

Analiza i izrada protokola rekonstrukcije računalnog modela terena upotrebom zračnog sustava za bespilotno snimanje i fotogrametrije

Tunjić, Boris

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:973050>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-28**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)



SVEUČILIŠTE SJEVER
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN
Studij Multimedija



DIPLOMSKI RAD br. 033-MMD-2020

**Analiza i izrada protokola rekonstrukcije
računalnog modela terena upotrebom zračnog
sustava za bespilotno snimanje i fotogrametrije**

Student:
Boris Tunjić, 1265/33D

Mentor:
doc. dr. sc. Andrija Bernik

Varaždin, rujan 2021.

Sažetak

Zračna fotogrametrija je razvojem optičke tehnologiji, primarno minijaturizacije elektroničkih sklopova i senzora, napravila veliki skok u konkurentnosti sa laserskim skenerima, te postala bitan faktor u metodologiji daljinskog istraživanja. Međutim, upravo rapidan razvoj nosi i niz negativnih konotacija. Jedan od glavnih je manjak standardizacije u svim procesnim koracima 3d rekonstrukcije.

Ovaj rad će analizirati tri tehnike u planiranju leta bespilotne letjelice, broju vertikalnih obzornih linija, kuta kamere prema snimanom objektu, frekvenciji fotografija i postotak njihovih preklapanja. Za terensko mjerenje koristila se bespilotna letjelica DJI Phantom 3 Standard, obrada i rekonstrukcija podataka u softveru Pix4Dmapper. Objekt istraživanja je zagrebački Medvedgrad.

Svrha ovog rada je izrada standardiziranog protokola snimanja koji bi doprinio bržem i optimalnijem radnom procesu uz zadržavanje kvalitete konačnog računalnog modela. Temeljem istraživanja i dobivenih rezultata primarno preko analize značajki i globalnog točkastog oblaka, dokazana je mogućnost snimana sa veće udaljenosti od objekta (30m) uz minimalan (3.6%) gubitak broja 2d značajki. To omogućuje korištenje jedne obzorne visine i skraćuje vrijeme letenja za 33%. Također, utvrđeno je da preklapanje fotografija od 85% daje skoro identičan broj 3d značajki (razlika 0.7%) kao i 90% preklapanje fotografija.

Ključne riječi: bespilotna letjelica, DJI Phantom 3 Standard, fotogrametrija, Pix4Dmapper

Summary

With the development of optical technology, primarily miniaturization of electronics and optical sensors, aerial photogrammetry has made a big leap in competitiveness with laser scanners and has become an important factor in the methodology of remote sensing. However, rapid development also carries several negative connotations. One of the main ones is the lack of standardization in the pipeline process of 3d reconstruction.

This paper will analyze three techniques in drone flight planning, the number of vertical horizon lines, the angle of the camera towards the captured object, the frequency of the photos, and the percentage of their overlaps. Capturing data was done by a DJI Phantom 3 Standard drone, processing and reconstructing data in Pix4Dmapper software. The object of the research is the ancient Medvedgrad, a medieval fort built in the 13th century and recently reconstructed, located near Zagreb.

The purpose of this paper is to develop a standardized recording protocol that would contribute to a faster and more optimal working process while maintaining the quality of the final computer model. Based on research and analysis of 2d features and overlapping by photo in Pix4Dmapper software, it was confirmed that 30m is the maximal distance from the object with the small (3.6%) decline in 2d features. Also, reducing photo overlap from 90% to 85% resulted in a minimal decline in 3d features (0.7%).

Key words: DJI Phantom 3 Standard, photogrammetry, Pix4Dmapper, unmanned aerial vehicle

Prijava diplomskog rada

Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za multimediju		
STUDIJ	diplomski sveučilišni studij Multimedija		
PRISTUPNIK	Boris Tunjić	MATIČNI BROJ	1265/336D
DATUM	01.04.2021.	KOLEGIJ	Produkcija video igara
NASLOV RADA	Analiza i izrada protokola rekonstrukcije računalnog modela terena upotrebom zračnog sustava za bespilotno snimanje i fotogrametrije		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Analysis and development of aerial photogrammetry procedures for reconstruction of 3d terrain models using an unmanned aerial vehicle		
MENTOR	doc.dr.sc. Andrija Bernik	ZVANJE	Docent
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. izv.prof. Dean Valdec - predsjednik		
	2. doc.art. Robert Geček - član		
	3. doc.dr.sc. Andrija Bernik - mentor		
	4. doc.dr.sc. Emil Dumić - zamjenski član		
	5. _____		

VŽKC

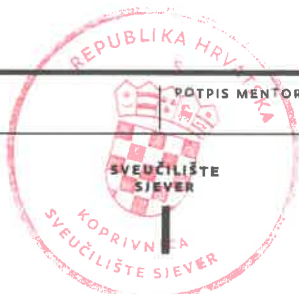
MMI

Zadatak diplomskog rada

BROJ	033-MMD-2020
OPIS	<p>Primjena zračne fotogrametrije u zabavnoj industriji limitirana je svojim nedostacima u odnosu na lasersku tehnologiju, primarno manjom preciznošću i visokom cijenom specijaliziranih kamera koje produktivno nisu konkurentne laserskim skenerima.</p> <p>U ovom radu istražiti će se dosadašnje primjene komercijalno dostupnih bespilotnih letjelica i softvera za rekonstrukciju snimljenih materijala u računalni model. Poseban naglasak je na metode i tehnike za povećanje metričke i teksturalne točnosti između realnog i dobivenog 3d modela.</p> <p>U sklopu ovog rada provest će se snimanje ciljanog područja bespilotnom letjelicom različitim metodološkim postupcima u koji spadaju planiranje plana leta, visina leta, kut kamere i frekvencija fotografiranja. Rekonstrukcija prikupljenih materijala provest će se u Pix4D Mapper softveru. Nad dobivenim rezultatima uraditi će se metričko mjerenje objekata u softveru, te njihova usporedba sa dimenzijama realnih objekata.</p> <p>Doprinos ovog rada je protokol upravljanja niskobudžetnim bespilotnim letjelicama, čijom implementacijom rezultira precizna rekonstrukcija računalnog modela. Format završnog proizvoda je kompatibilan sa softverima za 3d modeliranje ili za direktni unos u gaming engine. Čime se eliminira potreba za zasebnim kreiranjem 3d terena.</p>

ZADATAK URUČEN

01.04.2021.



POTPIS MENTORA

Bernik

Popis korištenih kratica

3D	3d rekonstrukcija
CCD	Charge-coupled device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CP	Ciljevi projekta
DNF	Digital negative file
DOG	Difference of Gaussian
EXIF	Exchangeable Image File Format
GCP	Zemaljske kontrolne točke
GNSS	Globalni navigacijski satelitski sustavi
GPS	Globalni položajni sustav
HACZ	Hrvatska agencija za civilno zrakoplovstvo
HTOL	Horizontal Takeoff and Landing vehicle
IMU	Inercijalna mjerna jedinica
JPG	Joint Photographic Experts Group
KK	Kontrola kvalitete
LiDAR	Light Detection and Ranging
PL	Plan leta
RAW	Raw image format
SIFT	Scale Invariant Feature Transform
SO	Softverska obrada
SP	Snimanje podataka
SSD	Solid State Disk
TIF	Tag Image File Format
UAV	Bespilotna letjelica
VTOL	Vertical Takeoff and Landing vehicle

Sadržaj

1	Pozadina istraživanja.....	1
1.1	Predmet i cilj rada.....	2
1.2	Struktura rada.....	2
1.3	Metoda izrade rada.....	2
2	Zračna fotogrametrija.....	4
2.1	Tehnologije bespilotnih letjelica.....	4
2.2	Klasifikacija letjelica.....	6
2.3	Pravna regulativa upravljanja i posjedovanja bespilotnih letjelica.....	7
2.3.1	Registracija bespilotnih letjelica u Republici Hrvatskoj.....	8
2.3.2	Dozvola za udaljene pilote.....	9
2.3.3	Korištenje zračnog prostora.....	9
3	Softver za 3d rekonstrukciju - Pix4Dmapper.....	12
3.1	Inicijalna detekcija značajki.....	12
3.1.1	SIFT algoritam.....	13
3.1.2	Primjena dimenzija i detekcija ekstrema.....	13
3.1.3	Lokalizacija ključnih točki.....	14
3.1.4	Orijentacijsko poravnavanje.....	15
3.1.5	Zapis 2d značajki.....	16
3.2	Točkasti oblak.....	16
3.3	Kreacija poligona i dodavanje tekstura.....	17
3.4	Izvoz modela.....	18
4	Istražena problematika zračne fotogrametrije.....	19
5	Istraživački projekt.....	23
5.1	Ciljevi istraživanja.....	23
5.2	Lokacija i predmet istraživanja.....	23
5.3	Istraživački problemi.....	24
5.4	Hipoteze.....	25
5.5	Korištena oprema.....	26
5.6	Metodologija istraživanja.....	28
5.7	Radni proces istraživanja.....	30
5.7.1	Inicijalna provjera lokacije.....	30
5.7.2	Priprema faza.....	31
5.7.3	Snimanje uzoraka.....	31
5.7.4	Obrada podataka.....	35
5.7.5	Analiza podataka.....	36
5.8	Rezultati istraživanja.....	37
5.9	Gotovi 3d računalni modeli.....	45
6	Interpretacija rezultata.....	48
6.1	Hipoteza 1.....	50
6.2	Hipoteza 2.....	50
6.3	Hipoteza 3.....	50

7	Zaključak.....	52
8	Literatura.....	54

1 Pozadina istraživanja

Unazad nekoliko godina bespilotne letjelice opremljene kamerama visoke rezolucije postale su ekonomičnije i pristupačnije širom tržištu što je imalo za efekt ubrzani razvoj specijaliziranih softvera za zračnu fotogrametriju. Sadašnji tržišni lider u prikupljanju podataka, što je prvi korak fotogrametrije, je laserska tehnologija. Laser je nedvojbeno preciznija i brži ali i višeput skuplji, što je limitiralo upotrebu zračne fotogrametrije na veće kompanije ili vladine organizacije za monitoring velikih površina ili mapiranje određenih lokacija ili građevina.

Nagli razvoj i velika ponuda bespilotnih letjelica i softvera za zračnu fotogrametriju ima i negativnu stranu. Jedan od glavnih je manjak standardizacije u svim procesnim koracima 3d rekonstrukcije.

Prvi korak zračne fotogrametrije je prikupljanje podataka, odnosno, fotografiranje objekta ili terena. Tu se nudi nekoliko tehnika plana leta, kružno gibanje oko definiranog središta, „cik-cak“ plan, mrežasto pokrivanje ili ručno ne definirano snimanje. Jako je teško odlučiti koji plan je primjereni ili koje su prednosti jednog naspram drugog.

Još jedno ne definirano područje je broj visinskog obzora, odnosno na koliko različitih visina letjeti kako bi se prikupili dovoljan broj fotografija. Također, frekvencija snimanja i broja preklapanja, u literaturama stoji minimalno 70-80% preklapanja (Nex and Remondino, 2014.). Što predstavlja veliki broj raspon, pogotovo ukoliko se radi o tisućama ili desecima tisuća fotografija. U cijelom radnom procesu, fizičko mjerenje zahtjeva veliki broj radnih sati provedeno na terenu. Ovdje treba uzeti u obzir da kapaciteti baterija bespilotnih letjelica nisu veliki, pa se mjerenje ne može provesti u jednom letu ili u jednom danu. Kao i utjecaj meteoroloških uvjeta, položaj sunca, brzina vjetrova, vlage u zraku, temperature zraka kao i nadzor zračnog prostora i cjelokupnog prostora.

Prednost novih bespilotnih letjelica je postojanje kvalitetnijih inercijsko navigacijskog sustava (IMU) i globalnog navigacijskog satelitskog sustava (GPS). Te dvije tehnologije omogućuju precizno lociranje položaja letjelice na karti prilikom svakog fotografiranja. Ti podaci spremljeni su zasebno u metapodacima fotografije.

Do sada u konvencionalnoj fotogrametriji potrebna je skupa dodatna oprema za povećanje preciznosti, zemaljske kontrolne točke (GCP). One služe kako bi softver za rekonstrukciju odredio točne položaje i orijentacije kamere.

Upotrebom GPS-a, softver za rekonstrukciju izravno preuzima globalne koordinate iz samih fotografija i time se skraćuje ukupno vrijeme projekta za 15% (Nex and Remondino (2014)).

U ovom radu analizirat će se gore navedene nedostaci zračne fotogrametrije. Svrha rada je standardizacija prikupljanje podataka bez gubitka kvalitete krajnjeg računalnog objekta.

1.1 Predmet i cilj rada

U ovom radu analizirani su problemi i nedostaci zračne fotogrametrije naznačeni u istraženoj stručnoj literaturi. Temeljem istraživanja provest će se terensko mjerenje bespilotnom letjelicom u svrhu analize različitih tehničkih metoda prikupljanja podataka:

- Maksimalna udaljenost kamere od snimanog objekta bez gubljenja broja značajki fotografija;
- Minimalni postotak preklapanja fotografije bez značajnog (<1%) gubitka ukupnog broja ključnih točki u točkastom oblaku;
- Analiza tri tipa plana leta uz mjerenje ukupnog broja ključnih točki u točkastom oblaku i ukupno vrijeme leta.

Doprinos ovoga rada je standardizirani radni protokol koji se temelji na optimizaciji procesa prikupljanja podataka zračne fotogrametrije.

1.2 Struktura rada

Prvi dio rada posvećen je istraživanju trenutne tehnologije zračne fotogrametrije s naglaskom na probleme i nedostatke u istoj. Navedene su tehnologije i uređaji koji su dio cijelog procesa, od prikupljanja podataka do završne faze – rekonstrukcije računalnog modela.

Pod prikupljanje podataka, misli se dakako na samo fotografiranje željenog objekta. U ovom dijelu rada opisani su postojeći sustavi za zračno daljinsko fotografiranje, njihove specifičnosti kao i klasifikacija. Navedena je i cijela regulativa te koraci potrebni za registraciju bespilotne letjelice i legalno upravljanje istom na teritoriju Republike Hrvatske.

Zadnji dio prvoga dijela rada posvećen je softveru za rekonstrukciju 3d računalnog modela, Pix4Dmapper. Opisani su svi koraci u procesu od unosa fotografija do izvoza gotovog modela. Naglasak je na detekciji značajki (engl. feature) fotografija, budući da je to jedan od metoda analize istraživačkog projekta. Drugi dio ovoga rada je posvećen istraživačkom projektu. Započinje izlaganjem problematike koje su pronađene u istraživačkim radovima. Slijedi opis i ciljevi projekta, provedba, analiza i interpretacija rezultata te zaključak cjelokupnog rada.

1.3 Metoda izrade rada

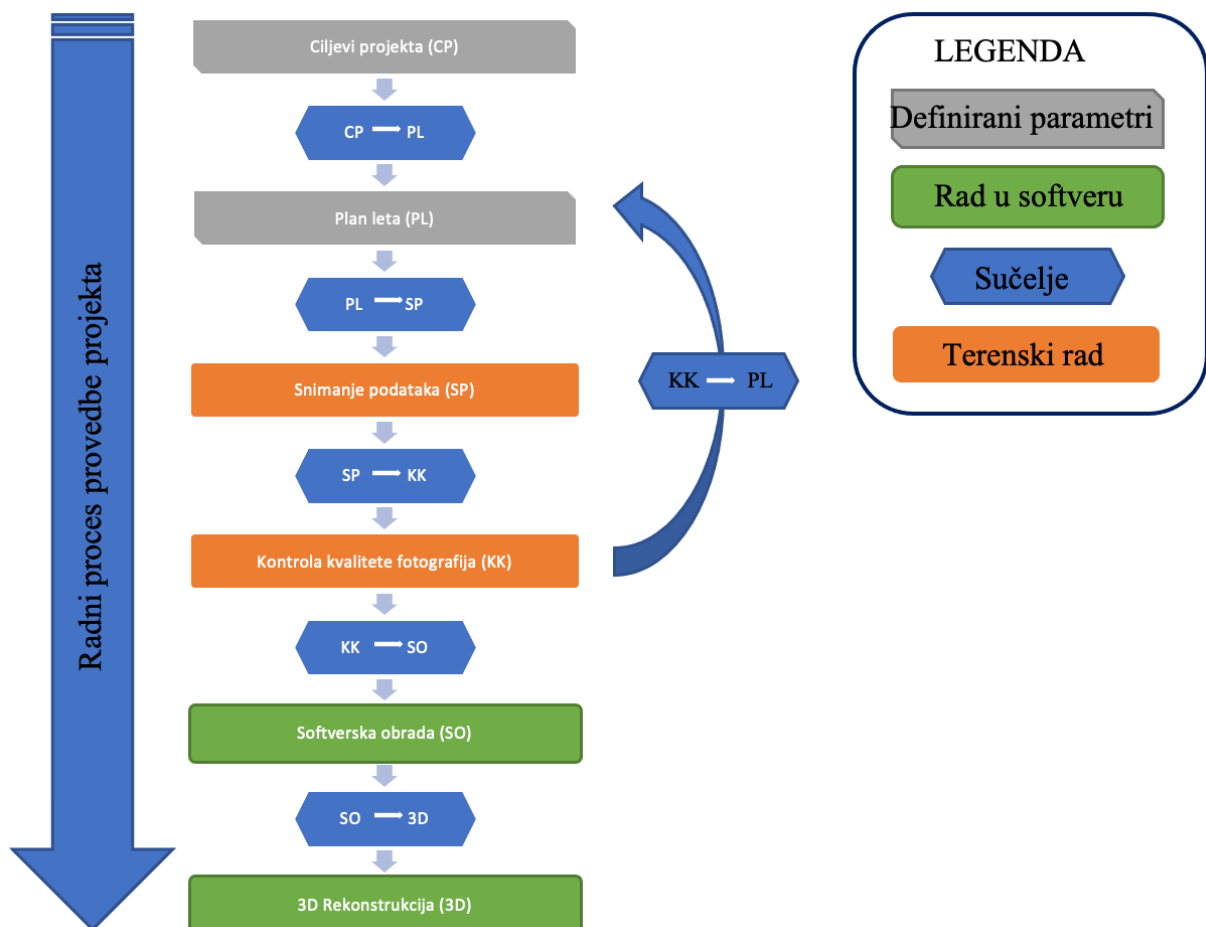
Istraživački projekt bazira se na broju detektiranih jedinstvenih referentnih točaka koju analitički alatom prikazuje softver Pix4Dmapper. Dosadašnjim istraživanjima poznata je korelacija između većeg broja fotografija i veće preciznosti točkastog oblaka (Micheletti et al., 2014), te završnog računalnog modela. Druga poznata činjenica je povećanjem rezolucije snimljene fotografije, povećava se, također, preciznosti točkastog oblaka (Kung et al., 2011).

Te dvije poznanice omogućuje uspoređivanje više metode mjerenja prema istom površinskom dijelu objekta. Ukoliko broj detektiranih značajki po fotografija ne padne, neće doći ni do promjene na točkastom oblaku i modelu.

Slika 1.1. prikazuje cijeli radni proces istraživačkog projekta. Započinje definiranim ciljevima (CP) i izradom plana leta bespilotne letjelice (PL). Nakon prve sesije fotografiranja (SP), koja se određuje trajanju interne baterije, slijedi provjeravanje snimljenih fotografija (KK) na samom terenu. Ukoliko je kvaliteta fotografija prihvatljiva nastavlja se snimanje. Ukoliko nije, radi se novi ili modificira postojeći plan reda kako bi se ponovno snimile fotografije koje nisu prošle kontrolu kvalitete. Završetkom snimanja, kreće završni, softverski dio procesa (SO i 3D). Ovaj proces se ponavlja za sva tri točke istraživanja.

Na pet različitih lokacija analizirani je broj detektiranih značajki po fotografiji slikane iz četiri različite udaljenosti od objekta (10m, 20m, 30m i 40m). Drugi element istraživanja se odnosi na broj preklapanja. Testirane su dvije preporučene postavke preklapanja (90% i 85%) te dvije postavke određene od strane autora (80% i 75%). Treći element istraživanja je metodologija snimanja iz zraka. Korištene su dvije preporučena plana leta: mrežasto pokrivanje iznad predmeta snimanja, kružno oko centralne točke predmeta snimanja. Autor je kreirao treći plan leta, hibridom dvjema gore nabodenih planova. Na kraju je analiziran ukupan broj ključnih točki u točkastom oblaku sa ukupnim vremenom snimanja za svaki od tri plana leta.

Slika 1.1 Radni proces istraživačkog projekta



2 Zračna fotogrametrija

Pod terminologija zračna fotogrametrija smatra se bespilotna letjelica (Eisenbeiss, 2008) kao platforma za prikupljanje podataka, odnosno fotografiranje. Letjelica se upravlja daljinskim upravljačem, može imati implementiran automatski ili autonoman sustav. Automatski sustav omogućuje da pilot na daljinu u svakom trenutku može preuzeti kontrolu, dok autonoman sustav u potpunosti kontrolira rad i let zrakoplova.

Letjelice su opremljene raznim vrstama fotogrametrijski sustava mjerenja, kamere različitih rezolucija senzora, toplinskih ili infracrvenih sustava kamera, LiDAR sustava u zraku ili hibridi navedenih sustava.

Zračna fotogrametrija otvara nove primjene u domeni kratkog i srednje-kratkog dometa, kombinirajući zračnu i zemaljsku fotogrametriju, što rezultira novoj primjeni u raznim industrijama kao alternativa klasičnoj fotogrametriji iz zraka s ljudskom posadom ili puno skupljim upotrebom satelitske tehnologije. Tablica 1 prikazuje odnose između satelitskog snimanja, fotogrametriji iz zraka s ljudskom posadom i UAV fotogrametrijom.

	satelitsko snimanje	ljudska posada	bespilotna letjelica
Pokrivenost	globalno	km ²	m ² -km ²
Preciznost	dm-m	cm-dm	mm-cm
GNSS kvaliteta	velika	velika	slaba-srednja
IMU preciznost	dm	cm	m
Cijena	jako velika	velika	mala
Operativni troškovi	mali	veliki	mali
Mobilnost	fiksna orbita	mala fleksibilnost, ovisno o meteorološkim uvjetima, pilot	velika, ovisno o meteorološkim uvjetima, kontrola na daljinu
Upotrebljivost u opasnim uvjetima	velika	jako mala ili nikakva	jako velika
Optički senzor	RGB, multispektralno	RGB, multispektralno, hiperspektralno, termalno	RGB, multispektralno, hiperspektralno, termalno

Tablica 1 Prikaz triju metoda snimanja (Zhuo 2017. i Gerke 2018.)

