

## Upoređenje rezultata UAV fotogrametrije na kalibracionom poligonu „Debeljača“ dobijenih primenom različitih softverskih sistema

PETAR M. BURSAC', Univerzitet u Beogradu,

Građevinski fakultet, Beograd

DRAGAN M. MIHAJLOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Građevinski fakultet, Beograd

NENAD D. BRODIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Građevinski fakultet, Beograd

Originalni naučni rad

UDC: 528.715:623.746.2-519

DOI: 10.5937/tehnika1905639B

*Cilj ovog rada je da prikaže uporednu analizu rezultata dobijenih UAV fotogrametrijom na kalibracionom poligonu „Debeljača“, primenom dva različita softverska sistema: AgiSoft PhotoScan i Trimble INPHO UASMaster. U radu je prikazana analiza uticaja i potencijalno vrednovanje grešaka u bloku UAV fotogrametrijskih snimaka, dobijenih DSLR - Digital Single-Lens Reflex amaterskom digitalnom kamerom sa nepoznatom unutrašnjom orijentacijom i nepoznatim vrednostima distorzije. Blokovi su formirani primenom SfM - Structure from Motion pristupa, implementiranog u datim softverskim sistemima. Veliki broj pouzdanih kontrolnih tačaka na kalibracionom poligonu omogućio je analizu propagacije grešaka u bloku za različite scenarije rasporeda orijentacionih tačaka, kao i ocenu geometrijskog kvaliteta fomiranih modela.*

**Ključne reči:** UAV fotogrametrija, Structure-from-Motion, blok aerotriangulacija sa samokalibracijom, kalibracioni poligon

### 1. UVOD

Nagli razvoj bespilotnih letelica (UAV – Unmanned Aerial Vehicle) i tehnologije snimanja iz vazduha pomoću različitih digitalnih senzora, omogućili su veoma široku primenu UAV sistema za fotogrametrijske svrhe – UAV fotogrametriju. Uprkos velikim mogućnostima koje UAV sistemi nude, u njihovoj praktičnoj primeni još uvek postoje nedoumice u pogledu kvaliteta rezultata i efikasnosti UAV fotogrametrije, kao i kvaliteta raspoloživih softvera za obradu podataka.

Pored upotrebe od strane geodetskih i fotogrametrijskih kompanija, upotreba UAV sistema kao platforme za fotogrametrijsko prikupljanje podataka se takođe brzo širi izvan tradicionalnog domena dobro regulisane i uspostavljene aerofotogrametrije. Mnoge kompanije koje nude UAV snimanja su osnovane od strane stručnjaka i inženjera iz oblasti informacionih

tehnologija, telekomunikacija ili informatike, sa vrlo malo ili nimalo znanja i iskustava iz oblasti geodezije i fotogrametrije, ali sa prilično velikim znanjem iz oblasti Computer Vision tehnika [1]. Takvi sistemi i softverski alati poznati i kao „crne kutije“ [2], [3], [4], ne nude tradicionalni pristup analizi i oceni grešaka, tačnosti i pouzdanosti koja je od značaja za korišćenje jednog ovakvog sistema u merne svrhe, a pre svega produkata koji se koriste u geodetsko – kartografske svrhe, geodetskom premeru, topografskom premeru, projektovanju, nadzoru i kontroli građevinskih radova, kao i u mnogim drugim oblastima. Stručnjaci koji se bave UAV fotogrametrijom koriste, skoro u potpunosti, automatizovan pristup u prikupljanju, obradi, analizi podataka i izradi produkata [2], [5], gde obično izostaje ocena kvaliteta na koju su navikli stručnjaci iz oblasti tradicionalne aerofotogrametrije.

Glavna prednost u obradi podataka UAV fotogrametrije se ogleda u upotrebi SfM – Structure from Motion pristupa u rešavanju problema orijentacije snimaka i određivanju koordinata nepoznatih tačaka. SfM predstavlja pristup kojim je moguće kreirati trodimenzionalne modele objekata ili topografije terena na osnovu 2D preklapajućih snimaka, koji su nastali sa više lokacija i različito orijentisanih snimaka, a sve u cilju

---

Adresa autora: Petar Bursac', Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73

e-mail: pbursac@grf.bg.ac.rs

Rad primljen: 10.09.2019.

Rad prihvaćen: 01.10.2019.

rekonstrukcije posmatrane scene. Promovisanje SfM pristupa iz Computer Vision nauka datira iz 2000. godine projektom „Photo tourism“ [6], [7], ali je njegova matematička formulacija dostupna mnogo godina ranije iz oblasti inženjerske fotogrametrije kao multistation ili multiview bundle adjustment [7], tako da je pogrešno ovaj pristup referisati kao novu metodu. Glavna prednost SfM pristupa se ogleda u implementiranim algoritmima za detekciju i merenje velikog broja ključnih – karakterističnih tačaka na snimcima, poznatim kao SIFT – Scale Invariant Feature Transform algoritmi [8]. Takvi algoritmi obezbeđuju veliki broj jedinstvenih entiteta na snimcima koji su invarijantni na promenu razmere i rotaciju, robusni na veliki broj varijacija na snimcima i pritom opisani odgovarajućim vektorom [2]. Na osnovu datog može se zaključiti da ovaj pristup nudi veoma efikasnu obradu podataka, ali postavlja se pitanje mogućnosti sistema da odgovori na zahteve tačnosti i pouzdanosti izlaznih rezultata.

