

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEDOETSKI FAKULTET

LUKA JURJEVIĆ

KALIBRACIJA KAMERE BESPILOTNE LETJELICE

DIPLOMSKI RAD



Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEDOETSKI FAKULTET

LUKA JURJEVIĆ

KALIBRACIJA KAMERE BESPILOTNE LETJELICE

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2017.

I. Autor

Ime i prezime: Luka Jurjević

Datum i mjesto rođenja: 12. travnja 1993., Zadar, Republika Hrvatska

II. Diplomski rad

Naslov: Kalibracija kamere bespilotne letjelice

Mentor: doc. dr. sc. Dubravko Gajski

Drugi mentor: dr. sc. Mateo Gašparović

Voditelj: dr. sc. Mateo Gašparović

III. Ocjena i obrana

Datum zadavanja zadatka: 3. veljače 2016.

Datum obrane: 8. rujna 2017.

Sastav povjerenstva pred kojim je branjen diplomski rad: doc. dr. sc. Dubravko Gajski

doc. dr. sc. Andrija Krtalić

doc. dr. sc. Robert Župan

Zahvala:

Hvala mentorima na konstruktivnim savjetima koji su učinili ovaj diplomski rad kvalitetnijim.

Želim se zahvaliti mojim roditeljima, sestri i obitelji na podršci i savjetovanju tijekom cjelokupnog studiranja, bez njihove podrške ovo je mogao biti puno teži put nego što je bio.

Nadalje zahvaljujem se svim svojim prijateljima koji su bili u bilo kojem trenutku studija uz mene i djelovali na mene te utjecali na mene kao osobu. Zahvaljujem se svom prijatelju Mihaelu na svim zajedničkim učenjima i zafrkanciji, koji su definitivno učinili studiranje lakšim i zabavnijim.

Posebno se zahvaljujem Mateu Gašparoviću na nesebičnoj pomoći, suradnji i savjetima koji su mi uvelike pomogli u daljnjoj stručnoj orijentaciji.

Hvala!

Kalibracija kamere bespilotne letjelice

Sažetak: U ovome radu obrađena je kalibracija niskobudžetne akcijske kamere predviđene za uporabu na bespilotnoj letjelici, sa naglaskom na uklanjanje radijalne distorzije. Obradena je teorijska osnova fotogrametrije, korištenih modela i metoda. Osim prezentirane teorije, predstavljen je postupak naknadne obrade fotografija u *.RAW formatu, te je ispitan njegov utjecaj i doprinos kalibraciji kamere. Kalibracija je obavljena u tri softvera od kojih je svaki predstavnik po jedne skupine softvera; slobodnog, komercijalnog i znanstvenog. Rezultati su pokazali da se može postići zadovoljavajuća točnost kalibracije kamere i uklanjanja pogrešaka leće, barem što se tiče fotogrametrijskih primjena koje ne zahtijevaju visoku točnost. Za primjene koje zahtijevaju višu točnost preporuča se dvostupanjski postupak sa inicijalnim uklanjanjem distorzije te rekonstrukcija objekta uz samokalibraciju kamere za optimalne rezultate.

Ključne riječi: Kalibracija; kamera; UAV; akcijska kamera; distorzija

UAV camera calibration

Abstract: Calibration of the low-cost action camera that is intended to use on the Unmanned Aerial Vehicle (UAV) is elaborated in this paper. Removal of the radial distortion influence is emphasized. Basic photogrammetric theory, used models and methods are presented, influence of image manipulation over *.RAW format in post processing is examined, so as its contribution to the camera calibration. Calibration of the camera is carried over in three different software. Each one of them is representative of one class; open source, commercial and scientific. Results of the taken tests indicate that sufficient quality of camera calibration and lens errors reduction for applications that do not require high precision can be achieved. For the applications that require high precision it is advised to use two-step procedure with initial distortion removal and subsequent calibration within object reconstruction, via self-calibration procedure.

Keywords: Calibration; camera; UAV; action camera; distortion

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Tehnologija	2
2.1 Unaprjeđenja kamere	2
2.2 Obrada *.RAW formata	5
2.3 Softveri za kalibraciju	9
3. Fotogrametrija	11
3.1 Unutarnja orijentacija kamere.....	13
3.2 Vanjska orijentacija	16
3.3 Jednadžbe kolinearnosti	19
3.4 Metoda izjednačenja zrakovnih snopova	20
3.5 Distorzija objektiva	23
3.6 Metode kalibracije	30
4. Kalibracija kamere	33
4.1 Agisoft Lens.....	33
4.2 MATLAB Toolbox for Camera Calibration	36
4.3 Orpheus 3.2.1	40
5. Rezultati	43
5.1 Agisoft Lens.....	43
5.2 MATLAB Toolbox for Camera Calibration	48
5.3 Orpheus Orient 3.2.1	51
6. Zaključak.....	55

1. Uvod

Danas, digitalne kamere su najrašireniji senzor za prikupljanje prostornih podataka, dostupan svima. Gotovo svatko tko posjeduje pametni telefon ima i takav senzor. Taj senzor je sposoban u jako kratkom vremenu ekspozicije, odnosno izloženosti svjetlosti, pribaviti nevjerovatno velik broj mjerenja koji ovisi o dimenziji senzora, odnosno o broju piksela (Gajski, 2013). Samo mjerenje podrazumijeva kvantifikaciju spektra elektromagnetskog zračenja. Ta kvantifikacija u kombinaciji s poznatim modelom projekcije svjetlosti na ravninu senzora, odnosno modela centralne projekcije (Luhmann i dr., 2013), ovim senzorima daje ogroman potencijal što se tiče geometrijskog i radiometrijskog mjerenja. Konstantnim poboljšavanjem kvalitete izrade senzora i optičkih komponenti kamera, odnosno napretkom tehnologije, ali i softvera, omogućeno je korištenje običnih "nemjerenih" kamera (amaterske, polu-profesionalne i profesionalne) u fotogrametrijske mjerne svrhe (Gašparović i Gajski, 2016). Osim dostatnog stupnja kvalitete izrade, ne mjerna kamera mora biti kalibrirana kako bi se mogla koristiti u mjerne svrhe (Gajski, 2015).

U širokoj lepezi ponude raznih kamera svoje mjesto su našle i akcijske kamere. Do nedavno, akcijske kamere su se pretežno koristile kod ekstremnih aktivnosti poput skokova s padobranom, ronjenja itd. Fotogrametrijska primjena je bila gotovo nemoguća s obzirom na to da nisu mogle proizvesti snimke visoke rezolucije, a i zbog kvalitete izrade često nisu imale stabilnu unutarnju orijentaciju. Kvaliteta izrade akcijskih kamera se poboljšala, a samim time su se i proširila polja primjene. Akcijske kamere su zbog svojih karakteristika idealne za razne niskobudžetne sustave snimanja (Gašparović i Jurjević, 2017). Idealne su za podvodne primjene s obzirom da postoje vodonepropusna kućišta (Raoult i dr., 2016), te za primjene na bespilotnim letjelicama s obzirom na njihove relativno male dimenzije i masu, te mogućnost bežične kontrole putem Bluetootha ili Wi-Fi-a.

Kalibracija kamere je tema koja već temeljito istražena. Geometrijsku kalibraciju kamere obradili su razni renomirani svjetski znanstvenici (Cramer, 2006, Tsai, 1987, Brown, 1971). U ovome radu opisani su postupci kalibracije niskobudžetne akcijske kamere Xiaomi Yi (URL 1) u različitim softverima. Korišteni softveri su predstavnici komercijalnih, znanstvenih i otvorenih softvera. Navedena kamera se pokazala kao dostojan konkurent višestruko skupljim akcijskim kamerama dostupnima na tržištu poput GoPro (URL 2), te je ubrzo našla primjenu na niskobudžetnim UAV fotogrametrijskim sustavima (Gašparović i Gajski, 2016).

2. Tehnologija

U ovom poglavlju opisana je korištena tehnologija za potrebe izrade ovoga rada. Opisani su postupci i metode unaprjeđenja korištene kamere. Postavljene su polazne pretpostavke te očekivani rezultati temeljem primjene definiranih postupaka. Opisana su softverska i hardverska unaprjeđenja predmetne kamere te postupci radiometrijske obrade fotografije s ciljem bolje detekcije vrhova test polja za kalibraciju.

2.1 Unaprjeđenja kamere

Kamera Xiaomi Yi je niskobudžetna akcijska kamera kineske proizvodnje. Xiaomi Yi za razliku od drugih jeftinih akcijskih kamera ima jako kvalitetan CMOS senzor Sony Exmor R BSI sa 16 MP (Megapiksela). Bez obzira na to, izvorna kamera ima nekoliko negativnih strana. Izvorno, Xiaomi Yi podešava vrijeme ekspozicije na najkraće moguće, što ima smisla s obzirom da je to akcijska kamera i da podrazumijeva dinamičnu okolinu prilikom korištenja. Posljedica toga je visoka osjetljivost, odnosno pojačan šum na slici i smanjena detaljnost. Navedeno nas navodi na slijedeći problem kod Xiaomi Yi kamere, a to je agresivno smanjivanje šuma. Zbog visoke osjetljivosti, kamera primjenjuje agresivni filter šuma uslijed čega dolazi do gubitka podataka. Slijedeća mana kamere je to što generira fotografije samo u *.JPEG formatu. Zadnja i možda najsignifikantnija mana izvorne Xiaomi Yi kamere je nepovoljno podešen fokus leće. Naime fokus je podešen tako da objekti u neposrednoj blizini kamere budu u fokusu, što nikako nije prema standardima fotogrametrijske primjene kamera na bespilotnim letjelicama s obzirom na uobičajenu udaljenost od objekta.

Uslijed navedenih manjkavosti, predmetna kamera bila je subjekt softverskog i hardverskog unaprjeđenja. Softversko unaprjeđenje je izvedeno razvojem skripti. Sve manjkavosti kamere osim fokusa leće riješene su navedenim softverskim unaprjeđenjem. Razvojem skripti moguće je podešavati parametre kamere poput osjetljivosti senzora (ISO), dužine ekspozicije, ali i generiranja *.RAW podataka. Fotografije u *.RAW formatu su minimalno procesuirane od strane algoritma kamere i nečitljive su. Zahtijevaju naknadno procesuiranje kako bi uopće bile čitljive. Potencijal *.RAW formata leži upravo u naknadnoj obradi i podešavanju parametara fotografije na način da se naglase neke pojave na slici koje su nam od interesa. U ovome radu se *.RAW format koristio s ciljem naglašavanja i boljeg detektiranja točaka testnog polja. Postupak naknadne obrade fotografija u *.RAW formatu objašnjen je u poglavlju 2.2.

Što se tiče softverskog unaprjeđenja skriptiranjem, predmetna kamera pri svakom pokretanju provjerava da li na SD kartici postoji datoteka „autoexec.ash“ (URL 3). Ukoliko postoji navedena datoteka, kamera ju čita i izvršava naredbe koje se nalaze u njoj. Na ovaj način je moguće predefinirati ponašanje kamere. Podešavanje osjetljivosti senzora, dužine ekspozicije i pojačanja se postiže dodavanjem linije koda sadržaja „t ia2 -ae exp P1 P2 P3“, gdje su P1, P2 i P3 korespondentne vrijednosti za osjetljivost senzora, dužinu ekspozicije i pojačanja. U tablici 1. prikazane su moguće vrijednosti za osjetljivost senzora, a u tablici 2. vrijednosti parametra sa korespondentnim vrijednostima u sekundama, kao dužinom ekspozicije. Generiranje fotografije u *.RAW formatu se postiže dodavanjem linije „t app test debug_dump 14“, u „autoexec.ash“ datoteku. Primjer „autoexec.ash“ datoteke korištene u svrhu jednostavnijeg fotografiranja za ovaj rad nalazi se u prilogu A.

Tablica 1. Mogući parametri osjetljivosti senzora.

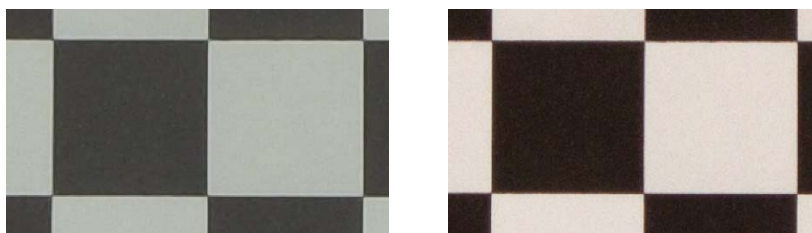
Osjetljivost senzora (ISO)
100
200
400
800
1600
3200
6400
12800
256000

Tablica 2. Vrijednost parametra dužine ekspozicije sa odgovarajućim vrijednostima u sekundama.

Dužina ekspozicije	Vrijednost parametra	Dužina ekspozicije	Vrijednost parametra	Dužina ekspozicije	Vrijednost parametra
Automatska	0	1/10s	800	1/320s	1450
7.9s	1	1/15s	900	1/500s	1531
7.7s	8	1/30s	1000	1/752s	1607
6.1s	50	1/50s	1100	1/1002s	1660
4.6s	100	1/60s	1145	1/2004s	1788
2.7s	200	1/80s	1200	1/2138s	1800
1s	400	1/125s	1275	1/3675s	1900
1/3s	590	1/140s	1300	1/6316s	2000
1/5s	600	1/250s	1405	1/8147s	2047

Na slici 1a i slici 1b prikazan je isti detalj šahovskog test polja koje je korišteno za potrebe kalibracije kamere. Lijevo (Slika 1a) se nalazi detalj sa izvorne fotografije u *.JPEG (engl. Joint Photographic Experts Group) formatu uvećan sa 500% zooma, na kojemu se jasno vidi nekorektno automatski podešeno balansiranje bijele boje (engl. White Balance – WB). Desno (Slika 1b) se nalazi fotografija u *.TIFF (engl. Tagged Image File Format) formatu, također

uvećana sa 500% zooma, izvedena iz *.RAW formata naknadnom obradom. Na priloženoj slici se jasno vidi da je kontrast naglašeniji, što bi trebalo omogućiti algoritmu za detekciju točaka kvalitetniju detekciju.



a)

b)

Slika 1. a) izvorna *.JPEG fotografija, b) naknadno obrađena *.RAW fotografija.

Problem lošeg fokusa kamere je eliminiran zamjenom širokokutnog objektiva kamere sa visoko kvalitetnim objektivom žarišne udaljenosti 4.35 mm, deklarirano male distorzije. Na slici 2. prikazana je izvorna i unaprijeđena kamera Xiaomi Yi, a u tablici 3 njihove specifikacije.

Tablica 3. Usporedba specifikacija izvorne i unaprijeđene kamere Xiaomi Yi.

	Izvorna kamera Xiaomi Yi	Unaprijeđena kamera Xiaomi Yi
Procesor	Ambarella A7LS	
Žarišna udaljenost	2.73 mm	4.35 mm (distorzija <1%)
Otvor blende	F2.8	
¹ FOV	155°	86°
Senzor	Sony Exmor R BSI CMOS 16 MP	
Veličina	6 x 2.1 x 4.2 cm	
Težina	72 g	
Video	Do 1080p 60fps	
Memorija	Do 64GB SD kartica	
Povezivost	Wi-Fi, Bluetooth 4.0v, USB, Micro HDMI	
*.RAW podaci	Ne	Da

¹FOV – Širina vidnog polja (engl. Field Of View)



(a)

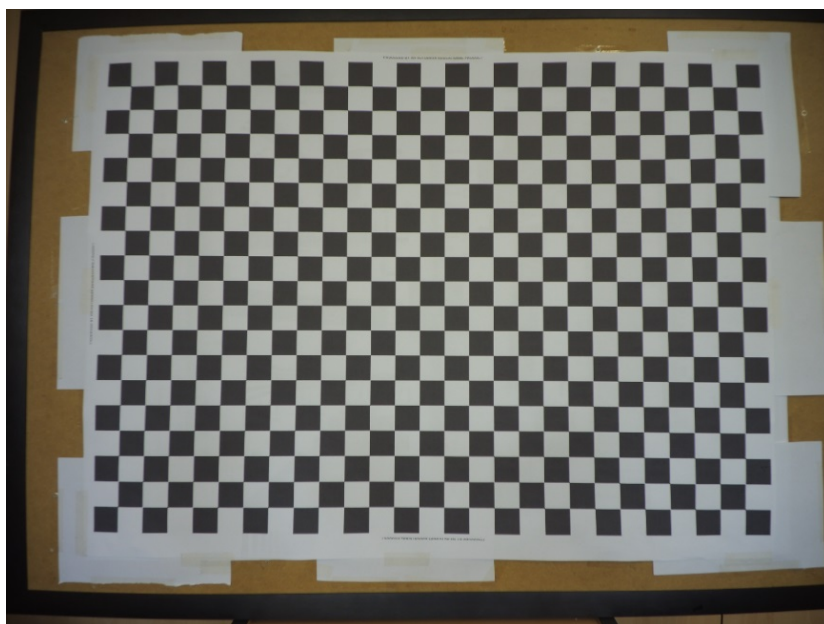


(b)

Slika 2. a) Izvorna kamera Xiaomi Yi (URL 1), b) unaprijeđena kamera Xiaomi Yi.

2.2 Obrada *.RAW formata

Kao što je već spomenuto, predmetna kamera je unaprijeđena razvojem skripti. Pri sakupljanju fotografija koje su se koristile za kalibraciju, zadano je generiranje datoteka u *.RAW formatu pored izvornih u *.JPEG formatu. Fotografije su snimane u najvećoj dostupnoj rezoluciji od 4608 x 3456 piksela. Prosječna *.JPEG datoteka u tim dimenzijama zauzima oko 4MB na tvrdom disku. Fotografija u *.JPEG formatu korištena za potrebe rada prikazana je na slici 3. Ona je ujedno i referenca za usporedbe koje slijede u daljnjem tekstu.

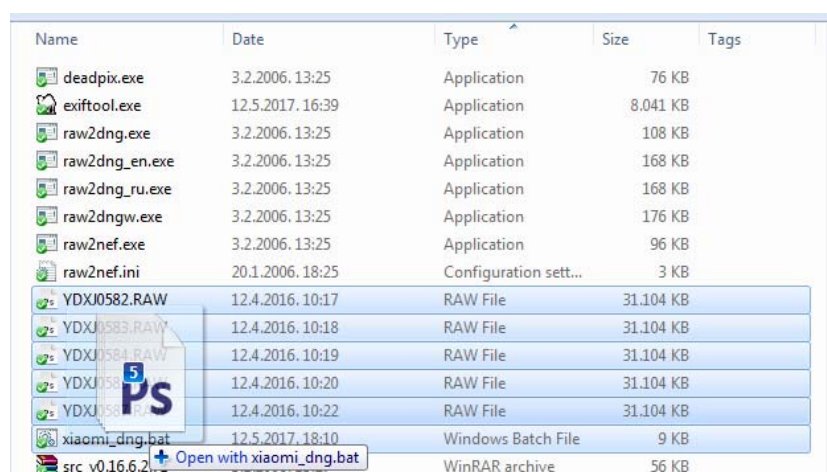


*Slika 3. Referentna *.JPEG fotografija.*

Datoteka u *.RAW formatu koja se kreira uz standardnu datoteku u *.JPG formatu zauzima u prosjeku 31MB na tvrdom disku. Iz navedenog se najbolje vidi potencijal korištenog *.RAW formata. To je format koji nije prošao kroz nikakav filter, odnosno to su podaci dobiveni direktno sa senzora. Naravno, takvi podaci su ne čitljivi i potrebno ih je konvertirati. Kako bi podaci bili čitljivi potrebno ih je konvertirati u jedan od čitljivih formata, u ovom slučaju to je *.DNG (engl. Digital Negative) format. Konverzijom *.RAW formata u *.DNG format najčešće se ne gube podaci, ovisno o softveru za konverziju. Prilikom takve konverzije podaci se najčešće samo restrukturiraju, te se tim postupkom memorija koju datoteka zauzima na tvrdom disku smanjuje na 9MB. Fotografija u *.DNG formatu se tada naknadno obrađuje. Za potrebe ovog rada fotografije u *.DNG formatu su obrađivane u softveru Adobe Photoshop CS6 (URL 4). Fotografije su manualno obrađene podešavanjem parametara koji utječu na radiometriju fotografije, kako bi se postigao

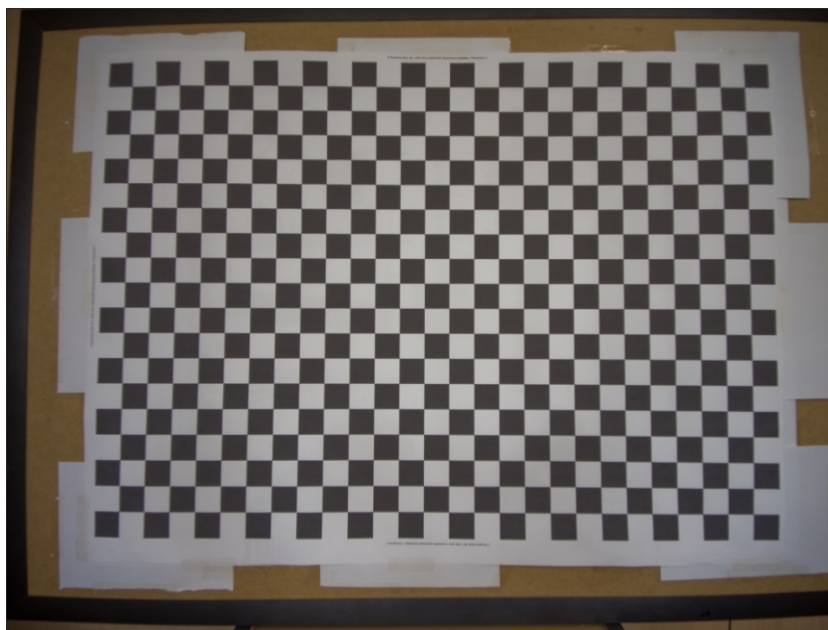
naglašeniji kontrast. Navedeni postupci su provedeni kako bi se ispitala pretpostavljena hipoteza koja kaže da je automatska detekcija točaka testnog polja na takvim fotografijama kvalitetnija.

Kao što je već navedeno, *.RAW format je nečitljiv za uobičajene softvere za obradu digitalnih fotografija. Za potrebe ovog rada, fotografije u *.RAW formatu su konvertirane temeljem uputa dostupnih na internet forumu (URL 5). Skripte korištene za konverziju su priložene na CD-u uz diplomski rad. Prvi korak u konverziji iz *.RAW formata u format koji se može koristiti za navedene potrebe se obavlja pomoću „xiaomi_dng.bat“ skripte. Za pokretanje postupka potrebno je samo označiti *.RAW datoteke i odvući ih klikom miša na datoteku „xiaomi_dng.bat“ (Slika 4), tada će se u komandnom prozoru prikazati status postupka konverzije.



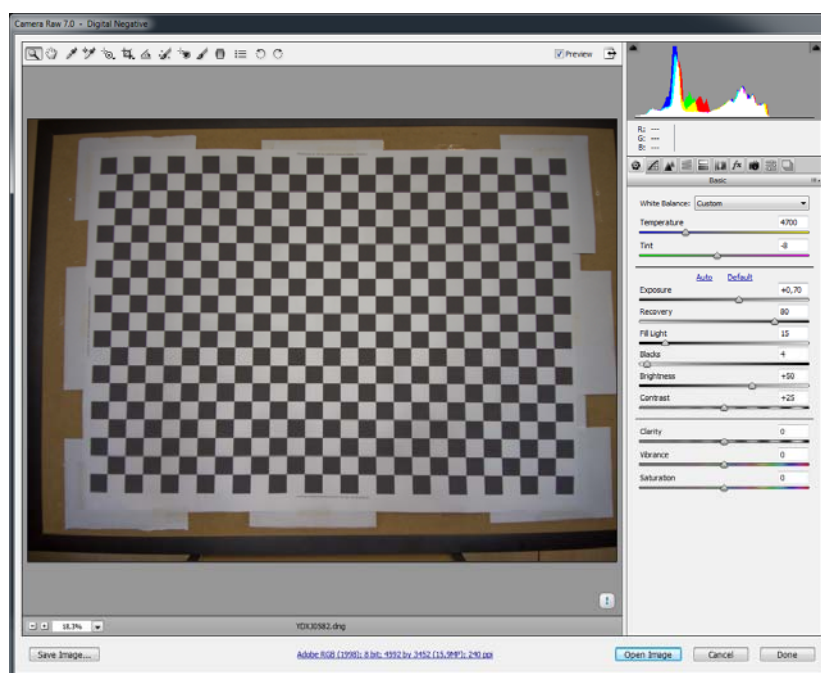
Slika 4. Pokretanje postupka konverzije fotografija iz *.RAW formata u *.DNG format.