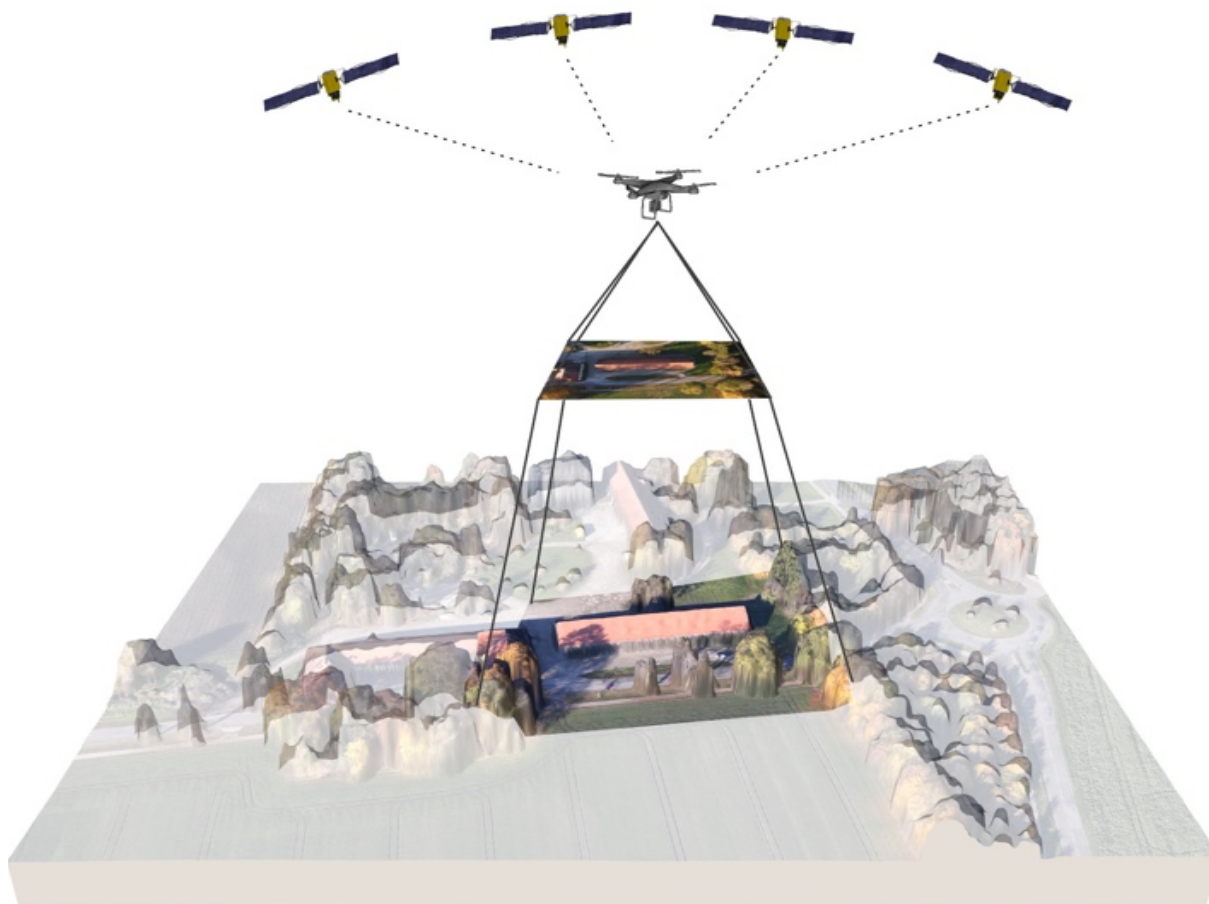
2.1 Tehnologije bespilotnih letjelica

Kako bi bespilotna letjelica prikupljala bilo kakve podatke mora imati jednu vrstu optičkog senzora, laserskog ili kameru. Letjelice s montiranim laserskim skenerima su jako skupe i korištene su samo u velikim projektima, primarno državnim ili vojnim nadzorom. Laserski uređaj emitira snop zraka koji se prilikom dodira s površinom objekta ili terena reflektira. Odbijenu zraku prima detektor koji preko sustava daljinomjera izračunava udaljenost terena od skenera. Daljinomjer radi proračun preko

dvije poznalice, konstantne brzine laserskog snopa, i ukupnog vremena od emitiranja do detekcije povratne zrake.

Bespilotne letjelice s kamerama prikupljaju podatke u širokom elektromagnetskom spektru. Termalne kamere snimaju u ili u blizini infracrvenog područja. Međutim, najčešće se koriste RGB kamere koje su i ekonomičnije od svih drugih tehnologija. U sklopu takvih kamera nalazi se CCD ili CMOS senzori. Ključna razlika između ta dva senzora je u hvatanju informacija svjetlosti. CMOS senzor ima problema kod snimanja brzih pokreta (engl. „rolling shutter“), što dovodi do raznih anomalija. CCD senzor hvata cijelu sliku odjednom pa ne dolazi do distorzija (global shutter).

Novi sustavi letjelica omogućuju spremanje koordinata pomoću GNSS (GPS) prijemnika koji se povezuje s satelitima i na taj način se polako smanjuje potreba za zemljanim kontrolnim točkama koja su služila za registraciju položaja kamere u prostoru. GPS omogućuje da se pozicija kamere direktno u svaku fotografiju zasebno, ti podaci se kasnije automatski učitavaju u softveru (slika 2.1). Taj sustav komunikacije i spremanje koordinata se još naziva i direktna geografska referenca (eng., „Direct Georeferencing“).



Slika 2.1 Direktna geografska referenca [8]

Svaka fotografija ima spremljene koordinate svog položaja u .EXIF formatu (eng., Exchangeable Image File Format). Posjeduje sve meta podatke fotografije, kao što su postavke i specifikacija kamere, postavke koje su korištene prilikom snimanja fotografije i podaci o lokaciji preko koordinata zemljopisne širine i dužine.

Kod niskobudžetnih letjelice, ili letjelice male mase postoji mogućnost da nemaju implementiran GPS prijamnik, ili imaju prijamnik slabe povezanosti što rezultira velikoj devijaciju prilikom javljanja točne lokacije. U takvim slučajevima se koristi zasebni uređaji za povećanje preciznosti mjerenja. Zemaljske kontrolne točke (GCP) prikazane na slici 2.2, su fizički obrasci koje se ciljano postavljaju niz cijeli mjerni teren. Portalnim GPS uređajima se definira točan položaj za svaki GCP, koji se potom naknadno unose u softver za 3d rekonstrukciju. Ova metoda je poznata kao indirektna geografska referenca (eng., „*Indirect Georeferencing*“). Upotreba GCP je skupa i radno jako zahtjevna metoda mjerenja. Prema Nex i Remondinu (2014) GCP zauzima 15% vremena cijelog procesa mjerenja.



Slika 2.2 Zemaljska kontrolna točka (GCP) [4]

Osim GNSS prijamnika u bespilotnim letjelicama implementiran je sustav žiroskopa, magnetometar i akcelerometar koji služe za detektiranje orijentacije letjelice i kamere u sve tri osi.

2.2 Klasifikacija letjelica

Službeno postoji više od šest klasifikacija i kategorija bespilotnih letjelica [8]. Od podjele prema namjeni (vojne, civilne i komercijalne), prema poletnoj masi pa sve do specifičnih kategorija letjelice. Kako ne postoji univerzalna propisana službena klasifikacija u zakonskom okviru, određena je regionalno ili državno, spomenut ćemo klasifikaciju prema konstrukciji letjelice.

- Bespilotne letjelice s fiksnim krilima
- Bespilotne letjelice s pokretnim krilima



Slika 2.3 bespilotna letjelica s fiksnim krilima [1]

Letjelice s fiksnim (slika 2.3), odnosno, nepokretnim krilima zahtijevaju kao i klasični civilni zrakoplovi poletno-slijetnu pistu. Ili u nekim slučajevima za polijetanja koristi katapultni sustav koji može bit ručni ili automatiziran. Ova kategorija letjelice ima akronim „HTOL“ (engl., „horizontal takeoff and landing vehicle“).

	UAV s fiksnim krilima	UAV s pokretnim krilima
Pokrivenost Primjena	velika mapiranje terena	mala inspekcija, kinematografija, monitoring, izviđanje, graditeljstvo, hitne intervencije
Brzina	velika	mala
Rezolucija mjerenja	cm po pikselu	mm po pikselu
Površina za slijetanje/polijetanje	velika	jako mala
Vrijeme letenja	velika	mala

Tablica 2 Usporedba letjelica s fiksnim i pokretnim krilima (SenseFly 2015)

Bespilotne letjelice s pokretnim krilima imaju jedan ili više rotora za pogon. Karakteristika ovih sustava je vertikalno polijetanja i slijetanja (*VTOL – vertical takeoff and landing vehicle*), sposobnost lebdjenja, što omogućuje veliku mobilnost na malim visinama i brzinama. U principu većina platformi zračne fotogrametrije spada u ove dvije kategorije. (Eisenbeiß et al. 2009). Tablica 2 uspoređuje ova dva sustava.

Podjela s obzirom na operativnu masu (tablica 3) je bitna s pravne strane. Operativna masa letjelice direktno određuje njezinu klasu i lokaciju iznad koje smije letjeti. Također, izravno određuje koju letačku dozvolu (udaljeni pilot A1, A2 ,A3) je potrebno imati za sigurno i legalno upravljanje bespilotnim letjelicama.

1. Klasa 5		do 5 kilograma
2. Klasa 25	od 5 kilograma	do 25 kilograma
3. Klasa 150	od 25 kilograma	do 150 kilograma

Tablica 3 Klase bespilotnih letjelica

2.3 Pravna regulativa upravljanja i posjedovanja bespilotnih letjelica

Od 1.siječnja 2021. na snagu su stupila nova pravila za regulaciju korištenja bespilotnih letjelica u Europskoj uniji, odnosno Republici Hrvatskoj. Nova pravila su donesena još 24. svibnja 2019. pod nazivom „Provedbene Uredbe Komisije (EU) 2019/947“ koje bolje definiraju postupke i rad bespilotnih letjelica.

Temeljem ove Uredbe sve postojeće letjelice spadaju u „Otvorenu kategoriju“, koja se potom dijeli na tri potkategorije: A1, A2 i A3. Svaka od potkategorija zahtjeva polaganje

teorijskog ispita nakon čega se steče dozvola (slika 2.4) udaljenog pilota položene potkategorije.

2.3.1 Registracija bespilotnih letjelica u Republici Hrvatskoj

Sukladno novim pravilima svi vlasnici i operatori bespilotnih letjelica čija masa prelazi 250g, ili kinetička energija letjelice u slučaju izravnog udara na čovjeka prelazi 80J, ili letjelica ima implementirane sustave senzora koji prikupljaju osobne podatke, moraju registrirati svoju letjelicu pri Hrvatskoj agenciji za civilno zrakoplovstvo (Direktivom 2009/48/EZ). Pod senzore koji „prikupljaju osobne podatke“ spada bilo koja vrsta kamere. U to uključuje i „live feed“ kamera koja nema internu ili eksternu mogućnost pohranjivanja podatka.

Operatori koji su već ranije bili pohranjeni u bazu podataka u HAZCZ obvezani su na ponovnu registraciju. Novom registracijom operator bespilotne letjelice dobiva jedinstveni registarski broj s kojim može izvoditi operacije u otvorenoj kategoriji u svim zemljama članicama Europske Unije.



Slika 2.4 Potvrda dozvole udaljenog pilota

Za bespilotne letjelice koji posjeduju operativnu masu veću od 5kg dobivena jedinstvena registarska oznaka mora biti označena fizički na letjelici negorivom pločicom. S time se osigurava mogućnost detekcije registracijskog broja u slučaju pada i zapaljenja letjelice. Za letjelice ispod 5kg dopuštene su samoljepljive trake.

Provedbenoj Uredbi Komisije (EU) 2019/947 propisano je i obvezno osiguranje odgovornosti vlasnika bespilotnih zrakoplova za štetu uzrokovanu trećim osobama.

Registracija bespilotne letjelice bez sklapanja gore navedene police osiguranja nije moguće.

2.3.2 Dozvola za udaljene pilote

Primjenom gore navedenih propisa, koji definiraju rad bespilotnih zrakoplova morat će prije obavljanja operacijskih letova bespilotnom letjelicom, položiti odgovarajuće teorijske ispite. „Otvorena kategoriju“ u koju spadaju sve komercijalne dostupne letjelice za zračnu fotogrametriju, podijeljena je u tri potkategorije: A1, A2 i A3. Kategorija A1 i A3 se polaže na daljinu preko interneta. Ispit se sastoji od 40 pitanja s višestrukim izborom odgovora. Prag prolaznosti 75%. Ispit se sastoji od devet cjelina povezanim za letačko osposobljavanje¹:

- i. Sigurnost zračnog prometa
- ii. Ograničenja u zračnom prostoru
- iii. Zrakoplovni propisi
- iv. Ljudska ograničenja
- v. Radni postupci
- vi. Opće znanje o bespilotnim zrakoplovima
- vii. Zaštita podataka
- viii. Police osiguranja
- ix. Zaštita

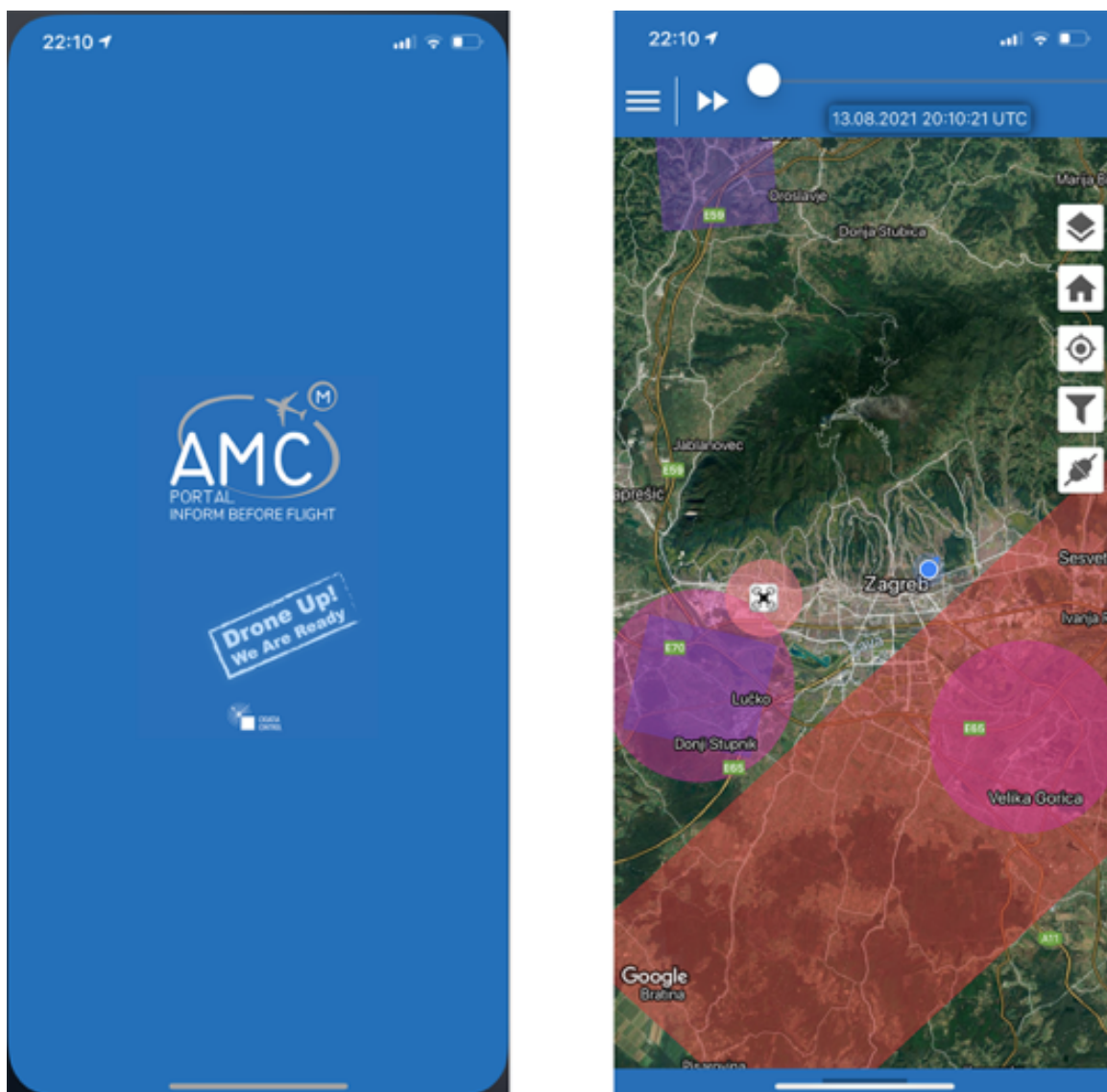
Za provođenje aktivnosti u A2 potkategoriji bespilotnim letjelicama operator mora posjedovati A2 licencu koja se polaže kod Hrvatske agencije za civilno zrakoplovstvo.

udaljeni piloti moraju položiti ispit za potkategoriju A2 u Hrvatskoj agenciji za civilno zrakoplovstvo. Osim teorijskog dijela ispita koju uključuje istih devet cjelina iz A1/“3 potkategorije, obvezni su izvršiti praktično samoosposobljavanje. Praktični dio mora sadržavati letačke vježbe polijetanja i slijetanja, precizne letačke manevre, „hover“ ili lebdjenje u svim orijentacijama. Udaljeni pilot mora vježbati napredne funkcije letjelice, ukoliko ih ima, kao što su funkcija „povratak kući“ i drugih automatskih funkcija leta.

2.3.3 Korištenje zračnog prostora

Svaki zračna aktivnost na prostoru Republike Hrvatske mora se izvoditi sukladno s primjenjivim propisima za korištenje zračnog prostora. Prije leta potrebno je prethodno ishoditi odobrenje od Hrvatske kontrole zračnog prometa.

¹ Hrvatska agencija za civilno zrakoplovstvo, Uputa za osposobljavanje i provjere za udaljene pilote



Slika 2.5 AMC Mobile Portal

Dozvola se ishodi putem mobilne „AMCPortalMobile“ aplikacije (slika 2.5). U prijavi je potrebno naznačiti vrstu i namjenu leta, oznaku letjelice, vrsta letjelice, područje i radiju obuhvaćanja letačkih operacija, te vrijeme početka i kraja operacije. Operator je dužan u svakom trenutku pratiti situaciju kako u zraku tako i na području aktivnosti. Pravila Republike Hrvatske zabranjuju obavljanje svih letačkih aktivnosti iznad vojnih postrojenja, bolnica, energetske postrojenja i glavnih prometnih infrastruktura (zračne luke i sl.). Slobodni zračni prostor podijeljen je u četiri klase (A, B, C, D).

Klasa letjelice	Klasifikacija terene			
	I	II	III	IV
5	A	A	B	C
25	A	B	C	D
150	B	C	D	D

Tablica 4 Zone letenja

Zračni prostor klasificiran je prema zonama s obzirom na naseljenost, odnosno, prisutnost ljudi. Tablica 4 prikazuje iznad kojih se područja smiju letjeti bespilotnim letjelicama u odnosu na njihovu klasu.

- Klasa I – područje bez visokih objekata ili građevina u kojima stalno borave ljudi
- Klasa II – područje u kojem se nalaze građevine koje nemaju stambene primjene ili u blizini pomoćnih gospodarskih objekata
- Područja na kojima nije dozvoljeno zadržavanje ljudi (prolaznici, biciklističke staze i sl.)
- Klasa III – područje na kojima su stambeni objekti ili građevine, poslovni prostori ili sportski objekti
- Klasa IV – jako naseljena područja kao što su područja u i oko centra gradova.

Udaljeni pilot je odgovoran za sigurnost letačkih aktivnosti. Primarno mora osigurati lokaciju od neovlaštenog dolaska skupine ljudi, ukoliko se leti iznad ljudi, dužan je svakog pojedinca upozoriti o potencijalnim opasnostima. Također, udaljeni pilot je odgovoran za plan i provedbu samog leta. U svakoj situaciji mora držati direktni vizualni kontakt sa bespilotnom letjelicom, u slučaju bilo kojih izvanrednih situacija obavezan je, bez odgode, sigurno prizemljiti letjelicu. Detaljnije obveze udaljenog pilota prikazane su u tablici 5.

Obveza operatora sustava bespilotnih zrakoplova	Kategorija letačke operacije			
	A	B	C	D
Ugovoriti policu obveznog osiguranja	×	×	×	×
Pribaviti odobrenje za korištenje radiofrekvencijskog spektra	×	×	×	×
Imenovati odgovornu osobu	×	×	×	×
Izraditi operativni priručnik			×	×
Označiti sustav bespilotnog zrakoplova				
- operator bira identifikacijsku oznaku	×	×	×	
- identifikacijsku oznaku dodjeljuje Agencija				×
Uspostaviti sustav zapisa o letovima	×	×	×	×
Uspostaviti sustav izvješćivanja o događajima povezanim sa sigurnošću u zračnom prometu	×	×	×	×
Uspostaviti sustav identifikacije opasnosti u upravljanju rizicima			×	×
Dostaviti Izjavu HACZ	×	×	×	×
Dob rukovatelja mora biti:				
- najmanje 16 godina	×	×		
- najmanje 18 godina.			×	×
Operator mora imati:				
- izjavu rukovatelja o psihofizičkoj sposobnosti ili	×	×		
- certifikat o zdravstvenoj sposobnosti rukovatelja Klase I, II ili III ili	×	×	×	×
- liječničko uvjerenje o zdravstvenoj sposobnosti rukovatelja za upravljanje vozilima koje se izdaje vozačima kojima upravljanje vozilom nije osnovno zanimanje, a koje nije starije od 5 godina ili	×	×	×	×
- vozačku dozvolu rukovatelja.	×	×	×	×
Operator mora imati:				
- izjavu rukovatelja o poznavanju primjenjivih zrakoplovnih propisa ili	×	×		
- pilotsku dozvolu ili potvrdu rukovatelja o položenom teorijskom ispitu koji provodi Agencija.	×	×	×	×
Operator mora imati:				
- izjavu rukovatelja o osposobljenosti za rukovanje sustavom bespilotnog zrakoplova.	×	×	×	×
Sustav bespilotnog zrakoplova mora udovoljavati tehničkim uvjetima za namjeravanu kategoriju letačkih operacija.	×	×	×	×

Tablica 5 Prikaz obveze udaljenih pilota [25]

3 Softver za 3d rekonstrukciju - Pix4Dmapper

Zračna fotogrametrija sastoji se od dva zasebna elementa. Prvi je prikupljanje podataka, terensko fotografiranje bespilotnom letjelicom. Nakon kontrole kvalitete fotografija i završetkom snimanja, kreće softverski dio fotogrametrije. Trenutno na tržištu postoji desetine softvera za 3d rekonstruiranje iz fotografija. Napravljeni su brojna istraživanja i usporedbe, jedno od njih je od istraživača Shahbazi [4] i suradnici pod naslovom: „Development and evaluation of a UAV-photogrammetry system for precise 3D environmental modeling“. Temeljem tog rada odabran je Pix4Dmapper softver koji se koristio u istraživačkom projektu.

Pix4D je softver za trodimenzionalnu rekonstrukciju terena ili objekta snimljene bespilotnim letjelicama. Kreirana od istoimene Švicarske kompanije. Pix4Dmapper specijalizirani je alat za rekonstrukciju terena i objekata. Pix4D napravio je nekoliko inačica specijalizirane za različite djelatnost. Pa tako ima Pix4D BIM za građevinske radove i konstrukcije, Pix4D Ag namijenjen je poljoprivrednom sektoru, te Pix4D Model za nekretnine (3D interijera i eksterijera).

Postoji i „*Pix4D Capture*“ aplikacija koja služi za automatizirano kontroliranje i snimanje terena uz pomoć bespilotnih letjelica. U ovom softveru moguće je odabrati postojeće uzorke leta ili samostalno uz pomoć zemljanih točaka izraditi plan leta, odrediti frekvenciju fotografiranja, visinu leta i postotak preklapanja te pustiti da automatski sustav preuzme punu kontrola nad letjelicom. Postoji zaštitna mjera, da u bilo kojem trenutku udaljeni pilot može preuzeti punu kontrolu nad letjelicom.

Sam softver ima bogatu paletu alata. Od analitičkih treba spomenuti detektiranje jedinstvenih referentnih točaka i globalnog točkastog oblaka praćeni sa lijepim vizualnim prikazima. Također, moćni alati editiranja u skoro svim fazama rekonstrukcije.

3.1 Inicijalna detekcija značajki

Nakon unosa fotografija u softver kreće prvi korak rekonstrukcije, inicijalna detekcija značajki (engl., „keypoints“) za svaku fotografiju zasebno. Paralelno uz detekciju, iz metapodataka fotografija sustav vadi zemaljske koordinate koje su spremljene tijekom fotografiranja. Putem satelita, precizno je detektirana lokacija kamere, orijentacija i kut kamere za svaku snimljenu fotografiju. Ovi podaci će služiti sustavu da ispravno postavi fotografije u svoj lokalni koordinatni sustav. Točno određene pozicije kamere povećavaju broj korelacija među značajkama a time i precizniji računalni model.

Značajke ili ključne točke na fotografiji predstavljaju važan segment u obradi slike. Svaka fotografija posjeduje tisuće jedinstvenih značajki koje se pojavljuju samo jedanput po fotografiji. U daljnjem koracima softver radi ekstrakciju značajki (vektor značajki), odnosno njihov opis koje će se tražiti na susjednim fotografijama i ukoliko ih pronađe dolazi do korelacija, odnosno preklapanja.

Program ovdje ima dva zadatke. Pronaći što uočljivije značajke, kako bi se lakše detektirali u kasnijim postupcima a isto vremenu imati mjeru u detekciji kako ne bi potpuno usporili cijeli program sa desetine tisuća ključnih točaka po fotografiji. Taj balans Pix4Dmapper rješava upotrebom SIFT algoritma.