Bespilotne letelice su u najvećem broju slučajeva opremljene optičkim digitalnim sensorima – kamerama čiji su geometrija i kvalitet sistema sočiva nepoznati. U tom smislu parametri unutrašnje orijentacije i vrednosti distorzija objektivu su nepoznate veličine. U cilju korišćenja jednog ovakvog sistema u merne – fotogrametrijske svrhe, od presudnog je značaja ocena ovih veličina u cilju dobijanja kvalitetnog – tačnog i preciznog 3D modela objekta od interesa ili površi terena.

Pristup oceni nepoznatih elemenata je dostupan kroz proširivanje funkcionalnog i stohastičkog modela blok aerotriangulacije, formiranjem dodatnih jednačina popravaka i njihovoj oceni po metodi najmanjih kvadrata, kroz postupak koji je poznat kao blok aerotriangulacija sa samokalibracijom [9]. Glavna prednost ovog postupka se ogleda u redukovanju sistematskih grešaka u cilju postizanja najveće tačnosti koordinata objekta od interesa.

Za eksperimentalni deo ovog rada, korišćena su dva popularna softverska sistema, u kojima su, pored SfM pristupa, u većoj ili manjoj meri implementirani i algoritmi konvencionalne triangulacije perspektivnih snopova.

Na osnovu velikog broja orijentacionih tačaka postavljenih na kalibracionom poligonu „Debeljača“, izvršena je i analiza uticaja rasporeda i broja orijentacionih tačaka na rezultate blok aerotriangulacije, kao i ocena geometrijskog kvaliteta formiranih modela za karakteristične slučajeve rasporeda. Izvršena je i analiza ocene elemenata unutrašnje orijentacije i distorzija objektivu u cilju sagledavanja i potencijalnog vrednovanja grešaka u bloku snimaka formiranog SfM pristupom.

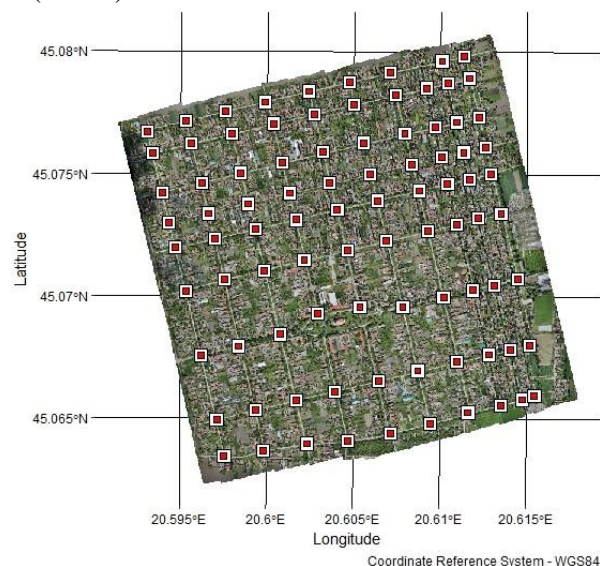
Za blok aerotriangulaciju prostorna tačnost koordinata orijentacionih tačaka mora biti određena sa tačnošću deset puta većom nego što je rezolucija piksela [10], kako ostvarena merenja ne bi kvarila rezultate blok aerotriangulacije. Na osnovu postavljene hipoteze, u radu je data analiza ovog izvora grešaka kod pomenuta dva softverska sistema u cilju sagledavanja uticaja na rezultate blok aerotriangulacije sa samokalibracijom kroz SfM postupak.

Ostatak rada je strukturiran na sledeći način: Drugo poglavlje pod nazivom „Kalibracioni poligon „Debeljača“ i UAV fotogrametrijsko snimanje“, posvećeno je opisu kalibracionog poligona, korišćene opreme i opisu samog snimanja. U okviru trećeg poglavlja „Rezultati i diskusija“ analizirani su i diskutovani rezultati sprovedenih eksperimenata sa aspekta ostvarene tačnosti bloka formiranog SfM pristupom. U poslednjem poglavlju rada izneti su odgovarajući zaključci i preporuke za buduća istraživanja.

## 2. KALIBRACIONI POLIGON „DEBELJAČA“ I UAV FOTOGRAMETRIJSKO SNIMANJE

### 2.1. Kalibracioni poligon „Debeljača“

Kalibracioni poligon „Debeljača“ razvijen je u okviru građevinskog reona naselja Debeljača. Građevinski reon je približno kvadratnog oblika 1.5x1.5 km sa ukupnom površinom od cca 250 ha. Pravilan raspored ulica je diktirao postavljanje 89 orijentacionih tačaka na raskrsnicama na približnom rastojanju od 150 – 200 m (slika 1).



Slika 1 - Prostorna dispozicija naselja Debeljača i mreže orijentacionih tačaka

Tačke mreže orijentacionih tačaka su stabilizovane bolcnama, čija je fotosignalizacija izvršena signalima kvadratnog oblika dimenzija 10x10 cm belom bojom, dok je unutrašnjost obojena crvenom bojom, kvadrat dimenzija 5 cm.

Koordinate tačaka su određene RTK GNSS metodom oslanjanjem na aktivnu mrežu GNSS permanentnih stanica AGROS (Aktivna geodetska referentna osnova Srbije) sa tipom korekcija RTCM3.0. GNSS prijemnik (Javad Triumph) je tokom merenja postavljan centrično iznad tačke, a prijem signala je vršen 5x nezavisno u trajanju od ukupno 30 epoha sa intervalom prijema od 1. RMSE odstupanja pojedinačnih koordinata od aritmetičke sredine iznose 0.007 m, 0.005 m i 0.008 m respektivno po N, E, H-koordinatnim osama ukazuju i da su merenja visoko saglasna.

