

UDK 528.711.11:528.089.6:771.31  
Pregledni znanstveni članak

# Ispitivanje utjecaja distorzije objektiva nemjernih digitalnih kamera na točnost fotogrametrijske izmjere

Dubravko GAJSKI, Mateo GAŠPAROVIĆ – Zagreb<sup>1</sup>

*SAŽETAK.* U radu se ispituje utjecaj radijalne i tangencijalne distorzije objektiva nemjernih digitalnih kamera na točnost fotogrametrijske izmjere, i to prije svega metodom računanja fototriangulacije sa samokalibracijom. Kao testno polje za određivanje distorzije upotrebljava se 2D-predložak s oznakama mjerenima metodom slikovnih korelacija. Prikazani su rezultati koji upućuju na presudan utjecaj radijalne i tangencijalne distorzije na rezultate fotogrametrijske izmjere, ali i samokalibracije. Stoga se predlaže neovisno prethodno određivanje utjecaja distorzije i njezina eliminacija prije samokalibracije. Rezultati su potvrđeni neovisnim izjednačenjem fototriangulacije s novouvedenim parametrima.

*Ključne riječi:* distorzija objektiva, nemjerne kamere, fototriangulacija, samokalibracija, fotogrametrija.

## 1. Uvod

Suvremene digitalne nemjerne kamere danas su postale najrašireniji senzor, dostupan svima i u svakoj prilici. Osim dostupnosti, taj senzor omogućuje i prikupljanje iznimno velike količine podataka u vrlo kratkom vremenu. Prikupljanje podataka podrazumijeva diskretiziranu i digitaliziranu prostornu razdiobu intenziteta vidljivog dijela elektromagnetskog zračenja u tri osnovna frekventijska pojasa, koja naš osjet vida doživljava kao primarne boje aditivne sinteze (crvena, zelena i plava). Pritom se te informacije bilježe u vrlo kratkom vremenu ekspozicije (dijelovi sekunde), centralnom projekcijom u ravninu senzora. Stoga je jasno da digitalna kamera posjeduje izniman mjerni potencijal, kako u radiometrijskom tako i u prostornom smislu. Ključna je prednost digitalnih kamera u odnosu na klasične kamere, koje snimaju na film, u tome da sve digitalne kamere imaju senzor u obliku pravokutne matrice s pojedinim fotodetektorima

<sup>1</sup> doc. dr. sc. Dubravko Gajski, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Croatia, e-mail: dgajski@geof.hr,

Mateo Gašparović, dipl. ing. geod., Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Croatia, e-mail: mgasparovic@geof.hr.

raspoređenim u redove i kolone, te je time i eksplicitno utvrđen pravokutni slikovni koordinatni sustav (Luhmann i dr. 2013). To omogućava izmjeru slikovnih koordinata i na temelju toga fotogrametrijsku izmjeru. Stoga su se već rano, odmah nakon pronalaska i prihvaćanja nove tehnologije počele upotrebljavati digitalne nemjerne kamere i u mjerne svrhe, prije svega u blizupredmetnoj fotogrametriji.

Istraživanjima vezanima za kalibraciju mjernih i nemjernih kamera bavili su se mnogi autori (Karras i Mavrommati 2002, El-Melegy i Farag 2003, Remondino i Fraser 2006, Pérez i dr. 2011, Stamatopoulos 2011, Fraser 2013, Hamid i Ahmad 2014). U ovom istraživanju ispitivat će se utjecaj distorzije objektiva na točnost dobivenih podataka fotogrametrijskom izmjerom.

## 2. Prostorna kalibracija

Matematički model centralne projekcije, koja opisuje idealno centralno preslikavanje sadržaja iz prostora predmeta u ravninu snimke, opisuju jednadžbe kolinearnosti (Kraus 2006):

$$x = x_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (1)$$

$$y = y_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)},$$

gdje su:

- $x, y$  – slikovne koordinate točke  $T$
- $x_0, y_0$  – slikovne koordinate glavne točke snimke
- $c$  – konstanta kamere
- $r_{ij}$  – elementi prostorne rotacijske matrice
- $X, Y, Z$  – koordinate točke  $T$  u Kartezijevu koordinatnom sustavu
- $X_0, Y_0, Z_0$  – koordinate snimališta u Kartezijevu koordinatnom sustavu.

Stvarno preslikavanje odstupa od navedenog idealnog slučaja zbog nesavršenosti u izradi objektiva, a pogreška u preslikavanju koja pritom nastaje naziva se distorzija objektiva. Distorzija objektiva je pogreška u preslikavanju, koja ne utječe na oštrinu snimke već samo na geometrijska izobličenja snimke u odnosu na idealno centralno preslikavanje (McGlone 2013).