3.1.1 SIFT algoritam

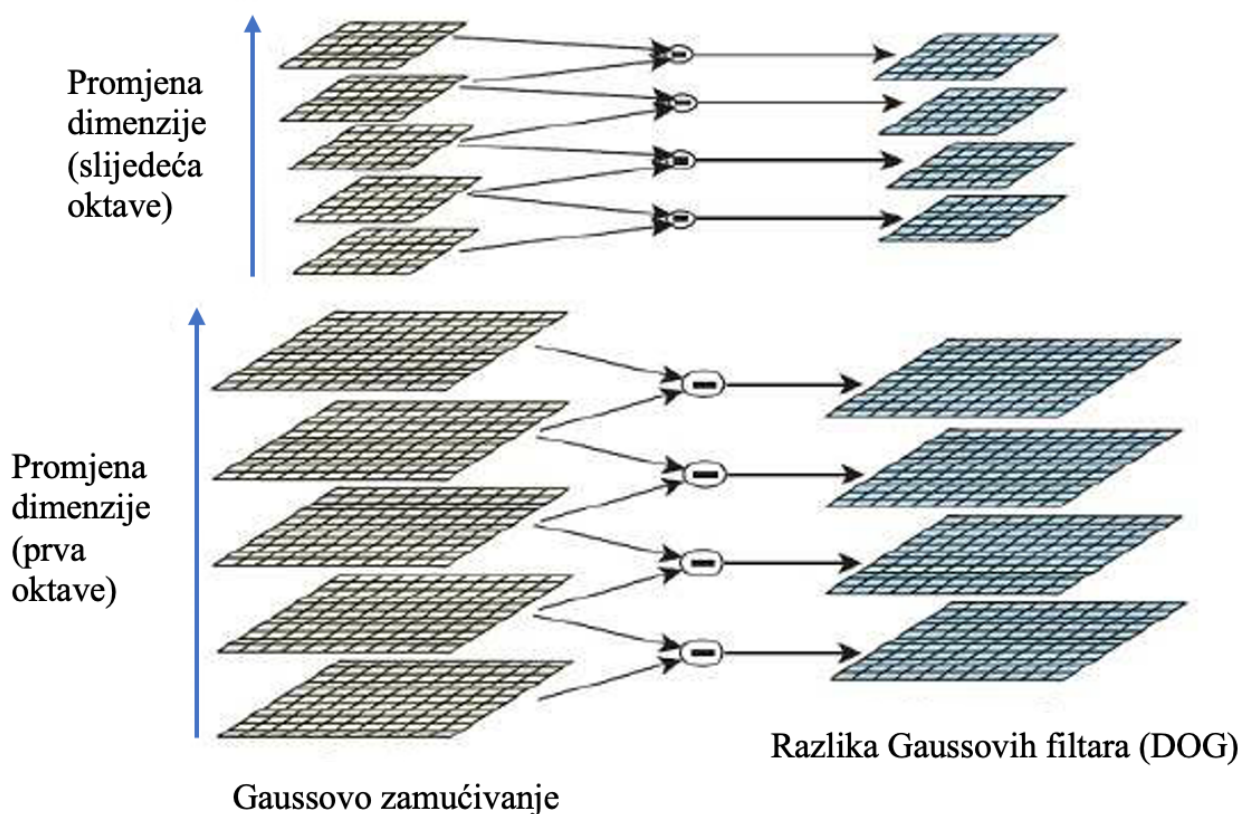
SIFT (engl., „*Scale Invariant Feature Transform*“) algoritam spada u područje računalnog vida, a koristi se za detekciju i opis lokalnih 2d značajki fotografije. Jedna od ključnih karakteristika je što promjena veličine i osvjetljenja fotografije nema utjecaja na detekciju pronalazjenja korelacijskih značajki. To je važno ukoliko fotografije nisu snimljene sa iste udaljenosti, što rezultira da značajke nisu istih dimenzija što može rezultirati da ih određeni programi ne prepoznaju. Još jedna element koji može poremetiti pronalazak identičnih značajki je osvjetljenje fotografija. Fotografije slikane u različitim vremenskim intervalima ili uvjetima, kao što su sjene, predvečer, rano ujutro, također može prouzročiti da su identične značajke drastično razlikuju po fotografijama.

SIFT algoritam se sastoji od četiri elemenata koji se nadovezuju jedan za drugim:

- Primjena dimenzija i detekcija ekstrema
- Lokalizacija ključnih točki
- Orijentacijsko poravnavanje
- Zapis značajki (vektorski opis)

3.1.2 Primjena dimenzija i detekcija ekstrema

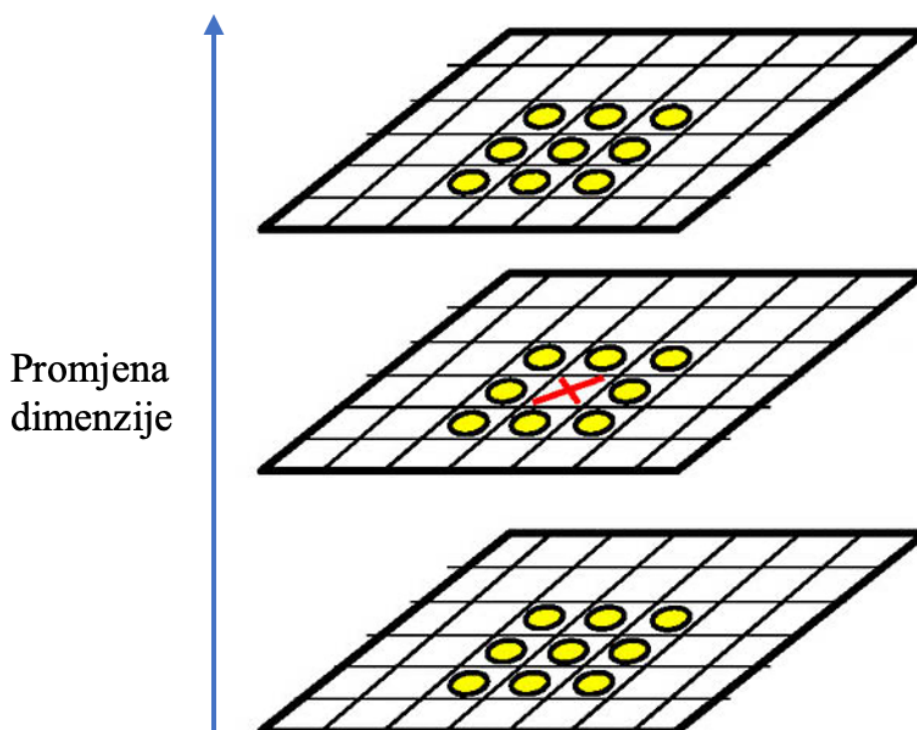
U ovom koraku fotografija se dijeli na oktave, gdje svaka nova oktava duplo manja od prethodne. Broj oktava ovisi o originalnoj dimenziji fotografije. Na svakoj oktavi radi se zasebno zamućivanje pomoću principa Gaussovih krivulja, odnosno filtera „Gaussian Blur“.



Slika 3.1 Razlika Gaussovog filtera[21]

Nakon zamučivanja fotografija slijedi kreiranje seta novih fotografija na kojima se postepeno oduzimaju *Gaussove* zamagljene verzije originalne fotografije te dobiva nova fotografija, razlike *Gaussovih* filtara. Odnosno, radi se *DOG* korak (slika 3.1) (engl., „*difference of gaussian kernel*“). Na taj način algoritam detektira koje značajke imaju najveću mogućnost prepoznavanja, odnosno najveće razlika od susjednih lokalnih obilježja.

Slijedeći korak (slika 3.2) je pronalaženje ključnih točaka (2d značajk) fotografije. Traženje se izvršava na fotografiji razlike *Gaussovih* filtara. Svaki piksel na fotografiji se uspoređuje sa susjednim 8 piksela ali i sa dvjema fotografijama različitih dimenzija (manja i veća). Što ukupno iznosi 26 piksela ($8+2 \times 9$). Na taj način se detektiraju značajke u različitim dimenzijama što omogućuje pravilo uspoređivanje na fotografijama snimljene sa različite udaljenosti ili veličinom fotografije.



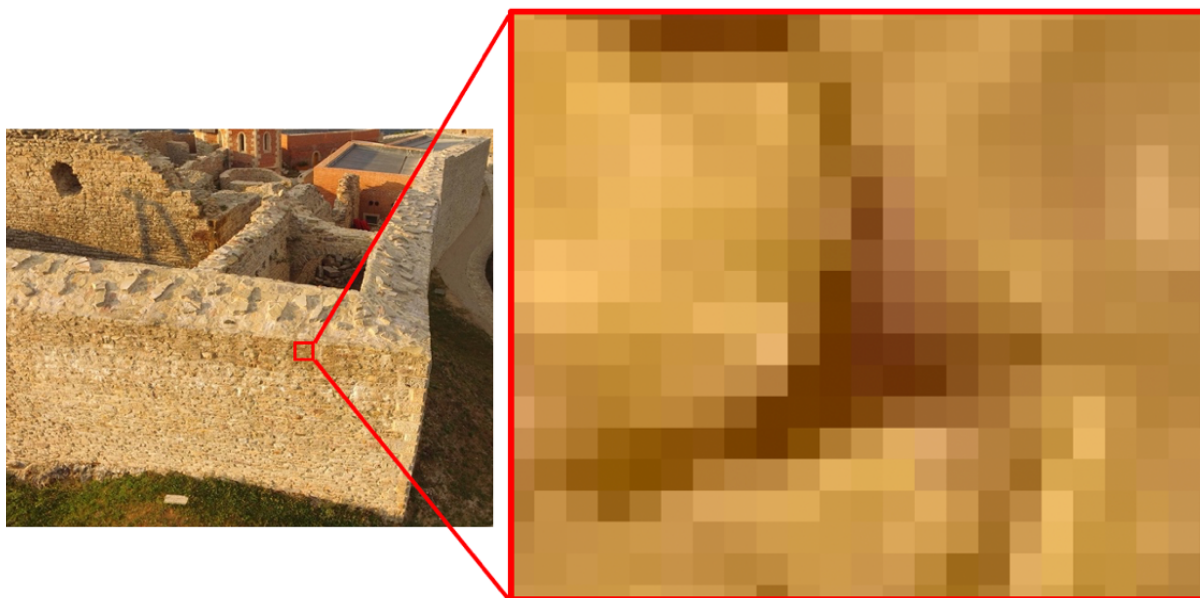
Slika 3.2 Uspoređivanje ključnih točki[22]

3.1.3 Lokalizacija ključnih točki

U gore navedenom koraku algoritam može pronaći na desetine tisuća ključnih točki. Budući da se u fotogrametriji radi sa tisućama fotografija to može drastično usporiti proces rekonstrukcije 3d modela. U ovom koraku se eliminiraju ključne točke koje se nalaze na rubnim pikselima ili ne posjeduju veliki kontrast. Takve ključne točke nisu dovoljno dobre prepoznatljive i ne mogu biti značajke fotografije. Slabi kontrast se eliminira upotrebom *Hessianove* matrice. Rubni pikseli detektiraju se preko *Harrisovog* detektora kutova koji se nakon otkrivanja brišu sa liste značajki fotografije.

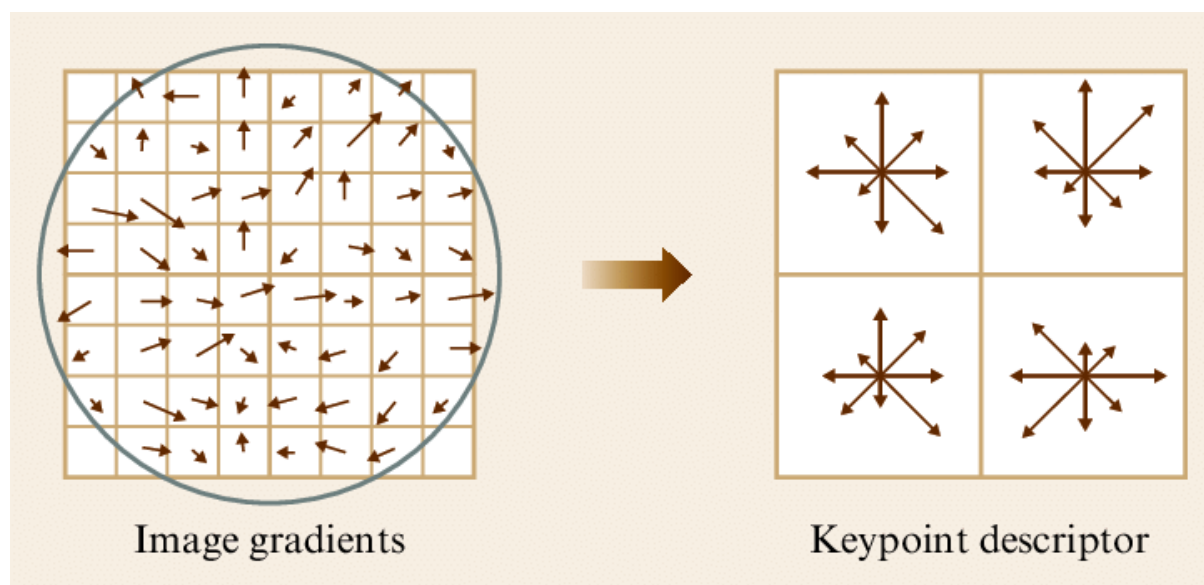
3.1.4 Orijentacijsko poravnavanje

Nakon što je algoritam precizno odredio značajke fotografija i njihovu mogućnost detekcije bez obzira na njihove dimenzije, potrebno je omogućiti detekciju i promjenom njegove orijentacije. Orijetacija detektirane 2d značajke prikazana je na slici 3.3. Fotogrametrija, pogotovo zračna, slika se ne samo iz različitih horizontalnih položaja veći različitih visina i obzornih kutova.



Slika 3.3 Orijetacijsko poravnavanje

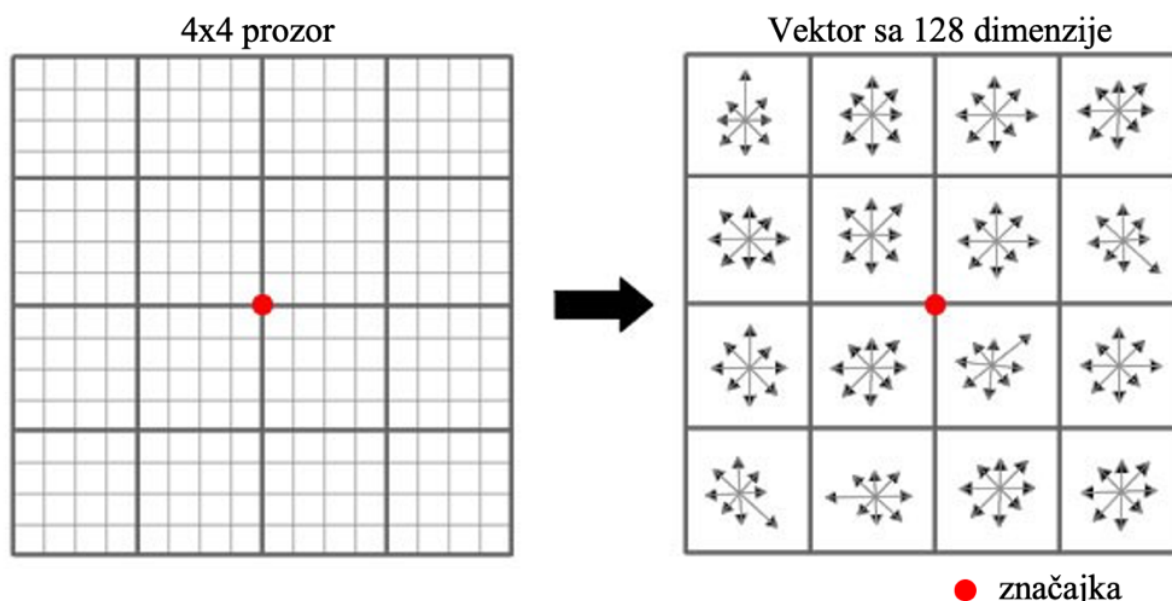
U tim slučajevima orijentacija 2d značajki nije ista i kako taj efekt ne bi spriječio pravilu detekciju i poravnavanje fotografija, algoritam koristi histogram lokalnih područja. Oko detektirane ključne točke mjeri se gradacija sive boje. Vektorima se mjeri veličina i smjer gradacije prikazane na slici 3,4. Na taj način se zapisuju obilježja značajki te bez obzira na orijentaciju algoritam će prepoznati identične vektorske zapise i ispravno poravnati fotografije.



Slika 3.4 Vektorski opis značajke fotografije[23]

3.1.5 Zapis 2d značajki

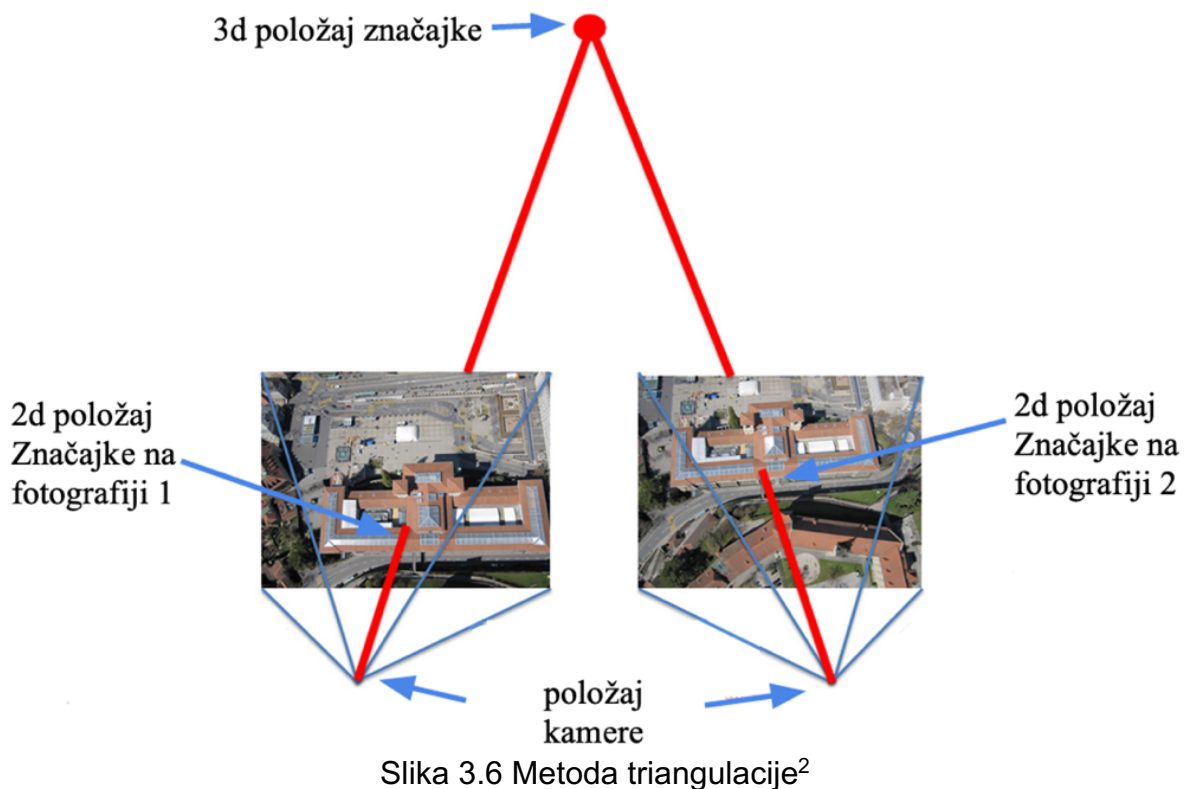
Algoritam je do sada točno odredio značajku fotografija, omogućio je preciznu detekciju bez obzira na veličinu i orijentaciju. Slijedeći korak je sam format zapisa značajke. Oko središta 2d značajke program formira 16 sa 16 prozor, koji potom dijeli na 16 jednakih kvadrata, pa se dobije prozor 4 sa 4. Za svaki od tih 16 kvadrata kreira se osmodijelni vektor kreiran u prethodnom koraku vezano za gradaciju sive boje (slika 3.5). Tako konačni vektorski zapis značajke je vektor sa 128 dimenzije (4x4x8). Ovim se osigurava brza i precizna detekcija identičnih značajki na ostalim fotografijama.



Slika 3.5 Vektorski zapis 2d značajke[26]

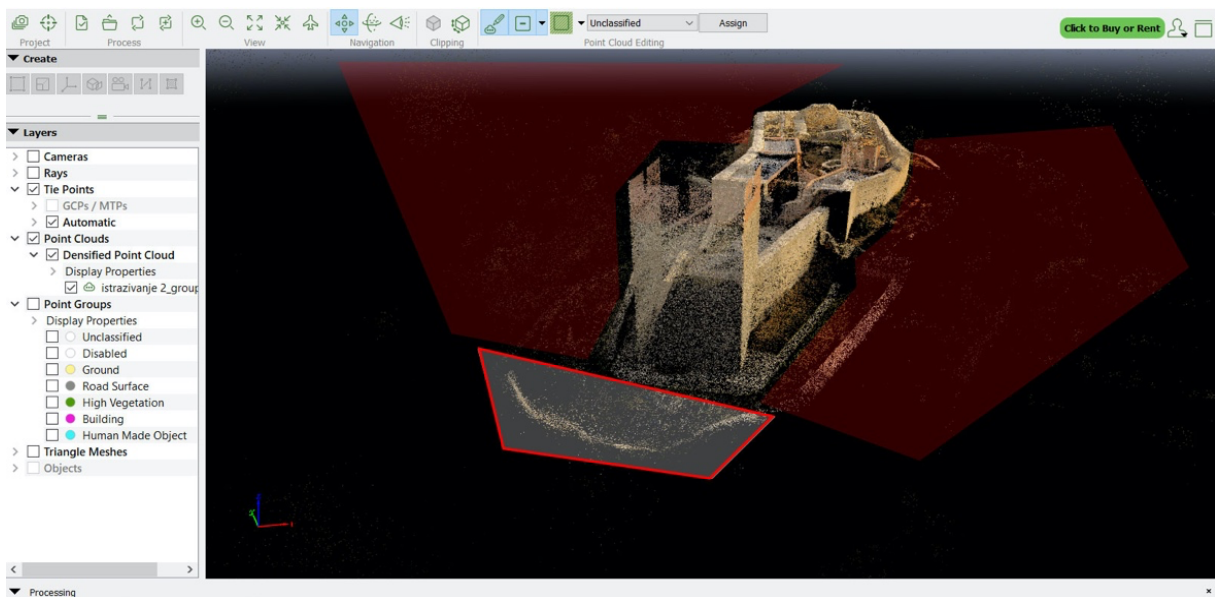
3.2 Točkasti oblak

Drugi korak rekonstrukcije trodimenzionalnog računalnog modela kreće sa traženjem korelacijskih 2d značajki, odnosno preklapanja 2d značajki fotografija. Iako algoritam pretražuje sve unesene fotografije, poseban naglasak ima na susjednim fotografijama koje su detektirane temeljem koordinata kamere, kuta i orijentacije objektiva za vrijeme snimanja. Kada se preklapanje detektira, sustav računa točnu lokaciju preklapanja preko metode triangulacije (slika 3.6). Kako program ima točnu lokaciju položaja kamere u svom lokalnom koordinatnom sustavu, povlačenjem imaginarnih linija iz objektiva kamere (poznati kut i orijentacija kamere) dolazi se do 3d lokacije značajke u koordinatnom sastavu. Skup svih 3d značajki zove se točkasti oblak i može sadržavati stotine tisuća ili milijuna značajki.



3.3 Kreacija poligona i dodavanje tekstura

Prije nego što se krene na kreaciju poligona, potrebno je očistiti šumove iz točkastog oblaka (slika 3.7). To su točke koje se vizualnom inspekcijom može utvrditi da su pogrešno locirane. Pix4D ima nekoliko alata preko kojih se klikom miša može izbrisati jedna ili više krivo postavljenih 3d značajki. Osim smetnji mogu se podešavati oštrina rubova ili zakrivljenosti površina, kao i razne manipulacije postojećih 3d značajki kao i dodavanje novih.