Merenja GPS prijemnikom u mreži orijentacionih tačaka su dobijena u WGS84 referentnom koordinatnom sistemu. U cilju transformacije koordinata u stari Državni koordinatni sistem Republike Srbije – Besselov elipsoid 7. zoni Gauss-Kruger-ove projekcije korišćeno je softversko rešenje GRIDER [11].

## 2.2. UAV fotogrametrijsko snimanje

UAV fotogrametrijsko snimanje kalibracionog poligona „Debeljača“ izvršeno je u maju mesecu 2018. godine, u idealnim uslovima snimanja. Kao platforma za snimanje korišćena je bespilotna letelica DJI Matrice 600 Pro sa digitalnom amaterskom DSLR kamerom Canon EOS 6D (slika 2), čiji kalibrisani parametri unutrašnje orijentacije i distorzije objektiva nisu prethodno bili poznati.



Slika 2 - Korišćena oprema za UAV fotogrametrijsko snimanje na kalibracionom poligonu „Debeljača“

Za stabilizaciju kamere i ublažavanje vibracija koje nastaju usled leta prilikom samog snimanja korišćen je gimbal DJI - Ronin MX.

U okviru tabele 1 dat je prikaz osnovnih parametara plana leta sa podešavanjima ekspozicije prilikom UAV fotogrametrijskog snimanja.

Kao softverska aplikacija, za izradu plana leta korišćena je besplatna verzija softvera Pix4D Capture, dok je za interna podešavanja letelice korišćeno softversko rešenje DJI GO.

Izvedeno je ukupno pet misija – letova, pri čemu je pre svakog poletanja vršena kalibracija kompasa za

orijentaciju letelice u prostoru i provera ispravnosti konekcije sa kontrolorom, po upustvima proizvođača letelice.

Tabela 1. Parametri plana leta sa izborom parametara ekspozicije

Parametar	Vrednost	Merna jedinica
Žižna daljina	24	mm
Veličina senzora	36 (Š)	mm
	24 (V)	mm
Veličina snimka	5472 (Š)	pix
	3648 (V)	pix
Visina leta	120	m
Podužni preklop	0.85	85%
Poprečni preklop	0.45	45%
Veličina piksela u ravni senzora	6.58	μm
Veličina piksela u prirodi - GSD	3	cm
Otvor blende	f/5	-
Brzina zatvarača	1/1000	s
ISO osetljivost	100	ISO
Brzina leta	10	km/h
Interval ekspozicije	3	s

Za potrebe formiranja UAV aerofotogrametrijskih blokova snimaka i kasnije obrade podataka softverskim paketima AgiSoft PhotoScan i Trimble Inpho UASMaster, na raspolaganju su sledeći podaci:

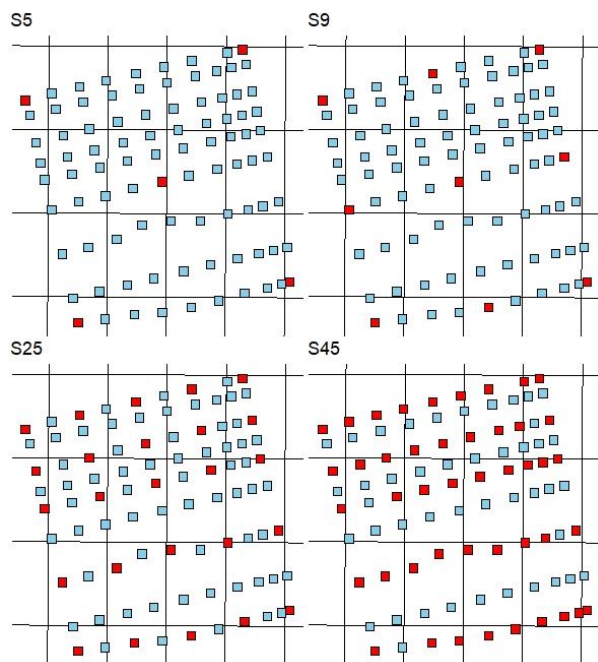
- 1215 snimaka rezolucije 5472x3648 piksela sa veličinom GSD od cca 3 cm i podužnim i poprečnim preklopom od 85% i 45% respektivno.
- Koordinate 89 orijentacionih tačaka u Državnom koordinatnom sistemu Republike Srbije.
- Mere kvaliteta položaja i visina orijentacionih tačaka kao a priori vrednosti mera preciznosti – standardnih devijacija po koordinatnim osama referentnog koordinatnog sistema ( $\sigma_Y$ ,  $\sigma_X$  i  $\sigma_Z$ ).

## 3. REZULTATI I DISKUSIJA

### 3.1. Blok aerotriangulacija sa samokalibracijom primenom SfM postupaka

U cilju ocene geometrijskog kvaliteta formiranih blokova UAV snimaka, definisana su četiri karakteristična scenarija rasporeda i broja orijentacionih tačaka (slika 3). U svakom karakterističnom scenariju jedan broj tačaka su definisane kao oslone, dok su ostale tačke poslužile kao kontrolne u cilju ocene i analize grešaka. Scenario S5 predstavlja najslabiji broj oslonih tačaka, dok scenario S45 predstavlja više nego povoljan broj i raspored oslonih tačaka, koji u praksi za

potrebe UAV aerofotogrametrije predstavlja veoma povoljno rešenje s obzirom na broj snimaka, korišćenje amaterskih kamera i veličinu bloka.



