao

$$M_{pq} = \sum_x \sum_y x^p y^q f(x, y), \quad (5.6)$$

gdje su p i q pozitivni cijeli brojevi koji označavaju red momenta po osi x i y . Najvažniji su momenti prvog reda: M_{10} predstavlja sumu svih x -koordinata piksela unutar objekta, a M_{01} sumu svih y -koordinata piksela unutar objekta. Moment nultog reda M_{00} jednak je površini objekta izraženoj u pikselima. Na temelju tih vrijednosti centroid (težište) se određuje kao:

$$\bar{x} = \frac{M_{10}}{M_{00}}, \quad \bar{y} = \frac{M_{01}}{M_{00}}, \quad (5.7)$$

što predstavlja prosječnu koordinatu svih piksela unutar objekta. Ova metoda jednostavna je i računalno učinkovita, no njezina točnost ograničena je razlučivošću piksela ([Fachruddin i](#)

[Buliali 2022](#)). Kako bi se postigla subpikselska preciznost, centroid se dodatno optimizira metodama uklapanja. Najčešći pristup temelji se na prilagodbi kružnice rubnim točkama konture, pri čemu se rješava sustav jednačbi oblika:

$$x^2 + y^2 + ax + by + c = 0, \quad (5.8)$$

a položaj centra kružnice računa se kao $x_c = -a / 2$, $y_c = -b / 2$. Alternativno se koristi optimizacija temeljena na metodi najmanjih kvadrata ili nelinearnim postupcima poput Levenberg–Marquardt algoritma. Ovakve metode pokazale su se osobito pouzdane u situacijama kada meta zauzima značajan broj piksela na slici te je rub dobro definiran ([Hanić dr. 2025](#)).

Konačna detekcija mora biti validirana uporabom mjera kvalitete. Uobičajeno se provjerava kružnost, kontrast između crnih i bijelih dijelova mete, broj rubnih točaka uključenih u uklapanje te pogreška između stvarnih rubnih točaka i idealiziranog modela kružnice. Ukoliko vrijednosti odstupaju od unaprijed definiranih pragova, detekcija se smatra nepouzdanom i isključuje se iz daljnje obrade. Time se osigurava da u konačnu analizu ulaze isključivo kvalitetni podaci koji zadovoljavaju kriterije geometrijske pravilnosti i kontrastne jasnoće.

Metodologija detekcije središta crno-bijelih meta, dakle, predstavlja kombinaciju postupaka procesiranja, segmentacije, analize oblika, inicijalne procjene centra pomoću momenata te subpikselsne optimizacije uklapanjem kružnice. Pouzdanost se dodatno osigurava validacijskim mjerama koje uklanjaju neadekvatne slučajeve. Time se postiže visoka razina točnosti i robusnosti potrebna u znanstvenim i inženjerskim aplikacijama.

5.2.6. Sinkronizacija vremena korisnički integrirane kamere

Kao što je prethodno naglašeno, u slučaju tvornički integrirane kamere korisnik ne mora poduzimati nikakve dodatne korake kako bi se sinkroniziralo vrijeme kamere s referentnim vremenom ručnog mobilnog sustava. Takva automatizirana sinkronizacija vrijedi jednako u kontekstu kalibracijskog skena kao i u kasnijim fazama obrade prikupljenih podataka te pripreme za izračun relativnih kalibracijskih parametara.

Situacija je bitno drukčija kada se na ručni mobilni sustav naknadno integrira vanjska kamera. U poglavlju 5.1.3. konceptualno je opisana novo-razvijena metoda softverske vremenske sinkronizacije namijenjena upravo takvim slučajevima. Predložena metoda

zasniva se na detekciji mikro-pomaka koji nastaje u trenutku kada korisnik, nakon provedene statičke inicijalizacije i pokretanja skeniranja, dodirne ručni mobilni sustav s namjerom da ga uzme u ruku. Taj se pomak identificira kombinacijom mjerenja inercijalne mjerne jedinice i detekcijom centra crno-bijele mete na snimljenim fotografijama.

Osnovna pretpostavka za uspješnu provedbu metode jest da je crno-bijela meta bila jasno vidljiva kameri tijekom početne faze kalibracijskog skena te da je kamera snimala videozapis visoke frekvencije, minimalno 60 sličica u sekundi. Nakon završetka kalibracijskog skena, iz videozapisa sustava s dvjema lećama tipa riblje oko konstruira se panoramski video, koji se zatim razdvaja na pojedinačne panoramske fotografije prema načelu „jedan kadar – jedna fotografija“. Slijedom toga pristupa se detekciji centara meta i određivanju njihovih pikselnih koordinata primjenom metode opisane u poglavlju 5.2.5.

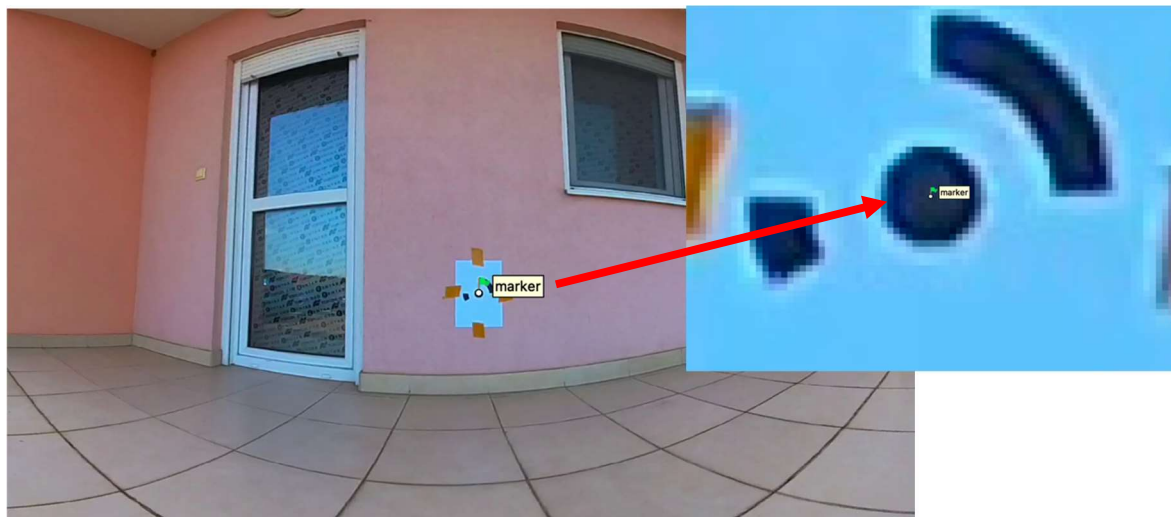
Ključno je detektirati i precizno odrediti koordinate centara na svim fotografijama snimljenima dok je mobilni sustav bio statičan (slika 5.8), sve do trenutka prvog signifikantnog pomaka. U ovom kontekstu, signifikantnim se pomakom smatra trenutak kada korisnik fizički dotakne sustav kako bi ga podigao, pri čemu nastaje mikro-pomak koji se na snimljenim fotografijama manifestira kao promjena u pikselnim koordinatama centra mete (tablica 5.2).

Tablica 5.2. Prikaz detekcije mikro-pomaka pomoću promjene u pikselnim koordinatama centra mjerne mete. Na prve četiri slike nema signifikantnih promjena u pikselnim koordinatama, dok na slici broj 5 nastupa mikro-pomak koji se očituje značajnom promjenom u koordinatama

Fotografija	x (piksel)	y (piksel)	Pomak po x osi	Pomak po y osi
1	1929.35388	1012.90186	-	-
2	1929.12036	1012.36572	-0.23352	-0.53614
3	1929.14185	1012.39764	0.02149	0.03192
4	1928.91199	1012.62036	-0.22986	0.22272
5	1929.9802	1015.01416	1.06821	2.3938

Za potrebe automatizirane detekcije meta i određivanja koordinata njihovih centara, kao i identifikacije fotografije (sličice) na kojoj se javlja prvi signifikantni pomak definiran zadanom tolerancijom, razvijena je odgovarajuća Python skripta. Nakon što se specificiraju

ulazni podaci i vrijednost tolerancije, skripta računa razlike pikselnih koordinata centara meta na uzastopnim fotografijama te označava fotografiju na kojoj je odstupanje jednako ili veće od zadane tolerancije. Višestrukim testiranjima utvrđeno je da je vrijednost tolerancije moguće postaviti na 1 piksel, čime se postiže optimalna ravnoteža između osjetljivosti i robusnosti metode.



Slika 5.8. Prikaz rezultata automatizirane detekcije centra crno-bijele kružne mete

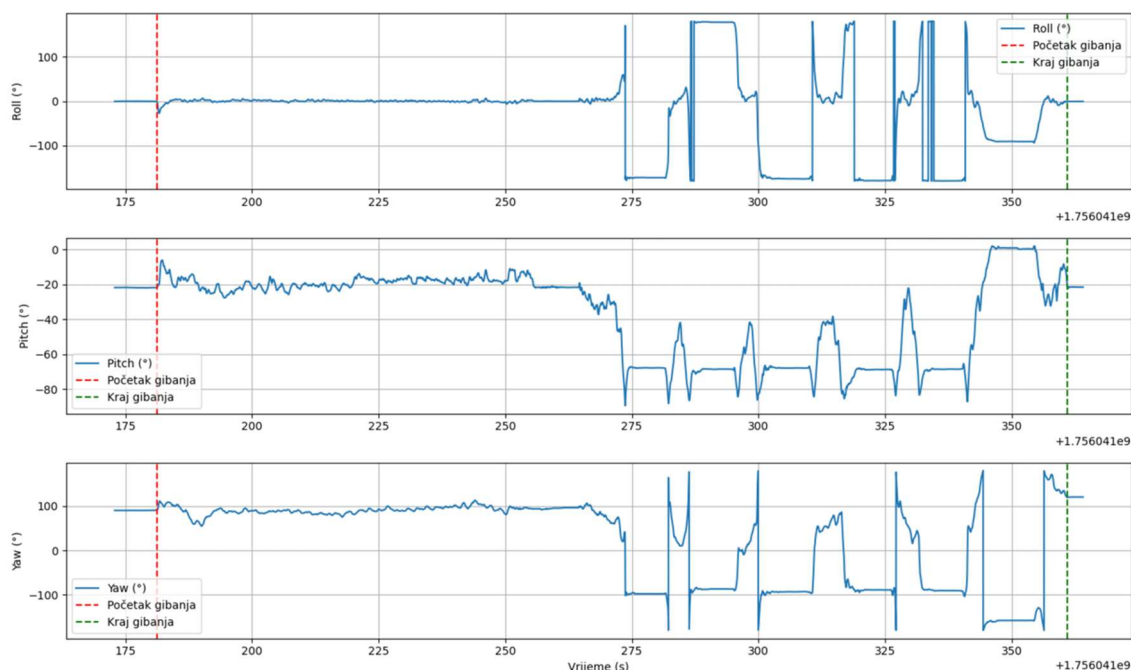
Drugi dio predložene metode vremenske sinkronizacije temelji se na analizi podataka inercijalne mjerne jedinice. Dok se u prvom dijelu pomak identificira kroz promjenu pikselnih koordinata centra mete na fotografijama, u ovom postupku isti mikro-pomak, detektira se iz trajektorije dobivene SLAM procesiranjem sirovih podataka ručnog mobilnog sustava.

Za tu svrhu razvijena je Python skripta koja učitava trajektoriju, izdvaja rotacijske podatke (kvaternioni) te ih transformira u Eulerove kutove kako bi se mogle analizirati promjene rotacije kroz tri osi. Na temelju početnog statičkog stanja skripta kontinuirano uspoređuje izračunate kutove s njihovim inicijalnim vrijednostima te provjerava prelazi li odstupanje zadanu graničnu vrijednost tolerancije. Prvi trenutak kada ta razlika prijeđe zadani prag označava se kao početak gibanja.

Rezultati se prikazuju u obliku vremenske oznake gibanja, a dodatno i grafički, kroz dijagrame koji prikazuju promjene rotacija u vremenu. Na taj se način omogućuje vizualna provjera detekcije (slika 5.9). Višestrukim testiranjem utvrđeno je da se parametar tolerancije može postaviti na vrijednost od 0.5° , što osigurava dovoljnu osjetljivost za

registraciju mikro-pomaka, ali i otpornost na manje oscilacije koje se javljaju čak i u statičkom stanju zbog vibracija motora laserske jedinice ili drugih komponenti sustava.

Rezultat postupka vremenske sinkronizacije jest vremenski zapis koji se može jednoznačno povezati s trenutkom prikupljanja određene sličice iz videozapisa. Na temelju poznatog vremena ekspozicije jedne sličice, kao i frekvencije snimanja, moguće je izračunati točno vrijeme svake izdvojene panoramske fotografije.



Slika 5.9. Prikaz grafova rotacija koji omogućuju vizualnu kontrolu detektiranog trenutka mikro-pomaka ručnog mobilnog ustava. Crvena vertikalna linija označava detektirani trenutak pomaka.

5.2.7. Izračun inicijalnih položaja i rotacija panoramskih fotografija

Posljednja faza obrade podataka kalibracijskog skena obuhvaća izračun inicijalnih položaja (3D koordinata) i rotacija (Eulerovih kutova) sfernih panoramskih fotografija. Inicijalni položaji i rotacije fotografija određeni su na temelju podataka trajektorije ručnog mobilnog sustava. Drugim riječima, oni izravno odgovaraju položajima i rotacijama samog mobilnog sustava, odnosno inercijalne mjerne jedinice, u trenutku ekspozicije kamere. Na temelju tako definiranih inicijalnih položaja i rotacija moguće je provesti fotogrametrijsko procesiranje, koje predstavlja nužan preduvjet za konačnu procjenu relativnih kalibracijskih parametara.

Izračun inicijalnih položaja i rotacija fotografija snimljenih tvornički integriranom kamerom u pravilu je trivijalan postupak. Komercijalna programska rješenja koja prate ovakve sustave

imaju neposredan pristup trajektoriji, kao i vremenskim zapisima ekspozicije svake pojedine panoramske fotografije. U tom slučaju, jedina je zadaća korisnika ručno definirati relativne kalibracijske parametre kao nulte vrijednosti:

- $dx = dy = dz = 0.000 \text{ m}$
- $d\varphi = d\theta = d\psi = 0.00^\circ$

S ovakvom definicijom relativnih kalibracijskih parametara, položaji i rotacije fotografija u potpunosti se poistovjećuju s položajima i rotacijama mobilnog sustava u trenucima ekspozicije. Time je za tvornički integriranu kameru proces obrade podataka završen te se može prijeći na završnu fazu – provedbu fotogrametrijskog postupka i izračun konačnih relativnih kalibracijskih parametara.

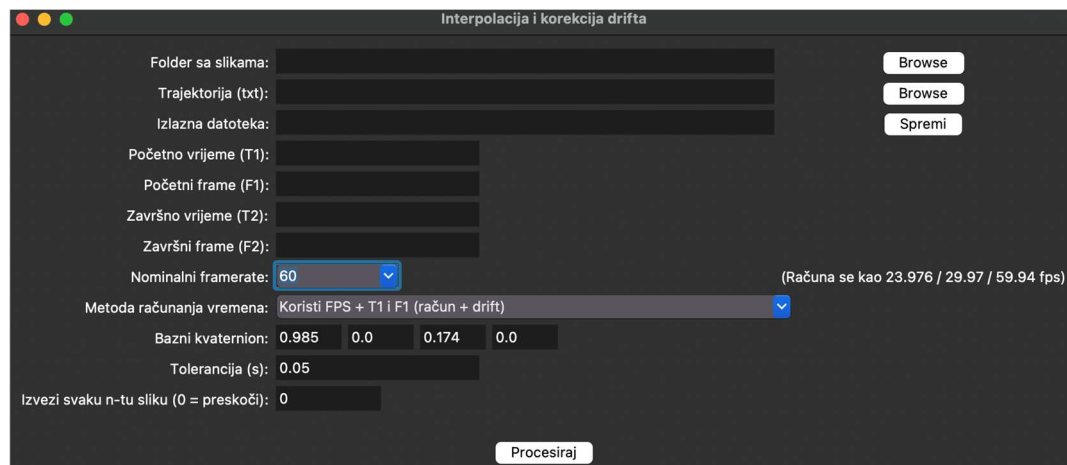
Izračun inicijalnih položaja i rotacija fotografija snimljenih korisnički integriranom kamerom u osnovi je identičan postupku primijenjenom za tvornički integrirane kamere. Ključna razlika jest u tome što vremenski zapisi ekspozicija u ovom slučaju nisu *a priori* poznati, već se moraju procijeniti korištenjem predložene metode vremenske sinkronizacije. Preduvjet za uspješnu primjenu te metode jest poznavanje točnog vremena ekspozicije barem jedne sličice unutar snimljenog videozapisa. Na temelju toga moguće je interpolirati ili ekstrapolirati vrijeme ekspozicije za sve ostale sličice. Kada se vremenski zapisi na taj način definiraju, daljnji postupak u potpunosti odgovara onome za tvorničke kamere. Svakoj panoramskoj fotografiji pridružuju se inicijalni položaji i rotacije izračunati na temelju poznate trajektorije i pridruženih vremenskih oznaka.

Za potrebe izračuna traženih inicijalnih vrijednosti razvijena je nova Python skripta ([slika 5.10](#)). Korištena metoda izračuna vremenskih zapisa za sve snimljene sličice temelji se na kombinaciji poznatog vremena jedne referentne fotografije i nominalne frekvencije snimanja (FPS). Za sličicu F_1 poznato je pripadajuće vrijeme ekspozicije T_1 , a vrijeme svake druge sličice F_i procjenjuje se pomoću izraza:

$$t_i = T_1 + \frac{F_i - F_1}{\text{FPS}}, \quad (5.9)$$

U implementiranoj skripti posebno se vodi računa o tome da se ne koristi zaokružena vrijednost frekvencije snimanja videozapisa (npr. 60 sličica u sekundi), nego stvarna industrijska vrijednost od 59.94 sličica u sekundi. Razlog tome je činjenica da čak i mala

razlika između 60 i 59.94 sličica u sekundi uzrokuje kumulativni pomak u vremenu. Primjerice, tijekom deset minuta kontinuiranog snimanja (≈ 36000 sličica), pogreška zbog korištenja 60 umjesto 59.94 sličica u sekundi iznosi približno 36 sličica, odnosno oko 0.6 sekundi. Takav pomak značajno bi degradirao sinkronizaciju između slikovnog i trajektorijskog zapisa.



Slika 5.10. Prikaz sučelja Python skripte za izračun inicijalnih položaja i rotacija fotografija (sličica) snimljenih korisnički integriranom kamerom

Nakon što je za svaku fotografiju određeno vrijeme ekspozicije, ono se koristi za pronalazak najbliže vremenske oznake unutar trajektorije mobilnog sustava. Ako je razlika između vremena fotografije i najbližeg trajektorijskog zapisa manja od unaprijed definirane tolerancije, fotografiji se pridružuju trodimenzionalne koordinate i rotacija sustava u tom trenutku. Na taj način dobivaju se inicijalni položaji i rotacije fotografija koji su potrebni za kasniju fotogrametrijsku obradu. U slučaju da tolerancija nije zadovoljena, fotografija se odbacuje, čime se osigurava konzistentnost i pouzdanost podataka.

Dodatno, u postupku je moguće odabrati da se izveze samo svaka n -ta fotografija. Ova funkcionalnost važna je jer omogućuje značajno smanjenje ukupnog broja obrađenih fotografija, a time i trajanja fotogrametrijske obrade. Međutim, pri odabiru parametra n potrebno je voditi računa o tome da se time izravno utječe na preklap između susjednih panoramskih fotografija. Prevelika vrijednost n može dovesti do gubitka kontinuiteta i nedostatnog preklapanja, dok premala vrijednost nepotrebno povećava količinu podataka i vrijeme obrade. Stoga je izbor parametra n kompromis između računske učinkovitosti i geometrijske pouzdanosti rezultata.

Ovim je postupkom završen proces određivanja traženih inicijalnih vrijednosti za korisnički integriranu kameru, te su stvoreni preduvjeti za konačni izračun relativnih kalibracijskih parametara.

5.3. Izračun relativnih kalibracijskih parametara

Finalna faza postupka umjerivanja kamere ručnog mobilnog mjernog sustava obuhvaća izračun relativnih kalibracijskih parametara. Dolaskom do ove faze podrazumijeva se da korisnik raspolaže panoramskim fotografijama (snimljenima tvornički ili korisnički integriranom kamerom), kao i pripadajućom datotekom koja sadrži inicijalne položaje i rotacije svake fotografije.

Fotografije s pridruženim inicijalnim položajima i rotacijama zatim se podvrgavaju fotogrametrijskoj obradi koja u konačnici provodi transformaciju dobivenih veznih točaka (*eng. tie points*), a time i samih fotografija, s položaja definiranog trajektorijom ručnog mobilnog sustava na položaj stvarne trajektorije kamere. Za potrebe takve transformacije koriste se orijentacijske točke, odnosno koordinate centara mjernih meta određene postupkom direktnog postavljanja sustava na mete tijekom izvođenja kalibracijskog skena.

Rezultat provedene fotogrametrijske obrade su dva seta podataka:

- skup fotografija sa položajima i rotacijama koji odgovaraju trajektoriji ručnog mobilnog sustava (inicijalna orijentacija)
- skup fotografija sa položajima i rotacijama koji odgovaraju realnoj trajektoriji kamere (izjednačena orijentacija)

Poznavanjem ovih dvaju skupova podataka moguće je provesti postupak regularnog izjednačenja posrednih mjerenja primjenom metode najmanjih kvadrata, čime se jednoznačno određuju relativni kalibracijski parametri.

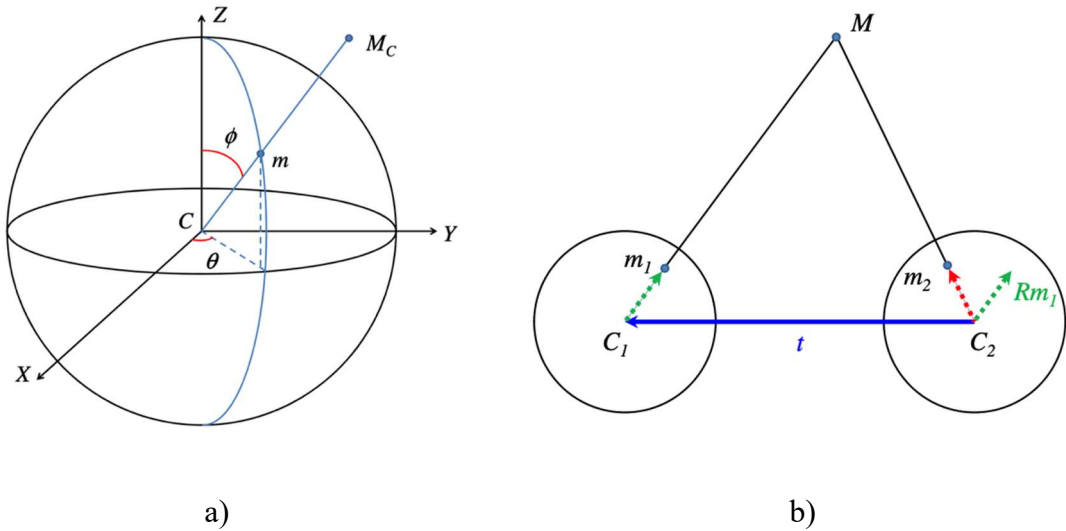
5.3.1. Algoritmi rekonstrukcije scene iz gibanja za sferni model kamere

Kako bi se provela fotogrametrijska obrada panoramskih snimaka, nužno je primijeniti algoritme rekonstrukcije scene iz gibanja (SfM algoritme) koji su posebno prilagođeni panoramskim slikama te se temelje na sfernom modelu kamere ([Pagani i Stricker 2011](#)). Za razliku od perspektivnog modela ([Hartley i Zisserman 2004](#)), sferne panoramske kamere

preslikavaju prostorne točke na jediničnu sferu, pri čemu se svaka točka slike opisuje kao jedinični vektor smjera:

$$m = \frac{M_C}{\|M_C\|}, \quad (5.10)$$

gdje je M_C vektor koordinata točke M izražen u koordinatnom sustavu kamere, a m normirani vektor projekcije (tj. smjer zrake) (slika 5.11.a). Time se geometrija SfM-a formulira u kutnim udaljenostima na sferi, a ne u euklidskom prostoru slike (Torii i dr. 2005).



Slika 5.11. Prikaz prostorne točke M koja se projicira na jediničnu sferu u točku m (a) te epipolarne geometrije za sferne panoramske fotografije (b) (Pagani i Stricker 2011)

U sfernom modelu sve zrake projicirane iz jedne fotografije i odgovarajuće zrake druge fotografije moraju ležati u istoj epipolarnoj ravnini, što se opisuje esencijalnom matricom E i epipolarnim uvjetom (Hartley i Zisserman 2004, Pagani i Stricker 2011):

$$m_2^T E m_1 = 0, \quad E = [t]_{\times} R. \quad (5.11)$$

Ovdje su m_1 i m_2 jedinični vektori projekcija iste prostorne točke M u dvjema panoramskim slikama, R matrica rotacije između dviju slika, a t vektor translacije između njihovih centara (slika 5.11.b). Operator $[t]_{\times}$ označuje križno-simetričnu matricu vektora t , koja omogućuje izvođenje vektorskog produkta u matričnom obliku.

Dodavanje novih fotografija u SfM rekonstrukciju zahtijeva rješavanje problema perspektive s n točaka (eng. *Perspective-n-Point - PnP*), tj. određivanje parametara vanjske orijentacije kamere iz skupa poznatih 3D točaka i njihovih projekcija na panoramskoj slici

(Abdel-Aziz i Karara 1971). Budući da su projekcije definirane na sferi, uvjet se može zapisati kao kolinearnost vektora:

$$m \times (RM_W + t) = 0, \quad (5.12)$$

gdje je M_W vektor koordinata točke M u koordinatnom sustavu kartiranja (m-sustavu).

Cijeli SfM postupak za panoramske slike odvija se kroz niz koraka:

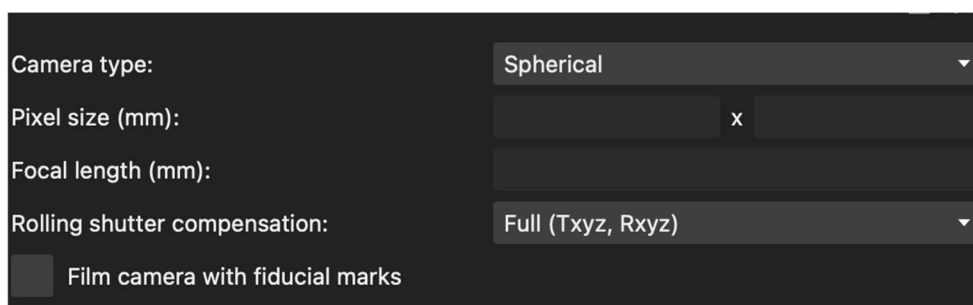
- detekcija i uparivanje značajki na sferi
- inicijalna rekonstrukcija pomoću dvije fotografije
- triangulacija prvih 3D točaka
- rješavanje PnP problema za nove fotografije
- globalno izjednačenje bloka

Ključna razlika u odnosu na perspektivne SfM metode jest ta što su svi algoritmi definirani na sferi, čime se osigurava konzistentna i numerički stabilna fotogrametrijska obrada panoramskih snimaka.

Za potrebe ovog istraživanja, fotogrametrijsko procesiranje panoramskih snimaka provedeno je u programu Agisoft Metashape, koji je odabran zbog svoje mogućnosti korištenja SfM algoritama uz primjenu sfernog modela kamere (Cera i Campi 2022). Metashape je izabran kako bi se izbjeglo pisanje vlastitog programskog koda, koji bi, s obzirom na algoritamsku opsežnost bio izrazito kompleksan.

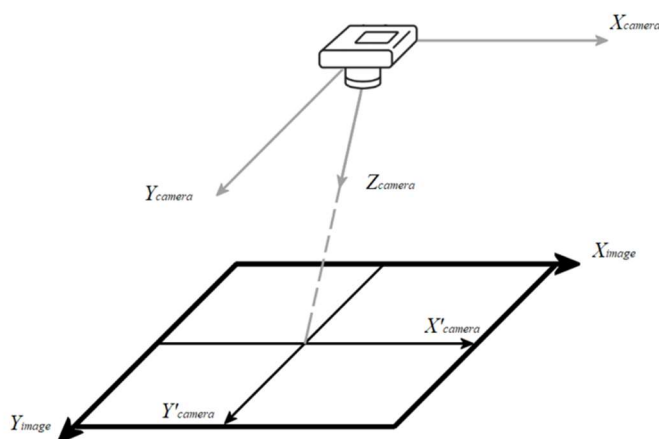
5.3.2. Uvoz fotografija u Agisoft Metashape i inicijalne postavke

Proces fotogrametrijske obrade panoramskih fotografija u programu Agisoft Metashape započinje uvozom fotografija zajedno s njihovim inicijalnim položajima i rotacijama te odabirom odgovarajućeg modela kamere (slika 5.12). Iako su panoramske slike izvorno konstruirane iz ultra-širokokutnih fotografija snimljenih dvostrukom lećom tipa riblje oko, u programu se za njihovu obradu odabire sferni panoramski model kamere. Jedna od ključnih značajki ovoga modela jest da ne omogućuje definiranje parametara unutarnje orijentacije. Naime, sferni model kamere pretpostavlja da su ti parametri već poznati za pojedine leće kojima su snimljene izvorne ultra-širokokutne slike te da je konačna panoramska fotografija geometrijski ispravno konstruirana.



Slika 5.12. Prikaz postavki modela kamere u Agisoft Metashape programu

Nakon definiranja modela kamere, potrebno je prilagoditi format 3D rotacija uvezenih fotografija kako bi se orijentacija koordinatnih osi kamere uskladila s onom koju koristi Agisoft Metashape. Kao i u većini fotogrametrijskih programa, lokalni koordinatni sustav kamere definiran je ishodištem postavljenim u projekcijski centar, pri čemu je os Z usmjerena prema naprijed (u smjeru gledanja kamere), os X prema desno, a os Y prema dolje (slika 5.13). Nasuprot tome, koordinatni sustav kamere ručnog mobilnog sustava definiran je sukladno b-sustavu, gdje je os X usmjerena prema naprijed, os Z prema gore, dok je os Y okomita na preostale osi i s njima čini desni koordinatni sustav (slika 4.1). Radi usklađivanja orijentacija koordinatnih sustava izrađena je Python skripta koja se može pokrenuti unutar sučelja Metashape programa, a koja automatski provodi konverziju unesenih 3D rotacija.



Slika 5.13. Prikaz definicije lokalnog koordinatnog sustava kamere u Agisoft Metashape programu ([URL 18](#))

U nastavku je potrebno definirati *a priori* ocjenu točnosti inicijalnih položaja i rotacija unesenih panoramskih fotografija. Budući da su ti položaji i rotacije određeni na temelju trajektorije ručnog mobilnog sustava, oni se u manjoj mjeri (za iznos relativnih kalibracijskih parametara) razlikuju od stvarnih vrijednosti orijentacija kamera. Unatoč tome, preporučljivo je početnu ocjenu točnosti položaja postaviti na 1 cm, a točnosti rotacije na 1° . Na taj se način osigurava da program Metashape tijekom procesa fotogrametrijskog

procesiranja primjenom SfM algoritama ne odstupa značajno od inicijalnih orijentacija, već ih samo numerički optimizira u sklopu postupka izjednačenja. Time se postiže da razlike između inicijalnih i izjednačenih položaja i rotacija odražavaju stvarne relativne kalibracijske parametre između kamere i referentnog koordinatnog sustava mobilnog sustava.

U slučaju kada se za prikupljanje panoramskih snimaka koristi korisnički integrirana kamera koja radi u načinu panoramskog videa, preporučljivo je u programu Metashape aktivirati opciju kompenzacije utjecaja rednog zatvarača (*eng. rolling shutter compensation*) ([slika 5.11](#)). Tijekom konstruiranja panoramskih snimaka, videozapis se razdvaja na pojedinačne sličice koje se zatim obrađuju kao zasebne fotografije, pri čemu svaka sličica zadržava geometrijske deformacije karakteristične za redni zatvarač. Redni zatvarač uzrokuje postupno čitanje senzora po redovima, zbog čega različiti dijelovi slike nisu snimljeni u istom trenutku, što tijekom gibanja sustava može rezultirati lokalnim nagibima, savijanjem objekata ili horizontalnim pomacima slikovnog sadržaja. Takve deformacije mogu narušiti detekciju i uparivanje značajki te time utjecati na stabilnost i točnost SfM algoritama ([Vautherin i dr. 2016](#)). Aktiviranjem kompenzacije rednog zatvarača Metashape modelira i numerički korigira te deformacije, čime se smanjuje njihov nepovoljan utjecaj na geometrijsku rekonstrukciju i konačnu procjenu kalibracijskih parametara.



Slika 5.14. Prikaz maskirane panoramske fotografije

Prije samog pokretanja postupka fotogrametrijskog procesiranja, dobra je praksa provesti tzv. maskiranje (*engl. masking*) panoramskih fotografija. Maskiranje u fotogrametriji označava definiranje područja slike koja će biti isključena iz obrade, odnosno dijelova koji

ne sadrže korisne informacije ili bi mogli uzrokovati pogreške pri detekciji značajki i rekonstrukciji. U slučaju sfernih panoramskih fotografija, najčešće se uklanjaju gornji i donji dijelovi slike, budući da prikazuju nebo i korišteni mjerni uređaj. Osim toga, deformacije slike kod sfernih panoramskih snimaka najizraženije su upravo u tim područjima ([slika 5.14](#)).

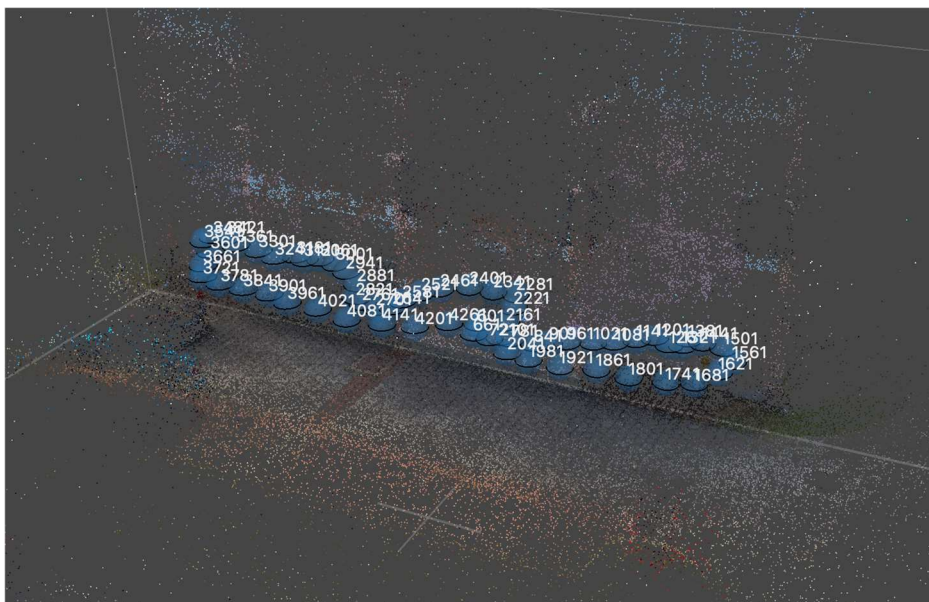
5.3.3. Fotogrametrijska obrada panoramskih snimaka

Pokretanjem funkcije *Align Photos* u programu Agisoft Metashape započinje faza fotogrametrijske obrade čiji je cilj određivanje međusobnih relacija svih fotografija u zajedničkom koordinatnom sustavu. Prvi korak algoritma poravnanja podrazumijeva detekciju značajki na svakoj slici, pri čemu Metashape koristi postupak sličan metodi SIFT (poglavlje 3.2.3) za pronalazak lokalnih karakterističnih točaka koje su neovisne o mjerilu i rotaciji slike ([Lowe 2004](#)). Za svaku detektiranu točku izračunavaju se deskriptori koji omogućuju njezino pouzdano prepoznavanje na drugim slikama. Alternativno se, ovisno o postavkama, može koristiti i varijanta temeljena na SURF algoritmu (poglavlje 3.2.3), koji daje slične rezultate uz manju računalnu složenost ([Bay i dr. 2008](#)).