Po završetku konverzije, datoteke u *.DNG formatu će se pojaviti u direktoriju gdje se nalaze sve datoteke. Primjer dobivene *.DNG datoteke je prikazana na slici 5. Važno je uzeti u obzir da se radi o *.DNG datoteci koja nije prošla nikakvu pred obradu te nalikuje *.JPEG datoteci na slici 3. To je slučaj zbog toga što su početni parametri *.DNG datoteke, koji su predefinirani u skripti kojom se pokreće konverzija, podešeni tako da radi lakše vizualne interpretacije fotografija bude bliže onome što ljudsko oko vidi. Datoteka još uvijek sadrži čitavi spektar informacija i može se podešavati kako bi se postigla bolja radiometrijska svojstva.



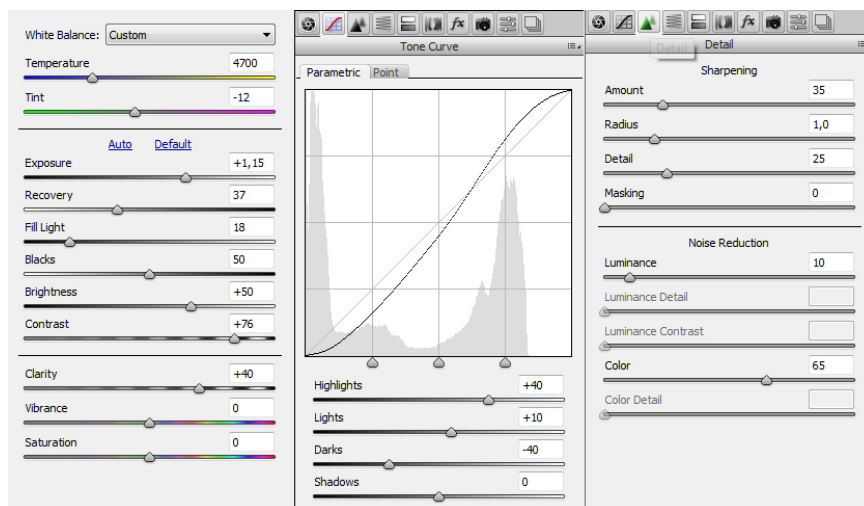
*Slika 5. Referentna *.DNG fotografija.*

Učitavanjem *.DNG datoteke u Adobe Photoshop CS6, otvara se prozor CameraRaw modula navedenog softvera (Slika 6). S desne strane otvorenog prozora nalazi se prozor u kojem se podešavaju postavke radiometrije fotografije prije konačnog uvoza i potvrđivanja postavki.



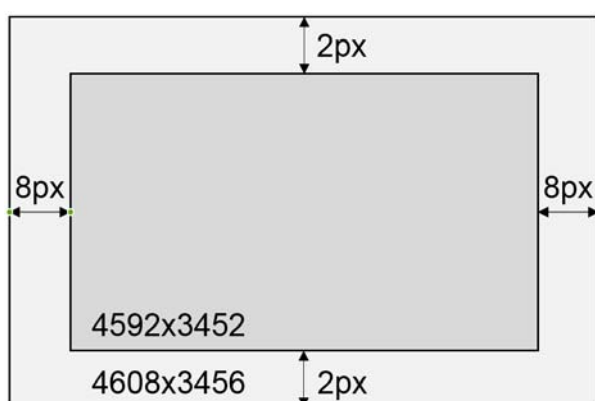
Slika 6. Prozor u CameraRaw modulu softvera Adobe Photoshop CS6.

Parametri radiometrijskih svojstava fotografije podešeni su manualno, te su prikazani na slici 7.

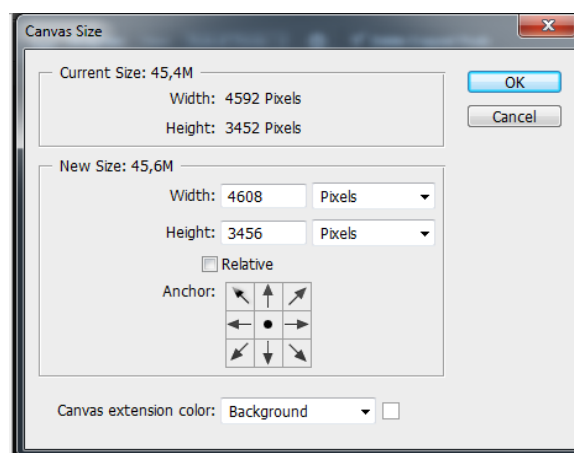


Slika 7. Parametri balansa bijele boje na fotografiji.

Navedeni parametri su korišteni pri uvozu svih fotografija. Ispravno je pretpostaviti da sve fotografije imaju ista radiometrijska svojstva s obzirom na konstantno osvjetljenje prilikom fotografiranja, te automatskog podešavanja balansa bijele boje kamere s obzirom na centar fotografije. Naime, u centru svake fotografije je bilo upravo testno polje, te to čini ovaj pristup ispravnim. Uočeno je da korišteni softver reže uvezenu datoteku od 16MP na 15.9MP. Izvorna fotografija dimenzija 4608x3456 piksela, automatski je izrezana na dimenzije 4592x3452 prilikom uvoza. Nastala razlika je malena, ali kako je jedan od ciljeva ovog eksperimenta usporediti parametre dobivene sa izvornim i sa obrađenim fotografijama, ta razlika je svakako signifikantna. Na sreću, korišteni softver uvezenu sliku izreže simetrično, po osam piksela sa lijeve i desne strane, te dva piksela odozgo i odozdo (Slika 8a). Pokazalo se da se jednostavnim proširivanjem platna i centriranjem slike alatom „Canvas Size“ (Slika 8b) na dimenzije originalne slike, izvedena slika zadržava geometriju unutarnje orijentacije.



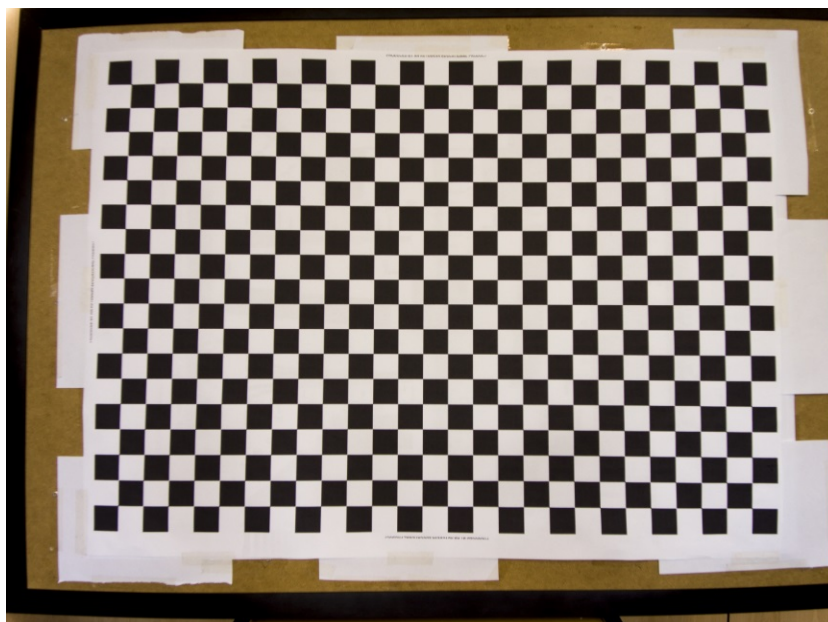
(a)



(b)

Slika 8. a) Shematski prikaz automatskog rezanja slike, b) prozor alata „Canvas Size“ u softveru Adobe Photoshop CS6.

Obradene fotografije su izvezene u *.TIFF (engl. Tagged Image File Format) formatu. *.TIFF format je najčešće korišteni format fotografija u fotogrametriji zbog svojstava koja omogućavaju *image matching* algoritmima bolju detekciju i visoki stupanj ispravnih podudaranja detalja na različitim fotografijama, naspram *.JPEG formata (Rehak, 2017). Primjer konačne fotografije izvezene u *.TIFF format prikazan je na slici 9.



Slika 9. Referentna *.TIFF fotografija.

Razlika između prikaza na slici 3 i na slici 9 je očigledna. Na slici u *.TIFF formatu kontrast je puno naglašeniji i zbog toga je očekivano bolje detektiranje kontrolnih točaka šahovskog test polja. Na slici 1a i slici 1b su komparativno prikazani identični detalji šahovskog test polja na fotografiji u *.JPEG formatu i na fotografiji u *.TIFF formatu.

2.3 Softveri za kalibraciju

Trenutno su na tržištu dostupni razni softveri za kalibraciju kamere. Kalibracija kamere je postala visoko automatizirani postupak koji je jako jednostavan za izvođenje, te i ne stručna osoba može vrlo lako dobiti rezultate kalibracije. Naravno, uvijek se postavlja pitanje kvalitete kalibracije, pogotovo kod ne mjernih kamera. Bez obzira na to što je trenutno kameru jako jednostavno kalibrirati, potrebno je dublje znanje fotogrametrijske teorije kako bi kvaliteta kalibracije bila zadovoljavajuća, odnosno kako bi se adekvatno modelirali razni sistematski utjecaji, te pogreške preslikavanja. Predmetna kamera je za potrebe ovoga rada kalibrirana u tri različita softvera. Spomenuti softveri su:

- Agisoft Lens (verzija 1.3.1),
- Camera Calibration Toolbox for MATLAB,
- Orpheus (verzija 3.2.1).

Odabrani softveri su predstavnici tri kategorije softvera. Agisoft Lens (URL 6) je besplatni dio komercijalnog Agisoftovog paketa koji sadrži trenutno najkorišteniji fotogrametrijski softver, PhotoScan. Agisoft Lens je softver isključivo za kalibraciju kamere. Ima implementiran algoritam za detekciju točaka na šahovskoj ploči, ali nažalost nema mogućnost izvoza navedenih podataka. Kalibraciju kamere vrši skupnim izjednačenjem metodom izjednačenja zrakovnih snopova. Formule modela se mogu pronaći u službenom priručniku softvera (Agisoft, 2017). Važno je napomenuti da se softver ažurira relativno često i da su česte i promjene u modelima koji se koriste za kalibraciju. Izvještaj o kalibraciji je moguće izvesti u nekoliko formata i uvesti u različite fotogrametrijske softvere te ih koristiti kao ili početne parametre ili fiksne parametre unutarnje orijentacije.

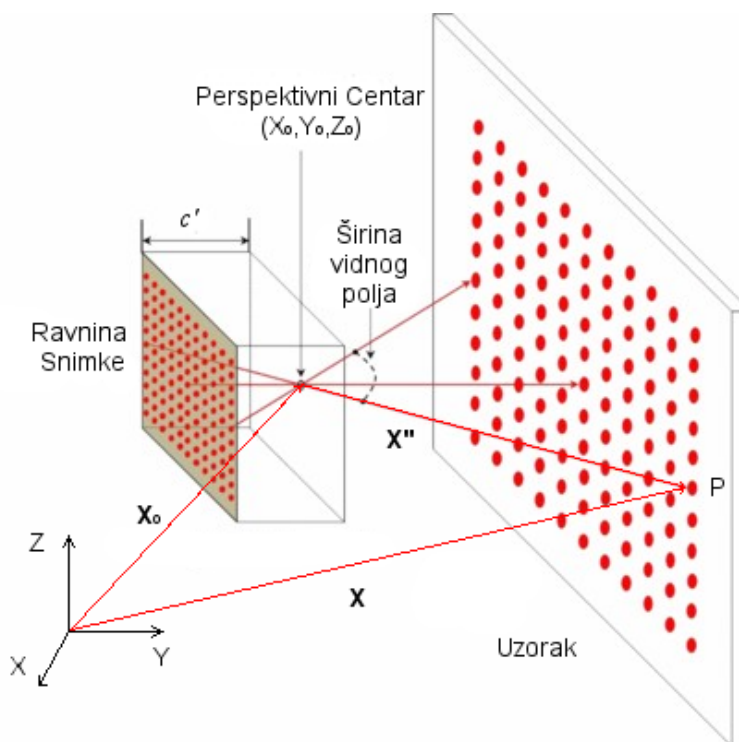
Nadalje, Matlab Calibration Toolbox (Bouguet, 2004) je predstavnik slobodnog softvera, te je implementiran i u najpoznatijoj programerskoj biblioteci vezanoj za računalni vid (engl. Computer Vision – CV), takozvani OpenCV (URL 7). Navedeni Toolbox se koristi za kalibraciju kamere, te za računanje vanjske orijentacije fotografija na temelju kojih je kalibracija obavljena. Osim navedenog, nudi mogućnost uklanjanja distorzije, ali kako je navedeni Toolbox proizveden 2004. godine kada su prosječne kamere imale ispod pet MP, modul za uklanjanje distorzije nije optimiziran za procesuiranje fotografija većih dimenzija, kao npr. fotografije od šesnaest MP koje generira Xiaomi Yi kamera.

Orpheus (Kager i dr., 2002) je predstavnik znanstvenog softvera. Orpheus je moćni softver razvijen na Tehničkom sveučilištu u Beču, čije mogućnosti nadilaze prethodno navedene softvere. Snaga Orpheusa leži u fleksibilnoj primjeni metode izjednačenja zrakovnog snopa (engl. Bundle Block Adjustment – BBA), dok je njegova slabost komplicirano korisničko sučelje i potrebno dublje znanje fotogrametrijske teorije. Sam softver se ne koristi striktno za kalibraciju, kao prethodna dva predstavnika svoje skupine, već su parametri kalibracije nusproizvod metode izjednačenja zrakovnog snopa. U sklopu softvera moguć je unos podataka iz vanjskih izvora, upravljanje opažanjima, procesuiranja i analiza digitalnih slika, interaktivno mjerenje, generiranje 3D modela objekata, te izvoz podataka i generiranje ortofota. Iz navedenog razvidno je da je Orpheus svestrani softver koji je nadmoćan ostalim softverima koji se koriste u ovome radu.

3. Fotogrametrija

Prema statutu ISPRS-a (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing), fotogrametrija je znanost i tehnologija dobivanja pouzdanih trodimenzionalnih, geometrijskih i tematskih informacija o objektima, nerijetko periodički, temeljem informacija iz fotografija i daljinskih sustava (URL 8).

U ovom poglavlju je objašnjena teorijska osnova kalibracije kamere. Dani su matematički modeli kojima se opisuje preslikavanje, korišteni koordinatni sustavi i pogreške koje treba uzeti u obzir prilikom kalibracije kamere. Fotogrametrija je tehnika trodimenzionalnog mjerenja koja koristi centralnu projekciju kao temeljni matematički model. Na slici 10 nalazi se grafički prikaz modela kamere, tzv. *pinhole* modela koji koristi centralnu projekciju. Rekonstrukcijom vanjskog snopa zraka moguće je odrediti veličinu i oblik promatranog objekta. Kod navedenog snopa zraka smjer zrake prema svakoj točki objekta P definiran je na temelju pozicije perspektivnog centra O' i odgovarajuće točke P' u ravnini snimka (Luhmann et. al., 2013).



Slika 10. Prikaz "Pinhole" modela kamere (Gašparović i Jurjević, 2017).

Pinhole model kamere je savršeni model kamere koji je oslobođen utjecaja mnogobrojnih pogrešaka, a prvi put je opisan od strane Grčkih matematičara Aristotela i Euklida u četvrtom i petom stoljeću prije nove ere. Takav model kamere je između ostalog

jako jednostavno napraviti, a najstarija sačuvana fotografija snimljena takvom kamerom datira iz 1826. ili 1827. godine (Slika 11.). Bez obzira na to što su *pinhole* kamere oslobođene raznih pogrešaka preslikavanja, ne koriste se kao takve zbog nerazmjera između ekspozicije i oštine preslikavanja. Naime, ukoliko želimo da fotografija bude što oštrije preslikana, rupa kroz koju ulazi svjetlost mora biti iznimno malena, posljedica toga je da jako malo svjetlosti ulazi u kameru te da je potrebno duže vrijeme ekspozicije. Tom problemu se doskočilo na način da se u kameru umjesto rupice kroz koju prolazi svjetlost doda leća koja sakuplja svjetlost. U tom slučaju i mala rupa može biti dovoljna jer je svjetlost fokusirana. Posljedica uvođenja leće u navedeni model kamere su naravno pogreške leće, koje većinom nastaju zbog nesavršenosti u izradi samih leća. Pogreške leća su sferna aberacija, kromatska aberacija, astigmatizam, te distorzija (Gajski, 2013). Od navedenih pogrešaka, distorzija ima najveći utjecaj i ovaj rad je fokusiran na kalibraciju kamere sa naglaskom na uklanjanje distorzije.



Slika 11. „View from the Window at Le Gras“, najstarija sačuvana fotografija (Gajski, 2013).

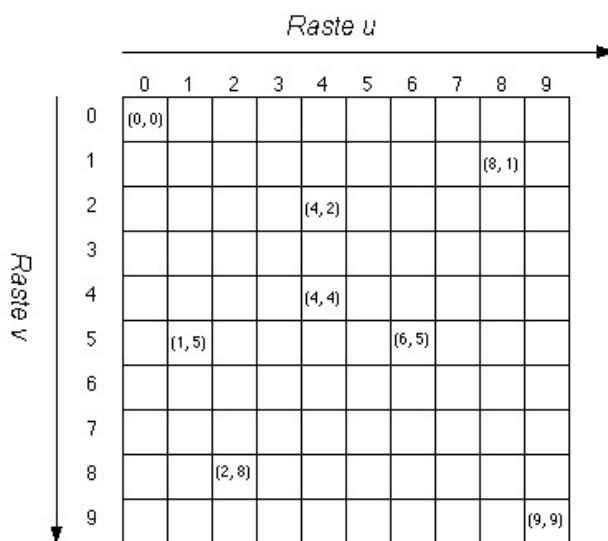
Kako bi se točka na fotografiji mogla rekonstruirati, potrebno je znati elemente unutarnje (engl. Interior Orientation– IO) i vanjske orijentacije (engl. Exterior Orientation - EO) i koordinate točke u objektnom prostoru. Kako bi se mogli uspostaviti matematički odnosi za navedeno, potrebno je uvesti koordinatne sustave. U ovom poglavlju su predstavljeni koordinatni sustavi koji se koriste u svrhu rekonstrukcije zraka svjetlosti prilikom preslikavanja (Gajski, 2013), a to su:

- o Instrumentalni koordinatni sustav (Koordinatni sustav senzora) (2D),
- o Slikovni koordinatni sustav (2D),
- o Koordinatni sustav kamere (3D) i
- o Referentni koordinatni sustav (Objektni koordinatni sustav) (3D).

Neki od navedenih sustava su dvodimenzionalni (2D) a neki su trodimenzionalni (3D). Metoda kojom se ovo preslikavanje najčešće opisuje se zove metoda izjednačenja vanjskog snopa zraka (engl. Bundle Block Adjustment – BBA). U ovom poglavlju je opisan prijelaz iz 2D sustava u 3D, opisan je temeljni funkcijski model korišten u fotogrametriji, korištena metoda kalibracije te dodatni parametri kojima se modelira pogreška objektiva koja ima najveći utjecaj na odstupanje od temeljnog funkcijskog modela u fotogrametriji.

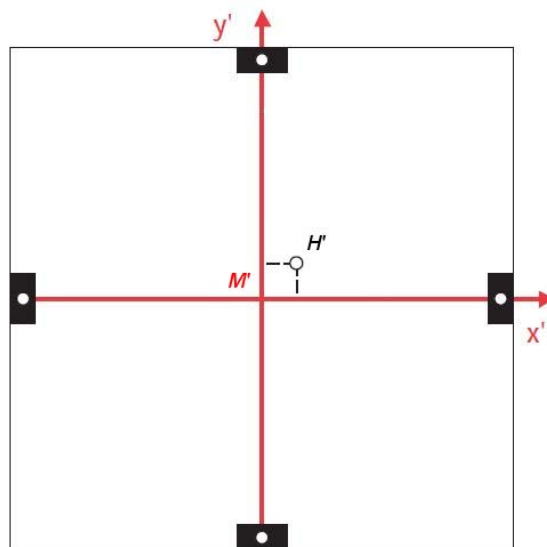
3.1 Unutarnja orijentacija kamere

Već je prethodno spomenuto da je rekonstrukcija zrake svjetlosti u principu transformacija jednog koordinatnog sustava u drugi. Iz toga slijedi da ukoliko želimo rekonstruirati zraku svjetlosti, fotografija fotografirana sa fotoaparatom mora na neki način biti definirana u nekom koordinatnom sustavu. Prije su analogne kamere imale rubne markice koje su bile fiksirane uz tijelo kamere, te su se prilikom svake ekspozicije preslikavale na mediji (npr. film, staklo), te je bilo moguće rekonstruirati slikovni koordinatni sustav na svakoj pojedinoj fotografiji, jer je on bio poznat u odnosu na rubne markice. Danas je situacija malo drugačija, analogne kamere se gotovo više i ne koriste. One su zamijenjene sa digitalnim kamerama koje kao mediji za preslikavanje koriste senzor. Danas se najčešće koriste CCD i CMOS senzori. CMOS senzor se nalazi i u predmetnoj Xiaomi Yi kameri. Senzori su matrične strukture, matrica senzora je podijeljena na stupce i redove, što vodi do toga da je u konačnici fotografija dobivena tim senzorom podijeljena na stupce i redove tj. da ima matričnu strukturu.



Slika 12. Prikaz koordinatnog sustava senzora.

Uslijed navedenog, ukoliko se promjeni matična struktura slike na nepoznat način, (izreže ili promijeni mjerilo) slika postaje neupotrebljiva, odnosno gubi se veza sa senzorom. Na slici 12. prikazan je koordinatni sustav senzora. Ishodište koordinatnog sustava senzora nalazi se u gornjem lijevom kutu i prvi piksel ima koordinate $(0, 0)$. Ako je u broj stupaca, a v broj redaka, zadnji piksel ima koordinate $(u-1, v-1)$. Ono što možemo postići u ovom koordinatnom sustavu je očitavanje koordinata detalja. Koordinate detalja će tada biti u koordinatnom sustavu senzora i slijedeći korak je dovođenje koordinata u koordinatni sustav koji uzima u obzir unutarnju orijentaciju kamere, odnosno u kojem je osim strukture medija na koji se preslikavanje vrši, poznat i odnos leće sa senzorom. Takav koordinatni sustav se zove slikovni koordinatni sustav, a dobiva se rekonstrukcijom unutarnje orijentacije. Kod analognih kamera su uslijed deformacija medija i raznih drugih pogrešaka korištene razne transformacije za računanje koordinata u slikovnom koordinatnom sustavu. Među njima su transformacija sličnosti, afina, polinomna i bilinearna transformacija. Kako bi se definirao slikovni koordinatni sustav, potrebno je odrediti ishodište koordinatnog sustava. Kod analognih fotografija ono je definirano rubnim markicama, dok kod digitalnih fotografija ono se proizvoljno nalazi u središtu fotografije ili analogno koordinatnom sustavu senzora, u gornjem lijevom kutu matrice fotografije. Na slici 13 je prikazan slikovni koordinatni sustav analognih fotografija.

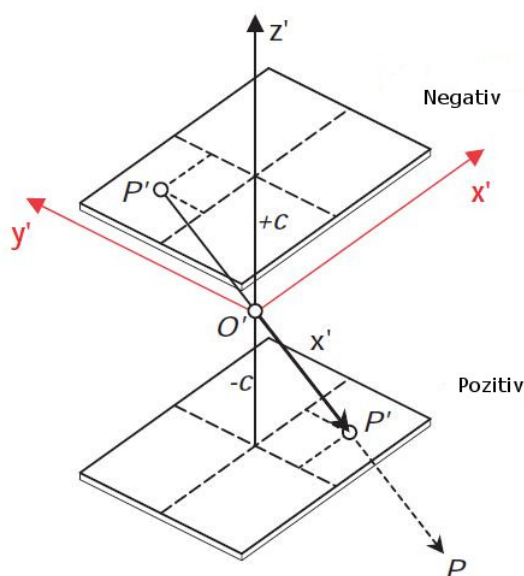


Slika 13. Slikovni koordinatni sustav definiran rubnim markicama. (Luhmann i dr., 2013).

Slijedeći korak u uspostavi veze između 2D koordinatnog sustava senzora i 3D referentnog koordinatnog sustava (sustava u kojemu se nalazi objekt) je proširivanje slikovnog koordinatnog sustava za jednu os. Uz os x' i y' , dodaje se os z' u glavnoj točki

autokolimacije (engl. Principal Point of Autocollimation - PPA), tako da zajedno čine koordinatni sustav desne ruke. U tome slučaju z' je negativan za objektni prostor, a pozitivan za prostor prema fotografu. Koordinatni sustav se tada translacija za konstantu kamere u smjeru pozitivne osi z' , te na taj način tvori koordinatni sustav kamere. Na slici 13, odstupanje točke H' (PPA) od presjeka dviju crvenih linija koje predstavljaju x' i y' osi je prenaplašeno u odnosu na dimenzije slike. U naravi ono najčešće iznosi ispod 20 piksela.

