

UDK 528.711.11

## SKAITMENINĖS MATUOJAMOSIOS FOTOKAMEROS KALIBRAVIMO PARAMETRŲ ĮTAKA NUOTRAUKAS TRANSFORMUOJANT Į PLOKŠTUMĄ

Jūratė Sužiedelytė-Visockienė

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva  
El. paštas j\_visockiene@hotmail.com

Įteikta 2006 10 17, priimta 2006 12 21

**Santrauka.** Straipsnyje aprašytas skaitmeninės matuojamosios fotokameros *Canon EOS 350D* kalibravimo procesas, kurio metu nustatyti fotokameros vidinio orientavimo elementai – simetrinė ir nesimetrinė distorsijos. Kalibravimas atliktas *Tcc* ir *Technet (Pictran B, D/E)* programomis, naudojant specialų stendą su žinomomis taškų koordinatėmis. Įvertintas gautų rezultatų tikslumas. Fotokameros kalibravimo rezultatai naudojami tolesniam nuotraukų apdorojimui. Siekiant nustatyti, kokios įtakos fotokameros kalibravimo parametrai turi fotonuotraukų transformavimo į plokštumą rezultatams, atlikti skaičiavimai taikant fotokameros kalibravimo duomenis ir jų netaikant. Fotonuotraukos į plokštumą transformuotos pagal 6 kontrolinius taškus. Skaitmeninėse fotonuotraukose įvertintas taškų matavimo tikslumas. Pateikta rezultatų apibendrinimas ir išvados.

**Reikšminiai žodžiai:** skaitmeninė fotokamera, fotokameros kalibravimas, fotokameros vidinio orientavimo elementai, kalibravimo stendas, fotonuotraukų transformavimas.

### 1. Įvadas

Pastaraisiais metais antžeminės fotogrametrijos darbams naudojamos skaitmeninės, matuojamosios fotokameros. Apdorojant gautas fotonuotraukas iškyla problemų [1]:

- kaip apibūdinti fotonuotraukos koordinatinių sistemą (fotonuotraukos, gautos skaitmenine fotokamera, neturi koordinatinių žymių);
- kaip nustatyti nežinomus fotokameros vidinio orientavimo elementus (projekcijos centro koordinatės, objektyvo židinio nuotolį, simetrinę bei nesimetrinę distorsijas);
- kokia fotokameros objektyvo distorsijos įtaka vaizdai.

Tiriant šias problemas atliktas skaitmeninės fotokameros kalibravimas bei fotonuotraukos transformavimas į plokštumą, skaičiavimuose taikant apskaičiuotus fotokameros vidinio orientavimo elementus ir jų netaikant.

Fotokameros kalibravimas gali būti atliekamas:

- specialioje kalibravimo laboratorijoje. Čia nustatyti fotokameros kalibravimo parametrai yra labai tikslūs ir patikimi, tačiau nedaug kas tokias laboratorijas turi;
- nuotraukų apdorojimo metu. Iš esmės tai susiję su stereofotogrametrijos procesais (fotogrametrinio tinklo išlyginimu). Tam reikalingas nemažas skaičius kontrolinių taškų, kurių koordinatės žinomos;
- naudojant specialią programinę įrangą ir kalibravimui paruoštą stendą trimatėje erdvėje, žinant pažymėtų taškų koordinatės.

Gautieji fotokameros kalibravimo parametrai naudojami tolesniuose nuotraukų apdorojimo procesuose.

*Tyrimo tikslas* – nustatyti, kokios įtakos turi fotokameros kalibravimo parametrai nuotraukos apdorojimo – transformavimo į plokštumą tikslumui. Transformavimo rezultatas – objekto planinis modelis arba žemėlapis (planas) plokštumoje.

### 2. Matematinis fotokameros kalibravimo ir fotonuotraukos transformavimo į plokštumą procesas

**Skaitmeninės fotokameros kalibravimas.** Fotokameros optikos sistemos paklaidos išreiškiamos šešiais modelio parametrais:  $A_1, A_2, A_3$  – radialine simetrine ir  $B_1, B_2, B_3$  – radialine nesimetrine distorsijomis. Radialinė simetrinė distorsija – fotonuotraukos taškų poslinkis radialinėmis kryptimis, susikertančiomis pagrindiniame fotonuotraukos taške. Taško poslinkis  $d_x, d_y$ , atsirandantis dėl distorsijos, išreiškiamas šiuo daugianariu [2, 3]:

$$\left. \begin{aligned} d_x &= A_1 x_0 (r^2 - r_0^2) + A_2 x_0 (r^4 - r_0^4) + A_3 x_0 (r^6 - r_0^6), \\ d_y &= A_1 y_0 (r^2 - r_0^2) + A_2 y_0 (r^4 - r_0^4) + A_3 y_0 (r^6 - r_0^6), \\ r^2 &= \left( \frac{d_x}{s_{xy}} \right)^2 + d_y^2, \end{aligned} \right\} (1)$$

