

# UPORABA NEMETRIČNIH DIGITALNIH FOTOAPARATOV V FOTOGRAMetriJI

USE OF NON-METRICAL DIGITAL CAMERAS IN PHOTOGRAMMETRY

*Dejan Grigillo*

UDK: 681.772.2

## POVZETEK

*Članek opisuje značilnosti delovanja digitalnih fotoaparatorov, ki jih je treba razumeti za uporabo z njimi narejenih podob v fotogrametriji. Nakazuje pomembnost izvajanja kalibracije digitalnega fotoaparata med projektom fotografiranja in podaja primer uporabe podob za izdelavo slikovnih načrtov ravnih objektov s projektivnim prevzorčenjem.*

Klasifikacija prispevka po COBISS-u: 1.04

## ABSTRACT

*The paper reveals the functioning of digital cameras that must be comprehended for use of acquired images in photogrammetry. The importance of the on-the-job digital camera calibration is presented. The projective image rectification for the orthoimage production is introduced as the application example.*

## KLJUČNE BESEDE

*digitalni fotoaparati, svetlobno tipalo, kalibracija fotoaparata*

## KEY WORDS

*digital camera, photo sensor, camera calibration*

## 1 UVOD

Tržišče ponuja celo paleto kakovostnih in cenovno dostopnih digitalnih fotoaparatorov. S fotogrametričnega gledišča so to nemetrični fotoaparati. V nasprotju z izredno dragimi metričnimi digitalnimi fotoaparati, razvitimi posebej za uporabo v fotogrametriji, uporabljajo spremenljivo optiko in imajo nestabilne in pogosto neznane elemente notranje orientacije. Zaradi enostavne izdelave podob, enotno opredeljenega slikovnega koordinatnega sistema, ki ga določa matrika slikovnih elementov (pikslov), in vse večje geometrične ločljivost so kljub temu postali zanimivi za uporabo v tistih nalogah bližnjelikovne fotogrametrije, ki ne zahtevajo najvišje natančnosti meritev. Elemente notranje orientacije in geometrična popačenja podob lahko ugotovimo s kalibracijo digitalnega fotoaparata, ki jo izvedemo med samim projektom terenskega fotografiranja.

## 2 DELOVANJE DIGITALNIH FOTOAPARATOV

Za uporabo digitalnih fotoaparatorov v fotogrametriji je treba razumeti nekatere značilnosti njihovega delovanja, iz katerih izhajajo tako prednosti kot omejitve za njihovo uporabo. V nadaljevanju predstavljene značilnosti vplivajo predvsem na izračun merila fotografiranja in določitev velikosti detajlov, ki jih še lahko zaznamo z digitalnimi fotoaparati.

## 2.1 Svetlobna tipala

Zapis podobe v digitalnem fotoaparatu omogoča svetlobno tipalo, ki zazna količino vpadle svetlobe. Najpogosteje uporabljeno tipalo je polprevodniško integrirano vezje CCD (angl. Charge Coupled Device). Drugi tip tipal je izdelan v tehnologiji CMOS (angl. Complementary Metal-Oxide Semiconductor). Obe vrsti tipal sta izdelani iz silicija in imata v osnovi enake lastnosti glede občutljivosti na vidni in bližnji infrardeči svetlobni spekter. Število zaznanih fotonov pretvarjata v električni naboj. Analogni električni impulzi se posredujejo analogno digitalnemu pretvorniku, ki jih spremeni v ustrezne številčne vrednosti. Barvna tipala so pri obojih izdelana z uporabo filtrov, ki prekrivajo posamezne slikovne elemente.

**Svetlobna tipala CCD** so sestavljena iz številnih posameznih fotosenzorjev. Ti energijo vpadle svetlobe pretvarjajo v električni naboj, ki se prek prenosne mreže in pomičnih registrov vodi na izhodni ojačevalnik. Na ojačevalniku se naboj s posameznih fotosenzorjev spremeni v analogno napetost, ki je sorazmerna s številom proizvedenih fotonov. Digitalni fotoaparati uporabljajo ploskovna tipala CCD, ki imajo v obliki mreže razporejeno večje število fotosenzorjev. Različne izvedbe tipal se ločijo po zgradbi in načinu prenosa. V digitalne fotoaparate so vgrajena medvrstična tipala CCD (»interline« CCD) in polna tipala CCD (»full frame« CCD) (Arnold, 2002; Schlemmer, 1996).