U drugom koraku, program provodi uparivanje značajki među slikama (*eng. feature matching*), gdje se deskriptori uspoređuju par po par kako bi se pronašle potencijalne korespondencije. Budući da u takvom procesu može doći do pojave pogrešnih uparivanja, Metashape primjenjuje RANSAC algoritam (poglavlje 3.2.3) koji statističkom analizom eliminira nepouzdanе veze među slikama ([Fischler i Bolles 1981](#)). Time se osigurava da u konačnom skupu veznih točaka ostanu samo one koje zadovoljavaju geometrijske uvjete projekcije u 3D prostoru.

Nakon što su identificirane valjane veze među slikama, Metashape rekonstruira prostorne koordinate veznih točaka i inicijalno procjenjuje parametre vanjske orijentacije svih fotografija. U završnom koraku procesiranja primjenjuje se izjednačenje bloka, koje predstavlja nelinearnu optimizaciju svih parametara orijentacije s ciljem minimiziranja ukupne reprojekcijske pogreške između izmjerenih i projiciranih točaka. U ovom istraživanju taj se postupak temelji na *a priori* poznatim položajima i rotacijama kamera, koji služe kao početne vrijednosti u procesu izjednačenja, dok se optimizacija provodi isključivo na razini koja omogućuje njihovo fino usklađivanje s geometrijskim uvjetima veznih točaka.

Završni rezultat ovog procesa uključuje orijentirane panoramske fotografije, procijenjene položaje i rotacije te početni prostorni model u obliku rijetkog oblaka točaka (*eng. sparse point cloud*), koji predstavlja osnovu za daljnju 3D rekonstrukciju ([slika 5.15](#)).



Slika 5.15. Rezultat fotogrametrijske obrade primjenom SfM algoritama – rijedak oblak točaka i orijentirane panoramske fotografije

Dobra je praksa da se nakon završetka fotogrametrijske obrade provede filtriranje veznih točaka koje čine rijedak oblak točaka. Na taj se način uklanjaju točke koje pokazuju velike reprojekcijske pogreške, imaju mali broj opažanja ili se nalaze izvan područja od interesa. U programu Metashape dostupni su ugrađeni alati za odabir i filtriranje veznih točaka prema različitim statističkim kriterijima, uključujući reprojekcijsku pogrešku, udaljenost projekcijskog centra (*eng. projection accuracy*) i broj slika na kojima je točka prepoznata (*eng. number of projections*) ([Agisoft 2025](#)). Filtriranje je iznimno važno jer kvaliteta i pouzdanost veznih točaka izravno utječu na rezultat izjednačenja bloka, odnosno na optimizirane položaje i rotacije panoramskih fotografija. Uklanjanjem nepouzdatih točaka te ponovnim pokretanjem postupka optimizacije, Metashape ponovno izračunava parametre vanjske orijentacije svake slike, čime se smanjuju lokalne deformacije i poboljšava geometrijska konzistencija modela. Na taj se način postiže veća stabilnost i točnost konačnog rezultata, što je osobito značajno kod sfernih panoramskih snimaka gdje su reprojekcijske pogreške neravnomjerno raspoređene po slici.

5.3.4. Izračun izjednačenih položaja i rotacija panoramskih fotografija

Nakon uspješno provedene fotogrametrijske obrade primjenom SfM algoritama implementiranih u programu Agisoft Metashape, moguće je pristupiti sljedećem, a za proces umjerivanja ključnom koraku – dodavanju orijentacijskih točaka. Kao što je ranije navedeno, orijentacijske točke u ovom su kontekstu koordinate centara mjernih meta, određene izravnim postavljanjem ručnog mobilnog sustava na mjerne mete tijekom kalibracijskog skena.

Nakon učitavanja orijentacijskih točaka u program, potrebno je označiti centre mjernih meta na što većem broju panoramskih fotografija te svakom centru pridružiti pripadajuću koordinatu. Takav pristup povećava geometrijsku stabilnost transformacije i preciznost konačne orijentacije. Sukladno opisu iz poglavlja 5.2.5, centri mjernih meta automatski su detektirani na svim panoramskim fotografijama na kojima su mete vidljive (slika 5.16). Time je postignuta visoka razina ponovljivosti i konzistentnosti u definiranju središta meta, što ne bi bilo moguće ostvariti manualnim označavanjem.



Slika 5.16. Automatski detektirane mjerne mete, povezane sa korespondentnim koordinatama u Agisoft Metashape programu. Mete su označene tzv. markerima te prikazane zajedno sa veznim točkama

Pokretanjem procesa transformacije koordinata u programu Metashape, vezne točke se transliraju i rotiraju sukladno učitanim i na fotografijama definiranim orijentacijskim točkama. Ova transformacija ne utječe samo na rijedak oblak točaka, već izravno mijenja i orijentacije panoramskih fotografija, usklađujući ih s referentnim koordinatnim sustavom.

Na taj način dobivaju se tzv. izjednačene orijentacije, odnosno položaji i rotacije koje odgovaraju stvarnoj trajektoriji kamere.

Završni korak uključuje izvoz izjednačenih orijentacija u tekstualnu datoteku, čime se formira ulaz za završnu fazu umjerivanja kamere ručnog mobilnog mjernog sustava.

5.3.5. Izračun relativnih kalibracijskih parametara translacije

Na temelju raspoloživih podataka o inicijalnim i korigiranim (izjednačenim) položajima i rotacijama kamere, provodi se postupak regularnog izjednačenja posrednih mjerenja s ciljem određivanja relativnih kalibracijskih parametara translacije, označenih s dx , dy i dz . Polazna funkcija mjerenja definira odnos između položaja kamere i referentne točke ručnog mobilnog sustava (najčešće referentna točka IMU-a), te se zapisuje u općem obliku sukladno formuli 4.1:

$$p_c = p_b + R_b r_{bc} , \quad (5.13)$$

gdje p_b predstavlja položaj IMU-a u m-sustavu (trajektorija ručnog mobilnog sustava), R_b rotacijsku matricu koja opisuje orijentaciju IMU-a u m-sustavu, p_c položaj kamere u m-sustavu (stvarna trajektorija kamere), dok je r_{bc} vektor relativnih kalibracijskih parametara translacije koji je potrebno procijeniti. Ova funkcija opisuje geometrijsku vezu između senzora IMU-a i kamere u stvarnom prostoru te čini temelj matematičkog modela izjednačenja.

Za svaku panoramsku snimku poznate su tri komponente položaja (inicijalni i korigirani) te pripadna rotacija izražena Eulerovim kutovima. Budući da su rotacije poznate veličine, njihove se vrijednosti koristi za definiranje rotacijske matrice koja transformira lokalni koordinatni sustav kamere u globalni koordinatni sustav kartiranja. Razlike između inicijalnih i korigiranih položaja kamera formiraju vektor prikraćenih mjerenja l , čiji su elementi pojedinačne komponente razlika l_{xi} , l_{yi} , l_{zi} za svaku panoramsku snimku. Za svaku trojku komponenti definira se jednadžba popravaka u obliku:

$$v_i = R_i x - l_i , \quad (5.14)$$

gdje v_i predstavlja vektor popravaka mjerenja, R_i rotacijsku matricu dobivenu iz poznatih rotacija ručnog mjernog sustava, $x = [dx, dy, dz]$ vektor nepoznanica, a l_i odgovarajuću trojku

prikraćenih mjerenja. Sastavljanjem jednadžbi za svih m snimaka dobiva se matrični oblik modela mjerenja:

$$v = A x - l, \quad (5.15)$$

pri čemu je A matrica koeficijenata jednadžbi popravaka čiji svaki blok odgovara rotacijskoj matrici pojedine snimke. Broj skalarnih mjerenja označava se s $n = 3m$, broj nepoznanica s $u = 3$, dok broj prekobrojnih mjerenja iznosi $n_f = n - u$.

Izjednačenje se provodi primjenom metode najmanjih kvadrata nad prethodno definiranim modelom, pri čemu se traži rješenje koje minimizira sumu kvadrata popravaka mjerenja, odnosno funkciju:

$$\min_x (Ax - l)^T (Ax - l). \quad (5.16)$$

Iz toga se dobivaju normalne jednadžbe u matričnom obliku (Rožić 2007):

$$N = A^T A, \quad n = A^T l, \quad \hat{x} = N^{-1} n. \quad (5.17)$$

Dobiveni vektor $\hat{x}$ predstavlja procijenjene vrijednosti relativnih kalibracijskih parametara translacije, koje usklađuju inicijalne i korigirane položaje kamera u zajedničkom koordinatnom sustavu. Nakon izjednačenja izračunava se vektor popravaka mjerenja:

$$\hat{v} = A \hat{x} - l, \quad (5.18)$$

te se procjenjuje referentno standardno odstupanje:

$$s_0 = \sqrt{\frac{\widehat{v^T v}}{n_f}}, \quad (5.19)$$

koje predstavlja ocjenu točnosti jedinice težine, odnosno mjeru slaganja modela s opažanjima. Na temelju matrice kofaktora nepoznanica $Q_{xx} = N^{-1}$ određuju se i standardna odstupanja pojedinih procijenjenih parametara, dana izrazom:

$$s_{\hat{x}} = s_0 \sqrt{\text{diag}(Q_{xx})}. \quad (5.20)$$

Ovim se postupkom dobiva numerički stabilna i statistički konzistentna procjena vektora relativnih kalibracijskih parametara translacije koji opisuju prostorni odnos između senzora kamere i IMU-a unutar ručnog mobilnog sustava.

5.3.6. Izračun relativnih kalibracijskih parametara rotacije

U ovom dijelu postupka provodi se izjednačenje relativnih kalibracijskih parametara rotacije, odnosno Eulerovih kutova $d\varphi$, $d\theta$ i $d\psi$, koji opisuju međusobnu rotaciju kamere i inercijalne mjerne jedinice (IMU) ručnog mobilnog sustava. Nakon što su u prethodnom poglavlju određeni translacijski parametri, ovdje se pristupa procjeni rotacijskih parametara koji se interpretiraju kao rotacije oko koordinatnih osi b-sustava.

Polazna funkcija mjerenja koja opisuje odnos rotacija kamere i IMU-a u općem obliku glasi:

$$R_c = R_b R_{bc}, \quad (5.21)$$

pri čemu su R_c i R_b rotacijske matrice kamere i IMU-a u m-sustavu, a R_{bc} označava matricu rotacije koja opisuje njihov međusobni rotacijski odnos. Navedeni je model nelinearan zbog multiplikacije rotacijskih matrica te bi za njegovo izjednačenje bilo potrebno razviti parcijalne derivacije po svim elementima matrica i provoditi iterativnu linearnu aproksimaciju. Takav pristup, iako teorijski točan, znatno povećava složenost algoritma i smanjuje stabilnost numeričkog rješenja.

Budući da su relativni kalibracijski parametri rotacije kod ručnih mobilnih sustava vrlo mali (najčešće unutar nekoliko stupnjeva), u ovom je radu usvojena linearizirana parametrizacija rotacije u prostoru Eulerovih kutova:

$$\varphi_c = \varphi_b + d\varphi, \quad \theta_c = \theta_b + d\theta, \quad \psi_c = \psi_b + d\psi \quad (5.22)$$

Time se pretpostavlja izravna proporcionalnost između razlika kutova i traženih rotacijskih parametara. Ovakva aproksimacija utemeljena je na relacijama $\sin(\alpha) \approx \alpha$ i $\cos(\alpha) \approx 1$, koje vrijede za male kutove. Za ilustraciju, pri $\alpha = 2^\circ$ (0.035 rad) razlika između stvarne vrijednosti i linearne aproksimacije iznosi svega 2×10^{-5} , odnosno manje od 0.002 %. U praktičnim primjenama, takva se linearizacija smatra potpuno prihvatljivom jer ne uzrokuje mjerljive pogreške u procjeni rotacije (Hartley i Zisserman 2004).

Za svaku panoramsku snimku poznate su rotacije iz inicijalnog i korigiranog rješenja, čijom se razlikom formiraju prikraćena mjerenja u obliku trojke kutnih razlika $(l_{\phi i}, l_{\theta i}, l_{\psi i})$. Nepoznanice sustava su tri relativna kalibracijska parametra rotacije $[d\phi, d\theta, d\psi]^T$. Izjednačenje se provodi prema istom postupku kao u poglavlju o translacijskim parametrima, primjenom metode najmanjih kvadrata na definirani sustav jednadžbi popravaka. Time se dobiva procijenjeni vektor relativnih kalibracijskih parametara rotacije te pripadajuće popravke mjerenja, referentno standardno odstupanje i standardna odstupanja nepoznanica. Usvojeni linearni model omogućuje jednostavno i numerički stabilno izjednačenje relativnih kalibracijskih parametara rotacije uz zanemarivo odstupanje od punog nelinearnog modela.

Ovime je dovršen postupak procjene relativnih kalibracijskih parametara rotacije, čime je proces umjerivanja kamere zaključen. Jednom kada korisnik raspolaže inicijalnim položajima i rotacijama panoramskih fotografija te relativnim kalibracijskim parametrima, moguće je izračunati konačne položaje i rotacije kamere u m-sustavu (izraz 5.13 i 5.22), čime se u konačnici dobivaju orijentirane panoramske snimke.

6. TESTIRANJE I PRIMJENA RAZVIJENE METODE UMJERIVANJA KAMERE

Nakon detaljne razrade novo razvijene metode umjerivanja kamere ručnih mobilnih mjernih sustava, nužno je provesti sustavna testiranja i analizu njezine učinkovitosti i pouzdanosti. Testiranje predložene metode umjerivanja kamere, kao i metode vremenske sinkronizacije za korisnički integrirane kamere, provedeno je u stvarnim terenskim uvjetima, koristeći dostupnu mjernu opremu i standardizirane postupke prikupljanja podataka, s ciljem eksperimentalne provjere definiranih hipoteza.

U prvoj fazi provedena su ispitivanja na razini kalibracijskog skena, s ciljem identifikacije parametara koji značajno utječu na kvalitetu procesa umjerivanja. Poseban je naglasak stavljen na analizu čimbenika koji mogu unaprijediti ili umanjiti pouzdanost procjene relativnih kalibracijskih parametara. Na temelju tih spoznaja oblikovan je optimizirani pristup planiranju i izvedbi kalibracijskog skena, kojim se osigurava ponovljivost i visoka kvaliteta rezultata.

Nakon provedbe početnih testova i definiranja preporučenih postupaka za kalibracijski sken, pristupilo se ocjeni preciznosti, odnosno ponovljivosti metode umjerivanja. Eksperimenti su provedeni triput za obje kamere – tvornički integriranu i korisnički integriranu – čime su stvoreni uvjeti za pouzdanu statističku analizu preciznosti metode. Slijedom toga, pristupilo se i nominalnoj ocjeni točnosti metode, usporedbom dobivenih relativnih kalibracijskih parametara s referentnim vrijednostima navedenima u službenom kalibracijskom certifikatu proizvođača tvornički integrirane kamere. Takva usporedba bila je moguća isključivo za tvornički integriranu kameru, budući da jedino za nju postoje certificirani referentni podaci.

Važno je napomenuti da su svi testovi najprije provedeni s tvornički integriranom kamerom, koja je tek nakon toga uklonjena i zamijenjena korisnički integriranom kamerom. Na taj je način izbjegnuto višekratno uklanjanje i ponovno montiranje tvorničke kamere, čime bi se mogla narušiti točnost njezina tvorničkog umjerivanja i time negativno utjecati na rezultate analize.

U završnoj fazi istraživanja provedena je potpuno neovisna ocjena kvalitete određivanja relativnih kalibracijskih parametara i vremenske sinkronizacije za obje kamere, čime je omogućena sveobuhvatna provjera obje postavljene hipoteze. Ova analiza temeljila se na

praktičnom eksperimentu čiji je cilj bio samostalno procijeniti točnost određivanja kalibracijskih parametara te kvantificirati pogrešku vremenske sinkronizacije primjenom metode monoskopskog kartiranja, uz potpunu kontrolu svih čimbenika koji mogu utjecati na točnost orijentacije panoramskih fotografija. Time su iz izračuna isključeni gotovo svi vanjski utjecaji, čime je dobivena realna i objektivna slika o stvarnoj kvaliteti razvijenih postupaka umjerivanja kamere i vremenske sinkronizacije.

6.1. Korištena mjerna oprema

Za potrebe provedbe svih ispitivanja i eksperimentalnih analiza korišten je komercijalni ručni mobilni mjerni sustav GeoSLAM ZEB-Horizon, u kombinaciji s tvornički integriranom kamerom GeoSLAM ZEB-Vision te korisnički integriranom kamerom Insta360 X3. U nastavku je prikazan pregled osnovnih tehničkih značajki i karakteristika svih korištenih mjernih sustava.

6.1.1. GeoSLAM ZEB-Horizon – ručni mjerni mobilni sustav

Ručni mobilni mjerni sustav GeoSLAM ZEB-Horizon predstavlja napredni 3D laserski skener temeljen na SLAM principu rada, razvijen u suradnji između britanske tvrtke GeoSLAM i australske znanstvene organizacije CSIRO (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation*), čija je istraživačka skupina *Data61* izvorno razvila tehnologiju pod nazivom Zebedee (Bosse i Zlot 2009). Ova tehnologija predstavlja jedno od prvih komercijalno uspješnih rješenja koje je SLAM metodu primijenilo u ručnim laserskim mjernim sustavima, čime je otvoren put suvremenim mobilnim sustavima za kartiranje.

ZEB-Horizon koristi rotirajući laserski senzor Velodyne Puck (VLP-16) koji prikuplja do 300 000 točaka u sekundi, s kutnim vidnim poljem od $360^\circ \times 270^\circ$. Maksimalni domet mjerenja iznosi 100 m, uz nominalnu relativnu točnost od 1–3 cm (URL 19), što sustav čini pogodnim za širok spektar primjena – od arhitektonskog i građevinskog dokumentiranja objekata do kartiranja prirodnih i industrijskih prostora.

Za razliku od statičkih 3D laserskih skenera koji se oslanjaju na registraciju zasebnih stajališta, ZEB-Horizon koristi varijantu grafičkog SLAM pristupa pod nazivom kontinuirani-vremenski SLAM (eng. *continuous-time* – CT SLAM), čime osigurava robusnu procjenu položaja i rotacije tijekom kretanja. Ovaj pristup omogućuje rekonstrukciju oblaka

točaka čak i u složenim prostornim uvjetima bez GNSS signala, što je ključno za primjene u zatvorenim prostorima ili područjima s ograničenom vidljivošću neba.

Sustav se sastoji od dvije osnovne komponente ([slika 6.1](#)):

1. ručne jedinice, koja ujedinjuje laserski senzor i inercijalnu mjernu jedinicu
2. vanjske jedinice (*eng. datalogger*), koja sadrži ugrađenu memoriju i baterijski modul za pohranu i napajanje sustava.

Obje su komponente međusobno povezane fleksibilnim kabelom, koji omogućuje istodobni prijenos podataka i napajanje, uz zadržavanje pokretljivosti operatera tijekom skeniranja. Ovakva modularna konfiguracija čini sustav laganim, prenosivim i jednostavnim za rukovanje u različitim terenskim uvjetima.

U kontekstu ovog istraživanja, ZEB-Horizon je korišten kao referentni mjerni sustav za testiranje i validaciju predstavljenih metoda umjerivanja i vremenske sinkronizacije kamera. Njegova modularna konstrukcija omogućuje montiranje tvornički ili korisnički integriranih kamera, poput GeoSLAM ZEB-Vision i Insta360 X3, čime se sustav može prilagoditi različitim eksperimentalnim konfiguracijama.



Slika 6.1 Komponente GeoSLAM ZEB-Horizon ručnog mjernog mobilnog sustava

6.1.2. GeoSLAM ZEB-Vision – tvornički integrirana kamera

Kamera GeoSLAM ZEB-Vision ([slika 6.2](#)) tvornički je integrirani vanjski (eksterni) slikovni modul namijenjen ZEB-Horizon mobilnom sustavu, a služi za prikupljanje ultra-

širokokutnih fotografija. Predstavljena je 2022. godine kao standardni dodatak GeoSLAM-ovim ručnim mobilnim sustavima, s ciljem da omogući kolorizaciju oblaka točaka i dokumentiranje okoline pomoću panoramskih snimaka.



Slika 6.2. GeoSLAM ZEB-Vision kamera prije (desno) i nakon postavljanja na GeoSLAM ZEB-Horizon mobilni sustav (lijevo) ([URL 8](#))

ZEB-Vision koristi dvojni optički sustav koji se sastoji od dvije leće tipa riblje oko, čime se ostvaruje sferno vidno polje od 360° . Parametri unutarnje orijentacije za obje leće tvornički su određeni i poznati. Svaka leća snima zasebnu sliku rezolucije 1920×1920 piksela, dok se nakon programske obrade konstruira sferna panoramska slika ukupne rezolucije 3840×1920 piksela. Kamera omogućuje intervalno prikupljanje slika u pravilnim vremenskim razmacima (npr. 1 sekunda), pri čemu korisnik može definirati duljinu intervala ovisno o brzini kretanja i zahtjevima snimanja.

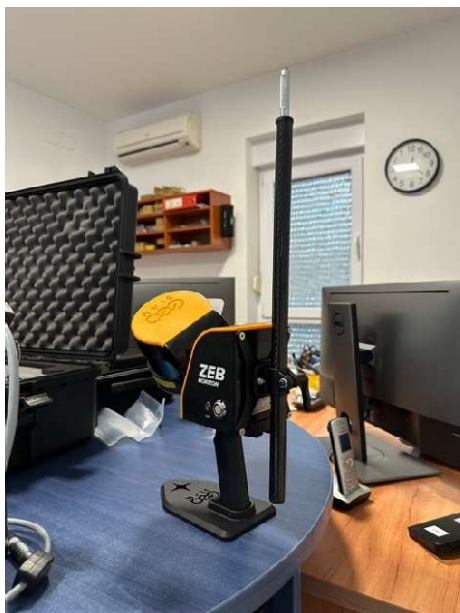
Vremenska sinkronizacija između kamere i mobilnog mjernog sustava ostvarena je hardverskim putem, koristeći pulsni sinkronizacijski signal frekvencije 1 Hz. ZEB-Horizon generira električni impuls svake sekunde te uz njega šalje serijsku poruku koja sadrži točan vremenski zapis trenutka emitiranja pulsa ([URL 20](#)). Kamera taj signal koristi za usklađivanje svojeg internog sata s vremenom skenera, čime se svaki snimljeni kadar vremenski referencira na zajednički sustav vremena (tzv. *Scanner Head Board time*). Takav pristup omogućuje visoku razinu točnosti (1-3 ms) u povezivanju slikovnih i geometrijskih podataka.

Zbog zatvorene strukture sustava, poznatih tvorničkih parametara i pouzdane hardverske sinkronizacije, ZEB-Vision predstavlja idealnu tvornički integriranu kameru za potrebe ovog istraživanja.

6.1.3. Insta360 X3 – korisnički integrirana kamera

Kamera Insta360 X3 (slika 6.3) korištena je u ovom istraživanju kao korisnički integrirana kamera s ručnim mobilnim sustavom GeoSLAM ZEB-Horizon, u svrhu analize novo razvijenih metoda umjerivanja i vremenske sinkronizacije. Za razliku od tvornički integriranog slikovnog modula poput ZEB-Vision kamere, X3 ne posjeduje unaprijed realiziranu vremensku sinkronizaciju sa skenerom niti dostupne tvorničke parametre unutarnje orijentacije, što ju čini prikladnim alatom za eksperimentalnu verifikaciju algoritama razvijenih u ovom radu.

Kamera je konstrukcijski izvedena kao kompaktni sferni sustav s dvije leće tipa riblje oko, koje zajedno ostvaruju vidno polje od 360°. Svaka leća projicira sliku na zasebni 1/2-inčni CMOS senzor rezolucije 48 megapiksela, pri čemu je ekvivalentna žarišna duljina objektiva 6.7 mm ([URL 21](#)). Konstruiranje panorame iz dviju ultra-širokokutnih fotografija može se provoditi u samoj kameri u realnom vremenu ili naknadno, uporabom programa *Insta360 Studio*. U ovom istraživanju sve panoramske fotografije konstruirane su naknadnom obradom u navedenom programu, budući da omogućuje precizniju kontrolu nad parametrima generiranja panorame.



Slika 6.3. Prikaz nosača izrađenog za postavljanje Insta360 kamere na ZEB-Horizon

U provedenim eksperimentima kamera je radila u načinu panoramskog videa u 4K razlučivosti pri 60 sličica u sekundi, što predstavlja ravnotežu između prostorne i vremenske razlučivosti potrebne za provedbu vremenske sinkronizacije te iskorištavanja sličica

izdvojenih iz videa za kolorizaciju ili monoskopsko kartiranje. Kamera je bila mehanički montirana na ZEB-Horizon pomoću posebno izrađenog rigidnog nosača (slika 6.3), pri čemu se vodilo računa da relativni kalibracijski parametri translacije budu što manji. Time se smanjuje osjetljivost orijentacije panoramskih snimaka na pogreške rotacije i vremenske sinkronizacije mobilnog sustava, čime se postiže veća stabilnost i pouzdanost umjerivanja. Budući da ne postoji tvornička povezanost između ova dva sustava, sinkronizacija vremena provedena je pomoću novo osmišljene softverske metode sinkronizacije opisane u 5. poglavlju.

Zahvaljujući otvorenosti sustava, dostupnosti video podataka i mogućnosti neovisne vremenske analize, Insta360 X3 omogućila je detaljnu provjeru točnosti razvijenih algoritama sinkronizacije i umjerivanja u uvjetima koji nisu ograničeni tvorničkom integracijom. Time je poslužila kao istraživačka platforma za usporedbu performansi između zatvorenih (tvornički integriranih) i otvorenih (korisnički integriranih) konfiguracija senzora.

6.2. Ispitivanje optimalnog pristupa kalibracijskom skenu za potrebe umjerivanja kamere

Kako bi se odredio optimalan pristup izvođenju kalibracijskog skena, s ciljem postizanja konzistentnog i ponovljivog umjerivanja kamere, provedena su ciljano oblikovana ispitivanja. U sklopu njih analizirani su ključni parametri koji mogu utjecati na kvalitetu i stabilnost postupka kalibracije, uključujući:

- trajanje kalibracijskog skena
- broj i prostorni raspored orijentacijskih točaka
- količinu preklopa (razmak) između uzastopnih panoramskih snimaka

U nastavku se daje opis lokacije na kojoj su testiranja provedena te detaljan prikaz svakog od provedenih ispitivanja povezanih s optimizacijom procesa kalibracijskog skena. Rezultati ovih ispitivanja poslužili su kao temelj za definiranje preporučenog protokola kalibracijskog skena korištenog u nastavku istraživanja. Važno je napomenuti da su sva ispitivanja prikazana u ovom poglavlju provedena korištenjem tvornički integrirane kamere GeoSLAM ZEB-Vision. Takav je pristup odabran zato što je za ovaj sustav bio dostupan tvornički kalibracijski certifikat, što znači da su relativni kalibracijski parametri između kamere i

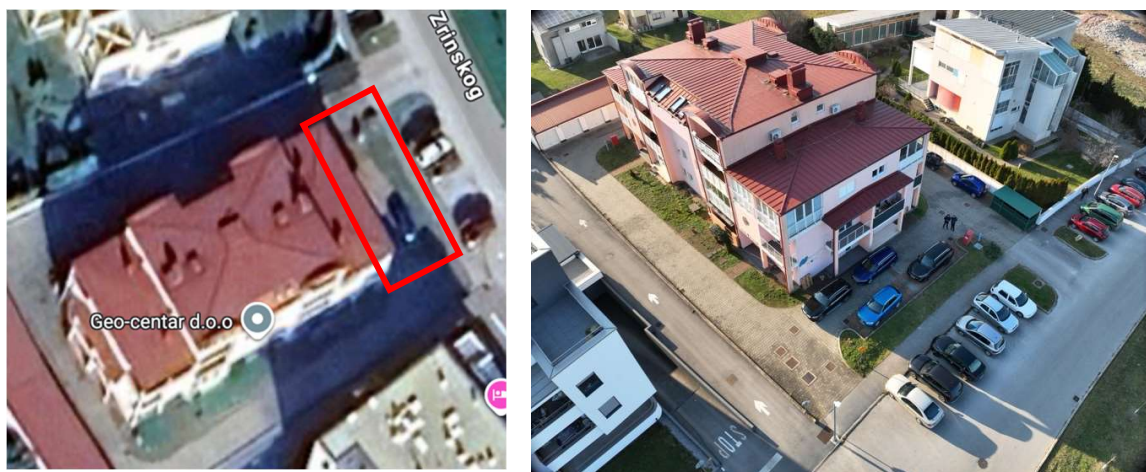
mobilnog mjernog sustava bili unaprijed poznati. To je bilo ključno za pouzdanu procjenu utjecaja pojedinih parametara na kvalitetu izvođenja kalibracijskog skena, a posljedično i na točnost konačno određenih relativnih kalibracijskih parametara.

6.2.1. Lokacija izvođenja kalibracijskog skena

Sva testiranja, kao i svi kalibracijski skenovi, provedeni su u urbanom području na adresi Jurja IV. Zrinskog 12B u Čakovcu (slika 6.4). Kao mikrolokacija testiranja odabrana je sjeveroistočna strana zgrade ureda tvrtke Geo-centar d.o.o., širine približno 17 m i visine oko 9 m. U neposrednom okruženju nalaze se dvije stambene zgrade te više manjih arhitektonskih elemenata, uključujući betonske ograde, zidiće, stupove i elemente ulične rasvjete.

Zona kretanja skenera bila je smještena na parkiralištu ispred zgrade, koje omogućuje nesmetano kružno ili linearno kretanje potrebno za izvedbu kalibracijskog skena. Zbog relativno malih dimenzija prostora, jedan kalibracijski sken moguće je provesti za 2–3 minute, što značajno olakšava višekratno ponavljanje testova i usporedbu rezultata.

Unatoč ograničenoj površini, odabrana je lokacija pogodna za provedbu umjerivanja kamere primjenom predložene metode. Razlog tomu je prisutnost dovoljnog broja geometrijski i teksturno raznolikih značajki u okruženju, koje omogućuju stabilnu SLAM navigaciju te pouzdanu primjenu SfM algoritama u fotogrametrijskoj obradi.



Slika 6.4. Prikaz mikrolokacije izvođenja kalibracijskih skenova. Slika lijevo prikazuje područje na satelitskoj snimci (izvor: Google Earth), dok slika desno prikazuje isto područje snimljeno iz zraka

6.2.2. Ispitivanje utjecaja duljine trajanja kalibracijskog skena

Prvi skup ispitivanja usmjeren je na utvrđivanje utjecaja trajanja kalibracijskog skena na točnost i konzistentnost određivanja relativnih kalibracijskih parametara. Cilj je bio ispitati može li duljina snimanja, odnosno veličina obuhvaćenog područja, utjecati na stabilnost fotogrametrijskog izjednačenja i dobivene relativne kalibracijske parametre.

U tu svrhu izvedeno je pet kalibracijskih skenova različitog trajanja. Prvi sken trajao je približno 2 minute, dok je svaki sljedeći trajao okvirno jednu minutu duže. Svi su skenovi provedeni na istoj lokaciji, pri čemu je područje snimanja za svaki sljedeći test postupno proširivano kako bi se omogućilo dulje trajanje skeniranja ([slika 6.5](#)).



Slika 6.5. Prikaz područja obuhvata svakog od pet kalibracijskih skenova (izvor: Google Earth)

U prvom je skenu korišteno 6 orijentacijskih točaka, ravnomjerno raspoređenih duž početnog područja snimanja. Za svaki sljedeći sken broj je točaka povećan za dodatne dvije, pri čemu su nove točke proširivale prostorni obuhvat sukladno povećanju područja kalibracijskog skena. Kao orijentacijske točke služile su crno-bijele kružne mete fiksno postavljene na pročelju zgrade uz koju su se provodili kalibracijski skenovi. Odnos između trajanja pojedinog skena i broja korištenih orijentacijskih točaka prikazan je u tablici [6.1](#).

Tijekom svih ispitivanja korištena je tvornički integrirana kamera GeoSLAM ZEB-Vision, koja prikuplja intervalne panoramske fotografije. Interval okidanja bio je postavljen na 1 sekundu, što je u kombinaciji s brzinom kretanja skenera od približno 1 m/s omogućilo

ostvarivanje dostatnog fotogrametrijskog preklopa između uzastopnih panoramskih snimaka te stabilan rad SfM algoritama u Agisoft Metashape programu.