Ukupne korekcije za eliminaciju utjecaja distorzije po obje osi slikovnog koordinatnog sustava dobiju se zbrajanjem pojedinih članova [izraz (2)]. Ti članovi opisuju parcijalne sustavne utjecaje, kojih je geometrijsko značenje dano u tablici 1. Utjecaj svakog člana na ukupnu korekciju određen je koeficijentom  $a_i$ , koji se određuje postupkom prostorne kalibracije (Kager i dr. 2002):

$$dX = \sum_{i \in I} [a_i \cdot dX_i(x, y)] \quad (2)$$

$$dY = \sum_{i \in I} [a_i \cdot dY_i(x, y)].$$

Korigirane slikovne koordinate  $(X, Y)$  za svaku mjerenu točku na snimci  $(X', Y')$  računamo po sljedećim izrazima (Kager i dr. 2002):

$$\begin{aligned} X &= X' + dX(x, y) \\ Y &= Y' + dY(x, y), \end{aligned} \quad (3)$$

u kojima su  $x$  i  $y$  normalizirane koordinate (Kager i dr. 2002):

$$\begin{aligned} x &= (X' - X_0) / \rho_0 \\ y &= (Y' - Y_0) / \rho_0 \\ r^2 &= x^2 + y^2, \end{aligned} \quad (4)$$

gdje su:

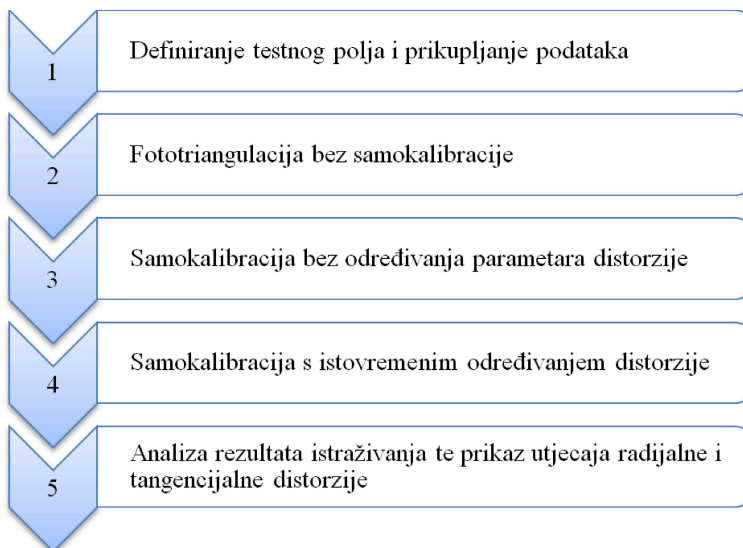
$X_0, Y_0$  – slikovne koordinate glavne točke snimke  
 $\rho_0$  – radijus nulte distorzije.

Za modeliranje sustavnog utjecaja distorzije odabrali smo članove prema preporuci Instituta za fotogrametriju i daljinska istraživanja Tehničkog sveučilišta u Beču. Matematički model i geometrijska interpretacija svakog od navedenih članova dani su u tablici 1.

Tablica 1. *Distorzijski članovi prema TS-standardu (Kager i dr. 2002).*

$i \in \hat{l}$	$dX_i(x, y)$	$dY_i(x, y)$	<b>Geometrijsko značenje</b>
1	0	$x$	neokomitost osi
2	0	$y$	mjerilo osi
3	$x \cdot (r^2 - 1)$	$y \cdot (r^2 - 1)$	radijalna distorzija, polinom 3. stupnja
4	$x \cdot (r^4 - 1)$	$y \cdot (r^4 - 1)$	radijalna distorzija, polinom 5. stupnja
5	$r^2 + 2 \cdot x^2$	$\cdot x \cdot y$	tangencijalna (asimetrična) distorzija
6	$2 \cdot x \cdot y$	$r^2 + 2 \cdot y^2$	tangencijalna (asimetrična) distorzija
37	$x \cdot (r^6 - 1)$	$y \cdot (r^6 - 1)$	radijalna distorzija, polinom 7. stupnja

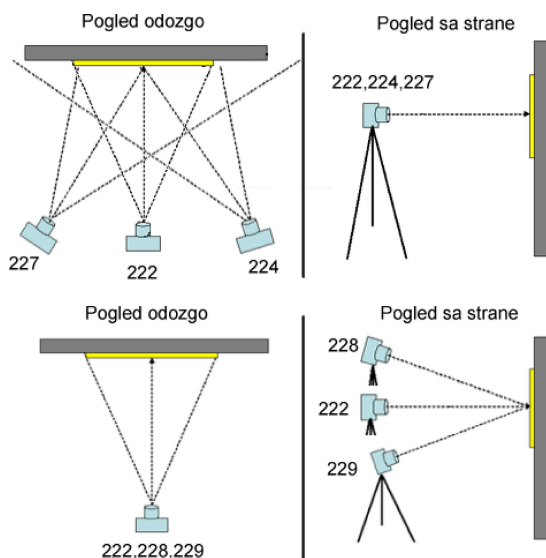
U nastavku će se prikazati utjecaj parametara distorzije na rezultate fototriangulacije na 2D testnom polju, zatim rezultati fototriangulacije sa samokalibracijom te naposljetku rezultati fototriangulacije s eliminiranim parametrima distorzije. Fototriangulacija je izračunata po metodi izjednačenja zrakovnog snopa – korištenjem softvera ORPHEUS 3.2.1, razvijenog na Tehničkom sveučilištu u Beču. Svi procesi ispitivanja utjecaja distorzije objektiva nemjernih digitalnih kamera na točnost fotogrametrijske izmjere prikazani su na slici 1.



