

Vpliv distorzije na razdalje, izračunane s pomočjo stereoskopskih slik

Jernej Mrovlje¹

¹ Institut »Jožef Stefan«, Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana
E-pošta: jernej.mrovlje@ijs.si

Povzetek. Metoda merjenja razdalj s pomočjo stereoskopskih slik temelji na principu stereoskopije, ki ga je leta 1838 kot prvi opisal britanski znanstvenik Charles Wheatstone. Informacije o lokaciji poljubnega objekta na stereoskopskem paru slik in dodatni parametri stereoskopskega sistema, s katerim zajamemo slike (razdalja med kamerami, horizontalni zorni kot kamer itd.), nam omogočajo izračun dejanske razdalje med objektom in sistemom (kamerami). Napaka izračunane razdalje je funkcija napake lokalizacije objekta na slikah, kot tudi napak optičnega sistema kamer. Optične napake se v slikah odražajo v kakovosti in geometrijskem popačenju. Mednje prištevamo kromatično in sferično aberacijo ter distorzije. Vpliv distorzije na razdalje, izračunane s pomočjo stereoskopskih slik, je predmet analize tega članka. S pomočjo kalibracije kamer smo pridobili parametre distorzije. Na podlagi Brownovega »Plumb Bob« modela distorzije smo v program »Stedimat« (program za izračun razdalj s pomočjo stereoskopskih slik) vgradili funkcijo odpravljanja distorzije. Zajeli smo množico stereoskopskih slik s testnimi objekti in na njih preizkusili delovanje omenjene funkcije. Uporaba omenjenega modela distorzije se je izkazala za učinkovito, saj so se napake izračunanih razdalj testnih objektov ustrezno zmanjšale.

Ključne besede: stereoskopija, merjenje razdalj, distorzija

Distortion impact on the distance calculated by using stereoscopic images

Extended abstract. Stereoscopy is a technique used in recording and presenting stereoscopic images. There are two possible ways of taking stereoscopic images: by using a special two-lens stereo-camera or a system with two single-lens cameras. Stereoscopic images allow us to calculate the distance of the camera(s) from the selected object. It is calculated from the differences between the position of the selected object on the left and the right image and additional technical data like focal length and the distance between the cameras. A certain object is selected on the left image and the same object is automatically detected on the right image. The objects position (distance) can be calculated by doing some geometrical derivations (2). There are several types of common optical distortions present in images: chromatic aberration, spherical aberration and distortions. Radial distortion has a significant impact on image geometry. In this paper, the distortion impact on the distances calculated by using stereoscopic images is studied. Firstly, in order to get distortion parameters, camera calibration was done by using the Camera Calibration Toolbox for Matlab. Secondly, a distortion model (1) was used to build the »distortion-correction function« as a part of the Stedimat (Stereo Distance Measuring Tool) application. The user interface of Stedimat is shown in Fig. 6. Four experiments were conducted in order to test the effectiveness of the built-in function. Seven test objects (panel boards) were positioned at the same distance D_{ref} from the stereoscopic system and then photographed.

Schematic arrangements of the test objects are shown in Fig. 7. The distance to each object was calculated twice: using a distorted and undistorted pair of stereoscopic images. Results are shown in Tables 1–4, with the distances calculated using the distorted images ($D_1 \pm \Delta D_1$) in the second column and distances calculated by using the undistorted images ($D_2 \pm \Delta D_2$) in third column. In Figs. 9–12, results are shown graphically with the dashed line presenting distances $D_1 \pm \Delta D_1$ and full line presenting distances $D_2 \pm \Delta D_2$. In Tables 5 and 6, the absolute distance error in pixels is presented.

Keywords: stereoscopy, measuring distance, distortion

1 Uvod

Stereoskopija je veda, ki se ukvarja s slikami, ki nam vzbudijo občutek tridimenzionalnega prostora. Stereoskopske slike so vedno posnete v parih, posamezni sliki v paru pa prikazujeta isti motiv, zajet iz različnih položajev oziroma iz različnih zornih kotov. Obstoji več metod zajema stereoskopskih posnetkov. Prvotno so v ta namen uporabljali stereoskopske kamere, danes pa so najbolj razširjeni stereoskopski sistemi. V prvem primeru gre za posebno kamero z dvema lečama, v drugem primeru pa za kombinacijo dveh kamer, ki ju združimo na vodilu.

Podatki o stereoskopskem sistemu in informacije, ki jih dobimo na podlagi analize stereoskopskih slik, omogočajo izračun razdalje med stereoskopskim

sistemom in poljubnim objektom v zajetem motivu (prostoru). Napake optičnega sistema kamer se prek geometrijskega popačenja slik odražajo na izračunani razdalji. Vpliv distorzije na razdalje, izračunane s pomočjo takšnih stereoskopskih slik, je predmet analize tega članka.