Tablica 6.1. Trajanje i broj korištenih orijentacijskih točaka za svaki kalibracijski sken

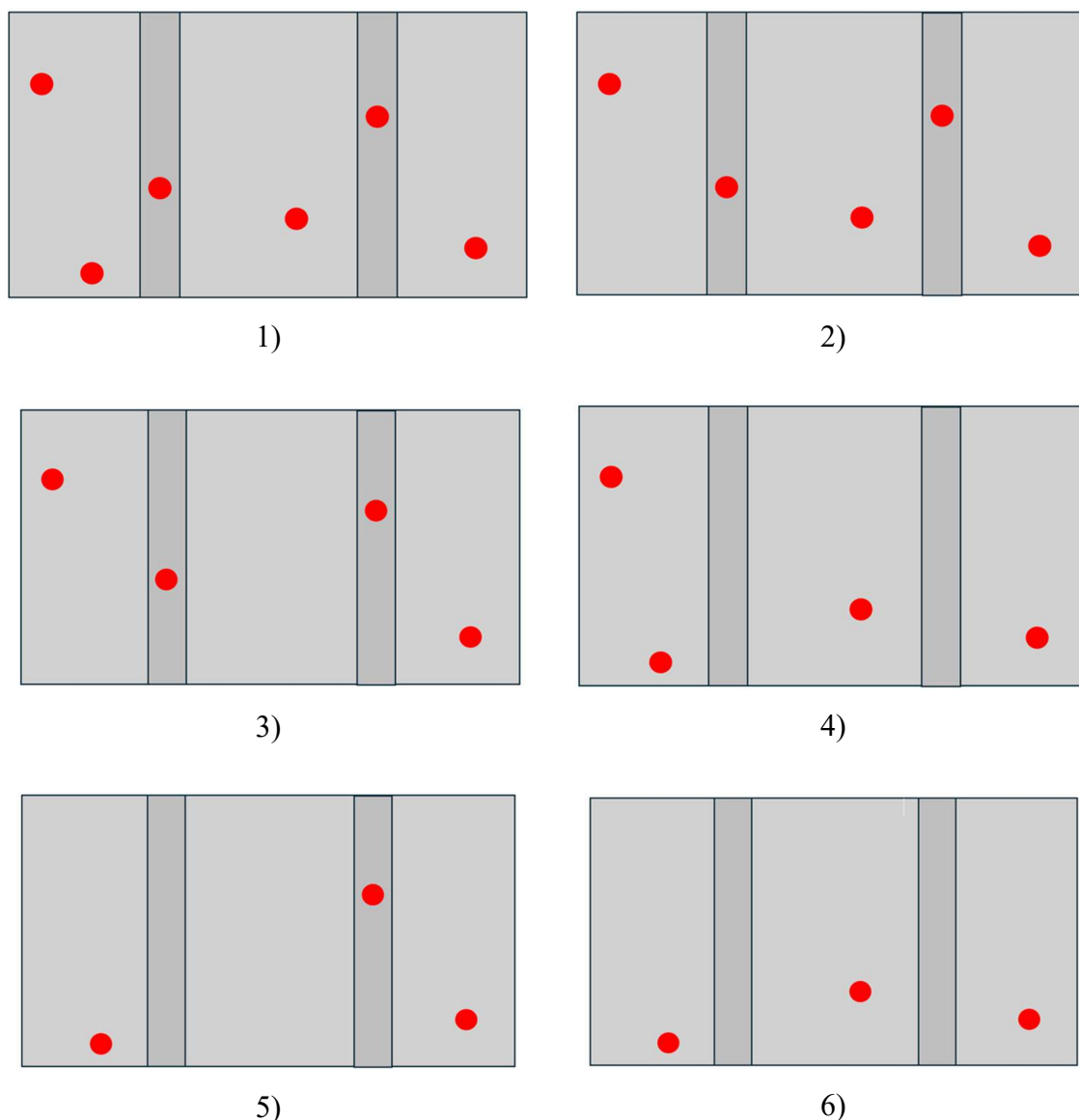
Kalibracijski sken	Okvirno trajanje skena	Broj orijentacijskih točaka
1. sken	2 min	6
2. sken	3 min	8
3. sken	4 min	10
4. sken	5 min	12
5. sken	6 min	14

6.2.3. Ispitivanje utjecaja broja i rasporeda orijentacijskih točaka

Drugi skup testova usmjeren je na ispitivanje utjecaja broja i geometrijskog rasporeda korištenih orijentacijskih točaka na kvalitetu dobivenih relativnih kalibracijskih parametara. U tu svrhu odabran je jedan kalibracijski sken iz prvog seta testova, trajanja približno 2 minute, koji je sadržavao ukupno 6 orijentacijskih točaka. Navedeni je sken naknadno obrađen u više varijanti, pri čemu su korišteni različiti brojevi aktivnih orijentacijskih točaka te različite kombinacije točaka kako bi se utjecalo na njihov prostorni raspored. Na taj su način definirani sljedeći scenariji ([slika 6.6](#)):

1. Sken sa 6 orijentacijskih točaka uz povoljan geometrijski raspored
2. Sken sa 5 orijentacijskih točaka uz povoljan geometrijski raspored
3. Sken sa 4 orijentacijskih točaka uz povoljan geometrijski raspored
4. Sken sa 4 orijentacijskih točaka uz nepovoljan geometrijski raspored
5. Sken sa 3 orijentacijske točke uz povoljan geometrijski raspored
6. Sken sa 3 orijentacijske točke uz nepovoljan geometrijski raspored

Pod povoljnim geometrijskim rasporedom podrazumijeva se raspored u kojem su točke pravilno raspoređene i prostorno raširene po cijelom području testiranja, pri čemu se ne nalaze u istoj liniji niti u istoj ravnini. Suprotno tome, nepovoljan geometrijski raspored označava situacije u kojima odabrane točke ne pokrivaju cijeli obuhvat snimanja ili su raspoređene približno u liniji odnosno unutar iste ravnine.

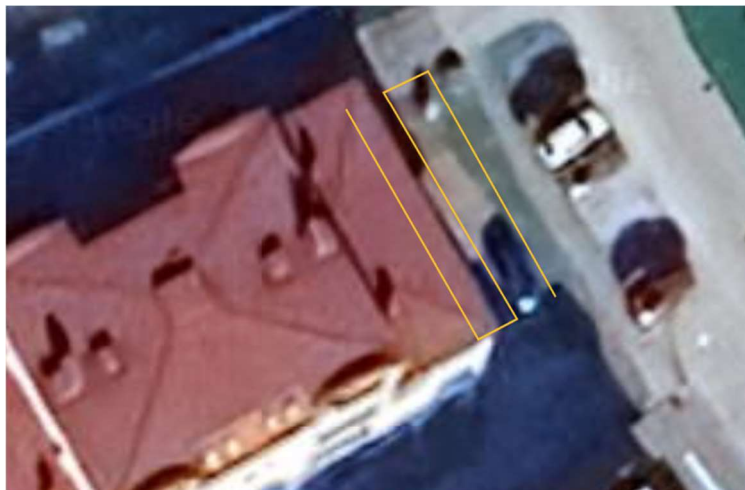


Slika 6.6. Ilustracija rasporeda orijentacijskih točaka za svaki od šest ispitanih scenarija. Siva pozadina predstavlja zid, dok tamniji pravokutnici prikazuju stupove zgrade. Crveni krugovi predstavljaju orijentacijske točke

6.2.4. Ispitivanje utjecaja preklopa između uzastopnih panoramskih snimaka

Posljednji skup testova u okviru definiranja optimalnog pristupa kalibracijskom skenu bio je usmjeren na ispitivanje utjecaja preklopa između uzastopnih panoramskih snimaka na kvalitetu dobivenih relativnih kalibracijskih parametara. Za razliku od perspektivnih kamera s ograničenim vidnim poljem, sferne panoramske slike pokrivaju vrlo široko vidno polje (360°), što omogućuje jednostavno postizanje znatnog uzdužnog preklopa (duž linije kretanja) i poprečnog preklopa (između paralelnih linija kretanja), nužnih za stabilnu fotogrametrijsku obradu.

Za potrebe ovoga ispitivanja proveden je jedan kalibracijski sken na testnom području. Skeniranje je izvedeno duž tri paralelne linije (slika 6.7), pri čemu je panoramska kamera (GeoSLAM ZEB-Vision) snimala u intervalu od jedne sekunde. Takvom konfiguracijom stvoreni su uvjeti za oblikovanje više razina preklopa, što je omogućilo analizu njihovog utjecaja na kvalitetu umjerivanja kamere.



Slika 6.7. Prikaz trajektorije kalibracijskog skena snimljenog za potrebe analize utjecaja preklopa između panoramskih snimaka na kvalitetu umjerivanja kamere (izvor: Google Earth)

Na temelju prikupljenog skena definirano je šest različitih scenarija preklopa (tablica 6.2). Broj linija izravno utječe na ostvareni poprečni preklap, dok interval ekspozicije kamere određuje uzdužni preklap. Broj korištenih orijentacijskih točaka u svim je varijantama ostao jednak. Svaki je scenarij zasebno obrađen i korišten za izračun relativnih kalibracijskih parametara, koji su potom u fazi analize uspoređeni s referentnim tvorničkim vrijednostima.

Tablica 6.2. Pregled šest scenarija preklopa između panoramskih snimaka korištenih za analizu utjecaja preklopa na određivanje relativnih kalibracijskih parametara

Scenarija preklopa	Broj linija	Interval ekspozicije kamere	Broj orijentacijskih točaka
1. scenarij	1	1 s	6
2. scenarij	2	1 s	6
3. scenarij	3	1 s	6
4. scenarij	1	2 s	6

5. scenarij	2	2 s	6
6. scenarij	3	2 s	6

6.3. Analiza točnosti i preciznosti relativnih kalibracijskih parametara

Nakon provedenih inicijalnih testova, čiji je cilj bio definirati optimalan pristup izvođenju kalibracijskog skena, pristupilo se ispitivanju točnosti i preciznosti novo osmišljene metode umjerivanja kamere. Analiza preciznosti provedena je za podatke umjerivanja dobivene za obje korištene kamere, dok je analiza točnosti provedena isključivo za kameru ZEB-Vision.

Za potrebe ove analize sa svakom su kamerom izvedena tri neovisna kalibracijska skena. U svakom skenu mijenjan je broj orijentacijskih točaka te trajanje skena, kako bi se osigurala potpuna neovisnost ponovljenih mjerenja. Parametri svakog skena prikazani su u tablici 6.3.

Tablica 6.3. Prikaz parametara kalibracijskih skenova korištenih za procjenu točnosti i preciznosti relativnih kalibracijskih parametara

Kamera	Oznaka skena	Trajanje skena	Broj linija u skenu	Broj orijentacijskih točaka	Interval ekspozicije kamere
ZEB-Vision	1. sken	2 min	2	5	1 s
	2. sken	3 min	2	6	1 s
	3. sken	4 min	2	7	1 s
Insta360 X3	1. sken	2 min	2	5	1 s (iz videa)
	2. sken	3 min	2	6	1 s (iz videa)
	3. sken	4 min	2	7	1 s (iz videa)

Iako je svaki sken trajao različit broj minuta, broj paralelnih linija snimanja, kojima je ostvaren poprečni preklop između panoramskih fotografija, bio je jednak za sve skenove. Povećanjem trajanja skena povećavao se i broj orijentacijskih točaka: za svaki je sljedeći sken dodana po jedna dodatna točka, čime se postizala bolja prostorna pokrivenost.

U pogledu uzdužnog preklopa, interval ekspozicije za tvornički integriranu kameru ZEB-Vision iznosio je 1 s. U slučaju korisnički integrirane kamere sniman je panoramski video pri 60 sličica u sekundi, a nakon razdvajanja videa na pojedinačne sličice, za obradu je odabrana svaka 60. sličica, čime se efektivno dobio interval ekspozicije jednak 1 sekundi.

Cilj ovih ispitivanja bio je utvrditi stabilnost postupka umjerivanja u ponovljenim uvjetima te procijeniti odstupanja relativnih kalibracijskih parametara u odnosu na referentne vrijednosti. Dobiveni rezultati omogućili su eksperimentalnu ocjenu prihvatljivosti obje postavljene hipoteze, pri čemu su se za tvornički integriranu kameru vrednovala točnost i preciznost razvijene metode umjerivanja, dok se za korisnički integriranu kameru ocjenjivala preciznost postupka, u skladu s dostupnim referentnim podacima. Detaljni rezultati provedenih analiza, zajedno s njihovim tumačenjem i raspravom, prikazani su u 7. poglavlju.

6.4. Neovisna terenska verifikacija točnosti umjerivanja i vremenske sinkronizacije

Neovisna terenska verifikacija provedena je s ciljem dodatne procjene točnosti metode umjerivanja te vremenske sinkronizacije za obje korištene kamere. Za razliku od inicijalnih ispitivanja, koja su se provodila unutar kontroliranog kalibracijskog polja, ovdje je umjerena kamera primijenjena u realnim terenskim uvjetima na novoj lokaciji te u drugačijoj geometrijskoj konfiguraciji prostora. U takvim okolnostima moguće je procijeniti koliko su dobiveni parametri robusni i primjenjivi izvan uvjeta u kojima su određeni. Ovakav pristup omogućio je neovisnu provjeru obje hipoteze, budući da se istovremeno ocjenjuje točnost umjerivanja za tvornički integriranu kameru te primjenjivost razvijenih postupaka umjerivanja i vremenske sinkronizacije za korisnički integriranu kameru.

U tu svrhu najprije je geodetskom mjernom stanicom visoke točnosti određeno 20 referentnih točaka smještenih na pročeljima dviju zgrada. Koordinate tih točaka čine neovisni referentni skup podataka za daljnju analizu točnosti. Nakon provedbe praktičnog skeniranja mobilnim sustavom i primjene relativnih kalibracijskih parametara na panoramske snimke, položaji istih referentnih točaka određeni su tehnikom monoskopskog kartiranja. Usporedbom ovako dobivenih koordinata s geodetski izmjerenim vrijednostima omogućena je potpuno neovisna ocjena kvalitete razvijenih metoda umjerivanja kamere i sinkronizacije vremena.

6.4.1. Lokacija terenskog ispitivanja

Terensko ispitivanje provedeno je na lokaciji smještenoj u neposrednoj blizini područja korištenog u prethodnim eksperimentima, no s namjernim pomakom prema prostoru koji omogućuje drugačiju geometrijsku konfiguraciju snimanja. Testni poligon formiran je kao linearni koridor duljine približno 40 m, smješten između dviju višekatnih zgrada na adresama Jurja IV. Zrinskog 10 i Jurja IV. Zrinskog 12 u Čakovcu ([slika 6.8](#)). Takva prostorna organizacija omogućila je jasno definiranu stazu kretanja mobilnog sustava te postupno mijenjanje udaljenosti i upadnih kutova laserske zrake prema fasadama.

a)



b)



Slika 6.8. Prikaz područja provođenja neovisnog ispitivanja točnosti razvijenih metoda umjerivanja i sinkronizacije kamere. Na slici a) (izvor: Google Earth) prikazan je prostorni obuhvat testnog poligona, dok slika b) prikazuje panoramsku fotografiju testne staze i pripadajućih zgrada.

U smislu kretanja ručnog mobilnog sustava, odabrani koridor pružao je povoljne uvjete za stabilnu SLAM navigaciju. Dvije približno paralelne fasade izrazite visine i s velikim brojem vertikalnih struktura, osiguravale su dovoljno pouzdane geometrijske značajke za kontinuirano praćenje gibanja i održavanje stabilne trajektorije tijekom skeniranja.

Za potrebe ovoga istraživanja dodatnu je prednost predstavljala velika dostupna fasadna površina, koja je sadržavala brojne jasno definirane građevinske elemente. Posebno su pogodna bila mjesta presjeka vertikalnog i horizontalnog ruba prozorskih otvora, čija se geometrijska definiranost pokazala vrlo prikladnom za određivanje referentnih točaka. Takva raspoloživost pouzdanih vizualnih obilježja na fasadama bila je ključna za kasniju usporedbu koordinata dobivenih monoskopskim kartiranjem s koordinatama izmjerenim geodetskom mjernom stanicom.

6.4.2. Određivanje referentnih točaka geodetskom mjernom stanicom

Za potrebe neovisne terenske verifikacije bilo je nužno uspostaviti pouzdan skup referentnih točaka čije su koordinate određene s visokom točnošću, kako bi mogle poslužiti kao objektivna osnova za procjenu kvalitete relativnih kalibracijskih parametara i vremenske sinkronizacije. U tu je svrhu korištena geodetska mjerna stanica Topcon GT-703 ([slika 6.9](#)), kutne preciznosti 3" te preciznosti daljinomjera od 2 mm + 2 ppm ([URL 22](#)).

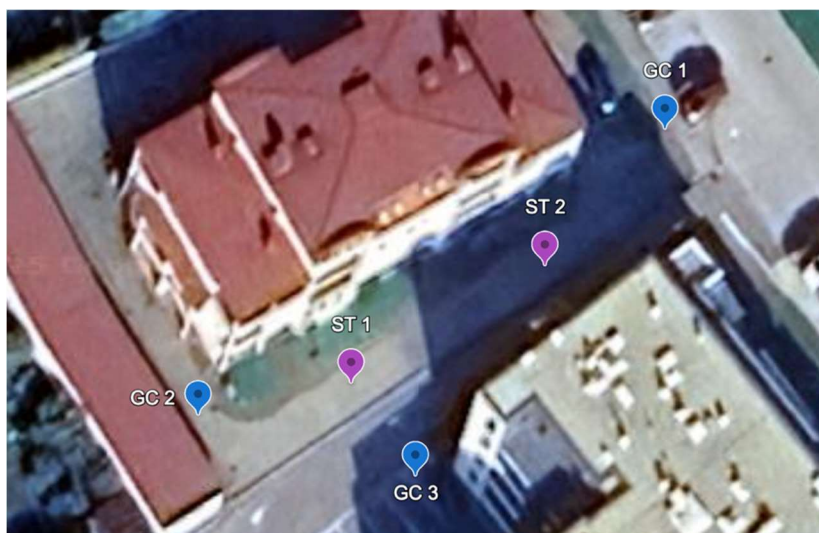


Slika 6.9. Topcon GT-703 mjerna stanica ([URL 23](#))

Mjerenje referentnih točaka izvedeno je s dvaju stajališta instrumenta, postavljenih na način da se osigura povoljna geometrija opažanja ([slika 6.10](#)). Na svakoj je zgradi određeno 10 točaka, ukupno 20, pri čemu je svaka točka definirana kao presjek vertikalnog i horizontalnog ruba prozorskog otvora ([slika 6.11](#)). Takva definirana mjesta na fasadi osiguravaju visoku prepoznatljivost i ponovljivost mjerenja, čime se smanjuje subjektivnost pri njihovoj identifikaciji na panoramskim fotografijama.

Izmjera je provedena u lokalnom koordinatnom sustavu, temeljenom na točkama referentne mreže tvrtke Geo-centar ([prilog 1](#)). Te su točke stabilizirane geodetskim bolcnama, a njihove su koordinate prethodno određene kombinacijom preciznih optičkih mjerenja (poligonometrija i precizni nivelman) te izjednačene primjenom metode najmanjih kvadrata. Navedene su točke poslužile kao geodetska osnova za orijentaciju mjerne stanice

(primjenom metode kombiniranog presjeka), ali i za georeferenciranje testnih skenova, čime je omogućeno da koordinate dobivene monoskopskim kartiranjem budu izražene u istom sustavu kao i referentne koordinate određene geodetskom mjernom stanicom.



Slika 6.10. Prikaz položaja dvaju stajališta instrumenta te točaka mreže tvrtke Geo-centar korištene za orijentaciju mjerne stanice metodom kombiniranog presjeka

a)



b)



Slika 6.11. Prikaz referentnih točaka određenih mjernom stanicom na pročelju sjeverne (a) i južne zgrade (b)

Mjerenja referentnih točaka provedena su u modu mjerenja duljine bez prizme (*engl. reflectorless*), što je prikladan način rada s obzirom na to da se točke nalaze na elementima fasade koje nije moguće fizički označiti zbog njihove visine i nepristupačnosti. Svaka je referentna točka mjerena u dva položaja instrumenta (jedan girus), čime su kompenzirane osnovne instrumentalne pogreške mjerenja kutova. Dodatno, mjerenje svake točke s dvaju stajališta osiguralo je veću pouzdanost određivanja duljina, budući da je svaka udaljenost opažena iz dva različita smjera.

Za svaku referentnu točku dobivena su po dva nezavisna seta koordinata, po jedan sa svakog stajališta instrumenta. Budući da su oba seta mjerenja bila ujednačene pouzdanosti i provedena uz istu metodu orijentacije, konačne koordinate određene su običnom aritmetičkom sredinom pripadnih setova koordinata ([prilog 2](#)).

6.4.3. Provođenje testnih skenova

Za potrebe neovisne terenske verifikacije kvalitete umjerivanja kamere i vremenske sinkronizacije provedena su dva zasebna skeniranja na testnom poligonu. Prvo skeniranje izvedeno je s tvornički integriranom kamerom GeoSLAM ZEB-Vision, a drugo s korisnički integriranom kamerom Insta360 X3. U oba slučaja kamere su prethodno umjerene primjenom razvijene metode, tako da su relativni kalibracijski parametri bili unaprijed poznati. Budući da je cilj ovih skeniranja bio posredno ispitati točnost predstavljenih metoda umjerivanja i sinkronizacije, bilo je nužno organizirati snimanje na način koji minimizira utjecaj svih ostalih čimbenika na rezultate monoskopskog kartiranja.

Nesigurnost određivanja položaja točaka monoskopskim kartiranjem teoretski ovisi o više međusobno povezanih čimbenika, među kojima se izdvajaju:

- nesigurnost relativnih kalibracijskih parametara
- nesigurnost vremenske sinkronizacije kamere
- vrijeme ekspozicije kamere
- linearna brzina kretanja
- kutna brzina rotacije
- tip zatvarača (globalni ili redni) kamere
- dimenzije panorame (broj piksela)
- nesigurnost odabira točke na panoramskoj slici

- šum LiDAR skena
- udaljenost mjerene točke od kamere
- elevacija (vertikalni kut) mjerene točke na panoramskoj slici

Ovisno o korištenom senzoru, pojedini parametri koji utječu na nesigurnost monoskopskog kartiranja mogu se u potpunosti kontrolirati ili značajno reducirati, dok na druge nije moguće izravno utjecati. Kod kamere ZEB-Vision, koja koristi mehanički globalni zatvarač, u potpunosti je izostao utjecaj geometrijskih deformacija svojstvenih rednom zatvaraču. Nasuprot tome, kod korisnički integrirane kamere Insta360 X3 taj je utjecaj prisutan i ne može se ukloniti, već se može samo opisati i uzeti u obzir pri interpretaciji rezultata.

Šum LiDAR-a smanjen je primjenom odgovarajućih postupaka filtriranja, dok se na dimenzije panoramske slike, kao ni na pogrešku vizualne identifikacije točaka na slici, ne može izravno utjecati. Linearna i kutna brzina kretanja sustava donekle se mogu kontrolirati operativnim postupkom snimanja. Vrijeme ekspozicije moguće je kontrolirati za obje kamere te ga je ključno postaviti na najmanje 1/250 s. Time se pomak senzora tijekom ekspozicije značajno reducira, a ujedno se smanjuje i mogućnost zamućenja slike.

Udaljenost točke od kamere može se kontrolirati odabirom točaka na različitim udaljenostima, pri čemu se pretpostavlja da nesigurnost monoskopskog kartiranja raste proporcionalno udaljenosti. Konačno, elevacija točaka čije se koordinate određuju monoskopskom metodom u potpunosti se može kontrolirati. Zbog geometrijskih svojstava projekcije sferne panorame na ravninu, nužno je ograničiti odabir točaka na one s manjim apsolutnim vrijednostima elevacije, čime se smanjuje utjecaj projekcijskih deformacija na konačnu točnost određivanja položaja.

Sažet prikaz parametara i načina njihove kontrole prikazan je u tablici 6.4.

Tablica 6.4. Prikaz parametara koji utječu na nesigurnost monoskopskog kartiranja i načini njihove kontrole

Parametar	Status	Način kontrole / eliminacije
Relativni kalibracijski parametri	Predmet ispitivanja	-
Vremenska sinkronizacija	Predmet ispitivanja	-

Vrijeme ekspozicije	Kontrolirano	Postavljeno $\geq 1/250$ s radi zanemarivog utjecaja
Linearna brzina kretanja	Kontrolirano	Ravnomjeran hod (približno 1 m/s) i statično snimanje
Kutna brzina rotacije	Kontrolirano	Izbjegnuto rotiranje sustava prilikom hodanja
Utjecaj rednog zatvarača	Djelomično kontrolirano	ZEB-Vision - mehanički globalni zatvarač; Insta360 X3 - redni zatvarač
Dimenzije panorame	Zadano	Prihvaća se zadana razlučivost 3840×1920 piksela za obje kamere
Točnost odabira točke na slici	Nekontrolirano	Ublaženo pažljivom identifikacijom
Šum LiDAR skena	Umanjen utjecaj	Primijenjen filter šuma
Udaljenost točke od kamere	Kontrolirano	Odabrane točke na različitim udaljenostima
Elevacija točke na panorami	Kontrolirano	Odabrane točke sa manjim elevacijama

Oba testna skeniranja izvedena su tako da se sustavno utječe na sve parametre na koje je to izvedivo te da se njihov utjecaj na konačne rezultate minimizira ili potpuno eliminira. Svako skeniranje započelo je statičnom inicijalizacijom, koja je u slučaju Insta360 X3 kamere istovremeno iskorištena za vremensku sinkronizaciju primjenom razvijene metode sinkronizacije. Nakon inicijalizacije operater se kretao linearno duž testne staze ujednačenom brzinom od približno 1 m/s, pri čemu su izbjegnute sve rotacije sustava. Takvim postupkom eliminirani su utjecaji kutne brzine, a linearno gibanje omogućilo je stabilne uvjete za procjenu točnosti vremenske sinkronizacije. Nakon dolaska na kraj staze operater se polagano okrenuo i vratio prema mjestu gdje je skeniranje započelo ([slika 6.12.a](#)).

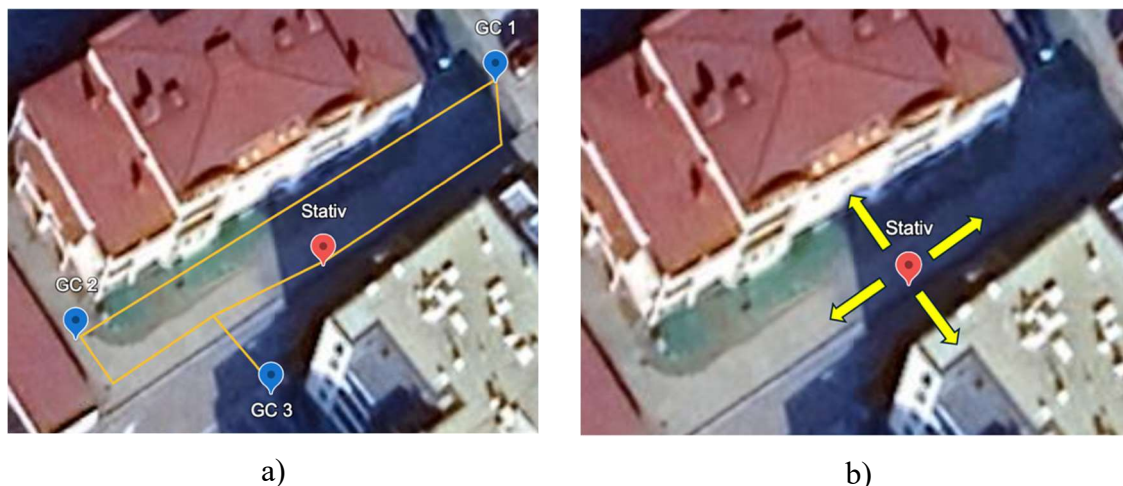
Kako bi se oba skena dovela u isti lokalni koordinatni sustav kao i geodetski izmjerene referentne točke na pročeljima zgrada, tijekom svakog skeniranja mobilni je sustav statično postavljen na tri geodetske točke (GC 1, GC 2 i GC 3), koristeći ploču za georeferenciranje (slika 6.12.a). Na svakoj od njih sustav je bio zadržan približno šest sekundi, što je omogućilo pouzdano georeferenciranje skenova te izravnu usporedbu monoskopskih koordinata s geodetskim referentnim vrijednostima. Ocjena točnosti georeferenciranja za oba skena izvezena je iz programa za SLAM procesiranje te je prikazana u tablici 6.5.

Tablica 6.5. Ocjena točnosti georeferenciranja testnih skenova, izražena pogreškama po koordinatnim osima za svaku referentnu točku

	Sken sa ZEB-Vision kamerom			Sken sa Insta360 X3 kamerom		
	v_x [mm]	v_y [mm]	v_z [mm]	v_x [mm]	v_y [mm]	v_z [mm]
GC 1	4	-5	-3	-6	4	5
GC 2	-3	-6	5	4	-5	-4
GC 3	6	2	-4	-5	6	-3

Na sredini staze bio je postavljen geodetski stativ koji je služio kao platforma za statička snimanja fotografija. Prilikom povratka mobilni je sustav postavljen na stativ pomoću ploče za georeferenciranje, čime je osigurano stabilno pozicioniranje senzora. Sustav je zatim doveden u četiri različita orijentacijska položaja na način da je kamera okrenuta prema prvoj zgradi, prema drugoj zgradi te u dva međupoložaja – pri čemu je u svakom položaju mobilni sustav zadržan nekoliko sekundi kako bi se prikupila barem jedna fotografija po položaju (slika 6.12.b). Postavljanjem mobilnog sustava i kamere u statički položaj prilikom prikupljanja fotografija u potpunosti je eliminiran utjecaj pogreške vremenske sinkronizacije, vremena ekspozicije, linearne brzine kretanja, kutne brzine rotacije i rednog zatvarača.

Ovakva je konfiguracija skeniranja omogućila jasno razdvajanje utjecaja pojedinih skupina parametara na monoskopsko kartiranje, te je prvi linearni segment kretanja (između točaka GC 1 i GC 2) korišten za procjenu točnosti vremenske sinkronizacije, dok su četiri statična položaja na stativu korištena za procjenu točnosti umjerivanja kamere.



Slika 6.12. Slika a) prikazuje putanju testnih skenova (žuta linija), točke geodetske mreže korištene za georeferenciranje skenova te položaja stativa, dok slika b) prikazuje četiri smjera u koje je mjerni sustav sa kamerom orijentiran prilikom postavljanja na stativ (izvor: Google Earth)

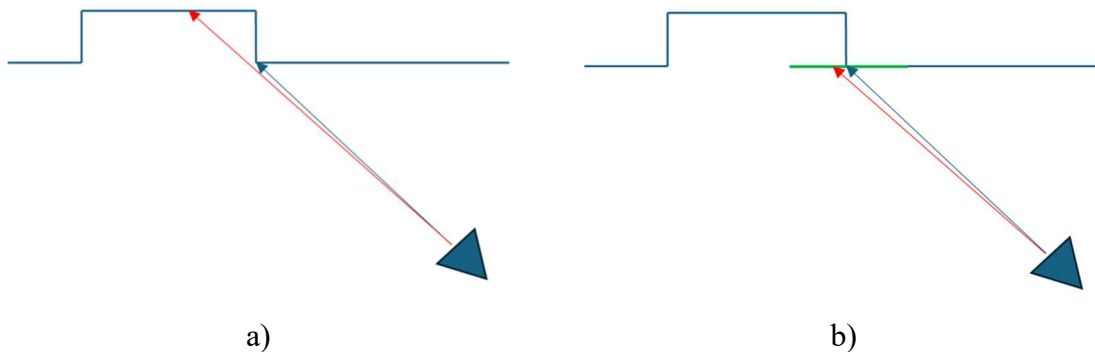
6.4.4. Određivanje koordinata metodom monoskopskog kartiranja

Nakon provedbe testnih skeniranja i dovođenja podataka u zajednički koordinatni sustav pristupilo se određivanju prostornih koordinata referentnih točaka na pročeljima zgrada primjenom monoskopskog kartiranja. Cilj ovoga postupka bio je dobiti dva neovisna skupa koordinata – po jedan iz svakog testnog skena – te ih usporediti s geodetski izmjenim referentnim koordinatama kako bi se mogla provesti sveobuhvatna statistička analiza.

Monoskopsko kartiranje provedeno je za ukupno 20 referentnih točaka na pročeljima dviju zgrada, identične onima izmjenim geodetskom mjernom stanicom. Za svaki od dvaju testnih skenova (ZEB-Vision i Insta360 X3) formiran je zaseban skup monoskopski određenih koordinata, čime su omogućene neovisne procjene kvalitete oba sustava. Sam postupak monoskopskog kartiranja proveden je sukladno metodologiji opisanoj u poglavlju 4.3.2.

Posebnu su metodološku zahtjevnost predstavljala mjesta na kojima su definirane referentne točke — rubovi građevinskih otvora (prozora). Takve geometrije karakterizira nagla promjena dubine, pri čemu i minimalna pogreška u orijentaciji panorame ili odabiru piksela može dovesti do pogrešne projekcije točke na susjednu plohu, primjerice na ravninu prozorskog otvora umjesto na fasadni zid (slika 6.13.a). Budući da bi takve pogreške značajno narušile interpretaciju rezultata, uveden je dodatni postupak kontrole dubine.

Za svaku referentnu točku najprije je određena lokalna fasadna ravnina na temelju LiDAR točaka koje pripadaju zidnoj plohi u neposrednoj blizini promatrane točke. Ova ravnina korištena je kao geometrijsko ograničenje prilikom monoskopskog kartiranja: nakon odabira točke na panoramskoj slici, njezina je konačna dubina definirana kao presjek vidne zrake s prethodno procijenjenom ravninom zida (slika 6.13.b). Na taj su način izbjegnute grube geometrijske pogreške, osobito one koje bi mogle nastati uslijed sitnih odstupanja u relativnim kalibracijskim parametrima, pogrešaka u vremenskoj sinkronizaciji ili nesavršenosti ljudskog odabira piksela.



Slika 6.13. Tlocrtni prikaz problema određivanja dubine pri monoskopskom kartiranju rubova prozorskih otvora. Slika a) prikazuje kako mala pogreška u smjeru zrake može rezultirati projekcijom točke na pogrešnu plohu unutar otvora. Slika b) vizualizira kako se definiranjem lokalne fasadne ravnine (zeleni linija) projekcija točke ograničava na stvarnu plohu fasade, čime se uklanjaju pogreške dubine

Nakon što su za oba skena određene koordinate svih 20 referentnih točaka, pristupilo se statističkoj obradi dobivenih podataka, koristeći vlastite Python skripte. Cjeloviti rezultati, uključujući sve numeričke pokazatelje i grafičke analize, prikazani su u narednom poglavlju.

7. TEORIJSKA ANALIZA, REZULTATI I VERIFIKACIJA METODA UMJERIVANJA I SINKRONIZACIJE

U ovome poglavlju predstavljaju se teorijska razmatranja, kvantitativni rezultati i neovisne provjere dviju metoda razvijenih u okviru ovoga istraživanja: (1) metode sinkronizacije vremena panoramske kamere i SLAM ručnog mobilnog sustava te (2) metode umjerivanja panoramske kamere u odnosu na koordinatni sustav mobilnog sustava. Obje metode zajedno čine cjelovit postupak integracije panoramske kamere u SLAM sustav, ali se temelje na različitim matematičkim modelima i podložne su različitim izvorima pogrešaka. Stoga se u ovome poglavlju analiziraju i verificiraju odvojeno, uz naglasak na njihove međusobne veze i utjecaj na konačnu geometrijsku konzistenciju panoramskih slika i laserskog skena.

Nakon što su u prethodnim poglavljima definirani matematički modeli transformacija i procjene relativnih kalibracijskih parametara (poglavlje 4), te detaljno opisan predloženi postupak obrade podataka uključujući algoritam vremenske sinkronizacije i postupak procjene relativnih kalibracijskih parametara (poglavlje 5), kao i pripadajući eksperimentalni dizajn (poglavlje 6), cilj je ovoga poglavlja kvantitativno ocijeniti učinkovitost, robusnost i ograničenja predloženih metoda u kontekstu provjere postavljenih hipoteza.

U prvome dijelu poglavlja daje se teorijska analiza očekivanih granica točnosti predstavljenih metoda. Time se formalizira na koji način različiti parametri utječu na procjenu vremenske sinkronizacije i relativnih kalibracijskih parametara. Ovaj teorijski okvir služi kao referentna osnova za interpretaciju dobivenih eksperimentalnih rezultata.

Slijedi skup eksperimentalnih analiza optimalnog kalibracijskog skena, u kojima se ispituje utjecaj trajanja skena, broja i rasporeda orijentacijskih točaka te stupnja preklopa panoramskih snimaka. Time se identificiraju uvjeti pod kojima metoda umjerivanja daje najpouzdanije rezultate te se utvrđuju minimalni zahtjevi za buduću terensku primjenu.

U nastavku se analizira točnost i preciznost procijenjenih relativnih kalibracijskih parametara za dvije kamere različitih karakteristika: tvornički integriranu ZEB-Vision kameru i korisnički integriranu Insta360 kameru. Usporedba s tvorničkim vrijednostima omogućuje procjenu apsolutne točnosti, dok analiza ponovljivosti u neovisnim skenovima daje uvid u statističku stabilnost metode.