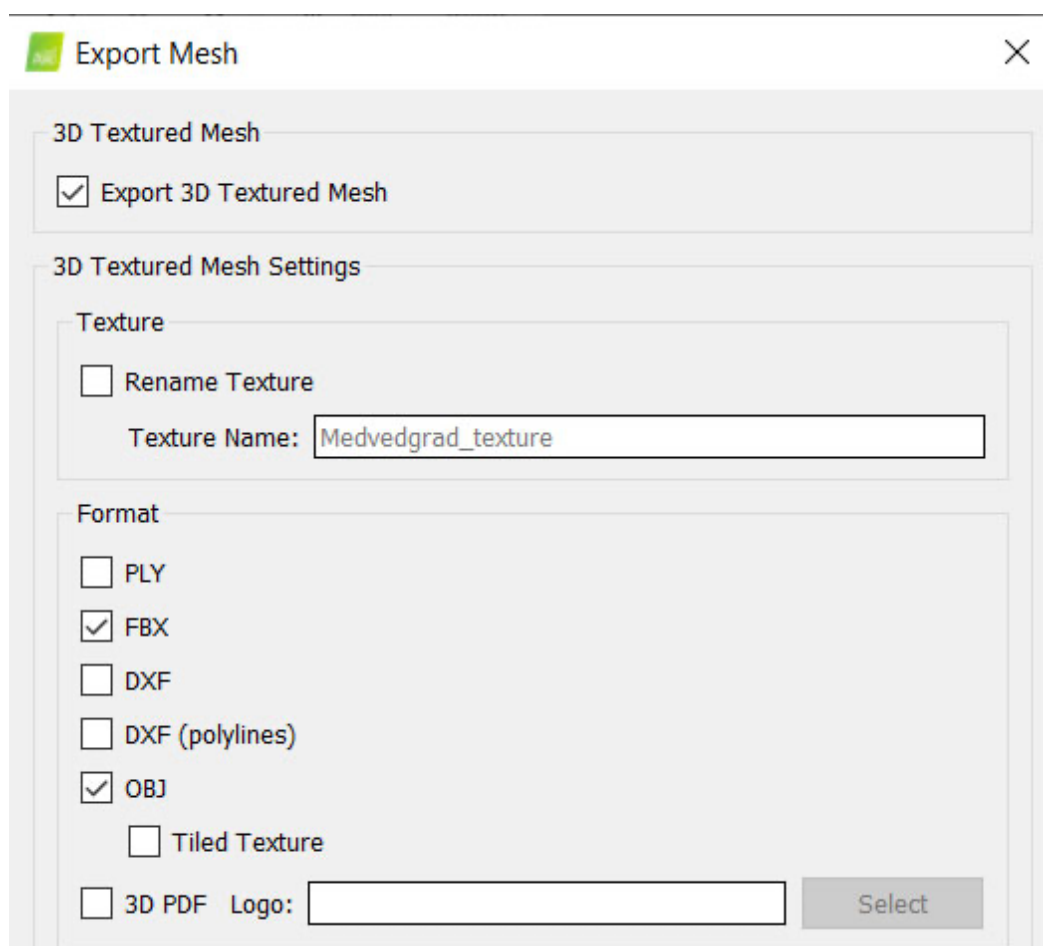


² Pix4Dmapper dokumentacija (izvor: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559369-Reprojection-error>)

Nakon što se je završila obrada točkastog oblaka slijedi dodavanje kvadratnih ili pravokutnih poligona (engl., plane). Poligoni spajaju susjedne točke (3d značajke) i ovisno o broju 3d značajki u nekom prostoru ovisi i preciznost rekonstrukcije. Završni korak je dodavanje tekstura koje su spremljene u točkastom oblaku i sadrže RGB podatke za svaki piksel fotografije.

3.4 Izvoz modela

Nakon završetka rekonstrukcije računalnog modela nudi se nekoliko mogućih koraka. Jedan od njih je manipuliranje modelom ili dodatna optimalizacija objekta. Alati za podešavanje modela omogućuju pomicanje krajnjih točaka poligona, oblikovanje rubova, povećanje, odnosno smanjenje zakrivljenosti kutnih dijelova. Također, nudi kreiranje novih poligona s kojim se može popuniti eventualne nedostatke modela. Za izvoz modela nudi veliki broj formata (slika 3.8) među kojim a je i .OBJ format datoteke koji je kompatibilan sa mnogim popularnim softverima za 3D modeliranje i softvere za razvoj računalnih igara „Gaming Engine“.



Slika 3.8 Opcije izvoza formata

4 Istražena problematika zračne fotogrametrije

U ovom poglavlju predstaviti će se problematika zračne fotogrametrije pronađene u znanstvenim radovima iz područja fotogrametrije, trodimenzionalnog rekonstruiranja i bespilotnih letjelica. Kako se radi o relativnoj novoj tehnologiji koja se dosad profesionalno primjenjivala samu u specijaliziranim industrijama, problemi se nailaze u svim fazama i aktivnostima zračne fotogrametrije. To predstavlja veliki izazov, budući da svaka aktivnost od planiranja projekta, plana leta i snimanja objekta te rada u softveru su u direktnoj korelaciji sa završnim rezultatom računalnog modela. Ukoliko se u jednom koraku napravi pogreška, teško se može naknadno ispraviti.

Fabio Remondino u radu iz 2011. godine pod nazivom: „*Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning*“, piše o problemima koji nastaju uslijed naglog povećanja pristupačnosti 3d tehnologije:

„S jedne strane, imamo pozitivan razvoj 3d tehnologije. Dostupnost novih proizvoda je svakim danom sve veća, ako uz to ubrojimo i pad cijena pristupačnosti ovih tehnologija nikad nije bila bliža. A s druge strane, ta velika ponuda ima i negativne strane, posebice u odabiru ispravnih proizvoda za željene djelatnosti i zadaće od ljudi koji nisu stručni u tom polju, ili se tek počele ili žele početi baviti. Najčešći problemi su nedostatak standardizacije terminologije, specifikacija i programa za mjerenje performansi.“[7]

Danas na tržištu postoje nekoliko desetina bespilotnih letjelica koji po specifikacijama od proizvođača na izgled imaju iste performanse. Međutim, velika razlika u cjenovnom rangu pokazuje da to ipak nije točno. Razlika najčešće dolazi u obliku kvalitete senzora kamere, GNSS prijavnika te dužine leta koje određuje kapacitet baterije. Današnja jedina standardizirana regulativa se odnosi samo na operativnu masu (C1, C2, C3) letjelice.

Kada se govori o kvaliteti GNSS prijavnika, treba napomenuti da se u profesionalne svrhe koristi zemaljske kontrolne točke (GCP). Kako je precizno zabilježiti položaj kamere jako bitno, za profesionalne potrebe ručno se implementira GCP markeri, koji uz pomoć mobilnih GPS sustava povećavaju preciznost ispod centimetra. Međutim upotreba zemaljske kontrolne točke je jako skupa i zahtjeva dodatni terenski rad, koji u nekim slučajevima može biti i dosta opasan. O tome piše u radu „*Automated and Precise 3D Building Reconstruction using UAVs*“ autora Tobiasa Kocha:

„...međutim povećanje broja korištenih zemaljskih kontrolnih točaka (GCP) na kraju neće dodatno poboljšati točnost georeferenciranja. Iako neizravno georeferenciranje s GCP-ima može postići najveću točnost, implementacija je često skupa, zahtjeva operacije na terenu i nepraktična je ili čak neizvodljiva u opasnim ili nedostupnim područjima. Na temelju iskustava iz terenskih kampanja UAV -a, Nex i Remondino (2014.) tvrdili su da GCP terenska mjerenja apsorbiraju najmanje 15% ukupnog trajanja kampanje.“[3]

U radu Koch ističe istraživanje [24] iz 2014. godine koje navodi da upotreba zemaljskih kontrolnih točaka zauzima najmanje 15% vremena u cijelom procesu prikupljanja podataka. Stoga se u istraživačkom projektu ne upotrebljava GCP sustavi, već se oslanja na interni GNSS prijavnika bespilotne letjelice.

U samom procesu prikupljanja podataka, odnosno, fotografiranja iz zraka postoji nekoliko elemenata koje se mogu optimizirati. Jedan od njih je broj vertikalnih obzora. Drugim riječima, na koliko visina letjelica mora mjeriti objekt ili teren da bi zabilježila sve potrebne podatke. Kod viših objekata to može zahtijevati nekoliko visina snimanja. Povećanjem visine snimanja smanjuje se preciznost završnog modela. U radu pod naslovom „Performance evaluation of 3d modeling software for uav photogrammetry“, autori Yanagi i Chikatsu objašnjavaju direktnu korelaciju između povećanja visine snimanja i točnosti mjerenja:

„Visina letenja i preciznost. Nadmorska visina i točnost: Rock i suradnici (2011.) potvrdili su da se preciznost (mjerenja) smanjuje kvadratnu krivulju s povećanjem visine snimanja.“[17]

„...Stoga je jasno da dok se točnost smanjuje s povećanjem visine (snimanja), normalizirana točnost raste s povećanjem visine. Stoga se može zaključiti da se točnost preklapanja (fotografija) poboljšava jer se raspon snimanja povećava s velikom visinom i sa slike se uzima više ključnih točaka (značajki).“[17]

Također, u istom radu, Yanag i Chikatsu ističu vezu između postotka preklapanja i točnosti preklapanja:

„Omjer i točnost preklapanja: Rosnell i Honkavaara (2012) provjerili su odnos između omjera preklapanja i točnosti. Pokazali su da veliko preklapanje smanjuje točnost. Međutim, pri korištenju fotografija s više prikaza, 90% preklapanja rezultira većom točnošću od 80% preklapanja. Stoga se omjer preklapanja u rasponu od 80% do 90% preporučuje pri korištenju softvera za 3D modeliranje.“[17]

Osim Yanag i Chikatsu sličnu problematiku su istraživao je i Mohammad Saadatseresht sa suradnicima [9].U radu govori o velikim volumenima fotografiranja većih površina i kako bi smanjenje korištenog postotka preklapanja drastično smanjio ukupan broj fotografija. Postoji dosta različitih mišljenja koji je optimalni postotak preklapanja fotografije. Dok Yanag i Chikatsu preporučuju 80% do 90% preklapanja, Tobias Koch u svom već citiranom radu kaže:

„Prema mnogim istraživanjima, preklapanja od najmanje 70–80% trebala bi se zadržati, pa čak i povećati za izazovna područja, poput površina s lošom teksturom ili neravnih terena (Nex i Remondino, 2014.).“[3]

Razlika između minimalnog postotka preklapanja u dvjema gore navedenih radova je 10%. Budući da pojedini projekti mogu imati preko desetine tisuća fotografija, smanjenje od deset posto može drastično ubrzati proces snimanja i same rekonstrukcije. U ovome radu istražit će se i analizirati rezultati snimanja sa 90%, 80%, 70% i 60% preklapanja.

Što se tiče softverskog djela zračne fotogrametrije, također je pronađeno nekoliko elemenata na kojima se treba dodatno raditi. Fabio Remondino piše o manjku automatizacije u radu s softverom. Napominje da radnje koje nisu dio procesa rekonstrukcije kao što su traženje značajki, kreiranje točkastog oblaka i poligona, potreban ručan i vremenski zahtjevan dodatni rad:

„Kreirani poligonski model često zahtijeva dugotrajno popravljavanje kako bi se zatvorile rupe, popravile nepravilne površine ili dijelovi koji nisu razdijeljeni. Te pogreške, vizualno neugodne, mogle bi uzrokovati nedostatke svjetla zbog pogrešne normalnosti, a 3D računalni model također će biti neprikladan za obrnuti inženjering, fotorealističnu vizualizaciju ili fizičke replike. Štoviše, područja s previše uzorkovanja treba pojednostaviti, dok se područja s nedovoljno uzorka trebaju podijeliti. Svi se ti postupci još uvijek vode ručno jer potpuno automatizirani postupci uređivanja još nisu pouzdani, osobito za složene zemaljske 3D modele.“[7]

Mnogi radovi koji se rade u softverima za rekonstrukciju nisu poznati osobama koji u njima ne radi. Određeni programi zahtijevaju selektiranje dijelova fotografija koje se ne želi rekonstruirati, upotreba takvih programa i radnji može drastično povećati trajanje projekta. Prije unosa fotografija u softver potrebno je provjeriti kvalitetu fotografija i po potrebi podesiti određene parametre ili maknuti sjenu. Svi ovi poslovi se ručno obavljaju i potreba za automatizacijom određenih procesa je nužna. O nedostatku automatizacije i standardizacije govori Armin Gruen sa suradnicima u radu „*UAV photogrammetry in remote areas - 3D modeling of Drapham Dzong Bhutan*“:

„Postojeći komercijalni softverski paketi koji se primjenjuju za fotogrametrijsku obradu podataka rijetko pružaju kvalitetnu podršku za fotografije slikane iz bespilotne letjelice jer još nisu implementirani standardizirani radni procesi i modeli senzora.“[8]

Posljedica nedostatka standardizacije u procesima zračne fotogrametrije je loša ili nepostojeća kontrola kvalitete. Kontrola kvalitete je u svim industrijama zadnja točka procesa, kontrola proizvoda ili usluga prije puštanja u rad. Kako bi se smanjio volumen obrade podataka, koji je gore navedeno, zahtjeva velike ljudske i vremenske resurse, potrebno je kvalitetno odraditi proces prikupljanja podataka. Snimanje zahtjeva ispravne postavke letjelice i kamere. Sve fotografije trebale bi biti snimljene pod istim uvjetima i istim postavkama. Nadalje, nakon snimanja, idealno u vremenu kada se letjelica na zemlji, radi promjene baterija ili završetka rada, potrebno je na samom terenu proći kroz sve fotografije i vizualno provjeriti ima li postoji li određena selekcija fotografija ne zadovoljavaju željenu kvalitetu. Na taj način se sprečava dodatan rad u samim softverima. Fabio Remondino se također u svom radu dotaknuo suštom potrebom za automatizacijom radnog procesa:

„... automatizacija u 3D obradi podataka jedno je od najvažnijih pitanja kada je u pitanju učinkovitost ili troškovi na razini proizvodnje. U ovom trenutku različita istraživačka rješenja i komercijalni paketi okrenuli su se polu automatiziranim pristupima, gdje su ljudski kapaciteti u tumačenju podataka upareni s brzinom i preciznošću računalnih algoritama. Doista, uspjeh potpune automatizacije u razumijevanju slika ili obradi oblaka točaka ovisi o mnogim čimbenicima i još uvijek je vruća tema istraživanja. Napredak obećava, ali prihvaćanje potpuno automatiziranih postupaka, procijenjenih u smislu obrađenih skupova podataka i točnosti konačnih 3D rezultata, ovisi o specifikacijama kvalitete korisnika i konačnoj uporabi proizvedenog 3D modela.“[7]

Ali nemaju svi autori pozitivno mišljenje o potpunoj automatizaciji radnog procesa fotogrametrije. Grazia Tucci sa suradnicima navodi u svom radu „*Education and training resources on digital photogrammetry*“ kako prepuštanje pune kontrole

računalu ima negativne strane u smislu dodatnog obrazovanja i stručnosti u tim poljima. Da se gubi potreba za stručnim ljudima, da ljudi koji budu upravljali tim sustavima neće znati tehničke i teorijske osnove o uslugama koje nude.

„S druge strane, komercijalni softver promiče tako učinkovite automatizirane tijekove rada da samo "pritiskom na gumb" korisnici dobivaju prilično privlačne rezultate, barem zbog svog vizualnog utjecaja. Tako mnogi krajnji korisnici misle da je dovoljno nabaviti jeftin (ili čak besplatan) softver i koristiti ga u skladu s potpuno automatskim tijekovima rada, najviše nakon čitanja priručnika za brzi početak, bez ikakve svijesti i kontrole nad svojim radnjama. Mnogi ne vide potrebu da nauče osnove fotogrametrije i možda čak i ne prepoznaju da ih ima. Nedostaje znanje o tome kako pravilno izvesti fotogrametrijski projekt i procijeniti njegovu kvalitetu. To može biti vrlo štetno ako model nije stvoren samo za vizualizaciju, već će se koristiti za arhiviranje ili projektiranje novih zgrada. S ovog gledišta, čak ni oni koji su u prošlosti imali osnovno znanje o tradicionalnoj fotogrametriji u svom obrazovanju ili profesionalnoj aktivnosti često nisu u stanju razumjeti kako funkcionira trenutna digitalna fotogrametrija.“ [5]

Pregledom istraživačkih radova i literatura možemo navesti područja zračne fotogrametrije na kojima treba dodatno proraditi. Ne samo razvojem nove tehnologiji u smislu boljih i inteligentnijih računalnih algoritama, ali isto tako i u standardizaciji uređaja, terminologije, tehnologije, te protokola radnih procesa.

Kratkih prikaz potencijalnih područja za povećanje efikasnosti i optimalizacije:

- Izbor hardvera (bespilotne letjelice), softvera (3D rekonstrukcija) i ispravne metodologije snimanja prema namijenjenoj aktivnosti;
- Standardizirati radni proces (engl., workflow) u svim koracima zračne fotogrametrije;
- Ubrzati aktivnosti prikupljanja podataka sa što više automatizacijskih procesa bez gubljenja kvalitete završnog modela;
- Zamijeniti upotrebu zemaljskih kontrolnih točaka (GCP) sa kvalitetnim internim GNSS prijamicima;
- Veća interaktivnost i manipulacija u koracima 3d rekonstrukcije (točkasti oblak, poligoni, teksture).

5 Istraživački projekt

U ovom poglavlju nalazi se detaljan opis svih radnih procesa provedenih u istraživačkom rada. Zračna fotogrametrija sastoji se od pripreme faze, terenskog mjerenja, obrade fotografija u specijaliziranim softverima te 3d rekonstrukcija i analiza rezultata u Pix4Dmapper softveru.

Inicijalna ideja je bila kreiranje završnog 3d računalnog modela za svaku metodu istraživanja. Na modelima bi se provodila vizualna analiza preko anketa, te bi rezultat bio rangiranje modela prema percepciji ispitanika. Detaljnim istraživanjem zaključilo se da postoji bolja znanstvena metodologija koja je opisana u ovom poglavlju.

5.1 Ciljevi istraživanja

Istraživačkom projektu se pristupilo na dva načina. Prvi je koristiti opremu plan i program koja je pronađen i preporučena u istraženoj literaturi koja je navedena u prethodnom poglavlju ovoga rada. Drugu pristup je kreirao autor temeljem istraživanja literatura na području fotogrametrije, bespilotnih letjelica i korelacijskih tehnologija.

Svrha i cilj istraživanje je odrediti optimalni i efikasniji način rada u procesu prikupljanja podataka bez gubljenja kvalitete koja se kvantitativno može mjeriti prema ukupnom broju ključnih točaka (značajki) po fotografiji i ukopanom broju ključnih točaka u točkastom oblaku. Pod procese prikupljanja podataka spadaju sve faze terenskih radnji (terensko mjerenje bespilotnom letjelicom sa korelacijskim aktivnostima) kao i sama priprema tih aktivnosti.

Doprinos ovoga rada je standardizirani radni protokol koji se temelji na optimizaciji procesa prikupljanja podataka zračne fotogrametrije.

5.2 Lokacija i predmet istraživanja



Slika 5.1 Medvedgrad

Prikupljanje podataka se izvodi metodom fotografiranja iz bespilotne letjelice. Predmet snimanja je stari grad (utvrda) Medvedgrad (slika 5.1) koji se nalazi na zagrebačkom Sljemenu. Medvedgrad je bio naseljav sve do katastrofalnog potresa 1950. godine od kada je napušten od tadašnjih vladara Gregorijanaca³. Od tada utvrda na Sljemenu je ostavljena na milost vremenskih prilika koje stoljećima polako uništava. Iako je lokacija Medvedgrada vidljiva iz skoro svih kvartova grada Zagreba, tek je 1979. godine krenulo arheološko istraživanje u sklopu kojeg je bilo i konzervacija zidina i rekonstrukcija određenih dijelova tvrđave. Na južnom djelu grada nalazi se prepoznatljivi toranj, odnosno, kula ispod koje je 1994. godine podignut „Oltar domovine“.

5.3 Istraživački problemi

Problematika zračne fotogrametrije navedena je u četvrtom poglavlju ovoga rada. U njemu su detaljno prikazani problemi koje su pronašli autori znanstvenih radova. Spektar je veliki a u ovom istraživačkom projektu testirat će se hipoteze iz nekoliko radnih procesa zračne fotogrametrije:

- I. Utjecaj povećanja horizontalne udaljenosti kamere na broj detektiranih 2d značajki po fotografiji.

Upotrebom klasičnih digitalnih kamera ili kamera na mobilnim uređajima kvaliteta fotografije u direktnoj je korelaciji sa nekoliko čimbenika: vremenski uvjeti (osvjetljenje), senzor kamere, stabilnost kamere i udaljenost odnosno korištenje digitalnog ili optičkog zuma. Upotrebom takvih uređaja, te povećanjem udaljenost predmeta snimanja kvaliteta fotografije će padati. Dolaskom novih tehnologija senzora, raste i udaljenost s koje se može slikati bez većeg gubitka (vidljivog) kvalitete fotografije.

Bespilotna letjelica koja se koristi u ovom istraživanju ima CMOS senzor od 12 megapiksela razlučivosti, što rezultira fotografiju dimenzija 4000x3000 piksela. Senzor je montiran na stabilizatoru u sve tri osi koji poništava vibracije četiri rotor motora. Sve gore navedene činjenice uz fotografiranje u normalnim vremenskim uvjetima trebalo bi omogućiti fotografiranje sa većih udaljenosti bez gubitka na detekciji značajki po fotografiji.

Prijašnja istraživanja [17] pokazala su korelaciju povećanja visine snimanja i preciznost preklapanja. Ovim istraživanjem se želi testirati krajnja granica korištene opreme i tehnologije, odnosno, najveća horizontalna i vertikalna udaljenost od objekta bez gubitka kvalitete. To je poseban problem kod visokih objekata gdje se zahtjeva snimanje sa više visina kako bi se pokrili svi dijelovi objekta. Odmicanjem bespilotne letjelice od predmeta snimanja te podizanje na veću visinu može se postići puni kadar. Odnosno, da cijeli vertikalni dio objekta bude u kadru kamere, što eliminira potrebu za snimanjem na više visina.

- II. Utjecaj različitih postotaka preklapanja fotografija na ukupan broj 3d značajki u globalnom točkastom oblaku

Preklapanje je proces u samom softveru za rekonstrukciju, i u direktnoj je korelaciji s brojem detektiranih značajki po fotografiji. Kod detekcije preklapanja fotografija, sustav koristi metodu triangulacije za izračun 3d pozicije značajke u koordinatnom sustavu.

³ Službena stranica Parka prirode Medvedgrad (<https://www.pp-medvednica.hr/turisticka-ponuda/medvedgrad/>)

Preko preklapanja značajki izrađuje se globalni točkasti oblak, koji je treći korak u rekonstrukciji 3d objekta.

Problem kod smanjenje postotka preklapanja fotografija sa 90% na 85% ili sa 80% na 75%, je pad broja preklapanja značajki, jer se manja površina fotografija analizira. Međutim, koristeći se I. hipotezom, povećanjem razlučivosti kamere, povećat će se i broj detektiranih značajki po fotografiji. Povećanjem broja značajki trebalo bi rezultirati i veći broj preklapanja značajki.

U poglavlju istraživačke problematike navedena su dva rada sa različitim zaključkom preporučenog postotka preklapanja fotografija. Suradnici Yanag i Chikatsu¹¹ navode da 90% preklapanje rezultira bolje rezultate od 80%, te preporučuju raspon preklapanja između ta dva postotka (80%-90%). Tobias Koch [3] pak navodi, minimalne iznose preklapanja od 70% do 80%. Razlika od 10% u zračnoj fotogrametriji je dosta velika. Za ovo istraživanje testirat će se četiri različita omjera preklapanja: 90%, 80%, 70% i 60%.

III. Utjecaj planova leta bespilotne letjelice na broj detektiranih 3d značajki u globalnom točkastom oblaku.

Planovi leta povezani su s odabranim brojem preklapanja fotografija. Mrežasto pokrivanje će snimiti najviše fotografija jer pokriva najveću površinu. Veći broj fotografija rezultirat će većim brojem preklapanja i preciznijim točkastim oblakom. Kružno gibanje oko središta, koje će biti sredina Medvedgrada, je vremenski najbrže jer radi jedan izduženi krug ili elipsu. Međutim, problem ove metode je što ne pokriva unutrašnjost Medvedgrada, što će vjerojatno rezultirati manjem broja 3d značajki u sredini globalnog točkastog oblaka, odnosno ova metoda će imati manji ukupan broj 3d značajki točkastog oblaka. Autorov plan leta, hibrid dvije postojeće metode, mogao bi rezultirati zadržavanjem ukupnog broja 3d značajki točkastog oblaka i smanjiti ukupno vrijeme leta.

Na svim istraženim komercijalno dostupnim softverima za upravljanje i planiranje plana leta bespilotne letjelice nalaze se dva predefinjirana plana leta: mrežasto pokrivanje i kružno gibanje oko središnje točke. Ova dva načina pokrivaju dobro većinu terena i građevina, međutim u slučaju Medvedgrada, radi se o izduženoj, pravokutnoj građevini. Mrežasto pokrivanje vremenski je najzahtjevnije i dolazi do problema učestale promjene baterija. Kružno gibanje oko središta Medvedgrada snima samo iz bočnih pozicije. Nije uključeno tlocrtno snimanje, što predstavlja problem slabije detekcije značajki u središnjem dijelu Medvedgrada. Autor je kreirao hibrid nabrojene dvije metode, temeljene na individualnim geometrijskim obilježjima same građevine. Istraživanje će bilježiti broj detektiranih 3d značajki u globalnom točkastom oblaku i ukupnom vremenu leta.