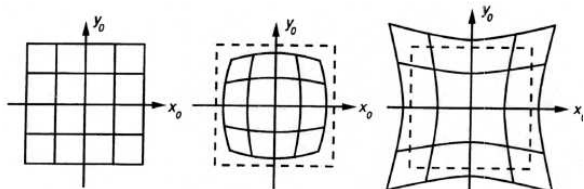
2 Napake optičnega sistema

Napake optičnega sistema, ki nastajajo na zajetih slikah, v odločilni meri vplivajo na kakovost in geometrijo slik, prek tega pa tudi na izračunane razdalje. Med najpomembnejše napake optičnega sistema prištevamo sferično in kromatično aberacijo ter distorzije.

Kromatična aberacija je napaka leč, zaradi katere so predmeti na slikah obrobljeni z mavričnimi barvami. Napaka je posledica disperzije, nastane pa zaradi različnega loma svetlobe posameznih valovnih dolžin. Sferična aberacija povzroči zmanjševanje ostrine slike proti robovom, medtem ko je v sredini slika ostra. Vzrok zanjo je različno lomljenje svetlobnih žarkov na neidealni površini leče. Žarki, ki vpadajo na lečo blizu sredine, se lomijo v točko, ki na goriščnici leži dlje od točke, v katero se lomijo žarki, ki vpadajo na lečo na robovih. Goriščnica ni strogo definirana točka. Omenjeni napaki bolj kot na geometrijo slike vplivata na njeno kakovost [6].

Radialna distorzija ali ukrivljenost slikovnega polja je ena najbolj dominantnih napak optičnega sistema in močno popači geometrijo zajetega motiva. Ločimo dve obliki radialne distorzije, in sicer »blazino« (angl. pincushion) ter »sodček« (angl. barrel). Pojav blazine upogne ravne linije proti središču slike, pojav sodčka pa proti robovom slike. Medtem ko je pojav blazine značilen za telefotobjektive, se pojav sodček pojavlja pri širokokotnih objektivih [8]. Slika 1 prikazuje obe obliki radialne distorzije.

Tangencialna distorzija je posledica nenatančnega centriranja lečja objektivna glede na slikovni senzor.



Slika 1: Shematični prikaz »sodčka« (sredina) in »blazine« (desno)

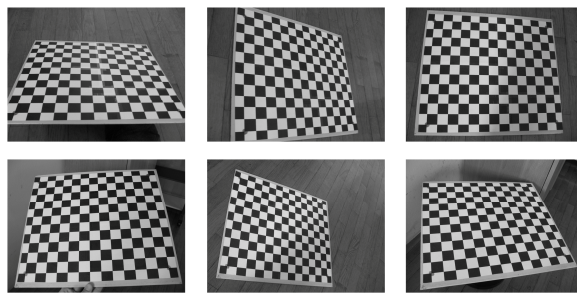
Figure 1. Barrel distortion (middle) and pincushion distortion (right).

3 Kalibracija in model distorzije

Napako distorzije v slikah lahko odpravimo matematično. V ta namen moramo poznati koeficiente distorzije, ki jih izračunamo s postopkom kalibracije

kamere. V literaturi najdemo več metod kalibracije, večini pa je skupno kalibracijsko polje – mreža točk z znanimi koordinatami. Na podlagi znanih dejanskih koordinat točk kalibracijskega polja in na zajetih slikah izmerjenih koordinat točk istega polja izračunamo koeficiente radialne in tangencialne distorzije.

Postopek kalibracije smo izvedli ločeno za obe kameri stereoskopskega sistema (kameri tipa Canon PowerShot A640). Pri tem smo se poslužili prosto dostopnega orodja za kalibracijo kamer »Camera Calibration Toolbox for Matlab« [7]; S posamezno kamero smo zajeli 20 slik kalibracijskega polja (tabla z vzorcem šahovnice) v različnih orientacijah. Znotraj kalibracijskega polja smo na zajetih slikah poiskali kalibracijske točke (presečišča belih in črnih polj). Dejanske koordinate točk kalibracijskega polja smo definirali z velikostjo in številom polj šahovnice.



Slika 2: Slike kalibracijske table

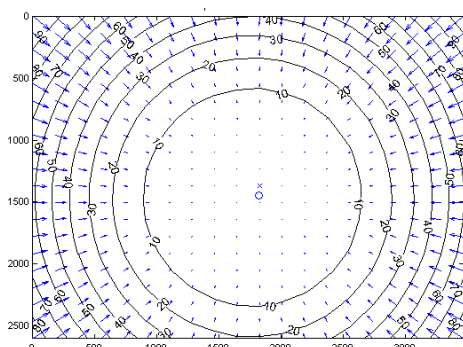
Figure 2. Calibration board taken in six different orientations.