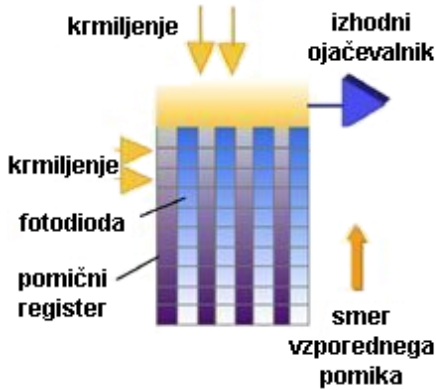
**Medvrstični »interline« CCD.** Skupaj je nameščenih več vrstičnih tipal (sestavljenih iz niza posameznih fotosenzorjev) in pripadajočih pomičnih registrov (slika 1). Čas osvetlitve uravnava elektronska zaklopka, ki potiska količino zajete svetlobe v navpične pomične registre. Izhod navpičnih pomičnih registrov je speljan v vodoravni register in od tam na izhodni ojačevalnik. Na ta način se zajame celotna podoba. Zaradi elektronike, ki obdaja vsak fotosenzor, je aktivne le 30 % površine posameznega piksla. Pred slikovne elemente je zato nameščen sistem mikroleč, ki povečajo učinkovitost zajema na 70 %.

**Polni »full frame« CCD** nima navpičnih pomičnih registrov. Osvetljevanje slikovnih elementov nadzira mehanski zaklop. Po osvetlitvi se celotna podoba prenese v vodoravni register v »surovi« obliki (RAW format). Ker nima pomičnih registrov in fotosenzorjem pripadajoče elektronike, je polni CCD enostavnejši. Aktivna površina znaša 70 % površine piksla in ne potrebuje dodatnih mikroleč. Tovrstno delovanje žal onemogoča uporabo zaslona LCD in s tem pregledovanje podobe pred njenim zapisom v pomnilnik fotoaparata.

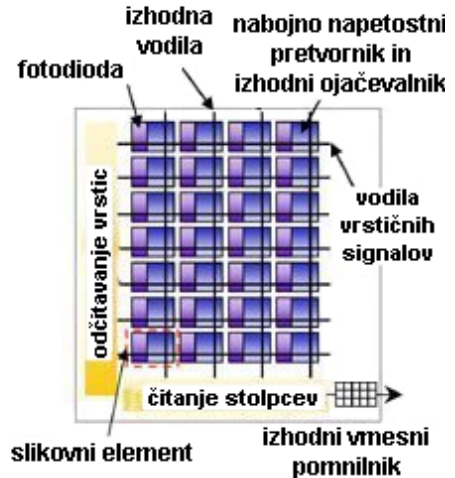
**Svetlobna tipala CMOS.** Zaznavanje svetlobe je pri tipalih CMOS podobno kot pri CCD, od tu naprej pa se tehnologiji močno razlikujeta (Denyer, 1999). Naboj se ne prenaša prek pomičnih registrov, ampak ga neposredno zaznajo ojačevalniki, narejeni iz tranzistorjev CMOS. Primerjavo arhitekture medvrstičnega tipala CCD in tipala CMOS prikazuje slika 1. Tipalo CMOS je prekrto z vodoravno mrežo vodil, ki zagotavljajo krmiljenje in odčitavanje signalov, navpična vodila pa so povezana z elektroniko za dekodiranje in mnogokratno odčitavanje. Takšna arhitektura tipala CMOS omogoča branje signala iz vsakega posameznega slikovnega elementa in enostavno x-y naslavljanje podatkov, česar tehnologija CCD ni sposobna (Kodak, 2001).

Glavna prednost tipal CMOS je združitev vseh funkcij digitalnega fotoaparata v en sam čip,

## Medvrstični CCD prenos



## Tipalo CMOS



Slika 1: Arhitektura medvrstičnega tipala CCD in tipala CMOS.

medtem ko je krmiljenje tipal CCD izvedeno z dodatnimi čipi. Tehnologija tipal CMOS je zato energijsko varčnejša. Fotoaparati, izdelani v tehnologiji CMOS, potrebujejo za delovanje le tretjino energije, ki jo porabijo fotoaparati, opremljeni s tipali CCD.