Kalibracijom kamere se utvrđuje njena unutarnja orijentacija, odnosno pozicija perspektivnog centra kamere u odnosu na slikovni koordinatni sustav. Parametri IO su $(x_o, y_o$ i $c)$, ali unutarnju orijentaciju je moguće proširiti za dodatne parametre koji opisuju pogreške preslikavanja (npr. tangencijalna i radijalna distorzija), više o tome se nalazi u poglavlju 3.5. Parametri x_o i y_o označavaju poziciju PPA u slikovnom koordinatnom sustavu, a c konstantu kamere. Na slici 14 je prikazan koordinatni sustav kamere, kojemu su osi x' i y' već korigirane za vrijednosti x_o, y_o , odnosno, ishodište osi z' se već nalazi u PPA. Na slici se vide dvije ravnine, tzv. pozitiv i negativ. U naravi slika nastaje na negativu (zrcaljena po x' i po y' osi), ali danas se ona softverski zrcali da bi se dobila u pozitivu, dok se nekada kod analognih kamera i snimaka na filmu naknadno razvijala u pozitiv.



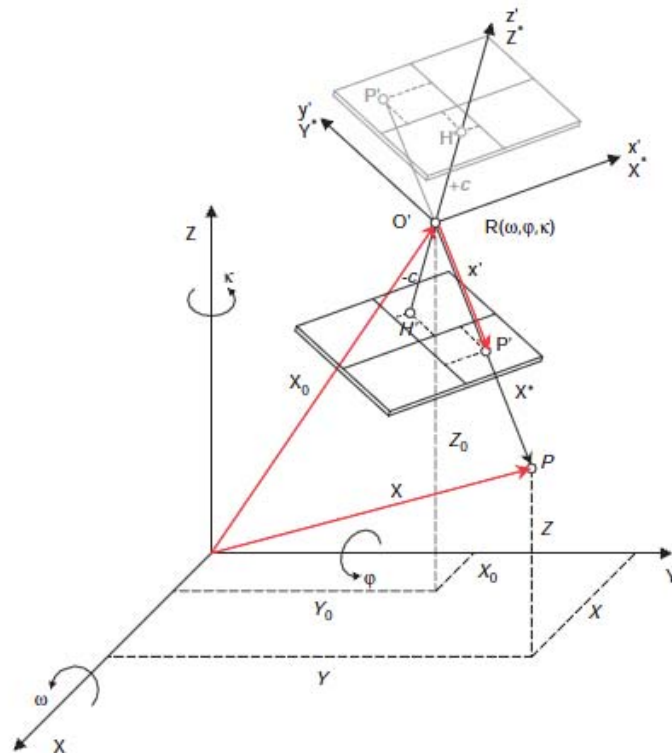
Slika 14. Koordinatni sustav kamere (Luhmann i dr., 2013).

Uvođenjem koordinatnog sustava kamere stečene su predispozicije za povezivanje referentnog koordinatnog sustava i slikovnog koordinatnog sustava u digitalnoj fotogrametriji. Navedena dva sustava su povezana šest parametarskom transformacijom iz referentnog

koordinatnog sustava u koordinatni sustav kamere i obrnuto. Šest parametara navedene transformacije su tri parametra translacije i tri parametra rotacije (Cramer, 2017).

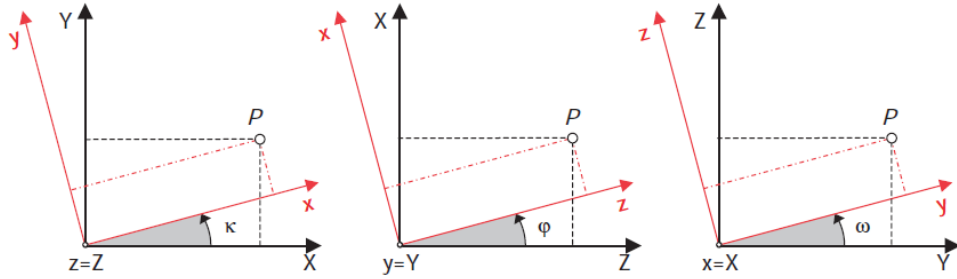
3.2 Vanjska orijentacija

Vanjskom orijentacijom kamere, odnosno perspektivnog centra kamere je zadan položaj i orijentacija kamere u odnosu na referentni koordinatni sustav. Vanjska orijentacija je zadana sa tri parametra translacije (X_o , Y_o , Z_o) i tri parametra rotacije (ω , ϕ , κ). Parametri translacije definiraju položaj optičkog centra u odnosu na referentni koordinatni sustav, a parametri rotacije definiraju međusobni odnos osi koordinatnog sustava kamere i referentnog koordinatnog sustava. Ukoliko znamo parametre vanjske orijentacije za određenu fotografiju, možemo rekonstruirati smjer pojedine zrake u referentnom koordinatnom sustavu. Na slici 15 prikazan je koordinatni sustav kamere sa zadanim elementima vanjske orijentacije. Ukoliko je poznata unutarnja orijentacija kamere, moguće je rekonstruirati unutarnji snop zraka kamere, npr. vektor $\mathbf{x}'$, dok ukoliko znamo i unutarnju i vanjsku orijentaciju kamere, možemo rekonstruirati i vanjski snop zraka, odnosno smjer, ali ne i dužinu pripadnog vektora $\mathbf{X}^*$, osim u slučaju kada točke objekta zadovoljavaju poznate geometrijske uvjete.



Slika 15. Vanjska orijentacija koordinatnog sustava kamere (Luhmann i dr., 2013).

Rotacija jednog koordinatnog sustava oko drugog je zadana sa tri zasebne rotacije. To su rotacija oko X, Y i Z, odnosno x' , y' i z' osi, ovisno o tome u kojem smjeru se vrši transformacija. U standardnoj i najčešće korištenoj parametrizaciji rotacije u aerofotogrametriji, tzv. „OMFIKA“ parametrizaciji, ω je kut rotacije oko osi X, ϕ je kut rotacije oko osi Y i κ je kut rotacije oko osi Z. Prikaz rotacije za svaku os vidljiv je na slici 16.



Slika 16. rotacija oko svake pojedine osi koordinatnog sustava (Luhmann i dr., 2013).

Jednadžbama (1), (3) i (5) su zadane rotacije oko svake pojedine osi:

- o Rotacija oko z' osi

$$\mathbf{X} = \mathbf{R}_{\kappa} \mathbf{x}, \text{ odnosno:} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix}. \quad (2)$$

- o Rotacija oko y' osi

$$\mathbf{X} = \mathbf{R}_{\phi} \mathbf{x}, \text{ odnosno:} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix}. \quad (4)$$

- o Rotacija oko x' osi

$$\mathbf{X} = \mathbf{R}_{\omega} \mathbf{x}, \text{ odnosno:} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega & -\sin \omega & 0 \\ \sin \omega & \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Prilikom korištenja matrica rotacije, bitno je znati u kojem smjeru ide rotacija. Iako bi intuitivno rekli da je na slici 16 crni koordinatni sustav ishodišni, u zbilji je crveni koordinatni sustav ishodišni sustav. Potpuna prostorna rotacija se definirana je slijedećim izrazom:

$$\mathbf{X} = \mathbf{R}\mathbf{x}, \text{ gdje je } \mathbf{R} \text{ dano izrazom:} \quad (7)$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_\omega \mathbf{R}_\phi \mathbf{R}_\kappa, \quad (8)$$

a $\mathbf{R}_\omega$, $\mathbf{R}_\phi$ i $\mathbf{R}_\kappa$ su sadržane u izrazima (2), (4) i (6).

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \kappa & -\cos \phi \sin \kappa & \sin \phi \\ \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \phi \cos \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \phi \sin \kappa & -\sin \omega \cos \phi \\ \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \phi \cos \kappa & \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \phi \sin \kappa & \cos \omega \cos \phi \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Ovakav redoslijed umnožaka matrica rotacija po osima vrijedi samo za „OMFIKA“ parametrizaciju. Matrice $\mathbf{R}$ su ortogonalne te imaju svojstvo da je invertirana matrica jednaka transponiranoj matrici. U tom slučaju za sustav jednažbi (7) vrijedi i :

$$\mathbf{x} = \mathbf{R}^T \mathbf{X}, \quad (11)$$

gdje je:

$$\mathbf{R}^T = \mathbf{R}_\kappa^T \mathbf{R}_\phi^T \mathbf{R}_\omega^T. \quad (12)$$

Individualni kutovi rotacije se iz matrice $\mathbf{R}$ mogu izvesti kao:

$$\sin \phi = r_{13}, \quad (13)$$

$$\tan \omega = -\frac{r_{23}}{r_{33}}, \quad (14)$$

$$\tan \kappa = -\frac{r_{12}}{r_{11}}. \quad (15)$$

S obzirom na to da je kut ϕ izražen preko funkcije sinus, to znači da nije jednoznačan te je u nekim slučajevima teško odlučiti koje rješenje je korektno, a ako su kutovi κ ili ω blizu 90° ili 270° , to dovodi do dijeljenja sa nulom u izrazu (14). Problem neodređenosti zbog dijeljenja sa nulom se rješava primjenom druge parametrizacije, odnosno novog redoslijeda umnoška matrica u izrazu (12). Osim „OMFIKA“ parametrizacije, u fotogrametriji primjenu pronalaze i „FIOMKA“, „KAOMFI“ ali i tzv. „ROLL PITCH YAW“ parametrizacija (Kager i dr., 2002).

3.3 Jednadžbe kolinearnosti

Jednadžbe kolinearnosti su temeljni model kojim se opisuje centralna projekcija u fotogrametriji. One opisuju preslikavanje iz objektnog prostora na ravninu snimke, uz polazeću pretpostavku da su točka na objektu, točka na snimci i centar projekcije snimke kolinearni (McGlone, 2013). Navedeno je jasno prikazano na slici 15.

Koordinate točke u referentnom koordinatnom sustavu moguće je vektorski izraziti pomoću prostornih elemenata vanjske orijentacije $\mathbf{X}_o$, i vektora $\mathbf{X}^*$, gdje je vektor $\mathbf{X}^*$ zapravo vektor $\mathbf{x}'$, na koji su primijenjeni rotacioni elementi vanjske rotacije snimke $\mathbf{R}$ i promjena mjerila m (Slika 15):

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_o + \mathbf{X}^*, \quad (16)$$

Odnosno:

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_o + m\mathbf{R}\mathbf{x}'. \quad (17)$$

Matrično to izgleda ovako:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix} + m \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Faktor mjerila m je nepoznata vrijednost koja je za svaku točku drugačija. Na temelju jedne snimke ne možemo odrediti faktor mjerila m . Potrebna je još bar jedna snimka na kojoj se vidi ista točka, slikovne koordinate te točke, te poznati elementi unutarnje i vanjske orijentacije da bi se odredio faktor mjerila, odnosno izračunale koordinate točke u referentnom koordinatnom sustavu.

Invertiranjem jednadžbe (17) i usvajanjem korekcije za slikovni koordinatni sustav $H'(x'_o, y'_o)$ te korekcije za distorziju $\Delta x'$ i $\Delta y'$, dobivaju se jednadžbe sa izraženim slikovnim koordinatama;

$$\mathbf{x}' - \mathbf{x}'_o - \Delta \mathbf{x}' = \frac{1}{m} \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{X} - \mathbf{X}_o) \quad (19)$$

Matrično to izgleda ovako:

$$\begin{bmatrix} x' - x'_o - \Delta x' \\ y' - y'_o - \Delta y' \\ z' \end{bmatrix} = \frac{1}{m} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_o \\ Y - Y_o \\ Z - Z_o \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Dijeljenjem prve i druge jednadžbe sa trećom jednadžbom, dobivamo klasični oblik jednadžbi kolinearnosti (21) gdje je faktor mjerila eliminiran. Jednadžbe kolinearnosti u tom obliku opisuju transformaciju koordinata u referentnom koordinatnom sustavu (X, Y, Z) u korespondentne slikovne koordinate (x', y') , kao funkciju unutarnje orijentacije kamere $(x'_o, y'_o, c, \Delta x', \Delta y')$ i vanjske orijentacije jedne snimke $(X_o, Y_o, Z_o, \omega, \phi, \kappa)$:

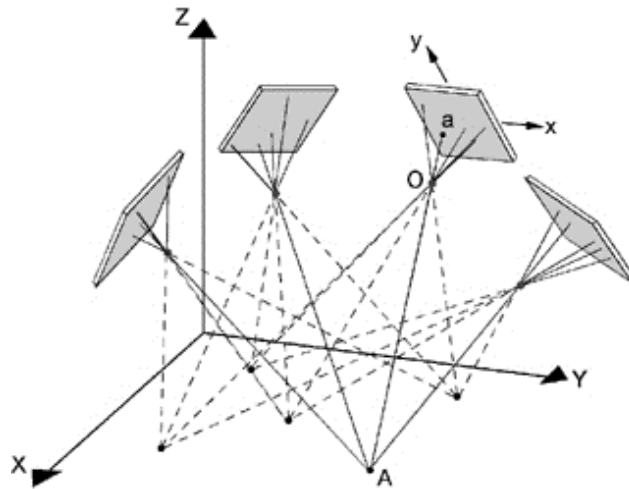
$$\begin{aligned} x' &= x'_o + z' \frac{r_{11}(X - X_o) + r_{21}(Y - Y_o) + r_{31}(Z - Z_o)}{r_{13}(X - X_o) + r_{23}(Y - Y_o) + r_{33}(Z - Z_o)} + \Delta x' \\ y' &= y'_o + z' \frac{r_{12}(X - X_o) + r_{22}(Y - Y_o) + r_{32}(Z - Z_o)}{r_{13}(X - X_o) + r_{23}(Y - Y_o) + r_{33}(Z - Z_o)} + \Delta y' \end{aligned} \quad (21)$$

Jednadžbe kolinearnosti u ovom obliku se koriste kao temeljna funkcija metode izjednačenja zakovnih snopova. U slijedećem potpoglavlju je objašnjen funkcijski model izjednačenja metodom zrakovnih snopova.

3.4 Metoda izjednačenja zrakovnih snopova

Metoda izjednačenja zrakovnih snopova je metoda simultanog određivanja velikog broja prostorno distribuiranih zraka svijetlosti, odnosno elemenata vanjske orijentacije, elemenata unutarnje orijentacije te veznih točaka. Navedena metoda kombinira fotogrametrijska opažanja (slikovne koordinate) veznih i orijentacijskih točaka, te klasična geodetska mjerenja na orijentacijskim točkama (koordinate u referentnom koordinatnom sustavu). Objekt koji se vidi na bar dvije slike je moguće rekonstruirati u tri dimenzije, a uvođenjem dovoljnog broja kontrolnih točaka moguće ga je i smjestiti u stvarno mjerilo i prostor.

Ova metoda zbog velikog broja prostorno distribuiranih zraka tvori geometrijski stabilnu prostornu strukturu među fotografijama (Slika 17) čiji se parametri izjednačavaju. Uvjet izjednačenja je da je zbroj kvadrata popravaka slikovnih koordinata minimalan. Uslijed navedenog, metoda izjednačenja zrakovnih snopova je najprihvatljivija metoda orijentacije fotografija i određivanja točaka.



Slika 17. Međusobna geometrija zraka više fotografija (URL 9).

Samo izjednačenje mjerenja se vrši prema Gauss-Markovljevom modelu, odnosno prema metodi najmanjih kvadrata, a funkcije mjerenja su jednadžbe kolinearnosti. Opći oblik funkcija mjerenja ove metode, proširen za funkciju utjecaja distorzije prikazan je izrazom (22):

$$\begin{aligned} x'_i + vx_i &= F(X_{oj}, Y_{oj}, Z_{oj}, \omega_j, \phi_j, \kappa_j, x'_{ok}, y'_{ok}, c_k, X_i, Y_i, Z_j) \\ y'_i + vy_i &= F(X_{oj}, Y_{oj}, Z_{oj}, \omega_j, \phi_j, \kappa_j, x'_{ok}, y'_{ok}, c_k, X_i, Y_i, Z_j) \end{aligned} \quad (22)$$

Navedeni model funkcija sadrži parametre unutarnje orijentacije, tako da se i parametri unutarnje orijentacije izračunavaju ovakvim izjednačenjem. U ovom radu svi korišteni softveri izvršavaju kalibraciju na temelju ove metode.

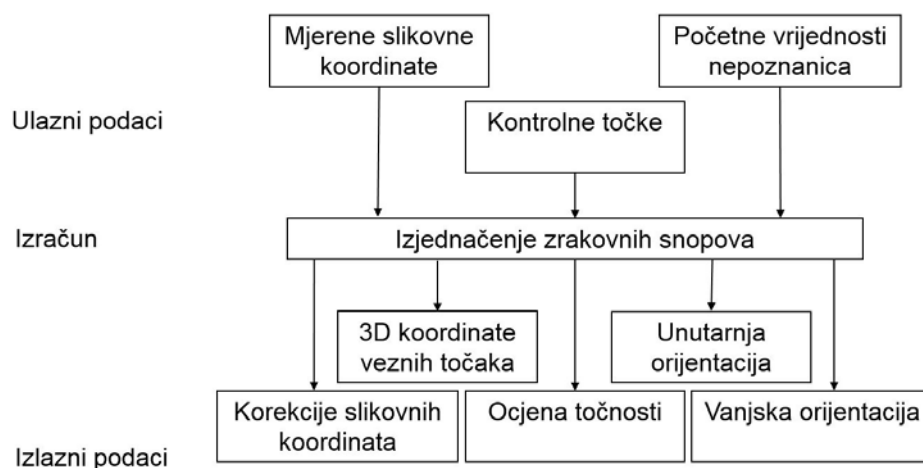
Gdje su:

i - indeks točke

j - indeks fotografije

k - indeks kamere.

Na slici 18 prikazana je shema metode izjednačenja zrakovnih snopova. Nekada je ova vrsta izjednačenja nekad bila jako nepraktična, uslijed dugotrajnog opažanja veznih točaka i zahtjevnog izračuna. Danas je situacija bitno drugačija. U zadnjih deset godina su razvijeni tzv. *feature matching* algoritmi koji se bave detekcijom identičnih točaka na slikama, kao što su SIFT, SURF, FAST i mnogi drugi (Skrypnyk i Lowe, 2004; Bay i dr., 2006; Rosten, 2006), čime se broj mjerenja slikovnih koordinata veznih točaka nebrojeno mnogo puta povećao, a razvojem računala je pređena i prepreka zahtjevnog računanja.



Slika 18. Shema toka metode izjednačenja zrakovnih snopova.

Sam algoritam izjednačenja je identičan klasičnom algoritmu izjednačenja posrednih mjerenja (Rožić, 2007). Broj nepoznanica u posrednom regularnom izjednačenju snopa zraka se računa prema izrazu (23):

$$u = 6 \cdot n_{fotografija} + 3 \cdot n_{veznih\ točaka} + u_k \cdot n_{kamera} \quad (23)$$

Gdje se $n_{fotografija}$ množi sa šest jer postoji šest nepoznanica vanjske orijentacije za svaki snimak, $n_{veznih\ točaka}$ sa tri jer su tri koordinate veznih točaka nepoznanice, te n_{kamera} sa u_k , gdje je $u_k = 0 \dots \geq 3$, ovisno o tome da li se kamera kalibrira unutar izjednačenja i da li se određuju dodatni parametri osim PPA i konstante kamere, npr. parametri distorzije. U tablici 4 dan je primjer broja nepoznanica za klasičnu konfiguraciju kalibracije sa minimalnim brojem snimaka, pri kalibraciji prema općeprihvaćenoj metodi autora Z. Zhanga (Zhang, 2000) koja je korištena u radu.

Tablica 4. Odnos broja mjerenja i nepoznanica u klasičnoj konfiguraciji snimaka za kalibraciju kamere.

	Slika 34	u	u_{ukupno}
$n_{fotografija}$	8	6	48
$n_{veznih\ točaka}$	0	3	0
n_{kamera}	1	8	8
u			56
$n_{mjerenja}$			468
$r = n - u$			412

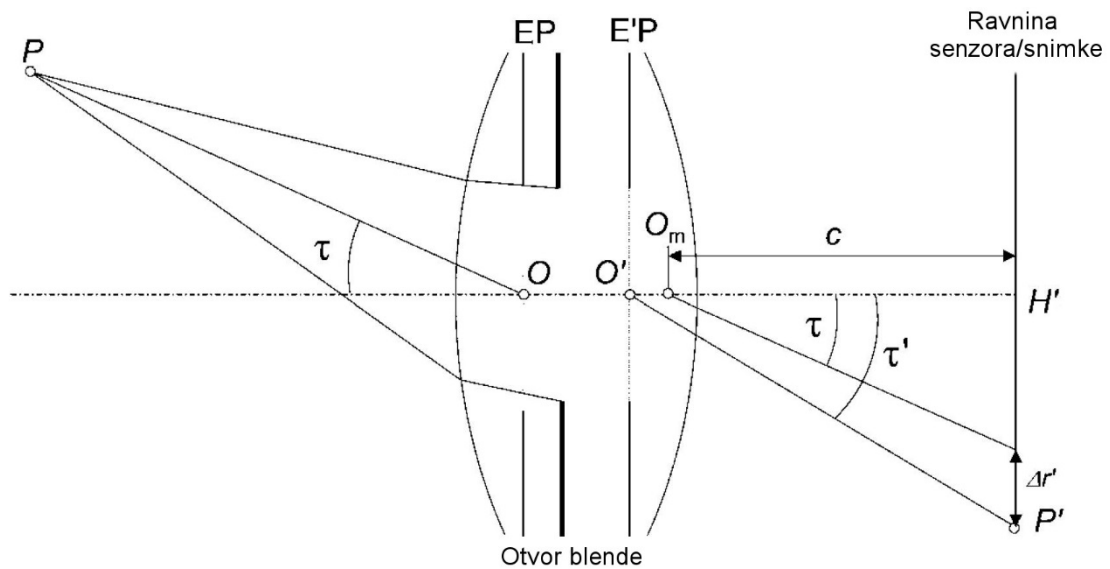
U konfiguraciji koje je prikazana na tablici je prisutno osam fotografija čiji se elementi vanjske orijentacije traže, vezne točke uopće nisu prisutne već se izjednačenje izvršava samo

sa namjerom da se na temelju referentnih točaka izračuna unutarnja orijentacija kamere, te vanjska orijentacija kao nusproizvod izjednačenja. Nadalje, traženo je osam parametara unutarnje orijentacije kamere, tri parametra su parametri PPA i konstanta kamere, te pet parametara distorzije. Distorzija je detaljnije obrađena u slijedećem poglavlju. Pri takvoj konfiguraciji matrica koeficijenata jednadžbi popravaka (A) ima dimenzije 3296×44 . Današnja računala su sposobna izvršiti zahtjevne operacije nad matricama jako velikih dimenzija, te se s toga danas u praksi koristi puno veći broj slika za kalibraciju kamere nego li je navedeno u primjeru u tablici 4. Radi se o broju od oko petnaest fotografija pod raznim kutovima i na raznim udaljenostima kamere od test polja. Shema klasične konfiguracije matrice A prilikom izjednačenja u svrhu kalibracije kamere prethodno navedenom metodom (Zhang, 2000) dana je u prilogu B. Izjednačenje metodom zrakovnih snopova je moguće proširiti i za druga mjerenja, osim klasičnih opažanja slikovnih koordinata. To mogu biti mjerenja kontrolnih točaka ukoliko im želimo dodijeliti neku težinu, odnosno pripadnu točnost s kojom su određene ili pak elementi apsolutne (Blázquez, 2008) ili relativne zračne kontrole (Blázquez i Colomina, 2012). Elementi apsolutne i relativne zračne kontrole se odnose na GNSS i IMU mjerenja vanjske orijentacije. Uvođenjem elemenata apsolutne ili relativne zračne kontrole u principu dodjeljujemo vrijednost i težinu opažanim vanjskim orijentacijama kamere. Ti slučajevi nisu posebno obrađeni u ovom radu jer je kod takvih izjednačenja kalibracija kamere najčešće sekundarna zadaća, dok je kod prezentiranog primjera striktni cilj kalibracija kamere.

