

UDK 528.089.6:528.711.11:771.31

Stručni članak

Kalibracija digitalne kamere FUJI FinePIX S2 Pro

Tomislav CICELI – Zagreb*

SAŽETAK. U radu je opisan postupak kalibracije digitalne kamere FUJI FinePix S2 Pro u kombinaciji sa širokokutnim objektivom SIGMA DG RF konstantne žarišne daljine 20 mm. Pojava sve kvalitetnijih digitalnih amaterskih kamera nameće potrebu za njihovim korištenjem u mjerne svrhe. Za potrebe kalibracije izrađeno je test-polje od 56 točaka. Primijenjen je postupak kalibracije izjednačenja metodom zrakovnog snopa terestričkih snimki. Nakon postupka kalibracije provedena je analiza rezultata s odstupanjima na poznatim točkama. Rezultati su obrađeni za pojedinačne snimke te i za grupe snimki.

Ključne riječi: amaterska digitalna kamera, fotogrametrija, kalibracija, distorzija.

1. Uvod

Danas kada je digitalna tehnologija dobro zakoračila u svijet fotogrametrije postavlja se pitanje; odlučit se za mjernu digitalnu kameru ili upotrijebiti amatersku?

Tehnologija izradbe digitalnih kamera je toliko napredovala da na tržištu egzistira sve veći broj kvalitetnih amaterskih kamera. Procjenjujemo ih po:

- kvaliteti optike,
- kvaliteti senzora,
- robusnosti građe,
- mogućnosti nadogradnje,
- kompatibilnosti s objektivima,
- utjecaju algoritama za procesiranje digitalne slike u aparatu, ali i izvan njega (softver za konverziju RAW formata u TIFF, JPG, ili koji drugi format),
- utjecaju algoritama za kompresiju digitalnih snimki,

*Mr. sc. Tomislav Ciceli, dipl. ing., Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, 10 000 Zagreb, e-mail: tomislav.ciceli@geof.hr.

- utjecaju mehanizama za stabilizaciju slike (npr. O.I.S.),
- tempu pohranjivanja snimki i
- mogućnosti sinkronizacije više kamera (barem dvije) za snimanje dinamičkih procesa.

U fotogrametrijskom smislu važna je kvaliteta ugrađene optike, kvalitete senzora te njihova kompatibilnost (Ciceli 2004). Prema tim kriterijima odabrana je digitalna kamera Fuji FinePix S2 Pro u kombinaciji sa širokokutnim objektivom SIGMA DG RF konstantne žarišne daljine 20 mm.

1.1 Digitalna kamera FUJI FinePix S2 Pro

Digitalna kamera Fuji FinePix S2 Pro (slika 1) je zrcalno refleksna kamera japanskog proizvođača kamera i dodatne opreme za fotografiju Fujifilm. Kamera je predstavljena u siječnju 2002. Napravljena je na osnovi Nikon N80 (F80) tijela, te prihvaća objektivne Nikon serije F. U tablici 1 prikazane su neke tehničke specifikacije.

Fuji FinePix S2 ubraja se u profesionalne fotografske kamere, pa je robusnije građe od amaterske digitalne kamere, ali manjih dimenzija nego profesionalne fotogrametrijske kamere.



Slika 1. Prikaz digitalne kamere FUJI FinePix S2 Pro s objektivom SIGMA DG RF 20 mm. Na kameru su naknadno pridodani dodaci u obliku prizmi za horizontaliranje i mjerača vanjske temperature.

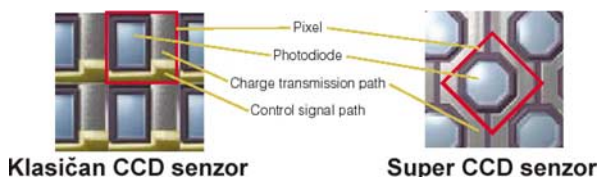
Nedostatak kamere je napajanje. Za normalan rad potrebne su četiri standardne punjive AAA baterije, te dvije 3V baterije CR123A ili DL123A. Prilikom svakog izlaska na teren potrebno je provjeriti njihovo stanje, te ih po potrebi napuniti (4xAAA) ili zamijeniti (2x3V).

Tablica 1. *Prikaz nekih od tehničkih specifikacija digitalne kamere FUJI FinePix S2 Pro (URL 1).*

Sensor	Fujifilm SuperCCD III, 23 x 15,5 mm
Sensor effective pixels	6,17 million
Final image size	4256 x 2848 (12,1 million pixels)
Sensor CFA	Primary (RGB)
Sensitivity	ISO 100, ISO 160, ISO 200, ISO 400, ISO 800, ISO 1600
Image sizes	4256 x 2848 (12,1 million), 3024 x 2016 (6,1 million) 2304 x 1536 (3,5 million), 1440 x 960 (1,4 million)
Image formats	JPEG (EXIF), TIFF-RGB (8-bit), CCD-RAW (12-bit)
Lens mount	Nikon F mount (with AF coupling & AF contacts)
Storage	Slot 1: SmartMedia (up to 128 MB) Slot 2: Compact Flash Type I/II (IBM Microdrive compatible)
LCD monitor	1,8" 117,000 pixel TFT (100% frame coverage)

1.1.1 Senzor

Senzor ugrađen u kameru ubraja se u Charge Coupled Device, (CCD), senzore punog formata. Predstavlja originalni Fuji proizvod treće generacije, SuperCCD senzor (slika 2). Koristi Bayer (Bayer 1976) uzorak za dobivanje boja. Osnovna ćelija nije klasično pravokutnog oblika nego osmerokutnoga, što uzrokuje potrebu za konverzijom u pravokutni oblik. Kako bi se maksimalno iskoristio format senzora omjer interpolacije nije 1:1 (jedan senzor : jedan piksel), nego otprilike 1 : 1,4.