5.4 Hipoteze

- I. Povećanjem horizontalne udaljenosti neće doći do drastičnog pada (<5%) 2d značajki po fotografiji
- II. Ukupan broj 3d značajki točkastog oblaka će padati smanjenjem postotka preklapanja

- III. Hibridni (autorov) plan leta će rezultirati sličnim ukupnim brojem (<5%) 3d značajki u globalnom točkastom oblaku kao i plan leta mrežastim pokrivanjem, uz ukupno kraće vrijeme letenja. Plan leta kružnim vremena proizvest će najmanji broj 3d značajki.

5.5 Korištena oprema

Istraživački projekt sastoji se od terenskog rada gdje su se prikupljali podaci, odnosno vršilo fotografiranje Medvedgrada. Za snimanje koristila se bespilotna letjelica DJI Phantom 3 Standard (slika 5.2). Letjelica spada u lak-srednju kategoriju mase nešto više od 1.2 kilograma uključujući bateriju. Pogon mu pružaju četiri motora-rotora (engl., „quadcopter“) maksimalne horizontalne brzine od 16m/s. Maksimalna brzina uspona je 5m/s, a spuštanja 3m/s. Opremljen je CMOS senzorom od 12 megapiksela, 94 stupnjeva polja snimanja s f/2.8 objektivom. Kamera je montirana na stabilizator (engl., „gimbal“) koji pruža stabilizaciju na sve tri osi. Kamera se može rotirati vertikalno prema tlu za 90 stupnjeva, te horizontalno za 30 stupnjeva na svaku stranu. Kamera je trajno implementirana na letjelicu te nije moguće zamijeniti za bolji senzor. Letjelica se kontrolira preko daljinskog upravljača preko frekvencijskog raspona od 5.725 - 5.825 GHz. Maksimalni horizontalni domet je 1000 metara i maksimalna visina je 120 metara. Koristi DJI „Intelligent Flight“ bateriju kapaciteta 4480mAh što omogućuje oko 22 minute leta.



Slika 5.2 DJI Phantom 3 Standard

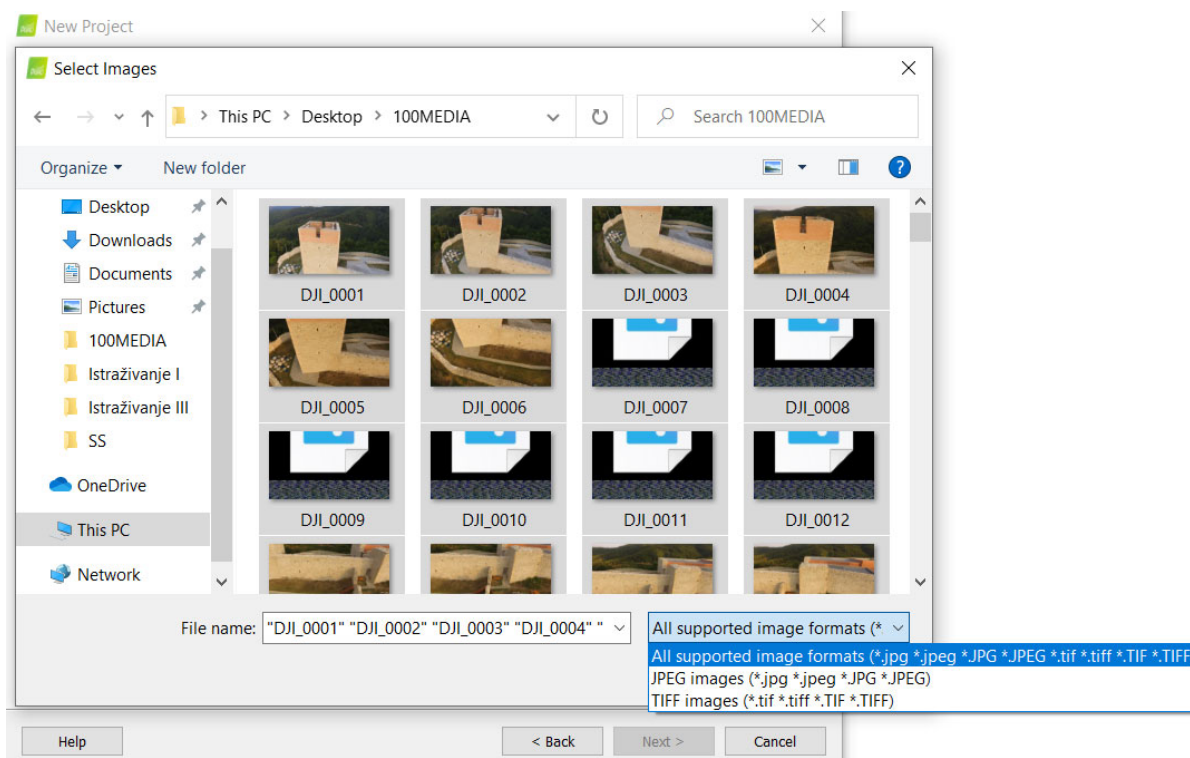
Jedna od nedostataka CMOS senzora kamere je „rolling shutter camera“ metoda snimanja. Odnosno senzor ne bilježi cijeli kadar od jednom već u pokretu bilježi horizontalne i vertikalne piksele. To predstavlja problem kod zračne fotogrametrije jer za snimanje potpuno oštre slike, čak i uz kvalitetan stabilizator treba potpuno eliminirati horizontalnu i vertikalnu brzinu letjelice. To dakako, usporava rad prikupljanja podataka.



Slika 5.3 DJI GO (lijevo) i Pix4Dcapture (desno)

Phantom 3 Standard posjeduje interni GNSS prijamnik koji se spaja na GPS i GLONASS navigacijske satelite. Za vrijeme leta može biti povezan sa dvadeset satelita što rezultira jako preciznim podacima o trenutnoj lokaciji koji se bilježe u metapodatke fotografija kao i u internu memoriju. Za kontrolu letjelice koristila se DJI GO (slika 5.3) aplikacija na mobilnom uređaju iPhone XS Max. Za planiranje i proces prikupljanja podataka koristila se mobilna aplikacija Pix4Dcapture (slika 5.3) koja pruža veće funkcije prilagođavanja leta, putanje, brzine, automatsko fotografiranje prema odabranom postotku preklapanja fotografija.

Prije unosa fotografija u softver za rekonstrukciju, svaka fotografija zasebno se je provjerila u Adobe Photoshop 2021 softveru za obradu fotografija. Rekonstrukcija fotografija u 3d računalni model radila se u Pix4Dmapper softveru.



Slika 5.4 Formati uvoza fotografija

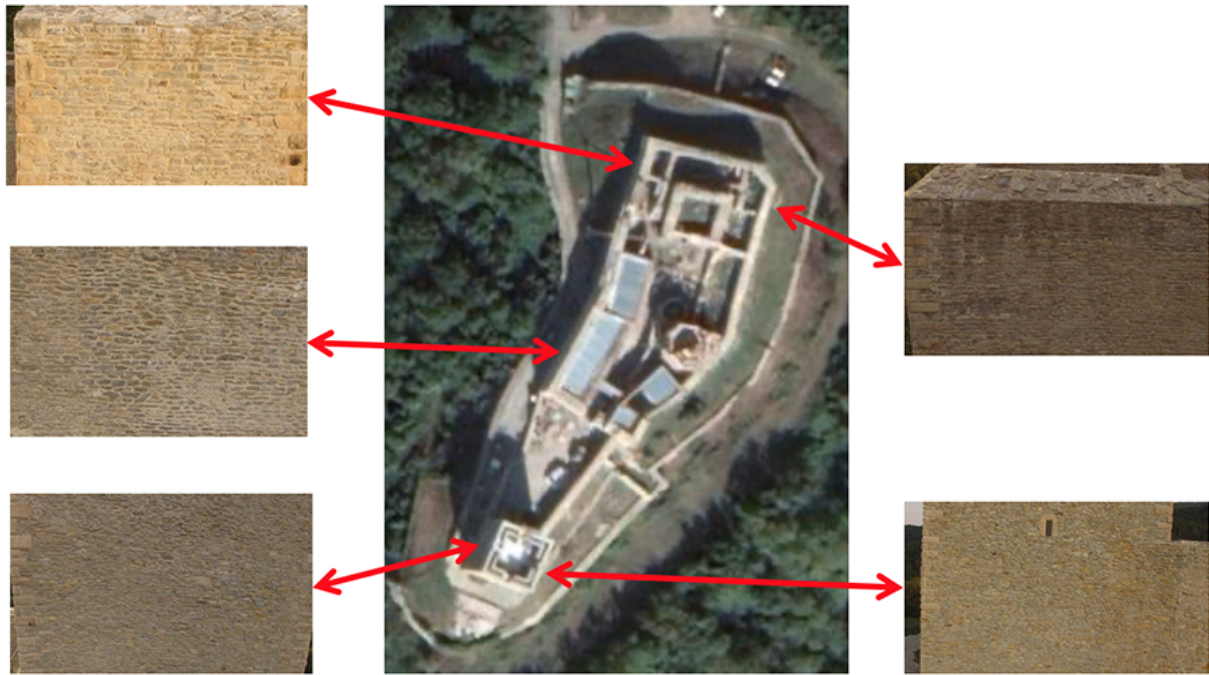
Pix4Dmapper je najpopularniji softver za obradu slika na tržištu. Softver podržava samo dva formata fotografija .jpg i .tif (slika 5.4). Automatski unosi koordinate lokacije kamere iz metapodataka svake fotografije. Program nudi bogatu paletu analitičkih alata (podaci o preklapanju, broju značajki, mjerenje površina, volumenu, udaljenosti, nadmorskoj visini) i alata za manipulaciju podataka ovisno u kojem se procesu radi (točkasti oblak, ortomozaik, digitalne površinske modele, 3D model sa teksturom, toplinske karte i indeksne karte).

5.6 Metodologija istraživanja

Istraživanje se sastoji od terenskog mjerenja bespilotnom letjelicom i obrade i analize prikupljenih podataka u Pix4Dmapper-u i Adobe Photoshop 2021 softveru. Za svaku od četiri istraživanja radila su se zasebna mjerenja i analize. Temeljem toga određene je optimalni redoslijed istraživanja problema navedeni u poglavlju 5.3. „Istraživački problemi“. Za dobivanje reprezentativnih uzoraka (fotografija), korištene su identične postavke kamere u svim sesijama snimanja. Detalji oko postavaka i svih drugih popratnih aktivnosti opisani su u poglavlju „Radni procesi istraživanja“.

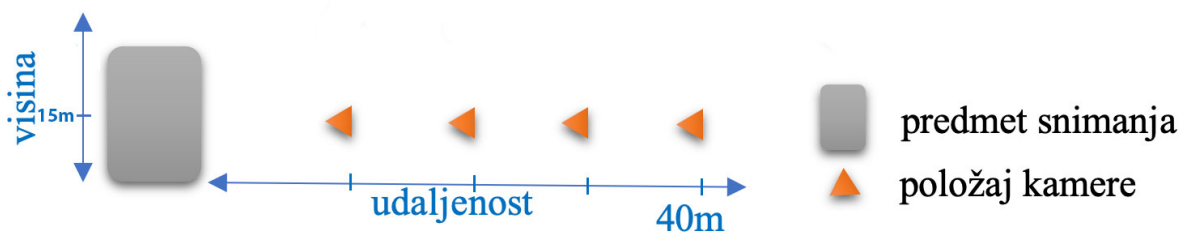
- I. Utjecaj povećanja horizontalne udaljenosti kamere na broj detektiranih ključnih točaka (značajki) po fotografiji.

Za prvi istraživački problem izabran je utjecaj (horizontalne) daljine položaja kamere na broj detektiranih ključnih točaka (značajki) na fotografiji, koje izračunava Pix4Dmapper softver. Istraživanje se obavljalo na pet različitih lokacija (slika 5.5).



Slika 5.5 Lokacije istraživanja

Horizontalna udaljenost je iznosila 10, 20, 30 i 40 metara. Vertikalna visina u odnosu na tlo je 15 metara, duplo manja od najviše točke Medvedgrada. Grafički prikaz položaja kamere od predmeta slikanja je prikazan na slici 5.6.



Slika 5.6 Položaji kamere

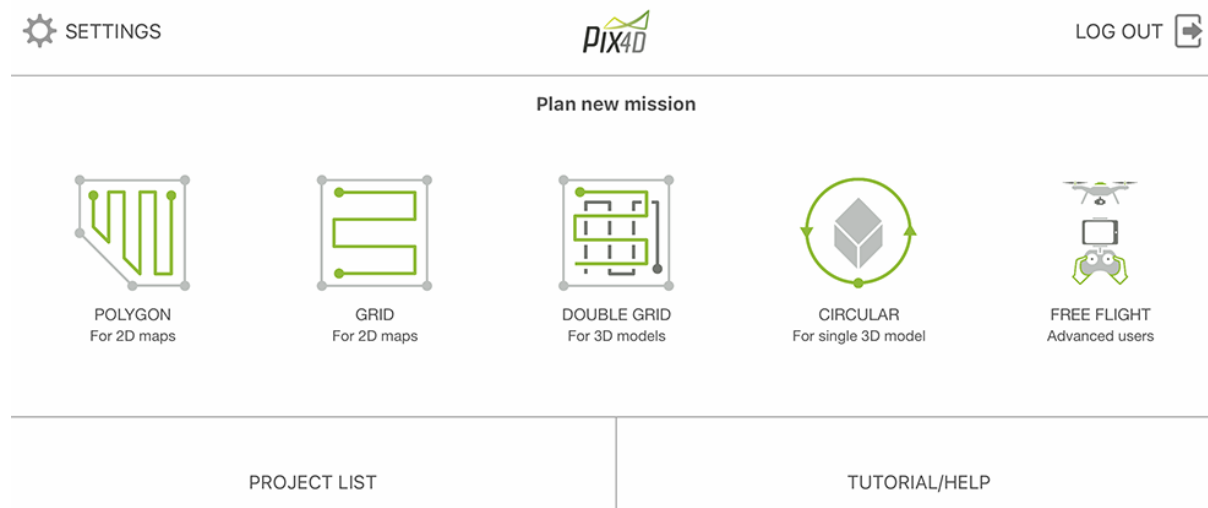
Fotografija snimljena sa 10 metara udaljenosti smatra se temeljnom fotografijom. Kako slikanje sa većih udaljenosti pokriva i veći kadar, u softveru Adobe Photoshop 2021 radila se dodatna obrada fotografija, odnosno „rezanje“ (engl. „crop“) fotografija kako bi se dobio kadar iz temeljne fotografije. Tim dodatnim procesom omogućuje mjerenje iste površine i reprezentativniji rezultati. Na svih 20 fotografija, u Pix4Dmapper softveru, rađena je detekcija ključnih točaka (2d značajki) po fotografiji. Dodatnom analizom prikazani su odnosi udaljenosti i značajki fotografije.

Dobiveni rezultati je maksimalna udaljenost s koje se može snimati bez gubljenja kvalitete u detekciji. Dobiveni parametri horizontalne udaljenosti korišteni su za planiranje istraživanja za preostale dvije točke istraživanja.

II. Utjecaj različitih postotaka preklapanja fotografija na ukupan broj 3d značajki u globalnom točkastom oblaku

Za precizno snimanje prema željenim parametrima koristila se mobilna aplikacija Pix4Dcapture (slika 5.7). U programu se podešeni svi parametri leta za svaku aktivnost snimanja. Uključujući i postotak preklapanja fotografija. Zasebno su se snimala četiri postavke preklapanja fotografija: 90%, 85%, 80% i 75%. Izabran je rešetkasta metoda

snimanja budući da ova metoda snima zahtjeva najviše fotografija, koje rezultiraju najpreciznijim rezultatima. Беспилотна летјеліца је снимала са 50 метара висіне. За сваку од четіри поставке преклапања фотографіја, у Pix4Dmapper софтверу ради се реконструкціја глобалног тоčkастог облака. Анализира се укупан број 3d значајки на глобалном тоčkастом облаку у односу на постотак преклапања фотографіја.



Slika 5.7 Pix4Dcapture - početno izbornik

- III. Utjecaj planova leta беспілотне летјеліце на број детектіраних 3d значајки у глобалном тоčkастом облаку.

Preko aplikacija Pix4Dcapture kreirane su tri plana leta za snimanje Medvedgrada. Prva dva su predefiniрани u samom софтверу: mrežasto pokrivanje i kružno gibanje oko središnje točke. Autor je kreirao hibrid gore navedenih planova koja su temeljena na individualnim geometrijskim obilježjima same građevine. Na svim metodama su identične postavke преклапања фотографіја. U pix4Dmapper софтверу kreira се глобални тоčkasti oblak за све три plana leta zasebno, на којима се мјери укупан број 3d значајки.

5.7 Radni proces istraživanja

Radni proces započinje pripremnom fazom. Provjerama valjanosti licenci za Pix4Dmapper софтвер i Adobe Photoshop 2021. Kada се потврди употребљивост софтверског sustava, kreću pripreme за теренски рад, односно првом иницијалном посјету локацији snimanja. Grafički prikaz radnog procesa provedbe prikupljanja podataka i софтверска obrada prikazana је на slici 1.

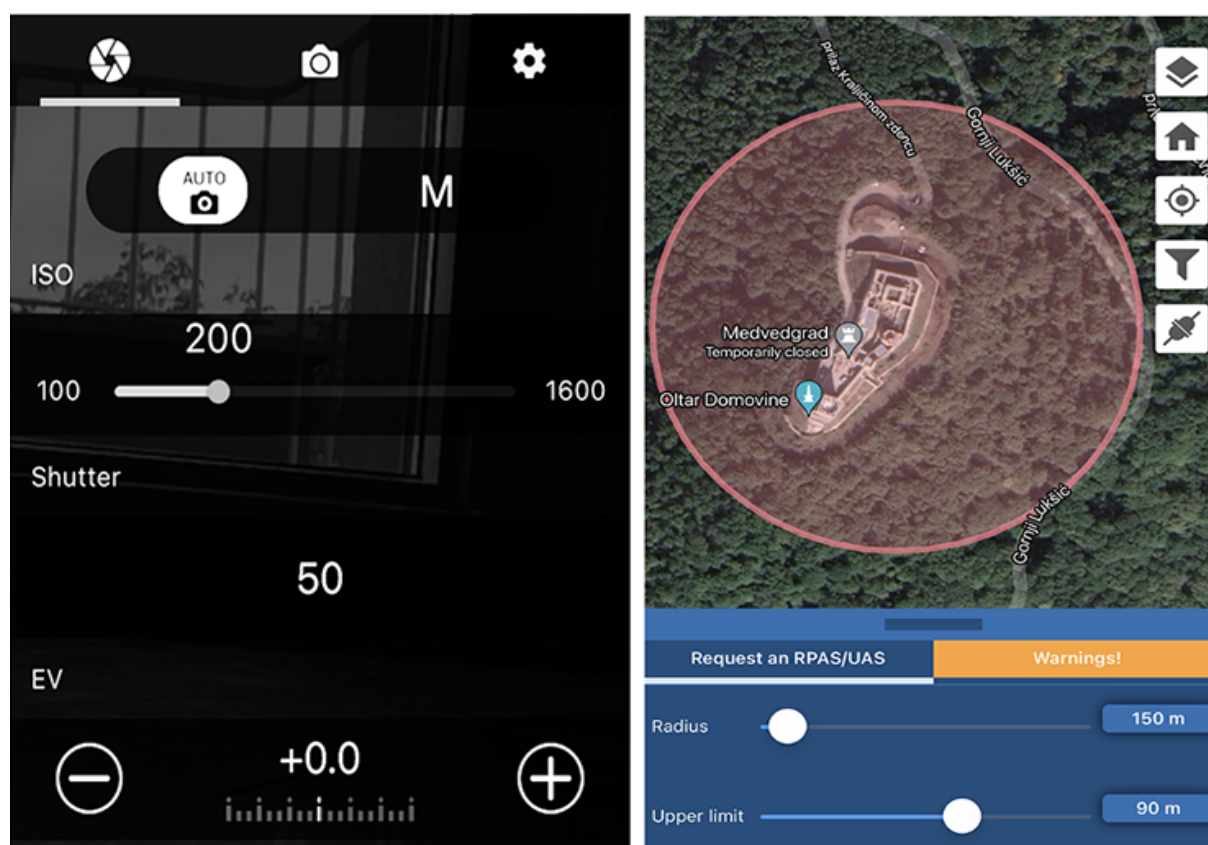
5.7.1 Inicijalna provjera lokacije

Prvi posjet Medvedgradu bio је 25 svibnja 2021. Tom prilikom provjeravalo се неколіко elemenata ključno за сигурност i uspješnost snimanja. Kako је по правилнику propisano да управитelj летјеліцу не смије изгубити из vida, потребно је било provjeriti pristupačne ceste ili putove oko Medvedgrada. Vizualnom inspekcijom utvrđena је mogućnost letenja oko Medvedgrada без губитка vizualnog kontakta са летјеліцом. Друга stavka сигурности је provjera висіне snimanog predmeta i околних mogućih prepreka. Najveći dio Medvedgrada је kula, која се налази на јужном djelu visoka nešto više од 29 metara. Други dijelovi nisu veći од 20 metara., такоđer, у околници tvrđave nisu забилежени остале visinske prepreke природног или ljudског поријекла.

Zadnja stavka vezana sa sigurnost letjelice je provjera postojanje eventualnih uređaja koji mogu ometati frekvencijsku vezu između daljinskog upravljača i bespilotne letjelice. Tu se obično radi o dalekovodima, trafostanicama, odašiljačima, radarima, antenama i ostalim sustavima koje emitiraju jaka elektromagnetska zračenja.

5.7.2 Priprema faza

Prije dolaska na lokaciju i početak vršenja radnji snimanja, potrebno je odraditi nekoliko pripremnih radnji vezano za bespilotnu letjelicu. Prije svega podešavanje postavaka kamere. To se vrši preko mobilne aplikacije DJI GO, podešeni su sljedeći parametri (slika 5.8) kamere: ISO 200, brzina zatvarača kamere (engl., shutter) 1/50, otvor blende je fiksiran f/2.8, RAW format datoteke fotografija, predefiniране sunčane postavke balansa bijele boje, uključen histogram za provjeru kvalitete slikanih uzoraka. Za svako od tri zasebne sesije mjerenja provjereno je vizualno stanje bespilotne letjelice te stanje baterija. Kada su zadovoljeni svi uvjeti preko mobilne aplikacije *AMCPortalMobile* (slika 5.8) rezervira se lokacija, termin i planirane aktivnosti (visina i promjer snimanja) snimanja hrvatskoj kontroli zračne plovidbe. Odobreni parametri i termini moraju se poštivati sukladno propisima Republike Hrvatske.

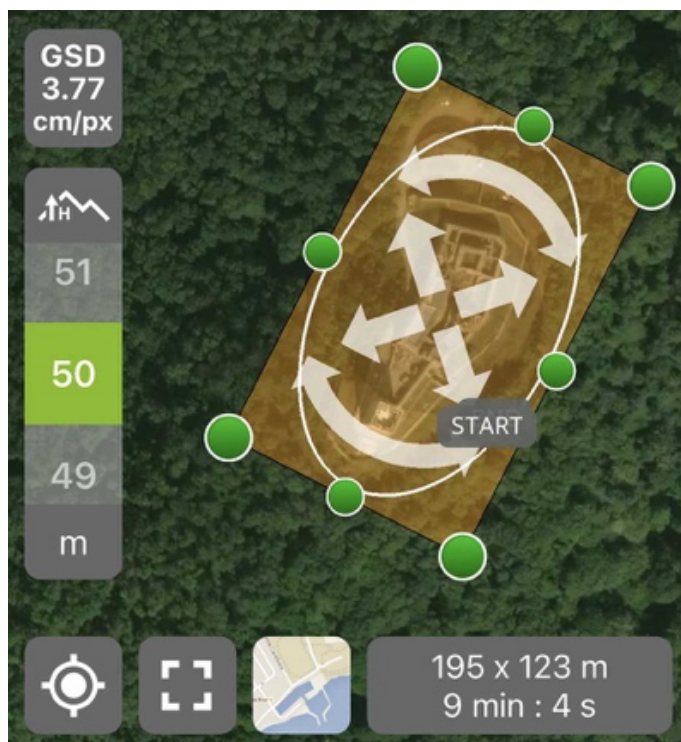


Slika 5.8 Postavke kamere (lijevo) i AMC portal (desno)

5.7.3 Snimanje uzoraka

U vrijeme odobrenog termina započinju letačke aktivnosti. Prvo snimanje za prvu (I.) točku istraživanja događalo se 20. lipnja. 2021. od 6:45, do 8:15 sati. Prije specifičnog snimanja 20 fotografija na pet različitih lokacija, snima se referentni uzorak. Odabrana metoda snimanja je kružno gibanje oko centra Medvedgrada. Odabran je

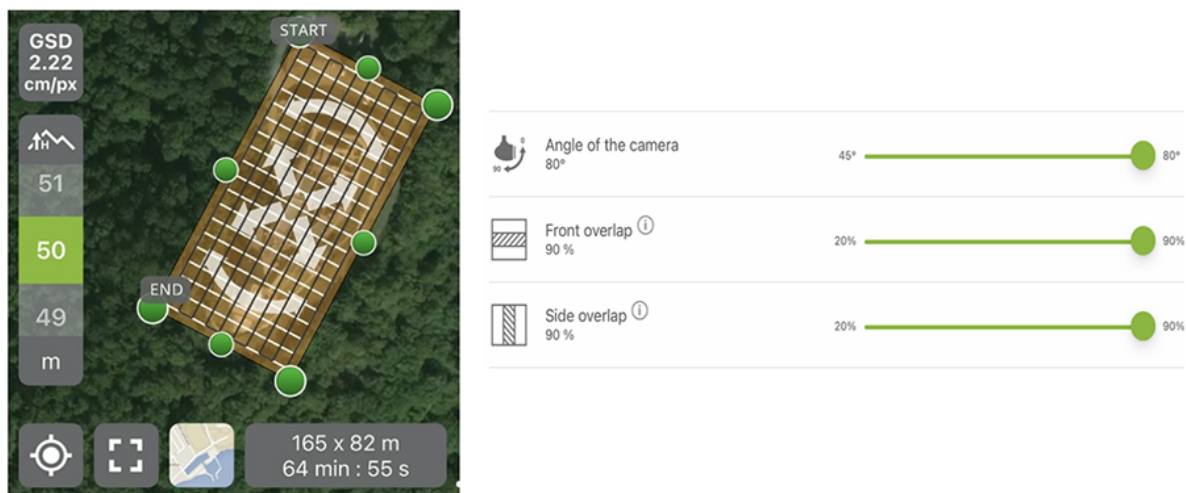
90 postotno preklapanje fotografija, uz brzinu horizontalnog letenja od 3m/s, na visini od 50 metara. (slika 5.9).