3.5 Distorzija objektiva

Distorzija objektiva je posljedica geometrijske nesavršenosti izrade leća koje se koriste u kamerama. Distorzija utječe na preslikavanje na način da se linije koje su u objektnom sustavu ravne, na slikovni koordinatni sustav preslikavaju kao da su iskrivljene. Distorzija utječe samo na geometriju slike, dok je oštrina slike sačuvana. Ona ima presudan utjecaj na odstupanje od teorijskog *pinhole* modela kamere (McGlone, 2013), ali moguće ju je jako dobro modelirati te gotovo potpuno eliminirati kvalitetno određenim parametrima distorzije. Za modeliranje distorzije koriste se različiti matematički modeli, ovisno o fotogrametrijskoj primjeni kamere. Ovaj rad se bavi kalibracijom kamere za potrebe fotogrametrijske izmjere sa bespilotnim letjelicama i stoga je kao temeljni model distorzije u ovome radu korišten tzv. Brownov model (Brown, 1966) koji je implementiran u većini fotogrametrijskih softvera. On

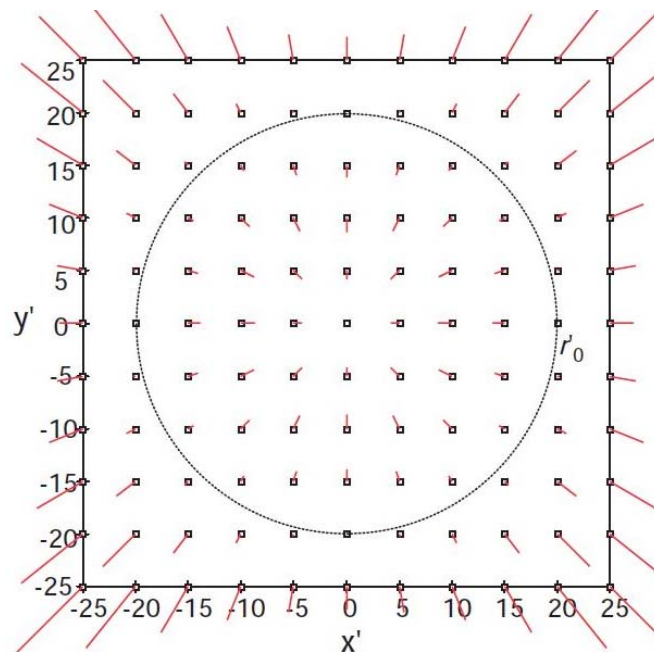
se sastoji od dvije komponente, radijalne i tangencijalne distorzije. Najčešće se modeliraju obadvije komponente distorzije bez obzira na to što je utjecaj tangencijalne distorzije relativno malen i višestruko manji od utjecaja radijalne. Distorzija se javlja zbog nesavršenosti u izradi leća, ali se može smanjiti upravo posebnim načinom izrade leća. Kako bi se smanjio njezin utjecaj koriste se simetrične leće, dok je kod asimetričnih leća utjecaj distorzije jako naglašen. Na slici 19 nalazi se prikaz geometrije zrake koja prolazi iz objektnog prostora u optički sustav kamere, te utjecaj radijalne distorzije na njeno širenje.



Slika 19. Utjecaj radijalne distorzije na geometriju puta zrake od točke P do točke P' (Kraus, 2000).

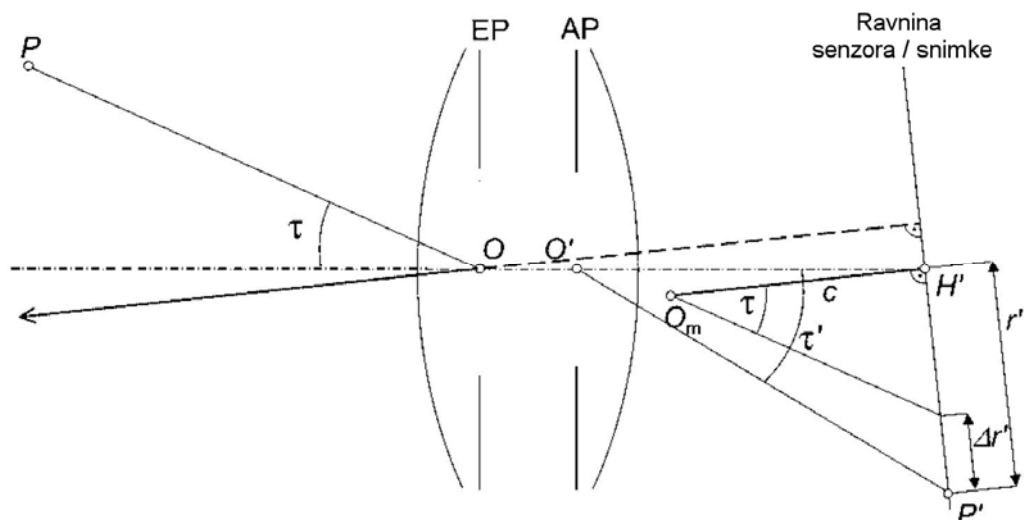
Prema *pinhole* modelu kamere, perspektivni centar je definiran sa točkom centralne projekcije kroz koju prolaze sve zrake iz objektnog sustava. U složenom sustavu objektiva mogu se definirati dva perspektivna centra. Svaki je definiran kao presjek optičke osi sa odgovarajućom ravninom pupile. O je presjek ravnine ulazne pupile (EP), dok je O' presjek ravnine izlazne pupile ($E'P$) sa optičkom osi. Na slici se vidi kako zraka do leće dolazi pod kutom τ a izlazi pod kutom τ' . U idealnom slučaju ta dva kuta bila bi ista, ali zbog tehničkih nesavršenosti objektiva oni se razlikuju. Posljedica toga je da je točka P' (na radijalnoj udaljenosti r') radijalno translaticirana za iznos $\Delta r'$. To je utjecaj radijalne simetrične distorzije, i taj iznos bi trebao biti radijalno simetričan u odnosu na točku H' , zbog utjecaja necentriranosti pojedinih elemenata leće, nije u potpunosti simetričan. Zanimljivo je da to, može se izračunati preko izraza (24), a još ga se naziva i utjecaj radijalne simetrične distorzije. Utjecaj radijalne distorzije je grafički prikazan na slici 20.

$$\Delta r' = r' - c \tan \tau . \quad (24)$$

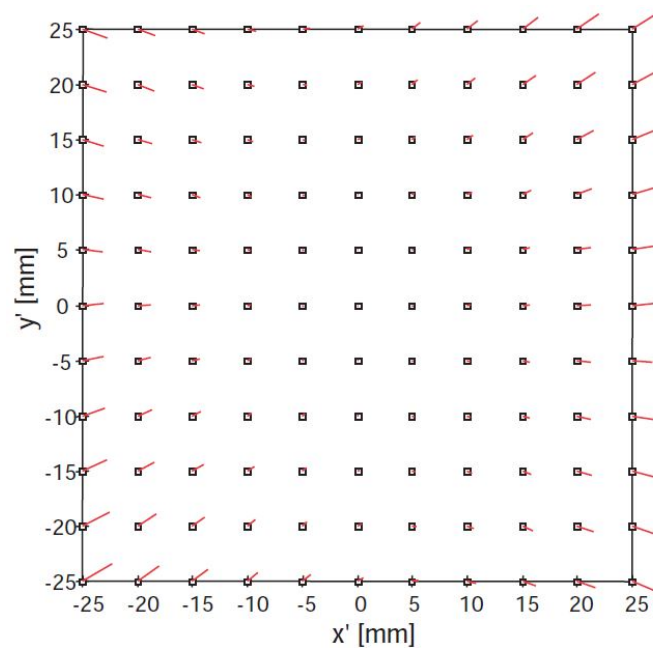


Slika 20. Grafički prikaz utjecaja radijalne distorzije (Luhmann i dr., 2013).

Iz navedene jednadžbe se vidi da iznos radijalne distorzije ovisi i o konstanti kamere. Iz tog razloga ako se koristi kamera sa tzv. zoom objektivom, od iznimne važnosti fiksirati njezin objektiv da elementi IO budu stabilni tijekom cijelog postupka snimanja i kalibracije. Osim utjecaja radijalne simetrične distorzije, uslijed neokomitosti ravnine senzora i optičke osi, javlja se utjecaj tangencijalne distorzije (Slika 22). Točka H' , je definirana kao sjecište optičke osi leće i ravnine senzora. Ukoliko ravnina snimka i optička os nisu okomite, tada O_m ne će biti na optičkoj osi (Luhmann i dr., 2013). Tada se kao referentna os za fotogrametrijske potrebe koristi os definirana ravnom linijom $O_m H'$ (Slika 21).

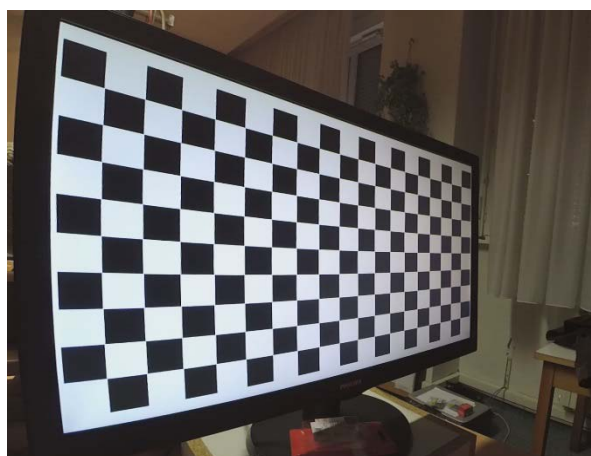


Slika 21. Utjecaj tangencijalne i radijalne distorzije na geometriju puta zrake od točke P do točke P' (Kraus, 2000).

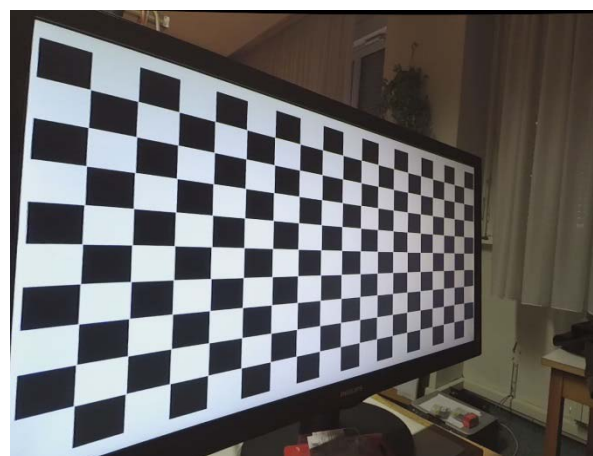


Slika 22. Grafički prikaz utjecaja tangencijalne distorzije (Luhmann i dr., 2013).

Na slici 23 prikazane su dvije fotografije. Slika 23a prikazuje izvornu fotografiju, dok slika 23b prikazuje fotografiju na kojoj je eliminirana distorzija. Primijetite kako su na slici 23a linije sve zakrivljenije kako se povećava radijalna udaljenost, dok na slici 23b toga efekta nema.



a)



b)

Slika 23. a) Izvorna fotografija; b) izvedena fotografija sa uklonjenom distorzijom.

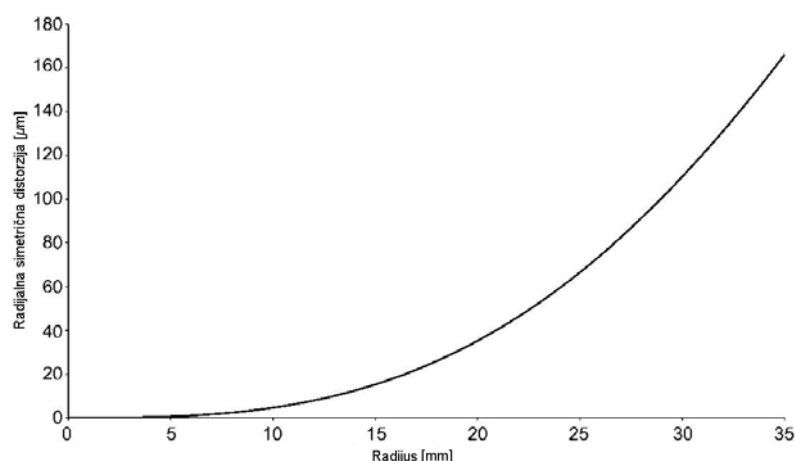
Utjecaj distorzije je dodan u jednadžbe kolinearnosti kao $\Delta x'$, odnosno $\Delta y'$. Modelira se matematičkim modelima koji ovise o fotogrametrijskoj primjeni. Najčešće korišteni model distorzije je Brownov model, ali se nerijetko koriste i drugi modeli (Kager i dr. 2002). Kod kalibracije akcijskih kamera, ali i drugih kamera koje imaju naglašen utjecaj distorzije, često

se primiče korištenju više stupanjskog postupka kalibracije i uklanjanja distorzije. Tako postoji dvostupanjski algoritam (Gašparović i Gajski, 2016) ali i drugi, poput trostupanjskog itd. Ti algoritmi imaju sličan princip koji se bazira na inicijalnom uklanjanju distorzije, te finalnom uklanjanju distorzije u slijedećim koracima. Posebno je zanimljiv višestupanjski model uklanjanja distorzije gdje se u prvim iteracijama koristi Brownov model, a nakon toga se preostala nepravilna distorzija modelira polinomom višeg stupnja (Shahraki i Haala, 2015).

Radijalna simetrična distorzija čini najveći dio ukupne korekcije koja se primjenjuje na slikovne koordinate pojedine slike. Ona je funkcija svojstava korištene leće, žarišne duljine leće, pa čak i udaljenosti objekta od glavne točke projekcije (Luhmann i dr., 2013). Utjecaj udaljenosti objekta od glavne točke projekcije se ne razmatra u ovom radu s obzirom da je taj utjecaj relativno malen i općenito se uzima u obzir samo kod iznimno preciznih radova koji se ionako ne izvode sa akcijskim kamerama kao što je predmetna kamera. Radijalna distorzija se najčešće modelira Brownovim modelom, uzimajući u obzir prvih n elemenata lineariziranog modela. Najčešće se uzimaju prva tri elementa, ovisno o tome koliki je iznos distorzije predmetne leće. Izraz (25) predstavlja model distorzije prema Brownu:

$$\Delta r'_{rad} = K_1 r'^3 + K_2 r'^5 + K_3 r'^7 + \dots \quad (25)$$

Gdje je r' radijalna udaljenost promatrane točke, a koeficijenti K_1, K_2 i K_3 koeficijenti radijalne distorzije. Grafički prikaz funkcije distorzije prema izrazu (25) je prikazan na slici 24.

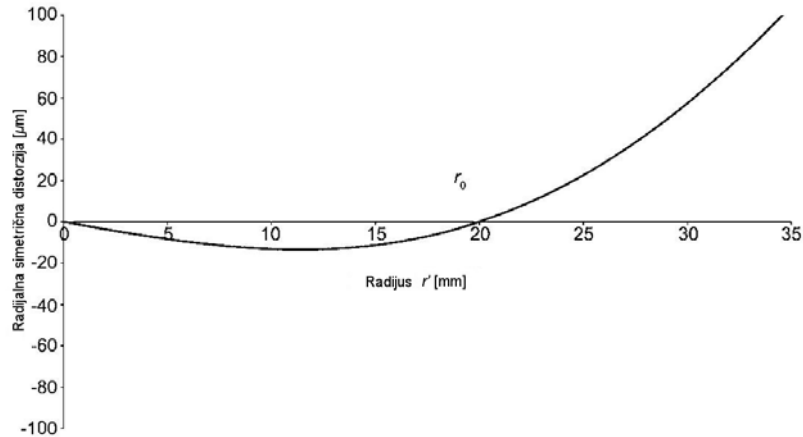


Slika 24. Vrijednosti funkcije radijalne distorzije u ovisnosti u radijusu (Luhmann i dr., 2013).

Korekcije koordinata se računaju prema izrazu (26), gdje su x' i y' opažane slikovne koordinate pojedine točke, a r' njihov radijus izračunan kao korijen zbroja kvadrata opažanih slikovnih koordinata:

$$\begin{aligned}\Delta x'_{rad} &= x' \frac{\Delta r'_{rad}}{r'} \\ \Delta y'_{rad} &= y' \frac{\Delta r'_{rad}}{r'}\end{aligned}\quad (26)$$

Parametri distorzije dani izrazom (25) su korelirani sa konstantom kamere, te kako bi se mogla zanemariti ta ovisnost, linearni dio funkcije se odvaja. To se manifestira kao rotacija funkcije distorzije (Slika 24) prema r osi koja predstavlja radijus distorzije (Slika 25).



Slika 25. Balansirana funkcija radijalne distorzije u ovisnosti u radijusu (Luhmann i dr., 2013).

Na slici 25 je prikazana zarotirana krivulja sa slike 24. To je postignuto odvajanjem linearnog dijela izraza (25); kako bi se relaksirala ovisnost parametara uvodi se nova konstanta u jednadžbu te se nakon preuređivanja izraza dobiva izraz (27), gdje su A_1 , A_2 i A_3 parametri balansirane radijane distorzije. Bez obzira na to, nova konstantna vrijednost r_0 se ne može odabrati proizvoljno zbog ovisnosti između parametara distorzije. Treba biti odabrana tako da pripadna balansirana krivulja distorzije bude što više balansirana, odnosno da i pozitivni i negativni maksimum distorzije budu podjednaki. Ta udaljenost je najčešće dvije trećine dužine poludijagonale fotografije (Luhmann i dr., 2013).

$$\Delta r'_{rad} = A_1 r'^3 + A_2 r'^5 + A_3 r'^7 - r' (A_1 r_0^2 + A_2 r_0^4 + A_3 r_0^6) \quad (27)$$

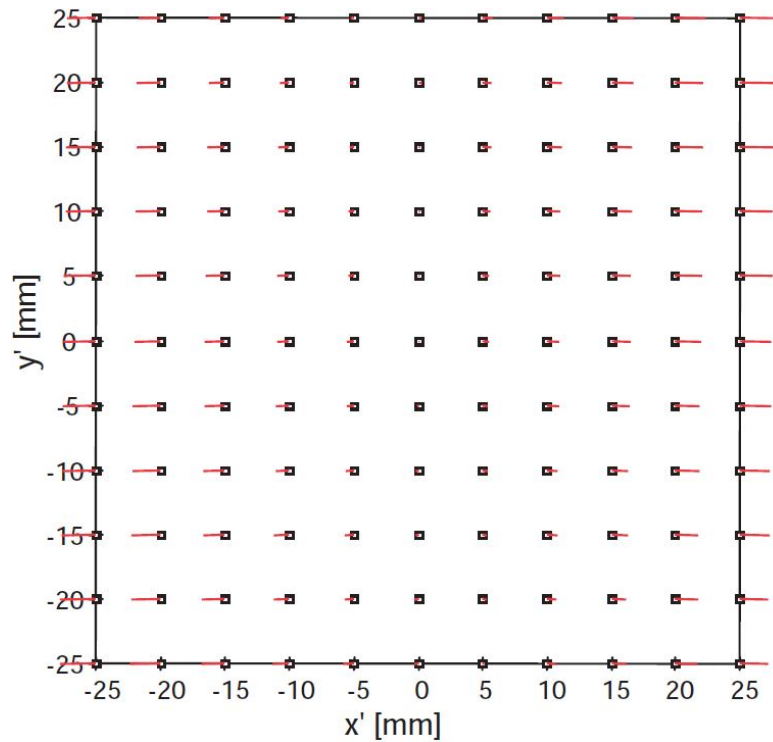
Osim elemenata radijalne distorzije, prema Brownu, u obzir se uzima i tangencijalna distorzija koja najčešće nema veliki utjecaj. Njezin utjecaj je u pravilu za red veličine manji od utjecaja radijalne distorzije, pogotovo kod novih kamera kojima se kvaliteta izrade i centriranja optičkih elemenata signifikantno povećala. Bez obzira na to, tangencijalna distorzija se modelira najčešće sa dva parametra lineariziranog modela distorzije prema

Brownu. Izraz (28) prikazuje model tangencijalne distorzije prema Brownu, gdje su B_1 i B_2 parametri tangencijalne distorzije:

$$\begin{aligned}\Delta x'_{\tan} &= B_1(r'^2 + 2x'^2) + 2B_2x'y' \\ \Delta y'_{\tan} &= B_2(r'^2 + 2y'^2) + 2B_1x'y'\end{aligned}\quad (28)$$

Osim radijalne i tangencijalne distorzije, nerijetko se uzima u obzir i nejednako mjerilo i neokomitost koordinatnih osi. Kod digitalnih kamera sistematski utjecaj koji se može opisati tim modelom se javlja ukoliko pikseli na senzoru odstupaju od pravokutnog oblika ili su nejednakih stranica, dok se kod analognih snimaka taj utjecaj poništava afinom transformacijom iz instrumentalnog u slikovni koordinatni sustav. Stupanj kvalitete izrade današnjih DSLR (engl. Digital Single Lens Reflex) kamera je takav da se ti parametri najčešće mogu zanemariti pri kalibraciji. U ovom radu, navedeni parametri su određivani za potrebe kalibracije, s obzirom da je predmetna kamera višestruko jeftinija od najnižeg cjenovnog ranga DSLR kamera. Izraz (29) se koristi za modeliranje navedenog sistematskog utjecaja, a na slici 26 je prikazan utjecaj ne pravokutnosti i nejednakog mjerila:

$$\begin{aligned}\Delta x'_{aff} &= C_1x' + C_2y' \\ \Delta y'_{aff} &= 0\end{aligned}\quad (29)$$



Slika 26. Grafički prikaz utjecaja nejednakog mjerila (Luhmann i dr., 2013).

Potpuni utjecaj radijalne i tangencijalne distorzije, te utjecaja nejednakog mjerila i ne pravokutnosti se uzima u obzir prema izrazu (30), kao zbroj navedenih utjecaja:

$$\begin{aligned}\Delta x' &= \Delta x'_{rad} + \Delta x'_{tan} + \Delta x'_{aff} \\ \Delta y' &= \Delta y'_{rad} + \Delta y'_{tan} + \Delta y'_{aff}\end{aligned}\quad (30)$$

Bez obzira na izraz (30), u obzir se najčešće ne uzimaju svi elementi iz s desne strane izraza. Korištenje svih elemenata ne znači nužno da će rezultati kalibracije biti bolji. Ukoliko je neki od parametara suvišan, prouzročiti će visoku korelaciju sa drugim parametrima. Prema tome, treba pratiti statističke pokazatelje i koristiti manji broj parametara koji dovoljno dobro opisuje preslikavanje predmetne kamere (Mikhail i dr., 2001). Izrazi (25)-(30) su preuzeti od autora T. Luhmanna (Luhmann i dr., 2013).

3.6 Metode kalibracije

U fotogrametriji, postupak određivanja unutarnje orijentacije kamere se naziva kalibracija kamere. Najnovije tehnike kalibracije kamere redovito koriste analitičke metode određivanja parametara unutarnje orijentacije na temelju fotogrametrijskih opažanja. Osnovni elementi unutarnje orijentacije su:

- o konstanta kamere i
- o koordinate glavne točke autokolimacije (PPA).

Osim osnovnih elemenata, najčešće se određuju i dodatni parametri unutarnje orijentacije kojima se modelira odstupanje fizikalne realnosti kamere od teorijskog *pinhole* modela kamere. Neki od dodatnih parametara su:

- o radijalna simetrična distorzija,
- o tangencijalna distorzija,
- o neokomitost osi i nejednako mjerilo te
- o drugi dodatni parametri.

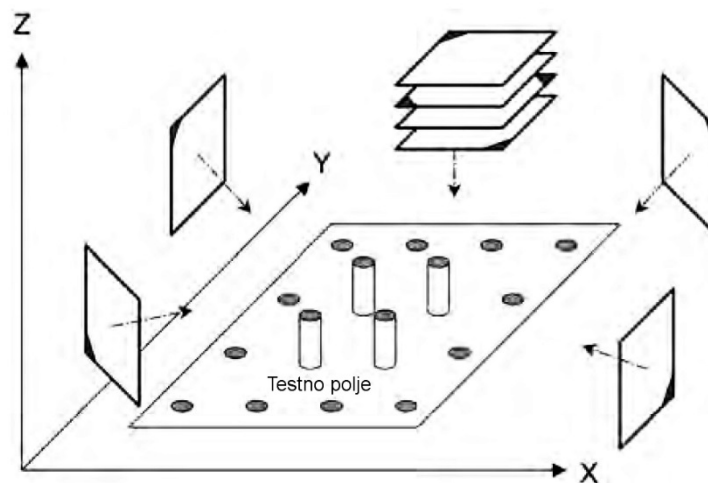
U praksi, za mjerne kamere se pretpostavlja da im je unutarnja orijentacija stabilna i konstantna, te se one kalibriraju periodički (npr. godišnje). S obzirom na to kalibracija kamere se najčešće vrši na amaterskim kamerama, čija je unutarnja orijentacija nestabilnija i podložna

promjenama. Ovisno o tome koji instrumentariji i metoda se koristi za kalibraciju, razlikujemo:

- o laboratorijsku kalibraciju,
- o kalibraciju na test polju i
- o samokalibraciju.

Laboratorijska kalibracija se obavlja samo na mjernim kamerama. Parametri unutarnje orijentacije se određuju uređajima koji se zovu goniometar i kolimator. Tim uređajima se direktno mjeri geometrija preslikavanja kamere. Ovakvo određivanje unutarnje orijentacije koristi se samo kod mjernih fotogrametrijskih kamera, prilikom njihove kalibracije u tvornicama.

Nadalje, kalibracija na test polju je kalibracija bazirana na izjednačenju metodom zrakovnih snopova. Radi se o određivanju elemenata unutarnje orijentacije rješavanjem prekobrojnog sustava jednačbi u kojima se određuju elementi vanjske orijentacije, unutarnje orijentacije i dodatni parametri. Nerijetko se izjednačenje vrši i bez definicije datuma, odnosno kao izjednačenje slobodne mreže. Na slici 27 je prikazana standardna konfiguracija snimaka na 3D test polju. Naravno, kalibracija je moguća i na 2D test polju, ali u tom slučaju treba se iznimno paziti na korelaciju nepoznanica.



Slika 27. Standardna konfiguracija kalibracije na 3D testnom polju (Luhmann i dr., 2013).