Slika 2. *Usporedni prikaz strukture klasičnog CCD senzora i Super CCD senzora (FujiFilm 2002).*

Udaljenost d_2 (slika 2) između Super CCD elemenata manja je nego udaljenost d_1 , što za posljedicu ima veću prostornu rezoluciju i bolju radiometrijsku dinamiku. Posljedica je toga da je broj registriranih piksela veći nego broj aktivnih senzora. Maksimalna rezolucija koju kamera može isporučiti je 12,1 milijuna piksela (12.1 MP). Prilikom snimanja i pohranjivanja provodi se interpolacija na sljedeći način: nakon ekspozicije snimka se pohranjuje u maksimalnoj rezoluciji (12.1 MP) te se nakon toga interpolira u zadanu, najčešće nižu, rezoluciju. Prema tvrdnjama proizvođača osmerokutni oblik povećava količinu svjetla koju senzor registrira, te

se time dobiva bolji dinamički raspon, osjetljivost i odnos signal/šum. Prilikom snimanja moguće je postaviti sljedeće osjetljivosti filma prema ISO normama; 100, 160, 200, 400, 800 i 1600.

Veličina fotoosjetljivog elementa, piksela, kod ovog modela je cca $7,6 \mu\text{m} \times 7,6 \mu\text{m}$. Zbog specifičnog osmerokutnog oblika nije moguće točno odrediti njegove dimenzije. Trenutno je na tržištu prisutna četvrta generacija Super CCD senzora.

1.2 Širokokutni objektiv SIGMA DG RF 20mm F1.8

DG RF 20 mm širokokutni je objektiv fiksne žarišne duljine proizvođača foto opreme Sigma. Temelji se na asferičnim lećama u prednjem i stražnjem dijelu kako bi se smanjile pogreške kao što su distorzija, sferična aberacija i astigmatizam. Leće posjeduju nevinjetirajuću konstrukciju poželjnu kod objektivna namijenjenih digitalnim kamerama.

2. Općenito o kalibraciji kamere

Geometrija snopa zraka koji prolazi kroz sustave leća u kamerama definira se postupkom kalibracije. Rezultat kalibracije elementi su unutarnje orijentacije. Mjernom kamerom smatra se ona koja ima poznate elemente unutarnje orijentacije. Kako bi se i *nemjerne* kamere mogle koristiti u fotogrametrijske svrhe, potrebno im je odrediti parametre unutarnje orijentacije, tj. kameru je potrebno *kalibrirati*.

2.1 Unutarnja orijentacija

Postupkom unutarnje orijentacije rekonstruira se put zraka svjetlosti kroz optički sustav kamere. Elementi unutarnje orijentacije dijele se:

- na elemente unutarnje orijentacije kamere,
- na elemente unutarnje orijentacije snimka.

Elementi unutarnje orijentacije originalne snimke neposredno nakon ekspozicije u fotogrametriji jednaki su elementima unutarnje orijentacije kamere (Braun 1969). U digitalnoj fotogrametriji izostaje efekt fotografske obradbe te je snimka rasterećena takvih deformacija, međutim pojavljuju se deformacije definirane ponašanjem senzora u različitim temperaturnim uvjetima, kao i deformacije uzrokovane nesavršenošću objektivna.

Elementima unutarnje orijentacije određuje se relativna orijentacija snimke prema projekcijskom središtu. Elementi originalne snimke elementi su kamere, te unutarnja orijentacija originalne snimke ostaje za istu kameru konstantna (tako dugo dok kamera zadržava svoj oblik i dimenzije – primarno *mjerne* kamere). Elementi obrađene snimke primarno ovise o kameri, ali postoji i sekundarna ovisnost o fotografskim i optičkim procesima koji su uključeni između snimanja i mjerenja (analogna fotogrametrija) kao i o ponašanju senzora u smislu konstantnosti njegovih dimenzija (digitalna fotogrametrija).

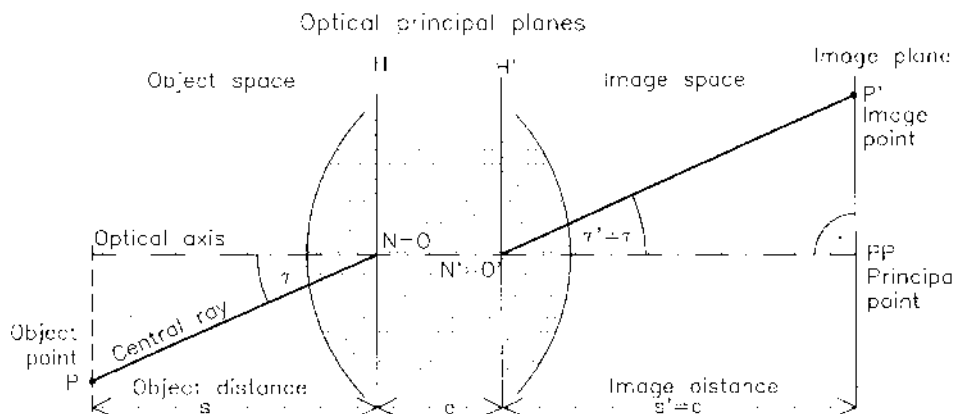
S tehničkog aspekta (Braun 1969) elementi unutarnje orijentacije sagledavaju se kao najopćenitiji slučaj, preslikavanje optikom sa i bez distorzije i na mogućnost izvedbenih pogrešaka. Najvažnije izvedbene pogreške smatraju se nedovoljno

točno centriranje objektivu, zbog čega nema rotacijske simetrije optičkog preslikavanja, neokomit položaj snimke prema optičkoj osi objektivu, zbog čega i pri postojećoj rotacijskoj simetriji optičkog projiciranja ne postoji rotacijska simetrija na snimci. Tehnički elementi unutarnje orijentacije određuju se postupkom koji se naziva *kalibracija kamere*.

2.1.1 Razlike između idealnog i stvarnog sustava preslikavanja

Rezultat optičkog preslikavanja može se aproksimirati centralnom projekcijom. Kod centralne projekcije točke predmeta preslikavaju se s pomoću zraka, što prolaze kroz centar projekcije. Projekcijski centar nalazi se na udaljenosti “ c ”, od glavne točke snimke “PP” (slika 3). Parametri tako pojednostavljenog gledanja optičkog preslikavanja konstanta su kamere, “ c ” i slikovne koordinate glavne točke “PP” (ξ_0, η_0).

Snop zraka između objekta i objektivu poznat je pod nazivom vanjski snop zraka, a snop zraka između objektivu i ravnine slike unutarnji snop zraka (Donassy 1973). Centar projekcije vanjskog snopa zraka nalazi se u ulaznoj pupili “O”, a centar projekcije unutarnjeg snopa u izlaznoj pupili “O’”. Može se reći da je cilj unutarnje orijentacije postići potpunu kongruentnost vanjskog snopa zraka prilikom projiciranja i snimanja (slika 3).



