

Primjena fotogrametrije u građevinarstvu

Gojak, Lovro

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:433540>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-15**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET



DIPLOMSKI RAD

PRIMJENA FOTOGRAMETRIJE U GRAĐEVINARSTVU

LOVRO GOJAK

Zagreb, srpanj 2023

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET



DIPLOMSKI RAD

PRIMJENA FOTOGRAMetriJE U GRAĐEVINARSTVU

LOVRO GOJAK

Autor: Lovro Gojak

Mentor: doc. dr. sc. Zvonko Sigmund

Zagreb, srpanj 2023



TEMA DIPLOMSKOG RADA

Ime i prezime studenta: **Lovro Gojak**

JMBAG: **0036483069**

Diplomski rad iz predmeta: **Tehnologija građenja 2**

Naslov teme
diplomskog rada:

| | |
|-----|---|
| HR | Primjena fotogrametrije u građevinarstvu |
| ENG | Use of photogrammetry in the construction industry |

Opis teme diplomskog rada:

Sadržaj:

1. Uvod
2. Fotogrametrija i njeni temeljni koncepti
3. Primjena fotogrametrije u građevinarstvu
4. Istraživanje primjene na primjerima
5. Rezultati istraživanja
6. Zaključak

Datum: **05.04.2023.**

Komentor:

(Ime i prezime komentora)

Mentor:

doc. dr. sc. Zvonko Sigmund

(Ime i prezime mentora)

(Potpis mentora)

PRINT

Sadržaj

| | |
|---|----|
| Popis tablica | 3 |
| Popis slika | 3 |
| 1. Uvod | 4 |
| 2. Fotogrametrija i njeni temeljni koncepti..... | 5 |
| 2.1. Uvod u fotogrametriju | 5 |
| 2.2. Trikutacija | 5 |
| 2.3. Stereoskopija | 6 |
| 2.4. Paralaksa | 6 |
| 3. Primjena fotogrametrije u građevinarstvu | 7 |
| 4. Metodologija istraživanja | 10 |
| 4.1. Prikupljanje podataka | 10 |
| 4.1.1. Postupak prikupljanja podataka..... | 11 |
| 4.2. Obrada podataka | 16 |
| 4.2.2. Optimizacija ulaznih podataka | 18 |
| 4.2.3. Ručno poravnavanje..... | 21 |
| 4.2.4. Zajedničke točke | 22 |
| 4.2.5. Oblak točaka | 23 |
| 4.2.6. Spajanje modela..... | 25 |
| 5. Rezultati istraživanja | 26 |
| 6. Diskusija i preporuke | 37 |
| 7. Zaključak | 39 |
| 8. Popis literature..... | 41 |

SAŽETAK

Fotogrametrija je znanost o mjerenju i izradi modela i površina koristeći fotografije i optičke snimke. U ovom diplomskom radu istražuje se primjena fotogrametrije u građevinarstvu, s fokusom na analizu rezultata dobivenih terenskim istraživanjima dronom i kamerom s punim kutom gledanja. Rad obuhvaća opis općih koncepta i tehnika fotogrametrije, postupke snimanja i obrade podataka, primjenu u građevinarstvu te analizu prednosti i nedostataka. Detaljno se opisuju teren i objekt koji su istraživani, uz objašnjenje korištenih instrumenata, postupaka snimanja i analize podataka. Rezultati istraživanja pokazuju razinu preciznosti fotogrametrije u stvaranju trodimenzionalnih prikaza građevina, s mogućnošću daljnjeg unaprjeđivanja.

Ključne riječi: Fotogrametrija, Terensko istraživanje, Dron, Kamera s punim kutom gledanja

ABSTRACT

Photogrammetry is the science of measuring and making models and surfaces using photographs and optical recordings. This thesis examines the application of photogrammetry in construction, with a focus on the analysis of the results obtained from field surveys with a drone and a full-angle camera. This paper includes a description of the general concepts and techniques of photogrammetry, data recording and processing procedures, application in construction and analysis of advantages and disadvantages. The terrain and objects that were part of the research are described in detail, with an explanation of the instruments used, the recording procedures and data analysis. The research results show the level of precision of photogrammetry in creating three-dimensional representations of buildings, with the possibility of further improvement.

Key words: Photogrammetry, Field research, Drone, Full-view camera

Popis tablica

| | |
|--|---|
| Tablica 1 Primjene fotogrametrije (Mihic i dr., 2023)..... | 8 |
|--|---|

Popis slika

| | |
|---|----|
| Slika 1 Objekt na Borongaju..... | 12 |
| Slika 2 Uzorak preleta | 13 |
| Slika 3 Sjeverna strana objekta..... | 14 |
| Slika 4 Južna strana objekta..... | 15 |
| Slika 5 Put prolaska prilikom snimanja objekta..... | 16 |
| Slika 6 Uspješno poravnat skup fotografija..... | 18 |
| Slika 7 Kvaliteta prikupljenih fotografija | 20 |
| Slika 8 Ručno postavljeni markeri | 22 |
| Slika 9 Prikaz zajedničkih točaka | 23 |
| Slika 10 Spojeni model | 25 |
| Slika 11 Loša kvaliteta istočnog pročelja | 27 |
| Slika 12 Loša kvaliteta južnog pročelja..... | 28 |
| Slika 13 Dobra kvaliteta sjevernog pročelja..... | 28 |
| Slika 14 Pouzdanost modela na sjevernoj strani..... | 29 |
| Slika 15 Pouzdanost modela na južnoj strani..... | 29 |
| Slika 16 Tlocrt dobiven fotogrametrijom | 30 |
| Slika 17 Tlocrt dobiven LIDAR-om..... | 30 |
| Slika 18 Prvi detalj dobiven LIDAR-om..... | 31 |
| Slika 19 Prvi detalj dobiven fotogrametrijom | 31 |
| Slika 20 Drugi detalj dobiven LIDAR-om..... | 32 |
| Slika 21 Drugi detalj dobiven fotogrametrijom..... | 33 |
| Slika 22 Model dobiven inicijalnim preletom..... | 34 |
| Slika 23 Model u pogledu odozgo | 34 |
| Slika 24 Detalj modela | 35 |
| Slika 25 Model dobiven dodatnom snimkom..... | 35 |

1. Uvod

Fotogrametrija je znanost o mjerenju i izradi modela i površina, koristeći fotografije i druge optičke snimke. Njezina primjena u građevinarstvu omogućuje detaljnu analizu zgrada i infrastrukturnih objekata, planiranje i projektiranje novih građevina, te održavanje i obnovu postojećih objekata. U ovom diplomskom radu fokus će biti na primjeni fotogrametrije u građevinarstvu, s naglaskom na analizu rezultata dobivenih terenskim istraživanjima provedenih dronom i kamerom s punim kutom gledanja.

U dijelu rada predstaviti će se općeniti koncepti i tehnike fotogrametrije, te opisati osnovne postupke snimanja i obrađivanja podataka. Nadalje, istražiti će se primjena fotogrametrije u građevinarstvu, uključujući primjenu u planiranju, projektiranju, održavanju i obnovi građevina. Analizirati će se prednosti i nedostatke korištenja fotogrametrije u građevinarstvu te usporediti različite metode i tehnologije.

U drugom dijelu rada detaljno će biti opisan teren i objekt koji je istraživan dronom i kamerom s punim kutom gledanja. Bit će objašnjeni instrumenti korišteni za snimanje, te opisan postupak snimanja i pripreme podataka za daljnju obradu, objasniti će se kako se obrađuju podaci dobiveni dronom i kamerom s punim kutom snimanja, postupci izrade trodimenzionalnog prikaza građevine, te analizirati rezultate dobivene istraživanjem terena dronom i kamerom s punim kutom snimanja. Diskutirati će se o prednostima i nedostacima korištenja fotogrametrije u građevinarstvu, te iznijeti mogućnosti daljnjeg istraživanja u ovom području. Kao zaključak ovog rada naglasiti će se važnost primjene fotogrametrije u građevinarstvu, te sažeti glavne nalaze istraživanja.

2. Fotogrametrija i njeni temeljni koncepti

2.1. Uvod u fotogrametriju

Fotogrametrija je znanstvena disciplina koja se bavi mjerenjem udaljenosti na temelju dviju ili više slika (Congress i Puppala, 2019) uz pomoć koje je moguće dobiti visokokvalitetne i precizne trodimenzionalne modele građevina i terena, što omogućava detaljnu analizu i planiranje. Fotogrametrija se pokazala kao vrlo korisna u održavanju i obnovi građevina, omogućujući bržu i precizniju identifikaciju i rješavanje problema. Također, fotogrametrija nudi mogućnost izrade trodimenzionalnih prikaza i modela objekta koji kasnije mogu biti korišteni za praćenje raznih vrsta građevinskih radova (Bognot i dr., 2018). Međutim, kao i svaka tehnologija, fotogrametrija također ima svoje nedostatke i ograničenja.

2.2. Trikutacija

Trikutacija je postupak mjerenja udaljenosti između točaka na fotografiji pomoću trigonometrijskih izračuna. Ovaj postupak se koristi u fotogrametriji za stvaranje trodimenzionalne slike objekta. Trikutacija se temelji na činjenici da se kutovi i stranice trokuta mogu izračunati ako su poznate duljine dviju stranica i kut između njih. U fotogrametriji, trikutacija se koristi za određivanje udaljenosti između točaka na fotografiji, a zatim se te udaljenosti koriste za stvaranje trodimenzionalne slike objekta. Postupak trikutacije uključuje mjerenje kutova i duljina stranica trokuta na fotografiji, a zatim primjenu trigonometrijskih izračuna kako bi se odredila udaljenost između točaka. Trikutacija je važna tehnika u fotogrametriji jer omogućuje precizno mjerenje udaljenosti između točaka na fotografiji, što je ključno za stvaranje preciznih trodimenzionalnih slika objekata (Forstner i Wrobel, 2008).

2.3. Stereoskopija

Stereoskopija je tehnika koja se koristi u fotogrametriji za stvaranje trodimenzionalne slike objekta. Ova tehnika se temelji na činjenici da ljudski mozak može stvoriti trodimenzionalnu sliku objekta iz dvije slike koje su snimljene pod različitim kutovima. U stereoskopiji, dvije fotografije istog objekta snimljene su pod različitim kutovima i zatim se koriste za stvaranje trodimenzionalne slike objekta. Kada se gledaju ove dvije fotografije kroz stereoskopski uređaj, mozak ih kombinira u jednu sliku koja ima osjećaj dubine i prostornosti. Stereoskopija je važna tehnika u fotogrametriji jer omogućuje precizno mjerenje udaljenosti između točaka na fotografiji, što je ključno za stvaranje preciznih trodimenzionalnih slika objekata. Stereoskopija se također koristi u drugim područjima, kao što su film i video igre, kako bi se stvorio osjećaj dubine i prostornosti (Kraus, 2007).