Slika 1. Koraci provedenih istraživanja.

### 3. Opis testnog polja

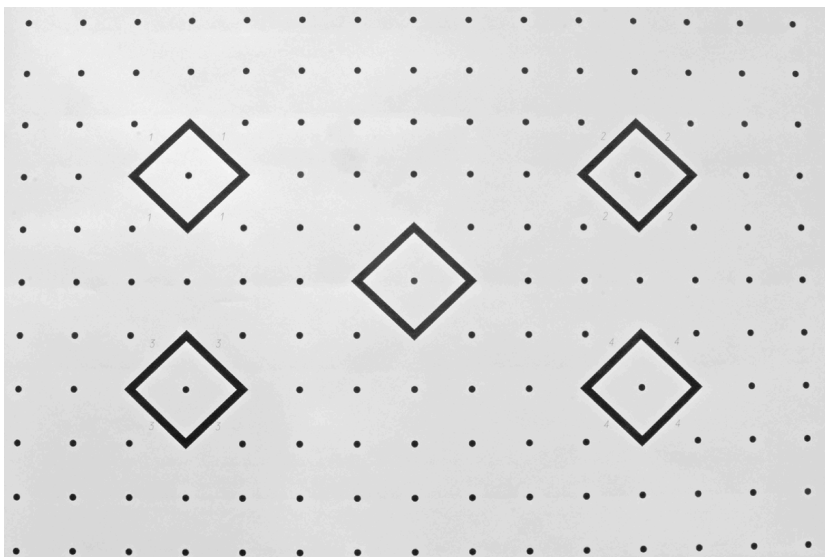
Distorzija objektiva SIGMA DG-RF20/1.8 (No. 2004569) na tijelu digitalne kamere NIKON D90 (No. 6138236) određena je snimanjem 2D testnog polja (slika 3) te



Slika 2. Pozicije snimališta u odnosu na testno polje (URL 1).

opažanjem slikovnih koordinata centara crnih kružnih signala, pravilno raspoređenih diljem čitavog formata snimke. Slikovne koordinate opažane su potpuno automatizirano, metodama automatske slikovne korelacije.

Testno polje fotografirano je iz 5 različitih dispozicija snimanja (slika 2). Te snimke, odnosno slikovne koordinate markica, osnova su za ispitivanja prikazana u ovom radu.



Slika 3. Snimka testnog polja (pozicija snimališta 222).

#### 4. Određivanje utjecaja distorzije na rezultate mjerenja

Početne elemente unutarnje orijentacije kamere izračunali smo pomoću sljedećih formula:

$$\begin{aligned}
 x_0 &= \frac{\check{s}_{px}}{2} = 2144 \text{ px} \\
 y_0 &= \frac{v_{px}}{2} = 1424 \text{ px} \\
 c &= \frac{1}{2} \left( \frac{\check{s}_{px}}{\check{s}_{mm}} + \frac{v_{px}}{v_{mm}} \right) \cdot c_{mm} = 3619 \text{ px},
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

gdje su  $\check{s}_{px}$  i  $v_{px}$  širina odnosno visina slikovne matrice (4288 px, 2848 px),  $\check{s}_{mm}$  i  $v_{mm}$  širina i visina senzora (23,6 mm i 15,8 mm),  $x_0$  i  $y_0$  pozicija glavne točke, a  $c_{mm}$  žarišna daljina objektiva (20 mm). Prethodno navedene vrijednosti preuzeli smo iz specifikacija kamere i objektiva.

Fototriangulacija je simultani proces pronalaska parametara prostorne rekonstrukcije zrakovnih snopova proveden po metodi najmanjih kvadrata s ocjenom točnosti (Triggs i dr. 2000). Poznate vrijednosti za izjednačenje su koordinate orijentacijskih točaka predloška ( $X, Y, Z$ ) te parametri kamere ( $x_0, y_0, c$ ) uzeti kao fiksne odnosno nepromjenljive vrijednosti [izraz (1)]. Bitno je naglasiti da u toj prvoj fototriangulaciji članovi distorzije objektiva [izraz (2)] nisu uzeti u obzir i nisu računati u postupku izjednačenja. Mjerene vrijednosti su slikovne koordinate orijentacijskih točaka opažane na svim snimkama. Koordinate orijentacijskih točaka testnog polja uzete su u milimetrima, a parametrizacija kutnih elemenata vanjske orijentacije  $\omega$  (Omega),  $\varphi$  (Phi),  $\kappa$  (Kappa) izražena je u gonima. Početne vrijednosti elemenata vanjske orijentacije snimaka izračunate su presjekom natrag fotogrametrijskog snopa zraka (tablica 2).

Tablica 2. Početni elementi vanjske orijentacije.