## 2.2 Ločljivost svetlobnih tipal v digitalnih fotoaparatih

Diagonala tipičnega svetlobnega tipala znaša približno 8 milimetrov s stranicami v razmerju štiri proti tri, v nekaterih modelih tudi tri proti dve. Na tipalu je pri zmogljivejših fotoaparatih razporejeno med tremi in petimi milijoni pikslov. Razvoj ločljivosti posameznih tipal je v zadnjih letih izredno nagel. Canon je tako že izdelal model z enajst milijoni pikslov z največjo ločljivostjo 4064 x 2704 in merami tipala CMOS 35,8 x 23,8 milimetrov. Še večjo ločljivost 4536 x 3024 nudi Kodakov model DCS 14n s 13,9 milijona pikslov in velikostjo CMOS tipala 36 x 24 milimetrov. Med podatki o posameznem fotoaparatu se lahko število pikslov svetlobnega tipala in število pikslov na narejeni podobi razlikujeta, saj za zapis podobe običajno niso izkoriščeni vsi piksli, poleg tega pa je lahko podoba tudi elektronsko povečana. V povezavi z ločljivostjo je treba pojasniti pojma velikost svetlobnega tipala in število učinkovitih pikslov. Ločljivost svetlobnih tipal nekoliko zmanjšuje način zapisovanja barvnih podob.

**Velikost svetlobnega tipala.** Proizvajalci običajno podajajo velikost svetlobnih tipal v palcih v obliki ulomka. Diagonala tipala je na primer podana kot 1/1,8 palca. Zapis izhaja iz 50-ih let prejšnjega stoletja in dejansko pomeni zunanji premer ohišja video cevi, ne pove pa prave velikosti diagonale tipala. Nekatere dejanske velikosti posameznih tipal prikazuje tabela 1 (Askey, 2002). Prvi stolpec v tabeli podaja velikost svetlobnega tipala, ki jo navaja proizvajalec. V drugem stolpcu so podana razmerja med stranicami. Premer katodne cevi v tretjem stolpcu je dejansko le vrednost podatka, pretvorjena v milimetre. Zadnji trije stolpci podajajo prave velikosti svetlobnih tipal. Za primerjavo je v zadnji vrstici tabele opisan posnetek klasičnega 35-milimetrskega fotoaparata.

Podatek	Razmerje	Premer [mm]	Tipalo [mm]		
			Diagonala	Širina	Višina
1/3,6"	4 : 3	7,056	5,000	4,000	3,000
1/3,2"	4 : 3	7,938	5,680	4,536	3,416
1/3"	4 : 3	8,467	6,000	4,800	3,600
1/2,7"	4 : 3	9,407	6,592	5,270	3,960
1/2"	4 : 3	12,700	8,000	6,400	4,800
1/1,8"	4 : 3	14,111	8,933	7,176	5,319
2/3"	4 : 3	16,933	11,000	8,800	6,600
1"	4 : 3	25,400	16,000	12,800	9,600
4/3"	4 : 3	33,867	22,500	18,000	13,500
35 mm	3 : 2		43,267	36,000	24,000

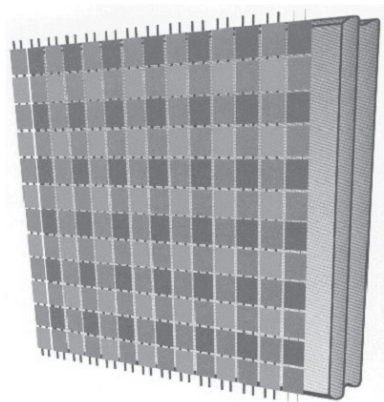
**Tabela 1:** Običajne velikosti svetlobnih tipal.

**Število učinkovitih pikslov.** Število pikslov v svetlobnem tipalu, ki ga proizvajalci podajajo v milijonih pikslov, je običajno višje, kot če ga izračunamo iz podobe najvišje ločljivosti, ki jo lahko zajamemo s posameznim fotoaparatom. Število pikslov v svetlobnem tipalu lahko podamo na štiri načine (Askey, 2001). Primer prikazuje tabela 2.

Skupno število pikslov	2140 x 1560 (3,34 M)
Število svetlobno občutljivih (učinkovitih) pikslov	2088 x 1550 (3,24 M)
Število aktivnih pikslov	2080 x 1542 (3,21 M)
Število pikslov za zapis podobe	2048 x 1536 (3,14 M)

**Tabela 2:** Število pikslov v elektronskem tipalu.

Piksli na robovih svetlobnega tipala niso namenjeni za zapis podobe. Ostalo območje imenujemo učinkovito območje tipala. Tudi znotraj učinkovitega območja so nekateri stolpci in vrstice na robovih prekrite s črno barvo. Ti piksli opredeljujejo radiometrično vrednost pikslov, ki so popolnoma temni. Preostalo območje predstavljajo aktivni piksli, znotraj katerih se proizvajalci odločajo za dejansko velikost podobe, ki v glavnem ustreza standardnemu razmerju stranic podobe štiri proti tri.