Slika 5.9 Snimanje referentnog uzorka

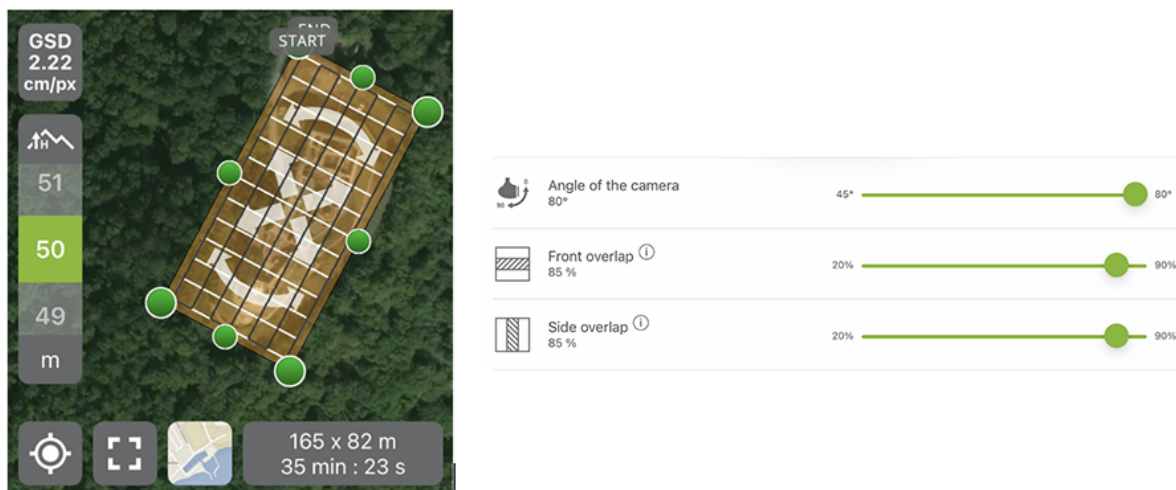
Potom se krenulo na snimanje na pet različitih lokacija Medvedgrada, prikazano na slici 16. Horizontalna udaljenost bespilotne letjelice od predmeta snimanja iznosila je 10m, 20m, 30m i 40m, na visini od 15 metara. Za svaku lokaciju prikupljene su po dvije fotografija za svaku udaljenost u slučaju da neka od originalnih fotografija ne zadovoljan kvalitetom. U analizi koristit će se jedna fotografija po udaljenosti, što ukupno iznosi 20 fotografija za točki jedan (I.) istraživanja.

Vrijeme zakazanog i odrađenog snimanja za točku II. istraživanja je 26. lipnja 2021. u 7:00 do 9 sati i 27. lipnja 2021 od 7:30 do 9 sati. Plan leta je kreiran u Pix4Dcaptura aplikaciji.



Slika 5.10 Mrežasto snimanje sa 90% preklapanja

Korišten je predefiniрани „rešetkasti“ plan letenja na 50 metara visine, sa sporom horizontalnom brzinom (engl. „Slow+“) bespilotne letjelice i kutom snimanja od 80 stupnjeva.. Za prvo snimanje podešeno je na 90% preklapanja fotografija (slika 5.10). Cijela letačka operacija trajala je oko 65 minuta, u kojoj su uključena dva slijetanja radi promjene baterije. Ukupno je korišteno tri baterije punog kapaciteta. Snimanje na 85% preklapanja fotografija (slika 5.11.) trajalo je oko 37 minuta sa jednom promjenom baterije.



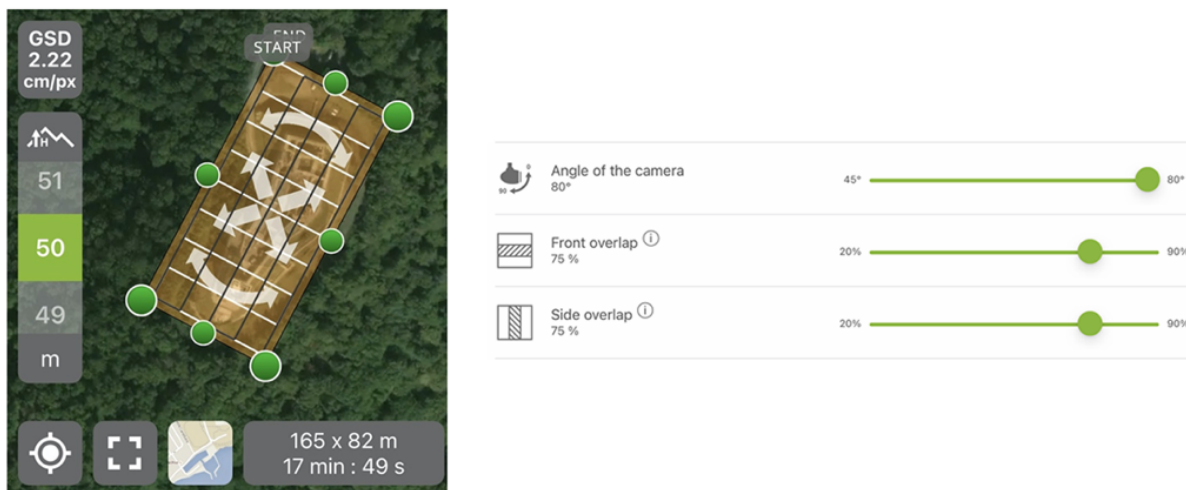
Slika 5.11 Mrežasto snimanje sa 85% preklapanja

Treće snimanje na 80% preklapanja (slika 5.12) radilo se dan poslije, nedjelja 27. lipnja 2021. Trajalo je oko 24 minute uz jednu promjenu baterije.



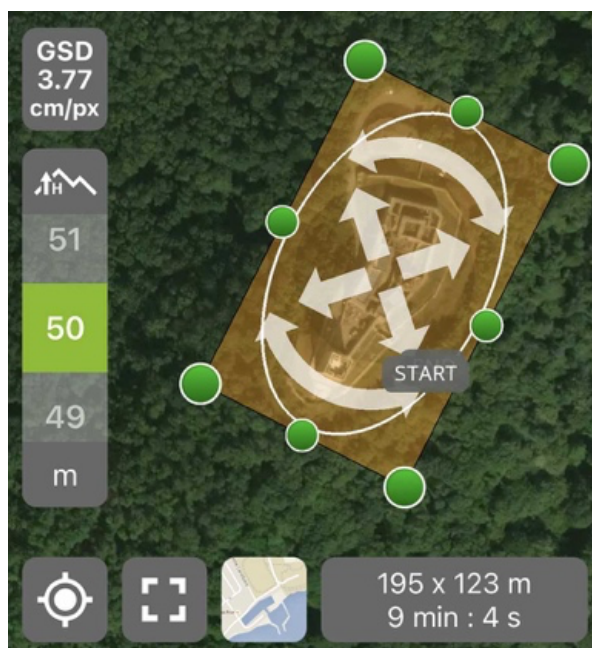
Slika 5.12 Mrežasto snimanje sa 80% preklapanja

Zadnje četvrto snimanje, na 75% preklapanja (slika 5.13), snimljeno sa jednim punjenjem baterije u ukupnom trajanju od 18 minuta.



Slika 5.13 Mrežasto snimanje sa 75% preklapanja

Treća i posljednja točka istraživanja (III.) snimale su u subotu 3. srpnja 2021. u terminu od 7:00 do 9:00. Postupak je identičan kao za drugu točku istraživanja. Tri modela plana leta, podešena su koristeći Pix4Dcaptur aplikaciju. Prva odabrana metoda plana leta je „mrežasto snimanje“ na visini od 50 metara.



Slika 5.14 Kružno gibanje oko središnje točke

Izabran je najoptimalniji postotak preklapanja (85%) fotografija na temelju dobivenih rezultata iz točke dva (II.) istraživanja. Ukupno trajanje leta iznosilo je 24 minute sa jednom promjenom baterije. Drugi model plana leta izabrano je kružno gibanje oko središta Medvedgrada (slika 5.14). Visina leta je namještena na 50 metara. Let je trajao malo više od devet minuta. Zadnji model plana leta, koji je kreirao autor (slika 5.15) korišteno je ručno unošenje „letačkih točaka“ (engl., waypoints) preko DJI GO aplikacije. Visina leta je bila 50 metara i trajala je nešto više od 15 minuta.



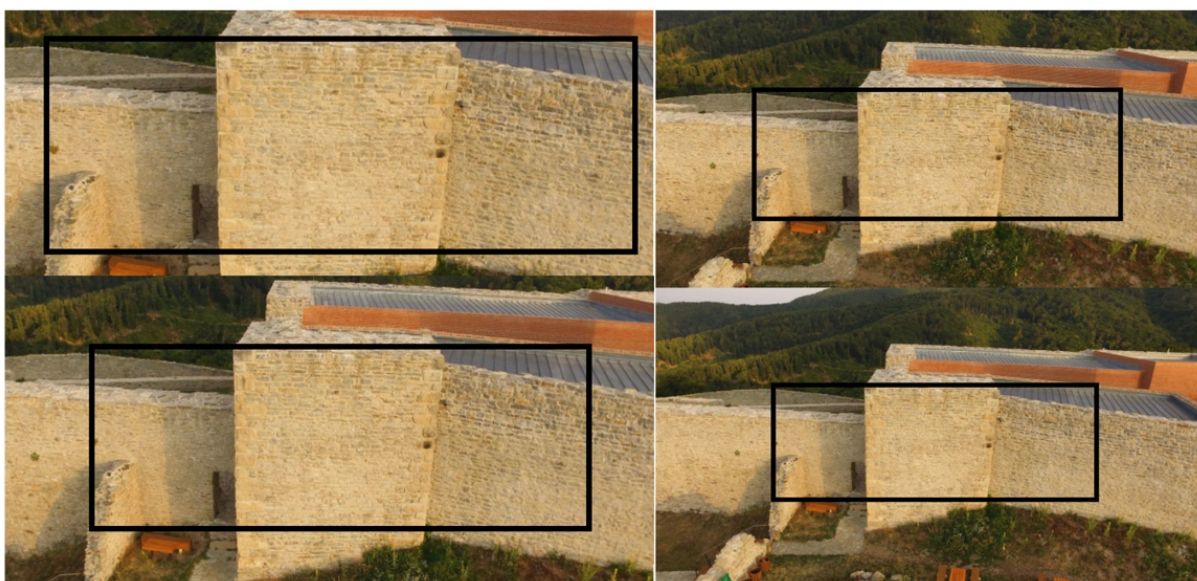
● Početna točka ● Završna točka

Slika 5.15 Autorov plan leta

Nakon svake sesije snimanja, izvršava se kontrola kvalitete snimljenih fotografija. Ukoliko određene fotografije ne zadovoljavaju uvjete u smislu osvjetljenja, kontrasta, oštine ili točne pozicije, snimanje tih fotografija se ponavlja.

5.7.4 Obrada podataka

Nakon svake završene aktivnosti snimanja, snimljene fotografije sa microSD kartice (SanDisk Ultra 32GB) prebacuju se na interni SSD prijenosnog računala Macbook Pro 2015 Retina. U softveru Adoba Photoshop 2021 otvaraju sve snimljene fotografije koje su spremljene u DNF (engl., „*digital negative file*“), ili raw datoteka koju sačinjavaju svi izvorni medijski podaci i metapodaci. Nakon provjere fotografija i eventualne određene obrade (kontrast, osvjetljenje, sjena) fotografije se spremaju u zasebnu mapu u .jpg formatu. Format koji je kompatibilan sa softverom za 3d rekonstrukciju (Pix4Dmapper).

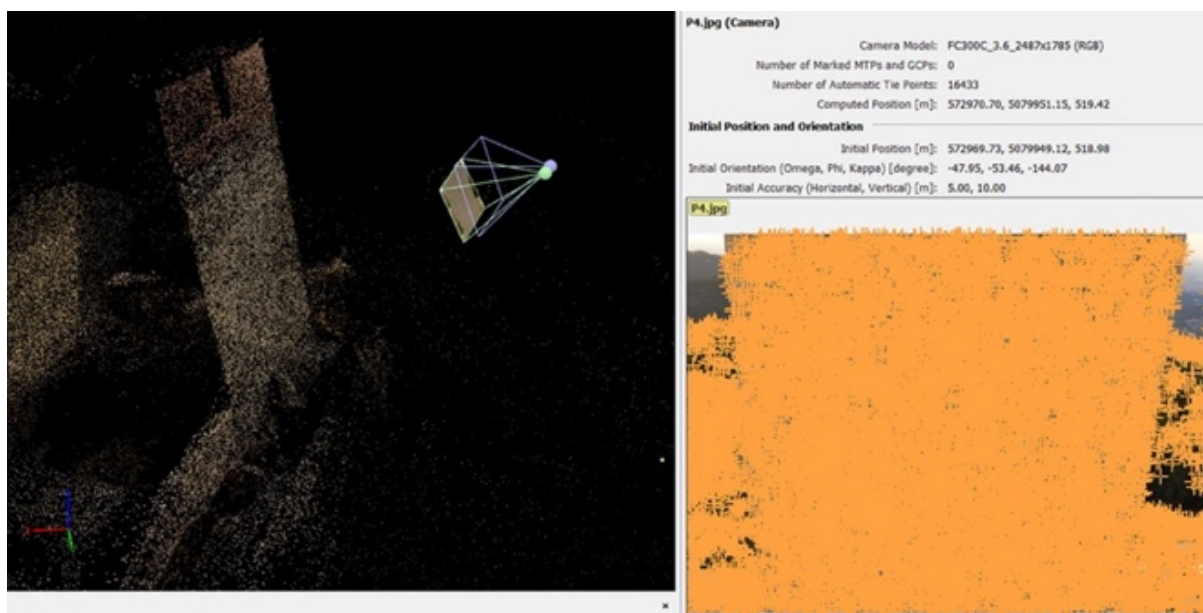


Slika 5.16 Podešavanje kadra istraživanja

Za istraživanje pod točkom jedan (I.) radi se dodatan korak rezanja fotografija. Na svim fotografijama snimljene na većoj udaljenosti od 10m (20m, 30m i 40m) radi se rezanje fotografije (slika 5.16) kako bi se dobio kadar što sličniji fotografiji snimljenoj sa 10 metara. Na taj način se uspoređuje ista površina na svim fotografijama.

5.7.5 Analiza podataka

Fotografije koje su obrađene i snimljene u jpg. formatu unose se u softver za 3d rekonstrukciju Pix4Dmapper. Prema definiranom planu istraživanja pod točkom jedan (I.), u Pix4Dmapper unosimo 20 fotografija namijenjene ovom istraživanju. Uz dvadeset fotografija unosi se 45 fotografija snimljeni metodom kružnog gibanja oko centra Medvedgrada. Ove fotografije su referenca za detekciju 2d značajki fotografija. Pokreće se prvi korak 3d rekonstrukcije pronalazjenje ključnih točaka na fotografijama (slika 5.17). Dobiveni rezultati (broj značajki po fotografiji) se unose u posebnu tablicu za daljnju analizu. Za prvu točku ispitivanja nije potrebno raditi ostale korake 3d rekonstrukcije.



Slika 5.17 Prikaz detektiranih značajki fotografije

Za potrebe istraživanja druge (II.) točke, unose se obrađene fotografije samo jedne postavke preklapanja fotografije.



Slika 5.18 Globalni točkasti oblak

Za svaku od četiri postavke preklapanja, radi se 3d rekonstrukcija zaključno sa globalnim točkastim oblakom (slika 5.18). Traženi podaci su ukupan broj 3d značajki u točkastom oblaku za svaku postavku preklapanja zasebno. U istraživanju treće točke (III.) istraživanja, za svaki od tri modela plana leta, radi se potpuna rekonstrukcija računalnog modela u koju je uključena i tekstura površina za vizualni prikaz završnog rezultata.

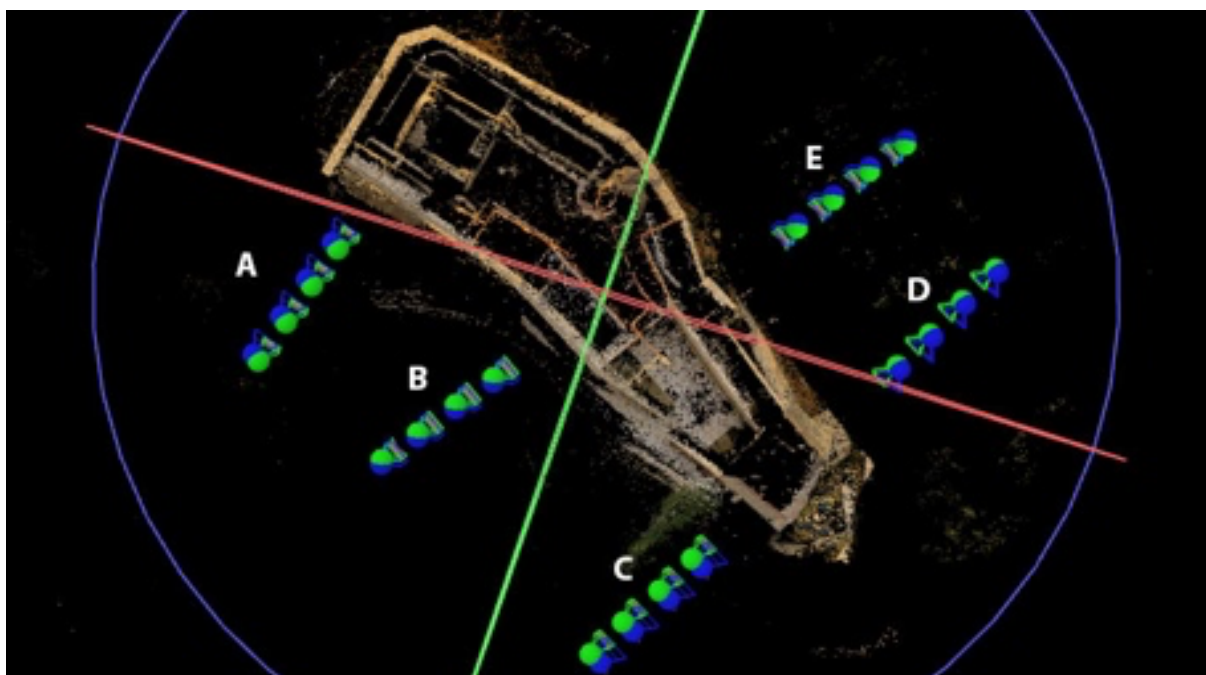
5.8 Rezultati istraživanja

Rezultati istraživanja provodila se u računalnom softveru Pix4Dmapper, na prijenosnom računalu macBook Pro 2015, u kojem se nalazi Intelov Corei7-5557U 3.10GHz procesor sa 16GM radne memorije. Kako Pix4Dmapper nije kompatibilan na macOS-u, preko „*Boot Camp*“ aplikacije instaliran je Windows 10 Home, 64-bitni operativni sustav.

Analiza podataka podijeljena je na tri potkategorije, prema svakoj točki istraživanja.

- I. Utjecaj povećanja horizontalne udaljenosti kamere na broj detektiranih ključnih točaka (značajki) po fotografiji.

Istraživanje se izvodila na pet lokacija označena slovom od A do E. Na svakoj lokaciji snimalo se sa četiri različite udaljenosti od predmeta snimanja (10m, 20m, 30m i 40m). Na slici 5.19 prikazane su sve pozicije snimanja, smještene u lokalni koordinatni sustav u Pix4Dmapperu, preko zapisanih GNSS geografskih koordinata.



Slika 5.19 Pozicije snimanja u Pix4Dmapper-u

Pozicija „A“ se nalazi na sjeveru-zapadnom djelu Medvedgrada. Nakon završetka procesa inicijalnog skeniranja fotografija dobije se vizualna analiza rezultata (slika 5.20). U analizi se nalaze podaci o kameri, broju korištenih zemaljskih pozicijskih točaka, broju pronađenih ključnih točaka (značajki), geografska pozicija kamere i orijentacija, horizontalna i vertikalna preciznost koordinata. Za analizu točke I. potrebni samo podaci pronađenih ključnih točaka (engl., „*Tie Points*“).



Slika 5.20 Analiza pozicije "A"

Na fotografiji snimljenoj sa deset metara udaljenosti, sa pozicije A, pronađeno je ukupno 16.573 ključnih točaka. Pomicanjem horizontalne udaljenosti na 20 metara pronađeno je 16.489 ključnih točaka, 16.111 sa 30 metara i 14.167 sa 40 metara udaljenosti. Na tablici 6 (ispod) prikazani su rezultati snimanja sa pozicije A.

Pozicija „A“	
Udaljenost [m]	2d značajke
10	16573
20	16489
30	16111
40	14167

Tablica 6 Rezultati za pozicija „A“

Fotografija na poziciji „B“ (slika 5.21), snima središnji dio zapadnog zida.



Slika 5.21 Analiza pozicije "B"

Sa udaljenosti od deset metara pronađeno je 25.897 ključnih točaka. Udaljavanjem na dodatnih 10 metara rezultiralo je pronalaskom 25.656 ključnih točaka, sa 30 metara 24.894 ključnih točaka i 21.894 sa 40 metara udaljenosti. Rezultati su prikazani u tablici 7.

Pozicija „B“	
Udaljenost [m]	2d značajke
10	25897
20	25656
30	24897
40	21894

Tablica 7 Rezultati za pozicija „B“

Pozicija „C“ fotografira jugo-zapadnu stranu južne kule (slika 5.22).



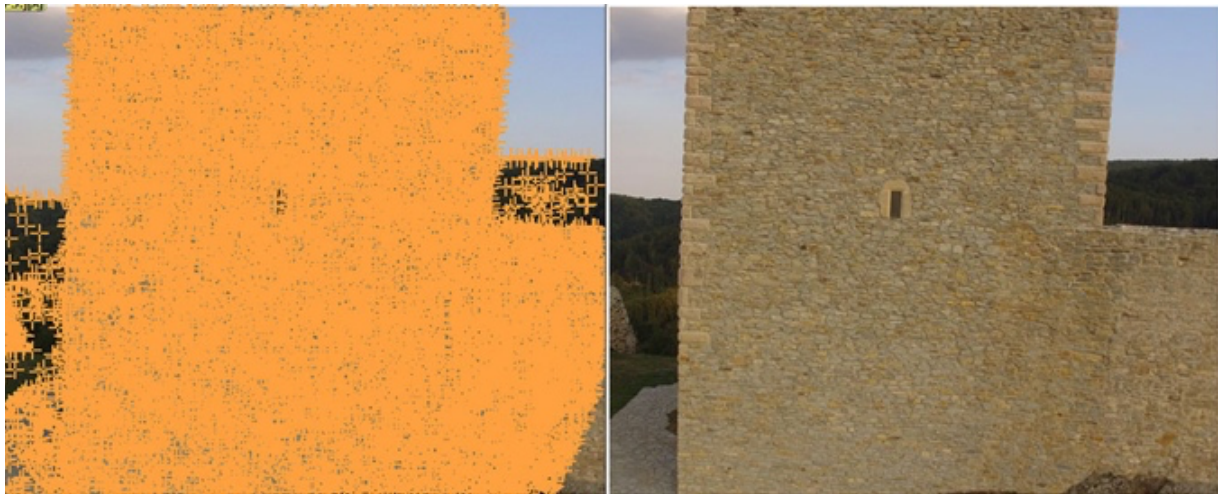
Slika 5.22 Analiza pozicije "C"

Na fotografiji snimljenoj sa pozicije „C“, sa udaljenosti od deset metara, pronađeno je 16.433 ključnih točaka. Na udaljenosti od 20 metara 16.372 točke, 16.221 sa 30 metara i 14.229 sa 40 metara udaljenosti. Tablica 8 prikazuje rezultate pozicije „C“.