Slika 3 - Karakteristični slučajevi broja i rasporeda orijentacionih tačaka – oslonih (crvenom bojom) i kontrolnih tačaka (plavom bojom)

U svim scenarijima obrade podataka, za tačnost fotogrametrijskih merenja fotosignalisanih orijentacionih tačaka, tj. dodeljivanje težina usvojena je vrednost od 0,3 pix. Navedena vrednost je potvrđena empirijski za slučaj da su orijentacione tačke fotosignalisane veštačkim putem, tj. u ovom slučaju belom bojom na asfaltnoj površini. Ta vrednost pokazuje da s obzirom na veličinu piksela u prirodi od cca 3 cm, greška manualnog fotogrametrijskog merenja slikovnih koordinata iznosi cca 0,9 cm.

Orijentacione tačke su u procesu izravnjanja uključene sa vrednošću težina koje su izračunate preko standardne devijacije od 2 cm po sve tri ose referentnog koordinatnog sistema. Ova vrednost je usvojena empirijski, na osnovu a posteriori ocene komponenti varijanse u blokovima sa različitim scenarijima rasporeda orijentacionih tačaka.

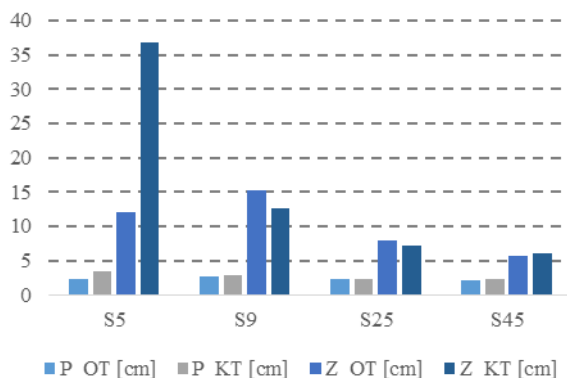
Kao što će se videti iz Globalne test statistike (poglavlje 3.4.), usvojena vrednost je saglasna sa a posteriori ocenom tačnosti orijentacionih tačaka dobijenom iz izravnjanja GNSS merenja.

### 3.2. Ocena geometrijskog kvaliteta formiranih modela

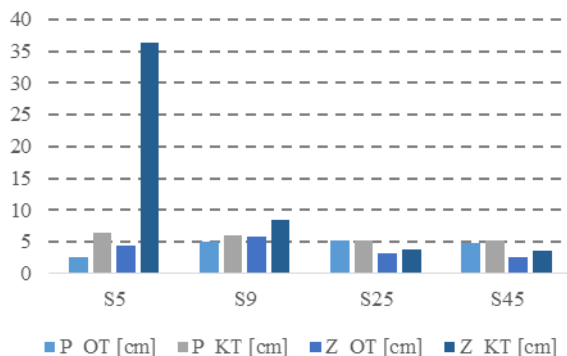
Kao glavna mera geometrijskog kvaliteta korišćena je srednja kvadratna greška RMSE – Root Mean Square Error odstupanja koordinata datih oslonih i

kontrolnih tačaka od koordinata dobijenih kroz formiranje odgovarajućeg bloka. Nakon formiranja fotogrametrijskih blokova za sve konfiguracije orijentacionih tačaka (S5, S9, S25, S45), izračunate su razlike koordinata između datih koordinata tačaka i odgovarajućih koordinata dobijenih formiranjem blokova, i na osnovu njih sračunate odgovarajuće RMSE.

U pogledu ocene geometrijskog kvaliteta formiranih modela, za predstavljene scenarije rasporeda i broja oslonih orijentacionih tačaka, blokovi formirani datim softverskim rešenjima pokazuju dobru saglasnost rezultata (slike 4 i 5).

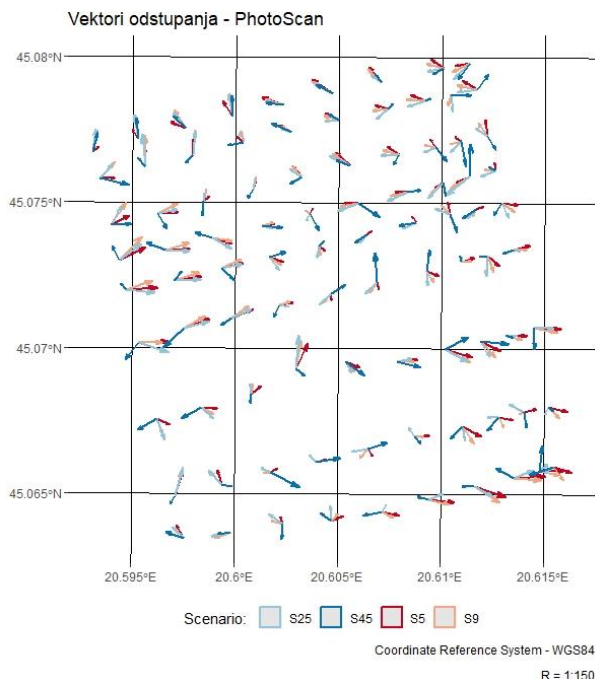


Slika 4 - RMSE vrednosti odstupanja na oslonim i kontrolnim tačkama, za četiri definisana scenarija sa obradom podataka u softverskom sistemu PhotoScan