SN	$X_0$ [mm]	$Y_0$ [mm]	$Z_0$ [mm]	$\omega_0$ [gon]	$\varphi_0$ [gon]	$\kappa_0$ [gon]
222	375,42	289,48	672,30	-3,10827	-0,69126	0,208415
229	375,05	448,92	717,07	-17,1188	-0,46573	-0,05487
228	407,23	-66,49	682,54	28,13517	1,970009	-0,05534
224	816,14	284,46	713,27	-2,48222	34,63671	-0,36037
227	-143,62	287,13	717,19	-2,58425	-39,9434	1,313922

Nepoznanice u izjednačenju elementi su vanjske orijentacije svake snimke ( $X, Y, Z, \omega, \varphi, \kappa$ ) te izjednačene koordinate svih orijentacijskih točaka ( $X, Y, Z$ ). Referentno standardno odstupanje pri tom izjednačenju iznosi:

$$s_0 = 93,523 \text{ px} . \quad (6)$$

Postupkom fototriangulacije izračunate su izjednačene vrijednosti nepoznanica elemenata vanjske orijentacije svake snimke te standardna odstupanja nepoznanica (tablice 3 i 4).

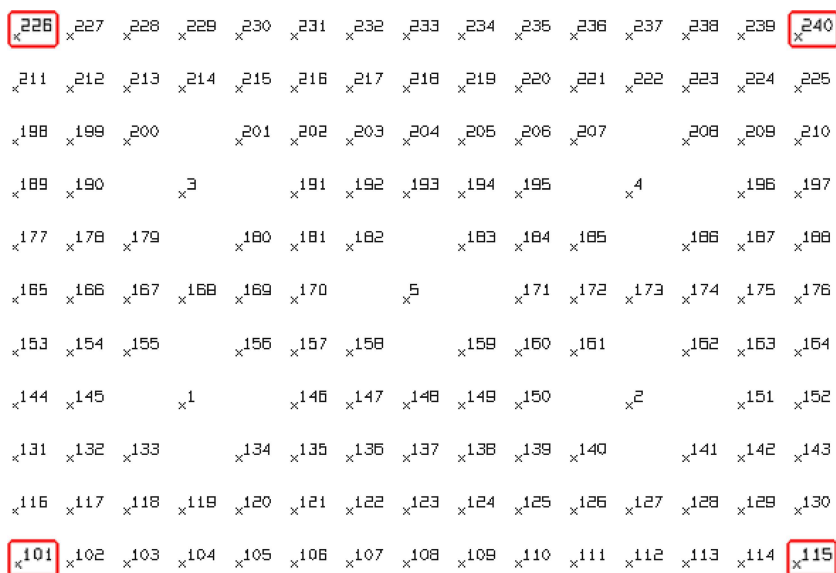
Tablica 3. Kutni elementi vanjske orijentacije snimaka i njihova standardna odstupanja.

SN	$\omega$ [gon]	$s_\omega$ [gon]	$\varphi$ [gon]	$s_\varphi$ [gon]	$\kappa$ [gon]	$s_\kappa$ [gon]
222	-3,04288	0,1549	-0,51595	0,1117	0,22014	0,0855
224	-3,52973	0,1635	33,77686	0,1106	-0,40025	0,0992
227	-2,78172	0,1654	-40,6926	0,1092	1,30528	0,1068
228	29,36884	0,1526	1,54073	0,1062	0,06915	0,0899
229	-17,45922	0,154	-0,39691	0,111	-0,04588	0,0871

Tablica 4. Koordinate projekcijskih središta snimaka i njihova standardna odstupanja.

SN	X [mm]	$s_x$ [mm]	Y [mm]	$s_y$ [mm]	Z [mm]	$s_z$ [mm]
222	377,621	1,2619	288,842	1,6956	673,966	0,9883
224	809,652	1,4474	299,358	1,9296	732,453	1,3165
227	-154,838	1,4655	289,252	1,9055	716,712	1,4118
228	401,44	1,3329	-80,663	1,7411	679,46	1,2775
229	375,964	1,3694	453,436	1,8049	718,605	1,1542

Uz prethodno navedene elemente vanjske orijentacije snimaka izračunate su i izjednačene koordinate orijentacijskih točaka s popratnim standardnim odstupanjima. Zbog velikog broja orijentacijskih točaka (240) za analizu točnosti u ovom radu odabrane su 4 referentne točke na poludijagonalama snimaka na kojima je utjecaj radijalne distorzije maksimalan (slika 4). Koordinate odabranih točaka te standardna odstupanja priloženi su u tablici 5.



Slika 4. Točke maksimalne radijalne distorzije.

Tablica 5. Koordinate odabranih orijentacijskih točaka i standardna odstupanja.

SN	X [mm]	$s_x$ [mm]	Y [mm]	$s_y$ [mm]	Z [mm]	$s_z$ [mm]
101	4,695	0,8370	-0,277	0,9965	-1,111	2,0139
115	754,089	1,1529	2,600	1,2171	-0,037	1,8837
226	3,338	0,9787	507,322	0,8785	1,382	1,5292
240	753,524	0,7310	506,066	0,7621	0,714	1,0315

## 5. Samokalibracija bez određivanja parametara distorzije

Samokalibracija je postupak provođenja fototriangulacije pri kojem se kao nepoznanice u izjednačenje uvode i elementi unutarnje orijentacije: konstanta kamere  $c$  te pozicija glavne točke  $x_0$  i  $y_0$ . Nepoznanice u izjednačenju su i koordinate orijentacijskih točaka te elementi vanjske orijentacije. Procesom samokalibracije u svojim istraživanjima bavili su se autori: Armstrong (1996), Pollefeys (1999) i Azizi (2003).