Na kraju poglavlja prikazana je neovisna terenska verifikacija temeljena na metodi monoskopskog kartiranja, koja omogućuje provjeru robusnosti procjene relativnih kalibracijskih parametara i pogreške vremenske sinkronizacije u stvarnim uvjetima rada mobilnog sustava.

7.1. Teorijska analiza mogućnosti i ograničenja metoda

Teorijska analiza služi kao polazište za razumijevanje granica točnosti koje je moguće postići primjenom razvijenih postupaka sinkronizacije vremena i umjerivanja panoramske kamere. Nesigurnost ovih postupaka određena je prvenstveno fizikalnim svojstvima senzora i matematičkim modelima na kojima se temelje, zbog čega je potrebno formalno sagledati njihova ograničenja prije interpretacije eksperimentalnih rezultata.

U ovom dijelu poglavlja prikazuje se i teorijska procjena ostvarive točnosti monoskopskog kartiranja. Uvrštavanje ove analize opravdano je zato što monoskopsko kartiranje predstavlja glavnu praktičnu primjenu orijentiranih panoramskih snimaka, bilo za određivanje koordinata značajki na slici, bilo za kolorizaciju laserskog skena. Uz to, završni test točnosti u poglavlju 7 provodi se upravo pomoću monoskopskog kartiranja, pa je poznavanje njegovih teorijskih ograničenja nužno kako bi se ispravno protumačili dobiveni rezultati.

7.1.1. Teorijska analiza točnosti predstavljene metode vremenske sinkronizacije

Točnost vremenske sinkronizacije korisnički integrirane panoramske kamere i SLAM ručnog mobilnog sustava određena je prvenstveno vremenskom razlučivošću senzorskih podataka koji sudjeluju u detekciji početnog mikro-pomaka. U ovome radu korištena je panoramska kamera (Insta360 X3) koja snima video frekvencije 60 sličica u sekundi, što odgovara vremenskom intervalu $T_{vid} = 16.7$ ms, dok SLAM sustav ZEB-Horizon korisniku daje trajektoriju uzorkovanu na 100 Hz, odnosno $T_{traj} = 10$ ms. Iako interno IMU podaci ZEB-Horizon mobilnog sustava imaju veću frekvenciju (potvrđeno pregledavanjem *log* zapisa nakon procesiranja), korisnik im ne može pristupiti, te je zbog toga teorijska analiza sinkronizacije nužno ograničena na trajektoriju od 100 Hz.

Budući da se početni mikro-pomak može detektirati isključivo na razini najbližeg diskretnog uzorka u svakoj od dviju vremenskih serija, nesigurnost određivanja pripadnih trenutaka uvjetovana je kvantizacijskom pogreškom. Ako se pretpostavi da je stvarni trenutak događaja unutar svakog intervala uniformno raspoređen, tada standardno odstupanje

kvantizacije iznosi $T/\sqrt{12}$ (Taylor 1997). Kombiniranjem dvaju neovisnih doprinosa dobiva se ukupna nesigurnost sinkronizacije u obliku standardnog odstupanja:

$$\sigma_{\Delta t} \approx \sqrt{\left(\frac{T_{\text{traj}}}{\sqrt{12}}\right)^2 + \left(\frac{T_{\text{vid}}}{\sqrt{12}}\right)^2} \approx 5.6 \text{ ms} \quad (7.1)$$

Ova vrijednost predstavlja teorijsku donju granicu nesigurnosti sinkronizacije, koja je određena isključivo diskretnošću uzorkovanja. Model pretpostavlja da je mikro-pomak jasno detektiran u oba signala, odnosno da se promjena u odnosu na šum pojavljuje u prvom uzorku u kojem je sustav započeo gibanje. U takvom slučaju kvantizacija je dominantan izvor pogreške, a dodatni doprinosi su manji ili zanemarivi u odnosu na kvantizacijsku komponentu. Formula korištena za procjenu teorijske nesigurnosti sinkronizacije temelji se na standardnim rezultatima teorije vjerojatnosti, pri čemu se pretpostavlja uniformna razdioba položaja događaja unutar vremenskog intervala $[0, T]$ (Taylor 1997, Bendat i Piersol 2010).

S obzirom na to da tipične brzine kretanja ručnog mobilnog sustava iznose oko 1 m/s, teorijska nesigurnost sinkronizacije od 5.6 ms odgovara prostornom pomaku od:

$$\Delta s \approx v \cdot \sigma_{\Delta t} \approx 6 \text{ mm}. \quad (7.2)$$

Takva teorijski ostvariva razina točnosti sinkronizacije je u potpunosti dostatna za primjenu panoramskih snimaka u postupcima kolorizacije oblaka točaka ili monoskopskog kartiranja te ne ograničava ukupnu točnost predložene metode umjerivanja kamere.

7.1.2. Teorijska analiza točnosti metode umjerivanja kamere

Teorijska točnost umjerivanja panoramske kamere određena je kombinacijom triju ključnih faktora:

1. nesigurnosti određivanja smjera projekcijskih zraka za sferne panorame
2. stabilnosti i geometrijske kvalitete SfM optimizacije
3. točnosti statičkih položaja mobilnog sustava dobivenih iz SLAM trajektorije

Za razliku od klasičnih metoda umjerivanja kamere baziranih na mjernim metama, ovdje se većina geometrijskih parametara određuje SfM pristupom, dok mjerne mete služe isključivo za provođenje rigidne transformacije između SLAM trajektorije i trajektorije kamere. Stoga

je teorijska analiza bitno drugačija od standardnog modela baziranog na mjernim metama i mora odražavati hijerarhijsku prirodu predložene metode.

Kod SfM optimizacije panorama rezolucije 3840×1920 (W x H) piksela, nesigurnost određivanja značajke (vezne točke) reda $\sigma_p \approx 0.3$ piksela rezultira kutnom nesigurnošću projekcijske zrake u iznosu:

$$\sigma_\theta \approx \frac{2\pi}{W} \sigma_p \quad (7.3)$$

Budući da SfM optimizira rotacije panorama na temelju velikog broja takvih značajki, njihova se varijanca smanjuje proporcionalno $1/\sqrt{M}$, gdje je M broj detektiranih značajki na slikama. Kod tipičnih scena i preklopa panorama, gdje je M reda nekoliko tisuća, teorijska nesigurnost rotacije pojedine panoramske kamere računa se prema:

$$\sigma_{\varphi, \theta, \psi}^{(\text{SfM})} \approx \frac{\sigma_\theta}{\sqrt{M}}, \quad (7.4)$$

što je u skladu s rezultatima izjednačenja bloka kada postoji široko vidno polje i visoka razina redundancije ([Hartley i Zisserman 2004](#)).

Na translacijske parametre unutar SfM-a dominantno utječe geometrija preklopa panorama. Panorame se snimaju tijekom kretanja kroz prostor, pa se paralaksa akumulira iz brojnih različitih pozicija. Budući da projekcija sferne panorame sadrži sve smjerove zraka ($360^\circ \times 180^\circ$), akumulirana paralaksa između velikog broja panorama daje vrlo dobro uvjetovane jednadžbe za translacijske parametre. Ovakva konfiguracija maksimizira kutnu divergenciju zraka, što je ključni preduvjet stabilnosti SfM translacije ([Snaveley i dr. 2007](#)). U takvim povoljnim geometrijskim uvjetima, red veličine teorijske nesigurnosti relativnih translacija panorama može se procijeniti na nekoliko milimetara do približno jednog centimetra, ovisno o lokalnoj strukturi scene i stupnju redundancije opažanja.

Apsolutna orijentacija veznih točaka kreiranih primjenom SfM algoritama postiže se pomoću nekoliko mjernih meta čije se 3D koordinate određuju iz položaja mobilnog sustava pri statičkim zaustavljanjima na mjernim metama. Budući da se stvarni položaj mobilnog sustava tijekom mirovanja ipak mijenja zbog šuma SLAM rješenja, teorijska nesigurnost položaja skenera u tim trenucima tipično iznosi $\sigma_s \approx 5 - 10$ mm. Navedeni raspon temelji se na konzistentnim empirijskim opažanjima tijekom provedenih kalibracijskih skenova te

predstavlja očekivanu razinu šuma IMU–LiDAR integracije u odsutnosti gibanja. Ovaj šum prenosi se u određivanje rigidne transformacije između koordinatnih sustava SLAM trajektorije i trajektorije kamere. Ako je broj mjernih meta N , teorijska nesigurnost translacijske komponente transformacije iznosi približno:

$$\sigma_t^{(\text{rigid})} \approx \frac{\sigma_s}{\sqrt{N}}, \quad (7.5)$$

što u tipičnim uvjetima (tri ili četiri mjerne mete) daje raspon od 3–6 mm. Utjecaj šuma na rotacijsku komponentu transformacije još je manji zbog međusobnih udaljenosti između meta i zbog toga što SfM već određuje vrlo stabilnu relativnu orijentaciju panorama. Time se teorijska nesigurnost konačnih relativnih kalibracijskih parametara rotacije može procijeniti na:

$$\sigma_{d\varphi, d\theta, d\psi} \approx 0.01^\circ - 0.03^\circ, \quad \sigma_{dx, dy, dz} \approx 2 - 6 \text{ mm} \quad (7.6)$$

Ove vrijednosti predstavljaju teorijsku granicu točnosti razvijenog postupka umjerivanja u kojem SfM određuje relativnu geometriju panorama (koristeći inicijalne položaje i rotacije izvedene iz SLAM trajektorije), a mjerne mete omogućuju prijenos te geometrije u koordinatni sustav kartiranja. Takav hibridni pristup omogućuje razinu točnosti koja bi bila teško ostvariva metodama koje se oslanjaju isključivo na mjerne mete, jer SfM pruža mnogo više informacija o relativnim orijentacijama između panorama nego što ograničen broj meta može pružiti samostalno.

7.1.3. Teorijska analiza točnosti monoskopskog kartiranja

Monoskopsko kartiranje pomoću orijentirane sferne panorame predstavlja najstroži oblik provjere ukupne geometrijske konzistencije sustava, budući da se u toj primjeni iskorištavaju svi procijenjeni parametri — translacijski i rotacijski parametri umjerivanja, procijenjena vremenska sinkronizacija, brzine gibanja mobilnog sustava, model projekcije panoramske slike te točnost označavanja točke na fotografiji. Od svih primjena panoramskih snimaka navedenih u poglavlju 4.3, upravo monoskopsko kartiranje ima najveću težinu jer se koristi i kao direktan način određivanja koordinata točaka na slici i kao posredan postupak pri kolorizaciji laserskog skena. Stoga je nužno razviti teorijski model koji kvantificira utjecaj svih relevantnih izvora pogrešaka na konačnu točnost određivanja prostorne koordinate točke pomoću slike.

U prethodnom poglavlju (6.4.3) opisani su svi izvori pogrešaka koji utječu na monoskopsko kartiranje, dok se ovdje daje matematička formulacija njihovih doprinosa i teorijska procjena ukupne nesigurnosti za tipične vrijednosti parametara. Početni model pretpostavlja da se ukupna nesigurnosti sastoji od tri dominantne komponente:

1. translacijske nesigurnosti, koja proizlazi iz nesigurnosti relativnih kalibracijskih parametara i vremenske sinkronizacije
2. rotacijske nesigurnosti, koja se multiplicira s udaljenošću objekta od kamere
3. nesigurnosti označavanja točaka na slici.

Ukupna translacijska nesigurnost određuje se prema izrazu:

$$\sigma_{trans} \approx \sqrt{\sigma_T^2 + (v \sigma_{\Delta t})^2 + (r \omega \sigma_{T_{exp}})^2 + (r \omega \sigma_{T_r})^2 + \sigma_{LiDAR}^2}, \quad (7.7)$$

gdje je σ_T nesigurnost relativnih kalibracijskih parametara translacije, $\sigma_{\Delta t}$ nesigurnost vremenske sinkronizacije, v linearna brzina gibanja skenera, r euklidska norma vektora relativnih kalibracijskih parametara translacije (udaljenost između referentne točke navigacijske jedinice i perspektivnog centra kamere), ω kutna brzina, $\sigma_{T_{exp}}$ nesigurnost zbog vremena ekspozicije kamere, σ_{T_r} nesigurnost zbog utjecaja rednog zatvarača (kod Insta360 kamere), a σ_{LiDAR} šum LiDAR senzora.

Rotacijska nesigurnost prenosi se u prostornu nesigurnost zbog toga što nesigurnost u rotaciji (orijentaciji) panorame σ_θ uzrokuje odstupanje zrake koje na udaljenosti D iznosi:

$$\sigma_{rot}(D) \approx D \sigma_\theta \quad (7.8)$$

Nesigurnost definiranja točke na panorami transformira se u kutnu nesigurnost prema izrazima:

$$\sigma_{\theta,mark} \approx \frac{2\pi}{W} \sigma_{pix}, \quad \sigma_{\varphi,mark} \approx \frac{2\pi}{H} \sigma_{pix}, \quad (7.9)$$

$$\sigma_{mark,ang} = \sqrt{\sigma_{\theta,mark}^2 + \sigma_{\varphi,mark}^2}$$

gdje je W širina panorame, H je visina panorame, a σ_{pix} nesigurnost označavanja točke (u ovoj analizi korištena je pretpostavljena vrijednost od 1 piksela). Njezina projekcija u prostor iznosi:

$$\sigma_{mark}(D) \approx D \sigma_{mark,ang} \quad (7.10)$$

Ukupna teorijska nesigurnost monoskopskog kartiranja dobiva se kao:

$$\sigma_{mono}(D) \approx \sqrt{\sigma_{trans}^2 + \sigma_{rot}(D)^2 + \sigma_{mark}(D)^2} \quad (7.11)$$

U nastavku se daju teorijski primjeri u vidu tabličnih prikaza ([tablica 7.1](#) i [7.2](#)) za obje korištene kamere. U oba slučaja pretpostavljaju se identični uvjeti snimanja, osim u parametrima sinkronizacije i utjecaja rednog zatvarača, koji je za Insta360 kameru postavljen na 7 ms (konzervativna procjena zasnovana na tipičnom ponašanju CMOS senzora pri rezoluciji 3840×1920 i snimanju 30–60 sličica u sekundi). Ostali parametri definirani su sukladno očekivanim ili unaprijed zadanim vrijednostima.

Tablica 7.1. Prikaz teoretskih vrijednosti svih parametara koji utječu na nesigurnost monoskopskog kartiranja za obje korištene kamere.

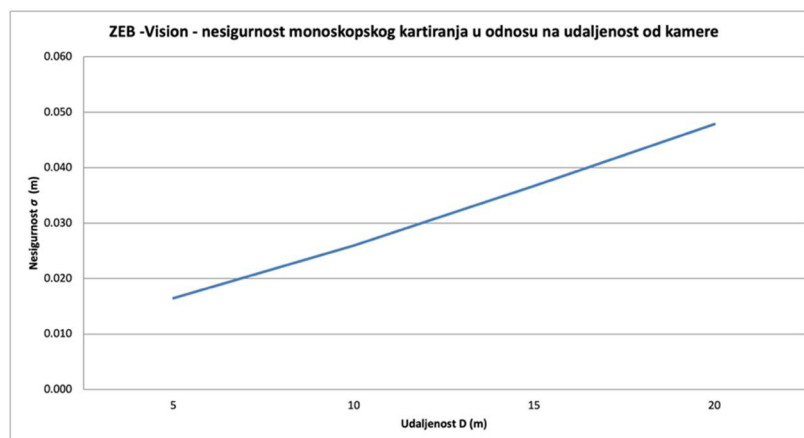
Parametar	ZEB-Vision	Insta360
Nesigurnost relativnih kalibracijskih parametara translacije	4 mm	4 mm
Nesigurnost relativnih kalibracijskih parametara rotacije	0.03 °	0.03 °
Nesigurnost vremenske sinkronizacije	2 ms	6 ms
Vrijeme ekspozicije kamere	1/250 s	1/250 s
Linearna brzina kretanja mobilnog sustava	1 m/s	1 m/s
Kutna brzina rotacije mobilnog sustava	20 °/s	20 °/s
Utjecaj rednog zatvarača	0 ms	7 ms
Nesigurnost označavanja točke na slici	1 piksel	1 piksel
Šum laserskog skena	1 cm	1 cm

Tablica 7.2. Nesigurnost monoskopskog kartiranja za obje korištene kamere na udaljenostima od 5 do 20 m, izračunata korištenjem parametara iz tablice 7.1.

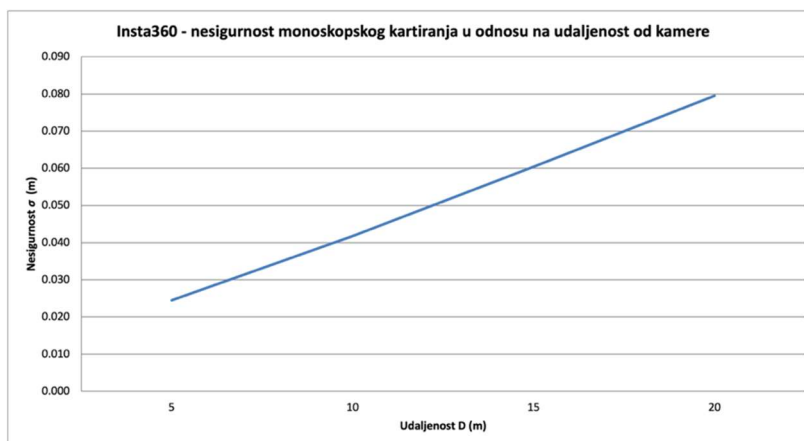
	$\sigma_{\text{mono}} (5 \text{ m})$	$\sigma_{\text{mono}} (10 \text{ m})$	$\sigma_{\text{mono}} (15 \text{ m})$	$\sigma_{\text{mono}} (20 \text{ m})$
ZEB-Vision	1.6 cm	2.6 cm	3.7 cm	4.8 cm
Insta360	2.4 cm	4.2 cm	6.0 cm	7.9 cm

Teoretski rezultati pokazuju da monoskopsko kartiranje u potpunosti reflektira kvalitetu svih prethodnih koraka umjerivanja, sinkronizacije i dinamike sustava. Tvornička kamera ZEB-Vision, zahvaljujući hardverskoj sinkronizaciji i izostanku efekta rednog zatvarača, postiže teoretsku nesigurnost od 2–5 cm za udaljenosti 5–20 m, što potvrđuje da njezina razina sinkronizacije eliminira većinu translacijskih izvora pogrešaka. Suprotno tome, kod korisnički integrirane Insta360 kamere dodatna vremenska nesigurnost i pogreška zbog rednog zatvarača multipliciraju se sa gibanjima sustava, te već pri umjerenim brzinama uzrokuju povećanje ukupne teoretske nesigurnosti na 2–8 cm (slika 7.1).

a)



b)



Slika 7.1. Grafički prikazi teoretske nesigurnosti monoskopskog kartiranja za ZEB-Vision (a) i Insta360 (b) u odnosu na udaljenost od kamere

7.2. Eksperimentalne analize optimalnog kalibracijskog skena

Nakon provedene teorijske analize točnosti i primjenjivosti novo razvijenih metoda vremenske sinkronizacije i umjerivanja kamere, bilo je moguće pristupiti analizi praktičnih eksperimenata, provedenih i detaljno opisanih u poglavlju 6.2. Analiza je provedena odvojeno za svaki pojedini eksperiment, pri čemu je sustavno razmatran utjecaj trajanja kalibracijskog skena, broja i prostornog rasporeda orijentacijskih točaka te stupnja preklapanja panoramskih snimaka na stabilnost i kvalitetu postupka umjerivanja tvornički integrirane kamere GeoSLAM ZEB-Vision. Na temelju provedene sveobuhvatne analize doneseni su zaključci o optimalnom oblikovanju kalibracijskog skena s ciljem postizanja stabilnih i pouzdanih kalibracijskih rezultata.

7.2.1. Analiza utjecaja trajanja kalibracijskog skena

Eksperiment analize utjecaja trajanja kalibracijskog skena proveden je u skladu s postupkom opisanim u poglavlju 6.2.2. Cilj eksperimenta bio je ispitati kako ukupno trajanje kalibracijskog skena utječe na točnost procjene relativnih kalibracijskih parametara tvornički integrirane kamere ZEB-Vision.

Kalibracijski sken proveden je pet puta na istom testnom području, uz zadržavanje jednakih uvjeta snimanja i identične metodologije obrade podataka. Osim trajanja skena, koje je iznosilo 2, 3, 4, 5 i 6 minuta, kontrolirano je i povećavanje broja orijentacijskih točaka. Kako bi se u svakom eksperimentu očuvala povoljna prostorna geometrija orijentacijskih točaka, svaki sljedeći sken uključivao je dvije dodatne točke u odnosu na prethodni. Time je osigurano da eventualne promjene u kvaliteti rješenja nisu posljedica degradacije geometrije, već prvenstveno duljine trajanja skena i pripadne količine prikupljenih opažanja.

Dobiveni relativni kalibracijski parametri uspoređeni su s tvorničkim referentnim vrijednostima proizvođača koje se smatraju nominalno točnima i služe kao osnova za procjenu pogrešaka (tablica 7.3). Uz relativne kalibracijske parametre izračunate su u postupku izjednačenja i pripadne ocjene točnosti nepoznanica u obliku standardnog odstupanja, zasebno za translacijske (s_T) i rotacijske (s_R) parametre. Dobiveni su rezultati prikazani u tablicama 7.4 i 7.5.

Tablica 7.3. Tvorničke vrijednosti relativnih kalibracijskih parametara za ZEB-Vision kameru

	dx [mm]	dy [mm]	dz [mm]	dφ [°]	dθ [°]	dψ [°]
Referentna vrijednost	35	0	200	-0.56	2.37	-0.12

Tablica 7.4. Relativni kalibracijski parametri i njihova ocjena točnosti dobiveni u testnim kalibracijskim skenovima

Trajanje skena	Broj točaka	s_T [mm]	s_R [°]	dx [mm]	dy [mm]	dz [mm]	dφ [°]	dθ [°]	dψ [°]
2 min	6	2.2	0.00	33	2	198	-0.60	2.41	-0.10
3 min	8	1.7	0.01	36	-2	202	-0.55	2.34	-0.14
4 min	10	1.8	0.01	34	-1	201	-0.57	2.38	-0.11
5 min	12	1.5	0.03	37	1	203	-0.52	2.33	-0.16
6 min	14	1.7	0.02	34	2	199	-0.58	2.39	-0.13

Tablica 7.5. Pogreške izračunatih relativnih kalibracijskih parametara u odnosu na referentne vrijednosti

Trajanje skena	v_{dx} [mm]	v_{dy} [mm]	v_{dz} [mm]	v_{dφ} [°]	v_{dθ} [°]	v_{dψ} [°]
2 min	-1.8	1.8	-1.6	-0.04	0.04	0.02
3 min	1.1	-1.6	1.9	0.01	-0.03	-0.02
4 min	-0.6	-0.9	0.7	-0.01	0.01	0.01
5 min	2.3	1.2	2.6	0.04	-0.04	-0.04
6 min	-0.9	2.3	-0.8	-0.02	0.02	-0.01

Na temelju provedenih eksperimenata može se zaključiti da trajanje kalibracijskog skena, u razmatranom rasponu od 2 do 6 minuta, nema značajan utjecaj na točnost procjene relativnih kalibracijskih parametara. Dobivene pogreške translacijskih i rotacijskih parametara ostaju usporedive za sve analizirane skenove te ne pokazuju sustavnu ovisnost o duljini trajanja snimanja. Također, standardna odstupanja relativnih kalibracijskih parametara ukazuje na

visoku točnost umjerivanja kamere za svih pet skenova. Time se potvrđuje da je, uz očuvanje povoljne geometrije orijentacijskih točaka, trajanje kalibracijskog skena sekundarni čimbenik u odnosu na ostale elemente postupka umjerivanja.

7.2.2. Analiza utjecaj broja i rasporeda orijentacijskih točaka

U ovom eksperimentu analiziran je utjecaj broja i prostornog rasporeda orijentacijskih točaka na točnost i stabilnost postupka umjerivanja tvornički integrirane kamere. Postupak izvođenja eksperimenta opisan je u poglavlju 6.2.3, dok se u ovom poglavlju razmatraju dobiveni rezultati i njihova interpretacija.

Za razliku od prethodne analize, u ovom slučaju nije provedeno više neovisnih kalibracijskih skenova. Umjesto toga, korišten je jedan kalibracijski sken u trajanju od približno dvije minute, preuzet iz eksperimenta opisanog u poglavlju 7.2.1. Na temelju istog skupa terenskih podataka formirano je šest različitih scenarija obrade, pri čemu su se sustavno mijenjali broj i prostorni raspored orijentacijskih točaka. Promjene su ostvarene selektivnim uključivanjem i isključivanjem pojedinih točaka, čime je omogućeno ispitivanje utjecaja geometrije orijentacijskih točaka bez dodatnih varijacija uzrokovanih različitim uvjetima snimanja ili obrade.

Polazni scenarij uključivao je svih šest dostupnih orijentacijskih točaka, pravilno raspoređenih po prostoru kalibracijskog područja. U narednim scenarijima broj točaka postupno je smanjivan, pri čemu su formirane konfiguracije s pet, četiri i tri orijentacijske točke uz zadržavanje povoljne prostorne geometrije. Dodatno su analizirana dva scenarija u kojima je prostorni raspored orijentacijskih točaka bio nepovoljan, karakteriziran grupiranjem točaka i ograničenom prostornom bazom.

Za svaki od šest scenarija provedena je identična obrada podataka i izračun relativnih kalibracijskih parametara, koji su zatim uspoređeni s tvorničkim referentnim vrijednostima proizvođača ([tablica 7.3](#)). Time je osigurano da se razlike u dobivenim rezultatima mogu izravno pripisati isključivo promjenama u broju i rasporedu orijentacijskih točaka. Dobiveni rezultati predloženi su u tablicama [7.6](#) i [7.7](#). Scenariji sa povoljnim prostornim rasporedom orijentacijskih točaka imaju u nazivu oznaku *P*, dok scenariji sa nepovoljnim rasporedom imaju u nazivu oznaku *N*.

Tablica 7.6. Prikaz izračunatih relativnih kalibracijskih parametara i pripadnih ocjena točnosti za svaki od definiranih scenarija rasporeda i broja orijentacijskih točaka. Scenariji sa nepovoljnim rasporedom točaka označeni su crvenom bojom

Oznaka scenarija	Broj točaka	s_T [cm]	s_R [°]	dx [mm]	dy [mm]	dz [mm]	$d\phi$ [°]	$d\theta$ [°]	$d\psi$ [°]
1-P	6	2.2	0.00	33	2	198	-0.60	2.41	-0.10
2-P	5	1.9	0.01	34	-1	201	-0.57	2.38	-0.11
3-P	4	1.4	0.02	36	-2	202	-0.55	2.34	-0.14
4-N	4	4.5	0.12	29	7	191	-0.71	2.56	-0.02
5-P	3	2.0	0.04	34	2	199	-0.59	2.41	-0.10
6-N	3	6.3	0.15	44	-8	209	-0.39	2.18	-0.29

Tablica 7.7. Prikaz pogrešaka relativnih kalibracijskih parametara za svaki definirani scenarij

Oznaka scenarija	v_{dx} [mm]	v_{dy} [mm]	v_{dz} [mm]	$v_{d\phi}$ [°]	$v_{d\theta}$ [°]	$v_{d\psi}$ [°]
1-P	-1.8	1.8	-1.6	-0.04	0.04	0.02
2-P	-0.6	-0.7	0.5	-0.01	0.01	0.01
3-P	1.2	-1.5	1.7	0.01	-0.03	-0.02
4-N	-6.1	6.7	-8.6	-0.15	0.19	0.10
5-P	-1.4	1.9	-1.2	-0.03	0.04	0.02
6-N	8.8	-8.1	8.9	0.17	-0.19	-0.17

Rezultati pokazuju da u scenarijima s povoljnom prostornom geometrijom orijentacijskih točaka broj uključenih orijentacijskih točaka nema značajan utjecaj na točnost procjene relativnih kalibracijskih parametara. Već tri pravilno raspoređene točke omogućuju stabilno rješenje, dok se povećanjem broja točaka ne uočava sustavno poboljšanje položajne ni kutne točnosti. Translacijske pogreške u tim scenarijima ostaju na razini od nekoliko milimetara, dok su rotacijske pogreške usporedive s onima dobivenima u prethodnom eksperimentu.

Suprotno tome, scenariji s nepovoljnim prostornim rasporedom orijentacijskih točaka rezultiraju izraženijim pogreškama u procijenjenim kalibracijskim parametrima, i to unatoč činjenici da je broj korištenih orijentacijskih točaka jednak ili veći nego u scenarijima s dobrom geometrijom. U tim slučajevima dolazi do vidljivog pogoršanja stabilnosti rješenja, što se očituje i u izračunatim standardnim odstupanjima translacijskih (s_T) i rotacijskih (s_R) parametara. Pritom translacijske pogreške dosežu vrijednosti reda veličine do približno 1 cm, a rotacijske pogreške višestruko su veće u odnosu na scenarije s povoljnim rasporedom.

Dobiveni rezultati jasno potvrđuju da broj orijentacijskih točaka sam po sebi nije presudan čimbenik točnosti postupka umjerivanja. Ključnu ulogu ima njihova prostorna raspodjela i geometrijska konfiguracija, koja mora osigurati dovoljnu prostornu bazu i geometrijsku raznolikost. Time se potvrđuje da pravilno raspoređene orijentacijske točke omogućuju robusno i stabilno umjerivanje čak i uz minimalan broj točaka, dok nepovoljna geometrija može značajno degradirati rezultate neovisno o njihovom ukupnom broju.

7.2.3. Analiza utjecaja preklopa između panoramskih snimaka

U ovom testu analiziran je utjecaj uzdužnog i poprečnog preklopa između panoramskih snimaka na točnost i stabilnost postupka umjerivanja kamere. Postupak izvođenja testa detaljno je opisan u poglavlju 6.2.4.

Eksperiment se temelji na jednom kalibracijskom skenu izvedenom u obliku tri paralelne linije snimanja, pri čemu je kamera u izvornom skenu snimala panoramske fotografije u intervalu od jedne sekunde. Iz istog skupa terenskih podataka formirano je ukupno šest scenarija obrade, kombiniranjem broja linija snimanja (jedna, dvije ili tri linije) i intervala ekspozicije kamere (jedna ili dvije sekunde). Na taj je način omogućena izolirana analiza utjecaja preklopa panoramskih snimaka, bez dodatnih varijacija uvjetovanih različitim kretanjem sustava, rasporedom orijentacijskih točaka ili promjenama u postupku obrade.

U svim scenarijima korišten je jednak broj orijentacijskih točaka, kao i identična metodologija obrade i izračuna relativnih kalibracijskih parametara. Dobiveni rezultati uspoređeni su s tvorničkim referentnim vrijednostima proizvođača, pri čemu su analizirane translacijske i rotacijske pogreške procijenjenih kalibracijskih parametara. Rezultati eksperimenta predloženi su u tablicama 7.8 i 7.9.

Tablica 7.8. Izračunati relativni kalibracijski parametri i pripadna ocjena točnosti za svaki korišteni scenarij preklopa između panorama

Broj linija	Interval ekspozicije	s_T [mm]	s_R [°]	dx [mm]	dy [mm]	dz [mm]	$d\phi$ [°]	$d\theta$ [°]	$d\psi$ [°]
1	1	3.2	0.04	31	5	195	-0.62	2.42	-0.06
2	1	1.9	0.02	38	-3	203	-0.53	2.35	-0.15
3	1	2.1	0.02	32	3	198	-0.58	2.4	-0.09
1	2	7.6	0.11	26	9	192	-0.65	2.47	-0.02
2	2	3.4	0.05	40	-5	196	-0.60	2.32	-0.17
3	2	2.8	0.04	32	4	204	-0.51	2.36	-0.14

Tablica 7.9. Prikaz pogrešaka relativnih kalibracijskih parametara u odnosu na referentne vrijednosti, izračunate za svaki scenarij preklopa između panorama

Broj linija	Interval ekspozicije	v_{dx} [mm]	v_{dy} [mm]	v_{dz} [mm]	$v_{d\phi}$ [°]	$v_{d\theta}$ [°]	$v_{d\psi}$ [°]
1	1	-4.4	4.7	-4.8	-0.06	0.05	0.06
2	1	3.2	-2.9	3.3	0.03	-0.02	-0.03
3	1	-2.6	3.1	-2.5	-0.02	0.03	0.03
1	2	-8.6	8.6	-7.9	-0.09	0.10	0.10
2	2	4.5	-4.8	-4.3	-0.04	-0.05	-0.05
3	2	-3.1	4.1	4.4	0.05	-0.01	-0.02

Rezultati pokazuju da scenariji s dostatnim preklopom panoramskih snimaka, ostvarenim kombinacijom najmanje dvije linije snimanja i intervala ekspozicije od jedne sekunde, omogućuju stabilne i točne procjene relativnih kalibracijskih parametara. U tim slučajevima translacijske pogreške ostaju na razini od nekoliko milimetara, dok su rotacijske pogreške reda veličine nekoliko stotinki stupnja, što je usporedivo s rezultatima dobivenima u prethodnim eksperimentima.

U scenarijima u kojima je preklap smanjen, bilo povećanjem intervala ekspozicije na dvije sekunde ili korištenjem samo jedne linije snimanja, uočava se blago pogoršanje kvalitete rješenja. Takvi scenariji rezultiraju većim raspršenjem procijenjenih kalibracijskih parametara, pri čemu translacijske pogreške dosežu vrijednosti reda veličine nekoliko milimetara, a pogreške rotacije približavaju se vrijednostima od oko 0.05 - 0.06 stupnjeva. Iako su takvi rezultati još uvijek unutar prihvatljivih granica, jasno ukazuju na smanjenu robusnost postupka u uvjetima ograničenog preklopa.

Najnepovoljniji rezultati dobiveni su u scenariju koji kombinira samo jednu liniju snimanja i interval ekspozicije od dvije sekunde. U tom slučaju preklap između susjednih panoramskih snimaka je minimalan, što dovodi do osjetnog pogoršanja stabilnosti fotogrametrijske obrade. Pogreške translacijskih parametara u tom scenariju dosežu vrijednosti reda veličine do približno 1 cm, dok pogreške rotacijskih parametara prelaze 0.08 stupnjeva. Takvi rezultati jasno ukazuju na ograničenja postupka umjerivanja u uvjetima nedostatnog preklopa panoramskih snimaka.

Na temelju provedenih analiza može se zaključiti da preklap između panoramskih snimaka predstavlja jedan od ključnih čimbenika koji utječu na pouzdanost postupka umjerivanja. Dostatan preklap, ostvaren odgovarajućim brojem linija snimanja i dovoljno čestim intervalom snimanja, omogućuje robusnu fotogrametrijsku obradu i stabilnu procjenu relativnih kalibracijskih parametara. Suprotno tome, smanjeni preklap dovodi do postupnog pogoršanja rezultata, pri čemu kombinacija jedne linije snimanja i duljeg intervala ekspozicije predstavlja najnepovoljniji scenarij za provedbu kalibracijskog skena.

7.3. Eksperimentalna analiza preciznosti i točnosti relativnih kalibracijskih parametara

Nakon što su u prethodnom poglavlju analizirani utjecaji ključnih parametara kalibracijskog skena na stabilnost postupka umjerivanja, u ovom se poglavlju naglasak prebacuje na eksperimentalnu analizu preciznosti i točnosti procijenjenih relativnih kalibracijskih parametara. Analiza se temelji na testovima provedenima i detaljno opisanim u poglavlju 6.3, čiji je cilj bio kvantitativno vrednovati pouzdanost dobivenih kalibracijskih rješenja.