Proširivanjem kalibracije na test polju dobiva se postupak kalibracije koji se još naziva „samokalibracija“. Samokalibracija je postupak simultanog određivanja elemenata vanjske orijentacije, unutarnje orijentacije, veznih točaka na objektu, kontrolnih točaka i dodatnih

parametara. Ovim postupkom se unutar postupka rekonstrukcije objekta određuju i parametri kalibracije. Ovo je moguće zahvaljujući već spomenutim *feature matching* algoritmima i velikom broju veznih točaka na objektu. Zbog činjenice da se zajedno sa određivanjem nepoznanica rekonstruira i objekt, ova metoda nudi optimalno rješenje unutar jednog zadatka.

Rezultati kalibracije na testnom polju i samokalibracije uvelike ovise o geometriji konfiguracije i distribucije točaka, što nas dovodi do problema koji se javljaju kod kalibracije kamere ovim metodama.

Prvi problem što se javlja je korelacija među parametrima. Kako se svi parametri određuju simultano, korelacija parametara je neizbježna. Ono što je bitno je da se nakon izjednačenja provjere elementi matrice kovarijance, te da se detektiraju ovisni parametri. Za očekivati je da konstanta kamere i ishodište slikovnog koordinatnog sustava koreliraju sa elementima vanjske orijentacije, pogotovo kod vertikalnih fotografija. Parametri distorzije su uvijek korelirani, te pri kalibraciji treba obratiti pažnju na red korištenih elemenata za modeliranje distorzije. Više parametara ne znači da će rezultati biti bolji i da će distorzija biti bolje uklonjena, dapače, može dovesti do lošijih rezultata. Korelacija parametara unutarnje orijentacije i vanjske orijentacije se može smanjiti do određenog nivoa korištenjem fotografija koje su snimljene na različitim visinama ili udaljenostima od test polja, te međusobno zarotirane. Važno je imati na umu da ukoliko se kamere kalibriraju ovim metodama, te se pokaže da imaju signifikantnu razinu korelacije među parametrima, takva kalibracija kamere se ne bi smjela koristiti naknadno kao predefinirana kalibracija.

Distorzija se kalibracijom ne može ukloniti dovoljno dobro ukoliko referentne točke nisu regularno distribuirane duž cijelog kadra. Ukoliko na nekom dijelu kadra nema točaka koje su se koristile u izjednačenju, tu se događa ekstrapolacija, te se često pogrešno modelira distorzija. U praksi, na rubovima kadra se distorzija često neuspješno modelira, te se svakako preporučuje da se ne koristi deset posto vanjskog dijela kadra.

Kod kalibracije na 2D testnom polju, najveći je problem nedostatak informacija o mjerilu u smjeru optičke osi. Posljedica toga je nemogućnost jednoznačnog određivanja konstante kamere i položajnog elementa Z, vanjske orijentacije. Kako bi se navedeni problem izbjegao, potrebna nam je bar jedna duljina izmjerena i vidljiva u kadru ili konvergirajuće fotografije.

4. Kalibracija kamere

U ovom poglavlju opisan je eksperimentalni dio provedene kalibracije kamere bespilotne letjelice. Opisani su korišteni postupci i metode, algoritmi korištenih softvera za kalibraciju, te analiza kvalitete rezultata. Kao što je već navedeno, korištena su tri različita softvera za kalibraciju kamere. Korištena metoda kalibracije je najbliža metodi kalibracije na testnom polju. Korišteno je isprintano, 2D test polje sa uzorkom šahovnice dimenzija od 81 x 57 cm, veličine svakog individualnog kvadrata od 3 cm. Eksperimenti obavljeni za potrebe rada provedeni su nad skupom od sveukupno dvadeset i osam fotografija snimljenih pod različitim kutovima, orijentacijama te rotacijama kamere. Fotografije su snimljene u skladu sa smjernicama i načelima prikazanima u poglavlju 3.6. Iz izvornog skupa od dvadeset i osam fotografija, postupcima i metodama prikazanima u poglavlju 2.2. izvedeno je novih dvadeset i osam fotografija koje su bile podvrgnute radiometrijskoj obradi, odnosno optimizaciji. Kalibracija je inicijalno provedena nad izvornim fotografijama, u *.JPEG formatu, te kada su se postigli zadovoljavajući rezultati kalibracije koji su adekvatno opisivali model preslikavanja predmetne kamere, kalibracija je provedena još jednom, ovaj put nad identičnim skupom prethodno obrađenih fotografija u *.TIFF formatu.

4.1 Agisoft Lens

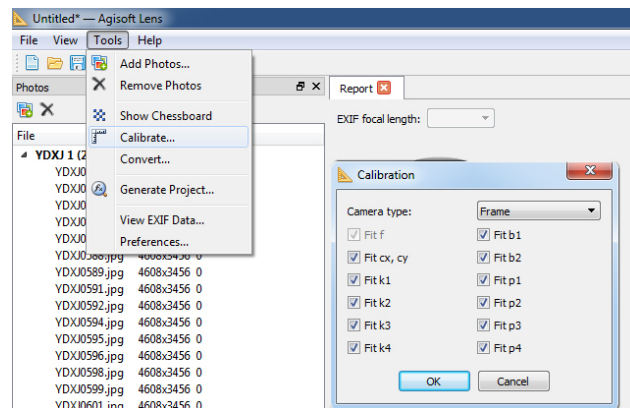
Kao što je već spomenuto, Agisoft je predstavnik komercijalnog softvera. U ovom softveru kalibracija se vrši isključivo prema metodi autora Z. Zhanga (Zhang, 2000). Softver se često nadograđuje i česte su promjene u modelima koji se koriste. Standardni Brownov model distorzije uključuje tri parametra radijalne i dva parametra tangencijalne distorzije. U predmetnom softveru osim standardnih parametara Brownovog modela, moguće je odrediti još jedan parametar distorzije i još dva parametra tangencijalne distorzije. Proširivanje modela sa dodatnim parametrima se vrši dodatnim razvijanjem funkcije tangencijalne i radijalne distorzije. Osim parametara distorzije i unutarnje orijentacije, moguće je odrediti i parametre koji predstavljaju nejednakost stranica piksela (nejednakost mjerila po osima) i odstupanje od pravokutnog oblika. Matematički model koji koristi predmetni softver je u potpunosti dostupan u službenoj dokumentaciji (Agisoft, 2017). Softver uz vrijednosti određenih parametara prikazuje i standardno odstupanje, te pogrešku reprojekcije točaka. Uslijed nedostatka statističkih podataka o postupku kalibracije, kao što je npr. matrica kovarijance, glavna referenca ocjene kvalitete kalibracije je bila standardno odstupanje traženih elemenata

u kombinaciji sa promjenom tzv. pogreške reprojekcije. Pogreška reprojekcije je odstupanje mjerene vrijednosti slikovnih koordinata GCP od reprojecirane vrijednosti temeljem parametara unutarnje i vanjske orijentacije dobivenih skupnim izjednačenjem (kalibracijom).

Agisoft Lens ima mogućnost, te u službenoj dokumentaciji preporučuje korištenje ugrađenog modula koji kreira šahovnicu na ekranu računala, ali s obzirom na širinu vidnog polja i bližu granicu oštrog preslikavanja kalibrirane kamere, ovom problemu se pristupilo iz drugog kuta, te je kamera kalibrirana temeljem fotografija proizvoljnog test polja isprintanog na papiru i zalijepljenog za čvrstu podlogu. Dimenzije šahovskog polja i činjenica da nije korišteno preporučeno šahovsko polje ni u kojoj mjeri ne utječe na rezultate kalibracije. Dimenzije šahovskog polja u izjednačenju ne utječu na elemente unutarnje orijentacije, već samo na elemente vanjske orijentacije. Iako navedeno nije dokumentirano u službenoj dokumentaciji, Agisoft Lens prema svemu sudeći koristi proizvoljni referentni sustav za kalibraciju kamere i zbog navedenog ne daje informacije o vanjskoj orijentaciji nakon kalibracije. Osim navedenog, u službenoj dokumentaciji softvera preporuča se da test polje ispunjava cijeli kadar fotografija koje se koriste za kalibraciju. Navedenu smjernicu je jako teško pratiti pri kalibraciji akcijskih kamera s obzirom na širinu vidnog polja te potrebu konvergirajućih fotografija za kvalitetnu kalibraciju. Iako je bilo nemoguće u potpunosti zadovoljiti navedenu smjernicu, pri izvođenju eksperimentalnog dijela, ona je praćena u najvećoj mogućoj mjeri. Softver detekciju točaka na fotografijama vrši automatskim algoritmom. U službenoj dokumentaciji se ne navodi koji se algoritam točno koristi, ali evidentno je da zbog uniformne distribucije točaka na šahovskom polju nisu korišteni algoritmi koji osim položaja točke vode računa o jedinstvenosti točke (npr. SIFT, SURF), odnosno o korespondentnosti, već jednostavniji algoritam (npr. FAST, BRISK) koji kao rezultat daje isključivo položaj u slikovnoj matrici. Takvi algoritmi mogu postići subpikselsku točnost detekcije točke, ovisno o kvaliteti šahovskog polja.

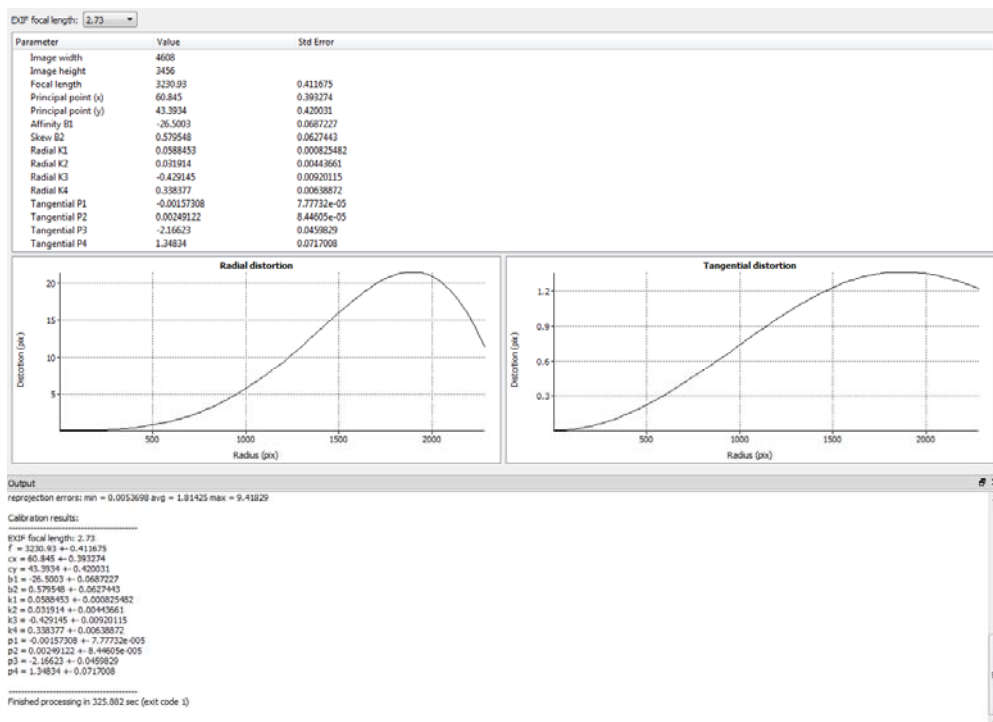
Nakon pokretanja softvera, klikom na ikonu „Add photos“ otvara se prozor u kojem selektiramo fotografije koje će se koristiti za kalibraciju. Slijedeći korak je jednostavno pokretanje kalibracije. Kalibracija se pokreće odabirom kartice „tools“ te nakon toga „calibrate“ nakon čega se otvara prozor na kojem selektiramo parametre koje želimo koristiti za kalibraciju kamere (Slika 28). Model kamere koja se koristi je naravno „Frame“, odnosno *pinhole*, a ne „Fisheye“, s obzirom da unaprijedni objektiv kamere nije *fisheye* objektiv. *Fisheye* model ne koristi centralnu projekciju kao model preslikavanja. Parametri $K1$, $K2$, $K3$ i $K4$ su parametri radijalne distorzije, a $P1$, $P2$, $P3$ i $P4$ su parametri tangencijalne distorzije.

$B1$ i $B2$ su parametri mjerila po osima i kuta među osima, dok su naravno cx i cy koordinate PPA.



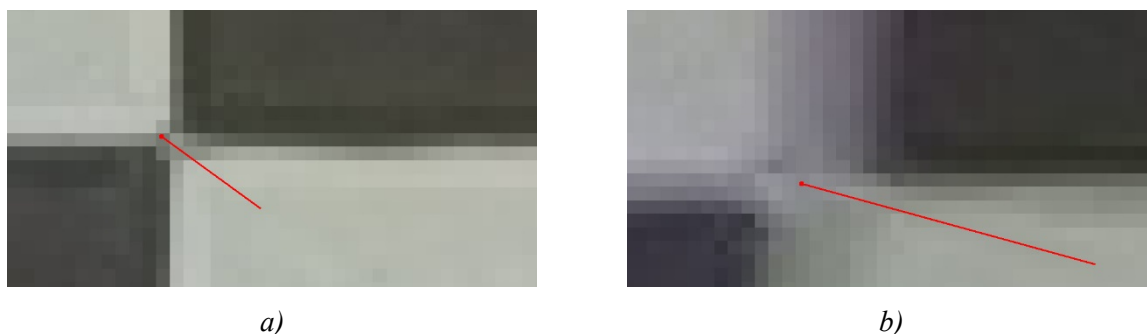
Slika 28. Pokretanje kalibracije u softveru Agisoft Lens.

Dobiveni rezultat je moguće izvesti u formatu čitljivom drugim fotogrametrijskim softverima. Naravno rezultat je moguće uvesti i u Agisoftov softver PhotoScan i provesti rektifikaciju fotografija temeljem uvezenih fotografija. Navedeni postupak je korišten za ispitivanje kvalitete uklanjanja distorzije. Na slici 29 je prikazan prozor izlaznih podataka nakon kalibracije. U gornjem dijelu prozora su prikazani izračunani parametri, u srednjem dijelu krivulje radijalne i tangencijalne distorzije te u donjem dijelu ponovno izračunani parametri uz minimalnu, maksimalnu i prosječnu pogrešku reproprojekcije izraženu u pikselima.



Slika 29. Prozor sa rezultatima kalibracije u softveru Agisoft Lens.

Klikom na pojedinu fotografiju u prozoru sa lijeve strane (Slika 28) otvara se fotografija te prikaz detekcije točaka i reprojekcije točaka. Crvene i plave točke su položaji u slikovnoj matrici koji označavaju detektiranu točku, dok je vektor pripadne boje iznos pogreške reprojekcije uvećan dvadeset puta zbog lakše vizualne interpretacije (Slika 30). Na slici 30a prikazan je vektor pogreške reprojekcije točke u centru fotografije sa slike 3, dok je sa slici 30b prikazan vektor pogreške reprojekcije točke na obodu iste fotografije. Iz navedenog se vidi presudan utjecaj distorzije u radijalnom smjeru.



Slika 30. Prikaz detekcije točaka i pogreške reprojekcije za: a) centar fotografije, b) rub fotografije.

Osim presudnog utjecaja distorzije u radijalnom smjeru, iz fotografije se iščitava upitna kvaliteta detekcije GCP-a, pogotovo točaka na obodu fotografije zbog efekta razlijevanja boje uslijed generalno lošije kvalitete preslikavanja na obodu.

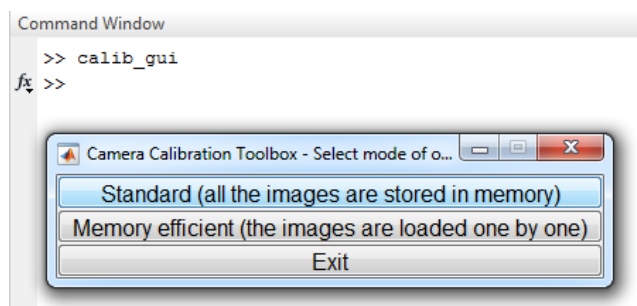
4.2 MATLAB Toolbox for Camera Calibration

MATLAB Toolbox for Camera Calibration je kod napisan u softveru MATLAB u svrhu kalibracije kamere. Kod je pisan iz perspektive računalnog vida te same smjernice i upute koje se nalaze na službenoj stranici (URL 10) ovog slobodnog koda ne ulaze u fotogrametrijsku materiju i ne objašnjavaju kako i na koji način postići dobre rezultate. Ovaj kod je u principu implementacija metode kalibracije prema autoru Z. Zhangu (Zhang, 2000). Model distorzije koji se koristi u ovom kodu je Brownov model. Model uzima u obzir prva tri koeficijenta radijalne distorzije i dva koeficijenta tangencijalne distorzije. Osim parametara distorzije u sklopu postupka kalibracije, možemo odrediti i jedan parametar koji predstavlja odstupanje piksela od pravokutnog oblika. Za razliku od parametara kalibracije u softveru Agisoft Lens, nejednako mjerilo po osima je ovdje uvedeno na drugačiji način. Umjesto parametra koji predstavlja omjer mjerila po osima, predmetni kod određuje dvije žarišne udaljenosti, po jednu za svaku os. Naravno, žarišne udaljenosti je moguće prisiliti da iz

izjednačenja izađu kao jednake vrijednosti, ukoliko smo sigurni da su pikseli kvadratnog oblika.

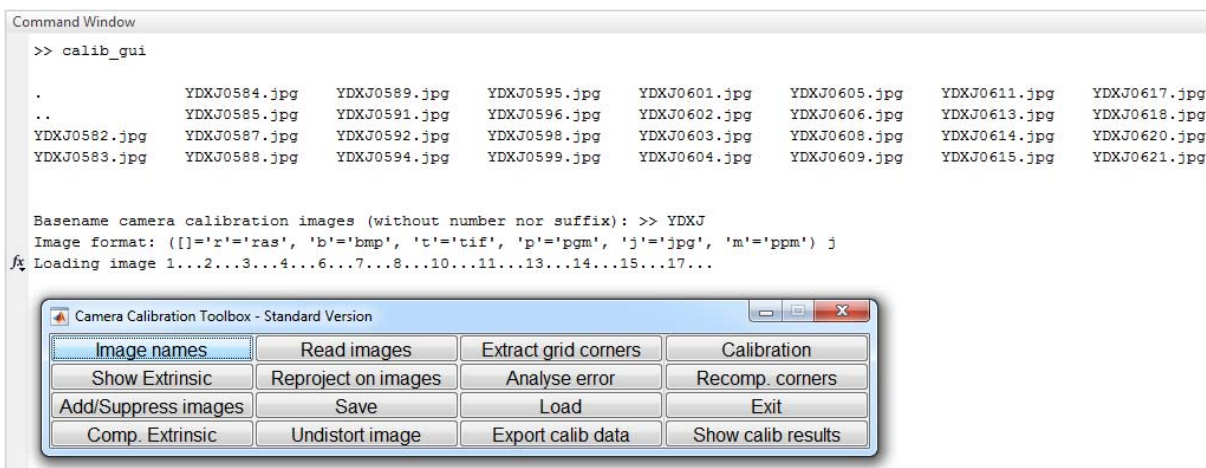
Ograničenja korištenog koda nam ne daju da kalibracijsko test polje u potpunosti ispuni kadar, te da se sukladno tome distorzija na rubovima kadra što bolje modelira. Razlog leži u tome što je zahtijevano uniformno ponavljanje kontrolnih točaka, odnosno sve kontrolne točke moraju biti vidljive na svakoj snimci. Detekcija točaka se vrši sličnim algoritmom kao u softveru Agisoft Lens. Razlika je u tome što ovaj kod zahtjeva zadavanje prozora unutar kojega će tražiti točke. Ovakav pristup ima svoje mane i prednosti. Agisoft Lens i njegov automatski algoritam su svaku kalibraciju nad dvadeset i osam fotografija izvršili unutar 5,5 minuta na prijenosnom računalu (Karakteristike računala: 8GB RAM, NVIDIA GeForce 740M, Intel i5 4200U). Za kalibraciju nad istim skupom fotografija, koristeći kod u MATLAB-u potrebno je oko 10 minuta. Prednost je generalno kvalitetnija detekcija točaka (Slika 33), te gotovo trenutno ponavljanje kalibracije ukoliko rezultati nisu zadovoljavajući, s obzirom na to da su slikovne koordinate spremljene u memoriju i da ih nije potrebno ponovno detektirati, a to je postupak koji upravo i traje najduže, bilo kod manualne ili kod automatske detekcije. Osim parametara unutarnje orijentacije, predmetni kod daje i parametre vanjske orijentacije, te nudi mogućnost vizualizacije potpunog modela distorzije, ali i zasebno modela radijalne i tangencijalne distorzije. Moguće je vizualizirati i pogrešku reprojekcije koja se može koristiti za detekciju sistematskih utjecaja i grubih pogrešaka unutar algoritma kalibracije.

Kod se poziva pozivanjem skripte „calib_gui.m“ u softveru MATLAB. Otvara se prozor (engl. Graphical User Interface - GUI) na kojem se odabire između dva modula koja se razlikuju po metodi spremanja fotografija. U ovome radu korišten je modul koji sve fotografije sprema u memoriju računala, zbog toga što je modul koji sprema u memoriju samo sliku koja se trenutno obrađuje nekompatibilan sa korištenom verzijom MATLAB -a. Na slici 31 je prikazan GUI koji se otvara po pokretanju skripte „calib_gui.m“.



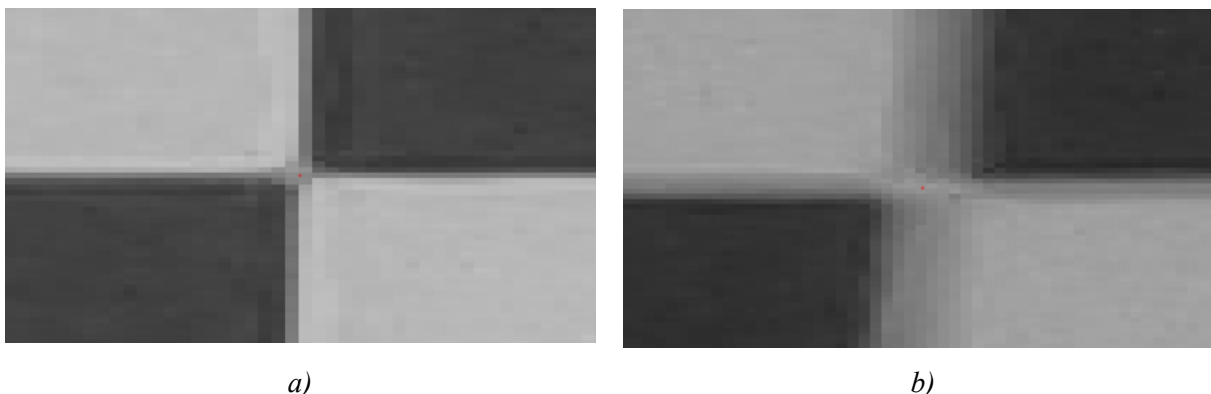
Slika 31. GUI koji otvara skriptu „calib_gui.m“.

Slijedeći korak je učitavanje fotografija. Klikom na ikonu „*Image names*“ u komandnom prozoru softvera treba podesiti osnovne parametre fotografija koje se trebaju uvesti, kao što su korijen imena fotografija i ekstenzija odnosno format. Nakon toga se pokreće uvoz fotografija (Slika 32).



Slika 32. Prikaz podešavanja parametara i uvoza fotografija u softver.

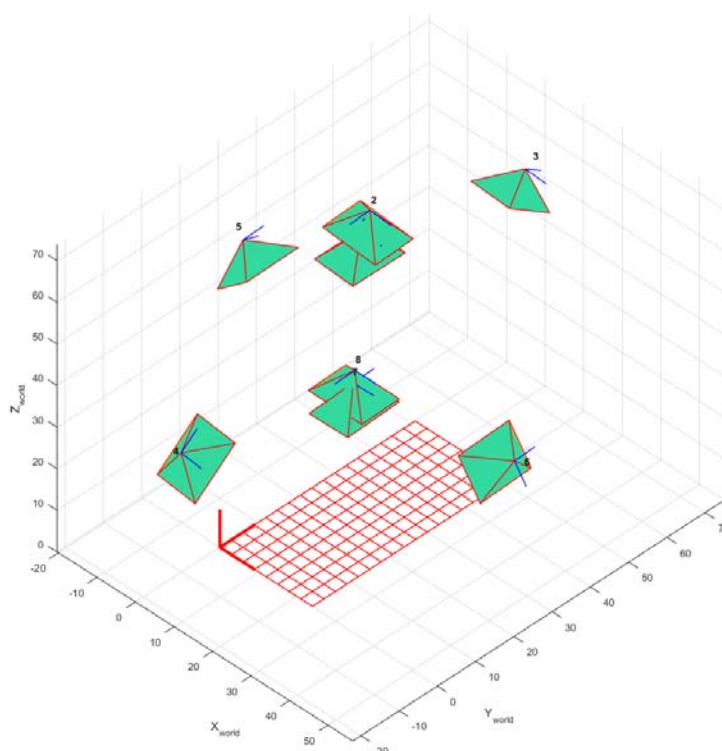
Nakon toga slijedi detektiranje GCP-a. Detekcija se vrši poluautomatski, a započinje se klikom na ikonu „*Extract grid corners*“. Kako bi se izvršila detekcija potrebno je definirati prozor unutar kojeg će softver detektirati točke, nakon čega softver automatski računa broj stupaca i redaka test polja te s obzirom na oblik definiranog četverokuta perspektivnom transformacijom računa i dodaje na prikaz približne slikovne koordinate GCP-a, koje se kasnije koriste za preciznu detekciju točaka. Ukoliko je aproksimacija zadovoljavajuća i nije potrebno dodati približne parametre distorzije kako bi se položaj GCP-a još bolje aproksimirao (što je slučaj ovdje), u predefiniranoj blizini aproksimiranih položaja GCP-a će se algoritmom za detekciju GCP-a izvršiti automatska detekcija točaka koja može postići i subpikselsku točnost. Crveni križić na slikama 33a i 33b označava detektiranu točku.