Za početne vrijednosti unutarnje i vanjske orijentacije uzeti su, kao i pri prvom izjednačenju, izraz (5) i tablica 2. Isto tako, i mjerene su vrijednosti (slikovne koordinate orijentacijskih točaka) uzete kao u prvom izjednačenju. Referentno standardno odstupanje fototriangulacije sa samokalibracijom bez dodatnih elemenata za distorziju objektiva iznosi:

$$s_0 = 38,112 \text{ px} . \quad (7)$$

U nastavku su priložene izjednačene vrijednosti elemenata vanjske orijentacije (tablice 6 i 7) te izjednačene vrijednosti koordinata orijentacijskih točaka s maksimalnom radijalnom distorzijom (tablica 8).

Tablica 6. *Kutni vanjski elementi snimaka i standardno odstupanje.*

SN	$\omega$ [gon]	$s_\omega$ [gon]	$\varphi$ [gon]	$s_\varphi$ [gon]	$\kappa$ [gon]	$s_\kappa$ [gon]
222	-3,37598	0,1425	-0,68313	0,0732	0,20938	0,0349
224	-3,53306	0,1976	34,0558	0,0921	-0,25271	0,1039
227	-3,22633	0,2143	-41,2087	0,0909	1,04588	0,1332
228	29,14585	0,1733	1,3536	0,0811	0,07898	0,037
229	-17,92761	0,1638	-0,52222	0,0786	-0,05564	0,0356

Tablica 7. *Koordinate projekcijskih središta snimališta i standardno odstupanje.*

SN	$X$ [mm]	$s_x$ [mm]	$Y$ [mm]	$s_y$ [mm]	$Z$ [mm]	$s_z$ [mm]
222	376,616	0,5653	291,333	0,7735	697,12	0,5145
224	827,254	0,67	297,628	0,7984	753,857	0,6232
227	-175,036	0,6759	291,953	0,7979	734,918	0,6455
228	400,898	0,5701	-91,258	0,7402	702,246	0,6128
229	375,405	0,5971	463,137	0,7646	742,098	0,5811

Tablica 8. *Koordinate orijentacijskih točaka maksimalne radijalne distorzije.*

SN	$X$ [mm]	$s_x$ [mm]	$Y$ [mm]	$s_y$ [mm]	$Z$ [mm]	$s_z$ [mm]
101	3,008	0,4529	1,068	0,4214	-0,325	0,8120
115	754,736	0,5429	1,685	0,5138	-1,357	0,7716
226	3,402	0,4895	507,295	0,3866	-0,565	0,6270
240	754,322	0,4161	506,815	0,3553	-1,523	0,4244



S obzirom na to da su u ovo izjednačenje kao nepoznanice uključeni elementi unutarnje orijentacije, oni su i izračunati. U nastavku se mogu vidjeti vrijednosti tih parametara te njihova standardna odstupanja:

$$\begin{aligned}x_0 &= 2150,4443 \text{ px} \\s_{x_0} &= 4,5321 \text{ px} \\y_0 &= 1411,368 \text{ px} \\s_{y_0} &= 9,6266 \text{ px} \\c &= 3746,309 \text{ px} \\s_c &= 1,6711 \text{ px} .\end{aligned}\tag{8}$$

## 6. Samokalibracija s istovremenim određivanjem distorzije

U izjednačenju fototriangulacije sa samokalibracijom, uz nepoznanice unutarnje orijentacije ( $x_0$ ,  $y_0$ ,  $c$ ) uvedeni su i elementi distorzije objektiva. Uz radijus nulte distorzije od 700 px dobivamo:

$$\begin{aligned}x_0 &= 2159,52661 \text{ px} & y_0 &= 1424,82031 \text{ px} & c &= 3733,53931 \text{ px} \\a_1 &= 0,0133628 & a_2 &= 0,4342731 & a_3 &= -2,6101663 \\a_4 &= 0,0803644 & a_5 &= 0,0449837 & a_6 &= 0,0031294 \\a_{37} &= -0,0002380 & \rho_0 &= 700 \text{ px} ,\end{aligned}\tag{9}$$