Slika 3. Idealan slučaj preslikavanja gdje su točke N, N' čvorne točke, jednake projekcijskim centrima O, O' (Kraus 1993).

Posljedica nesavršenosti kamere određena su odstupanja između idealnog i stvarnog sustava preslikavanja (Kraus 1993).

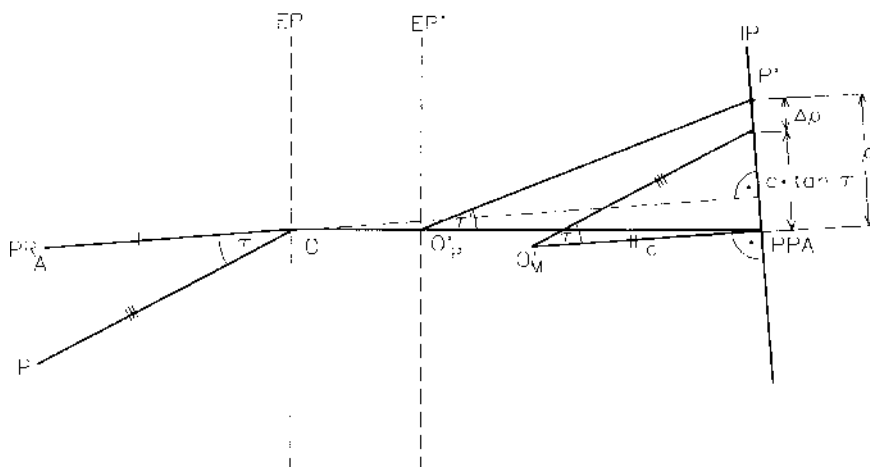
U idealnom slučaju optička bi os trebala sadržavati središta zakrivljenosti svih leća koje se nalaze u objektivu. U stvarnosti, nakon sastavljanja objektivu te njegove uporabe s odgovarajućom kamerom kada ga smještamo relativno u odnosu na mehaničku žarišnu ravninu, dolazi do malih pogrešaka. Zato referentna os u fotogrametriji nije optička os “OA” (slika 4), nego kalibrirana žarišna zraka “PRA” koja u prostoru objekta predstavlja okomicu na ravninu slike i prolazi centrom

ulazne pupile “O”. Produžetak te osi sječe ravninu snimke u točki pod nazivom glavna točka autokolimacije “PPA”, ili samo glavna točka.

Objektni kut “ τ ” definiran je u centru ulazne pupile, a ne u čvrnoj točki. Kako se ulazna pupila ne nalazi u glavnoj ravnini “H”, slijedi da kut “ τ' ” nije jednak kutu “ τ ”. Mehaničkim putem realizirana udaljenost “ s'_m ” razlikuje se za mali iznos od optički realizirane udaljenosti “ s ”. Ravnina slike nije strogo okomita na optičku os.

Posljedica je navedenih razlika da objektni kut “ τ' ” u prostoru slike ne odgovara objektnom kutu “ τ ” u prostoru objekta. Zato se definira matematički projekcijski centar “ O'_M ” koji se nalazi na okomici na ravninu snimke u glavnoj točki “PPA” na udaljenosti “ c ”, i zatvara kut “ τ ”. Preostale pogreške vode k radijalnoj optičkoj distorziji “ $\Delta\rho$ ”. Rezultat je izraz koji opisuje unutarnju orijentaciju (Kraus 1993):

$$\rho = c \tan \tau + \Delta\rho. \quad (1)$$



Slika 4. Stvarni oblik preslikavanja gdje je “ $O'M$ ” matematički centar preslikavanja, “ PR_A ” glavna zraka, “PPA” glavna točka snimke, “EP” ulazna pupila, “EP’” izlazna pupila, “ O'_p ” fizički projekcijski centar, “ c ” konstanta kamere i “ ρ ” visina slike = $\sqrt{(\xi - \xi_0)^2 + (\eta - \eta_0)^2}$, $\Delta\rho$ (radijalna) optička distorzija. (Kraus 1993).

2.2 Distorzije objektivna

Distorzija objektivna pogreška je objektivna koja uzrokuje nedovoljno oštro i geometrijski neispravno preslikavanje. Prilikom prolaska zrake svjetlosti kroz objektiv dolazi do određene promjene izlaznog osnoga kuta τ' u odnosu na ulazni osni kut τ , što rezultira pomaknutim preslikavanjem točke na snimci. Distorzija je sistematska pogreška koja je poznata (kod mjernih kamera). Kod amaterskih ih je kamera je potrebno naknadno izračunati. U protokolu kalibracije kamere nalaze se svi potrebni podaci koji se unose prilikom stvaranja datoteke za određenu kameru.

Nastaje zbog nesavršenosti izradbe objektivna. Obuhvaća samu distorziju objektivna, ali i ostale optičke deformacije: sfernu i kromatsku aberaciju, komu, astigmatizam i zakrivljenost polja. Sve te pogreške degradiraju kvalitetu ili oštrinu snim-

ke, ali su one na današnjim objektivima mjerljive i određuju se kalibracijom kamere te se mogu uzeti u račun pri popravcima slikovnih koordinata. Najutjecajnije distorzije su radijalna i tangencijalna ili asimetrična distorzija.

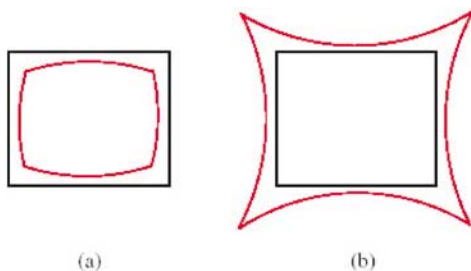
2.2.1 Radijalna distorzija

Ova distorzija predstavlja radijalnu udaljenost između stvarne i idealne udaljenosti točke na snimci a definirana je sljedećim izrazom:

$$\Delta\rho = \rho - c_0 \tan \tau, \quad (2)$$

gdje je c_0 najpribližnja vrijednost konstante kamere c .