2.4. Paralaksa

Paralaksa je pojava koja se javlja kada se promatra objekt iz različitih kutova. U fotogrametriji, paralaksa se odnosi na razliku u poziciji točaka na fotografiji kada se gledaju iz različitih kutova. Ova razlika u poziciji točaka može uzrokovati pogreške u mjerenju udaljenosti između točaka i stvaranju trodimenzionalne slike objekta. Kako bi se smanjila paralaksa, fotografije objekta moraju biti snimljene pod sličnim kutovima i udaljenostima kako bi se minimizirala razlika u poziciji točaka. Također, koriste se posebni alati za mjerenje paralakse kako bi se utvrdilo koliko su fotografije podudarne i koliko je paralaksa prisutna. Paralaksa je važna pojava u fotogrametriji jer može uzrokovati pogreške u mjerenju i stvaranju trodimenzionalne slike objekta, što može dovesti do netočnih rezultata i otežati daljnje analize (Forstner i Wrobel, 2008).

3. Primjena fotogrametrije u građevinarstvu

Potencijalne primjene fotogrametrije u građevinarstvu su vrlo široke i obuhvaćaju razne radove i analize podataka. Kod primjene fotogrametrije u građevinarstvu, jednako kao i za bilo koju drugu primjenu, koriste se fotografije za mjerenje objekata i stvaranje trodimenzionalnih modela (Omar, Mahdjoubi i Kheder, 2011). Međutim može biti potencijalno problematično koristiti fotogrametriju na područjima s ograničenim pristupom ili na velikim gradilištima. Kako bi se prevladale te poteškoće, fotogrametrija se može koristiti uz pomoć bespilotnih letjelica s ugrađenim kamerama (Ekinci, Mutari i Ferreira, 2021). Međutim pri tome u obzir treba uzeti i činjenicu da je gradilište vanjsko okruženje na kojem postoje razne varijacije osvjetljenja, zaklonjenih ploha i šumova koje uzrokuju smetnje (Kim, Son i Kim, 2011).

U ovom odlomku navode se mogućnosti korištenja 3D skeniranja za kontrolu kvalitete građevinskih radova. Kontrolu kvalitete općenito se može podijeliti na dimenzionalnu kontrolu kvalitete, kontrolu kvalitete površine i kontrolu premještaja. Dimenzijska kontrola provjerava odgovara li element odgovarajućim dimenzijama, a kontrola premještaja provjerava je li element na pravom mjestu. Kontrola kvalitete površine provjerava postoje li deformacije ili pukotine na površini, je li površina dovoljno ravna ili je došlo do ljuštenja (Mihic i dr., 2023).

Međutim, treba uzeti u obzir određene limitacije ove metode. Kada je riječ o radovima koji uključuju promjene na objektima, fotogrametrija može biti vrlo korisna za precizno praćenje promjena u površini objekta. Na primjer, kod radova poput izgradnje i rekonstrukcije zgrada ili mostova, fotogrametrija može pružiti vrijedne informacije o deformacijama, pomacima i promjenama u geometriji objekta. Ove informacije mogu biti korisne za procjenu sigurnosti objekata, praćenje napredovanja radova i provjeru usklađenosti s projektom. Ipak, u području građevinarstva i praćenja gradilišta i dalje postoje mnogi neriješeni problemi. Metode fotogrametrije koje se koriste za ove svrhe

suočavaju se s izazovima niskih strukturiranih površina ili prozora, te ta ograničenja predstavljaju izazov u primjeni fotogrametrije u građevinarstvu (Braun i Borrmann, 2019).

Međutim, također treba napomenuti da je radove poput postavljanja pločica, parketa, žbukanja i bojanja zidova i stropova teško ili gotovo nemoguće pratiti pomoću fotogrametrije, budući da su promjene u volumenu ovih radova obično vrlo male, nekoliko milimetara ili centimetara. Fotogrametrija se više koristi za praćenje promjena u velikim konstrukcijskim elementima. Osim toga, postoje i radovi koji su nevidljivi ili se obavljaju u skućenim prostorima, poput provlačenja instalacija ili injektiranja. U takvim slučajevima, fotogrametrija ne može pružiti dovoljno jasne slike ili perspektive za precizno mjerenje ili praćenje. Ostale primjene fotogrametrije u građevinskim radovima dane su u Tablici 1.

Tablica 1 Primjene fotogrametrije (Mihic i dr., 2023).

| Vrsta građevinskih radova | Fotogrametrija | UAV fotogrametrija |
|-------------------------------------|----------------|--------------------|
| Zemljani radovi | | |
| Iskopi | Da | Da |
| Zatrpavanje | Da | Da |
| Nasipi | Da | Da |
| Podzemni geotehnički radovi | | |
| Temelji pilota | Ne | Ne |
| Tuneliranje | Da | Ne |
| Oplata | | |
| Skele | Da * | Da * |
| Oplata zidova i stupova | Da * | Da * |
| Oplata ploča i greda | Da * | Ne |
| Armirački radovi | | |
| Zidna i stupna armatura | Da * | da * |
| Armatura ploča i greda | Da * | da * |
| Betoniranje | | |
| Betoniranje zidova i stupova | Ne | Ne |
| Izlijevanje betonskih ploča i greda | Da | Da |
| Zidarski radovi | | |
| Zidanje opeke | Da | Da ** |
| Grubo žbukanje | Da *** | Ne |
| Montažni radovi | | |

| | | |
|--|--------|--------|
| Čelični elementi | Da | Da ** |
| Drveni elementi | Da | Da ** |
| Montaža gotovih elemenata | | |
| Čelični elementi | Da | Da ** |
| Drveni elementi | Da | Da ** |
| Armiranobetonski elementi | Da | Da ** |
| Fasada | | |
| Moderni fasadni sustavi | Da | Da |
| Tradicionalni fasadni sustavi | Da *** | Da *** |
| Izolacija | | |
| Toplinska izolacija | Da *** | Da *** |
| Hidroizolacija | Ne | Ne |
| Unutarnji završni radovi | | |
| Polaganje pločica | Ne | Ne |
| Podovi | Ne | Ne |
| Žbukanje | Ne | Ne |
| Slika | Ne | Ne |
| Stropovi od suhozida | Da | Ne |
| Pregradni zidovi od suhozida | Da | Ne |
| Sanitarni čvorovi | Da | Ne |
| Prozori | Da | Da |
| Vrata | Da | Da ** |
| Instalacije | | |
| Strojarske instalacije | Da *** | Ne |
| Električne instalacije | Da *** | Ne |
| Vodovodne instalacije | Da *** | Ne |
| Uređenje okoliša | | |
| Asfaltiranje | Da | Da |
| Hortikultura | Da | Da |
| Izgradnja cesta i komunalnih objekata | | |
| Nosivi sloj ceste | Da | Da |
| Asfaltiranje cesta | Da *** | Da *** |
| Polaganje cijevi i kabela | Da *** | Da *** |

* Sposoban identificirati postojanje, ali još nije dovoljno točan da bi mogao identificirati svaki pojedinačni element s dovoljnim stupnjem točnosti;

** Da, ali samo ako je vidljivo s vanjske strane strukture;

*** Ovisno o debljini sloja/promjeru elementa.

Sve vrste građevinskih radova čiji se napredak može pratiti putem 3D skeniranja mogu se također testirati na dimenzijsku kontrolu kvalitete i kontrolu premještaja korištenjem iste

tehnologije bazirane na vizualnom opažanju. To je prirodno zbog činjenice da se provjeravaju iste karakteristike promatranog elementa s istim zahtjevima za preciznost. Na primjer, ako želimo uspješno pratiti napredak u izgradnji zida od opeke, moramo znati relativno precizne dimenzije tog zida. Te iste dimenzije mogu se provjeriti u usporedbi s postojećim BIM modelom da bismo vidjeli da dimenzije odgovaraju. Osim toga, ako imamo zid kao dio skeniranja gradilišta, i ako je skeniranje registrirano i preklopljeno s BIM modelom, možemo provjeriti je li položaj zida ispravan ili nije, odnosno koliko je zid pomaknut. Kontrola kvalitete površine, s druge strane, može biti najkorisnija za betonske elemente i zidove od opeke. Također se može koristiti za procjenu oštećenja nakon prirodnih katastrofa poput potresa (Mihić i dr., 2023).

4. Metodologija istraživanja

4.1. Prikupljanje podataka

Cilj ovog istraživanja bio je prikupiti potrebne podatke pomoću različitih fotogrametrijskih metoda i postupaka kako bi se tako dobiveni podaci kasnije mogli obraditi i vidjeti koliko je široka potencijalna primjena same tehnologije i kolika je preciznost tako dobivenih podataka. Te metode u ovom slučaju uključuju snimanje interijera i eksterijera objekta pomoću klasične kamere ugrađene na dronu i pomoću kamere s punim kutom gledanja. Preciznost se potom uspoređuje s rezultatima dobivenima LIDAR-om. Točnije, cilj je usporediti preciznost podataka dobivenih ovom metodom u određenim presjecima sa stvarnim stanjem podataka na terenu. Želi se usporediti potencijalne devijacije na određenim elementima građevine tako da devijacije ne prelaze određene vrijednosti u granicama u kojima bi se tehnologija mogla smatrati primjenjivom za komercijalne potrebe. Po pitanju opreme u istraživanju koristila se bespilotna letjelica opremljena video kamerom (popularno poznata kao dron) i akcijskom videokamerom s kutom snimanja od 360 stupnjeva (poznatijom kao 360 kamera). Predmet istraživanja bila su dva različita

objekta koja su se analizirala na dva fundamentalno različita načina. Analizi objekta na Borongaju pristupilo se s ciljem da se analiziraju mogućnosti dobivanja preciznog modela nekog objekta pomoću fotogrametrije koristeći bespilotnu letjelicu s kamerom, to jest dron. Opseg ovog istraživanja bio je napraviti 3D prikaz objekta gledan s vanjske strane kako bi se pokazala potencijala primjena fotogrametrije pri modeliranju većih objekata. Htjelo se vidjeti do koje razine detaljnosti moderne kamere na dronovima mogu prikazati neki objekt.