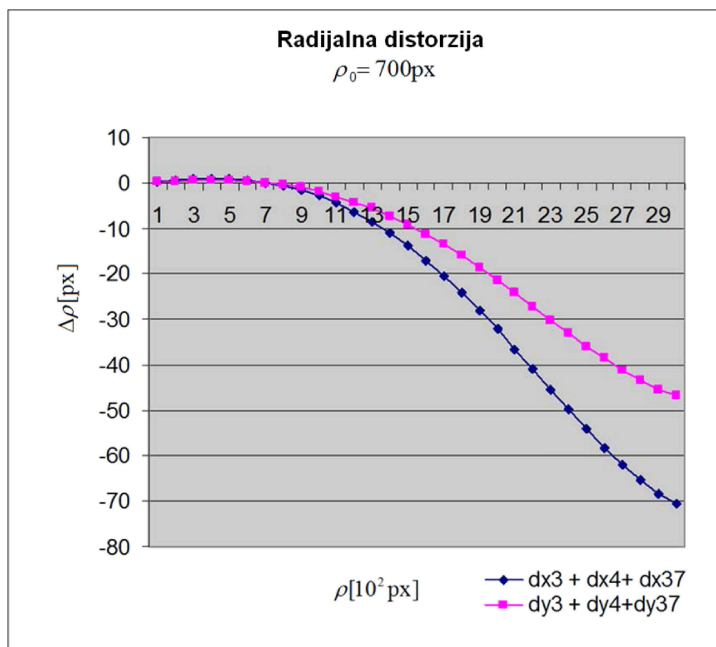
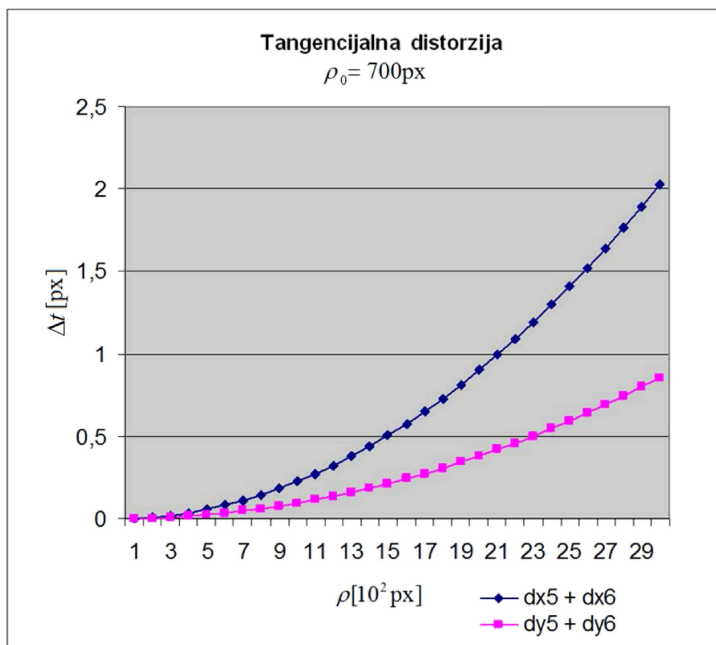
gdje su  $a_1$  do  $a_{37}$  koeficijenti dodatnih parametara unutarnje orijentacije računati po formulama danim i opisanim u drugom poglavlju (tablica 1).

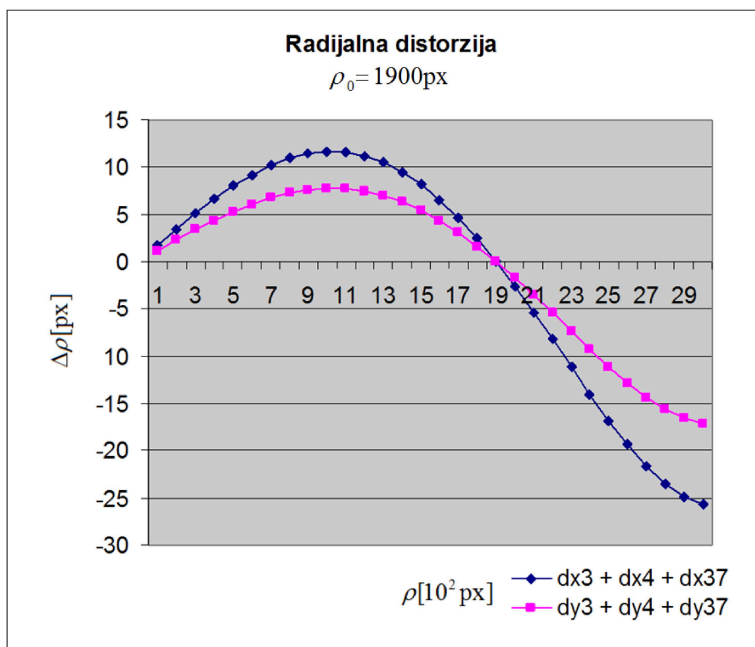
U nastavku su prikazani grafovi radijalne i tangencijalne distorzije za vrijednosti pomaka slikovnih koordinata. Vrijednosti grafa radijalne distorzije zbroj su koeficijenata  $a_3$ ,  $a_4$  i  $a_{37}$  računatih po formulama iz tablice 1 (slika 5). Za graf tangencijalne distorzije uzet je zbroj koeficijenata  $a_5$  i  $a_6$  (slika 6).