Analiza obuhvaća obje korištene kamere, odnosno tvornički integriranu kameru GeoSLAM ZEB-Vision i korisnički integriranu kameru Insta360, pri čemu je za obje kamere ispitana

preciznost procijenjenih relativnih kalibracijskih parametara. Procjena apsolutne točnosti provedena je isključivo za kameru ZEB-Vision, budući da su za nju dostupne tvorničke referentne vrijednosti relativnih kalibracijskih parametara, dok za korisnički integriranu kameru takve referentne vrijednosti ne postoje. Time se omogućuje eksperimentalna ocjena prihvatljivosti obje postavljene hipoteze, pri čemu se za tvornički integriranu kameru vrednuju točnost i preciznost razvijene metode umjerivanja, dok se za korisnički integriranu kameru razmatra preciznost postupka, u skladu s dostupnim referentnim podacima.

U nastavku poglavlja zasebno se razmatraju eksperimentalni pokazatelji preciznosti i točnosti, s ciljem utvrđivanja razine ponovljivosti procijenjenih kalibracijskih parametara te njihove usklađenosti s nominalnim vrijednostima, čime se dodatno proširuje eksperimentalna evaluacija predloženog postupka umjerivanja.

7.3.1. Ocjena točnosti i preciznosti umjerivanja ZEB-Vision kamere

Ocjena točnosti i preciznosti postupka umjerivanja tvornički integrirane kamere GeoSLAM ZEB-Vision provedena je na temelju triju međusobno neovisnih kalibracijskih skenova, s ciljem procjene pouzdanosti procijenjenih relativnih kalibracijskih parametara. Eksperimentalni dizajn osmišljen je tako da omogući razdvajanje slučajnih varijacija postupka obrade od sustavnih pogrešaka u odnosu na referentne vrijednosti proizvođača.

Svi kalibracijski skenovi provedeni su u skladu sa zaključcima donesenima u prethodnim poglavljima o optimalnom oblikovanju kalibracijskog skena. Ti zaključci upućuju na to da trajanje skena nema presudan utjecaj na točnost umjerivanja, da broj orijentacijskih točaka nije ključan čimbenik sam po sebi, već njihova prostorna raspodjela, te da je za stabilnu fotogrametrijsku obradu nužan dostatan preklap između panoramskih snimaka. Sukladno tome, provedena su tri kalibracijska skena različitog trajanja i s različitim brojem orijentacijskih točaka, pri čemu je u svim slučajevima osiguran povoljan prostorni raspored orijentacijskih točaka. Svi skenovi izvedeni su s dvije paralelne linije snimanja i intervalom okidanja panoramskih snimaka od jedne sekunde, čime je osiguran dostatan preklap između susjednih panorama. Svi ostali parametri snimanja i obrade zadržani su nepromijenjenima kako bi se osigurala međusobna usporedivost rezultata.

Za svaki sken izračunati su relativni kalibracijski parametri translacije i rotacije ([tablica 7.10](#)), koji su zatim uspoređeni s tvorničkim referentnim vrijednostima proizvođača ([tablica 7.3](#)). Na temelju tih podataka provedena je zasebna analiza točnosti i preciznosti postupka

umjerivanja (tablica 7.11 i 7.12). Točnost je procijenjena analizom pogrešaka definiranih kao razlika između izračunatih i referentnih vrijednosti, dok je preciznost procijenjena analizom raspršenosti izračunatih relativnih kalibracijskih parametara između triju neovisnih skenova.

Tablica 7.10. Relativni kalibracijski parametri izračunati u svrhu procjene točnosti i preciznosti umjerivanja ZEB-Vision kamere

Oznaka skena	Trajanje skena	Broj točaka	dx [mm]	dy [mm]	dz [mm]	dφ [°]	dθ [°]	dψ [°]
1	2 min	5	33	3	198	-0.60	2.41	-0.08
2	3 min	6	37	-3	203	-0.53	2.31	-0.17
3	4 min	7	34	2	196	-0.51	2.35	-0.14

Tablica 7.11. Statistička analiza točnosti umjerivanja ZEB-Vision kamere

Parametar	Srednja pogreška	Medijan	Min	Max	Raspon	RMS
dx	-0.2 mm	-0.6 mm	-2.3 mm	2.2 mm	4.5 mm	1.9 mm
dy	0.8 mm	1.8 mm	-2.6 mm	3.1 mm	5.7 mm	2.6 mm
dz	-0.8 mm	-2.2 mm	-3.7 mm	3.4 mm	7.1 mm	3.2 mm
dφ	0.018°	0.03°	-0.04°	0.05°	0.09°	0.043°
dθ	-0.011°	-0.02°	-0.06°	0.04°	0.10°	0.043°
dψ	-0.006°	-0.02°	-0.05°	0.04°	0.09°	0.038°

Točnost postupka umjerivanja analizirana je korištenjem standardnih statističkih pokazatelja pogrešaka: srednje pogreške, medijana, minimalne i maksimalne vrijednosti, raspona te srednje kvadratne pogreške (RMS). Dobivene RMS vrijednosti translacijskih parametara iznose približno 2–3 mm, dok RMS vrijednosti rotacijskih parametara iznose oko 0.04°. Takvi iznosi u skladu su s očekivanom razinom točnosti tvornički integriranog sustava te potvrđuju da predloženi postupak umjerivanja omogućuje pouzdanu procjenu relativnih kalibracijskih parametara. Važno je istaknuti da su maksimalne apsolutne pogreške

položajnih parametara manje od 4 mm, dok maksimalne kutne pogreške ne prelaze 0.06° , što dodatno potvrđuje odsutnost ekstremnih odstupanja i stabilnost rješenja.

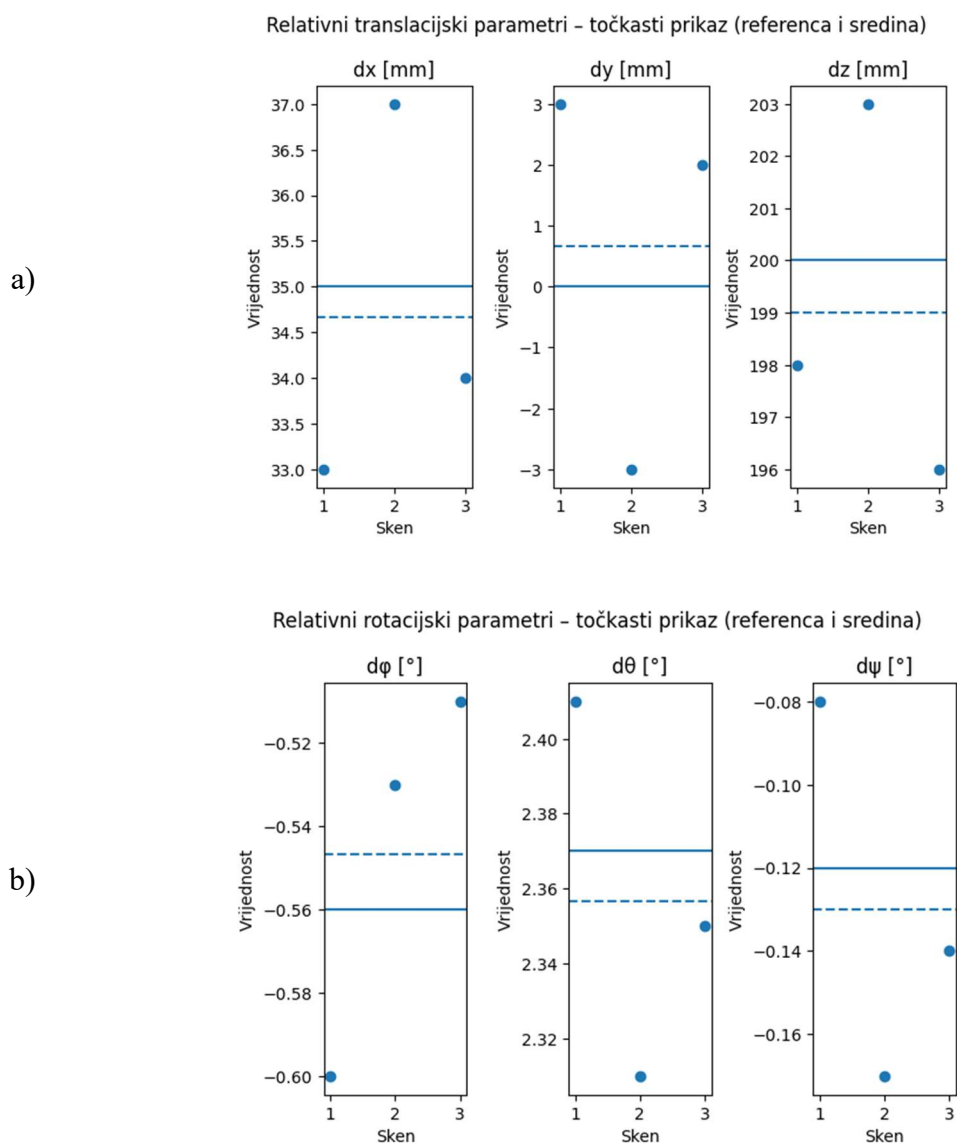
Tablica 7.12. Statistička analiza preciznosti umjerivanja ZEB-Vision kamere

Parametar	Srednja vrijednost	Min	Max	Raspon	Standardno odstupanje
dx	34.8 mm	-2.1 mm	2.4 mm	4.5 mm	2.3 mm
dy	0.8 mm	-3.4 mm	2.3 mm	5.7 mm	3.0 mm
dz	199.2 mm	-2.9 mm	4.2 mm	7.1 mm	3.7 mm
dφ	-0.547°	-0.05°	0.04°	0.09°	0.047°
dθ	2.357°	-0.05°	0.05°	0.10°	0.050°
dψ	-0.130°	-0.04°	0.05°	0.09°	0.046°

Preciznost postupka umjerivanja procijenjena je analizom ponovljivosti procijenjenih relativnih kalibracijskih parametara između triju neovisnih kalibracijskih skenova. Kao osnovni pokazatelji preciznosti korišteni su aritmetička sredina, minimalna i maksimalna pogreška u odnosu na srednju vrijednost, raspon pogreške te standardno odstupanje procijenjenih vrijednosti za svaki parametar. Standardna odstupanja translacijskih parametara iznose manje od 4 mm, dok su standardna odstupanja rotacijskih parametara manja od 0.05° . Takvi rezultati, kao i mali maksimalni iznosi pogrešaka ukazuju na dobru ponovljivost postupka umjerivanja i potvrđuju da promjene u trajanju skena i broju orijentacijskih točaka, uz zadržavanje povoljne geometrije i dostatnog preklopa, ne uzrokuju značajnu degradaciju preciznosti rješenja.

Za dodatnu analizu ponovljivosti i točnosti postupka umjerivanja izrađeni su točkasti grafovi relativnih kalibracijskih parametara (slika 7.2). Grafovi prikazuju rezultate triju neovisnih postupaka umjerivanja, pri čemu pojedinačne točke predstavljaju procijenjene vrijednosti pojedinog parametra za svaki sken. Puna linija na grafovima označava referentnu vrijednost parametra, dok je iscrtkana linija korištena za prikaz aritmetičke sredine svakog od procijenjenih kalibracijskih parametara. Takav prikaz omogućuje istodobnu vizualnu procjenu raspršenja rezultata oko srednje vrijednosti, kao mjere preciznosti postupka, te odstupanja srednje vrijednosti od referentne vrijednosti, kao indikatora točnosti procjene.

Analiza translacijskih parametara pokazuje da su procijenjene vrijednosti stabilno grupirane oko referentnih vrijednosti, uz mala i konzistentna odstupanja između pojedinih skenova. Uočena odstupanja aritmetičkih sredina od referentnih vrijednosti iznose svega nekoliko desetinki milimetara, što upućuje na visoku točnost postupka umjerivanja i izostanak značajnih sustavnih pomaka. Slično ponašanje vidljivo je i kod rotacijskih parametara, kod kojih su međusobna odstupanja pojedinih procjena reda veličine stotinki stupnja, a aritmetičke sredine vrlo bliske referentnim vrijednostima. Takva razina raspršenja ukazuje na visoku stabilnost i dobru ponovljivost procjene relativnih orijentacijskih parametara. S obzirom na ograničen broj ponavljanja, prikazani rezultati imaju deskriptivni karakter, no jasno potvrđuju pouzdanost i konzistentnost primijenjenog postupka umjerivanja.



Slika 7.2. Točkasti prikaz relativnih kalibracijskih parametara translacije (a) i rotacije (b) s referentnim vrijednostima (puna linija) i aritmetičkim sredinama (iscrtkana linija).

Na temelju provedene analize može se zaključiti da predloženi postupak umjerivanja ZEB-Vision kamere omogućuje visoku razinu točnosti i preciznosti u uvjetima optimalno definiranog kalibracijskog skena. Dobivene pogreške translacijskih i rotacijskih parametara nalaze se unutar očekivanih granica za ručne mobilne sustave s tvornički sinkroniziranim senzorima, dok mala raspršenost rezultata između neovisnih skenova potvrđuje dobru ponovljivost postupka. Time se eksperimentalno potvrđuje da zaključci o optimalnom oblikovanju kalibracijskog skena, doneseni u prethodnim poglavljima, osiguravaju pouzdanu procjenu relativnih kalibracijskih parametara te predstavljaju čvrstu osnovu za daljnje analize.

Iako se analiza temelji na samo trima neovisnim kalibracijskim skenovima, takav broj ponavljanja dovoljan je za deskriptivnu procjenu ponovljivosti postupka i reda veličine pogrešaka u kontroliranim, optimalno definiranim uvjetima. Veći broj ponavljanja bio bi potreban za snažnije zaključke, no za potrebe vrednovanja stabilnosti i praktične primjenjivosti predloženog postupka umjerivanja dobiveni rezultati pružaju relevantan i metodološki utemeljen uvid.

7.3.2. Ocjena preciznosti umjerivanja Insta360 kamere

Analiza umjerivanja korisnički integrirane Insta360 kamere provedena je na temelju triju međusobno neovisnih kalibracijskih skenova, provedenih u optimalnim uvjetima definiranim u prethodnim poglavljima. Za razliku od tvornički integrirane kamere ZEB-Vision, za Insta360 kameru ne postoje referentne vrijednosti relativnih kalibracijskih parametara, zbog čega se u ovom slučaju analizira isključivo ponovljivost, odnosno preciznost procijenjenih parametara.

Svi kalibracijski skenovi provedeni su uz poštivanje istih smjernica optimalnog kalibracijskog skena, uključujući povoljan prostorni raspored orijentacijskih točaka, dvije paralelne linije snimanja i vremenski interval panoramskih snimaka (sličica videozapisa) od jedne sekunde. Time je osigurano da uočene razlike u procijenjenim kalibracijskim parametrima proizlaze prvenstveno iz karakteristika kamere i postupka umjerivanja, a ne iz varijacija u načinu prikupljanja podataka.

U tablici 7.13 prikazani su procijenjeni relativni kalibracijski parametri položaja i rotacije za tri neovisna umjerivanja Insta360 kamere. Preciznost postupka umjerivanja procijenjena je analizom osnovnih deskriptivnih statističkih pokazatelja: srednje vrijednosti, minimalne i

maksimalne vrijednosti pogreške u odnosu na srednju vrijednost, raspona te standardnog odstupanja. Dobiveni rezultati prikazani su u tablici 7.14.

Tablica 7.13. Relativni kalibracijski parametri izračunati u svrhu procjene preciznosti umjerivanja Insta360 kamere

Oznaka skena	Trajanje skena	Broj točaka	dx [mm]	dy [mm]	dz [mm]	dφ [°]	dθ [°]	dψ [°]
1	2 min	5	-66	-12	335	1.15	-3.26	0.63
2	3 min	6	-72	-7	343	1.24	-3.18	0.52
3	4 min	7	-65	-14	336	1.27	-3.3	0.61

Tablica 7.14. Statistička analiza preciznosti umjerivanja Insta360 kamere

Parametar	Srednja vrijednost	Min	Max	Raspon	Standardno odstupanje
dx	-67.7 mm	-4.3 mm	2.7 mm	7 mm	3.8 mm
dy	-11.0 mm	-3.0 mm	4.0 mm	7 mm	3.6 mm
dz	338.0 mm	-3.0 mm	5.0 mm	8 mm	4.4 mm
dφ	1.220°	-0.07°	0.05°	0.12°	0.062
dθ	-3.247°	-0.05°	0.07°	0.12°	0.061
dψ	0.587°	-0.07°	0.04°	0.11°	0.059

Dobiveni statistički pokazatelji ukazuju na dobru ponovljivost postupka umjerivanja korisnički integrirane Insta360 kamere. Standardna odstupanja translacijskih parametara iznose približno 3–5 mm, dok su standardna odstupanja rotacijskih parametara reda veličine oko 0.06°. Uz to, minimalni i maksimalni iznosi pogrešaka u očekivanom su intervalu i potvrđuju da promjene u trajanju skena i broju orijentacijskih točaka nisu negativno utjecale na izračun relativnih kalibracijskih parametara.

U usporedbi s rezultatima dobivenima za ZEB-Vision kameru, kod Insta360 kamere uočava se blago povećana raspršenost kako translacijskih, tako i rotacijskih parametara. Takvo ponašanje je očekivano, s obzirom na činjenicu da se radi o korisnički integriranoj kameri

bez hardverske vremenske sinkronizacije i rigidne tvorničke integracije s mobilnim sustavom. Unatoč tome, utvrđeni rasponi i standardna odstupanja neznatno premašuju teorijsku procjenu nesigurnosti izračunatu u poglavlju 7.1.2., pri čemu i dalje ostaju unutar granica prihvatljivih za praktične primjene.

Važno je istaknuti da nijedan od analiziranih parametara ne upućuje na prisutnost grubih pogrešaka između pojedinih skenova. Rasponi procijenjenih vrijednosti su konzistentni, a srednje vrijednosti predstavljaju stabilnu procjenu relativnih kalibracijskih parametara u optimalnim uvjetima kalibracijskog skena.

7.4. Analiza točnosti metode umjerivanja kamere primjenom monoskopskog kartiranja

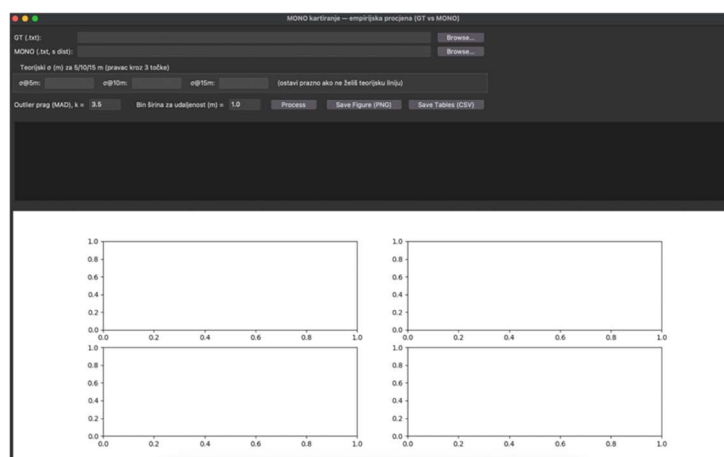
U ovom se poglavlju provodi eksperimentalna analiza točnosti metode umjerivanja kamere razvijene i opisane u poglavlju 5. Pritom se njezina učinkovitost vrednuje primjenom monoskopskog kartiranja, s ciljem neovisne provjere primjenjivosti i točnosti razvijenog postupka u kontekstu hipoteza istraživanja. Analiza se bazira na neovisnom verifikacijskom testu detaljno opisanom u poglavlju 6.4.

Eksperimentalni postupak temelji se na usporedbi dvaju skupova prostornih podataka. Prvi skup čine referentne koordinate 20 karakterističnih točaka na pročeljima objekata, određene klasičnim geodetskim postupkom mjerenja mjernom stanicom ([prilog 2](#)). Drugi skup podataka obuhvaća koordinate istih točaka određene primjenom monoskopskog kartiranja iz orijentiranih panoramskih snimaka, pri čemu su ulazni parametri orijentacije panorama dobiveni korištenjem procijenjenih relativnih kalibracijskih parametara kamere.

Za potrebe ove analize, za svaku kameru odabrane su četiri statične panoramske snimke. Svaka fotografija snimljena je iz jednog statičkog položaja kamere, ali uz različitu orijentaciju prema unaprijed definiranim referentnim smjerovima opisanim u poglavlju 6.4.3. Takav odabir osigurava geometrijsku raznolikost promatranja, analizu ponovljivosti određivanja istih točaka iz različitih panorama, ali i identifikaciju potencijalnih pogrešaka koje mogu proizaći iz postupka konstruiranja panoramskih snimaka. Postupak snimanja i obrade u potpunosti je identičan za obje kamere, čime se osigurava metodološka usporedivost rezultata u kasnijim poglavljima.

Na svakoj od četiri panoramske snimke monoskopskim su kartiranjem određene koordinate svih 20 referentnih točaka, pri čemu je za svaku točku zabilježena i pripadna udaljenost od kamere. Monoskopsko kartiranje provedeno je sukladno postupku opisanom u poglavlju 6.4.4. Time je za svaku kameru formiran skup monoskopski određenih koordinata koji obuhvaća više neovisnih opažanja istih prostornih točaka, što omogućuje detaljniju analizu točnosti.

Vrednovanje dobivenih podataka provedeno je primjenom posebno razvijene računalne Python skripte ([slika 7.3](#)), čiji je cilj kvantitativno vrednovati točnost monoskopskog kartiranja kao posredne mjere točnosti procijenjenih parametara umjerivanja kamere. Skripta kao ulaz prihvaća referentne koordinate točaka i odgovarajuće monoskopski određene koordinate iz svih panoramskih snimaka te na temelju njihove usporedbe provodi sveobuhvatnu statističku analizu.



Slika 7.3. Prikaz sučelja Python skripte izrađene za analizu i usporedbu referentnih i monoskopskih koordinata

Analiza obuhvaća ocjenu točnosti temeljenu na svim, kao i na specifičnim udaljenostima monoskopski određenih koordinata točaka. Dodatno, u analizu su uključene teorijske procjene nesigurnosti monoskopskog kartiranja, izražene standardnim odstupanjem za udaljenosti od 5, 10, 15 i 20 metara ([tablica 7.15](#)), koje služe kao referentni okvir za interpretaciju empirijski dobivenih rezultata. Teorijske vrijednosti nesigurnosti izračunate su uz pretpostavku statičkog snimanja panoramskih fotografija, čime je eliminiran ili znatno smanjen utjecaj dominantnih dinamičkih izvora pogrešaka monoskopskog kartiranja, uključujući pogrešku vremenske sinkronizacije, utjecaj translacijskog i rotacijskog gibanja kamere, efekt rednog zatvarača (kod korisnički integrirane kamere) te utjecaj vremena ekspozicije. Na taj način teorijske procjene predstavljaju idealizirani slučaj, odnosno donju

granicu očekivane točnosti monoskopskog kartiranja u uvjetima optimalno kontroliranog snimanja. Na temelju empirijskih podataka dodatno se određuju medijalne vrijednosti pogrešaka za karakteristične udaljenosti od 5, 10, 15 i 20 metara, čime se omogućuje procjena stvarnog rasta pogreške s udaljenošću od kamere i usporedba empirijski dobivenih rezultata s teorijskim očekivanjima.

Tablica 7.15. Teoretska nesigurnost monoskopskog kartiranja na različitim udaljenostima, u slučaju snimanja fotografija u statičkom položaju

	σ_{mono} (5 m)	σ_{mono} (10 m)	σ_{mono} (15 m)	σ_{mono} (20 m)
Kamera u statičkom položaju	1.4 cm	2.1 cm	3.0 cm	3.9 cm

Osim globalne ocjene točnosti, računalna skripta provodi i ispitivanje ponovljivosti određivanja istih točaka između različitih panoramskih snimaka, kao i zasebnu ocjenu točnosti monoskopskih koordinata za svaku pojedinu panoramu. Takav višerazinski pristup omogućuje detaljniji uvid u stabilnost postupka monoskopskog kartiranja te u potencijalne razlike u kvaliteti pojedinih panoramskih snimaka, što je osobito važno za pravilnu interpretaciju rezultata u kontekstu procjene točnosti metode umjerivanja kamere.

7.4.1. Analiza rezultata monoskopskog kartiranja za ZEB-Vision kameru

U daljnjem tekstu se razmatraju rezultati monoskopskog kartiranja dobiveni primjenom metode umjerivanja kamere na ZEB-Vision sustavu. Cilj analize je ocijeniti točnost prostornog određivanja referentnih točaka u uvjetima statičkog snimanja te procijeniti u kojoj mjeri dobiveni rezultati odgovaraju teorijskim očekivanjima nesigurnosti monoskopskog kartiranja. Pogreška je definirana kao razlika između monoskopski određenih i referentnih koordinata točaka, dok je ukupna prostorna pogreška izražena normom trodimenzionalnog vektora pogreške. Korištena datoteka sa monoskopski određenim koordinatama dana je u prilogu 3.

Globalni statistički pokazatelji točnosti, prikazani u tablici 7.16, pokazuju da se srednja vrijednost prostorne pogreške kreće oko 4 cm, dok je medijan nešto manji, reda veličine 3.5 cm. Vrijednost 3D srednje kvadratne pogreške iznosi približno 4.2 cm. Ovi rezultati su nešto nepovoljniji u odnosu na teorijske procjene nesigurnosti monoskopskog kartiranja u idealiziranim uvjetima statičkog snimanja, no takvo odstupanje je očekivano i metodološki

opravdano. Naime, globalna statistika obuhvaća širok raspon udaljenosti točaka od kamere (8-21 m), pri čemu se na većim udaljenostima javlja izraženiji utjecaj ograničene prostorne rezolucije panoramske slike. Pri takvim uvjetima pogreška odabira točke na slici postaje značajan doprinos ukupnoj pogrešci, budući da mala pogreška u kutnoj domeni rezultira sve većom linearnom pogreškom položaja. To je jasno vidljivo i iz statističkih pokazatelja kao što su minimalna i maksimalna pogreška te raspona pogrešaka. Prema tome, globalni pokazatelji točnosti ne predstavljaju izravnu mjeru kvalitete umjerivanja kamere, već odražavaju kombinirani utjecaj geometrije opažanja i ograničenja monoskopskog kartiranja u realnim uvjetima.

Tablica 7.16. Statistički pokazatelji točnosti monoskopskog kartiranja za ZEB-Vision kameru, izraženi za sve udaljenosti, kao i za dva zasebna razreda udaljenosti

	Broj mjerjenja	3D srednja pogreška [cm]	3D medijan [cm]	3D min [cm]	3D max [cm]	3D raspon [cm]	3D RMS [cm]
Sve udaljenosti	80	3.7	3.5	0.7	8.3	7.6	4.2
D ≤ 10 m	24	2.9	2.5	0.7	8.3	7.6	3.5
D > 10 m	56	4.1	3.7	0.9	8.0	7.1	4.4

Kako bi se navedeni učinak jasnije razdvojio, provedena je dodatna analiza točnosti po razredima udaljenosti, pri čemu su rezultati prikazani zasebno za točke udaljene do 10 m i za točke na većim udaljenostima ([tablica 7.16](#)). Za udaljenosti do 10 m dobiven je medijan prostorne pogreške reda veličine 2.5 cm, dok za udaljenosti veće od 10 m medijan raste na približno 3.7 cm. Sličan trend uočen je i kod ostalih statističkih pokazatelja. Ovakav porast pogreške s udaljenosti u potpunosti je u skladu s teorijskim očekivanjima. Rezultati potvrđuju da se degradacija točnosti primarno može pripisati povećanoj pogrešci odabira točke na panoramskoj slici pri većim udaljenostima, a ne nedostacima metode umjerivanja kamere. Upravo je iz tog razloga analiza po razredima udaljenosti nužna za pravilnu interpretaciju globalnih rezultata.

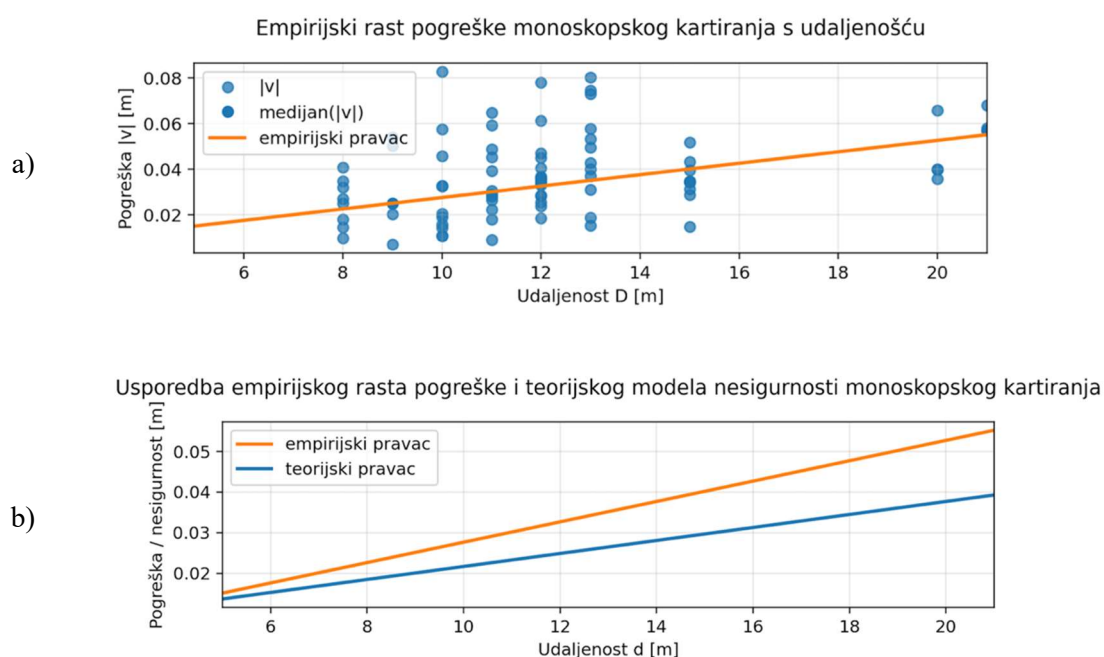
Za potrebe daljnje analize, u obzir je uzet empirijski i teorijski trend rasta pogreške. Empirijski odnos između prostorne pogreške i udaljenosti grafički je prikazan na slici [7.4.a](#),

gdje su uz pojedinačne vrijednosti pogreške (v) prikazani i medijani pogrešaka, kao i empirijski pravac dobiven njihovom aproksimacijom. Empirijski izračunati medijani na karakterističnim udaljenostima (5, 10, 15 i 20 m) prikazi su u tablici 7.17.

Tablica 7.17. Empirijski izračun medijana pogrešaka na karakterističnim udaljenostima za ZEB-Vision kameru

	5 m	10 m	15 m	20 m
Empirijski medijan pogreške	1.5 cm	2.8 cm	4.0 cm	5.3 cm

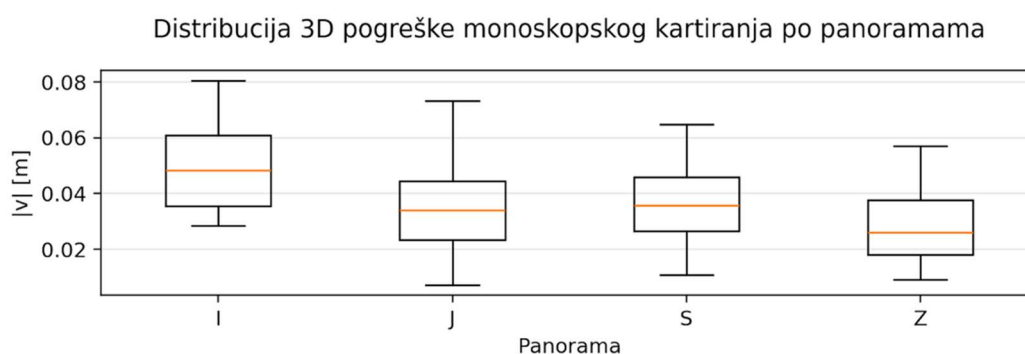
Te vrijednosti uspoređene su s teorijskim procjenama nesigurnosti monoskopskog kartiranja (tablica 7.15), koje su izražene standardnim odstupanjem i prikazane teorijskim pravcem na slici 7.4.b. Važno je naglasiti da se ove dvije skupine pokazatelja ne mogu izravno uspoređivati u strogo statističkom smislu, budući da teorijske vrijednosti predstavljaju standardno odstupanje idealiziranog modela, dok su empirijske vrijednosti izražene medijanom, kao robusnom mjerom tipične pogreške. Takav izbor empirijskog pokazatelja opravdan je činjenicom da je broj opažanja po pojedinim razredima udaljenosti relativno malen, zbog čega bi standardno odstupanje bilo nestabilno i osjetljivo na pojedinačna odstupanja.



Slika 7.4. Graf empirijskog rasta pogreške monoskopskog kartiranja s udaljenošću (a) te isti graf uspoređen sa teoretskim modelom nesigurnosti monoskopskog kartiranja (b) za ZEB-Vision kameru

Unatoč tim ograničenjima, usporedba trendova pokazuje vrlo dobro slaganje u pogledu oblika i reda veličine rasta pogreške s udaljenosti. Empirijski pravac je nešto strmiji od teorijskog, što se može objasniti kombiniranim utjecajem pogreške odabira točke, geometrije opažanja te, potencijalno, pogreške georeferenciranja skena, koja je na razini od nekoliko milimetara (tablica 6.5). Budući da se koordinate točaka određuju u zajedničkom koordinatnom sustavu, i ta pogreška izravno ulazi u razliku između monoskopski određenih i referentnih koordinata.

U konačnici je provedena i analiza točnosti monoskopskog kartiranja po zasebnim panoramama te je ocijenjena ponovljivost (preciznost) određivanja koordinata točaka. Rezultati analize po pojedinim panoramskim snimkama prikazani su dijagramom prostorne pogreške na slici 7.5. Iz prikaza je vidljivo da su distribucije pogrešaka po panoramama međusobno vrlo slične, pri čemu su medijalne vrijednosti prostorne pogreške usporedive, a interkvartilni rasponi u velikoj mjeri se preklapaju. Takav odnos jasno upućuje na to da razlike između pojedinih panorama nisu statistički izražene niti praktično značajne, te da ne postoji panorama koja bi se izdvajala po sustavno lošijim rezultatima. Uočene manje razlike u položaju medijana i rasponu pogrešaka mogu se pripisati očekivanim varijacijama geometrije opažanja i vidljivosti referentnih točaka u pojedinim smjerovima snimanja. Međutim, budući da niti jedna panorama ne pokazuje povećani rasap pogrešaka niti izražene ekstremne vrijednosti u odnosu na ostale, može se zaključiti da kvaliteta konstruiranih panoramskih snimaka ne predstavlja ograničavajući čimbenik ukupne točnosti monoskopskog kartiranja.



Slika 7.5. Grafički prikaz raspodjele 3D pogrešaka monoskopskog kartiranja po panoramama za ZEB-Vision kameru, nazvanima prema referentnim smjerovima – istok (I), jug (J), sjever (S) i zapad (Z)

Ovakav zaključak dodatno je potvrđen analizom ponovljivosti opažanja istih točaka između različitih panorama. Dobivene vrijednosti standardnih odstupanja prostorne pogreške po

točki pokazuju da je varijabilnost određivanja položaja iste točke relativno mala, s medijanom reda veličine 1.3 cm (tablica 7.18). Takva razina ponovljivosti upućuje na stabilan i konzistentan postupak identifikacije točaka na panoramskim snimkama te ne ukazuje na prisutnost značajnih sustavnih pogrešaka povezanih s postupkom konstruiranja panorama.