Slika 33. Prikaz precizne detekcije točaka u MATLAB-u za: a) centar fotografije, b) rub fotografije.

Nakon detekcije točaka moguće je pokrenuti kalibraciju. Prije pokretanja kalibracije moguće je definirati parametre koji će se koristiti za kalibraciju, postavljanjem njihove vrijednosti na 1 ili 0. Postavljanjem „*est_aspect_ratio*“ parametra na vrijednost 1, u obzir se uzima nejednako mjerilo po osima izraženo dvama žarišnim duljinama. Postavljanjem „*center_optim*“ parametra na vrijednost 1, omogućava se određivanje PPA, dok se u suprotnom uzima centar fotografije kao fiksna vrijednost. Moguće je postaviti koji parametri distorzije će se određivati kalibracijom postavljanjem jedinica u vektor „*est_dist*“. Posljednji parametar koji je moguće podesiti je određivanje neokomitosti osi, on se podešava predefiniranjem parametra „*est_alpha*“. Nakon što se podese željeni parametri, pokreće se kalibracija.

Kvaliteta kalibracije i potencijalne grube i sistematske pogreške mogu se detektirati vizualizacijom pogreške reprojekcije, klikom na ikonu „*Analyse error*“ (Slika 42). Moguće je rektificirati fotografije, odnosno ukloniti distorziju klikom na ikonu „*Undisort images*“. Taj postupak sa ovim kodom zahtjeva puno računalnih resursa i ne preporuča se njegovo pokretanje na slabim računalima. Klikom na ikonu „*Show Extrinsic*“, pokreće se prikaz parametara vanjske orijentacije u odnosu na koordinatni sustav definiran ili kamerom ili testnim poljem (Slika 34).



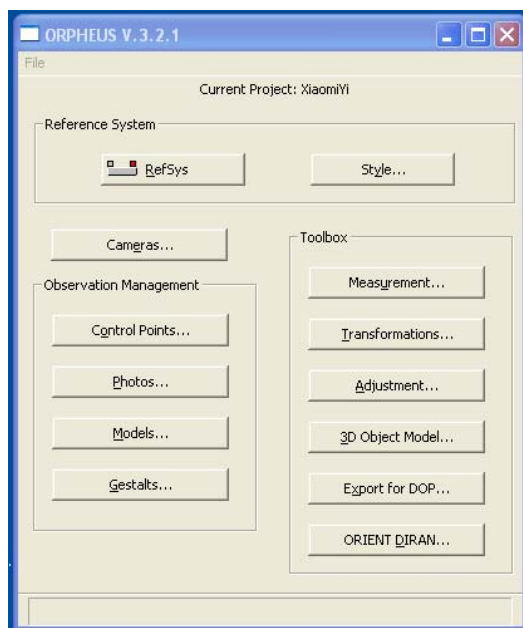
Slika 34. Prikaz parametara vanjske orijentacije podskupa fotografija korištenih za kalibraciju.

Klikom na ikonu „*Export calib data*“ moguće je izvesti slikovne i referentne koordinate na fotografijama pogodne za uvoz u druge softvere.

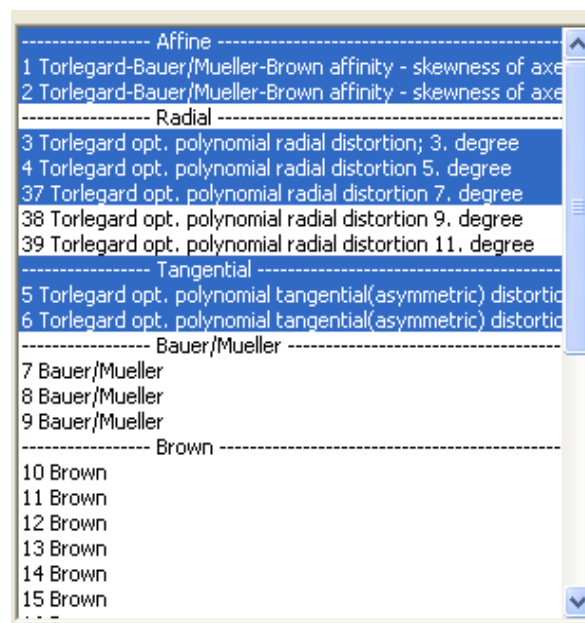
4.3 Orpheus 3.2.1

Orpheus je predstavnik znanstvenog softvera. Ovaj softver je proizveden na Tehničkom Sveučilištu u Beču, na Institutu za fotogrametriju i daljinska istraživanja. Radi se o nešto starijem softveru koji datira iz 2002. godine, ali to naravno ni u kojem slučaju ne utječe na kvalitetu rezultata koji se njime dobivaju, ovo je strogo analitički softver koji je daleko kompleksniji od prethodno predstavljenih softvera, ali isto tako i mnogo snažniji. Za potrebe ovog rada korišten je modul softvera za izjednačenje metodom zrakovnih snopova. Softver nudi mogućnost dodavanja dodatnih parametara koji modeliraju razne pogreške. Na taj način se mogu modelirati razni utjecaji poput neokomitosti osi, nejednako mjerilo po osima, radijalna i tangencijalna distorzija, pa čak i ekcentricitet GNSS antene u izjednačenju sa dodatnom zračnom kontrolom. Moguće je odabrati parametre za modeliranje distorzije modelima prema više autora. Nažalost nisu dostupni parametri distorzije identični onima korištenima u prethodna dva softvera (Brownov model), te su uslijed toga korišteni i određivani parametri distorzije prema TU Wien (njem. Technische Universität) standardu. TU Wien standard preporuča model distorzije prema Torlegardu (Torlegard, 1981) te korištenje parametara koji opisuju neokomitost osi i nejednako mjerilo po osima. Tolegardov model također koristi tri parametra radijalne i dva parametra tangencijalne distorzije te pronalazi svoju primjenu u blizupredmetnoj fotogrametriji i vrlo je sličan Brownovom modelu.

Kako je na svakoj fotografiji koja je korištena za kalibraciju vidljivo kalibracijsko test polje sa 468 GCP-a, te s obzirom na to da softver Orpheus nema mogućnost automatske detekcije GCP-a, a manualna detekcija tolikog broja kontrolnih točaka nema smisla, za potrebe pripremanja podataka za kalibraciju korišten je već spomenuti modul MATLAB-ovog Toolboxa za detekciju GCP-a šahovskog test polja. Kreirana je skripta koja konvertira slikovne koordinate iz izlaznog formata MATLAB-ovog Toolboxa u format adekvatan za softver Orpheus. Navedena skripta je priložena na CD-u uz diplomski rad. Po pokretanju programa i kreiranju projekta, otvara se GUI sa karticama kojima se otvaraju razni moduli i dijelovi softvera (Slika 35a).



a)



b)

Slika 35. a) Početni GUI softvera Orpheus Orient 3.2.1, b) odabir dodatnih parametara.

Pošto je projekt kreiran, potrebno je unijeti podatke prethodno pripremljene za izjednačenje, pod tim se podrazumijevaju koordinate GCP-a, slikovne koordinate GCP-a te početni parametri kamere. Primjer pripremljenih podataka za izjednačenje se nalazi na CD-u priloženom uz rad. Slijedeći korak je generiranje početnih nepoznanica vanjske orijentacije koji se generiraju pod karticom „*Aproximations*“ unutar modula „*Observation Management*“. Navedeni modul za taj postupak koristi metodu koja daje približna rješenja. Dodatni parametri kamere se odabiru pod karticom „*Meta...*“ unutar modula „*Observation Management*“, gdje je moguće proizvoljno odabrati parametre koje želimo (Slika 35b). Nakon što su podaci pripremljeni, dodatni parametri kalibracije selektirani, a približne nepoznanice izračunane ulazi se u postupak izjednačenja. U prozoru koji se otvara klikom na karticu „*Adjustment*“ odaberu se parametri koji se izjednačavaju, te se klikom na „*Adjust*“ obavlja izjednačenje (Slika 36). Parametri unutarnje orijentacije dobiveni ovim izjednačenjem se izvoze u *.cam file.

Strategy: Standard Photo Triangulation

Parameters of Adjustment Stage

Adjustment Stage: 2 Determine Shifts and Rotations ☐ Automatic Iteration

	OBJ	ERP	ROT	SCA	IOR	ADP	all	ROE
Photo Set: 117-123	☐	☒	☒	☐	☒	☒	☐	☐
Model Set: 1-99999999	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐
Gestalt Set: 1-99999999	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐
Polar Set: 1-99999999	☐	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐
ConPoi Set: 1-99999999	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Store Load Clear

Iterations: 5 Show Stat: 0.0 g0_apr: 0.0100 Max. Singul.: 15

☒ Omit ☒ Qxx ☐ Qyv Halfweight: 1000.0 ☐ Mark Observations Markwjdth: -1.0

Adjust Protocol... Details...

Statistics of Adjustment

Histogram of a priori Normalized Discrepancies

d *	200.00	400.00	600.00	800.00	1000.0	1200.0	1400.0	1600.0	1800.0	...
1055	2	0	0	0	0	0	0	0	0	
99.81%	.19%	.00%	.00%	.00%	.00%	.00%	.00%	.00%	.00%	

PLL: 31.9060 PVV: 31.9060

Observations: 1018 Unknowns: 52

Redundancy: 966 Sigma0: 0.1817

Marked: 0 Singularities: 0

The Worst a priori Normalized Discrepancies

1 PHO =	122, nr=	80, dx =	327.391
2 PHO =	122, nr=	81, dx =	320.232
3 PHO =	123, nr=	80, dx =	141.470
4 PHO =	123, nr=	81, dx =	135.238
5 PHO =	121, nr=	80, dx =	96.538
6 PHO =	121, nr=	81, dx =	96.007
7 PHO =	122, nr=	80, dy =	63.582
8 PHO =	120, nr=	81, dx =	60.253
9 PHO =	120, nr=	80, dx =	59.551
10 PHO =	122, nr=	81, dy =	59.542

List of Singular Unknowns

OK Apply Cancel Reset

View details on adjustment results (error statistics with list of marked observations, list of unknowns if Qxx is checked, normalized residuals and variance components if Qyv is checked)

Slika 36. Prozor Orpheusa u kojemu se vrši izjednačenje.

5. Rezultati

U ovome poglavlju prikazani su rezultati postignuti metodama predstavljenima u poglavlju 4. Prikazani su rezultati dobiveni sa tri različita softvera na temelju dvije verzije istog skupa slika. Prvi skup slika je u standardnom *.JPEG formatu, a drugi skup je u formatu koji se puno češće koristi u fotogrametriji, u *.TIFF formatu. Osim prikaza rezultata, analizirana je kvaliteta rezultata temeljem više metoda. Pogreška reprojekcije je razlika između mjerene vrijednosti točke u slikovnoj matrici i one dobivene izrazom (21) temeljem izračunanih parametara unutarnje i vanjske orijentacije postupkom kalibracije. Zbog navedenog, ona se može koristiti kao ocjena kvalitete kalibracije samo unutar zatvorenog skupa mjerenja. To znači da se parametri kalibracije mogu mijenjati i uzimati u obzir ili isključivati na način da pogreška reprojekcije ima što manji iznos, ali samo ukoliko se svaka kalibracija računa na temelju istih fotografija. Za očekivati je da će kalibracija koja ima više konvergentnih fotografija uz rub kadra gdje je utjecaj distorzije najveći i često ne odgovara korištenom matematičkom modelu imati veću pogrešku reprojekcije. Druga metoda ocjene kvalitete kalibracije, odnosno u ovom slučaju modeliranja utjecaja distorzije je ponovna kalibracija kamere na temelju rektificiranih fotografija. Naime, dobivenim parametrima kalibracije se rektificiraju fotografije kalibracijskog test polja koje nisu korištene za inicijalnu kalibraciju, te se nad njima provede ponovna kalibracija. Na tim fotografijama utjecaj distorzije bi trebao biti minimalan, te će nam rezultati dati uvid u kvalitetu uklanjanja distorzije. Tom metodom se inače dodatno kalibriraju kamere u više stupanjskim algoritmima kalibracije. U ovome radu takav pristup se koristi kao kontrola kvalitete.

5.1 Agisoft Lens

U softveru Agisoft Lens je provedena kalibracija sa više varijanti parametara uključenih u izjednačenje. Naravno, konstanta kamere, koordinate PPA su u svakoj varijanti određivane, dok su parametri distorzije, mjerila i neokomitosti varirali. Korištena verzija softvera aproksimira i radijalnu i tangencijalnu distorziju sa četiri parametra. Ponavljanjem postupka kalibracije sa različitim parametrima i uspoređivanjem pogreške reprojekcije selektirana je konfiguracija kalibracije pri kojoj se u obzir ne uzimaju dva parametra tangencijalne distorzije, te parametar koji predstavlja neokomitost osi. Parametri tangencijalne distorzije se često zanemaruju, ali kako je u predmetnu kameru ugrađen novi objektiv, te zasigurno nema

visoku kvalitetu centriranja optičkih elemenata u odnosu na senzor, nije dolazilo u obzir da se zanemare. Zanimljivo je da je uočeno kako parametar koji predstavlja nejednako mjerilo po osima utječe jako puno na rezultate kalibracije. Navedeno je očigledno posljedica niže cijene uređaja a posljedično i niže kvalitete izrade s obzirom na to da ova kamera izvorno nije namijenjena za fotogrametrijske svrhe. Isti parametri su odabrani za oba skupa fotografija, jer se naravno radi o istoj kameri. Prva zamijećena stvar je da je na fotografijama u *.TIFF formatu automatski algoritam detekciju izvršio bolje nego na fotografijama u *.JPEG formatu. Naime, na fotografijama u *.TIFF formatu je detektirano više točaka. Na slici 37a se nalazi isječak prozora iz softvera pri kalibraciji *.TIFF fotografijama, a na slici 37b pri kalibraciji sa *.JPEG fotografijama. Broj pored fotografije označava broj točaka detektiranih automatskim algoritmom za detekciju GCP-a testnog polja sa uzorkom šahovnice. Broj jedan pored pojedinih fotografija znači da je algoritam detekciju izvršio bezuspješno.

YDXJ0582.jpg	4608x3456	556	YDXJ0582.TIF	4592x3452	556
YDXJ0583.jpg	4608x3456	548	YDXJ0583.TIF	4592x3452	549
YDXJ0584.jpg	4608x3456	552	YDXJ0584.TIF	4592x3452	553
YDXJ0585.jpg	4608x3456	538	YDXJ0585.TIF	4592x3452	533
YDXJ0587.jpg	4608x3456	555	YDXJ0587.TIF	4592x3452	555
YDXJ0588.jpg	4608x3456	554	YDXJ0588.TIF	4592x3452	555
YDXJ0589.jpg	4608x3456	556	YDXJ0589.TIF	4592x3452	556
YDXJ0591.jpg	4608x3456	555	YDXJ0591.TIF	4592x3452	555
YDXJ0592.jpg	4608x3456	556	YDXJ0592.TIF	4592x3452	554
YDXJ0594.jpg	4608x3456	554	YDXJ0594.TIF	4592x3452	553
YDXJ0595.jpg	4608x3456	543	YDXJ0595.TIF	4592x3452	544
YDXJ0596.jpg	4608x3456	546	YDXJ0596.TIF	4592x3452	547
YDXJ0598.jpg	4608x3456	543	YDXJ0598.TIF	4592x3452	543
YDXJ0599.jpg	4608x3456	1	YDXJ0599.TIF	4592x3452	1
YDXJ0601.jpg	4608x3456	546	YDXJ0601.TIF	4592x3452	546
YDXJ0602.jpg	4608x3456	551	YDXJ0602.TIF	4592x3452	553
YDXJ0603.jpg	4608x3456	550	YDXJ0603.TIF	4592x3452	552
YDXJ0604.jpg	4608x3456	553	YDXJ0604.TIF	4592x3452	555
YDXJ0605.jpg	4608x3456	1	YDXJ0605.TIF	4592x3452	1
YDXJ0606.jpg	4608x3456	542	YDXJ0606.TIF	4592x3452	545
YDXJ0608.jpg	4608x3456	1	YDXJ0608.TIF	4592x3452	1
YDXJ0609.jpg	4608x3456	524	YDXJ0609.TIF	4592x3452	521
YDXJ0611.jpg	4608x3456	553	YDXJ0611.TIF	4592x3452	553
YDXJ0614.jpg	4608x3456	526	YDXJ0614.TIF	4592x3452	528
YDXJ0615.jpg	4608x3456	523	YDXJ0615.TIF	4592x3452	522
YDXJ0617.jpg	4608x3456	1	YDXJ0617.TIF	4592x3452	1
YDXJ0618.jpg	4608x3456	1	YDXJ0618.TIF	4592x3452	1
YDXJ0620.jpg	4608x3456	518	YDXJ0620.TIF	4592x3452	521
YDXJ0621.jpg	4608x3456	504	YDXJ0621.TIF	4592x3452	507

a)

b)

Slika 37. Broj detektiranih točaka na fotografijama istog izvora u: a) *.JPEG i b) *.TIFF formatu.

Rezultati kalibracije i jedne i druge metode su prikazani komparativno u tablici 5. Parametri *B1* i *B2* označavaju mjerilo i ne okomitost osi, su *K1*, *K2* i *K3* parametri radijalne distorzije, te su *P1* i *P2* parametri tangencijalne distorzije. Razlika u vrijednostima parametara kalibracije je zanemariva. Standardna odstupanja parametara pokazuju da nikakav sistematski utjecaj na mjerenja nije bio prisutan. Prosječne pogreške reprojekcije su prikazane u tablici. Navedeno nas dovodi do zaključka da ovakvo manipuliranje radiometrijskim svojstvima fotografije

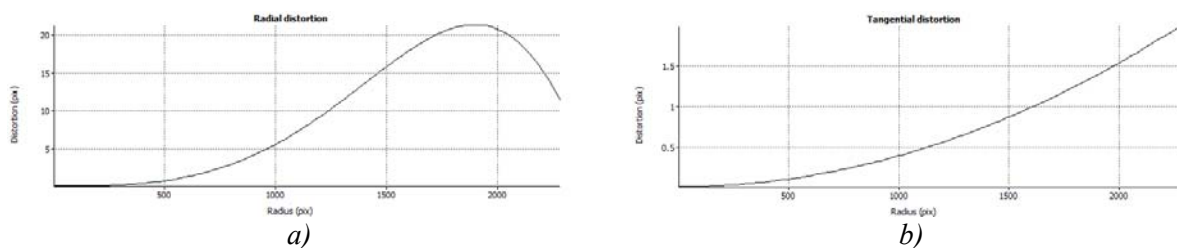
nema signifikantan utjecaj na korišteni algoritam kalibracije gdje se koristi veliki broj automatski detektiranih točaka.

Tablica 5. Prikaz rezultata kalibracije nad fotografijama u *.JPEG i *.TIFF formatu.

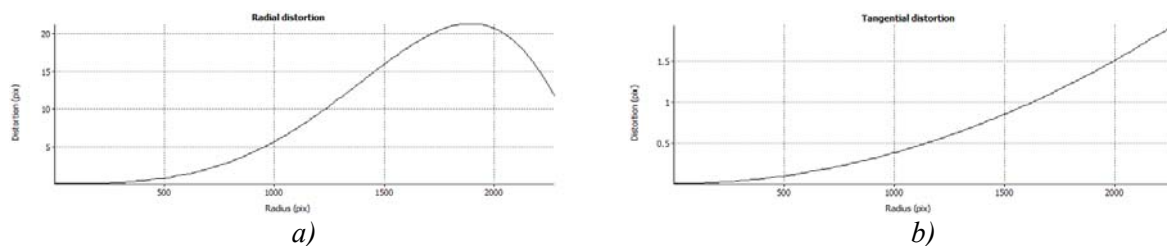
	*.JPEG		*.TIFF		*.TIFF
	Vrijednost	² SD	Vrijednost	² SD	Jedinice
c	3235,35	1,2221	3233,66	1,2229	[pikseli]
x_o	73,9943	0,6020	75,5783	0,6015	[pikseli]
y_o	29,1097	0,5555	28,0264	0,5540	[pikseli]
$B1$	-25,1674	0,0965	-25,3738	0,0928	/
$B2$	/	/	/	/	/
$K1$	0,0559	0,0015	0,0484	0,0014	/
$K2$	0,0401	0,0084	0,0950	0,0083	/
$K3$	-0,4297	0,0185	-0,5702	0,0186	/
$K4$	0,3192	0,0141	0,4393	0,0140	/
$P1$	0,0009	0,0000	0,0011	0,0000	/
$P2$	0,0002	0,0000	0,0001	0,0000	/
$P3$	/	/	/	/	/
$P4$	/	/	/	/	/
$reprojection_{error}$	1,6109	/	1,5662	/	[pikseli]

²SD – Standardno odstupanje (engl. Standard Deviation)

Na slikama 38a i 38b prikazane su krivulje radijalne i tangencijalne distorzije dobivene na temelju *.JPEG fotografija. Na slikama 39a i 39b su prikazane krivulje radijalne i tangencijalne distorzije dobivene temeljem *.TIFF fotografija. Razliku između krivulja je golim okom jako teško uočiti. Na slici 38a i slici 39a se iščitava da je utjecaj radijalne distorzije doseže svoj maksimum od oko dvadeset i tri piksela pri radijusu od oko 1900 piksela. Agisoft ne prikazuje krivulje distorzije u odnosu na radijus veći od pola širine matrice fotografije. To doprinosi težoj interpretaciji rezultata kalibracije, čije se krivulje distorzije obično iskazuju u odnosu na poludijagonale. Tangencijalna distorzija prema slici 38b i 39b ima oko trinaest puta manji utjecaj od radijalne, te kako se to i očekuje od krivulje tangencijalne distorzije, raste blago eksponencijalno prema rubu fotografije. S obzirom na to da je objektiv manualno ugrađen, očekivan je puno veći utjecaj tangencijalne distorzije.

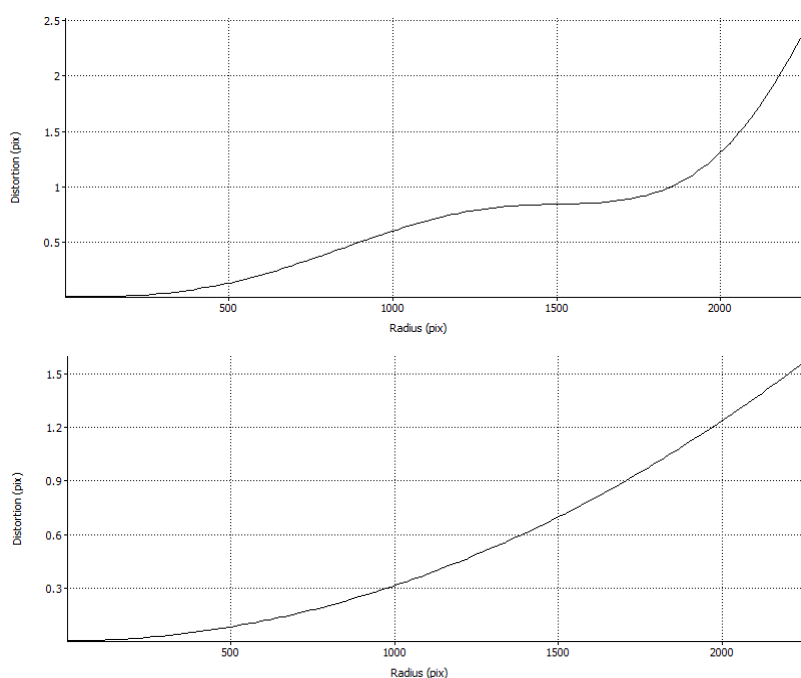


Slika 38. Krivulje distorzije dobivene kalibracijom nad fotografijama u *.JPEG formatu, a) radijalne, b) tangencijalne.