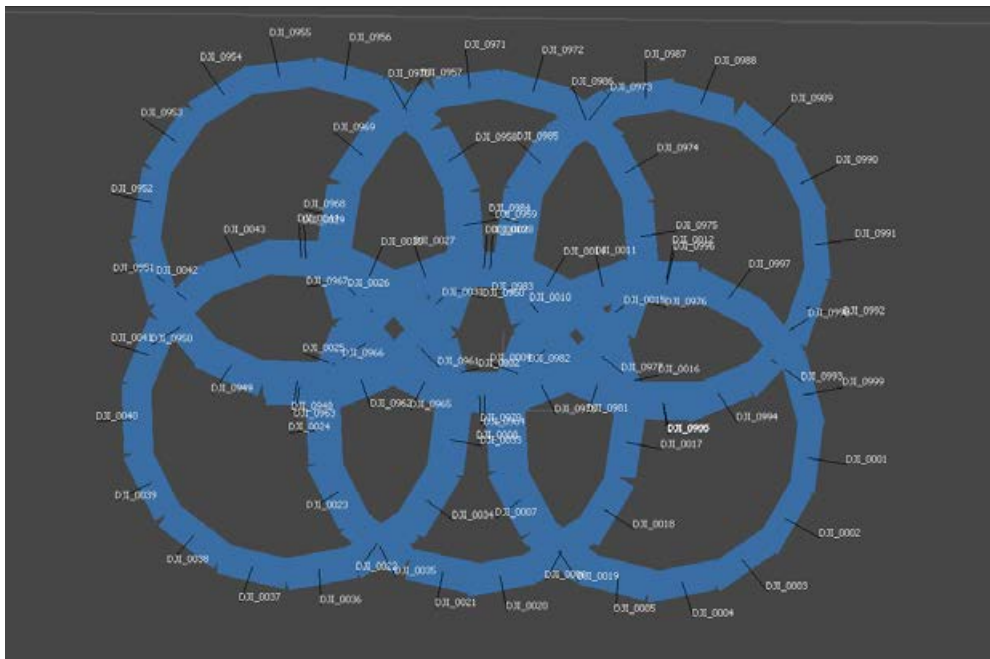
4.1.1. Postupak prikupljanja podataka

Prvi korak prije samog početka snimanja objekta bio je odabir i analiza lokacije za snimanje. Ovo je bio bitan korak pošto se željelo naći napušteni objekt na lokaciji gdje nema velikog prometa niti velikog broja ljudi, pošto bi ti faktori mogli otežati prikupljanje podataka koje je u ovom slučaju bilo akademske naravi. Međutim, bitno je za napomenuti kako ovi faktori, iako mogu otežati snimanje, to nikako ne znači da primjena ove tehnologije nije moguća i na naseljenijim lokacijama. Po dolasku na lokaciju snimanja prije samog polijetanja s dronom obavljen je inicijalni pregled objekta i njegove okoline kako bi se utvrdili uvjeti na terenu koji su nam ključni pri određivanju točnog načina snimanja objekta. Točnije, u ovom slučaju, uz južnu stranu objekta nalazilo se stablo u neposrednoj blizini objekta koje utječe na uzorak preleta drona pošto je više od samoga objekta, tako da njegova visina treba biti uzeta kao limitirajući faktor prilikom planiranja puta leta drona preko objekta kojeg snimamo. Na zapadnoj strani objekta na udaljenosti od otprilike 5 metara i visine malo veće od samog objekta nalazio se također red stabala. S obzirom na te okolnosti ustanovili smo kako s južne i zapadne strane nije moguće snimiti objekt s fiksnim planom letenja, već je potrebno obaviti let dronom samostalno upravljajući dronom.



Slika 1 Objekt na Borongaju

Prvi korak pri samom snimanju bio je odabrati sigurnu lokaciju za uzlet s dronom, te potom odabrati jedan od ponuđenih uzoraka snimanja i leta drona. Nakon što smo odabrali lokaciju s koje dron može sigurno poletjeti, odabrali smo unaprijed postavljen uzorak plana leta koji se u ovom slučaju sastojao od leta u nekoliko kružnica, gdje se dron na unaprijed određenim lokacijama zaustavlja kako bi obavio fotografiranje. Gustoću kružnica i učestalost fotografiranja moguće je dodatno povećati prema potrebi kako bi se potencijalno dobio detaljniji model objekta, međutim bitno je napomenuti kako je vrijeme leta ograničeno, pa je prema tome preporučljivo odabrati program s kojim možemo pokriti cijeli objekt unutar jednog preleta. Nakon izvršenog plana leta dron se vratio na istu lokaciju s koje je uzletio te je bio pri kraju baterije, tako da možemo smatrati kako je odabrana optimalna gustoća snimanja.



Slika 2 Uzorak preleta

Kao što je vidljivo na slici uzorka preleta, dron je letio i izvan gabarita objekta tako da je u svojim fotografijama obuhvatio i vanjske zidove objekta. Međutim, već tada se moglo znati da detalji na tim slikama neće biti kvalitete kolike su slike krova, pošto je krov snimljen iz puno više uglova. S obzirom na to pristupilo se dodatnom snimanju objekta iz razine samog objekta za vrijeme kojega se vršilo ručno upravljanje dronom. Svrha ovog postupka bila je prikupiti dodatni set podataka kako bi se dobila veća preciznost snimanja na tom dijelu objekta jer se smatralo kako se standardnim preletom nije prikupila dovoljna količina podataka za to područje. U ova dva različita seta podataka bitno je da imamo zajedničke dijelove objekta u oba seta podataka kako bi u kasnijoj obradi podataka mogli povezati ta dva seta snimaka s nekom zajedničkom referentnom točkom, to jest skupom točaka. Po završetku snimanja obavila se inicijalna provjera dobivenih podataka kako bi se na licu mjesta ustanovilo hoće li prikupljeni podaci biti dostatni za detaljniju analizu.

Drugi objekt na kojem se vršila analiza nalazio se u Sisku. Tu je bila riječ o objektu koji je bio teško oštećen u potresu. Cilj ovog dijela istraživanja bilo je pokušati pokazati da se fotogrametrija može koristiti i u svrhe analize unutrašnjosti takvih objekata kako bi se stvorio 3D prikaz interijera i eksterijera. Kao konačni cilj htjelo se pokazati da se s određenom dozom sigurnosti može iz podataka dobivenih fotogrametrijom dobiti uvid u stvarno stanje objekta na terenu, te dobiti dosljedan tlocrt objekta uključujući i raspored unutrašnjih prostorija. Također, i u ovom dijelu istraživanja cilj je dobiti što detaljniji 3D prikaz, međutim i prije samog početka istraživanja na ovoj lokaciji bilo je očito kako će postojati određene limitacije. Do tih zaključaka se došlo na osnovu naučenih lekcija tokom prethodnog istraživanja. Ti limitirajući faktori ponajprije se odnose na smanjenu količinu svjetlosti unutar ovog objekta i činjenicu da se ovo istraživanje vrši pomoću akcijske kamere s punim kutom gledanja, točnije riječ je o kameri koja istovremeno snima u radijusu od 360 stupnjeva.



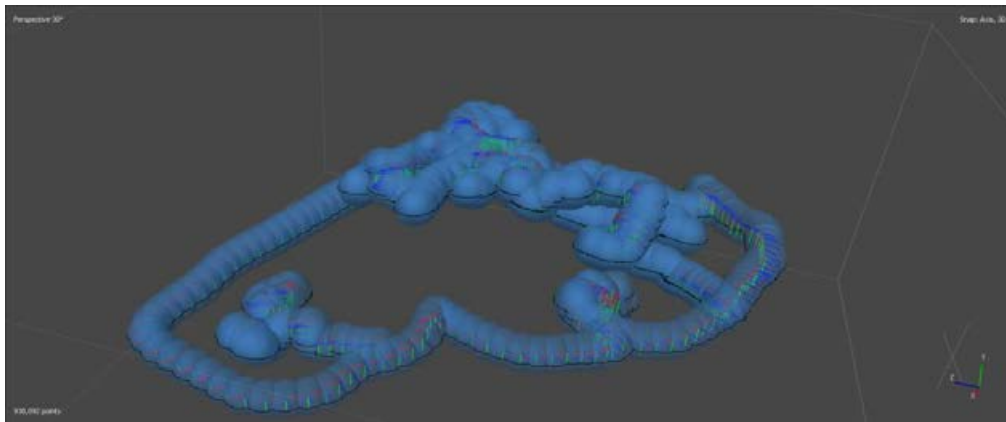
Slika 3 Sjeverna strana objekta



Slika 4 Južna strana objekta

Takvu kameru u ovom slučaju potrebno je kroz objekt nositi samostalno, te je s njom potrebno proći svaku prostoriju u objektu kako bi se omogućilo snimanje svih prostorija iz barem jednog kuta. Za razliku od snimanja objekta dronom za snimanje je korišten video format jer on u ovom slučaju omogućava najbolje rezultate (snimanje interijera objekta statičnom fotografijom oduzelo bi veliku količinu vremena). S obzirom na tu činjenicu u kasnijoj analizi podataka dobiveni video format bit će potrebno pretvoriti u skup statičnih fotografija. Limitirajući faktor u ovom slučaju je također i činjenica da naspram leta dronom ljudski hod unosi nepotrebne i neželjene kretnje u video zapis. Rezultat toga je da će snimka biti lošije kvalitete nego što bi bio slučaj da je snimka napravljena dronom, međutim snimanje dronom u tako malim prostorima jednostavno nije moguće. Prvi korak u ovom dijelu istraživanja bio je obići objekt i ustanoviti u kakvom je stanju objekt i kakva je okolina objekta. Nakon izvršenog pregleda napravio se plan snimanja objekta za koji je odlučeno da je najbolji pristup taj da se najprije snimi objekt izvana sa svih strana, tako da se s kamerom obiđe objekt s vanjske strane. Ta snimka služiti će kao referentna točka za sve daljnje snimke u kojima će se ulaziti u objekt kao polazište za preklapanje snimki. Unutrašnjost objekta snimana je tako da se sa snimanjem počinje izvan samog objekta, te

potom ulazi u objekt i snima prostorije tako da se ulazi u svaku pojedinačnu prostoriju na način da snimka pokrije cijelu prostoriju (ukoliko su veće prostorije u pitanju). Kako bi olakšali kasniju obradu podataka, a samim time i poboljšali kvalitetu konačnog modela ovaj postupak treba podijeliti u nekoliko dijelova na način da se u jednoj snimci pokrije nekoliko prostorija, a ne cijeli objekt odjednom jer to može u proces unijeti veliku količinu pogreške. Prema tome svako novo snimanje koje se započinje također bi trebalo započeti izvan samoga objekta kako bi se omogućilo povezivanje snimaka i modela. Nakon što su snimke prikupljene u postupku obrade podataka trebalo je pretvoriti dobiveni video snimak u pojedinačne fotografije.