Tablica 7.18. Ocjena ponovljivosti određivanja koordinata iste referentne točke za ZEB-Vision kameru

	Broj točaka	Srednja vrijednost [cm]	Medijan [cm]	Max [cm]
3D standardno odstupanje pogreške po točki	20	1.5	1.3	3.2

Rezultati prikazani u ovom poglavlju pokazuju da metoda umjerivanja kamere primijenjena na ZEB-Vision sustav omogućuje postizanje visoke razine točnosti monoskopskog kartiranja u realnim uvjetima primjene. Iako su empirijski pokazatelji globalne točnosti nešto nepovoljniji u odnosu na idealizirane teorijske procjene, detaljna analiza pokazuje da su ta odstupanja očekivana i u velikoj mjeri posljedica geometrije opažanja, ograničenja prostorne rezolucije panoramskih snimaka na većim udaljenostima te utjecaja georeferenciranja skena. Trend rasta pogreške s udaljenosti, kao i razina ponovljivosti određivanja točaka, u skladu su s teorijskim očekivanjima i upućuju na to da su procijenjeni relativni kalibracijski parametri kamere visoke kvalitete. Dobiveni rezultati stoga potvrđuju da je predstavljena metoda umjerivanja kamere primjenjiva u praksi te da omogućuje pouzdano i točno monoskopskog određivanje prostornih koordinata u okviru ručnih mjernih mobilnih sustava.

7.4.2. Analiza rezultata monoskopskog kartiranja za Insta360 kameru

U ovom se poglavlju prikazuju rezultati monoskopskog kartiranja dobiveni primjenom iste metode umjerivanja kamere na panoramskoj kameri Insta360 X3. Analiza je provedena u potpunosti analogno postupku opisanom u prethodnom poglavlju, pri čemu su korišteni isti referentni podaci te iste statističke mjere za ocjenu točnosti i ponovljivosti rezultata. Korištena datoteka sa monoskopski određenim koordinatama za Insta360 kameru dana je u prilogu 4.

Sve korištene panorame izdvojene su iz panoramskog videozapisa prikupljenog u statičkom položaju sustava, čime su eliminirani utjecaji kretanja i rotacije kamere. Time se omogućuje izravna usporedba rezultata s onima dobivenima za ZEB-Vision kameru u istim uvjetima opažanja.

Globalni statistički pokazatelji točnosti monoskopskog kartiranja za Insta360 kameru (tablica 7.19) pokazuju da se medijan prostorne pogreške kreće oko 3.5 cm, dok srednja vrijednost iznosi približno 3.8 cm. Vrijednost 3D srednje kvadratne pogreške iznosi oko 4.2 cm, pri čemu se minimalne i maksimalne opažene pogreške kreću u rasponu od približno 1 cm do 8 cm, ovisno o udaljenosti točke od kamere.

Analiza po razredima udaljenosti pokazuje da je za točke udaljene do 10 m medijan prostorne pogreške oko 3.1 cm, dok za udaljenosti veće od 10 m medijan raste na približno 4.0 cm, što je u skladu s očekivanim porastom pogreške uslijed ograničene prostorne rezolucije panoramskih snimaka.

Tablica 7.19. Statistički pokazatelji točnosti monoskopskog kartiranja za Insta360 kameru, izraženi za sve udaljenosti, kao i za dva zasebna razreda udaljenosti

	Broj mjerjenja	3D srednja pogreška [cm]	3D medijan [cm]	3D min [cm]	3D max [cm]	3D raspon [cm]	3D RMS [cm]
Sve udaljenosti	80	3.8	3.5	0.8	7.6	6.7	4.2
D ≤ 10 m	24	3.1	3.1	1.4	5.0	3.6	3.3
D > 10 m	56	4.2	4.0	0.8	7.6	6.7	4.5

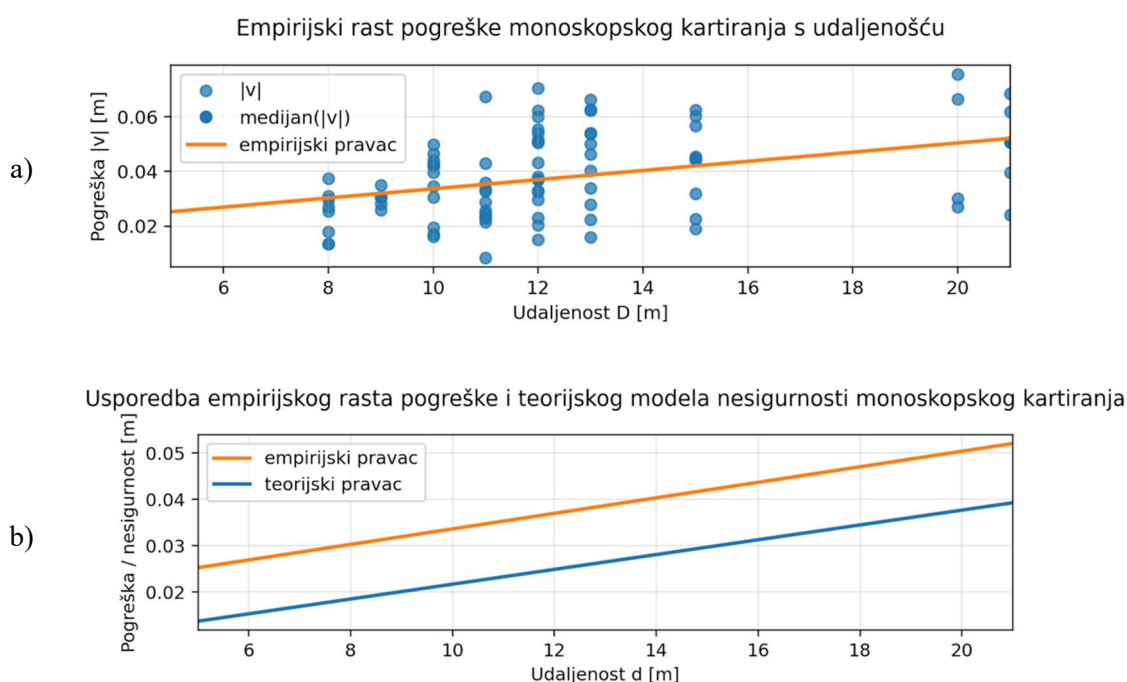
Statistički pokazatelji točnosti monoskopskog kartiranja za Insta360 kameru pokazuju vrlo slične vrijednosti kao i u prethodnom slučaju. Medijan prostorne pogreške, srednja vrijednost te srednja kvadratna pogreška nalaze se u istom rasponu, a opaženi maksimumi i minimumi pogrešaka usporedivi su s rezultatima dobivenima za ZEB-Vision kameru. Takvi rezultati upućuju na to da se ukupna razina točnosti monoskopskog kartiranja ne razlikuje značajno između dviju kamera u statičkim uvjetima snimanja.

Empirijski odnos između prostorne pogreške i udaljenosti grafički je prikazan na slici 7.6, dok su empirijski procijenjene medijalne vrijednosti pogreške po karakterističnim udaljenostima dane u tablici 7.20.

Tablica 7.20. Empirijski izračun medijana pogrešaka na karakterističnim udaljenostima za Insta360 kameru

	5 m	10 m	15 m	20 m
Empirijski medijan pogreške	2.5 cm	3.4 cm	4.2 cm	5.0 cm

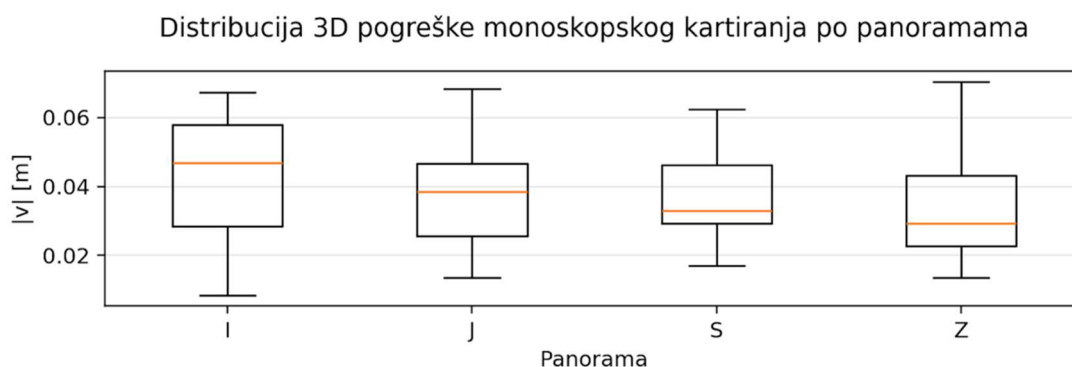
Analiza ovisnosti pogreške o udaljenosti od kamere pokazuje sličan trend rasta pogreške s udaljenosti kao i kod ZEB-Vision kamere. Empirijski dobiveni medijani pogreške po karakterističnim udaljenostima prate teorijski očekivani trend, uz odstupanja usporediva s onima već raspravljenima u poglavlju 7.4.1. Ta odstupanja mogu se, jednako kao i ranije, pripisati ograničenoj prostornoj rezoluciji panoramskih snimaka pri većim udaljenostima, geometriji opažanja te utjecaju georeferenciranja skena.



Slika 7.6. Graf empirijskog rasta pogreške monoskopskog kartiranja s udaljenošću (a) te isti graf uspoređen sa teoretskim modelom nesigurnosti monoskopskog kartiranja (b) za Insta360 kameru

Distribucije prostorne pogreške po pojedinim panoramama (slika 7.7) pokazuju ujednačeno ponašanje, s usporedivim medijanima i preklapajućim interkvartilnim rasponima. Ne

uočavaju se panorame koje bi se izdvajale po sustavno lošijim rezultatima, što upućuje na konzistentnost postupka monoskopskog kartiranja.



Slika 7.7. Grafički prikaz raspodjele 3D pogrešaka monoskopskog kartiranja po panoramama za Insta360 kameru, nazvanima prema referentnim smjerovima – istok (I), jug (J), sjever (S) i zapad (Z)

Slično prethodnom poglavlju, analiza ponovljivosti opažanja istih točaka između različitih panorama pokazuje da je medijan standardnog odstupanja po točki reda veličine 1.3 cm (tablica 7.21), što upućuje na dobru ponovljivost određivanja položaja točaka i odsutnost značajnih sustavnih pogrešaka u postupku konstruiranja panoramskih snimaka.

Zaključno, rezultati monoskopskog kartiranja za Insta360 kameru u statičkim uvjetima snimanja u velikoj su mjeri usporedivi s rezultatima dobivenima za ZEB-Vision kameru, pri čemu su globalni statistički pokazatelji točnosti, trend rasta pogreške s udaljenosti te razina ponovljivosti opažanja vrlo slični. Ipak, uočene su i određene suptilne razlike u ponašanju rezultata koje je moguće smisleno interpretirati na temelju geometrije projekcije i vizualnih svojstava panoramskih snimaka.

Tablica 7.21. Ocjena ponovljivosti određivanja koordinata iste referentne točke za Insta360 kameru

	Broj točaka	Srednja vrijednost [cm]	Medijan [cm]	Max [cm]
3D standardno odstupanje pogreške po točki	20	1.5	1.3	2.5

Nešto veći medijan pogreške zabilježen za Insta360 kameru na udaljenosti od 5 m može se objasniti lokalnim utjecajem projekcijske geometrije panoramske slike i osjetljivošću

postupka odabira točke u bliskoj zoni opažanja. Na manjim udaljenostima čak i mala pogreška u slikovnom prostoru može rezultirati izraženijom prostornom pogreškom, osobito u dijelovima panorame s većom lokalnom nelinearnošću projekcije. Taj se učinak, međutim, ne zadržava s porastom udaljenosti, već se empirijski pravac rasta pogreške postupno izravna i postaje gotovo paralelan s teorijskim modelom nesigurnosti monoskopskog kartiranja.

Na većim udaljenostima uočava se stabilnije ponašanje rezultata za Insta360 kameru, što se može povezati s vizualnom čitljivošću panoramskih snimaka. Iako su panorame obje kamere nominalno iste prostorne rezolucije, rezultati ukazuju da Insta360 snimke pri većim udaljenostima omogućuju lakšu identifikaciju referentnih točaka, što se pozitivno odražava na točnost i robusnost odabira točke. Takva interpretacija dodatno je potkrijepljena analizom ponovljivosti opažanja, pri čemu je maksimalno standardno odstupanje prostorne pogreške po točki kod Insta360 kamere manje nego u slučaju ZEB-Vision kamere, unatoč gotovo identičnim srednjim vrijednostima i medijanima.

Uzimajući u obzir navedeno, može se zaključiti da su razlike između dviju kamera male i ne upućuju na stvarne razlike u kvaliteti procijenjenih relativnih kalibracijskih parametara. Uočene razlike u ponašanju rezultata prije svega su posljedica lokalnih projekcijskih i vizualnih svojstava panoramskih snimaka, a ne nedostataka metode umjerivanja. Dobiveni rezultati potvrđuju da je predstavljena metoda umjerivanja kamere jednako primjenjiva i pouzdana i u slučaju korisnički integrirane panoramske kamere, pri čemu razina točnosti monoskopskog kartiranja u potpunosti zadovoljava zahtjeve realne praktične primjene.

7.5. Analiza točnosti metode vremenske sinkronizacije primjenom monoskopskog kartiranja

Nakon provedene analize točnosti umjerivanja kamere pomoću principa monoskopskog kartiranja, u ovom se poglavlju razmatra analiza točnosti metode vremenske sinkronizacije između kamere i ručnog mobilnog mjernog sustava. Cilj ove analize nije utvrđivanje apsolutne prostorne točnosti monoskopske rekonstrukcije, već procjena preostale pogreške vremenskog usklađivanja slikovnog i trajektorijskog zapisa te ocjena njezina utjecaja na rezultate monoskopskog kartiranja. Ovakva analiza izravno je usmjerena na provjeru druge hipoteze, koja se odnosi na mogućnost pouzdane vremenske sinkronizacije korisnički integrirane kamere s ručnim mobilnim mjernim sustavom, dok istodobno omogućuje

dodatnu provjeru utjecaja vremenske sinkronizacije na točnost monoskopskog kartiranja u kontekstu prve hipoteze.

Eksperiment je proveden sukladno metodološkom okviru opisanom u poglavlju 6.4, pri čemu je za obje korištene kamere – tvornički integriranu i korisnički integriranu – iz testnog skena izdvojen linearni segment trajektorije. Odabirom takvog segmenta osiguravaju se povoljniji uvjeti za analizu vremenskih odnosa jer se smanjuje utjecaj naglih promjena brzine i smjera gibanja, a dominantni doprinos pogreškama proizlazi iz eventualne vremenske neusklađenosti. Na odabranom segmentu monoskopski su određene sve vidljive referentne točke, za koje je pripremljen odgovarajući skup referentnih koordinata, dok je istodobno pripremljena i pripadajuća datoteka trajektorije kamere s položajima i rotacijama u vremenu.

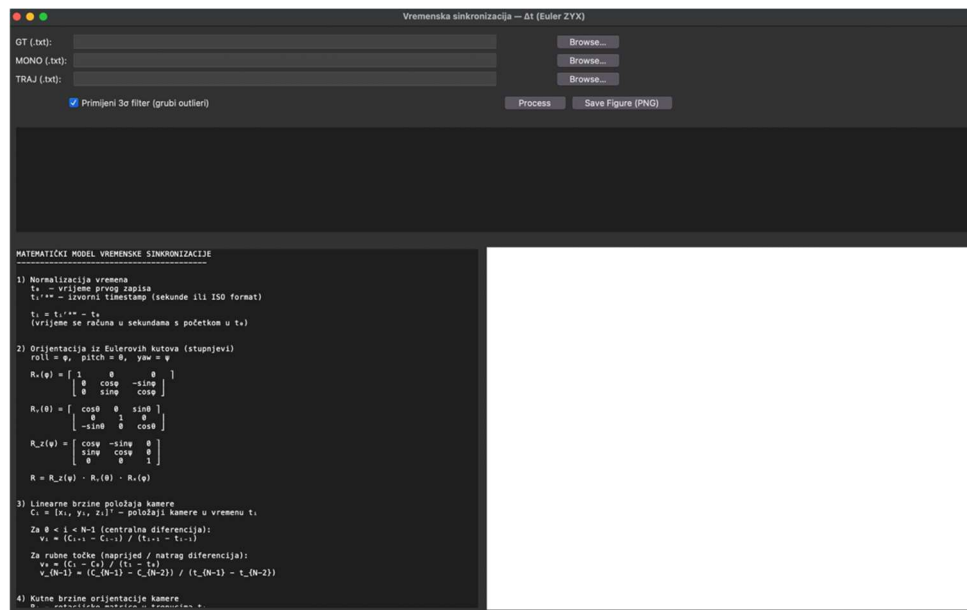
Analiza točnosti vremenske sinkronizacije temelji se na kinematičkom modelu koji povezuje prostornu pogrešku monoskopski određene točke s pogreškom u vremenskoj usklađenosti. Polazi se od pretpostavke da mala pogreška vremenske sinkronizacije Δt uzrokuje prostorni pomak položaja kamere razmjeran njezinoj linearnoj i kutnoj brzini u trenutku snimanja. Za svako opažanje može se zapisati aproksimativni model u obliku:

$$r_i \approx (v_i + \omega_i \times d_i) \Delta t, \quad (7.12)$$

gdje r_i predstavlja vektor pogreške monoskopski određene točke u odnosu na referentnu koordinatu, v_i linearnu brzinu kamere, ω_i kutnu brzinu kamere, a d_i vektor od centra kamere do pripadne referentne točke. Linearne i kutne brzine određuju se iz trajektorije numeričkom derivacijom položaja i rotacije, dok se položaj kamere u vremenskim trenucima monoskopski određenih točaka dobiva vremenskom interpolacijom trajektorije.

Na temelju navedenog modela formira se sustav jednadžbi popravaka u kojem nepoznanicu predstavlja pogreška vremenske sinkronizacije Δt , dok su koeficijenti jednadžbi definirani trenutačnim kinematičkim parametrima gibanja sustava. Sustav se rješava primjenom metode najmanjih kvadrata, čime se dobiva procjena Δt koja minimizira ukupnu kvadratnu pogrešku između opaženih i modeliranih prostornih odstupanja. Uz samu procjenu vremenske pogreške, postupak omogućuje i ocjenu točnosti procijenjene nepoznanice, temeljenu na razdiobi pogrešaka mjerenja i geometriji opažanja.

Cjelokupni opisani postupak implementiran je u obliku vlastite Python skripte s grafičkim korisničkim sučeljem (slika 7.8). Program provodi normalizaciju i linearizaciju vremenskih zapisa, izračun rotacijskih matrica iz podataka trajektorije, određivanje linearnih i kutnih brzina kamere te vremensku interpolaciju trajektorije na trenutke monoskopski određenih točaka. Na temelju tih podataka provodi se izjednačenje kojim se dobiva procjena pogreške vremenske sinkronizacije.



Slika 7.8. Grafičko sučelje Python skripte za procjenu točnosti vremenske sinkronizacije

Uz procjenu pogreške vremenske sinkronizacije, izjednačenjem su dobivena i standardna odstupanja mjerenja monoskopski određenih koordinata, koja opisuju raspršenost opažanja, dok se 3D srednja kvadratna pogreška u odnosu na referentne točke koristi kao pokazatelj ukupne prostorne točnosti monoskopskog kartiranja. Nadalje, program generira i grafičke prikaze koji omogućuju vizualnu interpretaciju ponašanja pogrešaka u vremenu, što predstavlja važan alat za kvalitativnu procjenu stabilnosti i pouzdanosti provedene sinkronizacije.

U sljedećem poglavlju prikazani su i analizirani dobiveni rezultati za obje korištene kamere, uz raspravu o postignutoj razini točnosti vremenske sinkronizacije i njezinu značenju u kontekstu daljnjih faza umjerivanja i monoskopskog kartiranja.

7.5.1. Točnost vremenske sinkronizacije ZEB-Vision kamere

U nastavku se analiziraju rezultati procjene točnosti vremenske sinkronizacije ZEB-Vision kamere. Iako je riječ o tvornički integriranoj kameri s hardverski riješenom vremenskom sinkronizacijom, provedena analiza ima za cilj eksperimentalno potvrditi da ostvarena razina vremenske usklađenosti odgovara očekivanjima za takav sustav, ali i pokazati da je razvijeni postupak primjenjiv i u slučajevima u kojima se ne očekuju izražene pogreške vremenske sinkronizacije. Korištene datoteke sa monoskopski određenim koordinatama i pripadnom trajektorijom ZEB-Vision kamere prikazane su u prilogima 5 i 6.

Primjenom modela vremenske sinkronizacije i izjednačenja metodom najmanjih kvadrata dobivena je procjena pogreške vremenske sinkronizacije reda nekoliko milisekundi:

$$\Delta t = 3.75 \text{ ms},$$

pri čemu je ocjena točnosti procijenjene nepoznanice istog reda veličine kao i sama procijenjena vrijednost:

$$s_{\Delta t} = 2.46 \text{ ms}.$$

Takav odnos između procijenjene vrijednosti i njezine ocjene točnosti tipičan je za slučajeve u kojima stvarna vremenska pogreška ne predstavlja dominantan izvor prostorne pogreške, već se njezin učinak nalazi na razini stohastičkog šuma monoskopski određenih mjerenja. U takvim uvjetima informacija o vremenskoj neusklađenosti sadržana u opažanjima postaje slabo izražena, što ograničava mogućnost preciznog razlučivanja vrlo malih vremenskih pomaka. Dobiveni rezultat stoga ne upućuje na postojanje značajne vremenske pogreške, već potvrđuje da se eventualna preostala neusklađenost nalazi unutar razlučivosti primijenjene metode.

Uz procjenu pogreške vremenske sinkronizacije, izjednačenjem su dobivena i standardna odstupanja mjerenja monoskopski određenih koordinata, kao i trodimenzionalna srednja kvadratna pogreška (3D RMS) u odnosu na referentne točke, koje zajedno opisuju preciznost i ukupnu prostornu točnost monoskopskog kartiranja ([tablica 7.22](#)). Dobivene vrijednosti nalaze se na razini od nekoliko centimetara, što je u skladu s rezultatima dobivenima u prethodnim poglavljima te s očekivanjima za korištenu konfiguraciju sustava i geometriju snimanja.

Tablica 7.22. Statistički pokazatelji točnosti i preciznosti monoskopskih mjerenja za ZEB-Vision kameru

	Broj mjerenja	s_x [cm]	s_y [cm]	s_z [cm]	3D RMS [cm]
ZEB-Vision kamera	131	2.7	3.7	2.2	5.1

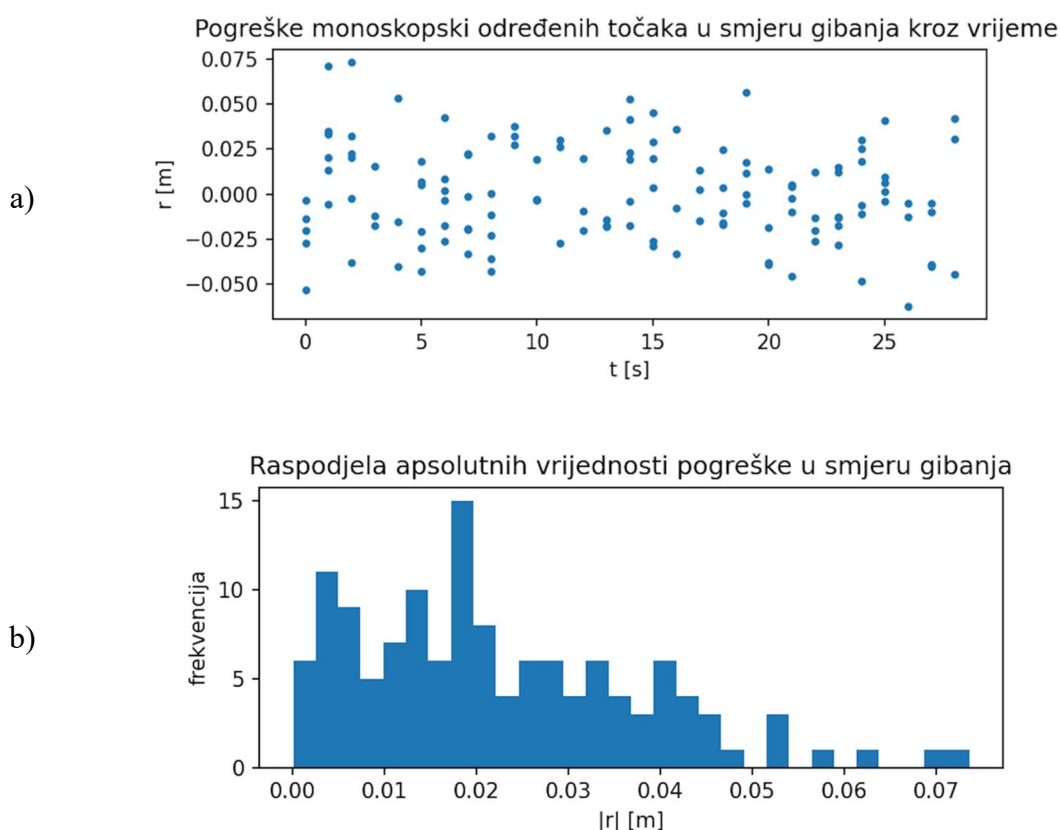
Analizom dobivenih numeričkih pokazatelja može se zaključiti da prostorni učinak preostale vremenske pogreške, koja je reda nekoliko milisekundi, ne predstavlja dominantan izvor pogreške monoskopskog kartiranja. Takav ishod dijelom je posljedica činjenice da su u ovom eksperimentu namjerno kontrolirani i ograničeni brojni parametri za koje je u prethodnim poglavljima pokazano da značajno utječu na točnost monoskopskog kartiranja, s ciljem što jasnije izolacije utjecaja vremenske sinkronizacije. Kretanje sustava provedeno je približno linearno i bez izraženih rotacija, čime je smanjen doprinos linearne i kutne brzine pogreškama monoskopske rekonstrukcije. Relativni kalibracijski parametri kamere prethodno su određeni s visokom točnošću, čime je njihov doprinos ukupnoj pogrešci sveden na malu, ali ne i potpuno zanemarivu razinu. Također, vrijeme ekspozicije kamere odabrano je tako da njegov utjecaj na monoskopsko kartiranje bude minimalan.

Unatoč tome, utjecaj pojedinih čimbenika nije moguće u potpunosti ukloniti, neovisno o načinu provođenja eksperimenta. Među njima se kao najznačajniji ističu kretanje sustava, udaljenost promatrane točke od kamere te točnost identifikacije točke na panoramskoj slici. Točnost odabira točke na slici osobito dolazi do izražaja zbog ograničene prostorne rezolucije panoramskih slika i lokalnih degradacija kvalitete slike, dok se utjecaj udaljenosti manifestira kroz povećanje pogrešaka monoskopske rekonstrukcije s porastom udaljenosti, neovisno o kvaliteti vremenske sinkronizacije. U takvim uvjetima preostale pogreške monoskopskog kartiranja dominantno su posljedica navedenih čimbenika, dok doprinos vremenske sinkronizacije, s obzirom na njezinu visoku razinu usklađenosti, ostaje sekundaran i unutar razlučivosti primijenjene metode.

Grafička analiza pogrešaka u smjeru gibanja kamere dodatno podupire navedene zaključke. Pogreška u smjeru gibanja definirana je kao komponenta prostorne pogreške monoskopski određene točke projicirana na trenutni smjer gibanja kamere, čime se izdvaja dio pogreške najosjetljiviji na eventualnu vremensku neusklađenost. Na grafu koji prikazuje vremenski tijek te pogreške ([slika 7.9.a](#)) ne uočava se sustavni trend, niti linearan ili periodički obrazac

koji bi upućivao na preostalu vremensku neusklađenost. Raspodjela apsolutnih vrijednosti pogreške u smjeru gibanja kamere (slika 7.9.b) također ukazuje na stohastički karakter pogrešaka, bez izraženog pomaka ili asimetrije. Takvo ponašanje tipično je za sustave kod kojih je vremenska sinkronizacija kvalitetno riješena, dok su preostale prostorne pogreške posljedica kombinacije geometrije opažanja i ograničenja monoskopskog kartiranja.

Na temelju kvantitativnih pokazatelja i njihove interpretacije može se zaključiti da ZEB-Vision kamera ostvaruje razinu vremenske sinkronizacije u skladu s očekivanjima za tvornički hardverski sinkroniziran sustav. Procijenjena pogreška vremenske sinkronizacije nije dominantan čimbenik u pogreškama monoskopskog kartiranja, već se nalazi na razini zanemarivog doprinosa u odnosu na ostale utjecajne parametre. Dobiveni rezultati stoga potvrđuju pouzdanost tvorničke vremenske sinkronizacije i predstavljaju referentnu osnovu za daljnju analizu.



Slika 7.9. Grafički prikaz iznosa pogrešaka u smjeru gibanja ZEB-Vision kamere kroz vrijeme (a) te raspodjele apsolutnih vrijednosti pogrešaka (b)

7.5.2. Točnost vremenske sinkronizacije Insta360 X3 kamere

U ovom poglavlju analiziraju se rezultati procjene točnosti vremenske sinkronizacije korisnički integrirane Insta360 kamere. Za razliku od ZEB-Vision kamere, koja je tvornički hardverski sinkronizirana s ostalim senzorima sustava, Insta360 kamera vremenski je sinkronizirana primjenom novo razvijene softverske metode vremenske sinkronizacije, detaljno opisane u poglavlju 5. S obzirom na to, provedena analiza ne služi samo za karakterizaciju ponašanja korisnički integrirane kamere, već ujedno predstavlja eksperimentalnu ocjenu točnosti predložene metode vremenske sinkronizacije u realnim uvjetima primjene. Korištene datoteke sa monoskopski određenim koordinatama i pripadnom trajektorijom Insta360 kamere prikazane su u prilogima 7 i 8.

Primjenom istog modela vremenske sinkronizacije i identičnog postupka izjednačenja metodom najmanjih kvadrata dobivena je procjena pogreške vremenske sinkronizacije:

$$\Delta t = 8.73 \text{ ms} ,$$

dok ocjena točnosti procijenjene nepoznanice ukazuje da je vremenska pogreška u ovom slučaju statistički razlučiva i ima mjerljiv utjecaj na prostorne pogreške monoskopskog kartiranja:

$$s_{\Delta t} = 3.35 \text{ ms}.$$

Takav rezultat je u skladu je s teorijskom procjenom točnosti vremenske sinkronizacije izvedenom u poglavlju 7.1, gdje je na temelju analize kinematičkih parametara sustava, geometrije opažanja i očekivanih izvora pogrešaka procijenjeno da se točnost sinkronizacije za korisnički integriranu kameru nalazi na razini od približno 6 ms. Empirijski dobivena vrijednost stoga pokazuje da je teorijska procjena bila realna i konzervativna, te da se stvarna točnost sinkronizacije nalazi unutar očekivanog raspona. Dobiveno odstupanje između teorijske i empirijske vrijednosti može se pripisati dodatnim stohastičkim utjecajima prisutnima u stvarnim mjernim podacima, koji u teorijskom modelu nisu mogli biti u potpunosti obuhvaćeni.

Standardna odstupanja mjerenja monoskopski određenih koordinata, kao i trodimenzionalna srednja kvadratna pogreška u odnosu na referentne točke (tablica 7.23), u ovom su slučaju veća nego kod tvornički sinkronizirane kamere, što upućuje na smanjenu preciznost i točnost monoskopskog kartiranja. Za razliku od prethodnog slučaja, dio tog pogoršanja može se

izravno povezati s izraženijom pogreškom vremenske sinkronizacije, koja više nije zanemariva u odnosu na ostale izvore pogrešaka.

Tablica 7.23. Statistički pokazatelji točnosti i preciznosti monoskopskih mjerenja za Insta360 kameru

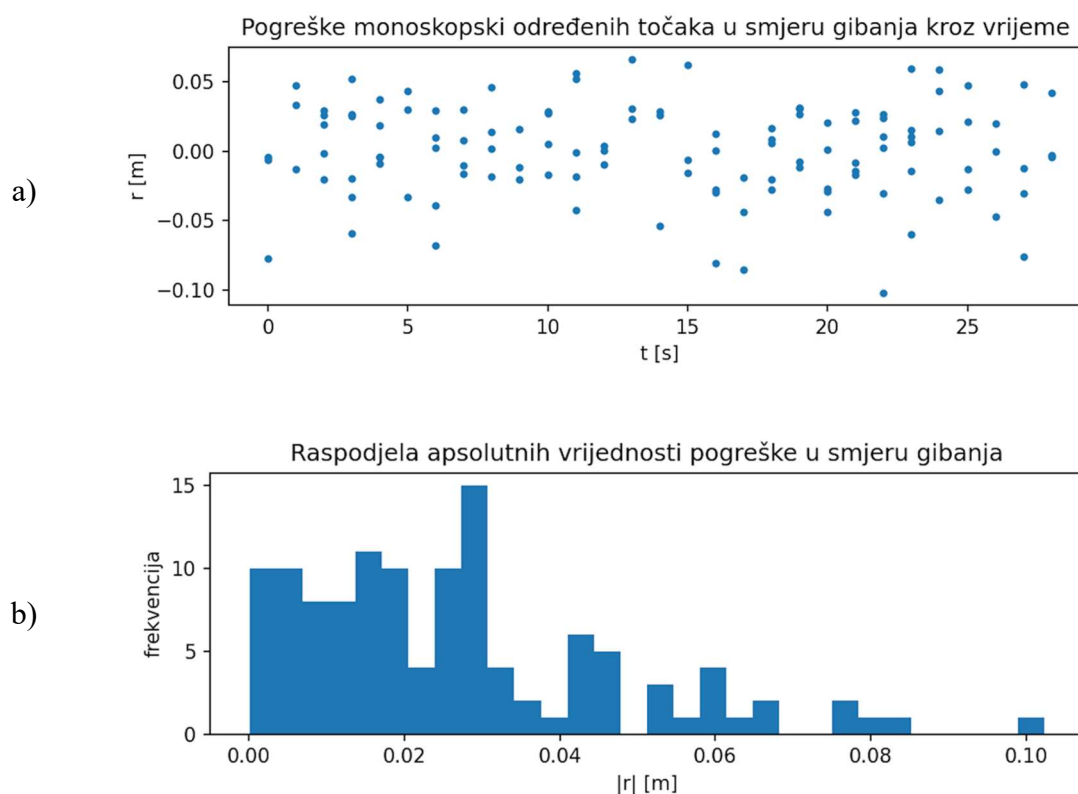
	Broj mjerenja	s_x [cm]	s_y [cm]	s_z [cm]	3D RMS [cm]
Insta360 kamera	120	3.4	4.8	2.9	6.5

Važno je pritom naglasiti da su i u ovom eksperimentu brojni parametri koji utječu na točnost monoskopskog kartiranja bili svjesno držani pod kontrolom kako bi se što jasnije izolirao utjecaj vremenske sinkronizacije. Kretanje sustava provedeno je približno linearno i bez izraženih rotacija, relativni kalibracijski parametri kamere prethodno su određeni, a vrijeme ekspozicije postavljeno je tako da njegov doprinos pogreškama bude minimalan. Međutim, za razliku od tvornički sinkronizirane kamere, Insta360 kamera koristi redni okidač, čiji se utjecaj ne može u potpunosti eliminirati i koji tijekom gibanja sustava može uzrokovati dodatne geometrijske deformacije slike. Taj učinak, iako ograničen odabranim uvjetima snimanja, predstavlja dodatni izvor pogreške monoskopskog kartiranja koji se pojavljuje uz preostalu pogrešku vremenske sinkronizacije. U tom kontekstu, preostala vremenska pogreška u ovom slučaju predstavlja jedan od relevantnih čimbenika koji, zajedno s utjecajem rednog okidača, utječu na ukupnu prostornu točnost monoskopskog kartiranja.