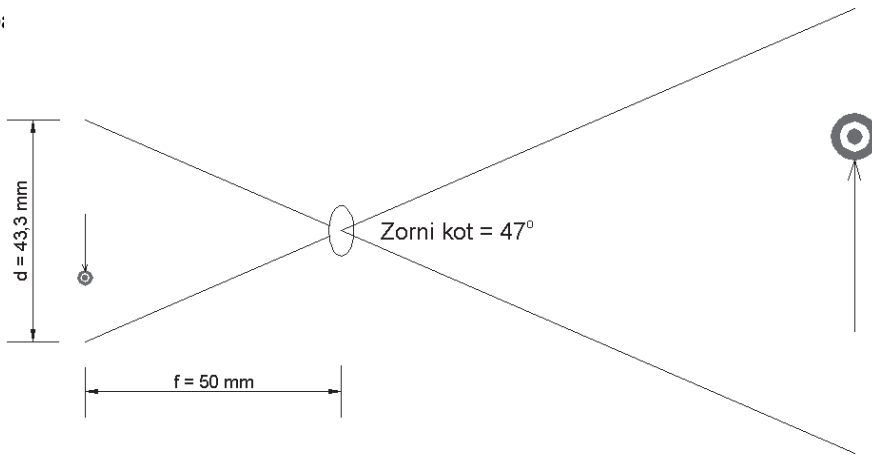
- rdeča
- zelena
- modra

**Slika 2:** Razporeditev filtrov v barvnem svetlobnem tipalu.

**Beleženje barve.** Čipi svetlobnih tipal so prekriti z rdečimi, zelenimi in modrim filtri, ki so simetrično razporejeni preko tipala (Ang, 2000). Vsak filter popolnoma prekriva samo en senzor v čipu. Ker je človeško oko najbolj občutljivo za zeleno barvo, je s podvojitvijo zelenih filtrov dosežena navidezna ostrina slike (slika 2). Pri zapisu podobe je barva posameznega piksla določena z interpolacijo vrednosti z devetih sosednjih fotosenzorjev. Barvna interpolacija zmanjšuje dejansko ločljivost svetlobnih tipal in povzroča manjše napake na mejah med različno svetlimi območji ali na ostrih robovih.

### 2.3 Ekvivalenca goriščnih razdalj

Merilo fotogrametričnih posnetkov je neposredno povezano z goriščno razdaljo fotoaparata. Ta je pri digitalnih fotoaparatih opredeljena enako kot pri običajnih. Ker imajo digitalni fotoaparati vgrajena svetlobna tipala različnih velikosti, se med seboj razlikujejo glede zornega polja, ki ga lahko zajamemo pri enakih goriščnih razdaljah. Da bi poenotili goriščne razdalje različnih tipal, podajajo proizvajalci ekvivalent goriščne razdalje. Ta je opredeljen glede na diagonalni zorni kot v klasičnih 35-milimetrskih fotoaparatih. Slednji uporabljajo film, ki ima velikost posnetka 36 x 24 milimetrov z dolžino diagonale približno 43 milimetrov. Goriščna razdalja, ki ustreza velikosti diagonale posnetka, ponuja zorno polje, ki približno ustreza človeškemu vidu. Normalnokotni objektiv 35-milimetrskih fotoaparatorov ima goriščno razdaljo 50 milimetrov. Zorni kot 35-mm foto:



**Slika 3:** Zorni kot normalnokotnega objektiv.

Velikost tipal v digitalnih fotoaparatih je precej manjša od posnetkov 35-milimetrskih fotoaparatorov. Tako dobimo isti zorni kot z uporabo krajših goriščnih razdalj. Njihov ekvivalent izračunamo po enačbi:

$$\text{ekvivalent} = \frac{f \cdot \sqrt{36^2 + 24^2} \text{ mm}}{d}, \quad (1)$$

kjer predstavlja  $f$  goriščno razdaljo digitalnega fotoaparata v milimetrih,  $d$  pa diagonalno polja svetlobnega tipala v milimetrih. Ker je pri digitalnih fotoaparatih v večini primerov podan 35-milimetrski ekvivalent goriščne razdalje, je to treba upoštevati pri izračunu merila podob.