Iz grafa radijalne distorzije vidi se da distorzijska krivulja i dalje nije dobro balansirana te da postoji maksimalna vrijednost radijalne distorzije od čak  $-70$  px. Također je iz trenda krivulje zaključeno da je za novo izjednačenje potrebno uzeti radijus nulte distorzije od 1900 px. Nakon provedenoga novog izjednačenja dobivamo nove elemente unutarnje orijentacije (10). S obzirom na to da smo u odnosu na prethodno izjednačenje promijenili samo radijus nulte distorzije, vidi se očita nje promjena konstante kamere što je i teorijski objašnjeno prethodno u tekstu:

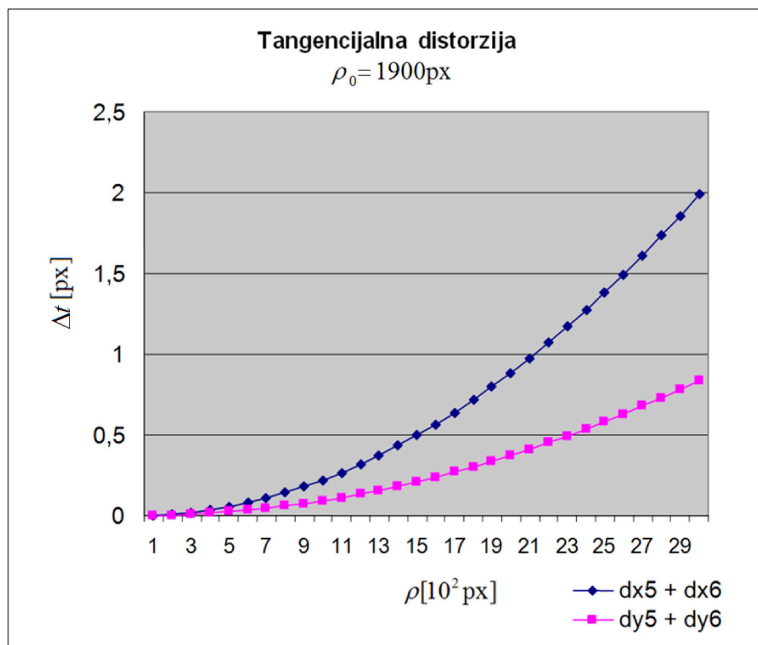
$$\begin{aligned}x_0 &= 2159,49609 \text{ px} & y_0 &= 1424,75977 \text{ px} & c &= 3668,36499 \text{ px} \\a_1 &= 0,0364077 & a_2 &= 1,1711224 & a_3 &= -51,2953606 \\a_4 &= 11,6386404 & a_5 &= 0,3252251 & a_6 &= 0,0227994 \\a_{37} &= -0,2543691 & \rho_0 &= 1900 \text{ px} .\end{aligned}\tag{10}$$

Verifikacija balansiranja distorzije najbolje se vidi iz samih grafova, tako da su u nastavku priloženi novi grafovi radijalne i tangencijalne distorzije, s radijusom nulte distorzije od 1900 px (slika 7 i 8).

Slika 5. Radijalna distorzija ( $\rho_0 = 700\text{ px}$ ).Slika 6. Tangencijalna distorzija ( $\rho_0 = 700\text{ px}$ ).



Slika 7. Radijalna distorzija ( $\rho_0 = 1900 \text{ px}$ ).



Slika 8. Tangencijalna distorzija ( $\rho_0 = 1900 \text{ px}$ ).

Iz novoga grafa radijalne distorzije (slika 7) vidi se da je apsolutna vrijednost minimalne i maksimalne radijalne distorzije podjednaka [izraz (11)], što znači da je balansiranje distorzije dobro provedeno, odnosno da se radijus nulte distorzije od 1900 px može uzeti kao konačan. Temeljem slika 6 i 8 može se uočiti kako tangencijalna distorzija ne ovisi o radijusu nulte distorzije:

$$|\Delta\rho_{\min}| \approx |\Delta\rho_{\max}|. \quad (11)$$

Kako se ovo izjednačenje uzima kao konačno, treba spomenuti da referentno standardno odstupanje iznosi:

$$s_0 = 3,7852 \text{ px}. \quad (12)$$

U nastavku su također priložene izjednačene vrijednosti elemenata vanjske orijentacije (tablica 9 i 10) te izjednačene vrijednosti koordinata orijentacijskih točaka s maksimalnom radijalnom distorzijom (tablica 11).

Tablica 9. *Kutni vanjski elementi snimaka i standardno odstupanje.*

SN	$\omega$ [gon]	$s_\omega$ [gon]	$\varphi$ [gon]	$s_\varphi$ [gon]	$\kappa$ [gon]	$s_\kappa$ [gon]
222	-3,24786	0,0162	-0,87147	0,0155	0,21464	0,0055
224	-3,32515	0,0221	34,0318	0,0166	-0,37268	0,0125
227	-2,88057	0,0241	-41,53662	0,0165	1,23332	0,0155
228	29,46917	0,0193	1,15025	0,0159	0,07689	0,0058
229	-17,89541	0,0181	-0,63421	0,0160	-0,04697	0,0056

Tablica 10. *Koordinate projekcijskih središta snimališta i standardno odstupanje.*

SN	$X$ [mm]	$s_x$ [mm]	$Y$ [mm]	$s_y$ [mm]	$Z$ [mm]	$s_z$ [mm]
222	376,276	0,0570	291,684	0,0809	684,172	0,0672
224	823,139	0,0681	297,654	0,0821	743,587	0,0716
227	-170,832	0,0670	290,762	0,0818	725,259	0,0738
228	400,007	0,0569	-87,019	0,0758	690,801	0,0728
229	376,011	0,0596	461,865	0,0810	729,339	0,0719