Pozicija „C“	
Udaljenost [m]	2d značajke
10	16433
20	16372
30	16221
40	14229

Tablica 8 Rezultati za pozicija „C“

Fotografija na pozicija „D“ snima sjever-istočnu stranu južne kule (slika 5.23). Fotografija snimljena sa deset metara udaljenosti rezultirala je sa 12.161 pronađenih ključnih točki. Dodatnim horizontalnim udaljavanjem od deset metara donosi 12015 ključnih točki. Na udaljenosti od 30 metara detektirano je 11819 značajki, te 9991 na 40 metara udaljenosti. Rezultati su prikazani u tablici 9.

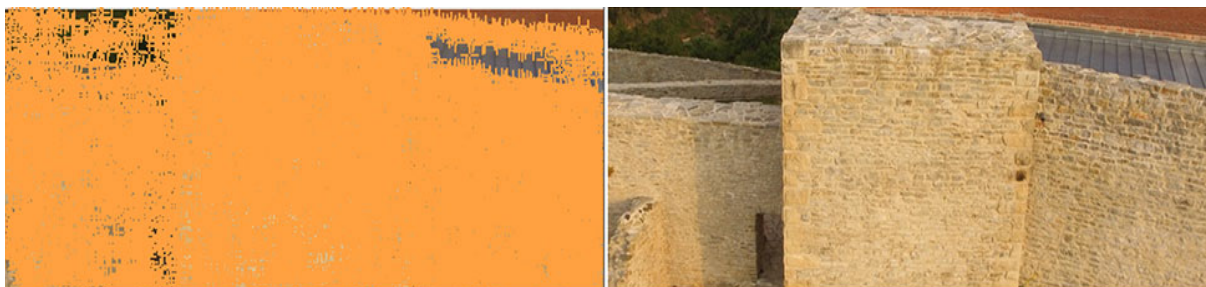


Slika 5.23 Slika 36 Analiza pozicije „D“

Pozicija „D“	
Udaljenost [m]	2d značajke
10	12161
20	12015
30	11819
40	9991

Tablica 9 Tablica 8 Rezultati za pozicija „D“

Zadnja, peta lokacija, prikazuje srednji dio zapadnog zida (slika 5.24).



Slika 5.24 Analiza pozicije "E"

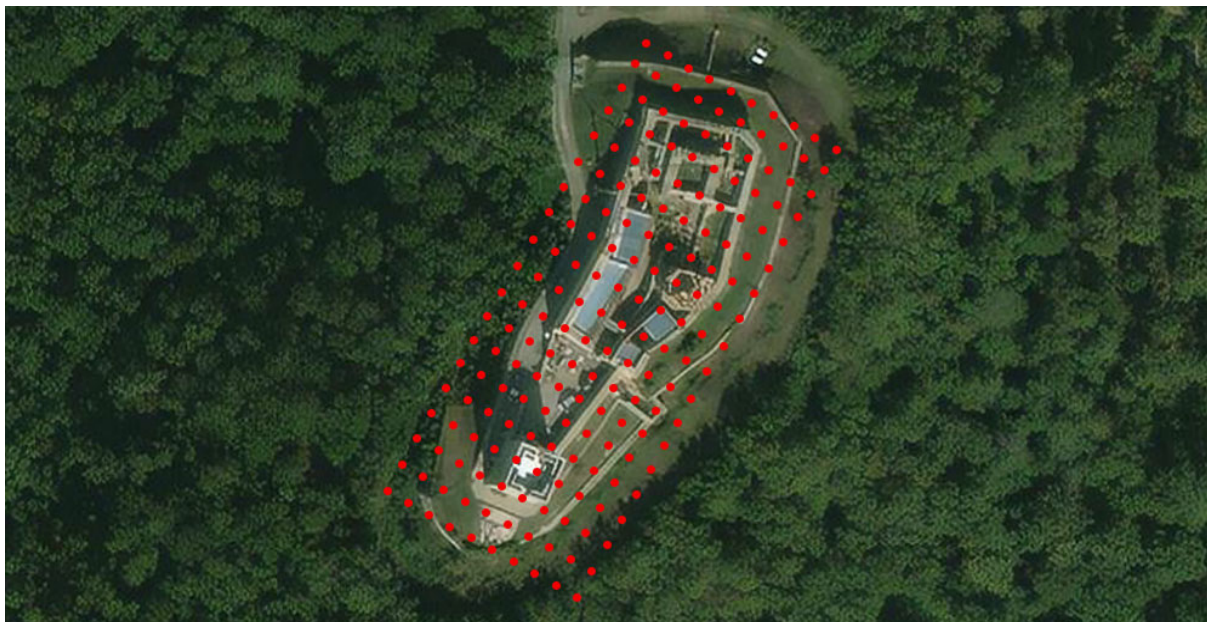
Na fotografiji sa udaljenosti od deset metara pronađeno je 8.975 ključnih točaka. Sa 20 metara pronađeno je 8.750 ključnih točaka, 8.155 sa 30 metara i 7.367 sa 40 metara udaljenosti. Tablica ispod prikazuje rezultate pozicije „E“.

Pozicija „E“	
Udaljenost [m]	2d značajke
10	8975
20	8750
30	8155
40	7367

Tablica 10 Tablica 8 Rezultati za pozicija „E“

II. Utjecaj različitih postotaka preklapanja fotografija na ukupan broj 3d značajki u globalnom točkastom oblaku

Rezultati ove točke istraživanja su ukupan broj 3d značajki u globalnom točkastom oblaku, broj 2d značajki, broj fotografija i ukupno vrijeme leta prikazano u minutama. Za plan leta koristilo se mrežasto pokrivanje. Zasebno su se snimala četiri postavke preklapanja fotografija: 90%, 85%, 80% i 75%.



Slika 5.25 Prikaz pozicija slikanja za 90% preklapanje

Plan leta za 90 postotno preklapanje fotografija činilo je mrežu od deset poprečnih točaka i 19 uzdužnih točaka snimanja. Ukupno vrijeme leta iznosilo je 64 minute i 55 sekundi uz dvije promjene baterija (ukupno tri kompleta baterije). Snimljeno je 190 fotografija. Globalni točkasti oblak sačinjavao je 3.197.173 3d značajki (slika 5.25). Ukupan broj 2d značajki na svim fotografijama iznosi 7.626.333.



Slika 5.26 Točkasti oblak od 90% preklapanja

Mrežasti plan leta (slika 5.27) sa 85 postotnim preklapanja fotografija činilo je sedam poprečnih točaka i 13 uzdužnih točaka snimanja. Vrijeme leta sa jednom izmjenom baterije iznosilo je 35 minuta i 23 sekunde. Ukupno je snimljeno 91 fotografija.



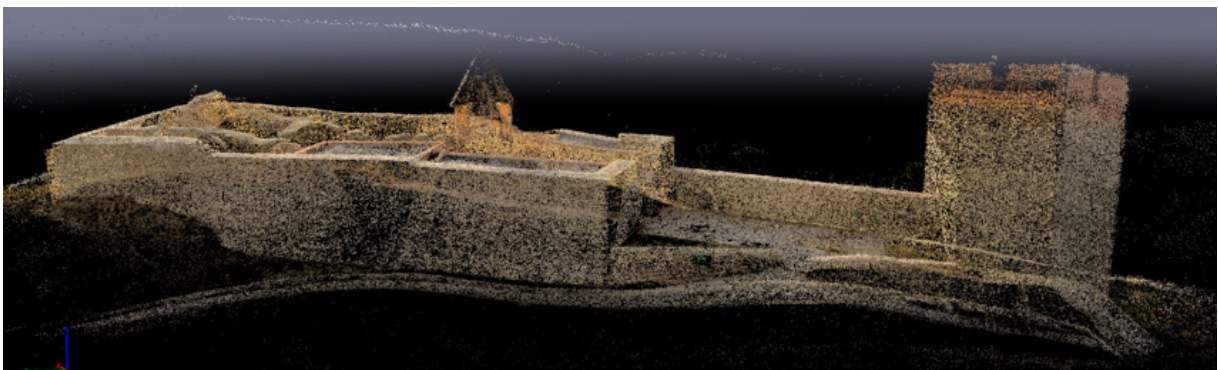
Slika 5.27 Prikaz pozicija slikanja za 85% (lijevo) i 80% (desno) preklapanje

Broj detektiranih 2d značajki (ključne točke) je 3.652.612, dok ukupan broj 3d značajki u globalnom točkastom oblaku iznosi 3.175.122 (slika 5.28).



Slika 5.28 Točkasti oblak od 85% preklapanja

Plan leta sa 80 postotnim preklapanjem fotografija činilo je mrežu od šest poprečnih točaka i deset uzdužnih točaka snimanja (slika 5.27).



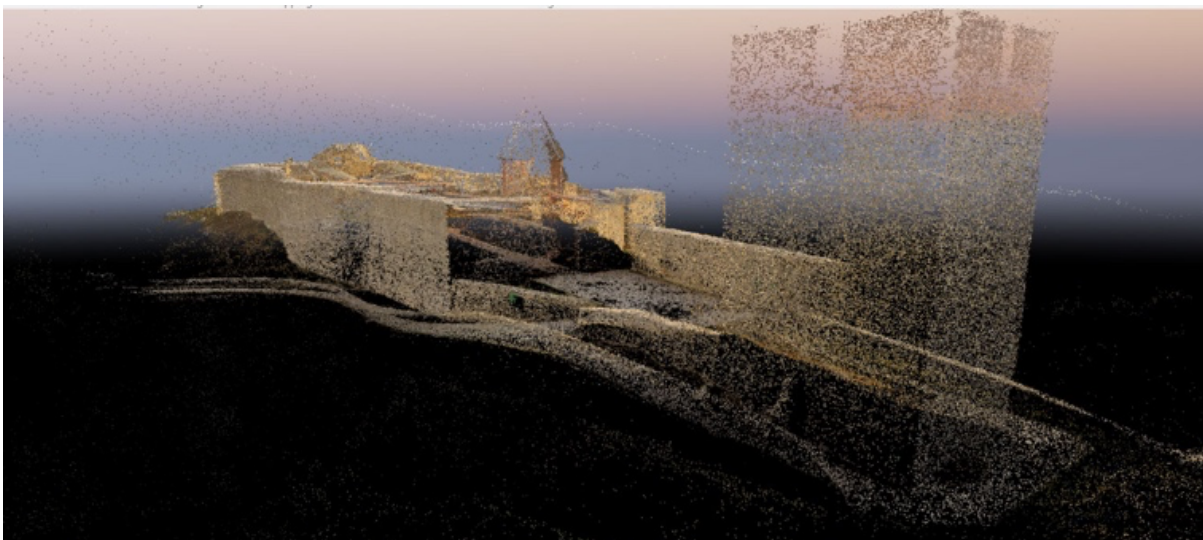
Slika 5.29 Točkasti oblak od 80% preklapanja

U 23 minute i 21 sekundu leta, uz jednu promjenu baterija, snimljeno je 60 fotografija. Broj pronađenih ključnih točki u svih 60 fotografija je 2.408.345. Ukupan broj 3d značajki u globalnom točkastom oblaku je 2.246.373 (slika 5.30).



Slika 5.30 Prikaz pozicija slikanja za 75% preklapanje

I zadnji, četvrti plan leta (slika 5.31) sa 75 postotnih preklapanjem sastojao se od pet poprečnih i devet uzdužnih točaka snimanja. Snimljeno je 45 fotografija. Ukupno trajanje leta bez slijetanja radi promjene baterija iznosio je 17 minuta i 49 sekundi.



Slika 5.31 Točkasti oblak od 75% preklapanja

Ukupan broj detektiranih ključnih točaka (2d značajke) na svim fotografijama je 1.727.122. Globalni točkasti oblak sačinjava se od 1.714.922 3d značajki (slika 5.32).

- III. Utjecaj planova leta bespilotne letjelice na broj detektiranih 3d značajki u globalnom točkastom oblaku.

Za mrežasto prikrivanje korišten je najoptimalniji rezultat (85% preklapanja fotografija) iz prethodne točke (II.) ispitivanja (slika 5.27). Broj 3d značajki u prethodnom istraživanju iznosi 3.175.122 (slika 5.28). Prikupljena je 91 fotografija, u vremenskom periodu od 35 minuta i 23 sekunde.



Slika 5.32 Kružni (lijevo) i hibridni (desno) plan leta

Kružno gibanje oko središta Medvedgrada također je bilo podešeno na 85 posto preklapanja fotografija (slika 5.33). Visina snimanja iznosila je 50 metara. Trajanje leta iznosilo je devet minuta i četiri sekunde, te je snimljeno 38 fotografija. Ukupan broj detektiranih 3d značajki je 1.621.562 (slika 5.34).



Slika 5.33 Točkasti oblak proizveden kružnim planom leta

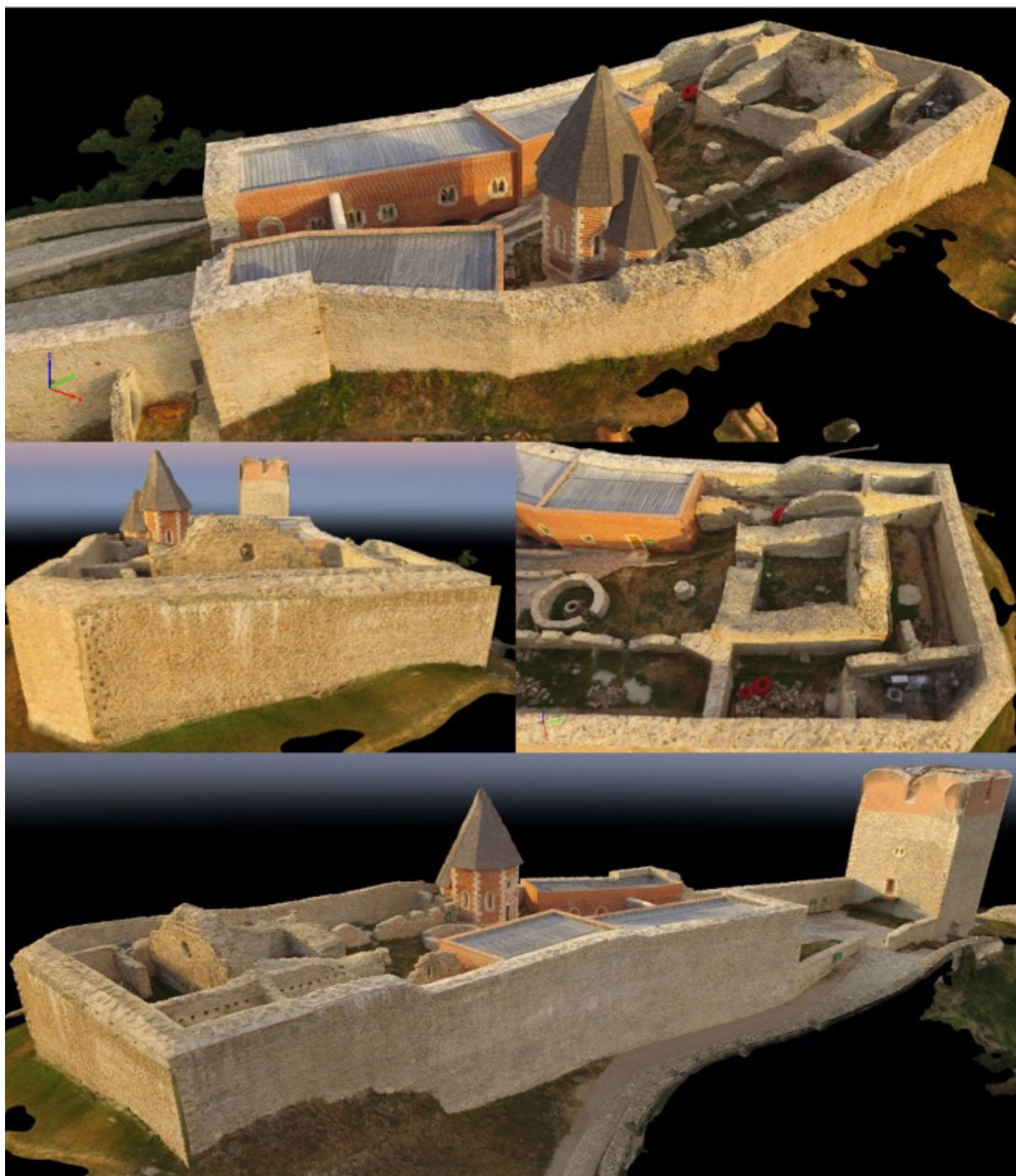
Autorov hibridni plan leta (slika 5.33) trajao je 21 minutu i 45 sekunde. Fotografirano je 57 fotografija. Ukupan broj 3d značajki iznosi 3.171.856 (slika 5.35).



Slika 5.34 Točkasti oblak proizveden hibridnim planom leta

5.9 Gotovi 3d računalni modeli

Završni korak je kompletna 3d rekonstrukcija računalnog modela za sve tri metode letenja. U softveru Pix4Dmapper postavljene su postavke sa najvećom rezolucijom i detaljima. Te postavke su rezultirale da sam proces rekonstrukcije traje između 7 do 14 sati ovisno o broju fotografija. Prvi plan leta za koji se radila 3d rekonstrukcija je mrežno pokrivanje (5.36). Toj metodi je prikupljeno 91 fotografija koje su kreirale 3.175.122 3d značajki u globalnom točkastom oblaku. Ukupna 3d rekonstrukcija je trajala 7 sati i 12 minuta. Dobiveni model ima sljedeće dimenzionalna odstupanje od realnih dimenzija: odstupanje poprečne osi iznosi 35 cm, uzdužne 39cm i visinsko odstupanje je 0.51cm.



Slika 5.35 3d model - mrežasto snimanje

Drugi rekonstruirani 3d računalni model je bio od metode kružnog gibanja (5.37) bespilotne letjelice oko središta Medvedgrada. Ovaj plan leta nije imao prelete iznad samog predmeta snimanja već isključivo snimanje iz bočnih strana. Skupljeno je 38 fotografija, koji su kreirali globalni točkasti oblak od 1.621.562 3d značajke. Vrijeme 3d rekonstrukcije iznosilo je točno tri sata. Zabilježeno poprečno dimenzionalno odstupanje iznosi 45cm, uzdužno 42cm te vertikalno odstupanje od 53cm.



Slika 5.36 3d model - kružno snimanje

Treća i zadnja trodimenzionalna rekonstrukcija bila je autorov hibridni plan leta (slika 5.38). Preko njega je skupljeno 57 fotografija iz koji je rekonstruirano 3.171.856 3d značajki u globalnom točkastom oblaku. Odstupanja po poročnoj osi iznosi 36cm, uzdužnoj 40cm i visinsko odstupanje iznosi 51cm. Ukupno vremensko trajanje rekonstrukcije je 4 sata i 45 minuta.



Slika 5.37 hibridni model snimanja

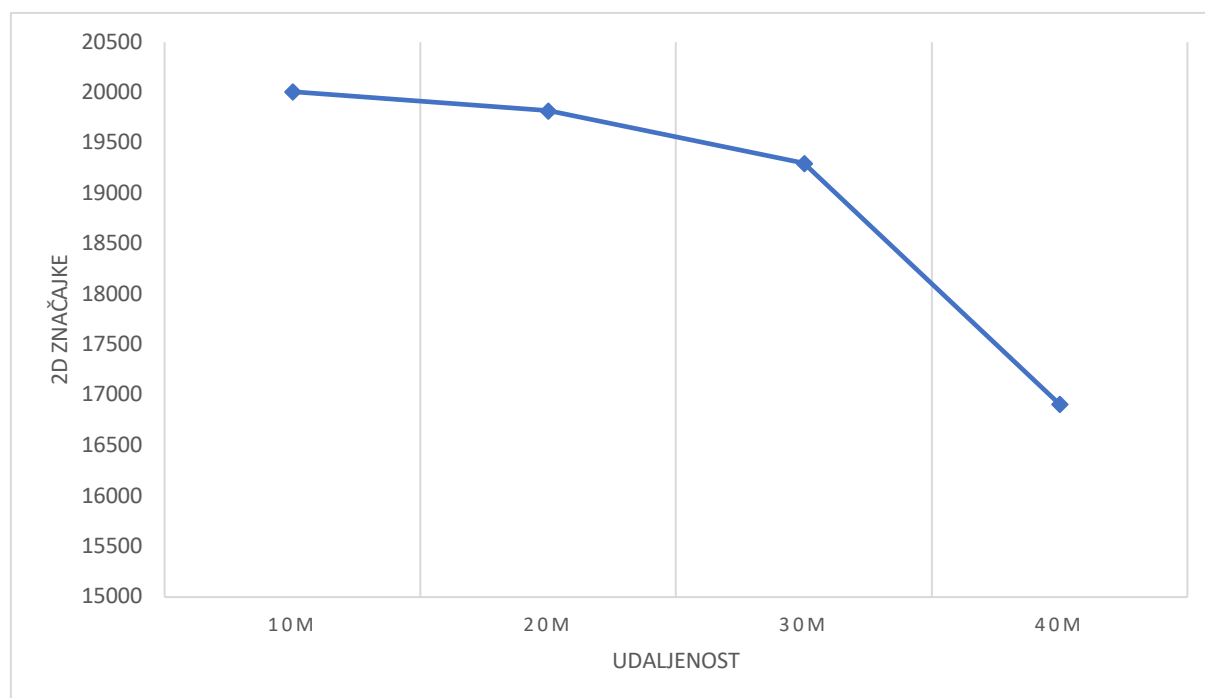
6 Interpretacija rezultata

Dobiveni rezultati istraživanja navedeni u prethodnom poglavlju analizirat će se koristeći deskriptivnom analizom. Istraživanje pod točkom jedan (I.) sastoji se od 4 fotografije različitih udaljenosti na pet različitih lokacija. Kako bi se dobili što reprezentativniji uzorci, potrebno je grupirati rezultate po udaljenosti od predmeta istraživanja. Tako će se dobiti po pet vrijednosti za svaku udaljenost. Za eliminiranje velikih odstupanja ovisno o položaju izračunat će se aritmetička sredina za svaku udaljenost zasebno. S time će se dobiti srednja vrijednost za svaku točku mjerenja. Statistička analiza radila se u Microsoft Excel programu

Udaljenost [m]	2d značajke
10	20009,75
20	19820,5
30	19300,75
40	16912

Tablica 11 Analizirani rezultati I. istraživanja

Dobiveni rezultati prikazani u tablici 12, jasno prikazuju pad detektiranih 2d značajki po fotografiji sa udaljavanjem od predmeta snimanja. Ako se uzme da je udaljenost od deset metara početna vrijednost u kojem je zabilježeno malo više od 20.000 točaka, horizontalnim udaljavanjem od deset metara izgubit će se izgubiti zanemarivih 0.01% 2d značajki.