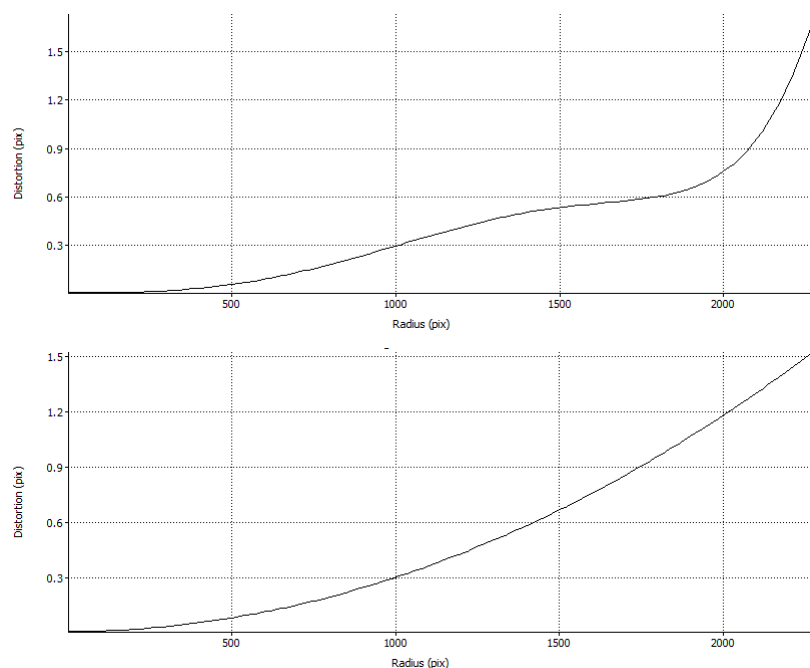


Slika 39. Krivulje distorzije dobivene kalibracijom nad fotografijama u *.TIFF formatu, a) radijalne, b) tangencijalne.

Kako bi se provjerila kvaliteta uklanjanja distorzije, proveden je dvostupanjski postupak uklanjanja distorzije gdje se u drugoj iteraciji algoritma ponovno provodila kalibracija nad drugim skupom fotografija koji je prethodno rektificiran temeljem parametara prikazanih u tablici 5. Rektifikacija je obavljena nad drugim skupom fotografija rektificiranih softverom iz Agisoftovog paketa, PhotoScanom. Navedeni softver je korišten jer sam Lens nema mogućnost rektificiranja fotografija, već samo računanja parametara kalibracije. Sam postupak rektifikacije u PhotoScanu nije opisan u radu jer se u njemu ne vrši kalibracija već samo jedan jednostavan korak rektifikacije fotografija temeljem parametara dobivenih u Lensu. Moguće je odabrati da se PPA postavi u centar fotografije, te da se prilagodi nejednako mjerilo po osima, ali te mogućnosti nisu korištene kako bi se zadržao odnos korelacije parametara. Rektificirane fotografije su korištene za ponovnu kalibraciju gdje je korišten kalibracijski model kalibracije sa članovima kao i u inicijalnoj kalibraciji. Na slikama 40a i 40b, odnosno 41a i 41b su prikazane krivulje radijalne i tangencijalne distorzije dobivene temeljem kalibracije nad rektificiranim snimcima u *.JPEG odnosno *.TIFF formatu.



Slika 40. Krivulje distorzije dobivene kalibracijom nad rektificiranim fotografijama u *.JPEG formatu; radijalne (gore) i tangencijalne (dolje).



*Slika 41. Krivulje distorzije dobivene kalibracijom nad rektificiranim fotografijama u *.TIFF formatu; radijalne (gore) i tangencijalne (dolje).*

Na krivuljama distorzije prikazanim na slikama 40 i 41 se vidi da je utjecaj distorzije sveden na prihvatljivu razinu, odnosno na ispod tri piksela radijalne i dva piksela tangencijalne distorzije u maksimumu funkcije za krivulje dobivene temeljem rektificiranih *.JPEG snimaka, te na ispod dva piksela i tangencijalne distorzije u maksimumu funkcije za krivulje dobivene temeljem rektificiranih *.TIFF snimaka. S obzirom na kvalitetu kamere i dimenzije fotografije, odnosno veličinu GSD (engl. Ground Sample Distance) na snimkama korištenim za kalibraciju, koji iznosi 0,3 mm, to je zadovoljavajuća točnost za predviđene fotogrametrijske primjene ove kamere. U predviđenim primjenama kao što snimanja terena sa kamerom na bespilotnoj letjelici na visini od npr. četrdeset metara, GSD je 0,8 cm te je utjecaj distorzije još uvijek u skladu sa realnim očekivanjima s obzirom na cijenu predmetne kamere. Realna razlika uklanjanja distorzije između ova dva seta podataka je zanemariva. Na grafovima radijalne i tangencijalne distorzije (Slika 40 i 41) vidi se kako funkcija i radijalne i tangencijalne distorzije eksponencijalno raste povećavanjem radijusa fotografije iznad 2000 piksela. Takvo ponašanje je očekivano ne samo zbog utjecaja distorzije, već i zbog akumuliranja drugih pogrešaka leće koje postižu svoj maksimum upravo na rubovima leće.

5.2 MATLAB Toolbox for Camera Calibration

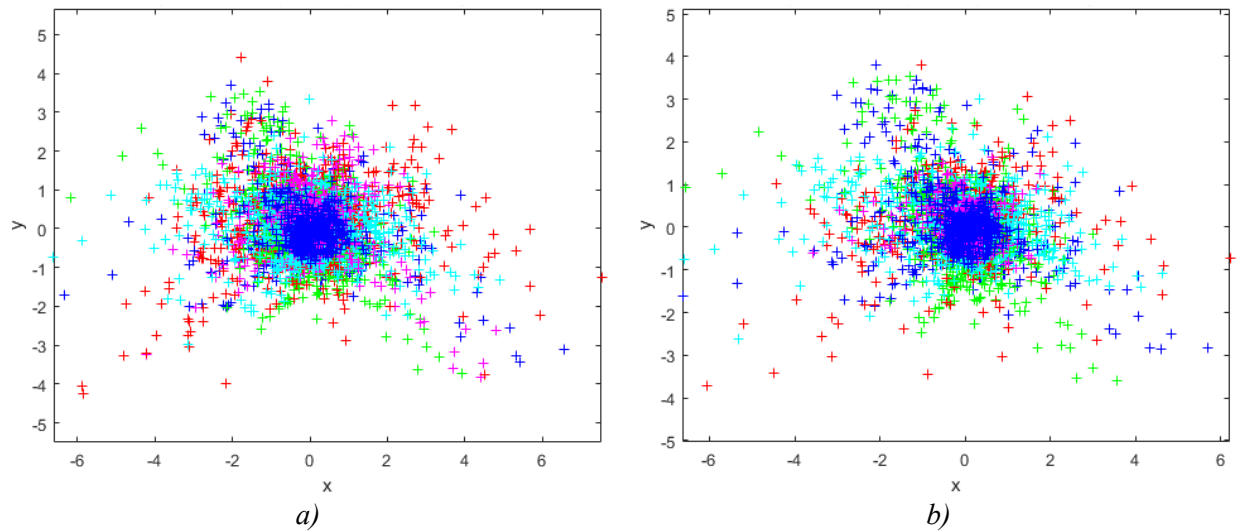
Koristeći navedeni kod, kamera je kalibrirana modelom sa sličnim parametrima kao i u prethodnom primjeru. Korišteni *toolbox* daje mogućnost korištenja tri parametra radijalne distorzije i dva parametra tangencijalne distorzije. Iako je na temelju iskustva iz prošlog primjera predviđeno da će se koristiti puni model bez parametra okomitosti osi, iskušane su varijante kalibracije sa raznim parametrima. Varijacije raznih kalibracija nisu dale bolji rezultat od predviđene, a parametar neokomitosti osi se pokazao kao nesignifikantan. Korišteni model ne koristi faktor mjerila kao parametar koji opisuje odstupanje piksela od kvadratnog oblika, već računa dvije žarišne duljine. U tablici 6 komparativno su prikazani parametri dobiveni na temelju *.JPEG i *.TIFF snimaka.

Tablica 6. Prikaz rezultata kalibracije nad fotografijama u *.JPEG i *.TIFF formatu.

Parametri	*.JPEG		*.TIFF		Jedinice
	Vrijednost	SD	Vrijednost	SD	
c_x	3201,3190	1,2382	3201,9025	1,2402	[pikseli]
c_y	3226,4460	1,2525	3227,1729	1,2546	[pikseli]
x_o	73,8065	0,6420	73,3884	0,6424	[pikseli]
y_o	29,6764	0,5823	29,5193	0,5832	[pikseli]
<i>skew</i>	/	/	/	/	/
$K1$	0,0805	0,0008	0,0805	0,0008	/
$K2$	-0,1279	0,0031	-0,1243	0,0031	/
$K3$	-0,0269	0,0036	-0,0314	0,0036	/
$P1$	0,0003	0,0000	0,0003	0,0000	/
$P2$	0,0009	0,0000	0,0009	0,0000	/
<i>reprojection_{error}</i>	1,3184	/	1,2757	/	[pikseli]

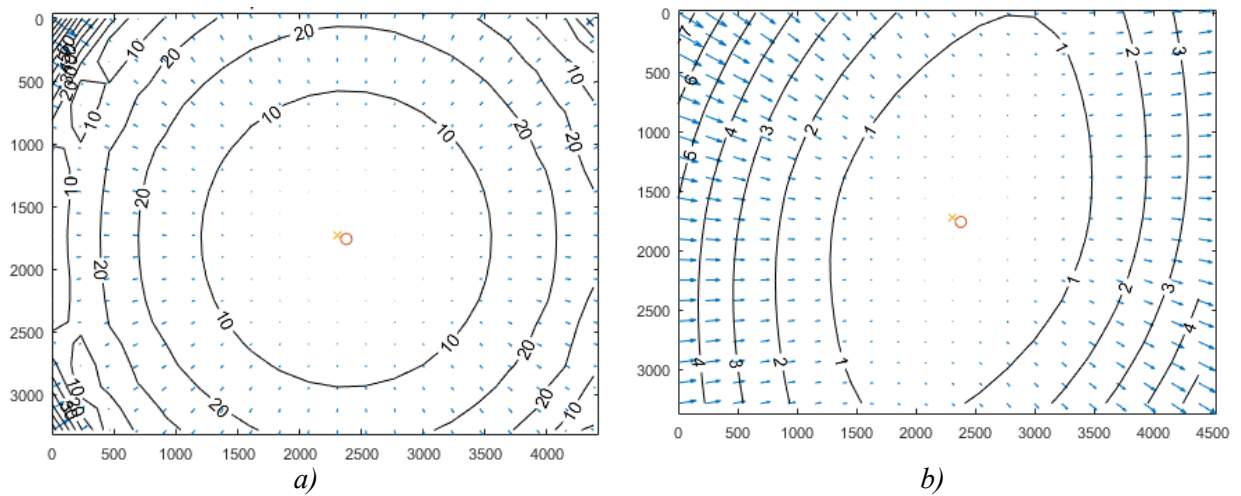
Kao ocjenu točnosti Matlab Calibration Toolbox daje tzv. numeričku grešku, koja reprezentira interval pouzdanosti od 99.73% odnosno 3σ . U tablici 6 prikazane su vrijednosti za 1σ (standardno odstupanje), odnosno interval pouzdanosti od 95%. Standardna odstupanja dodatnih parametara i parametara unutarnje orijentacije ukazuju na to da nema nikakvih sistemskih utjecaja na rezultat. Što se tiče prosječne pogreške reprojekcije, ona je posebno iskazana za x i za y os. U tablici je iskazana pogreška reprojekcije u punom linearnom iznosu, odnosno kao korijen kvadrata zbroja pogrešaka reprojekcije po osima. Pogreška reprojekcije je manja nego li kod kalibracije u softveru Agisoft. Navedeno se može pripisati preciznijoj djelomično manualnoj metodi detekcije točaka u MATLAB-u naspram automatskog algoritma koji se koristi u Agisoft Lensu. Što se tiče odnosa pogreške reprojekcije između predstavljene dvije kalibracije, kalibracija nad fotografijama u *.TIFF formatu daje nijansu bolji rezultat, ali još uvijek razlika nije signifikantna, dapače, distribucija pogrešaka

reprojekcije je gotovo identična za obadvije kalibracije. Također, standardna odstupanja parametara su isto gotovo identična.

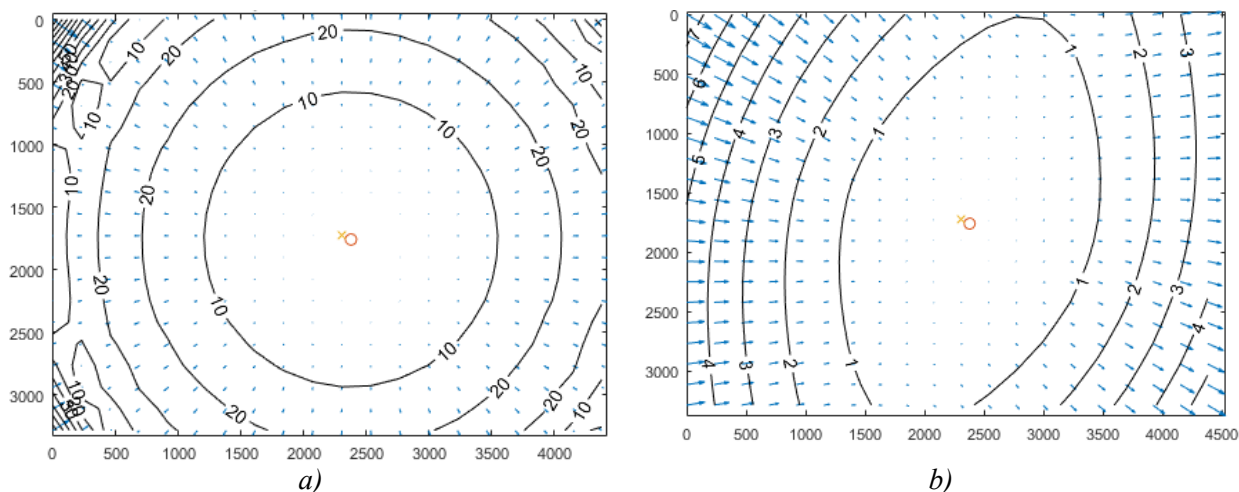


Slika 42. Pogreška reprojekcije u pikselima, za kalibraciju nad a) *.JPEG fotografijama, b) *.TIFF fotografijama.

Na slici 43a i 43b su prikazani grafovi modela radijalne i tangencijalne distorzije dobiveni u MATLAB-u za fotografije u *.JPEG, a na slikama 44a i 44b za fotografije u *.TIFF formatu.

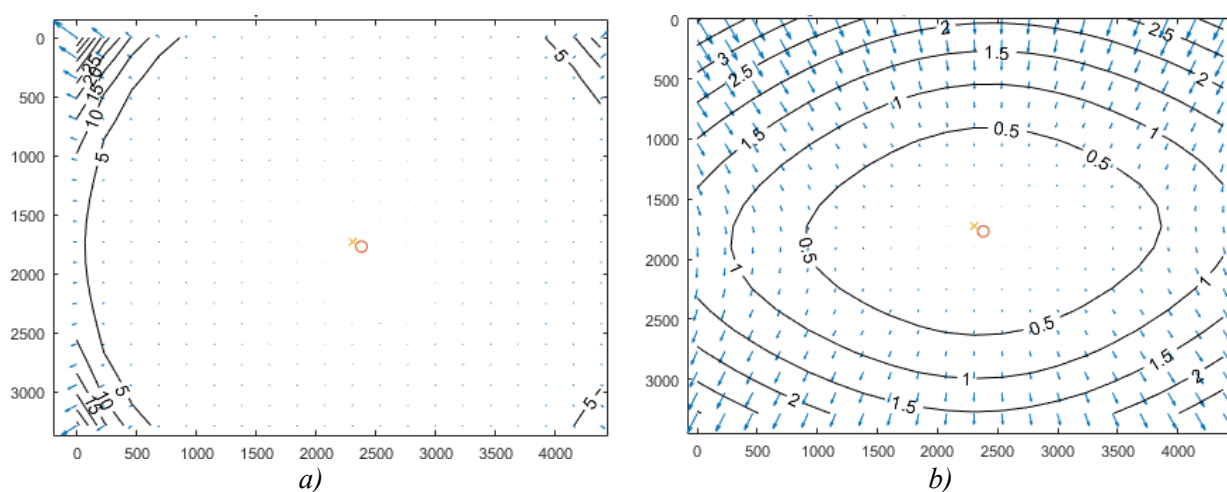


Slika 43. Graf modela distorzije u pikselima, za kalibraciju nad *.JPEG fotografijama, a) radijalne, b) tangencijalne.

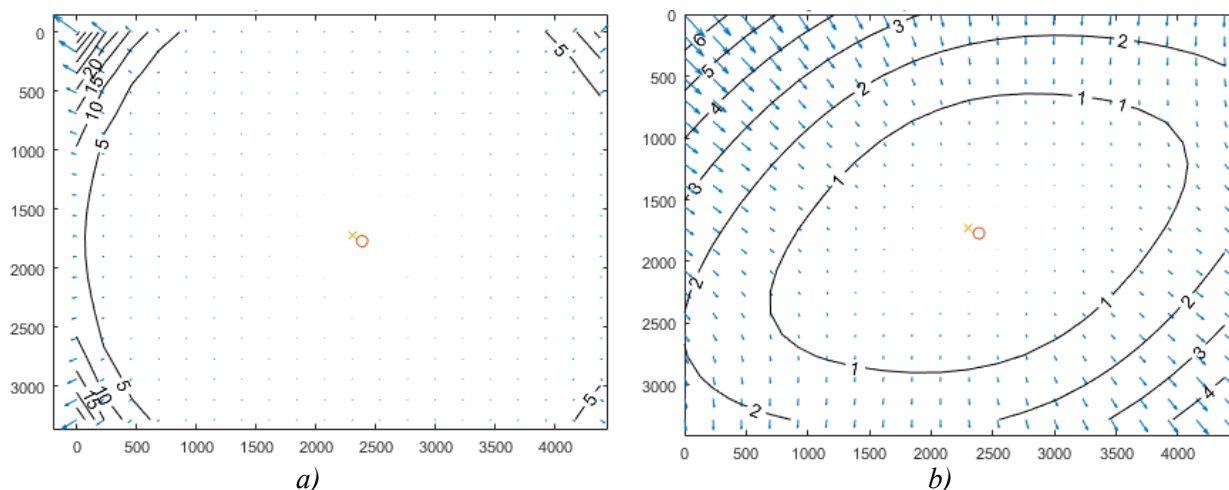


Slika 44. Graf modela distorzije u pikselima, za kalibraciju nad *.TIFF fotografijama, a) radijalne, b) tangencijalne.

Razlika među modelima distorzije je minimalna, gotovo nepostojeća. Iz navedenog se još jedan put vidi da poboljšavanje fotografije za potrebe kalibracije nema posebnog smisla. Kako bi se provjerila kvaliteta uklanjanja distorzije, proveden je dvostupanjski postupak uklanjanja distorzije gdje se u drugoj iteraciji algoritma ponovno provodila kalibracija nad drugim skupom fotografija koji je prethodno rektificiran temeljem parametara prikazanih u tablici 6. Na taj način se kontrolira koliki su ostaci pogrešaka preslikavanja, te da li su odabrani parametri koji kvalitetno opisuju stvarni utjecaj pogrešaka. Na slikama 45 i 46 su prikazani grafovi utjecaja distorzije dobiveni kalibracijom temeljenoj na prethodno rektificiranim fotografijama kalibracijskog test polja. Same vrijednosti parametara dobivenih kalibracijom kamere nisu prezentirane jer je cilj druge iteracije kalibracije pokazati samo preostali utjecaj distorzije.



Slika 45. Graf modela distorzije u pikselima, za kalibraciju nad rektificiranim *.JPEG fotografijama, a) radijalne, b) tangencijalne.



Slika 46. Graf modela distorzije u pikselima, za kalibraciju nad rektificiranim *.TIFF fotografijama, a) radijalne, b) tangencijalne.

Rezultati ukazuju na dostatnu kvalitetu uklanjanja distorzije za fotogrametrijske primjene koje ne zahtijevaju visoku točnost. Ostatci radijalne distorzije su gotovo identični za obje kalibracije (Slika 45a i 46a), dok se utjecaj tangencijalne distorzije malo razlikuje. Na prvi pogled to je signifikantna razlika, ali pogleda li se bolje, vidi se da je riječ o utjecaju od ispod pola piksela, te da se o tome ne može niti raspravljati. Radijalna distorzija je jednolično uklonjena u radijusu od 2000 piksela od centra fotografije, te na cijelom području iznosi ispod pet piksela. Uzmemo li u obzir GSD pri kojem je vršena kalibracija, utjecaj distorzije nije značajan, ali svakako ga treba imati na umu pri primjenama u rekonstrukciji objekata na većoj udaljenosti od one pri kojoj je vršena kalibracija. Povećavanjem radijusa iznad 2000 piksela, utjecaj distorzije gotovo eksponencijalno raste. Takvo ponašanje radijalne distorzije navodi na zaključak da bi i uz četvrti parametar za modeliranje radijalne distorzije sveukupna distorzija bila modelirana kvalitetnije. Tangencijalna distorzija nakon kalibracije nije značajnije promijenila svoj iznos, već samo smjer. To može biti posljedica visoke korelacije tangencijalne distorzije sa PPA uslijed vjerojatno nedostatnog broja zarotiranih fotografija, na što očigledno treba obratiti posebnu pozornost prilikom prikupljanja fotografija za kalibraciju.

5.3 Orpheus Orient 3.2.1

Koristeći ovaj moćan softver, sistemski utjecaji su modelirani modelom koji je preporučen prema TU Wien standardu. Navedeni model, što se tiče modeliranja distorzije je sličan prethodno korištenom Brownovom modelu, te se također sastoji od tri parametra kojima se modelira radijalna distorzija, te dva parametra kojima se modelira tangencijalna distorzija.

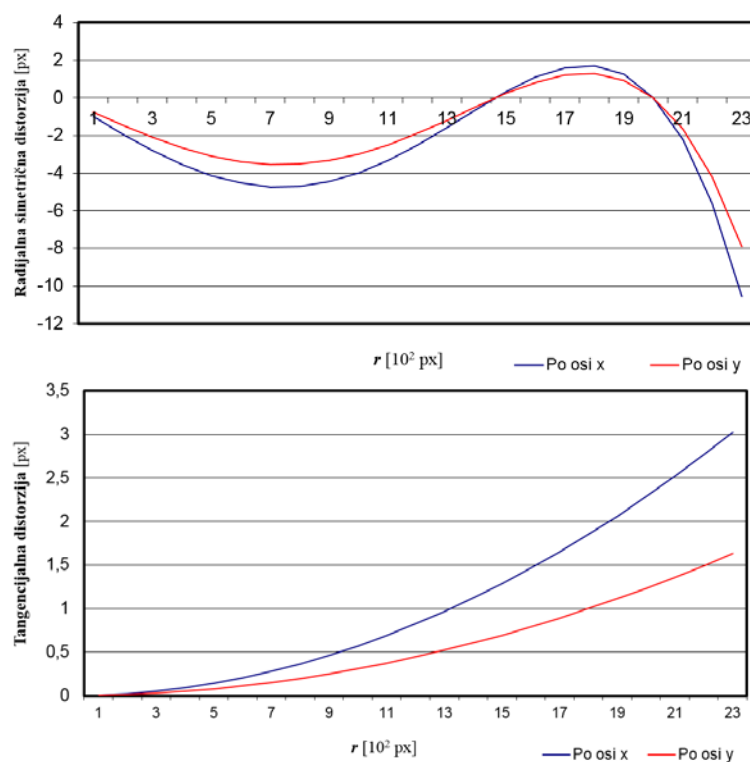
Osim parametara distorzije sastoji se i od parametara koji pored PPA i konstante kamere modeliraju neokomitost osi i nejednako mjerilo, te su kao preporučeni parametri TU Wien standarda korišteni u eksperimentalnom dijelu ovog rada. U tablici 7 su komparativno prikazani parametri dobiveni temeljem točaka detektiranih na fotografijama u *.JPEG formatu, te temeljem točaka detektiranih na fotografijama u *.TIFF formatu. U tablici 7, parametri $R1$, $R2$ i $R3$ označavaju parametre radijalne distorzije, dok $T1$ i $T2$ označavaju parametre tangencijalne distorzije. Kao radijus nulte distorzije korišten je radijus od 2000 piksela, odnosno dvije trećine poludijagonale fotografije.

Tablica 7. Parametri kalibracije dobiveni u softveru Orpheus, na temelju *.JPEG i *.TIFF fotografija.