Kalibracijom se dobivaju asimetrični rezultati, te se krivulje distorzije ne podudaraju. Uzroci su tomu u pogreškama centriranja pojedinih leća, činjenici da ravni-na slike nije u potpunosti okomita na optičku os i greškama u lećama. U osnovi, limitirajuća je ona točnost kojom se može odredit glavna točka snimke “PPA”. Asimetrija se reducira uvođenjem nove referente osi “ PR_s ”, malo različite od glavne osi “ PR_A ”. Os najbolje simetrije PR_s prolazi točkom “O”, kroz središte ulazne pupile “EP” i siječe ravninu slike u točki najbolje simetrije “PBS”.



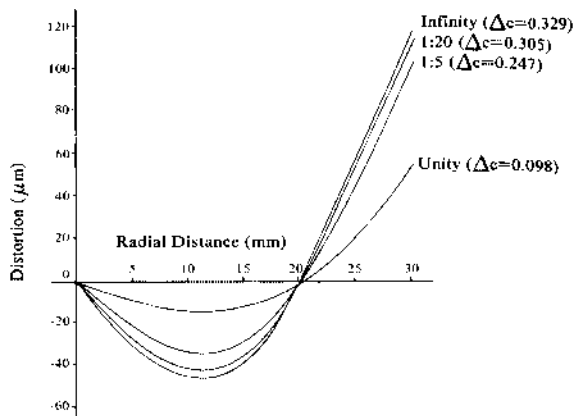
Slika 5. Utjecaj radijalne distorzije na sliku se očituje na dva načina: a) bačvasti, kada se točke preslikavaju bliže prema optičkoj osi i b) jastučasti oblik distorzije kada se točke preslikavaju dalje od optičke osi.

Utjecaj radijalne distorzije u osnovi se može prikazati na tri načina (Moffitt i Mikhail 1980):

- krivuljom distorzije (slika 6)
- tabličnim prikazom distorzije kao funkcije radijalne udaljenosti, gdje se vrijednost intervala r bira kao posljedica oblika krivulje
- metodom interpolacije dobiva se vrijednost distorzije na osnovi vrijednosti r za svaku točku
- uporabom polinomske funkcije u obliku:

$$\delta = k_0 r + k_1 r^3 + k_2 r^5 + \dots \quad (3)$$

u kojoj se vrijednosti koeficijenata k dobivaju interpolacijom polinomne krivulje prema podacima o distorziji metodom najmanjih kvadrata.



Slika 6. Prikaz krivulje radijalne distorzije za kameru Rolleiflex SLX Reseau sa 50 mm Distagon f-4 objektivom (Karara 1989).

Nakon što se izračuna vrijednost radijalne distorzije za pojedinu točku, koordinate te točke moraju biti popravljene za taj iznos.

Prema Torlegardu (Karara 1989), za radijalnu distorziju leća uvode se dodatni parametri koji se koriste u postupku računanja slikovnih koordinata točke kao popravci prema sljedećim formulama:

$$x_0 = g_{13}x(r^2 - r_0^2), \quad y_0 = g_{13}y(r^2 - r_0^2) \quad (4)$$

ili

$$x_0 = g_{14}x(r^4 - r_0^4), \quad y_0 = g_{14}y(r^4 - r_0^4). \quad (5)$$

gdje je $r^2 = x^2 + y^2$, r_0 – radijus u kojem je radijalna distorzija jednaka nuli.

2.2.2 Asimetrična ili decentrirajuća distorzija

Javlja se zbog nesavršenog centriranja komponenti objektiva i ostalih pogrešaka pri proizvodnji složenih leća, a dijeli se na radijalnu i tangencijalnu komponentu. Točkom “PPA” prolazi os kod koje je tangencijalna komponenta maksimalna, a radijalna jednaka nuli. Ta je os pod kutom “ Φ_0 ” prema pozitivnom smjeru osi x ravnine slike, mjereno u smjeru suprotnom od kazaljke na satu. Također u odnosu na tu os postoji i druga u kojoj je tangencijalna distorzija jednaka nuli, ali je radijalna komponenta asimetrične distorzije u maksimumu.

Formule za izračun te distorzije temelje se na pretpostavci da se ispred savršenog sustava leća postavi tanka prizma. Možemo je predstaviti analogno radijalnoj distorziji (slika 6). Graf koji opisuje funkciju naziva se “profil funkcije” i predstavljen je sa “ $P(r)$ ” gdje je

$$P(r) = (P_1^2 + P_2^2)^{1/2} r^2. \quad (6)$$

Obično je decentrirajuća distorzija manja od $30 \mu\text{m}$ na rubovima snimke, a za pažljivo konstruirane leće može biti i manja. Iznos decentrirajuće distorzije nije konstantan nego varira s vremenom kao posljedica različitih udaraca, vibracija i vanjskog pritiska.

Prema Torlegardu (Karara 1989), za tangencijalnu ili asimetričnu distorziju leća uvode se dodatni parametri koji se koriste u postupku računanja slikovnih koordinata točke kao popravci prema sljedećim formulama:

$$x_0 = g_{15}(r^2 + 2x^2), \quad y_0 = g_{15}2xy \quad (7)$$

$$x_0 = g_{16}2xy, \quad y_0 = g_{16}(r^2 + 2y^2). \quad (8)$$

Rezultirajuća distorzija asimetrična je s obzirom na glavnu točku autokolimacije i naziva se tangencijalna distorzija. Glavna je posljedica ove pogreške pomak glavne točke.

2.3 Metode za kalibraciju kamere

Za razliku od aerofotogrametrijskih kamera, gdje standardi za laboratorijsku i terensku kalibraciju postoje već dugi niz godina, u terestričkoj fotogrametriji, gdje se koriste različite *mjerne* i *nemjerne* kamere, standardi nisu postavljeni. Rezultat je takvog stanja cijeli niz postupaka i metoda za kalibraciju kamera u terestričkoj fotogrametriji. Mogu se razvrstati u dvije osnovne skupine (Karara 1989):

- kalibracija u laboratorijskim uvjetima,
- kalibracija na radnom zadatku (engl. On the Job Calibration).

2.3.1 Kalibracija na radnom zadatku

To je oblik triangulacije metodom zrakovnog snopa s računanjem dodatnih parametara kojima se dobivaju podatci o distorzijama, konstanti kamere, pomacima glavne točke i sl.