čia  $x_0, y_0$  – pagrindinio fotonuotraukos taško koordinatės;  $A_1, A_2, A_3$  – radialinės simetrinės distorsijos parametrai;  $S_{xy}$  – fotonuotraukos mastelio koeficientas;  $r_0$  – konstanta, apibūdinanti koreliaciją tarp

distorsijos koeficientų ir fotokameros židinio nuotolio  $c$ . Paprastai ši konstanta yra lygi 1/3 fotonuotraukos įstrižainės ilgio.

Radialinė nesimetrinė distorsija išreiškiama šiomis lygtimis [2, 3]:

$$\begin{aligned} d_x &= B_1(r^2 + 2x_0^2) + B_2 2x_0 y_0, \\ d_y &= B_2(r^2 + 2y_0^2) + B_3 2x_0 y_0, \end{aligned} \quad (2)$$

čia  $B_1, B_2, B_3$  – radialinės nesimetrinės distorsijos parametrai.

Fotokamerai kalibruoti naudojamas atitinkamos konfigūracijos stendas su pažymėtais taškais. Taškų koordinatės arba atstumas tarp jų turi būti žinomas. Paruoštas kalibravimo stendas fotografuojamas iš įvairiausių fotokameros padėčių. Fotokameros kalibravimo parametrai gaunami išsprendus (1, 2) daugianarius.

Fotokameros kalibravimo rezultatų tikslumą lemia šie pagrindiniai veiksniai:

- fotonuotraukose matuojamų taškų koordinatžių tikslumas:
  - fotokameros parametrų pastovumas;
  - matuojant taikomas algoritmas;
  - taškų žymėjimas ir atpažinimas;
- fotonuotraukos mastelis;
- fotografavimo kampas;
- kontrolinių taškų tikslumas.

**Fotonuotraukos (vaizdo) transformavimas į plokštumą pagal kontrolinius taškus.** Naudojantis planinėmis fotonuotraukomis, galima išspręsti daug fotogrametrijos uždavinių. Dažnai tikslus objekto (pastato fasado, meno kūrinio, komunikacijos vamzdžių) planinis vaizdas reikalingas įvairiems projektavimo darbams atlikti. Objektui transformuoti į plokštumą reikia turėti vieną arba kelias fotonuotraukas su mažiausiai 4 koordinuotais kontroliniais (transformavimo) taškais. Kiekvienam kontroliniam taškui sudaromos dvi lygtys [4, 5]:

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{A_1 x + A_2 y + A_3 z}{C_1 x + C_2 y + 1}, \\ Y &= \frac{B_1 x + B_2 y + B_3 z}{C_1 x + C_2 y + 1}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

čia  $X, Y$  – taškų koordinatės, transformuotos į plokštumą,

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= Z \frac{a_1}{c_3 z}; \quad A_2 = Z \frac{a_2}{c_3 z}; \quad A_3 = Z \frac{a_3}{c_3}, \\ B_1 &= Z \frac{b_1}{c_3 z}; \quad B_2 = Z \frac{b_2}{c_3 z}; \quad B_3 = Z \frac{b_3}{c_3}, \\ C_1 &= \frac{c_1}{c_3 z}; \quad C_2 = \frac{c_2}{c_3 z}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Formulėse (3), (4)  $x, y, z$  – erdvinės kontrolinių taškų koordinatės objekto koordinatžių sistemoje;  $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3, C_1, C_2$  – 8 nežinomieji (trans-

formavimo elementai), pagal kuriuos nustatoma perspektyvos priklausomybė tarp fotonuotraukų, vaizduojančių objektą pasvirai ir horizontaliai;  $a_i, b_i, c_i$  – krypčių kosinusai, kuriais nustatoma dviejų koordinatžių sistemų – erdvinės ir plokštuminės, tarpusavio padėtis.

Žinant transformavimo elementus, pagal (3) formules galima apskaičiuoti bet kurio taško koordinatės.