Grafička analiza dodatno potvrđuje navedene zaključke. Na grafu koji prikazuje vremenski tijek pogreške u smjeru gibanja kamere ([slika 7.10.a](#)) uočava se veća raspršenost vrijednosti nego u slučaju tvornički sinkronizirane ZEB-Vision kamere, uz povremena odstupanja većih iznosa. Raspodjela apsolutnih vrijednosti pogreške u smjeru gibanja ([slika 7.10.b](#)) pokazuje širu i manje koncentriranu raspodjelu, s povećanim udjelom većih pogrešaka. Takav oblik raspodjele u skladu je s očekivanim ponašanjem korisnički integriranih kamera te upućuje na izraženiji utjecaj vremenske sinkronizacije i slikovnog senzora na prostorne pogreške monoskopskog kartiranja.

Na temelju kvantitativnih pokazatelja i grafičke analize može se zaključiti da korisnički integrirana Insta360 kamera, vremenski sinkronizirana primjenom razvijene softverske metode, ostvaruje razinu vremenske sinkronizacije koja je u skladu s teorijskim očekivanjima i primjenjiva u praktičnim uvjetima. Iako točnost sinkronizacije ne doseže

razinu tvornički hardverski sinkroniziranog sustava, dobiveni rezultati potvrđuju da predložena metoda omogućuje pouzdanu vremensku usklađenost i predstavlja valjano rješenje za integraciju korisničkih kamera u ručne mobilne mjerne sustave, osobito u primjenama gdje je zahtijevana centimetarska prostorna točnost.



Slika 7.10. Grafički prikaz iznosa pogrešaka u smjeru gibanja Insta360 kamere kroz vrijeme (a) te raspodjele apsolutnih vrijednosti pogrešaka (b)

Provedene teorijske i eksperimentalne analize omogućile su cjelovitu evaluaciju razvijenih metoda umjerivanja kamere i vremenske sinkronizacije u različitim uvjetima primjene. Dobiveni rezultati ukazuju na razinu pouzdanosti i ograničenja predloženih postupaka, kako u kontroliranim kalibracijskim uvjetima, tako i u realnim terenskim scenarijima. Time je stvoren jasan analitički okvir za donošenje konačnih zaključaka o primjenjivosti i učinkovitosti razvijenih metoda u kontekstu postavljenih hipoteza.

8. ZAKLJUČAK

Ručni mjerni mobilni sustavi predstavljaju specifičnu kategoriju mobilnih mjernih sustava čija se primjena posljednjih godina intenzivno širi u geodetskim i srodnim inženjerskim disciplinama. Njihova glavna obilježja uključuju ručno nošenje sustava, kontinuirano kretanje operatera tijekom snimanja te integraciju različitih senzora, pri čemu se za određivanje trajektorije kretanja gotovo isključivo primjenjuju SLAM algoritmi. Među njima se danas najčešće koriste pristupi temeljeni na grafu, odnosno metode grafičke optimizacije, koje omogućuju robusno i stabilno određivanje trajektorije u složenim i dinamičnim okruženjima. U takvim mjernim sustavima kamera ima važnu ulogu u vizualizaciji, kolorizaciji oblaka točaka i monoskopskom kartiranju, pri čemu prostorna točnost dobivenih rezultata izravno ovisi o kvaliteti njezina umjerivanja u odnosu na mjerni sustav.

U okviru ovoga doktorskog rada razmatrane su isključivo vanjske (eksterne) kamere koje omogućuju prikupljanje ultra-širokokutnih fotografija u svrhu konstruiranja 360° panoramskih snimaka. Takve kamere mogu biti tvornički integrirane, kada ih proizvođač predviđa za uporabu s određenim sustavom, ili korisnički integrirane, kada ih korisnik naknadno dodaje ili zamjenjuje postojećom kamerom. Budući da vanjske kamere nisu trajno ugrađene u tijelo sustava, njihovi relativni kalibracijski parametri mogu se mijenjati tijekom vremena uslijed učestalog korištenja, mehaničkih naprezanja, vibracija te ponovljenog uklanjanja i ponovne montaže, zbog čega se javlja potreba za povremenim ponavljanjem postupka umjerivanja.

U skladu s navedenim, u ovome je radu razvijena nova metoda umjerivanja kamere posebno prilagođena ručnim mjernim mobilnim sustavima. Metoda se temelji na kratkom i operativno jednostavnom kalibracijskom skenu, pri čemu se istodobno koriste panoramske snimke kamere i podaci SLAM trajektorije mobilnog sustava. Tijekom kalibracijskog skena sustav se kontinuirano kreće kroz prostor, uz višekratna statička zadržavanja na unaprijed definiranim orijentacijskim točkama. Orijentacijske točke realizirane su u obliku kružnih crno-bijelih mjernih meta postavljenih u prostoru. Njihovi položaji u m-sustavu određuju se analizom statičkih segmenata trajektorije, odnosno detekcijom vremenskih intervala u kojima je sustav bio u mirovanju. Obrada slikovnih podataka provodi se primjenom fotogrametrijske rekonstrukcije panorama uz sferni model kamere, pri čemu se na panoramskim snimkama automatski detektiraju centri mjernih kružnih meta primjenom

odgovarajućih algoritama za detekciju kružnih značajki. Inicijalni položaji i rotacije svake panoramske fotografije definiraju se na temelju SLAM trajektorije za trenutak ekspozicije pojedine snimke. Korištenjem mjernih meta kao orijentacijskih točaka u fotogrametrijskom procesu, inicijalni položaji i rotacije fotografija rigidno se transformiraju, čime se dobivaju prostorno ispravno orijentirane panoramske snimke. Konačni relativni kalibracijski parametri kamere određuju se postupkom regularnog izjednačenja posrednih mjerenja primjenom metode najmanjih kvadrata, pri čemu se koriste dva skupa podataka: inicijalni položaji i rotacije fotografija preuzeti iz SLAM trajektorije te optimizirani položaji i rotacije dobiveni fotogrametrijskom obradom uz primjenu orijentacijskih točaka. Razvijeni postupak umjerivanja oblikovan je radi eksperimentalne provjere postavljenih hipoteza, koje se odnose na primjenjivost metode umjerivanja za različite načine integracije kamere te na mogućnost pouzdane vremenske sinkronizacije korisnički integriranih kamera.

Sastavni dio razvijenog metodološkog okvira čini i softverska metoda vremenske sinkronizacije namijenjena kamerama koje nisu tvornički sinkronizirane s mjernim sustavom. Razvijeni postupak temelji se na detekciji početnog mikro-pomaka sustava iz vremenskih nizova panoramskih snimaka i SLAM trajektorije te omogućuje procjenu vremenskog pomaka između snimaka kamere i trajektorije sustava isključivo na temelju stvarnih podataka snimanja i kretanja, bez potrebe za dodatnim hardverskim rješenjima ili vanjskim sinkronizacijskim uređajima.

Jedna od ključnih prednosti razvijene metode umjerivanja jest brzina i jednostavnost provedbe kalibracijskog skena. Provedene analize pokazale su da je već trajanje skena od približno dvije minute dostatno za stabilnu i ponovljivu procjenu relativnih kalibracijskih parametara, pod uvjetom da se korisnik pridržava osnovnih načela SLAM-a i SfM rekonstrukcije. Dodatna prednost metode jest fleksibilnost u pogledu kalibracijskog prostora. Kalibracijsko područje nije potrebno postavljati u strogo kontroliranim laboratorijskim uvjetima, već se može uspostaviti praktično u bilo kojem otvorenom ili poluotvorenom prostoru sa ujednačenim osvjetljenjem. Ključno je osigurati stabilne orijentacijske točke i povoljne geometrijske uvjete opažanja, dok se ostali uvjeti mogu prilagoditi konkretnim terenskim okolnostima. Uz to, cjelokupni postupak obrade podataka u velikoj je mjeri automatiziran. Fotogrametrijska rekonstrukcija panorama provodi se softverski, detekcija orijentacijskih meta automatizirana je postupcima obrade slike, a izdvajanje statičkih položaja, odnosno orijentacijskih točaka, temelji se na analizi SLAM

trajektorije. Time je omogućeno da postupak umjerivanja može provoditi sam korisnik sustava, brzo i jednostavno, bez potrebe za dugotrajnom pripremom mjernog okruženja. Ovakav operativni pristup čini razvijenu metodu posebno pogodnom za često i rutinsko ponavljanje umjerivanja u praktičnim uvjetima rada.

Analiza točnosti i preciznosti procijenjenih relativnih kalibracijskih parametara provedena je na temelju ograničenog broja ponovljenih kalibracijskih skenova. Za svaku kameru provedena su tri neovisna skena, što predstavlja relativno mali uzorak s aspekta stroge statističke analize. Međutim, cilj ovoga istraživanja nije bio odrediti populacijske statističke parametre, već procijeniti ponovljivost metode i red veličine ostvarive točnosti u realnim operativnim uvjetima. Dobiveni rezultati pokazali su stabilnost procijenjenih relativnih kalibracijskih parametara za obje razmatrane kamere. Kod tvornički integrirane kamere potvrđena je visoka razina apsolutne točnosti u odnosu na referentne tvorničke vrijednosti. Relativni kalibracijski parametri translacije određeni su s točnošću na razini od 2–3 mm, dok su parametri rotacije određeni s točnošću reda veličine približno 0.04° , što je u skladu s očekivanjima za ovakav tip sustava i način integracije kamere. Time je eksperimentalno potvrđena prva hipoteza doktorskog rada, prema kojoj se razvijena metoda umjerivanja može uspješno primijeniti na tvornički integrirane vanjske kamere ručnih mjernih mobilnih sustava. Kod korisnički integrirane kamere potvrđena je dobra ponovljivost procijenjenih parametara u neovisnim skenovima. Preciznost relativnih kalibracijskih parametara iznosila je približno 4 mm za translacijske komponente te oko 0.06° za rotacijske komponente, što ukazuje na stabilno ponašanje metode i očekivano nešto veću raspršenost rezultata u odnosu na tvornički integrirano rješenje. Navedeni rezultati potvrdili su drugu hipotezu istraživanja, koja se odnosi na mogućnost pouzdanog umjerivanja korisnički integrirane kamere, uz očekivano nešto nižu preciznost u odnosu na tvornički integrirana rješenja.

Monoskopsko kartiranje korišteno je kao neovisna metoda verifikacije razvijenog postupka umjerivanja kamere. Ovakav pristup omogućuje ocjenu kvalitete procijenjenih relativnih kalibracijskih parametara u realnim mjernim uvjetima, pri čemu se istodobno manifestiraju svi relevantni izvori pogrešaka prisutni u praktičnoj primjeni.

U analizi metode umjerivanja nastojalo se svjesno ukloniti ili minimizirati što veći broj utjecajnih čimbenika kako bi se provjerilo može li se eksperimentalnim putem približiti teorijski očekivanim vrijednostima prostorne točnosti. Dobiveni rezultati monoskopskog kartiranja pokazali su da su ostvarene empirijske pogreške vrlo bliske teorijskim

procjenama, pri čemu su uočena odstupanja očekivano nešto veća. Ta odstupanja prvenstveno proizlaze iz ograničenja geometrije opažanja, postupka georeferenciranja skena te otežane identifikacije točaka na panoramskim snimkama s porastom udaljenosti objekata od kamere.

Budući da su ostvareni rezultati monoskopskog kartiranja u skladu s teorijskim očekivanjima, može se zaključiti da procijenjeni relativni kalibracijski parametri ne predstavljaju dominantan izvor pogreške u ukupnom postupku. Naprotiv, činjenica da empirijski rezultati slijede teorijski trend, uz odstupanja koja se mogu jasno objasniti poznatim i neizbježnim ograničenjima monoskopskog opažanja, potvrđuje da su relativni kalibracijski parametri određeni ispravno i s dostatnom točnošću. Time se dodatno potvrđuje da prethodno provedena analiza točnosti i preciznosti umjerivanja realno i vjerodostojno opisuje stvarnu kvalitetu procijenjenih parametara te da navedena ocjena točnosti nije precijenjena.

Sličan zaključak vrijedi i za provjeru metode vremenske sinkronizacije pomoću monoskopskog kartiranja. Teorijska analiza pokazala je da je, zbog diskretne prirode uzorkovanja videozapisa i SLAM trajektorije, moguće postići teorijsku točnost sinkronizacije od približno 6 ms. Eksperimentalna ispitivanja pokazala su da je u praksi ostvarena točnost od oko 8 ms, što vrlo dobro odgovara teorijskim očekivanjima. Tvornički integrirana kamera pokazala je očekivano vrlo dobru prostornu konzistenciju monoskopski određenih koordinata, dok je kod korisnički integrirane kamere uočena nešto veća raspršenost rezultata, u skladu s izostankom hardverske sinkronizacije. Unatoč tome, ostvarena razina sinkronizacije u potpunosti je dostatna za praktične primjene, uključujući kolorizaciju oblaka točaka i monoskopsko kartiranje.

Na temelju provedenih teorijskih analiza i eksperimentalnih ispitivanja može se zaključiti da su obje postavljene hipoteze doktorskog rada potvrđene. Time je potvrđeno da se razvijena metoda umjerivanja može uspješno primijeniti kako za tvornički integrirane vanjske kamere, tako i za korisnički integrirane kamere koje se naknadno dodaju ili zamjenjuju na ručnim mjernim mobilnim sustavima.

Ostvareni rezultati potvrđuju i očekivane znanstvene doprinose ovoga doktorskog rada. Razvijena je i usavršena metoda umjerivanja kamere posebno prilagođena ručnim mjernim mobilnim sustavima, razvijen je metodološki pristup koji je primjenjiv neovisno o načinu

integracije kamere na sustav te je razvijena prilagođena metoda vremenske sinkronizacije za korisnički integrirane kamere. U dostupnoj znanstvenoj i stručnoj literaturi ne postoje izravno usporedive metode umjerivanja koje bi bile namijenjene isključivo ručnim mjernim mobilnim sustavima i koje bi istodobno obuhvaćale sve njihove specifičnosti.

Zaključno, razvijena metoda umjerivanja kamere predstavlja znanstveno utemeljen i praktično primjenjiv pristup koji omogućuje pouzdano i ponovljivo umjerivanje vanjskih kamera u ručnim mjernim mobilnim sustavima te osigurava dugoročnu kvalitetu i točnost dobivenih prostornih podataka u realnim operativnim uvjetima primjene.

LITERATURA

Abayowa, B. O., Yilmaz, A., Hardie, R. C. (2015): Automatic registration of optical imagery to a LiDAR point cloud for generation of textured 3D city models, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 100, 1–15.

Abdel-Aziz, Y. I., Karara, H. M. (1971): Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry, *Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry*, ASP/ASPRS.

Agarwal, P., Tipaldi, G. D., Spinello, L., Stachniss, C., Burgard, W. (2013): Robust map optimization using dynamic covariance scaling, in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*.

Agisoft (2025): Agisoft Metashape User Manual, Professional Edition, Version 2.2, Agisoft LLC.

Ahmad, N., Raja Ghazilla, R. A., Khairi, N. M., Kasi, V. (2013): Reviews on various inertial measurement unit (IMU) sensor applications, *International Journal of Signal Processing Systems*, 1(2).

Anandan, P. (1989): A computational framework and an algorithm for the measurement of visual motion, *International Journal of Computer Vision*, 2, 283–310.

Bailey, T. (2002): Mobile robot localisation and mapping in extensive outdoor environments, PhD thesis, The University of Sydney.

Bay, H., Tuytelaars, T., Van Gool, L. (2008): SURF: Speeded up robust features, *Computer Vision and Image Understanding*, 110(3), 346–359.

Bendat, J. S., Piersol, A. G. (2010): *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*, 4th edition, Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, New York, USA.

Besl, P. J., McKay, N. D. (1992): A method for registration of 3-D shapes, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2), 239–256.

Bettonvil, F. (2005): Fisheye lenses, *WGN, Journal of the International Meteor Organization*, 33(1), 9–15.

Bosse, M., Zlot, R. (2009): Continuous 3D scan-matching with a spinning 2D laser, in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 4312–4319.

Bosse, M., Zlot, R., Flick, P. (2012): Zebedee: Design of a spring-mounted 3-D range sensor with application to mobile mapping, IEEE Transactions on Robotics, 28(5), 1104–1119.

Brown, D. C. (1971): Close-range camera calibration, Photogrammetric Engineering, 37(8), 855–866.

Brown, M., Lowe, D. G. (2003): Recognising panoramas, in Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision.

Burt, P. J., Adelson, E. H. (1983): The Laplacian pyramid as a compact image code, IEEE Transactions on Communications, 31(4), 532–540.

Cadena, C., Carlone, L., Carrillo, H., Latif, Y., Scaramuzza, D., Neira, J., Reid, I., Leonard, J. J. (2016): Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: Toward the robust-perception age, IEEE Transactions on Robotics, 32(6).

Carlone, L., Aragues, R., Castellanos, J. A., Bona, B. (2011): A linear approximation for graph-based simultaneous localization and mapping, in Proceedings of Robotics: Science and Systems.

Cera, V., Campi, M. (2022): Fast survey procedures in urban scenarios: Some tests with 360° cameras, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVIII-2/W1-2022, 45–50.

Chio, S.-H., Hou, K.-W. (2021): Application of a hand-held LiDAR scanner for the urban cadastral detail survey in digitalized cadastral area of Taiwan urban city, Remote Sensing.

Cui, T., Ji, S., Shan, J., Gong, J., Liu, K. (2017): Line-based registration of panoramic images and LiDAR point clouds for mobile mapping, Sensors, 17(1), 70.

Ćosić, K., Mihoković, V., Zalović, L. (2022): Prikupljanje podataka o zgradama i drugim građevinama GeoSLAM ručnim laserskim skenerom u svrhu katastarske izmjere, Zbornik radova VII. Hrvatskog kongresa o katastru, Dubrovnik, Hrvatska.

Davis, J. (1998): Mosaics of scenes with moving objects, in Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.

Debeunne, C., Vivet, D. (2020): A review of visual–LiDAR fusion based simultaneous localization and mapping, *Sensors*, 20.

Dellaert, F., Carlson, J., Ila, V., Ni, K., Thorpe, C. E. (2010): Subgraph-preconditioned conjugate gradients for large scale SLAM, in Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.

Dellaert, F., Kipp, A., Krauthausen, P. (2005): A multifrontal QR factorization approach to distributed inference applied to multirobot localization and mapping, in Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence.

Dersch, H. (1999): Lens correction model for panoramic imaging, Panotools.org.

Dissanayake, M. W. M. G., Newman, P., Clark, S., Durrant-Whyte, H. F., Csorba, M. (2001): A solution to the simultaneous localisation and map building (SLAM) problem, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 17(3).

dos Santos, D. R., Dal Poz, A. P., Dalmolin, Q. (2010): Indirect orientation of images using control points extracted by the means of monoplotted model, *The Photogrammetric Journal of Finland*, 22(1).

Doucet, A., de Freitas, N., Murphy, K., Russell, S. (2000): Rao-Blackwellised particle filtering for dynamic Bayesian networks, in Proceedings of the Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI 2000).

Durrant-Whyte, H., Bailey, T. (2006): Simultaneous localisation and mapping (SLAM): Part I – The essential algorithms, *IEEE Robotics & Automation Magazine*.

Durrant-Whyte, H., Majumder, S., Thrun, S., de Battista, M., Scheduling, S. (2003): A Bayesian algorithm for simultaneous localisation and map building, in *Springer Tracts in Advanced Robotics*.

El-Sheimy, N. (2005): An overview of mobile mapping systems, in Proceedings of FIG Working Week 2005 and GSDI-8 – From Pharaohs to Geoinformatics, Cairo, Egypt.

Elhashash, M., Albanwan, H., Qin, R. (2022): A review of mobile mapping systems: From sensors to applications, *Sensors*, 22, 4262.

Fachruddin, I., Buliali, J. L. (2022): Circle detection using image moments and Hough transform, *Journal of Physics: Conference Series*, 2157, 012034.

Fischler, M. A., Bolles, R. C. (1981): Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography, *Communications of the ACM*, 24(6), 381–395.

Fridman, L., Brown, D. E., Angell, W., Abdić, I., Reimer, B., Noh, H. Y. (2016): Automated synchronization of driving data using vibration and steering events, *Pattern Recognition Letters*, 75, 54–61.

Furgale, P., Rehder, J., Siegwart, R. (2013): Unified temporal and spatial calibration for multi-sensor systems, in *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*.

Gao, S., Sun, L., Jiang, Q., Shi, H., Wang, J., Wang, K., Bai, J. (2022): Compact and lightweight panoramic annular lens for computer vision tasks, *Optics Express*, 30(17).

Gao, S., Yang, K., Shi, H., Wang, K., Bai, J. (2022): Review on panoramic imaging and its applications in scene understanding, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71.

Geyer, C., Daniilidis, K. (2000): A unifying theory for central panoramic systems and practical implications, in *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)*.

Gong, X., Lin, Y., Liu, J. (2013): 3D LIDAR-Camera Extrinsic Calibration Using an Arbitrary Trihedron, *Sensors*, 13(2), 1902–1918.

Gonzalez, R. C., Woods, R. E. (2008): *Digital Image Processing*, 3rd edition, Pearson Prentice Hall.

Goodman, D. S. (1996): *Geometric optics*, Wiley, New York.

Gopaul, N. S., Wang, J., Hu, B. (2016): Camera auto-calibration in GPS/INS/stereo camera integrated kinematic positioning and navigation system, *Journal of Global Positioning Systems*, 14.

Grammatikopoulos, L., Papanagnou, A., Venianakis, A., Kalisperakis, I., Stentoumis, C. (2022): An effective camera-to-LiDAR spatiotemporal calibration based on a simple calibration target, *Sensors*, 22(15), 5576.

Greivenkamp, J. E. (2004): Field guide to geometrical optics, SPIE Press, Bellingham, Washington.

Grisetti, G., Kümmerle, R., Ni, K. (2012): Robust optimization of factor graphs by using condensed measurements, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*.

Grisetti, G., Kümmerle, R., Stachniss, C., Burgard, W. (2010): A tutorial on graph-based SLAM, *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*.

Guivant, J. E., Nebot, E. M. (2001): Optimization of the simultaneous localization and map-building algorithm for real-time implementation, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 17(3).

Habib, A., Abdelgawy, H. (2007): Calibration of line scan cameras using LiDAR data, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*.

Han, L., Zhuang, Y., Chen, K., Xie, Y., Liao, G., Yin, G., Lin, J. (2025): Circle Detection with Adaptive Parameterization: A Bottom-Up Approach, *Sensors*, Vol. 25, No. 8, Article 2552, MDPI, Basel, Switzerland.

Harris, C., Stephens, M. (1988): A combined corner and edge detector, in *Proceedings of the Alvey Vision Conference*.

Hartley, R., Zisserman, A. (2004): Multiple view geometry in computer vision, 2nd edition, Cambridge University Press.

Hofmann, S., Eggert, D., Brenner, C. (2014): Skyline Matching Based Camera Orientation from Images and Mobile Mapping Point Clouds, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5, 181–188.

Huang, Y., Fu, Y., Zhang, G., Liu, Z. (2020): Modeling and analysis of a monocentric multi-scale optical system, *Optics Express*, 28(22).

IEEE (2008): IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems (IEEE Std 1588™-2008), IEEE.

Irani, M., Anandan, P. (1998): Video indexing based on mosaic representations, *Proceedings of the IEEE*, 86(5).

Irani, M., Rousso, B., Peleg, S. (1998): Computing occluding and transparent motions, *International Journal of Computer Vision*, 12(1).

Jakopec, A., Redovniković, L., Barković, Đ., Zrinjski, M. (2023): SLAM i geodezija, *Geodetski list*, 3.

Jiang, G., Yin, L., Jin, S., Tian, C., Ma, X., Ou, Y. (2019): A simultaneous localization and mapping (SLAM) framework for 2.5D map building based on low-cost LiDAR and vision fusion, *Applied Sciences*, 9.

Kaess, M., Johannsson, H., Roberts, R., Ila, V., Leonard, J. J., Dellaert, F. (2012): iSAM2: Incremental smoothing and mapping using the Bayes tree, *The International Journal of Robotics Research*, 31(2), 216–235.

Katz, S., Tal, A. (2013): On the visibility of point clouds, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 33(2), 32–43.

Katz, S., Tal, A., Basri, R. (2007): Direct visibility of point sets, *ACM Transactions on Graphics*, 26(3), Article 24.

Kim, J., Kim, S. (2018): Accurate and robust calibration between a camera and a LiDAR using planar features, *Sensors*, 18(7), 2180.

Kuglin, C. D., Hines, D. C. (1975): The phase correlation image alignment method, in *Proceedings of the IEEE International Conference on Cybernetics and Society*, New York.

Kweon, I.-S., Kanade, T., Okutomi, M. (2005): Robust vision-based mobile robot localization, *IEEE Transactions on Robotics*.

- Lauterbach, H. A., Borrmann, D., Heß, R., Eck, D., Schilling, K., Nüchter, A. (2015):** Evaluation of a backpack-mounted 3D mobile scanning system, *Remote Sensing*, 7.
- Lenz, R., Lenz, P. (1994):** On the geometry of binocular vision, in *Proceedings of SPIE – Intelligent Robots and Computer Vision*.
- Leonard, J. J., Feder, H. J. S. (1999):** A computationally efficient method for large-scale concurrent mapping and localization, in *Robotics Research: The Ninth International Symposium*, Springer.
- Levinson, J., Thrun, S. (2010):** Robust vehicle localization in urban environments using probabilistic maps, in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 4372–4378.
- Li, J., Yang, B., Chen, C., Huang, R., Dong, Z., Xiao, W. (2018):** Automatic registration of panoramic image sequence and mobile laser scanning data using semantic features, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 136, 41–57.
- Lindeberg, T. (1990):** Scale-space for discrete signals, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 12(3).
- Løvås, M. (2017):** Increasing the accuracy of positioning in mobile mapping systems: A method supported by simultaneous localization and mapping, Master's thesis, Norwegian University of Science and Technology (NTNU).
- Lowe, D. G. (2004):** Distinctive image features from scale-invariant keypoints, *International Journal of Computer Vision*, 60(2).
- Lucas, B. D., Kanade, T. (1981):** An iterative image registration technique with an application to stereo vision, in *Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*.
- Luo, Y., Huang, X., Bai, J., Liang, R. (2017):** Compact polarization-based dual-view panoramic lens, *Applied Optics*, 56(22), 6283–6287.
- MacKenzie Ellum, C. (2001):** The development of a backpack mobile mapping system, Master's thesis, University of Calgary.

Magnusson, M. (2009): The three-dimensional normal-distributions transform — an efficient representation for registration, surface analysis, and loop detection, PhD thesis, Örebro University, Sweden.

Markley, F. L., Cheng, Y., Crassidis, J. L., Oshman, Y. (2007): Averaging quaternions, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 30(4), 1193–1197.

Maset, E., Cucchiaro, S., Cazorzi, F., Crosilla, F., Fusiello, A., Beinat, A. (2021): Investigating the performance of a handheld mobile mapping system in different outdoor scenarios, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B1-2021.

Mikhail, E. M., Bethel, J. S., McGlone, J. C. (2001): Introduction to Modern Photogrammetry, John Wiley & Sons, New York, USA.

Mikolajczyk, K., Schmid, C. (2004): Scale & affine invariant interest point detectors, *International Journal of Computer Vision*, 60(1), 63–86.

Mikolajczyk, K., Schmid, C. (2005): A performance evaluation of local descriptors, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 27(10), 1615–1630.

Milgram, D. L. (1975): Computer methods for creating photomosaics, *IEEE Transactions on Computers*, C-24(11), 1113–1119.

Mishra, R. K., Zhang, Y. (2012): A review of optical imagery and airborne LiDAR data registration methods, *The Open Remote Sensing Journal*, 5, 54–63.

Montemerlo, M., Thrun, S., Koller, D., Wegbreit, B. (2002): FastSLAM: A factored solution to the simultaneous localization and mapping problem, in *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*.

Moulay, E., Léchappé, V., Plestan, F. (2019): Properties of the sign gradient descent algorithms, *Information Sciences*.

Nocerino, E., Menna, F., Remondino, F., Toschi, I., Rodríguez-Gonzálvez, P. (2017): Investigation of indoor and outdoor performance of two portable mobile mapping systems, in *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*.

Olivas, E. S., Guerrero, J. D. M., Martinez-Sober, M., Magdalena-Benedito, J. R., Serrano, L. (2015): Handbook of Research on Machine Learning Applications and Trends: Algorithms, Methods, and Techniques, IGI Global.

Pagani, A., Stricker, D. (2011): Structure from motion using full spherical panoramic cameras, in Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops).

Pandey, G., McBride, J. R., Savarese, S., Eustice, R. M. (2014): Automatic targetless extrinsic calibration of a 3D LiDAR and camera by maximizing mutual information, Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence.

Park, Y., Yun, S., Won, C. S., Cho, K., Um, K., Sim, S. (2014): Calibration between color camera and 3D LiDAR instruments with a polygonal planar board, Sensors, 14(3), 5333–5353.

Pentek, Q., Kennel, P., Allouis, T., Fiorio, C., Strauss, O. (2020): A flexible targetless LiDAR–GNSS/INS–camera calibration method for UAV platforms, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 163, 137–151.

Pernechele, C. (2018): Introduction to panoramic lenses, technical report / tutorial material.

Peynot, T., Underwood, J., Scheduling, S. (2009): Towards reliable perception for unmanned ground vehicles in challenging environments, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS).

Powell, R. L. (1996): Design study of an infrared panoramic optical system, Applied Optics, 35(31), 6190–6197.

Quam, L. H. (1984): Hierarchical warp stereo, technical report, SRI International, Menlo Park, CA, USA.

Rabiner, L. R. (1989): A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition, Proceedings of the IEEE, 77(2).

Rau, J.-Y., Habib, A. F., Kersting, A. P., Chiang, K.-W., Bang, K.-I., Tseng, Y.-H., Li, Y.-H. (2011): Direct sensor orientation of a land-based mobile mapping system, Sensors, 11(7).

Rehder, J., Nikolic, J., Schneider, T., Hinzmann, T., Siegwart, R. (2016): Extending kalibr: calibrating the extrinsics of multiple IMUs and of individual axes, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA).

Robinson, E. M. (2016): Focus, depth of field, and lenses, u: Crime Scene Photography, Third Edition, Academic Press, San Diego, CA, USA, 201–266.

Rolland, J. P., Davies, M. A., Suleski, T. J., Evans, C., Bauer, A., Lambropoulos, J. C., Falaggis, K. (2021): Freeform optics for imaging, *Optica*, 8(2), 161–176.

Rožić, N. (2007): Računska obrada geodetskih mjerenja, Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet, Zagreb.

Rublee, E., Rabaud, V., Konolige, K., Bradski, G. (2011): ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF, u: Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), Barcelona, Spain, 2564–2571.

Sahin, F. E., Tanguay, A. R. Jr. (2018): Distortion optimization for wide-angle computational cameras, *Optics Express*, 26(5), 5478–5493.

Sawhney, H. S., Kumar, R. (1999): True multi-image alignment and its application to mosaicing and lens distortion correction, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 21(3), 235–243.

Scaramuzza, D., Martinelli, A., Siegwart, R. (2006): A toolbox for easily calibrating omnidirectional cameras, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*.

Schmid, C., Mohr, R., Bauckhage, C. (2000): Evaluation of interest point detectors, *International Journal of Computer Vision*, 37(2), 151–172.

Schmidt, J. (2005): Calibration-free hand–eye calibration: a structure-from-motion approach, in *Joint Pattern Recognition Symposium*, Springer, 67–74.

Shalaginov, M. Y., An, S., Yang, F., Su, P., Lyzwa, D., Agarwal, A. M., Zhang, H., Hu, J., Gu, T. (2019): A single-layer panoramic metalens with $>170^\circ$ diffraction-limited field of view, *Nature Communications*, 10, 1–8.

Shalaginov, M. Y., An, S., Yang, F., Su, P., Lyzwa, D., Agarwal, A. M., Zhang, H., Hu, J., Gu, T. (2020): Single-element diffraction-limited fisheye metalens, *Nano Letters*, 20(10), 7429–7437.

Shiu, Y. C., Ahmad, S. (1989): Calibration of wrist-mounted robotic sensors by solving homogeneous transform equations of the form $AX = XB$, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 5(1), 16–29.

Slama, C. C. (1980): *Manual of Photogrammetry*, Fourth Edition, American Society of Photogrammetry, Falls Church, VA, USA.

Smid, M., Matas, J. (2019): Rolling shutter camera synchronization with sub-millisecond accuracy, *VISAPP – International Conference on Computer Vision Theory and Applications*.

Smith, R., Cheeseman, P. (1987): On the representation and estimation of spatial uncertainty, *The International Journal of Robotics Research*, 5(4).

Smith, R., Self, M., Cheeseman, P. (1987): A stochastic map for uncertain spatial relationships, in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*.

Smith, R., Self, M., Cheeseman, P. (1990): Estimating uncertain spatial relationships in robotics, in *Autonomous Robot Vehicles*, Springer.

Snaveley, N., Seitz, S. M., Szeliski, R. (2007): Modeling the World from Internet Photo Collections, *International Journal of Computer Vision*, 80(2), 189–210.

Stachniss, C., Leonard, J. J., Thrun, S. (2016): Simultaneous localization and mapping, in *Springer Handbook of Robotics*, Springer.

Szeliski, R. (2006): Image alignment and stitching: A tutorial, *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*, 2(1), 1–104.

Szeliski, R., Kang, S. B. (1995): Direct methods for visual scene reconstruction, in *Proceedings of the IEEE Workshop on Representations of Visual Scenes*, Cambridge, MA, USA.

Szeliski, R., Shum, H.-Y. (1997): Creating full view panoramic image mosaics and environment maps, in Proceedings of SIGGRAPH 1997, ACM, 251–258.

Taylor, J. R. (1997): An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements, 2nd edition, University Science Books, Sausalito, CA, USA.

Thibault, S., Artonne, J.-C. (2006): Panomorph lenses: A low-cost solution for panoramic surveillance, in Proceedings of SPIE Defense and Commercial Sensing, SPIE.

Thibault, S., Gauvin, J., Doucet, M., Wang, M. (2005): Enhanced optical design by distortion control, in Proceedings of SPIE – Optical Design and Engineering II, Vol. 5962, SPIE.

Thibault, S., Parent, J., Zhang, H., Roulet, P. (2014): Design, fabrication and test of miniature plastic panomorph lenses with 180° field of view, in Proceedings of SPIE-OSA – International Optical Design Conference, Vol. 9293, SPIE.

Thrun, S., Koller, D., Ghahramani, Z., Durrant-Whyte, H., Ng, A. Y. (2002): Simultaneous mapping and localization with sparse extended information filters: Theory and initial results, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation.