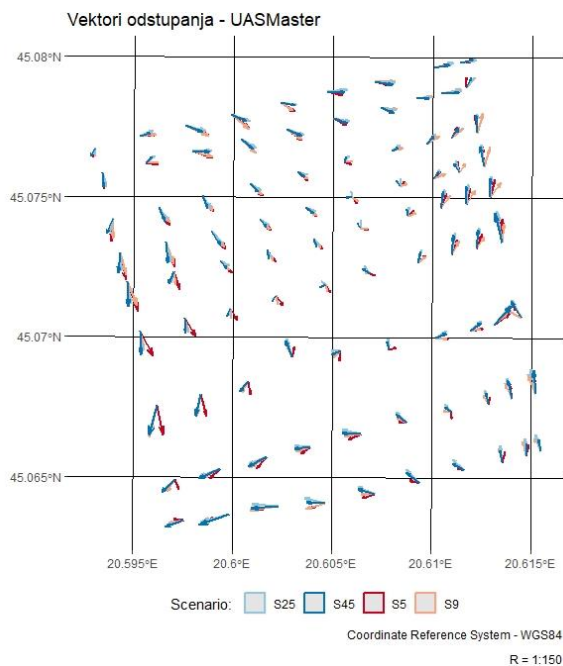


Slika 5 - RMSE vrednosti odstupanja na oslonim i kontrolnim tačkama, za četiri definisana scenarija sa obradom podataka u softverskom sistemu UASMaster

Moglo bi se reći da SfM pokazuje pouzdanu ocenu geometrijskog kvaliteta, nezavisno od korišćenog softverskog sistema. Trend opadanja RMSE vrednosti je isti, od redih ka gušćim konfiguracijama, sa tim da u bloku scenarija S5, vrednosti RMSE visina na kontrolnim tačkama iznose približno isto, cca 36 cm. Kod softverskog sistema UASMaster, uočljiv je trend manjih vrednosti RMSE na kontrolnim tačkama za oko 2 cm u odnosu na PhotoScan za scenario S25 i S45.



Slika 6 - Vektori odstupanja po položaju za četiri definisana scenarija i obrade podataka softverskim sistemom PhotoScan



Slika 7 - Vektori odstupanja po položaju za četiri definisana scenarija i obrade podataka softverskim sistemom UASMaster

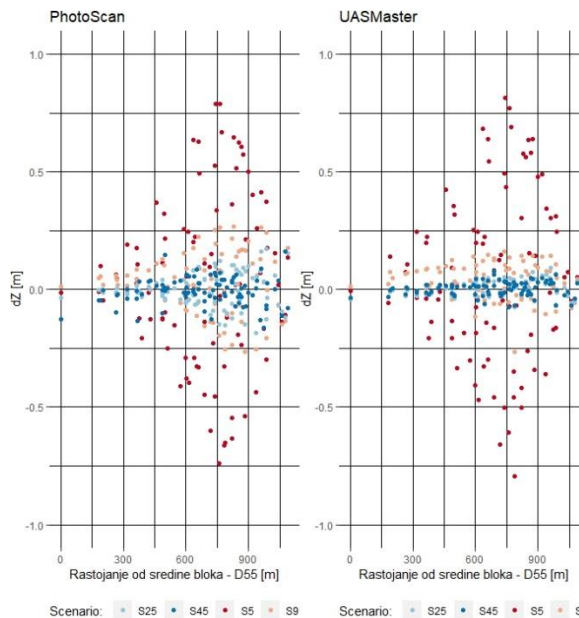
Analizom grafičkih prikaza vektora odstupanja po položaju za definisane scenarije broja i rasporeda oslonih orijentacionih tačaka, kod softverskog sistema PhotoScan (slika 6) i UASMaster (slika 7) dolazi se do sledećih zaključaka:

- Vektori odstupanja položaja kod softverskog sistema PhotoScan pokazuju približno slučajnu

orijentaciju (prva tri scenarija pokazuju približno saglasne rezultate, tj. rezultate koji slede sličnu zakonitost orijentacije vektora grešaka). Kod scenarija S45 orijentacija i smer vektora je u potpunosti slučajna. Smer vektora je u većem broju slučajeva ka sredini bloka. Intenzitet vektora je najveći na ivicama bloka, što je i očekivano.

- Vektori odstupanja položaja kod softverskog sistema UASMaster pokazuju visok stepen sistematskog karaktera i rezultati za sva četiri scenarija su visoko saglasni. Dati sistematski karakter orijentacije i smer vektora odgovara prostornoj dispoziciji manjih blokova snimaka pojedinačnih misija. Može se zaključiti i da veći intenzitet vektora odgovara dispoziciji manjih blokova.

Izvršena je i analiza grešaka visina i njihova vizuelizacija (slika 8) u odnosu na sredinu bloka, gde su koordinate tačke D55 usvojene kao približna sredina bloka.



Slika 8 - Grafik odstupanja po visini za četiri definisana scenarija i obrade podataka softverskim sistemima PhotoScan (levo) i UASMaster (desno)

Može se zaključiti da se povećanjem broja orijentacionih tačaka i njihovim sve povoljnijim geometrijskim rasporedom, postižu manje greške modela i odstupanja na kontrolnim tačkama, što je i očekivano. Softverski sistem UASMaster pokazuje manje rasipanje vrednosti odstupanja, dok kod softverskog sistema PhotoScan, greške visina pokazuju veći stepen rasipanja (slika 8).