### 3. Skaitmeninės matuojamosios fotokameros Canon EOS 350D kalibravimas

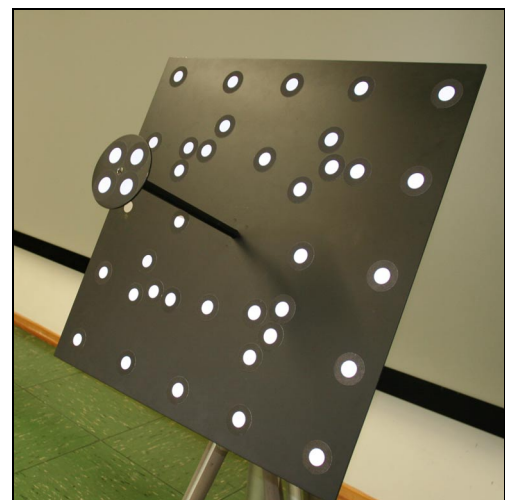
Fotokameros kalibravimas atliktas *Technet (Pictran B ir Pictran D/E)* ir *Tcc* programomis Vilniaus Gedimino technikos bei Bonos (Vokietija) universitetų fotogrametrijos laboratorijose. Skaitmeninės fotokameros *Canon EOS 350D* charakteristikos pateiktos 1 lentelėje.

**1 lentelė.** Skaitmeninės kameros *Canon EOS 350D* charakteristikos

**Table 1.** Characteristics of digital camera *Canon EOS 350D*

Savybės	Parametrai
Objektyvo židinio nuotolis $c$	20 mm
Skiriamoji geba	8 mln. vaizdo elementų (pikselių)
Vaizdo elemento dydis	6,4 × 6,4 μm
Fotonuotraukos dydis	22,2 × 14,8 mm
Jautrumas	ISO 100–400 pagal tarptautinę standartų sistemą
Fotonuotraukų formatai	JPG, RAW (12 bitų)
Fotonuotraukos vaizdo elementų skaičius	3456 × 2304 pikselių
Dydis (ilgis, plotis, aukštis)	126,5 × 94,2 × 64 mm
Svoris	485 g

Kalibravimui panaudotas specialus plakatas – stendas su žinomomis taškų koordinatėmis (1 pav.) [5, 6]. Stendas 24 kartus nufotografuotas iš skirtingų fotokameros padėčių. Apskaičiuoti fotokameros kalibravimo parametrai ir jų nustatymo tikslumas (2 ir 3 lentelės).



**1 pav.** Fotokameros kalibravimo stendas Bonos universiteto Fotogrametrijos institute  
**Fig 1.** Plate of camera calibration in Bonn university's Photogrammetry laboratory

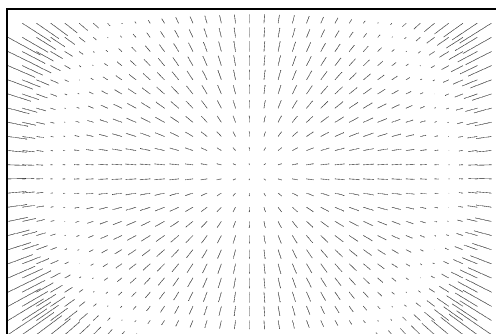
**2 lentelė.** Kameros *Canon EOS 350D* kalibravimo rezultatai  
**Table 2.** Results of camera *Canon EOS 350D* calibration

Parametrai	Kalibravimo rezultatai	
	<i>Pictran</i> , mm	<i>Tcc</i> , pikseliai
Fotokameros židinio nuotolis $c$	21,116637	3164,1968
Mastelis $S_{xy}$	1,65785	1,00019
Nuotraukos centro koordinatės		
$x_0$	-0,586128	-9,8223
$y_0$	0,821965	3,6421
Simetrinės radialinės objektyvo distorsijos parametrai		
$A_1$	-0,00021	$-7,070 \times 10^{-09}$
$A_2$	0,00000047	-
Nesimetrinės radialinės objektyvo distorsijos parametrai		
$B_1$	$0,8690 \times 10^{-04}$	$8,328 \times 10^{-08}$
$B_2$	$-0,3684 \times 10^{-03}$	$4,227 \times 10^{-09}$
Taškų matavimo vidutinė kvadratinė paklaida (RMS)		
$m_x$	-	0,168059
$m_y$	-	0,16879

**3 lentelė.** Fotokameros *Canon EOS 350D* kalibravimo tikslumo rodikliai  
**Table 3.** Precision rate of camera *Canon EOS 350D* calibration

Skaičiavimams naudotos programos	$\sigma$ , $\mu\text{m}$
<i>Pictran</i>	0,5455
<i>Tcc</i>	1,4563

Sėkmingo fotokameros kalibravimo tikslumo rodiklis  $\sigma$ , skaičiuojant *Pictran* ir *TCC* programomis, turėtų būti ne mažesnis kaip 0,5–1,4  $\mu\text{m}$  [4, 5]. Gautieji fotokameros kalibravimo parametrai įrašomi į programos skiltį, kurioje yra naudotos fotokameros aprašas. *Tcc* programa apskaičiuotoji fotokameros objektyvo distorsija gali būti pavaizduota grafiškai (2 pav.).