Slika 5 Put prolaska prilikom snimanja objekta

4.2. Obrada podataka

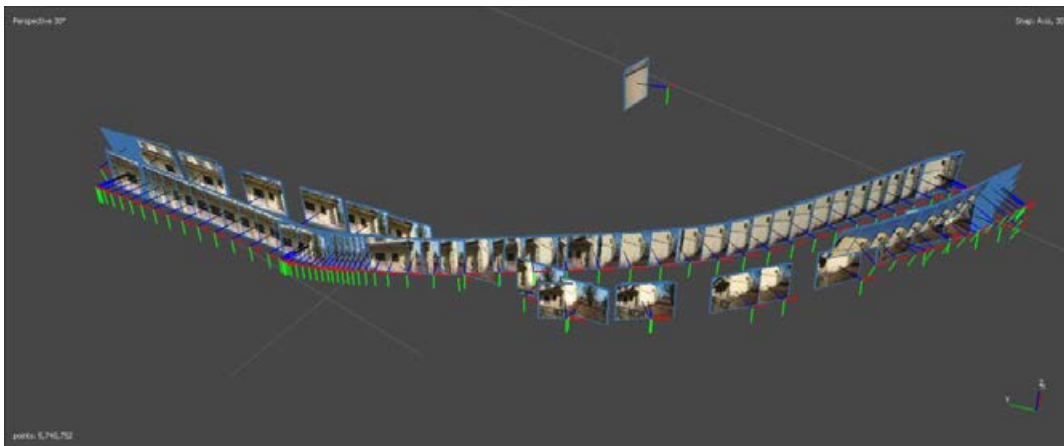
Pri obradi dobivenih podataka korišten je program Agisoft Metashape, koji je služio za obradu prikupljenih videozapisa i slika. Program je omogućio pretvorbu videozapisa u pojedinačne slike kako bi se olakšala njihova daljnja obrada. U sučelju programa Agisoft Metashape, korisnik ima mogućnost odabrati broj slika koje će se uzeti iz svakog kadra videa za daljnju obradu. Obrada velike količine slika može značajno usporiti postupak i

dovesti do nepotrebnog gubitka vremena. Također, veliki broj slika može dovesti do povećanja potrebnog prostora za pohranu podataka, što može predstavljati izazov, posebno pri radu s velikim projektima. Osim toga, treba uzeti u obzir i kvalitetu slika. Ubrzanje snimanja videa može rezultirati pojedinačnim slikama niže kvalitete, s manje detalja ili izobličenjima. Ograničavanje broja slika iz videa omogućuje odabir najboljih i najreprezentativnijih slika za daljnju obradu, čime se osigurava kvalitetniji rezultat. Uzimajući u obzir navedene čimbenike, pažljivo odabran broj slika za obradu u programu Agisoft Metashape omogućuje optimalno iskorištavanje računalnih resursa, smanjuje vrijeme obrade i osigurava kvalitetne rezultate.

4.2.1. Poravnanje kamera

Postupak obrade dobivenih slika putem programa Agisoft Metashape sastojao se od nekoliko koraka kako bi se postigao kvalitetan rezultat. Prvi korak bio je uvođenje slika u aktivni projekt. Nakon odabira skupa fotografija za obradu, važno je pravilno poravnati slike koristeći naredbu "Poravnaj kamere". Ovaj korak je ključan jer osigurava ispravan redoslijed slika za daljnju analizu. Program Agisoft Metashape koristi osnovna načela fotogrametrije za obradu fotografija i generira zajedničke točke kao rezultat obrade. To su točke koje program označava kao lako prepoznatljive točke na svakoj fotografiji i koristi ih za usporedbu s drugim fotografijama. Idealno je da postoji što više tih točaka raspoređenih ravnomjerno na svakoj slici. Međutim, kvaliteta tih točaka ovisi o čistoći slike (vidljivost objekata) i prostoru na slici. Primijećeno je da program ne može pravilno odabrati točke na velikim jednoličnim površinama poput čistih bijelih zidova ili prozora. Program najbolje prepoznaje lako prepoznatljive dijelove na fotografijama s kojih može lako odrediti njihovu točnu poziciju iz različitih kutova. S obzirom na to, bilo bi korisno

postaviti oznake ili markere na objektu koji se snima kako bi se olakšala obrada slika i poboljšala kvaliteta konačnog rezultata. Postavljanje markera na mjestima s velikim jednoličnim površinama poput stropova ili velikih dijelova zidova bez prozora posebno je preporučljivo. To će osigurati da u daljnjim koracima dobijemo potrebnu gustoću zajedničkih točaka za te dijelove objekta. Važno je napomenuti da će kvaliteta krajnjeg rezultata obrade slika ovisiti o kvaliteti samih slika, vidljivosti objekata na slikama te pravilnom postavljanju markera. Na temelju tih čimbenika, program Agisoft Metashape može generirati kvalitetan 3D prikaz objekta koji se snima.



Slika 6 Uspješno poravnat skup fotografija

4.2.2. Optimizacija ulaznih podataka

Nakon uvoza slika u program Agisoft Metashape, preporučljivo je izvršiti procjenu kvalitete slika koristeći dostupne naredbe u programu. Budući da prilikom ekstrakcije slika iz videa ne možemo unaprijed znati kakve će kvalitete biti pojedina slika, važno je provesti vlastitu procjenu i ukloniti slike koje ne zadovoljavaju postavljene kriterije. U slučaju da imamo dovoljan broj slika za obradu podataka, može se primijeniti agresivniji filter (na primjer,

ukloniti sve slike kvalitete manje od 80%), dok u situacijama kada nemamo dovoljno slika, filtracija će biti blaža. Ipak, izuzev u nekim specifičnim slučajevima, ne preporučuje se zadržavanje slika niže kvalitete od 60%. Postoje situacije u kojima je neizbježno prihvatiti slike s nižom kvalitetom, posebno prilikom snimanja interijera kada se krećemo iz prostorije u prostoriju te se suočavamo s naglim promjenama osvjetljenja koje uzrokuju pad kvalitete slike. Važno je prihvatiti takve snimke kako bi program uspješno izvršio međusobno poravnanje fotografija. U tim situacijama često je potrebno ručno odrediti zajedničke točke na nekoliko fotografija kako bi se osigurala točnost i kvaliteta rezultata. Taj postupak ručnog određivanja zajedničkih točaka bit će detaljnije opisan u nastavku rada. Osim procjene kvalitete slika i filtriranja neprikladnih snimaka, važno je uzeti u obzir i druge čimbenike koji mogu utjecati na kvalitetu i točnost rezultata. Na primjer, važno je voditi računa o postavljanju markera na objektu kako bi se olakšala obrada slika i poboljšala kvaliteta krajnjeg rezultata. Također, promjene osvjetljenja mogu predstavljati izazov u određivanju zajedničkih točaka, pa je potrebno posvetiti posebnu pažnju tim dijelovima i prilagoditi postupke obrade kako bi se postigla željena gustoća zajedničkih točaka. Obrada podataka prikupljenih putem fotogrametrije zahtijeva temeljitu analizu, pravilnu procjenu kvalitete slika, te primjenu odgovarajućih metoda i alata za postizanje najboljih rezultata.

| Label | Size | Aligned | Quality | Date & time | Make | Model | Focal length | F-stop | ISO | Shutter | 35mm focal |
|---------|-----------|---------|----------|-------------|------|-------|--------------|--------|-----|---------|------------|
| frame0 | 3840x2160 | ✓ | 0.919847 | | | | 31.9 | F/2.8 | 130 | 1/800 | 31 |
| frame1 | 3840x2160 | ✓ | 0.921863 | | | | 31.9 | F/2.8 | 130 | 1/800 | 31 |
| frame2 | 3840x2160 | ✓ | 0.918669 | | | | 31.9 | F/2.8 | 130 | 1/800 | 31 |
| frame3 | 3840x2160 | ✓ | 0.918392 | | | | 31.9 | F/2.8 | 130 | 1/800 | 31 |
| frame4 | 3840x2160 | ✓ | 0.920944 | | | | 31.9 | F/2.8 | 130 | 1/800 | 31 |
| frame5 | 3840x2160 | ✓ | 0.913694 | | | | 31.9 | F/2.8 | 130 | 1/800 | 31 |
| frame6 | 3840x2160 | ✓ | 0.908408 | | | | 31.9 | F/2.8 | 130 | 1/800 | 31 |
| frame7 | 3840x2160 | ✓ | 0.915025 | | | | 31.9 | F/2.8 | 130 | 1/800 | 31 |
| frame8 | 3840x2160 | ✓ | 0.909254 | | | | 31.9 | F/2.8 | 130 | 1/800 | 31 |
| frame9 | 3840x2160 | ✓ | 0.904778 | | | | 31.9 | F/2.8 | 120 | 1/800 | 31 |
| frame10 | 3840x2160 | ✓ | 0.914973 | | | | 31.9 | F/2.8 | 120 | 1/800 | 31 |
| frame11 | 3840x2160 | ✓ | 0.9214 | | | | 31.9 | F/2.8 | 120 | 1/1000 | 31 |
| frame12 | 3840x2160 | ✓ | 1.00362 | | | | 31.9 | F/2.8 | 120 | 1/1000 | 31 |
| frame13 | 3840x2160 | ✓ | 1.00678 | | | | 31.9 | F/2.8 | 120 | 1/1000 | 31 |
| frame14 | 3840x2160 | ✓ | 0.906587 | | | | 31.9 | F/2.8 | 120 | 1/1000 | 31 |
| frame15 | 3840x2160 | ✓ | 0.911805 | | | | 31.9 | F/2.8 | 120 | 1/1000 | 31 |
| frame16 | 3840x2160 | ✓ | 0.904806 | | | | 31.9 | F/2.8 | 120 | 1/1000 | 31 |
| frame17 | 3840x2160 | ✓ | 0.908053 | | | | 31.9 | F/2.8 | 120 | 1/800 | 31 |
| frame18 | 3840x2160 | ✓ | 0.911553 | | | | 31.9 | F/2.8 | 120 | 1/800 | 31 |
| frame19 | 3840x2160 | ✓ | 0.920508 | | | | 31.9 | F/2.8 | 120 | 1/800 | 31 |
| frame20 | 3840x2160 | ✓ | 0.909887 | | | | 31.9 | F/2.8 | 130 | 1/1000 | 31 |
| frame21 | 3840x2160 | ✓ | 0.899776 | | | | 31.9 | F/2.8 | 130 | 1/1000 | 31 |
| frame22 | 3840x2160 | ✓ | 0.901732 | | | | 31.9 | F/2.8 | 130 | 1/1000 | 31 |
| frame23 | 3840x2160 | ✓ | 0.902946 | | | | 31.9 | F/2.8 | 130 | 1/1000 | 31 |
| frame24 | 3840x2160 | ✓ | 0.898013 | | | | 31.9 | F/2.8 | 130 | 1/1000 | 31 |
| frame25 | 3840x2160 | ✓ | 0.899189 | | | | 31.9 | F/2.8 | 130 | 1/1000 | 31 |
| frame26 | 3840x2160 | ✓ | 0.918514 | | | | 31.9 | F/2.8 | 130 | 1/1000 | 31 |
| frame27 | 3840x2160 | ✓ | 0.969371 | | | | 31.9 | F/2.8 | 120 | 1/1000 | 31 |
| frame28 | 3840x2160 | ✓ | 0.973408 | | | | 31.9 | F/2.8 | 120 | 1/1000 | 31 |
| frame29 | 3840x2160 | ✓ | 0.974208 | | | | 31.9 | F/2.8 | 120 | 1/1000 | 31 |
| frame30 | 3840x2160 | ✓ | 0.909224 | | | | 31.9 | F/2.8 | 120 | 1/1000 | 31 |