### 3.3. Ocena elemenata unutrašnje orijentacije i distorzije

Oba softverska rešenja koriste matematički model unutrašnje orijentacije „pinhole“ kamere po Brown-

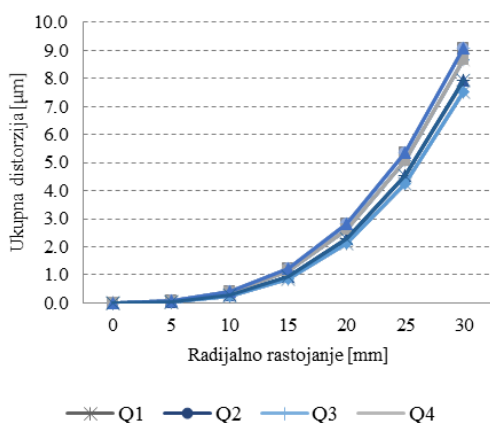
ovom modelu distorzije i oceni koeficijenata radijalne i tangencijalne distorzije [10]. U okviru tabele 2 date su ocenjene vrednosti elemenata unutrašnje orijentacije sa softverskim sistemom PhotoScan, dok su u tabeli 3 date ocenjene vrednosti dobijene softverskim sistemom UASMaster. Jasno je uočljivo da su kod oba softverska sistema rezultati invarijantni u odnosu na povećanje broja oslonih orijentacionih tačaka. Ako se uporede vrednosti između softverskih sistema, jasno je uočljivo da postoji sistematska vrednost razlike. To upućuje da se ocenjene vrednosti mogu koristiti kao fiksne vrednosti parametra kamere u budućim projektima UAV fotogrametrijskog snimanja, ali samo uz korišćenje korespondentnog softverskog sistema za obradu podataka.

Tabela 2. Ocena elemenata unutrašnje orijentacije – PhotoScan

Scenario	c (mm)	$\xi_0$ (mm)	$\eta_0$ (mm)
S-5	24.3212	0.0163	0.1362
S-9	24.3238	0.0164	0.1361
S-25	24.3197	0.0164	0.1362
S-45	24.3197	0.0164	0.1362

Tabela 3. Ocena elemenata unutrašnje orijentacije – UASMaster

Scenario	c (mm)	$\xi_0$ (mm)	$\eta_0$ (mm)
S-5	24.7006	0,0189	0,1421
S-9	24.6988	0,0190	0,1421
S-25	24.6869	0,0188	0,1423
S-45	24.6809	0,0187	0,1424



Slika 9 - Ukupna distorzija objekta dobijena samokalibracijom za različite scenarije orijentacionih tačaka kod softverskog sistema PhotoScan

Na slikama 9 i 10 dat je grafički prikaz ukupnih distorzija objekta korišćene digitalne kamere Canon EOS 6D, tj. ukupnih radijalnih i decentričnih distorzija na osnovu ocenjenih vrednosti koeficijenata. Rezultati

su predstavljeni za sva četiri kvadranta snimka u odnosu na radijalno rastojanje od središta snimka i sračunati pomoću formula koje opisuju Brown-ov model kamere [10]:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (1)$$

$$x' = x(1 + K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) + (P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2 xy) \quad (2)$$

$$y' = y(1 + K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) + (P_2(r^2 + 2y^2) + 2P_1 xy) \quad (3)$$

gde je:

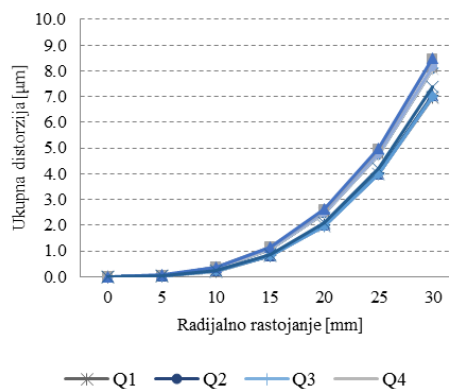
r - radijalno rastojanje;

x' - ocenjena vrednost slikovne koordinate po x osi slikovnog koordinatnog Sistema;

y' - ocenjena vrednost slikovne koordinate po y osi slikovnog koordinatnog sistema;

K1, K2, K3 - koeficijenti radijalnih distorzija (eng. radial distortion coefficients);

P1, P2 - koeficijenti tangencijalnih distorzija (eng. tangential distortion coefficients);



Slika 10 - Ukupna distorzija objekta dobijena samokalibracijom za različite scenarije orijentacionih tačaka kod softverskog sistema UASMaster