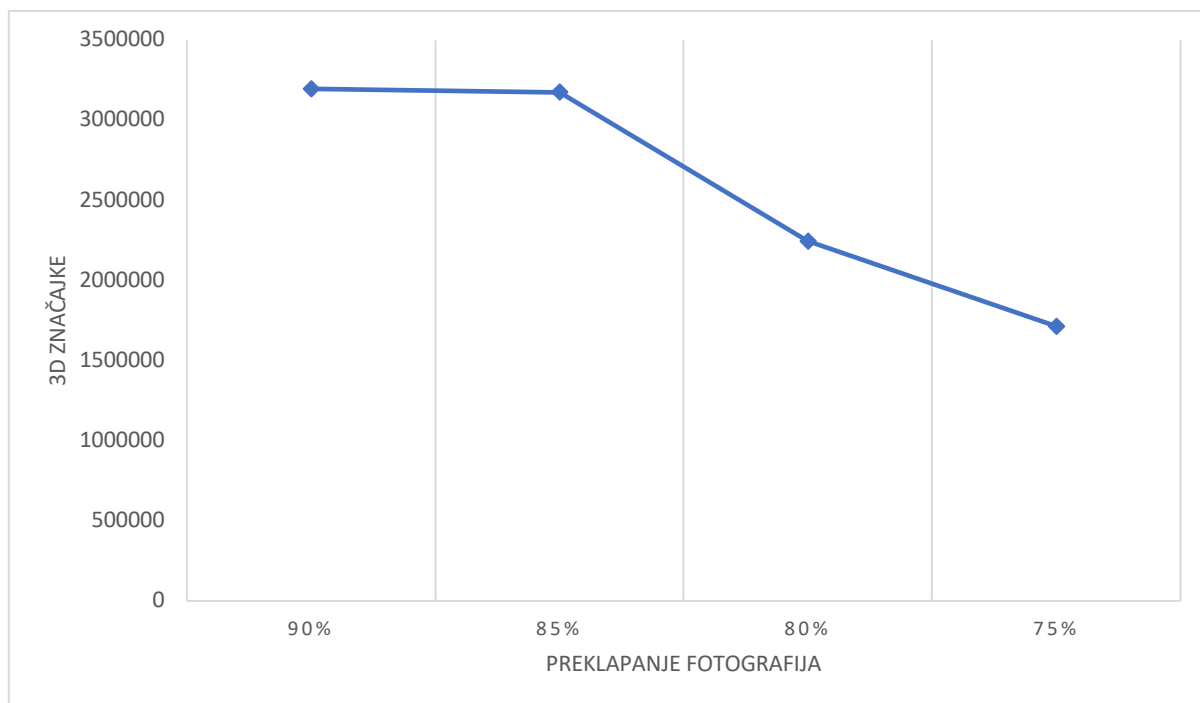
Tablica 12 Vizualni prikaz I. istraživanja

Dodatnim udaljavanjem od deset metara, na ukupnih 30m rezultirat će gubljene od 3.6% 2d značajki. I posljednja, najdalja mjerena horizontalna vrijednost od 40m imat će najveći gubitak 2d značajko od čak 15.5%. Ovaj drastičan pad (tablica 13) između udaljenosti od 30m i 40m govori da je limit korištene opreme, prije svega senzora kamere oko 30 metara. Temeljem rezultata može se zaključiti da je snimanje na horizontalnoj udaljenosti od predmeta snimanja maksimalna granica iz koje se može snimati podaci bez velikog odstupanja (<3.5%) od početne vrijednosti (10m).

Prekapanje fotografija [%]	3d značajke
90	3197173
85	3175122
80	2246373
75	1714922

Tablica 13 Tablični prikaz rezultata II. Istraživanja

Druga točka istraživanja mjerila je četiri vrste preklapanja fotografija u identičnim uvjetima (plan leta, vrijeme, kut kamere, visina), rezultati su prikazani u tablici 14. Globalni točkasti oblak sniman sa 90% i 85% preklapanja fotografija rezultirao je sličnim ukupnim brojem 3d značajki, razlika je samo 0.7%, uz točnost od 0.2 ključne točke. Međutim, trajanje snimanja 85% preklapanja iznosilo je za 45% kraće od 90%. Točkasti oblak sa 80% preklapanja ima 30% manje 3d značajki sa preciznošću nešto većem od 0.6 ključnih točaka. Najslabije rezultate, očekivano, dalo je preklapanje od 75% koje ima čak 46.4% manje 3d značajki od 90% preklapanja.



Tablica 14 Vizualni prikaz II. istraživanja

Rezultati pokazuju da je mala razlika između preklapanja od 90% i 85%, međutim vrijeme snimanja daje veliku prednost 85% preklapanju. Prijelaz sa 85% na 80% rezultira velikim padom (tablica 15) u ukupnom broju 3d značajki, iz stoga se može zaključiti da je 85% optimalni izbor postotaka preklapanja.

PLAN LETA	3D ZNAČAJKE	VRIJEME LETA
Mrežasto pokrivanje	3175122	35min 23s
Kružno gibanje	1621562	9min 4s
Hibrid	3171856	16min 22s

Tablica 15 Tablični prikaz rezultata III. istraživanja

Zadnja točka ispitivanja bili su različiti planovi leta (tablica 16). Skoro identičan broj 3d značajki u globalnom točkastom oblaku ima mrežasto pokrivanje i autorov hibridni plan. Slična situacija kao i u prethodnoj točki ispitivanje, gdje prevagu donosi ukupno

vrijeme leta. Bepilotna letjelica u hibridnom planu leta provela je devet minuta manje od mrežastog pokrivanja. Najlošije rezultate, i uvjerljivo najbrže mjerenje, dalo je kružno gibanje sa 49% manje 3d značajki u točkastom oblaku.

Dimenzionalna pogreška [m]	Mrežasto pokrivanje	Kružno gibanje	Hibrid
X os (poprečna)	0.35	0.45	0.36
Y os (uzdužna)	0.39	0.42	0.4
Z os (visinska)	0.51	0.53	0.51
Prosjek	0.42	0.47	0.42

Tablica 16 Dimenzionalna pogreška računalnog 3d modela

Završnom analiza rekonstrukcije 3d računalnog modela dobiveni su dimenzionalne pogreška za sve tri plana leta (tablica 17). Kako bi se dobili mjerljiviji rezultati, izračunat je ukupna greška u kojoj se nalaze podaci za sve tri osi. Temeljem te analize, Mrežasto pokrivanje i autorov hibrid imaju identičnu grešku od 42 centimetara, dok kružno gibanje ima nešto veću pogrešku od 47 centimetara. Kružno gibanje pokrivalo je samo vanjske rubove predmeta snimanja što ima za posljedicu nešto lošiju rekonstrukciju 3d računalnog modela. Temeljem dobivenih rezultata autorov plan leta nudi optimalniji i ekonomičniji pristup prikupljanja podataka.

6.1 Hipoteza 1

- I. Povećanjem horizontalne udaljenosti neće doći do drastičnog pada (<5%) 2d značajki po fotografiji

Provedenim istraživanjem prve točke očita je tendencija gubljenja detekcije 2d značajki horizontalnim udaljavanjem kamere od predmeta snimanja. Ono što je u bitno naglasiti da je pad između snimanja sa deset metara i 30 metara, svega 700 2d značajki, što je 3.6%. U drugoj točki istraživanja vidjelo se da pad od 5% 2d značajki ne pridonosi gubitak u kreiranju globalnog točkastog oblaka. Međutim, povećanjem horizontalne udaljenosti na 40 metara rezultiralo je pad od 15.5% 2d značajki, što bi definitivno prouzročilo veliki gubitak u kreiranju 3d značajki točkastog oblaka. S toga se može zaključiti da prag do koje je H1 prihvaćena iznosi 30 metara. Povećanjem udaljenosti preko te granice H1 se odbacuje.

6.2 Hipoteza 2

- II. Ukupan broj 3d značajki točkastog oblaka će padati smanjenjem postotka preklapanja

Temeljem mjerenja sa četiri postavke preklapanja fotografija, utvrđena je potvrda H2. Očekivano, preklapanje od 90% dalo je najviše 3d značajki, iako treba naglasiti da je razlika broja 3d značajki mjeren sa 85% preklapanje ispod 1%. Preklapanje fotografija od 80% rezultiralo je dodatnim smanjenjem 3d značajki od 29.3%, te naposljetku zadnje preklapanje od 75%, broj 3d značajki pao je za dodatnih 26.7%.

6.3 Hipoteza 3

- III. Hibridni (autorov) plan leta će rezultirati sličnim ukupnim brojem (<5%) 3d značajki u globalnom točkastom oblaku kao i plan leta mrežastim

pokrivanjem, uz ukupno kraće vrijeme letenja. Plan leta kružnim vremena proizvest će najmanji broj 3d značajki.

Mrežasto pokrivanje provedeno u ovom istraživanju rezultiralo je 3.175.122 3d značajki, dok je autorov hibridni model proizveo 3.171.856 3d značajki. Razlika između ta dva modela u ukupnom broju 3d značajki je manja od 0.1%. Najmanji broj 3d značajki proizvedeno je koristeći snimanje kružnim gibanjem. Najduže vrijeme u kojem je letjelica provela u zraku je kod mrežnog pokrivanja, skoro duplo duže od autorovog modela. Uvjerljivo najbrža metoda, iako sa najlošijim rezultatom, rezultirala je metoda kružno gibanje. Na kraju se može zaključiti da je H2 u potpunosti potvrđena.

7 Zaključak

Fotogrametrija je kompleksna tehnika sastavljena od nekoliko specifičnih i kompliciranih aktivnosti. Iako u naizgled djeluju odvojeno, cijeli proces je jedna vrsta kaskadne reakcije. Ukoliko skupljanje podataka, što se smatra prva aktivnost nije dobro obavljena, svi procesi koji slijede imat će velike probleme dobiti željeni rezultat. Ako u tu tehnologiju ubacimo i novi medij, u obliku bespilotne letjelice, kompleksnost pravilnog rukovanja višestruko se povećava.

Početak zamisao ovog rada je bilo istražiti trenutne tehnike, smjernice ili bilo koji dio procesa koji ima naznaku standardizacije. Standardizacija je temeljni segment bilo koje industrije kako bi se dobili pouzdani, konstantni, kontrolirani rezultati. Do sada, takvo što u sferi zračne fotogrametrije ne postoji. Jedan od primarnih razloga je što se radi još o relativno novoj tehnologiji. Upotreba bespilotnih letjelica u komercijalne svrhe je započela prije nešto više od jednog desetljeća. Razvojem tehnologije, pristupačnost je rasla iz godine u godinu i danas se slobodno može reći da je zasićenost tržišta raznim „drenovima“ velika.

U fotogrametriji, među mnogo bitnih komponentama, kamera je najbitnija. A tu leži i najveći nerazmjer što se tiče ponuda bespilotnih letjelica. Od „mikro dronova“ koje garantiraju 4K video snimke, a u stvarnosti imaju senzor kamere koji je po tehničkim specifikacijama nekoliko generacija ispod prosječne kamere na mobilnim telefonima, pa sve do skupocjenih laserskih skenera montirane na glomaznim letjelicama. U takvom velikom spektru teško je pronaći koji je proizvod idealan za određenu aktivnost, i kako tu aktivnost pravilno i optimalno provesti.

Ovaj rad je pokušaj da se da odgovor na optimalizaciju aktivnosti prikupljanja podataka, odnosno fotografiranja. Treba napomenuti da dobiveni rezultati su u direktnoj korelaciji sa upotrijebljenom opremom. Tokom cijelog istraživanja koristio se DJI Phantom 3 Standard bespilotna letjelica. To je ključno naglasiti, jer ponavljanje istraživanja sa drugom opremom može rezultirati drugim rezultatima i zaključcima.

Prije nego što se počne snimati određeni objekti ili teren, postoji nekoliko elemenata koje treba odrediti. Prije svega plan leta, odnosno, metodu kojom želimo da prikupljamo fotografija, kako bi dobili kvantitativan i kvalitativan rezultat. Pod kvantitativan se misli na frekvenciju fotografiranja što je izraženo u postotku preklapanja fotografija, što je temeljna tehnika 3d rekonstrukcije. A kvalitativan je dovoljna rezolucija fotografije kako bi softver mogao odraditi što precizniju rekonstrukciju. Iz toga proizlazi da za prikupljanje fotografija treba izabrati plan leta, odgovarajući postotak preklapanja fotografija koje trebaju biti dobre kvalitete, što se u slučaju zračne fotogrametrije određuje udaljenosti i visinom leta. Sve ta tri elementa su istražena u ovome radu kako bi se odredile optimalne postavke i metode rada, odnosno, standardizacija.

Temelj istraživanja su dva elementa u softverskoj 3d rekonstrukciji: 2d i 3d značajke fotografija. 2s značajke su jedinstvene točke na svakoj fotografiji a 3d značajke predstavlja točku u koordinatnom sustavu koja nastaje preklapanjem dvije ili više 2d točaka. Temeljem ukupnog broja tih dvaju točaka rađeni su istraživanja za određivanje optimalne horizontalne udaljenosti od predmeta snimanja, postotak preklapanja fotografija te najoptimalnija plan leta.

Rezultati nisu donijeli velika iznenađenja. Bilo je za pretpostaviti da udaljavanjem bespilotne letjelice od predmeta snimanja će broj 2d značajki padati. Međutim, analizom se utvrdio prag, na kojem nastaje mjerljiv pad 2d značajki. Temeljem toga je utvrđena da je 30 metara maksimalna horizontalna udaljenost kojom se može fotografirati a da se ne izgubi mjerljiv broj 2d značajki. Nastavno na ukupan broj 3d značajki dobiven je prag za preklapanje fotografija. Analizom je utvrđeno da značajan pad 3d značajki se dešava između 85% i 80% preklapanja fotografija. Zadnje istraživanje bavilo se planovima leta, odnosno metodama prekrivanja terena. Korištena su dva predefinirana plana koje se mogu pronaći na skoro svim aplikacijama za bespilotne letjelice. Rezultati su pokazali da mrežno pokrivanje daje osjetno bolje rezultate od kružnog gibanja, što je i očekivano jer kružno gibanje ne pokriva središnji dio predmeta snimanja. To je posebno naglašeno kod snimanja objekta većih dimenzija, što je bio slučaj u ovom radu. Negativna strana te metode je vrijeme leta. Kako je prosječno vrijeme leta bespilotne letjelice oko 20 minuta, snimanje koje zahtjeva dvije ili tri dodatne baterije nije optimalno. Iz tog razloga autor kreirao plan leta koji je kombinacija postojećih. Analiza dobivenih rezultata pokazala je da hibridna metoda snimanja rezultira gotovo istim brojem 3d značajki kao i mrežasto pokrivanje i to u skoro u pola kraćem vremenu.

Temeljem ovog istraživanja može se donijeti nekoliko smjernica za optimalnije korištenje Phantom 3 Standard letjelice:

- Maksimalna udaljenost od predmeta snimanja iznosi 30 metara
- Snimati sa 85% preklapanja fotografija
- Kreirati specijaliziran plan leta koji se bazira na geometriji predmeta snimanja

Treba napomenuti da 3d računalni modeli koji su rekonstruirani u ovome radu i dalje nisu spremni za direktan unos u „gaming engine“ ili druge slične programe. Na sva tri modela primijećeni su veliki vizualni nedostaci koje je potrebno ispraviti u specijaliziranim softverima za 3d manipulaciju. Ali napredak u zadnjih par godina je itekako vidljiv. Ova tehnologija već danas ima veliku primjenu u raznim industrijskim granama, a nezaustavnim i svakodnevnim razvojem hardvera i softvera, primjena i dostupnost će samo rasti.

U Varaždinu, 21.09.2021.
Datum


Potpis

8 Literatura

- [1] Raczynski, R. J. (2017). Accuracy analysis of products obtained from UAV-borne photogrammetry influenced by various flight parameters (Master's thesis, NTNU).
- [2] Barba, S., Barbarella, M., Di Benedetto, A., Fiani, M., Gujski, L., & Limongiello, M. (2019). Accuracy assessment of 3D photogrammetric models from an unmanned aerial vehicle. *Drones*.
- [3] Koch, T. (2020). Automated and Precise 3D Building Reconstruction using UAVs (Doctoral dissertation, TU München).
- [4] Shahbazi, M., Sohn, G., Théau, J., & Menard, P. (2015). Development and evaluation of a UAV-photogrammetry system for precise 3D environmental modeling. *Sensors*, 15(11), 27493-27524.
- [5] Tucci, G., Conti, A., Fiorini, L., Panighini, F., & Parisi, E. I. (2018). Education and training resources on digital photogrammetry. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*.
- [6] Yepes Moya, A. P. (2020). From UAV photogrammetry to 3D modeling of the Valencian Silo-Yard in Burjassot.
- [7] Remondino, F. (2011). Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. *Remote sensing*, 3(6), 1104-1138.
- [8] Gruen, A., Zhang, Z., & Eisenbeiss, H. (2012). UAV photogrammetry in remote areas—3D modeling of Drapham Dzong, Bhutan. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXIX-B1*, 375-9.
- [9] Saadatseresht, M., Hashempour, A. H., & Hasanlou, M. (2015). UAV photogrammetry: a practical solution for challenging mapping projects. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(1), 619.
- [10] Teke, T. (2016). Unmanned aerial vehicle based visualization of deep excavations using game engines (Doctoral dissertation, Middle East Technical University).
- [11] Li, J., Yang, B., Wu, W., Dai, W., Chen, C., Zou, X., & Tian, M. (2017). 3D mobile mapping with a low cost uav system. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 127.
- [12] Grenzdörffer, G. J., Engel, A., & Teichert, B. (2008). The photogrammetric potential of low-cost UAVs in forestry and agriculture. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 31(B3), 1207-1214.
- [13] Eisenbeiß, H. (2009). UAV photogrammetry (Doctoral dissertation, ETH Zurich).
- [14] Martínez-Carricondo, P., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Mesas-Carrascosa, F. J., García-Ferrer, A., & Pérez-Porras, F. J. (2018). Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 72, 1-10.
- [15] Ferrer-González, E., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., & Martínez-Carricondo, P. (2020). UAV Photogrammetry Accuracy Assessment for Corridor Mapping Based on the Number and Distribution of Ground Control Points. *Remote Sensing*, 12(15), 2447.
- [16] Herráez, J., Martínez, J. C., Coll, E., Martín, M. T., & Rodríguez, J. (2016). 3D modeling by means of videogrammetry and laser scanners for reverse engineering. *Measurement*, 87, 216-227.

- [17] Yanagi, H., & Chikatsu, H. (2016). PERFORMANCE EVALUATION OF 3D MODELING SOFTWARE FOR UAV PHOTOGRAMMETRY. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 41.
- [18] Chiabrando, F., Sammartano, G., Spanò, A., & Spreafico, A. (2019). Hybrid 3D models: when geomatics innovations meet extensive built heritage complexes. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(3), 124.
- [19] Erol, S., Özögel, E., Kuçak, R. A., & Erol, B. (2020). Utilizing Airborne LiDAR and UAV Photogrammetry Techniques in Local Geoid Model Determination and Validation. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(9), 528.
- [20] Brilakis, I., Fathi, H., & Rashidi, A. (2011). Progressive 3D reconstruction of infrastructure with videogrammetry. *Automation in construction*, 20(7), 884-895.
- [21] Lowe, D. G. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International journal of computer vision*, 60(2), 91-110.
- [22] Huang, Feng-Cheng & Huang, Shi-Yu & Ker, Ji-Wei & Chen, Yung-Chang. (2012). High-Performance SIFT Hardware Accelerator for Real-Time Image Feature Extraction. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*
- [23] Daniilidis, Kostas & Eklundh, J.-O. (2008). *3-D Vision and Recognition*.
- [24] Nex, Francesco & Remondino, Fabio. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*.
- [25] Gržin, M., & Marić, A. (2018). Pravna regulacija bespilotnih letjelica i mjere sprječavanja zlouporabe u Republici Hrvatskoj s policijskog aspekta. *Policija i sigurnost*, 27(1/2018), 146-165.
- [26] Adel, E., Elmogy, M., & Elbakry, H. (2014). Image stitching based on feature extraction techniques: a survey. *International Journal of Computer Applications*, 99(6), 1-8.

Popis slika

Slika 1.1 Radni proces istraživačkog projekta	3
Slika 2.1 Direktna geografska referenca [8]	5
Slika 2.2 Zemaljska kontrolna točka (GCP) [4]	6
Slika 2.3 bespilotna letjelica s fiksnim krilima [1]	6
Slika 2.4 Potvrda dozvole udaljenog pilota	8
Slika 2.5 AMC Mobile Portal	10
Slika 3.1 Razlika Gaussovog filtera[21]	13
Slika 3.2 Uspoređivanje ključnih točki[22]	14
Slika 3.3 Orijentacijsko poravnavanje	15
Slika 3.4 Vektorski opis značajke fotografije[23]	15
Slika 3.5 Vektorski zapis značajke[26]	16
Slika 3.6 Metoda triangulacije	17
Slika 3.7 Selektiranje šumova u Pix4Dmapper	17
Slika 3.8 Opcije izvoza formata	18
Slika 5.1 Medvedgrad	23
Slika 5.2 DJI Phantom 3 Standard	26
Slika 5.3 DJI GO (lijevo) i Pix4Dcapture (desno)	27
Slika 5.4 Formati uvoza fotografija	28
Slika 5.5 Lokacije istraživanja	29
Slika 5.6 Položaji kamere	29
Slika 5.7 Pix4Dcapture - početno izbornik	30
Slika 5.8 Postavke kamere (lijevo) i AMC portal (desno)	31
Slika 5.9 Snimanje referentnog uzorka	32
Slika 5.10 Mrežasto snimanje sa 90% preklapanja	32
Slika 5.11 Mrežasto snimanje sa 85% preklapanja	33
Slika 5.12 Mrežasto snimanje sa 80% preklapanja	33
Slika 5.13 Mrežasto snimanje sa 75% preklapanja	34
Slika 5.14 Kružno gibanje oko središnje točke	34
Slika 5.15 Autorov plan leta	35
Slika 5.16 Podešavanje kadra istraživanja	35
Slika 5.17 Prikaz detektiranih značajki fotografije	36
Slika 5.18 Globalni točkasti oblak	36
Slika 5.19 Pozicije snimanja u Pix4Dmapper-u	37
Slika 5.20 Analiza pozicije "A"	38
Slika 5.21 Analiza pozicije "B"	38
Slika 5.22 Analiza pozicije "C"	39
Slika 5.23 Slika 36 Analiza pozicije „D“	40
Slika 5.24 Analiza pozicije "E"	40
Slika 5.25 Prikaz pozicija slikanja za 90% preklapanje	41
Slika 5.26 Točkasti oblak od 90% preklapanja	41
Slika 5.27 Prikaz pozicija slikanja za 85% (lijevo) i 80% (desno) preklapanje	42
Slika 5.28 Točkasti oblak od 85% preklapanja	42
Slika 5.30 Točkasti oblak od 80% preklapanja	42
Slika 5.31 Prikaz pozicija slikanja za 75% preklapanje	43
Slika 5.32 Točkasti oblak od 75% preklapanja	43
Slika 5.33 Kružni (lijevo) i hibridni (desno) plan leta	44
Slika 5.34 Točkasti oblak proizveden kružnim planom leta	44
Slika 5.35 Točkasti oblak proizveden hibridnim planom leta	44
Slika 5.36 3d model - mrežasto snimanje	45
Slika 5.37 3d model - kružno snimanje	46
Slika 5.38 hibridni model snimanja	47

Popis tablica

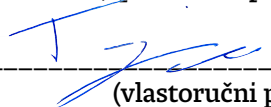
Tablica 1 Prikaz triju metoda snimanja (Zhuo 2017. i Gerke 2018.).....	4
Tablica 2 Usporedba letjelica s fiksnim i pokretnim krilima (SenseFly 2015)	7
Tablica 3 Klase bespilotnih letjelica	7
Tablica 4 Zone letenja.....	10
Tablica 5 Prikaz obveze udaljenih pilota s obzirom na kategoriju letačkih operacija. 11	
Tablica 6 Rezultati za pozicija „A“	38
Tablica 7 Rezultati za pozicija „B“	39
Tablica 8 Rezultati za pozicija „C“	39
Tablica 9 Tablica 8 Rezultati za pozicija „D“	40
Tablica 10 Tablica 8 Rezultati za pozicija „E“	40
Tablica 12 Analizirani rezultati I. istraživanja	48
Tablica 13 Vizualni prikaz I. istraživanja	48
Tablica 14 Tablični prikaz rezultata II. Istraživanja	49
Tablica 15 Vizualni prikaz II. istraživanja	49
Tablica 16 Tablični prikaz rezultata III. istraživanja.....	49
Tablica 17 Dimenzionalna pogreška računalnog 3d modela	50

**IZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU**

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, Boris Tunjić (*ime i prezime*) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica ~~završnog/diplomskog~~ (*obrisati nepotrebno*) rada pod naslovom Analiza i izrada protokola rekonstrukcije računalnog modela terena upotrebom zračnog sustava za bespilotno snimanje i fotogrametrije _____ (*upisati naslov*) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:

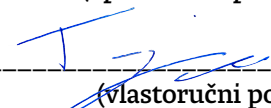
(upisati ime i prezime)

(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, Boris Tunjić (*ime i prezime*) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s **javnim objavom** ~~završnog/diplomskog~~ (*obrisati nepotrebno*) rada pod naslovom Analiza i izrada protokola rekonstrukcije računalnog modela terena upotrebom zračnog sustava za bespilotno snimanje i fotogrametrije _____ (*upisati naslov*) čiji sam autor/ica.

Student/ica:

(upisati ime i prezime)

(vlastoručni potpis)