Slika 7 Kvaliteta prikupljenih fotografija

U slučaju da poravnanje fotografija nije uspješno i program javi da nije uspio poravnati neke od fotografija, potrebno je provjeriti uzrok tog problema. Prilikom snimanja eksterijera pomoću dronova, takve greške trebale bi biti manje učestale u usporedbi sa snimanjem interijera korištenjem akcijskih kamera. Kada je riječ o snimanju dronom, često se događa da pojedina fotografija nije zadovoljavajuće kvalitete ili da je određeni dio građevine intenzivno osvijetljen, što rezultira prividnim gubitkom detalja na slici uslijed prevelike saturacije. Ovi problemi mogu utjecati na uspješnost poravnanja fotografija. Međutim, uz pravilan odabir parametara snimanja i kvalitetne kamere, takvi slučajevi mogu biti minimizirani.

Kod snimanja interijera često se javlja problem u poravnanju niza fotografija, posebno u većim serijama. Ovaj problem najčešće nastaje prilikom prolaska iz jedne prostorije u drugu, jer u takvim situacijama automatsko određivanje zajedničkih točaka nije uspješno. Većina zajedničkih točaka trebala bi se nalaziti na vratima i dovratnicima, ali ovi elementi nisu uvijek optimalni za precizno određivanje pojedinačnih točaka. Stoga, za takve dijelove

često je potrebno ručno odrediti zajedničke točke kako bi se osigurala točnost poravnanja. U procesu analize rezultata, važno je prepoznati i riješiti probleme u poravnanju fotografija kako bi se osigurala kvaliteta i preciznost dobivenih rezultata. Dodatno, provođenje dodatnih provjera i optimizacija parametara snimanja mogu biti korisne za smanjenje broja neuspješnih poravnanja. U nastavku rada bit će detaljnije opisane metode za identifikaciju i rješavanje ovih problema, kao i primjena alternativnih pristupa u situacijama kada automatsko poravnanje nije dovoljno adekvatno.

4.2.3. Ručno poravnanje

Kada se suočimo sa situacijom neuspješnog poravnanja slika, neophodno je provesti ručno određivanje zajedničkih točaka na mjestima gdje poravnanje nije uspjelo. Ovaj korak omogućuje preciznije poravnanje slika i poboljšava kvalitetu krajnjih rezultata. Za ručno određivanje zajedničkih točaka, pristupit će se tako da se odaberu otprilike zadnje dvije slike koje nisu uspješno spojene i prve dvije slike koje jesu uspješno spojene. Na tim slikama odabrat će se nekoliko točaka koje su vidljive na svim tim fotografijama i za koje se može lako vizualno odrediti točnu poziciju. Preporučljivo je odabrati barem četiri do pet takvih točaka, pri čemu svaka točka treba pokrivati jednu os koordinatnog sustava. Na taj način pruža se programu referenca za visinu, širinu i dubinu prostora, što poboljšava preciznost poravnanja. Nakon što su odabrane točke postavljene, programu je potrebno ponovno dati naredbu za poravnanje fotografija, ovaj put odabirući opciju poravnanja po markerima i dopuštajući automatsko skaliranje u postavkama. Ovim postupkom omogućava se programu da koristi ručno odabrane točke kao referencu za poravnanje i skaliranje slika.



Slika 8 Ručno postavljene markeri

Ručno određivanje zajedničkih točaka i njihovo korištenje u procesu poravnanja predstavlja važan korak u postizanju preciznih rezultata. Ovaj pristup omogućuje programu da koristi dodatne informacije koje nisu dostupne samo na temelju automatskog poravnanja, što rezultira boljom kvalitetom snimaka i pouzdanijim rezultatima analize.

4.2.4. Zajedničke točke

Sljedeći korak u generiranju 3D prikaza je opcionalan, ali u sklopu ovog istraživanja došlo se do zaključka da njegova primjena donosi bolju kvalitetu konačnog 3D prikaza, iako značajno utječe na vrijeme izvršenja obrade podataka. Nakon uspješnog poravnanja svih fotografija, može se odabrati opciju "Izradi zajedničke točke" koja na temelju prethodno generiranih zajedničkih točaka provodi detaljniju generaciju istih. Ovim korakom dobije se gušći oblak točaka koji će se koristiti u daljnjoj obradi, povećavajući tako količinu korisnih

informacija koje program ima na raspolaganju pri procesu generiranja oblaka točaka. Ovaj korak ima ključnu ulogu u stvaranju detaljnijeg i preciznijeg 3D prikaza, omogućujući bolje razlučivanje oblika, tekstura i dubinskih informacija. Važno je napomenuti da primjena ovog koraka može značajno produžiti vrijeme obrade podataka, posebno ako smo odabrali postavke s visokom kvalitetom obrade. Upravo zbog toga je potrebno pravilno balansirati između kvalitete i brzine obrade, uzimajući u obzir specifične zahtjeve istraživanja i dostupne resurse. U nekim slučajevima, ako nam je brzina obrade prioritet, možemo odabrati postavke koje omogućuju bržu generaciju oblaka točaka, iako to može rezultirati manjom gustoćom i detaljima u 3D prikaza.



Slika 9 Prikaz zajedničkih točaka

4.2.5. Oblak točaka

Izgradnja oblak točaka predstavlja vremenski najzahtjevniji korak u izradi 3D prikaza, u kojem program provodi obradu prethodno prikupljenih definiranih podataka iz postupka poravnavanja fotografija i izrade zajedničkih točaka. U ovom koraku program detaljno

analizira svaku pojedinačnu sliku, uspoređuje je s prethodno definiranim zajedničkim točkama, te izračunava njihove trodimenzionalne položaje putem triangulacije. Nakon toga, vrši se optimizacija i filtracija točaka kako bi se uklonile pogreške i šumovi, te se dobije precizniji skup podataka. Bitno je napomenuti da korisnik može kasnije odlučiti provesti dodatnu filtraciju točaka prema vlastitim potrebama, ovisno o vrsti podataka koje želi prikazati i namjeni modela. Odabir kvalitete procesiranja u ovom koraku značajno utječe na vrijeme izvršavanja, pa tako za niže zahtjeve kvalitete obrade postupak može biti gotov za nekoliko minuta, dok za visoke stupnjeve preciznosti i detalja može biti potrebno nekoliko sati (vrijeme izvršenja također ovisi o snazi i dostupnosti računalnih resursa na kojima se provodi analiza). Kao rezultat ovog koraka, dobije se oblak točaka koji pruža temeljni skup podataka o izgledu objekta kojeg smo snimali. Na temelju tog oblaka točaka, mogu se provesti različite daljnje analize i izračuni, ovisno o svrsi za koju želimo koristiti dobiveni model. Primjerice, analizom visinskih razlika mogu se odmah dobiti informacije o nagibima terena ili promjenama u visini objekta. Također, ukoliko se posjeduje sličan model iz nekog prethodnog vremenskog razdoblja, može se precizno uočiti razlike koje su se dogodile tijekom tog vremenskog perioda. U daljnjem istraživanju diplomskog rada, bit će provedena evaluacija rezultata ovog koraka i analizirat će se utjecaj različitih postavki kvalitete obrade na preciznost i detalje dobivenog oblaka točaka.

4.2.6. Spajanje modela

U slučaju kada je fotogrametrijskim postupkom stvoren model objekta od nekoliko snimaka potrebno je svaku snimku obrađivati kao zasebni skup podataka. Tome se pristupilo na način da se za svaku skupinu snimaka otvori novi odlomak i vrše sve prethodno opisane radnje za svaki odlomak. Odlomci su manji dijelovi od kojih je sastavljen radni prostor u ovom programskom okruženju. Kako bi se spojili tako dobiveni modeli koristi se naredba "Poravnaj odlomke" za međusobno poravnavanje istih i naredba "Spoji odlomke" za spajanje istih u zasebni model. Kako bi naredba "Poravnaj odlomke" mogla ispravno poravnati različite modele mora se osigurati da su ručno postavljeni markeri na lako prepoznatljivim lokacijama modela u svakom odlomku. Također, potrebno je da su markeri koji pokazuju na istu lokaciju u različitim odlomcima istoimenog naziva kako bi program mogao prepoznati da se u različitim modelima tu stvarno radi o istoj lokaciji.



Slika 10 Spojeni model

Kako je vidljivo na Slici 10. za slučaj kada je bilo potrebno objekt pokriti s većim brojem snimaka, te samim tim i većim brojem odlomaka, potrebno je koristiti i veliki broj markera. Procijenjeno je da bi za uspješno poravnanje bilo potrebno na svakom pojedinačnom

modelu postaviti barem četiri markera imajući na umu da se nazivi svih markera moraju poklapati u svakom pojedinom odlomku. Kako bi se detaljnije objasnilo na primjeru modela objekta u Sisku, kao što je već rečeno napravljena je jedna snimka samo vanjštine cijelog objekta na koju se kasnije vežu sve ostale snimke. Prema tome se na inicijalnoj snimci vanjštine objekta određuju svi potrebni markeri koji će se koristiti, te njihove brojeve koje potom treba spojiti s ostalim snimkama i markerima na njima.