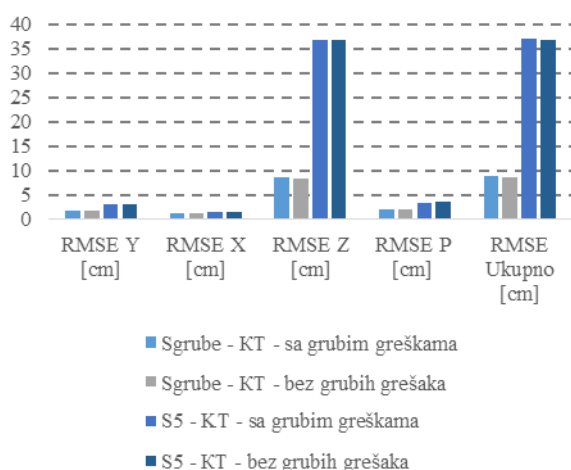
Oba softverska sistema pokazuju saglasne rezultate po kvadrantima za vrednosti ukupnih distorzija objekta, ocenjene kroz postupak samokalibracije. Softverski sistem PhotoScan pokazuje blago više vrednosti distorzija od 9.1 μm na radijalnom rastojanju od 30 mm od središta snimka, dok je kod softverskog sistema UASMaster maksimalna vrednost 8.5 μm. Iako je reč o istom matematičkom modelu, ove razlike u vrednostima radijalne distorzije upućuju na postojanje korelacije parametara distorzije u modelu (1) - (3) sa rekonstruisanim 3D modelom (a time i implementiranim algoritmima u tehnikama podudarnosti snimaka), kao i konfiguracijom orijentacionih tačaka.

### 3.4. Analiza uticaja grubih grešaka u mreži orijentacionih tačaka na tačnost blok aerotriangulacije SfM pristupom

Da bi se otklonio uticaj osrednjavanja rezultata nezavisnih sesija merenja jedne tačke, potrebno je prvo

statistički oceniti globalni model adekvatnosti u odnosu na *a priori* postavljene zahteve standardnog odstupanja od aritmetičke sredine (Fišer-ov test), a zatim i maksimalne vrednosti odstupanja statistički testirati primenom Student-ove raspodele. Rezultati statističkog testiranja su sledeći:

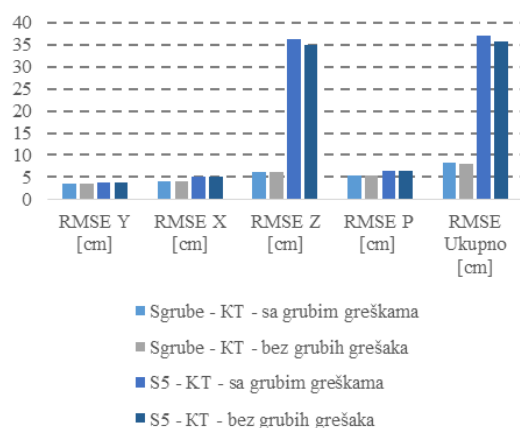
- Na osnovu test statistike postavljene hipoteze i rezultata, sa nivoom značajnosti od 0,05 (pri verovatnoći od 95%) prihvata se nulta hipoteza i zaključuje se da u rezultatima merenja nema prisustva grubih grešaka velikih po intenzitetu.
- Prosečne vrednosti standardnih devijacija GNSS merenja po N, E i H osi referentnog koordinatnog sistema, pre otklanjanja grubih grešaka (statistički posmatrano, sa usvojenom test statistikom, raspodelom i nivoom značajnosti) su iznosile 0,007 m, 0,012 m i 0,016 m. Nakon otklanjanja grubih grešaka, ove vrednosti iznose respektivno 0,007 m, 0,011 m i 0,015 m. Veoma male razlike upućuju na to da su sva merenja u 5 nezavisnih epoha GNSS prijemnikom u mreži orijentacionih tačaka, u svim serijama merenja izvršena istom preciznošću i da su homogena.



Slika 11 - RMSE vrednosti na kontrolnim tačkama kod softverskog sistema PhotoScan

Analiza uticaja grubih grešaka u mreži orijentacionih tačaka na tačnost blok aerotriangulacije SfM pristupom je za oba softverska sistema izvršena u dva karakteristična scenarija:

- Kao oslone tačke poslužile su sve tačke koje su imale bar jednu grubu grešku, dok su ostale smatrane kao kontrolne za proveru rezultata, što ukupno rezultira sa 44 oslonih orijentacionih i 45 kontrolnih tačaka (scenario Sgrube).
- U drugom scenariju za oslone – orijentacione tačke korišćen je scenario S5, koji podrazumeva minimalnu konfiguraciju u pogledu orijentacionih tačaka, što ukupno rezultira sa 5 oslonih i 84 kontrolnih tačaka.



Slika 12 - RMSE vrednosti na kontrolnim tačkama kod softverskog sistema UASMaster

Analizom uticaja grubih grešaka u mreži orijentacionih tačaka je pokazano da oba softverska sistema pokazuju veoma male razlike vrednosti RMSE odstupanja na kontrolnim tačkama u blokovima sa i bez prisustva grubih grešaka (slike 11 i 12). To upućuje na zaključak da su SfM postupci implementirani u razmatranim softverskim sistemima za UAV fotogrametriju, s jedne strane veoma robusni na uticaj grubih grešaka u koordinatama orijentacionih tačaka na izravnote rezultate (spoljašnja pouzdanost), ali su, s druge strane, slabo sposobni za njihovo otkrivanje (unutrašnja pouzdanost).

#### 4. ZAKLJUČAK

Kalibracioni poligon Debeljača“ omogućio je raznovrsno i slojevito upoređenje rezultata UAV fotogrametrije dobijenih primenom softverskih sistema PhotoScan i UASMaster. Pored zaključaka u vezi konkretnih softverskih sistema, neki od zaključaka su opšteg karaktera, s obzirom da su izvedeni korišćenjem karakterističnih predstavnika softvera koji u svojoj osnovi koriste SfM pristup. Pre svega, ocenom geometrijskog kvaliteta formiranih modela potvrđeno je da raspored i broj oslonih orijentacionih tačaka igra važnu ulogu u formiranju kvalitetnog, tačnog i pouzdanog 3D modela formiranog SfM pristupom.