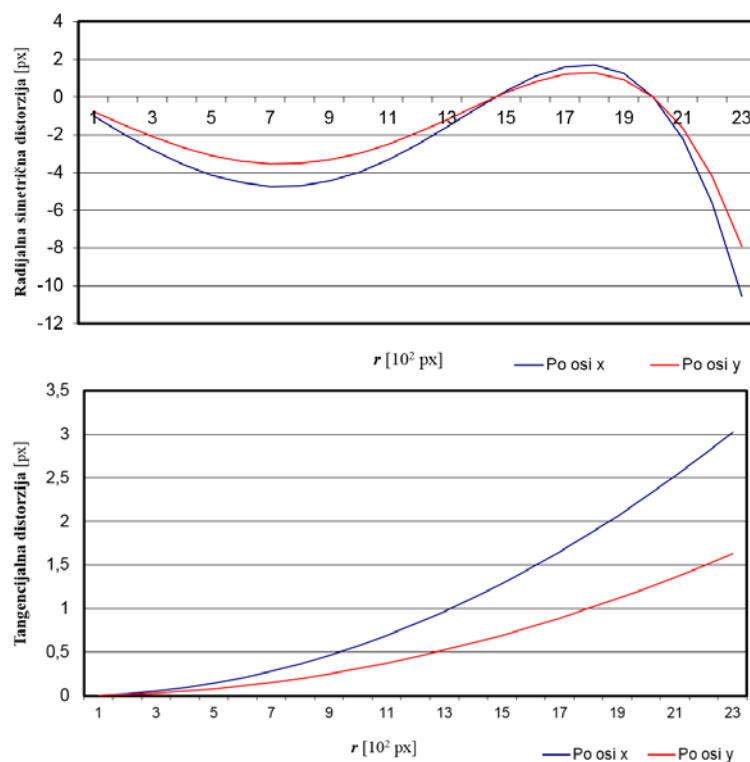
Parametri	*.JPEG		*.TIFF		Jedinice
	Vrijednosti	SD	Vrijednosti	SD	[pikseli]
f	3260.8472	0.6415	3261.2131	0.6428	[pikseli]
x_o	56,4514	1.4921	56,9658	1.4940	[pikseli]
y_o	16,9418	1.0436	16,9416	1.0428	[pikseli]
$B1$	0.2504	0,2080	0.2513	0,2039	/
$B2$	-3.2332	0,2071	-3.2365	0,2052	/
$R1$	72.0172	0,7330	72.0161	0,7312	/
$R2$	-48.0166	0,7082	-48.0140	0,7063	/
$R3$	0.9157	0,2053	0.9153	0,2014	/
$T1$	0.2052	0,1807	0.2042	0,1822	/
$T2$	0.9667	0,1151	0.9680	0,1142	[pikseli]

Usporedimo li tablicu 7 sa tablicama 6 i 5 vidimo da se parametri PPA i konstante kamere signifikantno razlikuju. To je posljedica korištenja drugog modela distorzije, odnosno očigledno jake korelacije tih parametara i u jednom i u drugom modelu. Naravno to nije posljedica korištenja određenog modela već posljedica okolnosti kalibracije kamere. Tome doprinosi nedostatak kvalitetnih fotografija za kalibraciju kamere te sama metoda kalibracije na dvodimenzionalnom testnom polju.

Na slici 47 su prikazane krivulje utjecaja radijalne i tangencijalne distorzije kreirane temeljem parametara za kalibraciju nad *.JPEG fotografijama, a na slici 48 krivulje utjecaja radijalne i tangencijalne distorzije kreirane temeljem parametara za kalibraciju nad *.TIFF fotografijama. Navedeni parametri su sadržani u tablici 7.



Slika 47. Graf modela distorzije za kalibraciju nad rektificiranim *.JPEG fotografijama; radijalne (gore) i tangencijalne (dolje).



Slika 48. Graf modela distorzije za kalibraciju nad rektificiranim *.TIFF fotografijama; radijalne (gore) i tangencijalne (dolje).

Razlika između grafova prikazanih na slikama 47 i 48 je zanemariva, baš kao i u prethodnim slučajevima. Na slici 47 i 48 je vidljivo kako krivulja radijalne distorzije dva puta siječe r os

grafa. Sjecište na 2000 piksela je tu zbog toga što je uzeti radijus nulte distorzije dvije trećine poludijagonale, odnosno 2000 piksela, dok je prvo sjecište posljedica rotacije grafa upravo uslijed korištenja normalizacijskog radijusa. Ono što je zanimljivo je činjenica da je drugačiji i kompleksniji model distorzije koji distorziju nezavisno modelira po dvije osi dao gotovo jednake rezultate kao i prethodno korišteni model distorzije koji ne odvaja utjecaj distorzije po x i y osi. Iz priloženih slika se također iščitava eksponencijalni rast utjecaja tangencijalne distorzije dostizanjem radijusa od 2000 piksela. Uvidom u ponovljivost rezultata za očekivati je da će drugi stupanj uklanjanja distorzije dati iste ili jako slične rezultate kao i dva prethodno korištena softvera, te je zbog opsežnosti postupaka koje je potrebno izvesti kako bi se obavio dvostupanjski postupak kalibracije, odnosno kontrola uklanjanja distorzije, zaključeno da nema posebnog smisla. Opsežnost postupaka se u prvom redu odnosi na uklanjanje distorzije temeljem dobivenih parametara, s obzirom na to da Orpheus ne nudi tu mogućnost te da bi se za nešto takvo prvo trebao razviti proizvoljni softver.

6. Zaključak

U ovom radu ispitana su tri različita softvera i njihove mogućnosti što se tiče kalibracije kamere. Svaki pojedini softver je predstavnik jedne od klasa. Agisoft Lens pokazao je visoku razinu jednostavnosti korištenja, ali sa druge strane i diskutabilnu kvalitetu detekcije točaka automatskim algoritmom. Toolbox for Camera Calibration u MATLAB-u je pokazao visoku razinu robusnosti te iznenađujuću kvalitetu rezultata. Veliki plus navedenog softvera je mogućnost kalibracije na 3D testnom polju, usporedbe radi, takvu mogućnost nema ni komercijalni softver Agisoft Lens. S druge strane, negativna strana softvera je nedostatan razvijen model utjecaja distorzije za kompleksnije objekte, čiji je utjecaj distorzije potrebno modelirati sa polinomom višeg stupnja. Treći korišteni softver, Orpheus, nadilazi spomenute softvere po kvaliteti rezultata i po mogućnostima modeliranja utjecaja distorzije, ali zahtjeva višu razinu fotogrametrijskog znanja i razumijevanja materije kako bi se iskoristio njegov puni potencijal. Osim navedenog, nedostatak Orpheusa je obujam priprema koje je potrebno obaviti kako bi se dobio podatak, te stoga takvi softveri i nisu u širokoj uporabi. Apsolvirano je da naknadna obrada fotografija u *.RAW formatu nema poseban utjecaj na kalibraciju kamere korištenim algoritmom, gdje test polje ima veliki broj GCP-a i gdje visoka stopa detekcije GCP-a nije od presudne važnosti. Potencijal ovakve radiometrijske obrade fotografija bi se možda bolje iskazao kalibracijom na test polju sa manje GCP-a, gdje je detekcija svake točke od iznimne važnosti ili pak prilikom rekonstrukcije objekta *dense matching* algoritmina gdje radiometrijska svojstva fotografije imaju presudan utjecaj na rezultat. Takvo bi se istraživanje trebalo provesti, ali ono izlazi izvan granica istraživanja ovog diplomskog rada. Kalibracijom na test polju potvrđeno je da radijalna distorzija ima najveći utjecaj na preslikavanje od svih pogrešaka. Rezultati kalibracije pokazuju da je ovakav tip kalibracije dostatan za primjene u blizupredmetnoj fotogrametriji, gdje se objekt nalazi u neposrednoj blizini kamere (na udaljenosti od nekoliko metara), ali zbog linearne ovisnosti veličine GSD-a i udaljenosti objekta od kamere, radijalna distorzija brzo postaje signifikantna u aerofotogrametrijskim primjenama. Zbog svega navedenog, preporuča se višestupanjski postupak kalibracije kamere pri bilo kakvoj primjeni koja nadilazi rekonstrukciju objekta u neposrednoj blizini, odnosno preporuča se postupak kojim se u prvoj iteraciji grubo uklanja distorzija, a nakon toga se skupnim izjednačenjem i rekonstrukcijom objekta vrši postupak samokalibracije te se uklanja preostali utjecaj distorzije.

Popis slika

- Slika 1. a) izvorna *.JPEG fotografija, b) naknadno obrađena *.RAW fotografija.*
- Slika 2. a) Izvorna kamera Xiaomi YI, b) unaprijeđena kamera Xiaomi Yi.*
- Slika 3. Referentna *.JPEG fotografija.*
- Slika 4. Pokretanje postupka konverzije fotografija iz *.RAW formata u *.DNG format.*
- Slika 5. Referentna *.DNG fotografija.*
- Slika 6. Prozor u CameraRaw modulu softvera Adobe Photoshop CS6.*
- Slika 7. Parametri balansa bijele boje podešeni na fotografiji.*
- Slika 8. a) Shematski prikaz automatskog rezanja slike, b) prozor alata „Canvas Size“ u softveru Adobe Photoshop CS6.*
- Slika 9. Referentna *.TIFF fotografija.*
- Slika 10. Prikaz "Pinhole" modela kamere (Gašparović i Jurjević, 2017).*
- Slika 11. „View from the Window at Le Gras“, najstarija sačuvana fotografija (Gajski, 2013).*
- Slika 12. Prikaz koordinatnog sustava senzora.*
- Slika 13. Slikovni koordinatni sustav definiran rubnim markicama. (Luhmann i dr., 2013)*
- Slika 14. Koordinatni sustav kamere (Luhmann i dr., 2013).*
- Slika 15. Vanjska orijentacija koordinatnog sustava kamere (Luhmann i dr., 2013).*
- Slika 16. rotacija oko svake pojedine osi koordinatnog sustava (Luhmann i dr., 2013)*
- Slika 17. Međusobna geometrija zraka više fotografija (URL 9).*
- Slika 18. Shema toka metode izjednačenja zrakovnih snopova.*
- Slika 19. Utjecaj radijalne distorzije na geometriju puta zrake od točke P do točke P' (Kraus, 2000).*
- Slika 20. Grafički prikaz utjecaja radijalne distorzije (Luhmann i dr., 2013).*
- Slika 21. Utjecaj tangencijalne i radijalne distorzije na geometriju puta zrake od točke P do točke P' (Kraus, 2000).*
- Slika 22. Grafički prikaz utjecaja tangencijalne distorzije (Luhmann i dr., 2013).*
- Slika 23. a) Izvorna fotografija; b) izvedena fotografija sa uklonjenom distorzijom.*
- Slika 24. Vrijednosti funkcije radijalne distorzije u ovisnosti u radijusu (Luhmann i dr., 2013).*
- Slika 25. Balansirana funkcija radijalne distorzije u ovisnosti u radijusu (Luhmann i dr., 2013).*
- Slika 26. Grafički prikaz utjecaja nejednakog mjerila (Luhmann i dr., 2013).*
- Slika 27. Standardna konfiguracija kalibracije na 3D testnom polju (Luhmann i dr., 2013).*

Slika 28. Pokretanje kalibracije u softveru Agisoft Lens.

Slika 29. Prozor sa rezultatima kalibracije u softveru Agisoft Lens.

Slika 30. Prikaz detekcije točaka i pogreške reprojekcije za: a) centar fotografije, b) rub fotografije.

Slika 31. GUI koji otvara skripta „calib_gui.m“.

Slika 32. Prikaz podešavanja parametara i uvoza fotografija u softver.

Slika 33. Prikaz precizne detekcije točaka u MATLAB-u za: a) centar fotografije, b) rub fotografije.

Slika 35. a) Početni GUI softvera Orpheus Orient 3.2.1, b) odabir dodatnih parametara.

Slika 36. Prozor Orpheusa u kojemu se vrši izjednačenje.

*Slika 37. Broj detektiranih točaka na fotografijama istog izvora u: a) *.JPEG i b) *.TIFF formatu.*

*Slika 38. Krivulje distorzije dobivene kalibracijom nad fotografijama u *.JPEG formatu, a) radijalne, b) tangencijalne.*

*Slika 39. Krivulje distorzije dobivene kalibracijom nad fotografijama u *.TIFF formatu, a) radijalne, b) tangencijalne.*

*Slika 40. Krivulje distorzije dobivene kalibracijom nad rektificiranim fotografijama u *.JPEG formatu; radijalne(gore) i tangencijalne(dolje).*

*Slika 41. Krivulje distorzije dobivene kalibracijom nad rektificiranim fotografijama u *.TIFF formatu; radijalne(gore) i tangencijalne(dolje).*

*Slika 42. Pogreška reprojekcije u pikselima, za kalibraciju nad, a) *.JPEG fotografijama, b) *.TIFF fotografijama.*

*Slika 43. Graf modela distorzije u pikselima, za kalibraciju nad *.JPEG fotografijama, a) radijalne, b) tangencijalne.*

*Slika 44. Graf modela distorzije u pikselima, za kalibraciju nad *.TIFF fotografijama, a) radijalne, b) tangencijalne.*

*Slika 45. Graf modela distorzije u pikselima, za kalibraciju nad rektificiranim *.JPEG fotografijama, a) radijalne, b) tangencijalne.*

*Slika 46. Graf modela distorzije u pikselima, za kalibraciju nad rektificiranim *.TIFF fotografijama, a) radijalne, b) tangencijalne.*

*Slika 47. Graf modela distorzije u pikselima, za kalibraciju nad rektificiranim *.JPEG fotografijama; radijalne (gore) i tangencijalne (dolje).*

*Slika 48. Graf modela distorzije u pikselima, za kalibraciju nad rektificiranim *.TIFF fotografijama; radijalne (gore) i tangencijalne (dolje).*

Popis Tablica

Tablica 1. Mogući parametri osjetljivosti senzora.

Tablica 2. Vrijednost parametra dužine ekspozicije sa odgovarajućim vrijednostima u sekundama.

Tablica 3. Usporedba specifikacija izvorne i unaprijedene kamere Xiaomi Yi.

Tablica 4. Odnos broja mjerenja i nepoznanica u klasičnoj konfiguraciji snimaka za kalibraciju kamere.

*Tablica 5. Prikaz rezultata kalibracije nad fotografijama u *.JPEG i *.TIFF formatu.*

*Tablica 6. Prikaz rezultata kalibracije nad fotografijama u *.JPEG i *.TIFF formatu.*

*Tablica 7. Parametri kalibracije dobiveni u softveru Orpheus, na temelju *.JPEG i *.TIFF fotografija.*

Prilog A

Primjer „autoexec.ash“ datoteke korištene za potrebe generiranja fotografija u *.RAW formatu, pokraj standardnog *.JPEG formata. U priloženoj datoteci je osjetljivost podešena na 800, pojačanje na 0 i ekspozicija na 1/275 s. Okidanje kamere je podešeno na svakih 40 s.

```
#Podesavanje ISO-a i ekspozicije
# npr: [iso_idx][exp_idx][gain_idx], 0 auto
t ia2 -ae exp 800 1275 0
#create RAW files
t app test debug_dump 14
# Podešavanje jacine zvuka
t pwm 1 set_level 75
# Blicanje led lampice
t gpio 6 sw out1
sleep 1
t gpio 6 sw out0
t gpio 54 sw out1
sleep 1
t gpio 54 sw out0
# Kratki zvuk i ledice
t gpio 6 sw out1
t gpio 54 sw out1
t pwm 1 enable
sleep 1
t gpio 6 sw out0
t gpio 54 sw out0
t pwm 1 disable
# Vremensko okidanje 40sec
sleep 10
while true; do
    t app key shutter
    t app key shutter_rel
    sleep 40
done
```

Prilog B

[illegible]

U prilogu B prikazana je matrica koeficijenata jednadžbi nepoznanica A. Korištena metoda kalibracije izjednačenjem određuje samo elemente vanjske orijentacije fotografija, te parametre unutarnje orijentacije i dodatne parametre. Koordinate referentnih točaka su fiksne. Dodatni parametri u ovom slučaju su elementi distorzije prema Brownu (Brown, 1966).

Prilog CD

Sadržaj digitalnog medija priloženog uz diplomski rad:

Direktoriji	Poddirektoriji	Sadržaj
Diplomski rad		Diplomski rad u *.docx i *.PDF formatu.
Podaci za kalibraciju	JPEG	Fotografije za kalibraciju u *.JPEG formatu.
	RAW	Fotografije za kalibraciju u *.RAW formatu.
Raw2dng		Datoteke za konverziju iz *.RAW u *.DNG format.

Literatura

Agisoft, LLC. (2017): Agisoft PhotoScan User Manual Professional Edition, Version 1.3.

Bay, H., Tuytelaars, T., Van Gool, L. (2006): Surf: Speeded up robust features, Computer vision–ECCV, 404-417.

Brown, D. C. (1966): Decentering distortion of lenses, Photogrammetric Engineering, 32, 3, 444–462.

Brown, D. C. (1971): Close-range camera calibration., Photogrammetric Engineering, 37(8), 855-866.

Blázquez, M., Colomina, I. (2012): Relative INS/GNSS aerial control in integrated sensor orientation: Models and performance., ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 67, 120-133.

Blázquez, M., (2008). A new approach to spatio-temporal calibration of multi-sensor systems., International Archives of the Photogrammetry: Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37, 481–486.

Bouguet, J. Y. (2004). Camera calibration toolbox for matlab.

Cramer, M. (2006): Calibration and validation of digital airborne cameras., International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36.

Cramer, M. (2017): Bilješke sa predavanja iz kolegija „Airborne data acquisition“, University of Stuttgart, Institute for Photogrammetry, Stuttgart.

Gajski, D. (2013): Bilješke sa predavanja iz kolegija „Fotogrametrija“, Geodetski Fakultet, Zagreb.

Gajski, D. (2015): Bilješke sa predavanja iz kolegija „Blizupredmetna fotogrametrija“, Geodetski Fakultet, Zagreb.

Gašparović, M., Gajski, D. (2016): Two-step camera calibration method developed for micro UAV's, XXIII ISPRS Congress, XLI-B1, 829 -833.

Gašparović, M., Gajski, D. (2016): Testing of Image Quality Parameters of Digital Cameras for Photogrammetric Surveying with Unmanned Aircrafts., Geodetski list: glasilo Hrvatskoga geodetskog društva, 70(3), 253-266.

Gašparović M., Jurjević L. (2017): Gimbal Influence on the Stability of Exterior Orientation Parameters of UAV Acquired Images, Sensors, 2, 401.

Kraus, K. (2006): Fotogrametrija 1. dio, Osnove i standardni procesi, Synopsis, Zagreb.

Kager, H., Rottensteiner, F., Kerschner, M., Stadler, P. (2002): ORPHEUS 3.2.1 User
Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Boehm, J. (2013): Close-Range Photogrammetry and
3D Imaging, 2nd edition, De Gruyter, Berlin.

Manual, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna University of
Technology, Vienna.

McGlone, J. C. (2013): Manual of Photogrammetry, 6th edition, American Society for
Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda.

Mikhali, E.M., Bethel, J.S., McGlone, J.C. (2001): Introduction to Modern Photogrammetry,
John Wiley & Sons, Inc., New York.

Raoult, V., David, P. A., Dupont, S. F., Mathewson, C. P., O'Neill, S. J., Powell, N. N., &
Williamson, J. E. (2016): GoProsTM as an underwater photogrammetry tool for citizen
science, PeerJ, 4, e1960.

Rehak, M. (2017): Integrated Sensor Orientation on Micro Aerial Vehicles, École
polytechnique fédérale de Lausanne, Lausanne.

Rosten, E. (2006): FAST corner detection., University of Cambridge, Cambridge.

Rožić, N. (2007): Računska obrada geodetskih mjerenja., Sveučilište u Zagrebu, Geodetski
fakultet, Zagreb.

Shahraki, M. N., Haala, N. (2015): Introducing free-function camera calibration model for
central-projection and omni-directional lenses., SPIE Optical Systems Design, 96300.

Skrypnik, I., Lowe, D. G. (2004): Scene modelling, recognition and tracking with invariant
image features., IEEE Mixed and Augmented Reality, 110-119.

Torlegard, K. (1981): Accuracy improvement in close range photogrammetry. Hochschule der
Bundeswehr München.

Tsai, R. (1987): A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine
vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses., IEEE Journal on Robotics and
Automation, 3(4), 323-344.

Zhang, Z. (2000): A flexible new technique for camera calibration., IEEE Transactions on
pattern analysis and machine intelligence, 22(11), 1330-1334.

Mrežne adrese

- URL 1: Xiaomi Yi, <http://www.xiaoyi.com/>, (Pristupljeno 5.4.2016).
- URL 2: GoPro, <https://gopro.com/>, (Pristupljeno 15.4.2016).
- URL 3: Tabaware, <http://www.tawbaware.com/xiaomiyi.htm>, (Pristupljeno 1.5.2017).
- URL 4: Adobe Photoshop CS6, <http://www.adobe.com/>, (Pristupljeno 14.4.2017).
- URL 5: DashCamTalk, <https://dashcamtalk.com/forum/>, (Pristupljeno 21.4.2016).
- URL 6: Agisoft Lens, <http://www.agisoft.com/>, (Pristupljeno 1.5.2017).
- URL 7: OpenCV, <http://opencv.org/>, (Pristupljeno 5.5.2016).
- URL 8: ISPRS, <http://www.isprs.org/>, (Pristupljeno 25.4.2017).
- URL 9: GMS, <http://www.geodesie-maintenance.com>, (Pristupljeno 4.5.2017).
- URL10: Camera Calibration Toolbox for Matlab,
http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/, (Pristupljeno 30.4.2016).

Životopis

Osobne informacije

<u>Ime i prezime:</u>	Luka Jurjević
<u>Datum i mjesto rođenja:</u>	12.4.1993, Zadar
<u>Adresa prebivališta:</u>	Stanka Vraza 8, 23 000 Zadar
<u>Mobilni telefon:</u>	099/ 340 - 5195
<u>E-mail:</u>	luka.jurjevic@outlook.com

Vještine

Komunikacija

- Vještine stečene radom u projektantskom poduzeću, temeljem interakcije sa inženjerima srodnih struka ali i strankama bez znanja stručne pozadine.
- Vještine prenošenja znanja stečene kao demonstrator na Građevinskom Fakultetu.

Timski rad / Rukovođenje

- Rad u timu, na radnom mjestu i tijekom studija na raznim projektima i programima.
- Rukovođenje na projektima tijekom studija, te na terenskom radu za druga poduzeća.

Rješavanje problema

- Inženjerski pristup rješavanju problema sa naglaskom na pronalaženje optimalnog rješenja.
- Sposobnost rada pod pritiskom vremenskih rokova.

Informatička znanja

- Osnovno poznavanje programskih jezika Java i SQL.
- Napredno korištenje programskih jezika Matlab i Python sa naglaskom na OpenCV biblioteku.
- Napredno korištenje AutoCAD i QGIS softvera.
- Napredno korištenje MS Office paketa.
- Napredno korištenje Agisoft PhotoScan i Orpheus 3.2.1 softvera.

Obrazovanje

Geodetski Fakultet, Sveučilište u Zagrebu (2011/2012 – 2013/2014)

Univ.bacc.ing.geod.et geoinf.

Geodetski Fakultet, Sveučilište u Zagrebu (2014/2015- Danas)

Mag.ing.geod.et geoinf.

Geomatics Engineering, Sveučilište u Stuttgartu (2017)

Studij bez diplome.

Jezici

- Engleski : B2.3 razina

Radno iskustvo

Praktikant, Donat d.o.o., Zadar (1/7/2012 – 1/9/2012)
(1/7/2013 – 1/9/2013)
(1/7/2014 – 1/9/2014)
(1/7/2015 – 1/9/2015)

Postignuti rezultati:

- Unaprijeđeno razumijevanje tehničke materije profesije.
- Unaprijeđeno korištenje naprednih softvera.
- Iskustvo u suradnji sa inženjerima srodnih struka.

Demonstrator, Građevinski Fakultet, Zagreb (5/10/2015 – 26/1/2016)
(9/10/2016 – 27/1/2016)

Postignuti rezultati:

- Iskustvo u prenošenju znanja.
- Poboljšanje komunikacijskih vještina i razumijevanja položaja sugovornika u komunikaciji.

Terenska ispomoć, Geo Futura d.o.o., Zagreb (1/3/2016 – 30/3/2017)

Postignuti rezultati:

- Iskustvo u korištenju raznovrsnih geodetskih instrumenata.
- Uvid u razne pravne procedure prisutne u geodetskom poslu.

Praktikant, Institut für Photogrammetrie, Stuttgart (1/4/2017 – 1/8/2017)

Postignuti rezultati:

- Produbljeno razumijevanje stručne materije.
- Iskustvo u korištenju najnovijih fotogrametrijskih softvera.
- Samostalni rad na zadanom projektu.

Radovi

- Gašparović, Mateo; Gajski, Dubravko; Jurjević, Luka
UAV's in photogrammetry (2016) Annual Conference of Croatian Chamber of Chartered Engineers of Geodesy
- Gašparović, Mateo; Jurjević, Luka
Gimbal Influence on the Stability of Exterior Orientation Parameters of UAV Acquired Images (2017) Sensors, 17(2):401.
- Jurjević, Luka; Gašparović, Mateo
3D Data Acquisition Based on OpenCV for Close-range Photogrammetry Applications (2017) ISPRS Hannover Workshop: HRIGI 17–CMRT 17–ISA 17–EuroCOW 17.

Dodatne informacije

- Vozačka dozvola B kategorije