Potrebna je jedna cjelovita točka (X, Y, Z) za svaka dva nepoznata parametra koja se određuju kalibracijom. Pogodna je za amaterske kamere zbog činjenica što su elementi unutarne orijentacije dobivaju istim rješenjem kao i ostale nepoznanice, pa je time izbjegnuta efekt nestabilnosti unutarne orijentacije snimki. Kod takvih kalibracija, u idealnom slučaju, objekt snimanja okružen je poljem kontrolnih točaka, kojima su trodimenzionalne koordinate poznate. Kod kalibracije postoje tri slučaja:

- test-polje dolazi na mjesto snimanja te se postavlja tako da okružuje objekt snimanja,
- objekt snimanja (ako je dovoljno malen) dolazi u područje ili mjesto gdje se nalazi test-polje,
- koriste se postojeće orijentacijske točke, te se dodatno proglašuju za potrebe kalibracije.

Nužan je uvjet da su te snimke napravljene s različitim snimalištima i u različitim smjerovima. Tijekom tog postupka relativan odnos objekta prema test-polju ne

smije se mijenjati kao ni postavke fokusa. Ako se mijenjaju postavke fokusa, tada u postupak izjednačenja sa samokalibracijom ulaze promjene fokusa, kao dodatne nepoznanice.

2.3.1.1 Izjednačenje metodom zrakovnog snopa

Osnovna geometrijska jedinica u fotogrametriji općenito je zraka svjetlosti (pravec) koja povezuje točku objekta, projekcijsko središte i preslikanu točku na snimci. Prema tome, svaka pojedinačna snimka može se predstaviti snopom zraka svjetlosti ili zrakovnim snopom s vrhom u projekcijskom središtu kojem nije poznat prostorni položaj (koordinate) ni orijentacija snopa u prostoru. U postupku izjednačenja *metodom zrakovnih snopova* povezuju se pojedinačni snopovi (snimke) u cjelinu te se ujedno određuje prostorni položaj svakog snopa (snimke) u odnosu na referentni sustav na osnovi određenog broja poznatih točaka. Izravno se računa veza između slikovnih i referentnih koordinata bez uvođenja modelnih koordinata kao međukoraka. Snopovi svih pripadajućih snimaka izjednačuju se zajedno, tako da se homologne zrake svjetlosti sijeku, a mjesto presjeka predstavlja položaj vezne ili osnovne zadane točke bloka u prostoru. Svaka pojedina točka određena je presjekom zraka svih snimki na kojima je dotična točka preslikana. Proces je iterativan i zahtijeva približne polazne veličine (Fiedler 2003).

Uvođenjem samokalibracije moguće je dodatno korigirati eventualne sistematske pogreške unutarnje orijentacije i na taj način povećati općenitu točnost izjednačenja.

Slikovni koordinatni sustav određen je preslikanim rubnim markicama sa slikovnog okvira kamere na svaku snimku (analogna fotogrametrija) ili dimenzijom snimke u pikselima (digitalna fotogrametrija). Ulazne veličine u izjednačenje, koje se temelji na metodi najmanjih kvadrata, izmjerene su slikovne koordinate svih veznih i zadanih točaka, te približni elementi kamere, a osnovna jedinica je snimka. Numeričkim modelom potrebno je odrediti međusobne odnose snimaka i objekta snimanja. Nepoznanice koje treba odrediti koordinate su svih veznih i zadanih točaka, elementi vanjske orijentacije svake pojedinačne snimke, te elementi unutarnje orijentacije ako se koristi metoda samokalibracije.

Procesom kalibracije kamere određuju se kalibrirane konstante kamere, položaja kalibrirane glavne točke, te parametri distorzije objektiva (tangencijalna i radijalna komponenta).

Tijekom kalibracije određuje se i položaj glavne točke autokolimacijom objektiva, te je na taj način određeno ishodište slikovnoga koordinatnog sustava (*engl. Principal Point of Autocolimation, PPA*).

Samokalibracija kamere (*engl. Self calibration*)

Samokalibracija je postupak kalibracije kod kojeg su istodobno snimani i objekt i zadane točke. Matematičkim modelom podrazumijeva se uvjet kolinearnosti modificiran dodatnim parametrima koji sadržavaju izraze za radijalnu i decentrirajuću ili asimetričnu distorziju. Također uključuje izjednačenje metodom zrakovnog snopa sa dodatnim parametrima, te se može smatrati općenitijim slučajem. Za kalibraciju na radnom zadatku može se reći da je poseban oblik samokalibracije koja se odvija u okviru samog zadatka.

3. Kalibracija

Za metodu određivanja parametara unutarnje orijentacije digitalne kamere Fuji FinePix S2 Pro odabrana je kalibracija metodom izjednačenja zrakovnih snopova (*engl. Bundle Block Adjustment*) bloka terestričkih snimaka sa samokalibracijom. Rezultat izjednačenja metodom najmanjih kvadrata su koordinate točaka, zadanih i izračunatih, elementi vanjske orijentacije, te ukoliko koristimo opciju samokalibracije elementi unutarnje orijentacije; koordinate projekcijskog središta u slikovnom koordinatnom sustavu i dodatni parametri koji opisuju distorziju korištenog objektiva.

Odabrane su četiri skupine od po četiri, pet i devet snimki (tablica 3). Sve su snimke snimane maksimalnom rezolucijom u RAW-formatu te konvertirane u *tiff*-zapis rezolucije 4256 x 2848 piksela. Fizička veličina jednog piksela iznosi $5,4 \mu\text{m}$ x $5,4 \mu\text{m}$. Snimanje je obavljeno u različitim vremenskim intervalima. Iz svake skupine odabrane su snimke koje maksimalno pokrivaju područje obuhvaćeno točkama, te se vodilo računa da snimke budu snimane iz što različitijih pozicija prema objektu snimanja, kako bi se dobio što povoljniji presjek za određivanje koordinata točaka.

3.1 Geodetska mjerenja

Za potrebe kalibracije u dvorištu Geodetskog fakulteta izrađena je baza za kalibraciju s 56 točaka, rasporeda kao na slici 9. Koordinate točaka određene su u lokalnom zemljišnom koordinatnom sustavu. Geodetska mjerenja izvedena su upo-

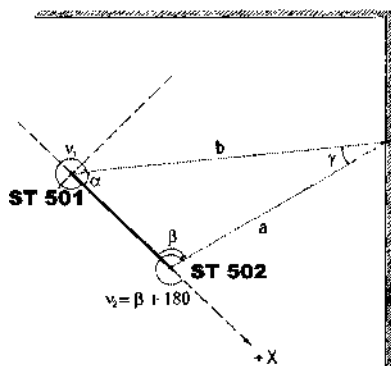


Slika 7. Raspored točaka u dvorištu Geodetskog fakulteta za kalibraciju kamere.

rabom teodolita Leica TC 1600. Točnost tog instrumenta iznosi, uz pretpostavku da je dobro rektificiran, za horizontalne i vertikalne kutove $\pm 1,5''$ (URL 3).