Oba softverska sistema pokazuju saglasne rezultate parametara unutrašnje orijentacije i distorzije objektiva, ocenjene kroz postupak samokalibracije. Izvesne razlike u vrednostima radijalne distorzije upućuju na postojanje korelacije parametara distorzije sa rekonstruisanim 3D modelom (korišćenjem algoritma podudarnosti slika), kao i konfiguracijom orijentacionih tačaka. To implicira da se dobijeni parametri unutrašnje orijentacije i distorzije objektiva mogu pouzdano koristiti u budućim projektima samo ukoliko se obrada podataka radi korišćenjem istih softverskih sistema sa kojima su ti parametri prethodno dobijeni.

Analiza uticaja grubih grešaka u mreži orijentacionih tačaka na tačnost izlaznih rezultata je pokazala da oba softverska sistema pokazuju veoma male razlike vrednosti RMSE odstupanja na kontrolnim tačkama u blokovima sa i bez prisustva grubih grešaka. To opet upućuje na zaključak opšteg karaktera da su SfM postupci u UAV fotogrametriji, s jedne strane veoma robusni na uticaj grubih grešaka na izravnete rezultate (spoljašnja pouzdanost), ali su, s druge strane, slabo sposobni za njihovo otkrivanje (unutrašnja pouzdanost).

U cilju daljeg sagledavanja mogućnosti drugih softverskih rešenja, potrebno je sprovesti niz dodatnih eksperimenata, kako bi se data empirijska istraživanja i u potpunosti potvrdila. Zaključak je da kalibracioni poligon „Debeljača“, po svojoj prostornoj dispoziciji i veličini odgovara zahtevima test kalibracionih područja mernih fotogrametrijskih kamera. Istraživanja drugih UAV fotogrametrijskih sistema, posebno njihovih digitalnih kamera, na ovom kalibracionom poligonu su sasvim opravdana, ukoliko se od njih očekuju primene na polju konvencionalnih fotogrametrijskih zadataka. Kod takvih zadataka je prirodno da se prethodno zahteva dokaz kvaliteta ovih sistema, pre svega u pogledu postizanja očekivane geometrijske tačnosti.

## 5. ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju kompaniji „MapSoft d.o.o.“ iz Beograda koja im je pomogla u realizaciji projekta mreže orijentacionih tačaka.

Autori duguju zahvalnost i Laboratoriji za fotogrametriju i daljinsku detekciju, Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu, koja je obezbedila opremu i bespilotnu letelicu za fotogrametrijsko snimanje.

## LITERATURA

- [1] Santise M, *UAS Photogrammetric blocks: accuracy, georeferencing and control*, Doctoral Thesis, University of Parma, Italy, 2016.
- [2] Remondino F, del Pizzo S, Kersten T. P, Troisi S, *Low-cost and open-source solutions for automated image orientation – a critical overview*, Lecture notes in Computer science, 2012.
- [3] Remondino F, Spera M. G, Nocerino E, Menna F, Nex F, *State of the art in high density image matching*, Photogrammetric Record, 2014.
- [4] Reshetyuk Y, Mårtensson S.G, *Generation of highly accurate digital elevation models with unmanned aerial vehicles*, Photogrammetric Record, 2016.
- [5] van Wegen W, Pronk M, *A smarter future for geomatics: GIM International interviews Thomas Kersten*, GIM International, 2014.
- [6] Snavely N, Seitz S. M, Szeliski R, *Photo Tourism: Exploring Photo Collections in 3D*, University of Washington, USA, 2008.
- [7] Granshaw S. I, *Structure from Motion: Origins and originality*, Photogrammetric Record, 2018.
- [8] Colomina I, Molina P, *Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014.
- [9] Granshaw S. I, *Bundle Adjustment Methods in Engineering Photogrammetry*, Photogrammetric Record, 1980, 2006.
- [10] Cramer M, Grenzdörffer G, Honkavaara E, *In situ digital airborne camera validation and certification – The future standard?*, ISPRS Commission I Meeting, Calgary, Canada, 2010.
- [11] Republički geodetski zavod – RGZ, *Web aplikacija za transformaciju koordinata GRIDER*, Beograd, R. Srbija, 2016. [citirano 19.08.2019]. Dostupno na: <http://www.rgz.gov.rs/usluge/grider>.



## SUMMARY

### COMPARISON OF THE RESULTS OF THE UAV PHOTOGRAMMETRY ON THE CALIBRATION TEST FIELD "DEBELJAČA" OBTAINED BY USING DIFFERENT SOFTWARE SYSTEMS

*The aim of this paper is to present a comparative analysis of the results obtained by UAV photogrammetry on the calibration polygon "Debeljača", and by using two different software systems: AgiSoft PhotoScan and Trimble INPHO UASMaster. The paper presents the impact analysis and the potential evaluation of errors in the UAV photogrammetric block, obtained by DSLR - Digital Single-Lens Reflex amateur digital camera with unknown internal orientation and unknown distortion values. Blocks were formed using SfM - Structure from Motion approach, implemented in given software systems. A large number of reliable control points on the calibration polygon enabled the analysis of error propagation in the block for different scenarios of distribution of the ground control points, as well as the assessment of the geometric quality of the formed models.*

**Key words:** UAV photogrammetry, Structure-from-Motion, bundle block adjustment with self-calibration, calibration test field