Tablica 11. *Koordinate orijentacijskih točaka maksimalne radijalne distorzije.*

SN	$X$ [mm]	$s_x$ [mm]	$Y$ [mm]	$s_y$ [mm]	$Z$ [mm]	$s_z$ [mm]
101	0,251	0,0501	0,166	0,0479	0,499	0,0809
115	757,391	0,0601	-0,054	0,0564	-0,787	0,0765
226	0,086	0,0541	509,166	0,0467	0,025	0,0636
240	757,552	0,0490	509,348	0,0431	-1,748	0,0431

## 7. Zaključak

Provedena istraživanja pokazuju da distorzija ima odlučujući utjecaj na točnost fotogrametrijske izmjere, posebno ako se za fotogrametrijska snimanja koriste kvalitetne profesionalne digitalne kamere i objektivi koji nisu konstruirani u mjerne svrhe. Iako je postupak samokalibracije, bez određivanja parametara distorzije, u ovom slučaju smanjio referentno standardno odstupanje u fototriangulaciji za više od pola (s 93 px na 38 px), ono je i dalje preveliko za standardne primjene nemjernih digitalnih kamera u blizupredmetnim aplikacijama. Tek proširivanjem matematičkog modela centralne projekcije s dodatnim elementima distorzije, znatno se smanjuje referentno standardno odstupanje za deset puta, koje iznosi 3,8 px, te omogućuju primjene kalibriranih digitalnih kamera u mjerne svrhe. U istraživanju je pokazano kako je utjecaj radijalne distorzije na fotogrametrijsku izmjeru znatno veći od utjecaja tangencijalne distorzije. Treba naglasiti kako se pronalaskom odgovarajućeg radijusa nulte distorzije smanjuje apsolutna vrijednost radijalne distorzije, dok se tangencijalna distorzija ovim postupkom znatnije ne mijenja.

Opisani postupci kalibracije digitalnih kamera uz uklanjanje distorzije objektiva omogućuju svestranu primjenu digitalnih kamera u mnogim područjima ljudske djelatnosti gdje je potrebno obaviti kvalitetnu i brzu prostornu izmjeru.

## Literatura

- Armstrong, M. N. (1996): Self-calibration from image sequences, Doctoral dissertation, University of Oxford, Oxford.
- Azizi, N. (2003): Camera Self-Calibration, University of Toronto, Toronto.
- El-Melegy, M. T., Farag, A. A. (2003): Nonmetric lens distortion calibration: Closed-form solutions, robust estimation and model selection, Computer Vision Proceedings: Ninth IEEE International Conference, 554–559.
- Fraser, C. S. (2013): Automatic camera calibration in close range photogrammetry, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 79(4), 381–388.
- Hamid, N. A., Ahmad, A. (2014): Calibration of high resolution digital camera based on different photogrammetric methods, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 18(1), 1–6.
- 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, Vienna.
- Karras, G. E., Mavrommati, D. (2002): Simple calibration techniques for non-metric cameras, International archives of photogrammetry remote sensing and spatial information sciences, 34(5/C7), 39–46.
- Kraus, K. (2006): Fotogrametrija 1. dio, Osnove i standardni procesi, Synopsis, Zagreb.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Boehm, J. (2013): Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging, 2nd edition, De Gruyter, Berlin.
- McGlone, J. C. (2013): Manual of Photogrammetry, 6th edition, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda.

- Pérez, M., Agüera, F., Carvajal, F. (2011): Digital camera calibration using images taken from an unmanned aerial vehicle, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(1), C22.
- Pollefeys, M. (1999): Self-calibration and metric 3D reconstruction from uncalibrated image sequences, Doctoral dissertation, ESAT-PSI, University of Leuven, Leuven.
- Remondino, F., Fraser, C. (2006): Digital camera calibration methods: considerations and comparisons, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5), 266–272.
- Stamatopoulos, C. (2011): Orientation and calibration of long focal length cameras in digital close-range photogrammetry, Doctoral dissertation, Engineering – Geomatics, The University of Melbourne, Melbourne.
- Triggs, B., McLauchlan, P., Hartley, R., Fitzgibbon, A. (2000): Bundle Adjustment – A Modern Synthesis, *Lecture Notes in Computer Science*, 1883, 298–375.

### Mrežne adrese

URL 1: PI-Calib, <http://www.terrageomatics.com/downloads/PI-calib-manual.pdf>, (15. 1. 2015.).

## Examination of the Influence of Lens Distortion of Non-Metric Digital Cameras on the Accuracy of Photogrammetric Survey

*ABSTRACT. This paper examines the influence of radial and tangential lens distortion of non-metric digital cameras on the accuracy of the photogrammetric survey, primarily using the method of photo-triangulation with self-calibration. 2D-template with the marks measured using image correlation is being used as a test field to determine the distortion. The results indicate decisive influence of radial and tangential distortion on the results of photogrammetric measurements and also of self-calibration. Therefore, we propose an independent predetermination of the effects of distortion and its elimination before self-calibration. The results were confirmed by independent equalization of photo-triangulation with newly introduced parameters.*

*Keywords: lens distortions, non-metric cameras, photo-triangulation, self-calibration, photogrammetry.*

*Primljeno: 2015-01-25*

*Prihvaćeno: 2015-02-20*