Točke su opažane s dva stajališta u dva girusa (slika 8). Udaljenost stajališta određena je uporabom laserskog daljinomjera WILD DI 3000, točnost kojega iznosi $1 \text{ mm/km} \pm 1 \text{ ppm}$ (Wild AG).

Mjereni pravci izjednačeni su metodom izravnih mjerenja kako bi se dobile njihove najvjerojatnije vrijednosti i njihove točnosti potrebne za određivanje koordinata opažanih točaka, a koordinate se računaju presjekom vanjskih vizura, dok se visine računaju trigonometrijski iz mjerenih vertikalnih kutova i početnih visina stajališta.



Slika 8. Položajna skica geodetskih mjerenja.

3.2 Određivanje parametara unutarnje orijentacije

Određivanje parametara unutarnje orijentacije (u daljnjem tekstu PUO) izvedeno je u nekoliko faza. U prvoj fazi trebalo je pokazati i dokazati da teorijske vrijednosti koordinata projekcijskog središta (tablica 3) nisu prihvatljive za fotogrametrijsku izmjeru. U drugoj fazi iterativnim su postupkom određene koordinate iste. U završnoj fazi, uz poznate koordinate projekcijskog središta, određeni su i parametri distorzije objektiva s normalizacijskim radijusom od 1000 piksela. Svaka faza analize rađena je u dva koraka: analiza pojedinačnih snimaka te analiza grupe snimaka prema tablici 2. U svakoj od faza rađeno je više od 1000 pojedinačnih mjerenja kako bi se dobile slikovne koordinate orijentacijskih točaka.

Za potrebe izjednačenja mjerenja, te za određivanje PUO korišten je programski paket ORPHEUS/ORIENT razvijen u Institutu za fotogrametriju i daljinska istraživanja Sveučilišta u Beču. ORIENT je specijalizirani alat za hibridna fotogrametrijska izjednačenja. ORPHEUS je grafičko korisničko sučelje ORIENT-a, te je ujedno i digitalni komparator više snimaka za simultano interaktivno mjerenje točaka i linija, na zračnim i terestričkim snimkama. ORPHEUS je posebno razvijan za potrebe aerotriangulacije, izradbe digitalnog ortofota, terestričke fototriangulacije sa samokalibracijom, te generiranje 3D teksturiranih modela objekata (Rottensteiner i dr. 2002).

Tablica 2. *Opći podaci o snimkama korištenim za kalibraciju digitalne kamere Fuji FinePix S2.*

Broj grupe	Broj snimke	Datum snimanja	Broj orijentacijskih točaka na snimci
I	01	30. 09. 2004.	39
	03		32
	05		29
	08		36
	09		26
II	201	22. 09. 2004.	45
	203		46
	204		33
	208		43
	209		29
III	301	21. 09. 2004.	28
	303		44
	305		29
	306		28
IV	401	2. 10. 2004.	18
	402		24
	403		21
	404		41
	405		40
	406		27
	407		23
	408		14
	409		14

3.2.1 Matematički model izjednačenja korišten u ORIENTU

ORIENT dopušta mogućnost simultanoga hibridnog izjednačenja metodom najmanjih kvadrata za različita opažanja, poput slikovnih koordinata, geodetskih mjerenja, orijentacijskih točaka, modelnih koordinata. Sadrži dvije tehnike za detekciju grubih pogrešaka: *engl. Robust estimation* i *engl. Data snooping*. ORIENT tretira opažanja kao koordinate točaka u 3D prostoru. Kartezijev koordinatni sustav opažanja dodijeljen je svakomu od tih prostora.

Između toga koordinatnog sustava i koordinatnog sustava objekta postoji veza definirana funkcijom koja povezuje opažanu točku $p = (u, v, w)^T$ s odgovarajućom točkom $P = (X, Y, Z)^T$:

$$p - p_0(adp) = \lambda R^T(\Theta) (P - P_0), \quad (9)$$

$p_0 = (u_0, v_0, w_0)^T$ predstavlja koordinate projekcijskog središta u koordinatnom sustavu snimke. Adp se odnosi na dodatne parametre. R je rotacijska matrica ovisna o rotacijskim kutovima Θ . λ je mjerilo između dvaju koordinatna sustava. $P_0 = (X_0, Y_0, Z_0)$ predstavlja koordinate snimališta u referentnom koordinatnom sustavu.

3.2.2 Određivanje koordinata nepoznatih točaka sa teoretskim vrijednostima parametara unutarnje orijentacije

Kod tog oblika izjednačenja u postupak se ušlo s približnim PUO koji su bili izraženi u broju piksela, te su iznosili $2.128,000$ i $-1.424,000$ za glavnu točku, a za žarišnu duljinu 3791 . Te su vrijednosti tretirane kao nepromjenjive. Uporabom tih parametara napravljeno je izjednačenje u svrhu određivanja koordinata 30 točaka polja koje su uzete kao nepoznate. Vanjska orijentacija napravljena je na osnovi 12 ravnomjerno raspoređenih točaka. Nakon izjednačenja izvedena je analiza odstupanja od koordinata dobivenih geodetskim mjerenjima. Vrijednosti prosječnih odstupanja na nepoznatim točkama nalaze se u tablici 3.

Tablica 3. *Prosječna odstupanja na nepoznatim točkama korištenjem teorijskih vrijednosti parametara unutarnje orijentacije.*

Oznake snimki	Broj zadanih točaka	Broj nepoznatih točaka	Prosječno odstupanje na nepoznatim točkama (mm)			Prostorni vektor odstupanja (mm)
			X	Y	Z	
201, 203, 208	12	30	54,1	37,1	48,8	87,1

Snimanje je obavljeno u približnom mjerilu 1 : 600, što znači da bi izlazni produkt mogao biti izrađen do mjerila 1:150. Dozvoljena položajna odstupanja na dobro definiranim detaljima (grafička) takvog produkta trebala bi biti od 0,1 do 0,2 mm u mjerilu prikaza, te iznose od 15 do 30 mm. Iz tablice 3 vidljivo je da su odstupanja na točkama čije su se koordinate određivale nekalibriranom digitalnom kamerom dvostruko veća. Ovim se dokazalo da za fotogrametrijske namjene PUO moraju biti određeni kalibracijom, a nikako se ne smiju koristiti izračunane vrijednosti na osnovi teorijskih pretpostavki.