Nekateri proizvajalci podajajo kot 35-mm ekvivalent goriščno razdaljo 50 milimetrov v primeru, ko je goriščna razdalja digitalnega fotoaparata enaka velikosti diagonale svetlobnega tipala. V tem primeru je treba enačbo (1) prepisati v obliko:

$$\text{ekvivalent} = \frac{f \cdot 50 \text{ mm}}{d}, \quad (2)$$

Še tretja opredelitev ekvivalenta se nanaša na horizontalni zorni kot, ki ga opredeljuje velikost daljše stranice posnetka. Če želimo vrednosti ekvivalentov primerjati z diagonalnim zornim kotom, je treba upoštevati tudi razmerje med stranicami posnetkov. To je pri 35-mm fotoaparatih tri proti dve, medtem ko imajo svetlobna tipala običajno razmerje stranic štiri proti tri. Pri tako podanih ekvivalentih je diagonalni zorni kot digitalnega fotoaparata nekoliko večji kot pri 35-mm fotoaparatu.

## 2.4 Globinska ostrina

Globinska ostrina opredeljuje razdalji od objektiva v prostoru, med katerima lahko pričakujemo ostro preslikavo. Bližnjo  $P_B$  in daljno oddaljenost  $P_D$  predmetov od objektiva, ki se bodo preslikali ostro, izračunamo:

$$P_{B,D} = \frac{P}{1 \pm (P - f)cD / f^2}, \quad (3)$$

kjer je  $P$  oddaljenost od objekta, na katerega smo izostrili sliko,  $f$  goriščna razdalja fotoaparata,  $D$  zaslonsko število (razmerje med goriščno razdaljo in odprtino zaslonke) in  $c$  krog sipanja. V klasični fotografiji je izbor kroga sipanja povezan s povečavo negativa na fotografski papir. V analitični fotogrametriji je  $c$  izbran tako, da velikost točk približno ustreza velikosti merske markice v analitičnih instrumentih (25  $\mu\text{m}$ ). Pri uporabi digitalnih fotoaparatorov za fotogrametrične potrebe lahko  $c$  določimo glede na velikost slikovnega elementa svetlobnega tipala.

Globinsko ostrino lahko povečamo:

- z uporabo manjše odprtine zaslonke  $d$  (večje zaslonsko število  $D$ );
- z uporabo krajše goriščne razdalje  $f$ ;
- z večanjem razdalje od predmeta  $P$ .

Digitalni fotoaparati uporabljajo krajše goriščne razdalje. Pri isti odprtini zaslonke zato z digitalnim fotoaparatom dosežemo mnogo večje polje globinske ostrine kot pri uporabi klasičnih fotoaparatorov in nam globinska ostrina običajno ne povzroča težav.

## 2.5 Iskalo, digitalni zoom, pomnilnik

Optično iskalo omogoča nadzor vsebine podobe, ki bo nastala med slikanjem. Najbolj navadna optična iskala so direktna. Pri tem gledamo na objekt neposredno skozi majhno lečo, ki nam da svetlo, vendar pomanjšano sliko objekta, kot ga vidi objektiv fotoaparata. Boljši nadzor nad vsebino podobe omogoča zrcalno-refleksni sistem, pri katerem opazujemo objekt skozi objektiv, preko katerega bo nastala podoba. Digitalni fotoaparati imajo lahko vgrajen majhen zaslon LCD (angl. Liquid Crystal Display), na katerem je prikazana podoba, kot jo zaznava svetlobno tipalo. LCD nudi najboljši nadzor nad vsebino podobe. Njegova slabost je počasno osveževanje slike in velika poraba električne energije. Zaslon LCD omogoča pregledovanje zapisanih podob takoj po njihovem nastanku. Če z nastalo podobo nismo zadovoljni, jo enostavno zberišemo in fotografiramo ponovno.

Poleg povečave (zoom), ki jo daje objektiv, ponujajo digitalni fotoaparati tudi digitalni zoom. Fotoaparati prenese sliko, nastalo pri najdaljši goriščni razdalji, v notranji pomnilnik, izreže del slike in ga z uporabo interpolacije poveča na normalno velikost. Učinek je podoben, kot bi slikali pri daljši goriščni razdalji, vendar se pri tem izgubi veliko podatkov. Dokler ne bodo interpolacijske tehnike bistveno napredovale, je digitalni zoom le omejeno uporaben in ni primeren za fotogrametrične aplikacije.