**2 pav.** Fotokameros objektyvo sistemos distorsijos grafinis vaizdas  
**Fig 2.** Distortion of camera objective system

Mažiausia fotokameros objektyvo sistemos distorsija yra objektyvo centre (2 pav.).

Distorsijai koreguoti yra sukurta *Tcc Distortion-Correct* (Vokietijoje, Bonos universitete) programa, kuri pataiso fotonuotraukos vaizdą, iškreiptą dėl šių paklaidų

[2], tačiau į gautus kalibravimo rezultatus galima atsižvelgti ir tolesniuose fotonuotraukų apdorojimo etapuose.

#### 4. Fotonuotraukos transformavimo į plokštumą tikslumo tyrimas

Eksperimento metu iširta, kokios įtakos fotokameros kalibravimo parametrai turi fotonuotraukos transformavimo į plokštumą rezultatams.

Fotonuotrauka į plokštumą (dvimatę erdvę) transformuota *Pictran D/E (Technet)* programa. Naudojamos specialaus formato *BT* nuotraukos, kurių byloje yra svarbi fotogrametrinė informacija, t. y. kameros kalibravimo rezultatai.

Tyrimui panaudota pastato nuotrauka, kurios 6 kontroliniai taškai geodeziškai koordinuoti. Jų koordinatės išmatuotos fotonuotraukose, kompiuterio ekrane (3 pav.).



**3 pav.** Pastato fotonuotrauka  
**Fig 3.** Image of a building

Pirmuoju atveju fotonuotrauka transformuota į plokštumą neatsižvelgiant į fotokameros kalibravimo duomenis. Į plokštumą transformuotos nuotraukos vaizdas matomas 4 pav. Transformavus gauti kontrolinių taškų koordinatės skirtumai ir tikslumo rezultatai pateikti 4 lentelėje.



**4 pav.** Transformuotos nuotraukos vaizdas  
**Fig 4.** View of a rectified image

**4 lentelė.** Fotonuotraukos transformavimo rezultatai neatsižvelgiant į kameros kalibravimo parametrus  
**Table 4.** Results of image rectification when camera calibration parameters are not used

Kontrolinių taškų Nr.	Kontrolinių taškų koordinatės, m		Nuotraukose išmatuotų kontrolinių taškų koordinatėms skirtumai, gauti atlikus transformavimą, m			Išmatuotos taškų koordinatės nuotraukose netaisytos dėl fotokameros distorsijos, mm	
	x	y	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta xy$	x'	y'
1	6,1552	12,1700	-0,0019	-0,0016	0,0025	-8,37	23,35
2	8,6595	12,1773	-0,0012	0,0013	0,0018	9,47	23,80
3	8,3980	10,1984	0,0042	-0,0001	0,0042	8,65	12,90
4	8,6704	9,2979	-0,0039	-0,0014	0,0041	11,71	6,55
5	6,1643	9,2899	-0,0048	0,0005	0,0048	-11,24	6,32
6	6,5939	9,9878	0,0076	0,0013	0,0077	-6,66	11,33
$\sigma = 5,6 \mu\text{m}$							

**5 lentelė.** Fotonuotraukos transformavimo rezultatai naudojant kameros kalibravimo parametrus  
**Table 5.** Results of image rectification with camera calibration parameters

Kontrolinių taškų Nr.	Nuotraukose išmatuotų kontrolinių taškų koordinatėms skirtumai, gauti atlikus transformavimą, m			Nuotraukose išmatuotos taškų koordinatės pataisytos dėl fotokameros distorsijos, mm	
	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta xy$	x'	y'
1	-0,0014	-0,0012	0,0019	-8,39	23,41
2	-0,0017	0,0017	0,0024	9,50	23,88
3	0,0031	-0,0012	0,0033	8,62	12,86
4	-0,0027	-0,0005	0,0027	11,65	6,52
5	-0,0062	0,0019	0,0065	-11,18	6,28
6	0,0089	0,0007	0,0089	-6,63	11,27
$\sigma = 6,1 \mu\text{m}$					

Antruoju atveju fotonuotrauka transformuota į plokštumą įtraukiant į skaičiavimus *Pictran* programa gautus skaitmeninės *Canon EOS 350D* kalibravimo rezultatus (2 lentelė). Transformavimo rezultatai pateikti 5 lentelėje. Šiuo atveju transformuotos nuotraukos vaizdas vizualiai nesiskiria nuo pirmoju atveju transformuotojo vaizdo (4 pav.).