5. Rezultati istraživanja

U ovom poglavlju prokomentirat će se dobivene rezultate snimanja i usporediti ih s očekivanjima i predviđanjima koja su napravljena u prethodnom dijelu rada. Prije svega treba napomenuti kako je jedan od ključnih faktora pri obradi podataka bio odabir optimalnog broja fotografija koje su bile ulazni podaci za analizu. Važno je naglasiti da se broj odabranih slika iz videa pažljivo određuje kako bi se izbjegla nepotrebna opterećenost sustava i izbjegli problemi koji mogu nastati iz prevelikog broja slika za obradu. Na primjer, ako je video snimljen pri brzini od 60 sličica u sekundi, nakon samo 5 sekundi snimka već bi bilo 300 slika za obradu. Jedan od razloga je povezan s opterećenjem računalnih resursa i vremenom potrebnim za obradu velikog broja slika. Prema tome određeno je da je optimalni broj fotografija po jednom odlomku za obradu bio između 100 i 200, ovisno o vremenskom trajanju snimke i veličini prostora koja se htjela u tom odlomku obraditi. Ovaj pristup podjele analize na manje odlomke s manjim brojem fotografija za rezultat je imao činjenicu da je skraćeno vrijeme obrade, jer ono eksponencijalno raste s brojem fotografija koje se obrađuju, te je značajno olakšan proces otklanjanja poteškoća i ručnog poravnavanja kamera. Na slici 11. prokomentirat će se jedan od nedostataka fotogrametrije

u slučaju snimanja velikih ravnih ploha uniformne boje koje nemaju lako prepoznatljive detalje.



Slika 11 Loša kvaliteta istočnog pročelja

Kao što je vidljivo iz Slike 11 predmet ove diskusije bit će vanjski zid zgrade orijentiran prema istoku. Vidljivo je da jedini dio tog zida koji je vidljiv u konačnom modelu zapravo onaj dio na zidu gdje su nastala oštećenja od potresa i gdje su vidljive znatne pukotine. Ovaj dio objekta je sniman iz neposredne blizine zbog ograničenja na terenu, te je iz tog razloga veliki dio svake pojedinačne slike iz snimke s tog dijela objekta pripadao samo velikoj uniformnoj plohi iz koje program nije bio u stanju razaznati mnogo zasebnih točaka i stvoriti precizan model. Pretpostavka je da bi snimka tog zida bila bolja da je postojala mogućnost snimiti ga iz veće daljine i samim time omogućiti programu da uzme u obzir i neke duge točke za koje bi lakše mogao razaznati njihovu točnu lokaciju. Prema tome po ovom pitanju može se zaključiti definitivna limitacija fotogrametrijskog postupka u ovakvim uvjetima i treba napomenuti kako se ne smatra da je postupak preporučljiv za primjenu u ovim okolnostima. U slučajevima kada je neizbježno korištenje na ovakvim plohamo preporučuju se dodatna snimanja ili postavljanje vizualnih markera na objekt radi lakšeg prepoznavanja referentnih točaka.



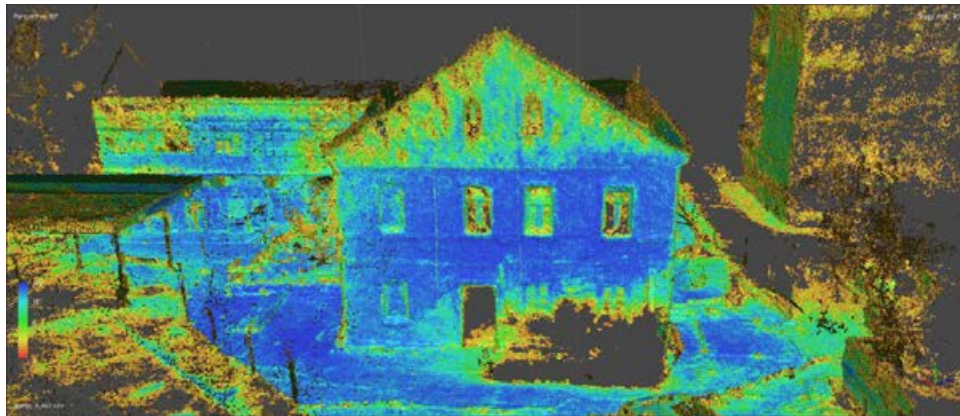
Slika 12 Loša kvaliteta južnog pročelja

Također, na Slici 12 može se ustanoviti kako je u određenoj mjeri došlo do degradacije kvalitete modela na južnoj strani objekta. Ponajprije, pretpostavka je kako je do toga došlo zbog kombinacije faktora velike uniformne plohe i njezine prevelike saturacije sunčevom svjetlošću u trenutku snimanja. Sukladno tome može se zaključiti kako niti prevelika količina osvjetljenja nije pogodna za dobivanje optimalnih snimaka. Suprotno tome na Slici 13 može se vidjeti kakva je kvaliteta modela dobivena sa sjeverne strane objekta gdje je fasada mnogo reljefnija i nije prilikom snimanja bila izložena direktnoj sunčevoj svjetlosti.

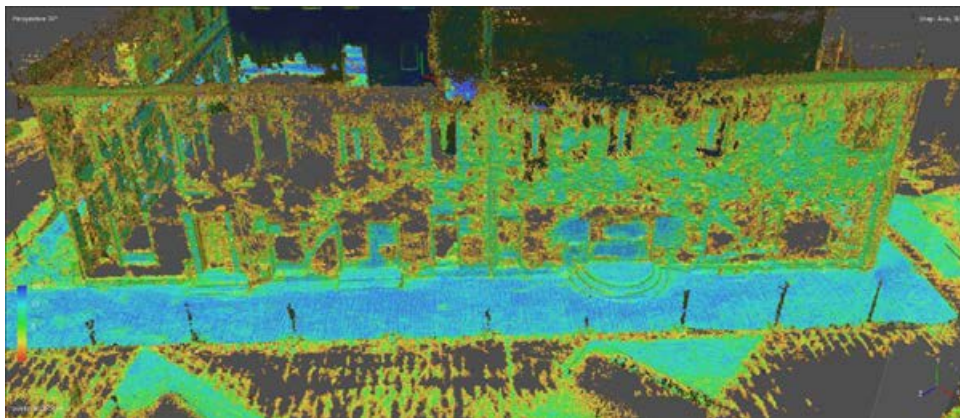


Slika 13 Dobra kvaliteta sjevernog pročelja

Može se zaključiti kako je na tom dijelu modela puno veća kvaliteta snimke, kako u količini detalja koji su vidljivi, tako i u kvaliteti dobivenih podataka, to jest njihovoj preciznosti. Po pitanju preciznosti može se napraviti usporedbu Slike 12 sa Slikom 13. Na njima je vidljivo kako uslijed pogodnih uvjeta snimanja dolazi do znatno manjih odstupanja, kao što je pokazano na primjeru odstupanja zida za kojeg možemo kao referencu uzeti da bi trebao biti relativno ravan.



Slika 14 Pouzdanost modela na sjevernoj strani

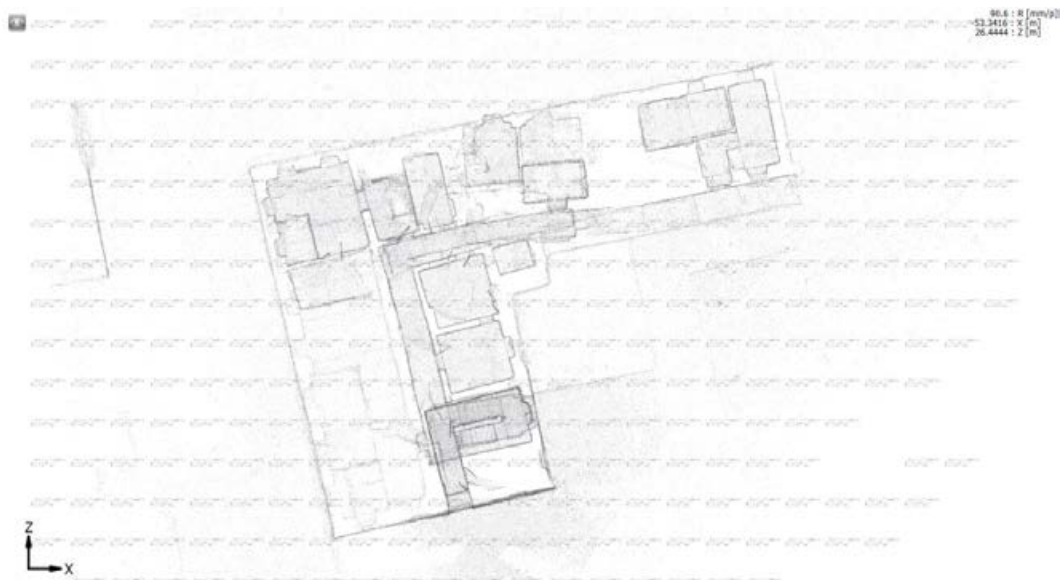


Slika 15 Pouzdanost modela na južnoj strani

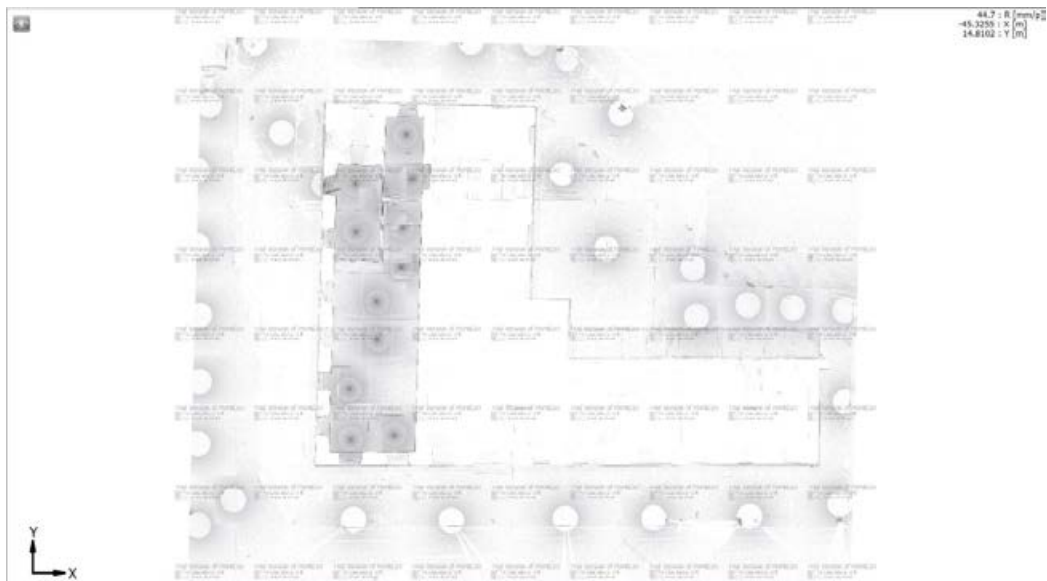
Na Slikama 14 i 15 prikazana je pouzdanost točnosti točaka za južno i sjeverno pročelje objekta, te iz toga možemo vidjeti kako je sigurnost, a samim time i točnost modela

znatno manja na južnoj strani objekta, te se također mogu vidjeti odstupanja od stvarnog stanja.