Narejene podobe se v digitalnem fotoaparatu shranjujejo v pomnilnik. Fotoaparati imajo vgrajen fiksni pomnilnik, zamenljivega ali oba. Zamenljivi pomnilniki so magnetni mediji v obliki pomnilniških kartic, ki jih enostavno zamenjamo, ko je kartica polna. Večina proizvajalcev ob nakupu priloži pomnilnike, ki imajo med 8 in 32 MB pomnilniške zmogljivosti. Danes prevladujejo štirje standardi, ki se zaradi različnih tehnologij med seboj razlikujejo predvsem po fizični velikosti in pomnilniški zmogljivosti (Arnold, 2002). Najbolj razširjen je standard Compact Flash. Dva tipa kartic Compact Flash (oznaki I in II), se med seboj razlikujeta zgolj po velikosti ohišja (debelini ohišja sta 3,3 in 5,5 milimetrov). Kartice Compact Flash II ponujajo zmogljivosti, ki sežejo nad 512 MB. Med pomnilniškimi nosilci se vse bolj uveljavljajo tudi IBM-ovi diski Microdrive z zmogljivostjo shranjevanja 1 GB podatkov, ki so vgrajeni v ohišje Compact Flash II. Kartice SmartMedia so nekoliko večje, a precej tanjše. Proizvajalci ponujajo zmogljivosti do 128 MB. Poseben format teh kartic Memory Stick uporablja Sony. Njihova zmogljivost sega do 256 MB, vendar so uporabne le v Sonyjevih izdelkih. Najmlajši in po fizični velikosti najmanjši je standard MMC (Multimedia Card) in njegova nadgradnja SD (Secure Digital), ki omogoča boljše varovanje avtorskih pravic. Kartice so po velikosti primerljive s poštnimi znamkami, zmogljivosti pa dosegajo 512 MB.

Podobe se v pomnilnik običajno shranjujejo stisnjeno. Najpogostejši in najbolj varčen zapis podob v digitalnih fotoaparatih je zapis JPEG (Joint Photographic Expert Group), vendar se z njegovo uporabo izgublja del podatkov s podobe. Bolj primeren je zapis podob v formatu TIFF (Tagged Image File Format), ki ponuja možnost stiskanja podob LZW (Lempel-Ziv Welch). Algoritem LZW omogoča stiskanje datotek brez izgube podatkov. Nekateri fotoaparati nudijo možnost nestisnjenega zapisa TIFF. Največ podatkov ohranijo podobe, zapisane v surovi obliki RAW. RAW predstavlja nestisnjen zapis, kot ga ustvari analogno digitalni pretvornik. Zaradi pomnilniško zahtevnega zapisa ga ponujajo le nekateri dražji modeli digitalnih fotoaparatorov.



### 3 KALIBRACIJA NEMETRIČNIH DIGITALNIH FOTOAPARATOV

Za izvajanje merskih nalog v fotogrametriji je treba poznati elemente notranje orientacije fotoaparata, s katerim so bili narejeni posnetki. Te ugotavljamo v postopku kalibracije, v katerem določamo:

- koordinate  $x_0, y_0$  in  $f$  projekcijskega centra v slikovnem koordinatnem sistemu, ki je običajno opredeljen z robnimi markami. Pri digitalnih fotoaparatih opredeljuje slikovni koordinatni sistem matrika slikovnih elementov, ki vsebuje zapis podobe;
- simetrično radialno distorzijo;
- nesimetrično distorzijo.

Kalibracija nemetričnih digitalnih fotoaparatorov je nujna predvsem zaradi velikega geometričnega popačenja, do katerega prihaja pri zapisu podob z elektronskim tipalom. Geometrična distorzija je posledica majhnih razmikov med piksli, na račun katerih se razvija ločljivost svetlobnih tipal, in slabših objektivov, ki so običajno vgrajeni v nemetrične digitalne fotoaparate, ki jih najdemo na tržišču.

Tehnika kalibracije mora biti prilagojena naravi digitalnih fotoaparatorov. Zaradi spremenljive optike (objektivi zoom) je kalibracijo priporočljivo izvajati med samim projektom fotografiranja. Kalibracijo izvajamo s testnim poljem. Različni avtorji (Matsuoka in ostali, 2002; Triggs, 1998; Zhang, 1998; če navedem le nekatere) so predlagali več načinov kalibracije na podlagi testnega polja, ki ga predstavlja ravnina z naneseno mrežo točk z znanimi koordinatami. Takšno testno polje lahko odnesemo s seboj na vsako terensko fotografiranje. Položaj točk testnega polja na fotografiranih podobah določimo s samodejnim merjenjem. Na podlagi izmerjenih slikovnih koordinat točk in znanih koordinat točk testnega polja izračunamo parametre notranje orientacije fotoaparata, ki omogočajo geometrično popravo podob s slikovnim prevzorčenjem.

Digitalni zapis podob omogoča izredno hitre samodejne meritve položajev velikega števila točk, kar vsekakor opravičuje izvedbo terenske kalibracije med vsakim projektom, saj je čas od zajema podobe do izdelave končnih izdelkov še vedno krajši, kot pri uporabi klasičnih posnetkov na fotografskem filmu. Z razpoložljivimi podatki o kalibraciji fotoaparata lahko z digitalnimi fotoaparati izdelamo podobe, ki so geometrično ustrezne za uporabo v nekaterih fotogrametričnih nalogah.