Skaitmeninėse fotonuotraukose matuotų kontrolinių taškų koordinatėms tikslumas (6 lentelė) įvertintas pagal dvigubųjų matavimų skirtumus  $d_{xy}$ , laikant, kad matavimai iš esmės vienodo tikslumo.

**6 lentelė.** Fotonuotraukose išmatuotų taškų koordinatėms tikslumo skaičiavimai

**Table 6.** Quality calculation of point's measurement in the images

Nuokrypių skirtumai	Kontrolinių taškų Nr.					
	1	2	3	4	5	6
$d_{xy}, \mu\text{m}$	6	-6	9	14	-17	-12

Matavimų skirtumų vidutinė kvadratinė paklaida  $m_d$  apskaičiuota pagal šią formulę:

$$m_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_{xy}^2}{n}} = 11 \mu\text{m}, \quad (5)$$

čia  $d_{xy}$  – kontrolinių taškų, gautų į skaičiavimus įtraukus fotokameros kalibravimo parametrus ir jų neįtraukus, koordinatėms nuokrypių skirtumai;  $n$  – kontrolinių taškų skaičius.

Vieno matavimo fotonuotraukose vidutinė kvadratinė paklaida

$$m = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_{xy}^2}{n}} = 5 \mu\text{m}. \quad (6)$$

Iš rezultatų (5, 6) matyti, kad kontroliniai taškai fotonuotraukose kompiuterio ekrane išmatuoti labai tiksliai – 5–10  $\mu\text{m}$  tikslumu.

## 5. Išvados

Atlikus skaitmeninės fotokameros *Canon EOS 350D* tyrimus nustatyta, kad tirtosios fotokameros objektyvas aukštos kokybės – simetrinė ir nesimetrinė distorsijos mažos. Į jas rekomenduojama atsižvelgti tik atliekant labai tikslus antžeminius fotogrametrinius darbus. Fotonuotraukos transformavimo į plokštumą rezultatų tikslumas, naudojant kameros kalibravimo parametrus,  $\sigma = 0,0061$  mm. Tikslumo rezultatai mažai skiriasi ir nenaudojant skaičiavimuose fotokameros kalibravimo duomenų ( $\sigma = 0,0056$  mm). Skaitmeninėse nuotraukose

kompiuterio ekrane taškų koordinatės išmatuotos 5–10  $\mu\text{m}$  tikslumu.

Skaitmeninių nuotraukų transformavimo į plokštumą metu:

- objektų detalės, nufotografuotos iš ekstremalaus kampo (sunkiai prieinamose vietose), transformavus išlieka;

- lengvai panaikinama fotokameros objektyvo distorsija;

- prieš atliekant transformavimą galima keisti nuotraukos objektų ryškumą. Taip gaunami objektai yra detalesni.

Transformuotos fotonuotraukos yra tinkamos objektų vektoriniams duomenims gauti. Vektoriniai duomenys reikalingi atliekant pastatų ekspertizės, fasadų plotų nustatymo bei kitus projektavimo darbus.

### Literatūra

1. ABRAHAM, S.; HAU, T. *Towards Autonomous High-Precision Calibration of Digital cameras*. Institute für Photogrammetrie, Universität Bonn, 2004. 12 p.
2. ABRAHAM, S. *Tcc – A software for Test field based on self-Calibration of multi-Camera-Systems*. Institute für Photogrammetrie, Universität Bonn, 2004. 39 p.
3. MARZAN, G. T.; KARARA, H. M. A computer program for direct linear transformation solution of the colinearity condition, and some applications of it. In *Proc of the Symposium on Close-Range Photogrammetric Systems*. Falls Church, VA: American Society of Photogrammetry, 2003, p. 420–476.
4. PICTRAN-B. Program description and user manual. Berlin, 2004. 121 p.
5. PICTRAN-D/E. Program description and user manual. Berlin, 2004. 105 p.
6. LÄBE, TH.; FÖRSTNER, W. *Geometry stability of low-cost digital consumer cameras*. Institute für Photogrammetrie, Universität Bonn, Commission I/2, 2004. 7 p.

---

**Jūratė Sužiedelytė-Visockienė.** Assoc Prof, Doctor. Vilnius Gediminas Technical University, Dept of Geodesy and Cadastre. Ph +370 5 274 4703, Fax +370 5 274 4705.

A graduate of Vilnius Gediminas Technical University (1998). Doctor (2003). Author of more than 10 scientific papers. Participated in many intern conferences.

Research interests: digital photogrammetry, land management.