3.2.3 Određivanje parametara unutarnje orijentacije kao promjenjivih vrijednosti

U toj su fazi početne vrijednosti PUO također bile teorijske vrijednosti, ali su prilikom izjednačenja tretirane kao promjenjive vrijednosti. Određivanju parametara pristupilo se na dva različita načina. Određivani su PUO iz svake snimke pojedinačno, a zatim su određeni parametri iz nekoliko skupina snimki.

Kod određivanja koordinata projekcijskog središta iz pojedinačnih snimaka raspršenost rezultata vidljiva je u tablici 4. Veličina prosječnog odstupanja od srednje vrijednosti dobivena tim načinom neprihvatljiva je za fotogrametrijske namjene.

Tablica 4. *Prikaz odstupanja parametara unutarnje orijentacije izračunanih za svaku snimku pojedinačno.*

Broj korištenih snimki	Broj točaka za kalibraciju	Vrijednosti i prosječno odstupanje PUO (pikseli)			Prostorni vektor odstupanja (pikseli)
		X	Y	Z	
23	56	2.067,821	-1.410,816	3.932,447	± 212,37
		± 108,48	± 67,70	± 169,90	

U sljedećoj fazi određivanja parametara izjednačeno je nekoliko različitih skupina snimki. Uz postojeće skupine vidljive u tablici 2 formirane su još tri skupine snimki iz već postojećih skupina. Rezultati dobiveni na taj način pokazuju manju raspršenost u odnosu na prethodnu metodu. Iako je raspršenost rezultata i dalje velika (tablica 5) (s fotogrametrijskog stajališta), može se zaključiti da se takvim izjednačenjem dobivaju prihvatljiviji rezultati PUO jer se uporabom više snimaka za svaku traženu točku dobiva više presjeka pravaca, što u konačnici rezultira pouzdanijim rezultatom.

Tablica 5. *Prikaz odstupanja parametara unutarnje orijentacije izračunanih za skupinu snimki.*

Broj korištenih skupina snimki	Broj točaka za kalibraciju	Vrijednosti i prosječno odstupanje PUO (pikseli)			Prostorni vektor odstupanja (pikseli)
		X	Y	Z	
7	56	2.112,347	-1.431,809	3.843,568	± 72,54
		± 38,62	± 35,43	± 50,15	

3.2.4 Određivanje parametara unutarnje orijentacije kao promjenjivih vrijednosti uz određivanja dodatnih parametara

Rezultat prethodne analize upućuje na to da je za postizanje visokih zahtjeva točnosti korištenju kamere u fotogrametrijske svrhe potrebno znati podatke o distorziji objektiva (Kraus 1997).

Kod amaterskih kamera utjecaj distorzije ponajbolje se može predstaviti dodatnim parametrima. Distorzija leća objektiva primarno je radijalnog tipa (Kraus 1997).

Uz određivanje PUO određivani su i dodatni parametri. Odabran je set parametara prikazanih u tablici 8 koji se definira kao standardni set parametara pri Tehničkom sveučilištu u Beču (TU standard). U njemu su sadržani parametri koji opisuju ponašanje distorzije u radijalnom i tangencijalnom smislu, te deformacije senzora u smjeru osi x i osi y (Kager i dr. 2002).

Rezultati kod pojedinačnog izjednačenja snimki pokazali su odstupanja prikazana u tablici 6.

Tablica 6. *Prikaz odstupanja parametara unutarnje orijentacije izračunanih za pojedinačne snimke uz računanje dodatnih parametara.*

Broj korištenih snimki	Broj točaka za kalibraciju	Vrijednosti i prosječno odstupanje PUO (pikseli)			Prostorni vektor odstupanja (pikseli)
		X	Y	Z	
22	56	2.140,3261	-1.447,3919	3.812,1257	± 103,85
		± 35,03	± 42,12	± 88,22	

Završni račun izjednačenja blokom terestričkih snimki napravljen je u skupinama snimki. Rezultati tako dobivenog izjednačenja bloka terestričkih snimki sa njihovim odstupanjima prikazani su u tablici 7.

Tablica 7. *Prikaz odstupanja parametara unutarnje orijentacije izračunanih za skupinu snimaka uz računanje dodatnih parametara.*

Broj korištenih snimki	Broj točaka za kalibraciju	Vrijednosti i prosječno odstupanje PUO (pikseli)			Prostorni vektor odstupanja (pikseli)
		X	Y	Z	
6	56	2.136,659	-1.450,597	3.790,275	± 6,88
		± 3,53	± 2,65	± 5,28	

Takva odstupanja uz izračunane dodatne parametre prikazane u tablici 8 predstavljaju parametre unutarnje orijentacije amaterske digitalne kamere prihvatljive za mjernu uporabu. Vidljivo je da najznačajniji udio ima radijalna distorzija, dok je utjecaj parametara 6 i 37 zanemariv.

Tablica 8. *Opis dodatnih parametara za opisivanje distorzije objektiva.*

1	Torlegard, Bauer/Mueller, Brown afinost – nagnutost osi	0,3375
2	Torlegard, Bauer/Mueller, Brown afinost – mjerilo osi y	0,0732
3	Torlegard, optička radijalna distorzija opisana polinomom 3. stupnja	-6,9062
4	Torlegard, optička radijalna distorzija opisana polinomom 5. stupnja	0,4417
5	Torlegard, optička tangencijalna (asimetrična) distorzija	0,0122
6	Torlegard, optička tangencijalna (asimetrična) distorzija	0,0009
37	Torlegard, optička radijalna distorzija opisana polinomom 7. stupnja	-0,0052

S tako izračunanim PUO, te dodatnim parametrima za opisivanje distorzije objektiva pristupilo se ponovno izjednačenju snimaka 201, 203 i 208 u svrhu određivanja koordinata nepoznatih točaka.