Po pitanju preciznosti snimanja također možemo i usporediti dobivene rezultate fotogrametrije s rezultatima dobivenima pomoću LIDAR-a.



Slika 16 Tlocrt dobiven fotogrametrijom



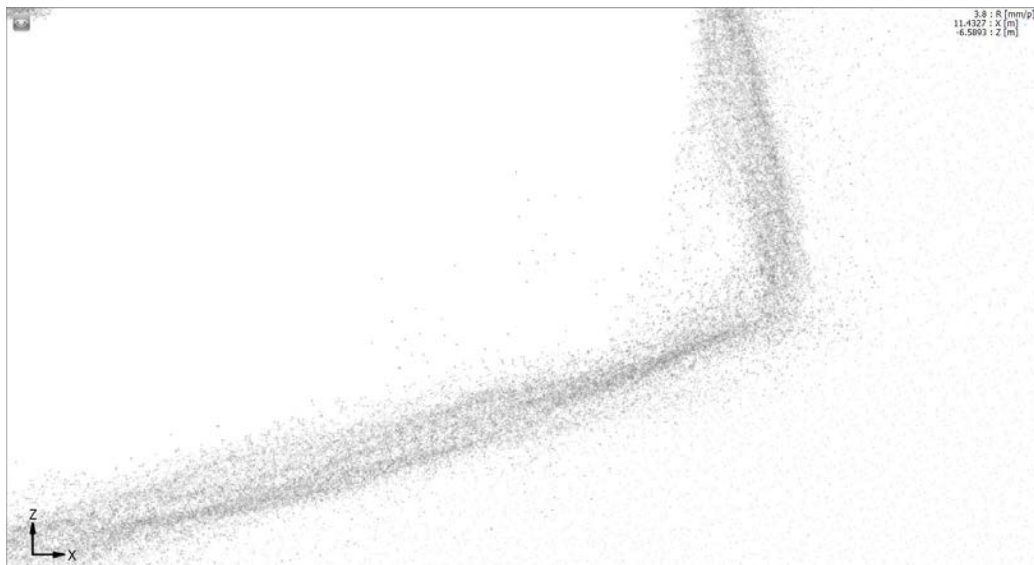
Slika 17 Tlocrt dobiven LIDAR-om

Kao što je vidljivo na Slici 16 koja je rezultat snimanja objekta fotogrametrijskim postupkom, te na Slici 17 koja je dobivena postupkom skeniranja LIDAR-om,

fotogrametrijski postupak ne nudi toliku preciznost kao snimanje LIDAR-om. Može se primijetiti kako su rubovi objekta manje precizniji i oštri na tlocrtu dobivenom fotogrametrijskim postupkom.



Slika 18 Prvi detalj dobiven LIDAR-om



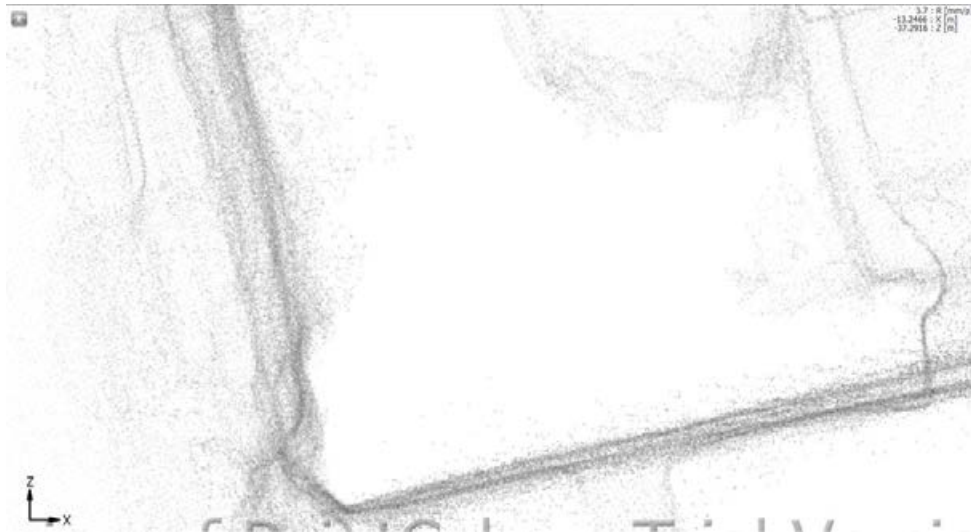
Slika 19 Prvi detalj dobiven fotogrametrijom

Kao što je vidljivo Slikama 18 i 19 te Slikama 20 i 21 prikazani su detaljni dijelovi zida koji je snimljen LIDAR-om i fotogrametrijskom postupkom. Iz tih slika vidljivo je kako je

raspršenost točkaka u oba slučaja znatno veća nego je to slučaj kada su u pitanju slike dobivene LIDAR-om, kod kojeg je vidljivo kako je linija koja predstavlja gabarite toga zida mnogo oštija i kako ne postoje praktički nikakva odstupanja. Na Slici 21 može se također vidjeti kako je fotogrametrijska metoda generirala svojevrsnu pogrešku tako što element koji se nalazi u blizini ruba zgrade nije razaznat kao samostalni element već je svojevrsno stopljen s ostatkom objekta. Prema tome može se vidjeti kako je fotogrametrijski postupak u ovom slučaju napravio relativno veliku pogrešku kada je u pitanju bio rub objekta gdje očigledno i inače nedostaje podataka za kvalitetnu analizu.



Slika 20 Drugi detalj dobiven LIDAR-om



Slika 21 Drugi detalj dobiven fotogrametrijom

Kada se pokušalo usporediti stvarne veličine i dimenzije dobivene fotogrametrijskim postupkom dobivena je vrijednost koja nije bila ni blizu stvarnoj vrijednosti površine objekta. Pretpostavka je da je razlog tome što je model nastao od više manjih modela dobivenih pojedinačnim snimkama koje je program skalirao kako bi ostvario ispravno poravnanje. Pošto širokokutna kamera koja je korištena nema ugrađeni GPS, nije moguće usporediti udaljenosti dobivene fotogrametrijom s onima iz GPS podataka i tako smanjiti mogućnost pogreške.

Cilj analize objekta na Borongaju bilo je pokazati da se eksterijere objekta može snimiti veoma precizno pomoću bespilotnih letjelica s ugrađenim kamerama i da je moguće dalje poboljšavati kvalitetu konačnog modela s integracijom naknadnih snimaka u postojeći model. Kao što je vidljivo iz Slike 22 i Slike 23 kvaliteta modela iz inicijalnog preleta dronom je na zavidnoj razini, a na Slici 24 i Slici 25 dobro se vidi je razina detalja koja je dobivena. Ponajviše se to očituje u gromobranskoj traci za uzemljenje, koja je širine svega nekoliko centimetara i debljine svega nekoliko milimetara, i vidljiva je na slikama i lako prepoznatljiva u sve tri dimenzije.



Slika 22 Model dobiven inicijalnim preletom



Slika 23 Model u pogledu odozgo



Slika 24 Detalj modela

Međutim, na Slici 22 također je vidljivo kako nedostaje veliki dio modela na južnoj strani koji se nalazi ispod nadstrešnice, te iz tog razloga nije bio vidljiv dronu tokom njegovog predviđenog plana leta. Iz dodatnog leta koji je obavljen u visini objekta i iz neposredne blizine dobiven je model prikazan na Slici 25 iz kojeg je vidljiva zavidna razina detalja.



Slika 25 Model dobiven dodatnom snimkom

Prema tome možemo konstatirati kako je na postojeći model moguće unijeti dodatne informacije i preciznije snimke objekta kako bi se poboljšala kvaliteta konačnog modela. Također može se konstatirati da je kvaliteta korištenih ulaznih podataka (fotografija) direktno utjecala na uspješnost analize u vidu broja uspješno poravnatih fotografija, kao i gustoću oblaka točaka - upravo kako predviđaju u svom radu Apollonio i dr. (2021). To je važna informacija za znati jer terenskim istraživanjem je utvrđeno da prije samog postupka obrade podataka gotovo je nemoguće znati s kojim skupovima podataka bi program mogao imati problema pri konačnoj obradi. Sukladno tome za dobivanje najboljih rezultata preporučuje se predvidjeti naknadna snimanja kojima će se nakon inicijalne obrade podataka nadopuniti model na mjestima gdje je to potrebno sukladno inicijalno dobivenom modelu. Također može se konstatirati kako je moguće dobivanje veoma visoke razine kvalitete modela ovim postupkom sve do razine odstupanja od svega nekoliko milimetara, ako je to potrebno. Sukladno tome mogu se provoditi daljnji precizniji preleti ovisno o tome kolika je razina detaljnosti i preciznosti potrebna, uzimajući u obzir kako taj proces iziskuje znatno više vremena od dobivanja grubog inicijalnog modela kojeg je (uključujući let dronom i obradu podataka) moguće dobiti u svega nekoliko sati ovisno o opremi kojom raspolažemo i veličini objekta kojeg snimamo. Prema tome smatra se da je inicijalni cilj ovog istraživanja postignut, te da je pokazano da fotogrametrijski postupak daje adekvatnu bazu za precizno mapiranje eksterijera objekta, te se prema tome preporučuje kombinacija korištenja drona za dobivanje veoma precizne slike eksterijera objekta i širokokutne kamere za snimanje interijera objekta. Iako širokokutna kamera nije pružila kvalitetu modela na razini onog dobivenog dronom ili LIDAR-om zbog svoje jednostavnosti i brzine kojom se može snimiti interijer objekta, nameće se kao potencijalna opcija u primjenama gdje nije potrebna visoka razina preciznosti.

6. Diskusija i preporuke

Može se također napraviti osvrt na Tablicu 1 koja se prikazana u ranijem dijelu rada i sa saznanjima dobivenima tokom ovog istraživanja ponuditi vlastita mišljenja o nekim stavkama. Snimiti skelu s nekom većom razinom detalja bilo bi veoma teško fotogrametrijskim postupkom, pogotovo ako je u pitanju velika skela na građevini. Razlog tome je što su elementi skele relativno malog poprečnog presjeka i obično napravljeni blago reflektirajući i uniformne boje što nam u postupku uvelike otežava njihovo snimanje. Vlastito je mišljenje kako snimanje skelarskih radova nije preporučljivo niti jednim fotogrametrijskim postupkom, pošto dobivene snimke ne bi bile zadovoljavajuće kvalitete za neku značajnu analizu. Uzevši u obzir da je još uvijek jedan od najtežih zadataka za fotogrametrijski postupak točno razlučivanje samih rubova objekta koji se snima (Nex i Rinaudo, 2020) ne čudi da elementi koji su tanki i imaju veliki udio rubova u svojoj ukupnoj površini nisu pogodni za snimanje ovim postupkom.