Torii, A., Imiya, A., Ohnishi, N. (2005): Two- and three-view geometry for spherical cameras, Proceedings of the OMNIVIS Workshop, Beijing, China.

Torma, P., György, A., Szepesvári, C. (2010): A Markov-chain Monte Carlo approach to simultaneous localization and mapping, in Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS).

Touchette, S., Gueaieb, W., Lanteigne, E. (2016): Efficient Cholesky factor recovery for column reordering in simultaneous localisation and mapping, Autonomous Robots.

Triggs, B., McLauchlan, P. F., Hartley, R. I., Fitzgibbon, A. W. (2000): Bundle adjustment — A modern synthesis, in Vision Algorithms'99, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 1883, Springer, 298–372.

Tsai, R. Y., Lenz, R. K. (1989): A new technique for fully autonomous and efficient 3D robotics hand/eye calibration, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 5(3), 345–358.

Tsyganok, E. A., Kozhina, A., Gao, S. (2021): Development of microscope lenses with uniform separation of optical illumination, in *Optical Design and Testing XI*, SPIE.

Uyttendaele, M., Eden, A., Szeliski, R. (2001): Eliminating ghosting and exposure artifacts in image mosaics, in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Vol. 2, 509–516.

Van Nam, D., Gon-Woo, K. (2021): Solid-state LiDAR based-SLAM: A concise review and application, in *Proceedings of the IEEE International Conference on Big Data and Smart Computing (BigComp)*.

Vautherin, J., Veloso, M., Peretroukhin, V., Kelly, J. (2016): Map-based localization with scan matching and particle filtering, *Robotics and Autonomous Systems*, 85, 127–141.

Vechersky, P., Cox, M., Borges, P., Lowe, T. (2018): Colourising point clouds using independent cameras, in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*.

Walter, M. R., Eustice, R. M., Leonard, J. J. (2007): Exactly sparse extended information filters for feature-based SLAM, *IEEE Transactions on Robotics*.

Wang, C. C. (1992): Extrinsic calibration of a vision sensor mounted on a robot, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 8(2), 161–175.

Wang, J., Hu, B., Wang, J. (2019): A review of mobile mapping systems: From sensors to applications, *ISPRS International Journal of Geo-Information*.

Wang, J., Zhang, Y., Liu, H. (2022): Optical design of panoramic imaging systems based on freeform surfaces, *Optical Engineering*.

Wang, L., Li, C., Jin, C. (2011): Design of catadioptric omnidirectional imaging system in solar blind UV, *Optics and Precision Engineering*, 19, 1503–1509.

Warren, J. (2008): Subdivision methods for geometric design: A constructive approach, Morgan Kaufmann Publishers.

Wu, H., Zeng, X., Wang, P. (2019): Design of catadioptric IR panoramic imaging optical system, *Infrared*.

Xu, W., Cai, Y., He, D., Lin, J., Zhang, F. (2022): FAST-LIO 2: Fast direct LiDAR-inertial odometry, *IEEE Transactions on Robotics*.

Xu, W., Zhang, F. (2021): FAST-LIO: A fast, robust LiDAR-inertial odometry package by tightly-coupled iterated Kalman filter, *IEEE Robotics and Automation Letters*.

Yang, T., Duan, Y., Cheng, D., Wang, Y. (2021): Freeform imaging optical system design: theories, development and applications, *Acta Optica Sinica*, 41(1).

Yuan, H.-Z., Wang, B.-P., Zhang, J., Li, H. (2010): A novel method for geometric correction of multi-cameras in panoramic video system, in *Proceedings of the International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, IEEE, 248–252.

Zaffar, M., Ehsan, S., Stolkin, R., Maier, K. M. (2018): Sensors, SLAM and long-term autonomy: A review, *IEEE Sensors Journal*.

Zalović, L., Mastelić-Ivić, S., Rončević, A. (2024): Selection of an appropriate extrinsic camera calibration method for handheld mobile mapping systems, *Technical Journal*, 18(si1), 55–61.

Zhang, J., Singh, S. (2014): LOAM: Lidar Odometry and Mapping in Real-time, *Robotics: Science and Systems (RSS)*, Berkeley, CA, USA.

Zhou, Q., Tian, Y., Wang, J., Xu, M. (2020): Design and implementation of a high-performance panoramic annular lens, *Applied Optics*, 59(36), 11246–11252.

Zoghلامي, I., Faugeras, O., Deriche, R. (1997): Using geometric corners to build a 2D mosaic from a set of images, in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, IEEE.

Zunić, J., Hirota, K., Rosin, P. L. (2010): A Hu invariant as a shape circularity measure, *Pattern Recognition*, 43(1), 47–57.

MREŽNE ADRESE

URL1:

<https://cdn.assets.lomography.com/c5/356bd0843c5616af9dba1a9bf850a350f1cfa1/1216x811x2.jpg?auth=d8dfb502d0bf9953e1613103b501de115a3646ac>
(25.4.2025.)

URL 2:

<https://www.technexion.com/wp-content/uploads/2024/11/vci-ar0522-c-s85-ir-kit.png>
(25.4.2025.)

URL 3:

https://www.intelrealsense.com/wp-content/uploads/2019/02/stereo_DT_d435_front-crop1a.png
(25.4.2025.)

URL 4:

<https://www.researchgate.net/publication/371647405/figure/fig3/AS:11431281168602779@1687024984227/LIDAR-a-Mechanical-Scanning-LIDAR-b-Solid-state-LIDAR.ppm>
(26.4.2025.)

URL 5:

https://docs.unity3d.com/Simulation/manual/author/images/9da96d2-diagram-IMU_0.jpeg
(26.4.2025.)

URL 6:

https://www.sccsurvey.co.uk/media/catalog/product/cache/2412bf1066845f9fbbd3b1fa4251e6b8/1/e/leica_pegasus_backpack_side_2333x3856.png
(29.4.2025.)

URL 7:

https://mms.businesswire.com/media/20180920005560/en/679428/5/NavVis_1.jpg
(29.4.2025.)

URL 8:

https://hts-3d.com/wp-content/uploads/2023/10/GEOSLAM_ZEB_horizon_RT_rental.jpg
(2.5.2025.)

URL 9:

https://shop.leica-geosystems.com/sites/default/files/styles/product_large/public/2022-01/BLK2GO_Side_Logo_Light_WBackground.png.webp?itok=Ze4PaX2_
(2.5.2025.)

URL 10:

https://shop.romvesen.as/wp-content/uploads/2024/01/P1_scanner-only.png
(2.5.2025.)

URL 11:

https://weiss-ag.com/wp-content/uploads/2018/03/civetta_head_right-e1616494995655.png
(5.6.2025.)

URL 12:

<https://www.teledynevisionsolutions.com/globalassets/imported-assets/image/ladybug5plus-frt-red.png>
(5.6.2025.)

URL 13:

<https://blog.ampedsoftware.com/wp-content/uploads/2023/11/image10.jpg>
(9.6.2025.)

URL 14:

<https://i.imgur.com/Hv1Lxmx.jpg>
(19.7.2025.)

URL 15:

<https://lasersurveyingequipment.com.au/wp-content/uploads/2020/07/Sticker-Survey-Target-for-3D-Scanner-min.jpg>
(12.8.2025.)

URL 16:

https://prs.igp.ethz.ch/research/completed_projects/automatic_registration_of_point_clouds/_jcr_content/par/fullwidthimage/image.imageformat.1286.189703476.png
(20.8.2025.)

URL 17:

<https://cartocanada.ca/wp-content/uploads/2022/12/GeoSlam-Single-Reference-Plate.jpg>
(27.9.2025.)

URL 18:

https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_2_2_en.pdf
(6.10.2025.)

URL 19:

https://knowledge.faro.com/Hardware/GeoSlam/ZEB_Horizon_and_Horizon_RT/Technical_Specifications_Sheet_for_ZEB_Horizon
(20.10.2025.)

URL 20:

https://knowledge.faro.com/Hardware/GeoSlam/ZEB_Accessories/ZEB_Vision_Time_Synchronisation?utm_source=chatgpt.com
(27.10.2025.)

URL 21:

<https://www.insta360.com/product/insta360-x3>
(3.11.2025.)

URL 22:

https://www.topconpositioning.com/content/dam/topcon_digital_asset_hub/collateral/datasheets/topcon_gt-series_7010-2430_enGL25data.pdf
(20.11.2025.)

URL 23:

<https://tpi.com.ro/wp-content/uploads/2025/07/Topcon-GT-700-GT-1500-News-05.jpg>
(21.11.2025.)

PRILOZI

Popis priloga:

- **Prilog 1:** Koordinate točaka mreže tvrtke Geo-centar
- **Prilog 2:** Koordinate referentnih točaka određenih na pročeljima zgrada mjernom stanicom
- **Prilog 3:** Koordinate točaka pročelja određene monoskopskim kartiranjem primjenom ZEB-Vision kamere, korištene u analizi točnosti metode umjerivanja kamere
- **Prilog 4:** Koordinate točaka pročelja određene monoskopskim kartiranjem primjenom Insta360 X3 kamere, korištene u analizi točnosti metode umjerivanja kamere
- **Prilog 5:** Koordinate točaka pročelja određene monoskopskim kartiranjem primjenom ZEB-Vision kamere, korištene u analizi točnosti metode vremenske sinkronizacije
- **Prilog 6:** Trajektorija ZEB-Vision kamere za linearni segment korišten u analizi točnosti metode vremenske sinkronizacije
- **Prilog 7:** Koordinate točaka pročelja određene monoskopskim kartiranjem primjenom Insta360 X3 kamere, korištene u analizi točnosti metode vremenske sinkronizacije
- **Prilog 8:** Trajektorija Insta360 X3 kamere za linearni segment korišten u analizi točnosti metode vremenske sinkronizacije

Prilog 1: Koordinate točaka mreže tvrtke Geo-centar

	X [m]	Y [m]	Z [m]	s_x [mm]	s_y [mm]	s_z [mm]
GC 1	54.5607	31.1826	2.0712	0.8	0.8	0.3
GC 2	13.5088	32.0664	2.0907	0.9	0.7	0.4
GC 3	21.9362	19.4401	1.6574	0.7	0.8	0.3

Prilog 2: Koordinate referentnih točaka određenih na pročeljima zgrada mjernom stanicom

Točka	X' [m]	Y' [m]	Z' [m]	s _x [mm]	s _y [mm]	s _z [mm]	s _{xyz} [mm]
S1	20.071	34.434	5.093	0.7	1.5	0.7	1.8
S2	23.847	34.157	14.217	1.5	1.2	1.0	2.2
S3	28.892	33.750	11.048	0.7	1.1	0.5	1.4
S4	36.786	33.092	11.046	1.5	0.6	1.2	2.0
S5	33.824	34.420	10.624	0.5	0.8	1.1	1.4
S6	32.032	34.557	7.578	0.1	0.0	0.2	0.2
S7	33.809	34.417	4.606	0.6	1.3	0.6	1.6
S8	41.801	32.685	14.206	0.5	1.3	1.3	1.9
S9	45.581	32.383	5.119	0.9	1.0	1.1	1.7
S10	49.025	32.115	8.192	1.0	0.6	1.0	1.5
J1	42.829	18.542	14.605	0.8	0.2	0.3	0.9
J2	32.887	17.866	14.598	0.4	0.8	0.7	1.1
J3	47.534	18.837	11.506	0.4	0.9	1.3	1.6
J4	41.684	18.464	11.497	0.3	0.5	1.4	1.5
J5	32.897	17.860	11.503	1.3	1.0	0.8	1.8
J6	47.537	18.839	8.590	0.0	0.4	0.9	1.0
J7	36.361	18.099	8.571	1.1	0.5	0.2	1.2
J8	32.896	17.864	8.570	1.1	0.6	0.7	1.4
J9	45.039	18.686	5.721	0.7	0.5	1.2	1.5
J10	36.352	18.094	5.714	0.8	1.0	1.1	1.7

Prilog 3: Koordinate točaka pročelja određene monoskopskim kartiranjem primjenom ZEB-Vision kamere, korištene u analizi točnosti metode umjerivanja kamere

Smjer	Točka	X [m]	Y [m]	Z [m]	Udaljenost [m]
I	S1	20.029	34.387	5.184	21
I	S2	23.859	34.138	14.279	20
I	S3	28.873	33.734	11.073	15
I	S4	36.778	33.077	11.018	10
I	S5	33.858	34.377	10.680	12
I	S6	32.028	34.583	7.588	12
I	S7	33.786	34.415	4.566	10
I	S8	41.834	32.717	14.247	12
I	S9	45.595	32.386	5.157	8
I	S10	49.055	32.135	8.185	12
I	J1	42.852	18.492	14.623	13
I	J2	32.857	17.824	14.602	15
I	J3	47.587	18.890	11.509	13
I	J4	41.703	18.476	11.442	11
I	J5	32.968	17.830	11.481	13
I	J6	47.539	18.842	8.551	11
I	J7	36.453	18.063	8.565	10
I	J8	32.920	17.845	8.570	11
I	J9	45.041	18.674	5.672	9

I	J10	36.325	18.092	5.736	8
J	S1	20.008	34.410	5.102	21
J	S2	23.839	34.134	14.243	20
J	S3	28.884	33.723	11.056	15
J	S4	36.771	33.089	11.032	10
J	S5	33.829	34.407	10.655	12
J	S6	32.017	34.575	7.582	12
J	S7	33.811	34.403	4.603	10
J	S8	41.814	32.705	14.239	12
J	S9	45.579	32.409	5.137	8
J	S10	49.026	32.144	8.210	12
J	J1	42.855	18.506	14.627	13
J	J2	32.880	17.835	14.611	15
J	J3	47.603	18.842	11.531	13
J	J4	41.725	18.475	11.473	11
J	J5	32.935	17.841	11.506	13
J	J6	47.555	18.840	8.577	11
J	J7	36.442	18.080	8.571	10
J	J8	32.919	17.852	8.583	11
J	J9	45.039	18.687	5.728	9
J	J10	36.349	18.085	5.714	8
S	S1	20.027	34.409	5.121	21
S	S2	23.864	34.163	14.253	20

S	S3	28.905	33.754	11.089	15
S	S4	36.790	33.101	11.049	10
S	S5	33.844	34.425	10.653	12
S	S6	32.050	34.580	7.598	12
S	S7	33.809	34.423	4.615	10
S	S8	41.820	32.699	14.247	12
S	S9	45.596	32.391	5.137	8
S	S10	49.046	32.128	8.214	12
S	J1	42.863	18.543	14.627	13
S	J2	32.892	17.879	14.603	15
S	J3	47.585	18.837	11.523	13
S	J4	41.746	18.480	11.507	11
S	J5	32.923	17.876	11.503	13
S	J6	47.561	18.853	8.592	11
S	J7	36.417	18.090	8.583	10
S	J8	32.933	17.876	8.593	11
S	J9	45.057	18.694	5.727	9
S	J10	36.371	18.087	5.732	8
Z	S1	20.034	34.410	5.129	21
Z	S2	23.868	34.165	14.250	20
Z	S3	28.910	33.754	11.073	15
Z	S4	36.798	33.101	11.049	10
Z	S5	33.847	34.427	10.633	12

Z	S6	32.044	34.543	7.579	12
Z	S7	33.792	34.389	4.600	10
Z	S8	41.814	32.669	14.246	12
Z	S9	45.598	32.381	5.124	8
Z	S10	49.004	32.121	8.210	12
Z	J1	42.846	18.541	14.596	13
Z	J2	32.880	17.874	14.636	15
Z	J3	47.529	18.834	11.492	13
Z	J4	41.693	18.482	11.514	11
Z	J5	32.888	17.858	11.467	13
Z	J6	47.541	18.840	8.598	11
Z	J7	36.365	18.094	8.553	10
Z	J8	32.887	17.879	8.566	11
Z	J9	45.002	18.704	5.756	9
Z	J10	36.338	18.091	5.716	8

Prilog 4: Koordinate točaka pročelja određene monoskopskim kartiranjem primjenom Insta360 X3 kamere, korištene u analizi točnosti metode umjerivanja kamere

Smjer	Točka	X [m]	Y [m]	Z [m]	Udaljenost [m]
I	S1	20.131	34.418	5.094	21
I	S2	23.861	34.130	14.217	20
I	S3	28.892	33.700	11.076	15
I	S4	36.799	33.078	11.042	10
I	S5	33.837	34.413	10.618	12
I	S6	31.996	34.570	7.581	12
I	S7	33.815	34.383	4.642	10
I	S8	41.805	32.676	14.256	12
I	S9	45.580	32.354	5.111	8
I	S10	48.969	32.140	8.182	12
I	J1	42.810	18.570	14.563	13
I	J2	32.902	17.808	14.579	15
I	J3	47.504	18.874	11.551	13
I	J4	41.676	18.483	11.493	11
I	J5	32.911	17.840	11.459	13
I	J6	47.495	18.848	8.642	11
I	J7	36.367	18.087	8.613	10
I	J8	32.901	17.866	8.576	11
I	J9	45.036	18.679	5.691	9

I	J10	36.362	18.093	5.737	8
J	S1	20.058	34.367	5.089	21
J	S2	23.905	34.144	14.187	20
J	S3	28.858	33.720	11.040	15
J	S4	36.760	33.125	11.040	10
J	S5	33.827	34.455	10.661	12
J	S6	32.026	34.565	7.596	12
J	S7	33.804	34.378	4.620	10
J	S8	41.823	32.695	14.183	12
J	S9	45.577	32.371	5.113	8
J	S10	49.057	32.152	8.208	12
J	J1	42.843	18.560	14.605	13
J	J2	32.885	17.847	14.596	15
J	J3	47.592	18.859	11.497	13
J	J4	41.673	18.444	11.506	11
J	J5	32.907	17.823	11.515	13
J	J6	47.524	18.872	8.594	11
J	J7	36.399	18.089	8.565	10
J	J8	32.903	17.888	8.583	11
J	J9	45.014	18.690	5.721	9
J	J10	36.344	18.082	5.748	8
S	S1	20.057	34.405	5.115	21
S	S2	23.852	34.155	14.244	20

S	S3	28.905	33.760	11.075	15
S	S4	36.792	33.078	11.038	10
S	S5	33.812	34.425	10.598	12
S	S6	31.987	34.559	7.545	12
S	S7	33.766	34.425	4.590	10
S	S8	41.813	32.672	14.179	12
S	S9	45.556	32.372	5.114	8
S	S10	49.005	32.108	8.155	12
S	J1	42.830	18.496	14.600	13
S	J2	32.907	17.896	14.646	15
S	J3	47.495	18.856	11.537	13
S	J4	41.707	18.442	11.507	11
S	J5	32.944	17.821	11.515	13
S	J6	47.563	18.823	8.604	11
S	J7	36.338	18.081	8.553	10
S	J8	32.900	17.862	8.592	11
S	J9	45.020	18.683	5.741	9
S	J10	36.363	18.068	5.727	8
Z	S1	20.054	34.448	5.104	21
Z	S2	23.889	34.161	14.154	20
Z	S3	28.853	33.770	11.041	15
Z	S4	36.811	33.098	11.030	10
Z	S5	33.851	34.400	10.574	12

Z	S6	32.082	34.510	7.594	12
Z	S7	33.829	34.420	4.569	10
Z	S8	41.826	32.650	14.173	12
Z	S9	45.574	32.398	5.125	8
Z	S10	49.045	32.104	8.188	12
Z	J1	42.800	18.534	14.620	13
Z	J2	32.879	17.879	14.582	15
Z	J3	47.519	18.838	11.501	13
Z	J4	41.698	18.468	11.537	11
Z	J5	32.891	17.854	11.476	13
Z	J6	47.537	18.855	8.573	11
Z	J7	36.360	18.115	8.568	10
Z	J8	32.884	17.886	8.572	11
Z	J9	45.047	18.710	5.745	9
Z	J10	36.345	18.084	5.720	8

Prilog 5: Koordinate točaka pročelja određene monoskopskim kartiranjem primjenom ZEB-Vision kamere, korištene u analizi točnosti metode vremenske sinkronizacije

Relativna vremenska oznaka [s]	Točka	X [m]	Y [m]	Z [m]
0	S10	49.040	32.117	8.208
0	J6	47.548	18.883	8.596
0	J3	47.555	18.778	11.510
0	S8	41.848	32.640	14.217
0	J4	41.682	18.413	11.494
1	S10	49.002	32.062	8.204
1	J6	47.497	18.867	8.538
1	J3	47.517	18.844	11.486
1	S8	41.764	32.691	14.238
1	J4	41.685	18.496	11.495
1	S4	36.711	33.081	11.019
2	S10	49.002	32.112	8.214
2	J6	47.460	18.825	8.577
2	J3	47.510	18.811	11.525
2	S8	41.766	32.679	14.225
2	S4	36.818	33.158	11.067
2	J4	41.680	18.495	11.453
3	S10	49.005	32.072	8.171

3	J6	47.542	18.752	8.605
3	S8	41.817	32.711	14.176
4	S10	49.036	32.075	8.195
4	J6	47.481	18.858	8.588
4	S4	36.820	33.033	11.046
5	S10	49.019	32.152	8.211
5	S4	36.814	33.101	11.068
5	J6	47.518	18.887	8.611
5	S8	41.818	32.679	14.206
5	J4	41.725	18.417	11.533
5	J7	36.349	18.110	8.555
6	S10	49.013	32.122	8.188
6	S4	36.780	33.093	11.041
6	S8	41.801	32.736	14.202
6	J6	47.559	18.814	8.586
6	J7	36.315	18.089	8.563
6	S5	33.838	34.394	10.648
7	S4	36.781	33.174	11.011
7	S10	49.053	32.175	8.190
7	S8	41.774	32.725	14.219
7	S5	33.839	34.438	10.601
7	J7	36.336	18.138	8.591
7	J4	41.700	18.458	11.473

8	S4	36.819	33.121	11.012
8	S6	32.051	34.531	7.546
8	S5	33.820	34.445	10.640
8	J7	36.399	18.031	8.576
8	S10	49.032	32.071	8.209
8	S8	41.765	32.689	14.224
9	S4	36.748	33.080	11.065
9	S6	31.990	34.499	7.594
9	S5	33.791	34.499	10.606
10	S4	36.783	33.069	11.010
10	S6	32.033	34.529	7.621
10	S5	33.802	34.417	10.651
11	S6	32.001	34.512	7.609
11	S4	36.809	33.079	11.020
11	S5	33.791	34.422	10.690
12	S6	32.008	34.584	7.564
12	S4	36.802	33.082	11.045
12	S5	33.829	34.480	10.627
13	S6	32.045	34.518	7.560
13	S4	36.746	33.050	11.027
13	S5	33.838	34.393	10.622
13	S3	28.902	33.723	11.020
14	S6	32.032	34.605	7.557

14	S5	33.768	34.404	10.609
14	S4	36.799	33.067	11.067
14	S3	28.865	33.784	11.053
14	J8	32.873	17.933	8.571
14	J7	36.316	18.108	8.602
15	S6	32.053	34.601	7.614
15	S5	33.775	34.380	10.614
15	S4	36.753	33.051	11.026
15	S3	28.916	33.754	11.082
15	J8	32.873	17.865	8.568
15	J7	36.354	18.097	8.580
16	S6	32.061	34.583	7.585
16	S3	28.895	33.761	11.069
16	S5	33.785	34.432	10.613
17	S6	32.025	34.571	7.593
17	S3	28.902	33.721	11.035
17	S5	33.806	34.422	10.651
18	S6	32.038	34.568	7.540
18	S3	28.863	33.796	11.056
18	S5	33.816	34.405	10.580
18	S4	36.798	33.096	11.028
18	J8	32.909	17.903	8.592
19	S6	32.012	34.576	7.600

19	S3	28.829	33.785	11.029
19	S5	33.816	34.421	10.576
19	J8	32.900	17.881	8.602
19	S4	36.771	33.084	11.049
20	S6	32.014	34.527	7.581
20	S3	28.927	33.784	11.068
20	S5	33.858	34.413	10.656
20	J8	32.910	17.899	8.567
21	S6	32.038	34.580	7.566
21	S3	28.884	33.751	11.041
21	S5	33.823	34.414	10.633
21	S2	23.889	34.145	14.235
21	J8	32.886	17.851	8.595
22	S3	28.901	33.677	11.034
22	S6	32.015	34.587	7.559
22	S2	23.871	34.149	14.236
22	S5	33.839	34.464	10.592
23	S3	28.904	33.825	11.056
23	S6	32.042	34.527	7.536
23	S2	23.831	34.238	14.207
23	S5	33.805	34.387	10.619
23	J5	32.908	17.877	11.482
23	S4	36.810	33.080	11.041

24	S3	28.863	33.718	11.006
24	S6	32.075	34.581	7.594
24	S2	23.813	34.169	14.208
24	S5	33.802	34.491	10.631
24	J5	32.903	17.869	11.538
24	S4	36.788	33.119	11.038
25	S3	28.878	33.709	11.056
25	S2	23.836	34.165	14.227
25	S5	33.779	34.460	10.623
25	J5	32.892	17.834	11.528
25	S4	36.786	33.127	11.065
26	S3	28.903	33.794	11.074
26	S2	23.849	34.129	14.238
26	S5	33.879	34.340	10.586
27	S2	23.853	34.143	14.218
27	S3	28.927	33.707	11.046
27	S5	33.861	34.450	10.641
27	J5	32.898	17.878	11.510
28	S2	23.891	34.113	14.210
28	S3	28.850	33.713	11.024
28	S5	33.796	34.334	10.600

Prilog 6: Trajektorija ZEB-Vision kamere za linearni segment korišten u analizi točnosti metode vremenske sinkronizacije

Relativna vremenska oznaka [s]	X [m]	Y [m]	Z [m]	φ [°]	θ [°]	ψ [°]
0	47.496	27.836	3.818	-0.417524	-0.065024	-59.134234
1	46.468	27.871	3.739	0.026584	-0.029677	-59.291726
2	45.540	27.791	3.828	0.210699	0.154495	-59.198468
3	44.461	27.788	3.817	0.994681	0.103164	-58.335265
4	43.471	27.857	3.730	0.746148	0.116378	-57.398476
5	42.459	27.836	3.852	0.755982	0.299859	-56.092670
6	41.476	27.912	3.886	1.050842	-0.122607	-58.127018
7	40.435	27.829	3.836	1.021108	-0.081598	-55.750352
8	39.447	27.878	3.894	0.663899	-0.538354	-56.271183
9	38.398	27.848	3.799	0.714105	-0.786674	-55.924360
10	37.398	27.818	3.764	0.719778	-0.831568	-54.609776
11	36.404	27.868	3.905	0.542134	-1.134636	-54.307036
12	35.416	27.847	3.781	0.884862	-1.427715	-54.731247
13	34.379	27.844	3.833	0.936294	-1.351492	-55.302682
14	33.429	27.870	3.829	0.818627	-1.140562	-56.419685
15	32.388	27.859	3.821	0.834620	-1.489091	-55.284989
16	31.381	27.851	3.800	0.442858	-1.416536	-54.803108
17	30.442	27.896	3.792	0.590636	-1.519574	-54.813661
18	29.326	27.936	3.717	0.059432	-1.458342	-55.343940

19	28.327	27.910	3.805	0.186221	-1.732699	-55.258088
20	27.343	27.899	3.893	-0.095681	-1.491785	-55.559923
21	26.366	27.894	3.759	0.184546	-1.542612	-55.934865
22	25.371	27.863	3.825	-0.132697	-1.253196	-56.754486
23	24.355	27.886	3.846	0.186885	-1.129640	-55.627333
24	23.341	27.857	3.742	-0.859009	-0.892456	-54.206633
25	22.325	27.888	3.782	-0.294446	-1.031700	-53.352403
26	21.292	27.856	3.794	-0.261126	-2.040140	-53.036824
27	20.322	27.932	3.891	-0.763640	-1.923638	-52.444642
28	19.240	27.873	3.763	-0.363281	-1.872927	-51.924192

Prilog 7: Koordinate točaka pročelja određene monoskopskim kartiranjem primjenom Insta360 X3 kamere, korištene u analizi točnosti metode vremenske sinkronizacije

Relativna vremenska oznaka [s]	Točka	X [m]	Y [m]	Z [m]
0	S10	49.026	32.231	8.138
0	J6	47.609	18.846	8.544
0	J3	47.533	18.804	11.455
1	S10	49.028	32.067	8.197
1	J6	47.481	18.934	8.577
1	J3	47.493	18.845	11.500
2	S10	48.986	32.168	8.170
2	J6	47.529	18.834	8.569
2	S8	41.772	32.679	14.188
2	J3	47.546	18.923	11.500
2	S4	36.751	33.247	11.052
3	S10	48.988	32.114	8.230
3	J6	47.584	18.821	8.643
3	S8	41.769	32.719	14.133
3	S4	36.724	33.107	11.037
3	J3	47.545	18.843	11.516
3	J4	41.707	18.457	11.515
4	S10	49.019	32.037	8.159

4	S4	36.739	33.028	11.072
4	J6	47.508	18.871	8.523
4	S8	41.795	32.720	14.166
4	J4	41.687	18.438	11.551
5	S10	48.986	32.126	8.192
5	S4	36.733	33.050	11.038
5	S8	41.828	32.729	14.236
6	S10	49.055	32.102	8.161
6	S4	36.774	33.074	11.052
6	S8	41.860	32.618	14.158
6	S5	33.786	34.426	10.617
6	J6	47.519	18.799	8.548
7	S4	36.747	33.118	11.077
7	S10	49.008	32.104	8.178
7	S5	33.824	34.374	10.602
7	S8	41.808	32.687	14.221
8	S4	36.729	33.062	11.080
8	S6	32.020	34.548	7.605
8	S5	33.801	34.369	10.625
8	S10	49.034	32.053	8.193
9	S4	36.795	33.070	11.067
9	S6	32.003	34.514	7.624
9	S5	33.827	34.369	10.598

10	S4	36.744	33.079	10.990
10	S6	31.992	34.535	7.540
10	S5	33.811	34.491	10.645
10	J7	36.373	18.098	8.613
11	S6	32.042	34.563	7.549
11	S4	36.777	33.134	11.096
11	S5	33.760	34.457	10.595
11	J7	36.300	18.101	8.546
11	J8	32.929	17.854	8.541
12	S6	32.022	34.533	7.581
12	S4	36.774	33.060	11.038
12	S5	33.825	34.388	10.636
13	S6	31.990	34.462	7.526
13	S4	36.711	33.030	11.069
13	S5	33.793	34.457	10.634
14	S6	31.997	34.524	7.589
14	S5	33.786	34.417	10.620
14	S4	36.831	33.107	11.049
15	S6	31.960	34.490	7.563
15	S5	33.822	34.402	10.626
15	S3	28.898	33.733	11.067
16	S6	32.010	34.586	7.602
16	S3	28.912	33.709	11.040

16	S5	33.842	34.461	10.656
16	S4	36.857	33.128	11.047
16	J8	32.887	17.805	8.598
17	S6	32.041	34.591	7.604
17	S3	28.968	33.772	11.058
17	S5	33.858	34.381	10.650
18	S6	32.006	34.440	7.555
18	S3	28.874	33.754	11.045
18	S5	33.810	34.465	10.624
18	S4	36.805	33.072	11.082
18	J8	32.907	17.902	8.563
19	S6	31.994	34.731	7.604
19	S3	28.890	33.727	11.047
19	S5	33.791	34.439	10.647
19	S4	36.747	33.000	11.056
19	J8	32.902	17.913	8.613
20	S6	32.050	34.627	7.586
20	S3	28.882	33.761	11.052
20	S5	33.860	34.443	10.604
20	S2	23.818	34.177	14.221
20	J8	32.915	17.873	8.547
21	S6	32.001	34.579	7.581
21	S3	28.853	33.739	11.083

21	S5	33.834	34.439	10.608
21	S2	23.847	34.178	14.219
21	S4	36.791	33.130	11.040
22	S3	28.879	33.732	11.015
22	S6	31.998	34.558	7.560
22	S2	23.868	34.153	14.215
22	S5	33.803	34.399	10.564
22	S4	36.879	33.107	11.035
22	J5	32.862	17.891	11.477
23	S3	28.873	33.736	10.988
23	S6	32.007	34.487	7.568
23	S2	23.778	34.103	14.232
23	S5	33.873	34.533	10.676
23	S4	36.791	33.066	11.030
23	J5	32.883	17.829	11.493
24	S3	28.823	33.726	11.064
24	S2	23.873	34.197	14.231
24	S5	33.801	34.444	10.627
24	J5	32.846	17.893	11.491
25	S3	28.895	33.809	11.046
25	S2	23.865	34.200	14.207
25	S5	33.768	34.366	10.658
25	J5	32.869	17.907	11.550

26	S3	28.881	33.706	11.046
26	S2	23.886	34.244	14.231
26	S5	33.795	34.391	10.634
27	S2	23.791	34.117	14.203
27	S3	28.957	33.720	11.084
27	S5	33.847	34.366	10.568
27	J5	32.903	17.878	11.433
28	S2	23.793	34.184	14.242
28	S3	28.889	33.741	11.037
28	S5	33.814	34.456	10.654

Prilog 8: Trajektorija Insta360 X3 kamere za linearni segment korišten u analizi točnosti metode vremenske sinkronizacije

Relativna vremenska oznaka [s]	X [m]	Y [m]	Z [m]	φ [°]	θ [°]	ψ [°]
0	47.511	28.052	3.797	-0.427275	0.022549	-59.625010
1	46.503	28.056	3.727	-0.013097	-0.105576	-58.937741
2	45.494	28.059	3.850	0.310500	0.199511	-58.405220
3	44.486	28.063	3.812	0.927877	0.073037	-58.118744
4	43.477	28.067	3.729	0.934496	-0.021320	-57.637458
5	42.469	28.070	3.872	0.842336	0.109716	-56.678119
6	41.460	28.074	3.866	0.926620	-0.210479	-57.986663
7	40.452	28.078	3.854	0.930841	-0.104870	-55.530196
8	39.444	28.081	3.903	0.718792	-0.622266	-56.335648
9	38.435	28.085	3.785	0.719453	-0.840593	-55.500467
10	37.427	28.089	3.776	0.499727	-0.890284	-54.426838
11	36.418	28.092	3.891	0.567636	-1.063357	-54.362989
12	35.410	28.096	3.755	0.853076	-1.327788	-54.953966
13	34.401	28.100	3.803	0.738252	-1.377817	-55.695451
14	33.393	28.104	3.831	0.742452	-1.206878	-55.830114
15	32.385	28.107	3.813	0.649838	-1.336454	-55.446010
16	31.376	28.111	3.805	0.288460	-1.330591	-55.277058
17	30.368	28.115	3.798	0.538954	-1.512056	-54.684492
18	29.359	28.118	3.746	0.198066	-1.635974	-55.723134

19	28.351	28.122	3.810	0.070568	-1.781094	-55.247312
20	27.342	28.126	3.907	-0.166825	-1.513956	-55.710018
21	26.334	28.129	3.789	0.101897	-1.635135	-56.110458
22	25.326	28.133	3.804	-0.049304	-1.225558	-56.041179
23	24.317	28.137	3.837	0.182493	-1.151092	-54.736352
24	23.309	28.140	3.754	-0.388249	-0.953039	-54.125360
25	22.300	28.144	3.764	-0.305355	-0.953739	-53.666301
26	21.292	28.148	3.799	-0.381113	-1.746679	-52.946934
27	20.283	28.151	3.885	-0.340426	-1.885148	-52.039837
28	19.275	28.155	3.741	-0.581388	-1.848427	-52.162505