V praktičnih primerih se je pokazalo, da predstavlja glavni del popačenja podob simetrična radialna distorzija. Slednjo lahko modeliramo s polinomom lihih potenc radialne oddaljenosti slikovne točke od glavne točke posnetka:

$$d_r = k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7 + \dots; \quad r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}, \quad (4)$$

kjer je  $d_r$  popravek slikovnih koordinat zaradi radialne distorzije,  $k_i$  so koeficienti distorzijskega polinoma,  $(x, y)$  slikovne koordinate točk in  $(x_0, y_0)$  koordinati glavne točke podobe.

V nadaljevanju so predstavljeni rezultati testa, ki orisuje nujnost izvajanja kalibracije za potrebe fotogrametričnih meritev. Test sem izvedel s programsko opremo, nastalo v okviru magistrske



naloge (Grigillo, 2003). Za test sem uporabil ravninsko mrežo 5 x 7 kvadratov velikosti 45 x 45 mm. Ob fotografiranju mreže sem izvedel tudi kalibracijo digitalnega fotoaparata, s katero sem ugotovil elemente simetrične radialne distorzije (prva dva koeficienta distorzijskega polinoma (4) in položaj glavne točke podobe). Na podlagi dobljenih parametrov sem s prevzorčenjem izvorne podobe izdelal popravljeno podobo mreže kvadratov. S projektivnim prevzorčenjem sem iz izvorne in iz popravljene podobe izdelal slikovna metrična načrta mreže. Projektivna transformacija omogoča izdelavo slikovnih načrtov ravnih objektov na podlagi štirih oslonilnih točk (Hemmler, Wiedemann, 1997). Kot oslonilne točke za izračun parametrov transformacije sem uporabil štiri robne točke mreže kvadratov. Enačbe projektivne transformacije:

$$X = \frac{a_1x + a_2y + a_3}{c_1x + c_2y + 1}, \quad Y = \frac{b_1x + b_2y + b_3}{c_1x + c_2y + 1}. \quad (5)$$

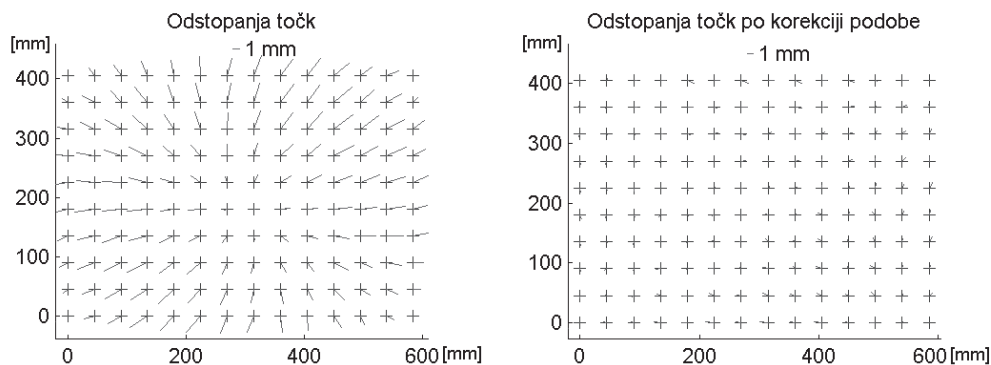
Na obeh slikovnih načrtih sem analiziral odstopanja vogalov kvadratov od pravilne lege. Vse slikovne koordinate (točke na podobah testnega polja in vogali kvadratov na slikovnem načrtu) so bile določene samodejno na podlagi slikovne korelacije (Höhle, 1997). Odstopanja na obeh slikovnih načrtih so prikazana v tabeli 3 in na sliki 4.

Podoba	Največja odstopanja [mm]			RMS [mm]
	$dx_{\max}$	$dy_{\max}$	$dxy_{\max}$	
Izvorna	3,485	2,890	4,045	2,731
Popravljena	1,437	0,634	1,439	0,658

**Tabela 3:** Odstopanja točk na metričnem načrtu.

Tabela 3 prikazuje največja odstopanja med izmerjenimi in pravimi položaji vogalov kvadratov v smeri koordinatnih osi  $x$  in  $y$  ter največje položajno odstopanje  $d_{xy}$ . V stolpcu RMS je podan srednji pogrešek odstopanj.