Također smatra se kako postavljanje armature nije moguće detaljno popratiti fotogrametrijskim postupkom jer se radi o mnoštvu elemenata s veoma sličnim vizualnim svojstvima u neposrednoj blizini, a k tome veoma mali poprečni presjek elementa i uobičajeno tamna boja armaturnih šipki s veoma malom količinom prepoznatljivih detalja na njima, što bi uvelike otežalo proces generiranja zajedničkih točaka u tom slučaju.

Također mogućnost snimanja prozora i vrata je veoma upitna iz razloga što ti elementi sadrže velikim dijelom svoje površine ostakljene plohe koje su reflektivne ili prozirne što fotogrametrijskom postupku ne dopušta ispravnu analizu istih. To se događa iz razloga što takve površine izgledaju drugačije ovisno o kutu gledanja i samim time program ne može odrediti zajedničke točke za takve elemente. Kao što se pokazuje u Tablici 1 smatra se kako primjena fotogrametrije pomoću drona nije moguća u zatvorenim prostorima, a fotogrametrijski postupak običnim kamerama nije preporučljiv za snimanje radova koji iziskuju veću dozu preciznosti. U globalu primjena fotogrametrije u građevinarstvu najviše

je preporučljiva za praćenje grubih građevinskih radova, u smislu promjene volumena radova, dok su neki od finijih radova kao što su instalaterski ili završni radovi teški za precizno popratiti fotogrametrijskim postupkom. Uz dovoljnu količinu utrošenog vremena i osiguravanja potrebnih uvjeta moguće je do neke mjere popratiti i takve radove, ali smatra se da u tom slučaju ulaže prevelika količina vremena i resursa za dobivanje relativno nepreciznih podataka.

Sukladno svemu rečenom u ovom radu do sada može se konstatirati kako prikupljanje podataka dronom opremljenog s video ili foto kamerom daje odlične rezultate, te je posebno primjenjivo kada želimo snimiti eksterijer objekta koji je većih dimenzija i ne postoje prepreke koje bi omogućile let drona iznad i oko objekta. Primjena ove metode prikupljanja podataka preporuča se kada se želi dobiti precizni vanjski gabariti objekta iz kojih je kasnije moguće dobiti podatke o površini ili volumenu objekta u pitanju. Također, uz kontinuirano snimanje u određenim vremenskim intervalima smatra se kako bi bilo moguće stvaranje dosljednog digitalnog blizanca budućeg objekta u kojem bi mogli vidjeti kako su napredovali grubi građevinski radovi kroz vrijeme realizacije objekta. Međutim, ako nam je želja stvoriti raspored prostorija ili dobiti tlocrt postojećeg stanja nekog objekta preporuča se prikupljanje podataka pomoću kamere sa širokim kutom gledanja koju kroz objekt nosi snimatelj. Ova metoda bila bi korisna u objektima gdje nam nije potrebna velika razina preciznosti, već nam je vrijeme snimanja limitirajući faktor, pošto je utvrđeno da su ograničenja primjene LIDAR-a dugotrajno vrijeme potrebno za svako skeniranje i visoki troškovi povezani s opremom kao što također navode i Omari i Moselhi (2008), te je za skeniranje cjelokupnog objekta potrebno više pomaka s različitih pozicija, što ovaj sustav čini dugotrajnim i nezgrapnim (Omar, Mahdjoubi i Kheder, 2018). To može biti mapiranje objekata pogođenih potresom u kojima se ne preporučuje zadržavanje, pa sukladno tome ovom metodom možemo dobiti uvid u stanje objekta i podatke za daljnju analizu bez potrebe za dužim izlaganjem opasnosti unutar potencijalno nesigurnih objekata. Jednom prikupljeni podaci o takvom objektu su prema tome dostupni za analizu

i nakon samog napuštanja objekta, te je detaljnije procjene stanja objekta moguće napraviti i naknadno uz pomoć tako prikupljenih podataka. Budući da LIDAR i fotogrametrijske snimke imaju svoje prednosti i nedostatke, prednosti jedne metode mogu kompenzirati nedostatke druge metode, čineći prirodnim kombiniranje dvaju izvora podataka (Zhang i Lin, 2016). Sukladno navedenom također se može konstatirati kako bi implementacija ove dvije fotogrametrijske metodologije snimanja bila veoma učinkovita u slučajevima kada želimo stvoriti digitalnog blizanca nekog već postojećeg objekta, uključujući u tu snimku eksterijer objekta snimljen dronom i interijer snimljen kamerom širokog kuta gledanja.

7. Zaključak

Cilj ovog rada bio je pokazati mogućnost primjene, to jest preciznost fotogrametrijskog postupka u različitim uvjetima koristeći različite metode snimanja. Zaključak je kako su osnovna načela fotogrametrije ista neovisno o kojoj se metodi prikupljanja podataka radi. Principi trikulacije, stereoskopije i paralakse su osnovni principi kojima se program služi za obradu podataka dobivenih snimanjem kako bi odredio međusobne pozicije točaka u prostoru. Iako su moguće primjene fotogrametrije u građevinarstvu široke, svrha ovog rada bila je pokazati preciznost samog postupka na već postojećim objektima u svrhu dobivanja što točnijeg i kvalitetnijeg 3D prikaza. Pomoću drona opremljenog kamerom provedeno je istraživanje nad objektom na zagrebačkom Borongaju, te je u sklopu tog istraživanja utvrđeno kako je tim postupkom moguće postići visoke razine preciznosti prikaza koje je moguće i dalje unaprjeđivati s dodatnim snimanjem pojedinih dijelova objekta na kojima se želi postići veću kvalitetu i preciznost prikaza. U sklopu analize objekta u Sisku korištena je kamera s punim kutom gledanja s kojom je cilj bio snimiti interijer objekta i pokušati dobiti što bolju kvalitetu prikaza u usporedbi onog kojeg bi se

moglo dobiti primjenom LIDAR tehnologije. Pokazano je kako se fotogrametrijskim postupkom ne može proizvesti razinu detalja na razini LIDAR tehnologije, ali je također utvrđeno da brzina kojom se fotogrametrijskim postupkom može analizirati cijeli objekt omogućava grubo modeliranje objekta u znatno kraćem vremenu nego bi bilo moguće koristeći druge metode. U konačnici fotogrametrijskim postupkom u građevinskoj industriji mogu se dobiti veoma precizni modeli visoke kvalitete detalja, ali to će ponajviše ovisiti o kvaliteti uvjeta prilikom prikupljanja podataka i količini vremena koju smo spremni potrošiti na izradu modela.

8. Popis literature

Apollonio, F.I.; Fantini, F.; Garagnani, S.; Gaiani, M. (2021) 'A Photogrammetry-Based Workflow for the Accurate 3D Construction and Visualization of Museums Assets', *Remote Sensing*, 13, 486.

Bognot, J. R.; Candido, C. G.; Blanco, A. C.; Montelibano, J. R. Y. (2018) 'Building construction progress monitoring using unmanned aerial system (uas), low-cost photogrammetry, and geographic information system (gis)', *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 4., br. 2, str. 41-47.

Braun, A.; Borrmann, A. (2019) 'Combining inverse photogrammetry and BIM for automated labeling of construction site images for machine learning', *Automation in Construction*, 106, 102879

Congress, S. C.; Puppala, A. J. (2019) 'Novel methodology of using aerial close range photogrammetry technology for monitoring the pavement construction projects', *Airfield and Highway Pavements*, str. 121-130.

Ekinci, A.; Muturi, T.; Ferreira, P. M. V. (2021) 'Aerial close-range photogrammetry to quantify deformations of the pile retaining walls' *Journal of the indian society of remote sensing*, vol. 49, br. 5, str.1051-1066.

El-Omari, S.; Moselhi, O. (2008) 'Integrating 3D laser scanning and photogrammetry for progress measurement of construction work', *Automation in Construction*, br. 18, str. 1-9.

Forstner, W.; Wrobel, B.P. (2016) *Photogrammetric computer vision; Statistics, geometry, orientation and reconstruction, (vol. 11)* Switzerland, Springer.

Kim, C.; Son, H.; Kim, C. (2011) 'The Effective Acquisition and Processing of 3D Photogrammetric Data from Digital Photogrammetry for Construction Progress Measurement', *Computing in Civil Engineering*, str. 179-185.

Kraus, K. (2007) *Photogrammetry, Geometry from images and laser scans (2. engl. izdanje)*, Berlin, New York Walter de Gruyter.

Lu, Y.; Zhang, J.Z.; Wu, Q.M.J.; Li, Z.N. (2004.) 'A survey of motion-parallax-based 3D reconstruction algorithms', *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics – part C*, vol. 34, br. 4, str. 532-548.

Maris, R.; Brad R.; Brad R. (2017.) 'A comparative study of block matching optical flow algorithms', *TEM Journal*, vol. 6, br. 4, str. 760-770.

Mihić, M.; Sigmund, Z.; Završki, I.; Butković, L.L. (2023) 'An Analysis of Potential Uses, Limitations and Barriers to Implementation of 3D Scan Data for Construction Management-Related Use-Are the Industry and the Technical Solutions Mature Enough for Adoption?', *Buildings*, 13, 1184.

Nex, F.; Rinaudo, F. (2011) 'LiDAR or photogrammetry? Integration is the answer' *Italian Journal of Remote Sensing*, vol. 43, br. 2, str. 107-121.

Omar, H; Mahdjoubi, L.; Kheder, G. (2018) 'Towards an automated photogrammetry-based approach for monitoring and controlling construction site activities' *Computers in industry*, br. 98, str. 172-182.

Shults, R.; Kassymkanova, K. K.; Burlibayeva, S.; Skopinova, D.; Demianenko, R.; Medvedskyi, Y. (2020) 'UAV Monitoring of Excavation Works' *11th International Conference "Environmental Engineering" Section: Technologies of Geodesy and Cadastre*. Vilnius Gediminas Technical University, Litvanija, 21–22. svibanj 2020. Litvanija, VGTU Press

Zhang, J.; Lin, X. (2016): 'Advances in fusion of optical imagery and LiDAR point cloud applied to photogrammetry and remote sensing', *International Journal of Image and Data Fusion*