Tablica 9. *Izračunana odstupanja na nepoznatim točkama korištenjem izračunatih parametara unutarnje orijentacije.*

Oznake snimki	Broj orijentacijskih točaka	Broj nepoznatih točaka	Prosječno odstupanje na nepoznatim točkama (mm)			Prostorni vektor odstupanja (mm)
			X	Y	Z	
201, 203, 208	12	30	± 4,0	± 2,0	± 3,9	± 6,0

Usporedimo li tablice 9 i 4 vidimo da su se prosječna odstupanja drastično smanjila u korist tablice 9, što nameće zaključak da uporaba digitalne amaterske kamere u fotogrametriji može biti itekako moguća uz odgovarajući postupak kalibracije ne samo za kamere nego i za korištene objektivne.

Finalni rezultat kalibracije kamere prikazan je koordinatama projekcijskog središta s vrijednostima:

$$X = 11.537,958 \mu\text{m} \pm 19,06 \mu\text{m}$$

$$Y = 7.833,224 \mu\text{m} \pm 14,31 \mu\text{m}$$

$$Z = 20.467,485 \mu\text{m} \pm 28,51 \mu\text{m}$$

Za objektiv SIGMA DG RF 20 mm parametri distorzije nalaze se u tablici 9.

4. Zaključak

Digitalna tehnologija omogućila je da visoko specijalizirana struka poput fotogrametrije postane dostupna većem broju korisnika.

Pojava digitalnih kamera visokih rezolucija otvorila je mogućnost da se i amaterske kamere mogu naći na popisu opreme osoba koje se bave fotogrametrijom. Te bi kamere služile ne samo za unaprjeđenje i poboljšanje vizualnog dojma klasičnih fotogrametrijskih produkata kao izvor tekstura, nego i kao izvor osnovnih informacija potrebnih za dobivanje mjernih podataka visoke točnosti.

Kvalitetan odabir digitalne kamere te poznavanje osnovnih karakteristika senzora ugrađenih u nju, njihovih prednosti i mana, s kvalitetnom kalibracijom pretvaraju digitalnu amatersku kameru u moćan alat za pripremu, izvedbu i prezentaciju različitih projekata u terestričkoj fotogrametriji.

Na osnovu prije iznesenih činjenica i spoznaja o građi, principima rada, izvedbama digitalnih kamera kao i izvedene kalibracije digitalne kamere FUJI FinePix S2 Pro, možemo zaključiti:

- Kalibracija je najvažniji preduvjet za korištenje digitalne kamere u mjerne svrhe.
- Kameru je potrebno kalibrirati sa što većim brojem točaka. Metoda kalibracije izjednačenjem bloka terestričkih snimaka pokazala se potpuno zadovoljavajućom. Prilikom kalibracije treba voditi računa o dvije činjenice: kameru čini tijelo kamere i objektiv kamere. Te su komponente u neraskidivoj vezi. Same koordinate projekcijskog središta nisu dovoljne da bi se dobilo zadovoljavajući rezultat. Obavezno treba izračunati i parametre koji opisuju distorziju objektiva, te ih koristiti prilikom izjednačenja.
- Konstantnost dodatnih parametara zbog nestabilne građe senzora vrlo je upitna (Kraus 1997) te je zbog tog razloga takvu kameru potrebno češće kalibrirati. Za postizavanje najboljih rezultata preporuka je raditi kalibraciju pri samom zadatku, sa korištenjem početnih parametara unutarnje orijentacije dobivenih kalibracijom na test polju.

Kako bi se dobio kompletan uvid u mogućnosti i potencijale digitalne kamere, trebalo bi izvršiti kalibraciju kamere u radiometrijskom smislu, čime bi se potpuno potvrdila prednosti digitalnih tehnologija s obzirom na analogne tehnike snimanja.

Literatura

- Braum, F. (1969): Elementarna fotogrametrija, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Bayer, B. E. (1976): Color imaging array, United States Patent 3,971,065.
- Ciceli, T. (2003): Primjena digitalne kamere u terestričkoj fotogrametriji, Magistarski rad, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Donassy, V. (1973): Fotogrametrija II, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Fiedler, T. (2003): Studija o aerotriangulaciji i izjednačenju bloka aero-snimaka, Državna geodetska uprava, Zagreb.
- FujiFilm (2002): Fujifilm's 3rd Generation Super CCD System: Raising FinePix Digital Cameras to A New Level, Fuji Foto film Co. Ltd, Japan.
- Kager, H., Rottensteiner, F., Kerschner, M., Stadler, P. (2002): ORPHEUS 3.2.1 User Manual, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna University of Technology, Beč, Austrija.
- Karara, H.M. (1989): Non-Topografic Photogrammetry, Second Edition, American Society For Photogrammetry And Remote Sensing, Virginija, SAD.
- Kraus, K. (1993): Photogrammetry, Volume 1, Fundamentals and Standard Processes, Dümmlers Verlage, Bonn, Njemačka.
- Kraus, K. (1997): Photogrammetry, Volume 2, Advanced Methods and Applications, Dümmlers Verlage, Bonn, Njemačka.
- Moffitt, F. H., Mikhail, E. M. (1980): Photogrammetry, Third Edition, Harper & Row, New York, SAD.

Rottensteiner, F., Grussenmeyer, P., Geneva, M. (2002): Experiences with the Digital Photogrammetric Program Package ORPHEUS Based on CIPA's "Zurich City Hall" Dataset for Architectural Photogrammetry, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV-5/C7, pp. 639–646.

URL 1: Askey, A. (2002): Fujifilm FinePix S2 Pro review,
<http://www.dpreview.com/reviews/fujis2pro/>.

URL 2: SIGMA LENS CHART,
<http://www.sigma-photo.com/html/lenschart.htm>.

URL 3: Tehničke karakteristike instrumenta Leica TC 1600,
http://www.rost.co.at/rost/daten/pdf/prospekte/rovi/Prospekt_TC1600.pdf.

Calibration of digital camera FUJI FinePix S2 Pro

ABSTRACT. Calibration of digital camera FUJI FinePix S2 Pro in combination with SIGMA DG RF 20 mm lens is described. Appearance of new and better models of amateur digital cameras enforces its usage in metric purposes. For calibration needs test field with 56 points was build. Method of bundle block adjustment of terrestrial photos was applied. After calibration analyses of residuals were made with deviation on known points. Results were processed for single images and for groups of images.

Key words: amateur digital camera, photogrammetry, calibration, distortion.

Prihvaćeno: 2007-02-23