Slika 4 prikazuje velikost in razporejenost odstopanj v povečanem merilu. Modri križi prikazujejo teoretično pravilno lego točk, rdeče črte pa odstopanja od pravih položajev. Radialne distorzija je na izvorni podobi lepo vidna. Preostala odstopanja na popravljeni podobi so posledica nesimetrične distorzije, ki je v postopku kalibracije nisem ugotavljal.



Slika 4: Odstopanja metričnega načrta izdelanega iz izvorne (levo) in iz popravljene podobe.

## 4 ZAKLJUČEK

Nemetrični digitalni fotoaparati ponujajo vse večjo geometrično ločljivost. Podobe, zapisane s svetlobnimi tipali, so na voljo takoj po terenskem fotografiranju, a jih obremenjujejo geometrična odstopanja. Za uporabo v fotogrametriji moramo fotoaparati kalibrirati. Kalibracijo je zaradi spremenljive optike smiselno izvesti med samim projektom. Ravninska testna polja in samodejne meritve na podobah omogočajo enostavno in hitro izvedbo kalibracije in geometrično popravo podob. Popravljenе podobe so tako uporabne za fotogrametrične meritve, ki ne zahtevajo najvišjih natančnosti (nekaj centimetrov v bližnjelikovnem območju).

### Literatura in viri:

- Ang, T. (2000). *Digitalna fotografija*. Ljubljana: Tehniška založba Slovenije.
- Arnold, M. (2002, januar). *Fotoaparati digitalne dobe*. *Monitor*, letnik 12, št. 1, str. 56–84.
- Askey, P. (2001). *Effective Pixels*. Spletna stran (URL): [www.dpreview.com/learn/Glossary/Camera\\_System/Effective\\_Pixels\\_01.htm](http://www.dpreview.com/learn/Glossary/Camera_System/Effective_Pixels_01.htm)
- Askey, P. (2002). *Making (Some) Sense Out Of Sensor Sizes*. Spletna stran (URL): [www.dpreview.com/news/0210/02100402sensorsizes.asp](http://www.dpreview.com/news/0210/02100402sensorsizes.asp)
- Denyer, P., B. (1999). *CMOS vs CCD*. *STMicroelectronics, Vision & Imaging Business Unit*. Spletna stran (URL): [www.vvl.co.uk/whycmos/whitepaper.htm](http://www.vvl.co.uk/whycmos/whitepaper.htm)
- Grigillo, D. (2003). *Uporaba digitalnih fotoaparatorov v enoslikovni arhitekturni fotogrametriji*. Magistrska naloga. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo.
- Hemmleb, M., Wiedemann, A. (1997). *Digital Rectification and Generation of Orthoimages in Arhitekturnal Photogrammtry*. *CIPA International Symposium. IAPRS, vol. XXXII, Part 5C1B, str. 261–267*. Göteborg, Švedska.
- Höhle, J. (1997). *The Automatic Measurement of Targets*. Aalborg, Danska. Spletna stran (URL): [www.i4.auc.dk/jh/auto\\_measurement.pdf](http://www.i4.auc.dk/jh/auto_measurement.pdf)
- Kodak Research and Development (2001). *CMOS vs CCD and the Future of Imaging*. Eastman Kodak Company. Spletna stran (URL): [www.kodak.com/US/en/corp/researchDevelopment/techProdHighlights.shtml](http://www.kodak.com/US/en/corp/researchDevelopment/techProdHighlights.shtml)
- Matsuoka, R., Fukue, K., Cho, K., Shimoda, H., Matsumae, Y., Hongo, K., Fujiwara, S. (2002). *A Study on Calibration of Digital Camera*. *Proceedings of the Photogrammetric Computer Vision, ISPRS Commission III, Symposium 2002, Graz, Austria*.

*Schlemmer, H. (1996). Grundlagen der Sensorik, Eine Instrumentenkunde für Vermessungsingenieure. Heidelberg: H. Wichmann Vlg.*

*Triggs, B. (1998). Autocalibration From Planar Scenes. ECCV, str. 89–105.*

*Zhang, Z. (1998). A Flexible New Technique for Camera Calibration. Technical Report MSR-TR-98-71, Microsoft Research. Spletna stran (URL): [research.microsoft.com/~zhang/Cal](http://research.microsoft.com/~zhang/Cal)*

**asist. mag. Dejan Grigillo, univ. dipl. inž. geod.**

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo  
Jamova 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija  
e-pošta: [dgrigill@fgg.uni-lj.si](mailto:dgrigill@fgg.uni-lj.si)

**Prispelo v objavo: 20. junija 2003**