Za opis distorzije smo uporabili v orodju privzeti Brownov »Plumb Bob« model distorzije:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} = (1 + k_c(1)r^2 + k_c(2)r^4 + k_c(5)r^6) \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2k_c(3)xy + k_c(4)(r^2 + 2x^2) \\ k_c(3)(r^2 + 2y^2) + 2k_c(4)xy \end{bmatrix}, \quad (1)$$

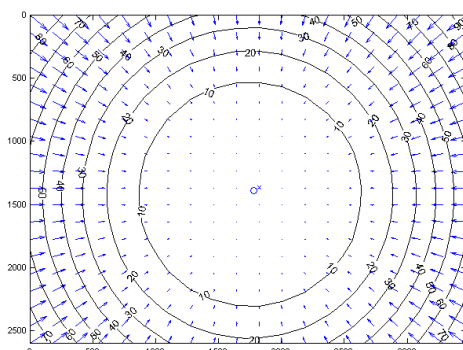
kjer so k_c parametri distorzije, $[x_d \ y_d]$ koordinate »popačene« točke, $[x \ y]$ koordinate »nepopačene« točke in $r^2 = x^2 + y^2$. Prvi del enačbe predstavlja radialno komponento, drugi del pa tangencialno komponento distorzije. $k_c(1)$, $k_c(2)$ in $k_c(5)$ so parametri radialne distorzije, $k_c(3)$ in $k_c(4)$ pa parametra tangencialne distorzije. Na podlagi modela (1) vpliv distorzije na slikovne točke lahko prikažemo grafično (sliki 3 in 4). Križec na grafikonih je matematično središče slike, krogec pa središče radialne distorzije. Puščice prikazujejo premik slikovnih točk zaradi distorzije. Velikost distorzijske napake je v sredinskem delu slike na območju do 10 slikovnih točk, proti robovom slike pa naraste do 90 slikovnih točk. Iz grafikonov je razvidno, da je geometrijsko popačenje slik pri našem

modelu kamere veliko. Vpliv geometrijskega popačenja na izračunano razdaljo je analizirano v nadaljevanju.



Slika 3: Grafični prikaz distorzije leve kamere

Figure 3. Vizualizing distortion of the left camera.



Slika 4: Grafični prikaz distorzije desne kamere

Figure 4. Vizualizing distortion of the right camera.

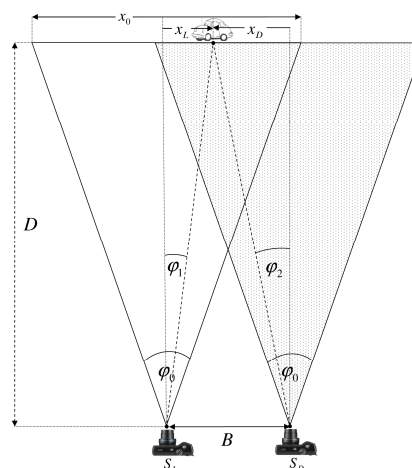
4 Vpliv distorzije na izračunane razdalje

Razdalje izračunavamo s pomočjo aplikacije »STEDIMAT« (»STEReo DIStance MeAsuring Tool«). Aplikacija je bila zgrajena v programskem paketu Matlab in prevedena s pomočjo orodja Matlab Compiler. Uporabniški vmesnik aplikacije Stedimat je prikazan na sliki 6.

Razdalja med kamero in poljubnim objektom v prostoru se izračunava na podlagi razlike med lokacijama istega objekta na levi in desni stereoskopski sliki ter dodatnih informacij o stereoskopskem sistemu (fizična razdalja med kamerama, horizontalni zorni kot kamere itd.) [5]. Trenutna verzija aplikacije omogoča »offline« obdelavo na terenu zajetih slik. Na izbrani levi sliki določimo objekt, katerega oddaljenost želimo izračunati. Lokalizacija na levi sliki izbranega objekta se na desni sliki izvede avtomatsko, poteka pa v dveh stopnjah. Primarno iskanje se izvede v horizontalni smeri. Rešitev slednjega je izhodišče za sekundarno iskanje, ki v manjšem obsegu poteka v dveh smereh: v horizontalni in vertikalni. Na podlagi razlik položaja izbranega objekta na levi in desni sliki, izračunamo končno razdaljo do objekta:

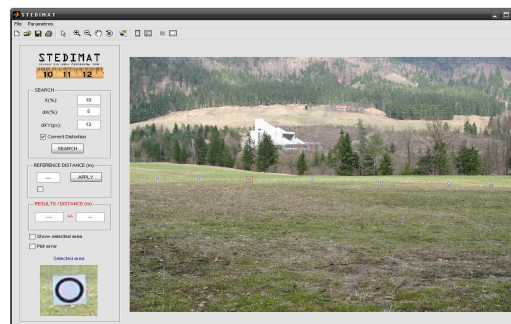
$$D = \frac{Bx_0}{2 \tan\left(\frac{\varphi_0}{2}\right)(x_L - x_D)} \quad (2)$$

kjer B pomeni razdaljo med kamerama, φ_0 horizontalni zorni kot kamere, x_0 širino zajetih slik (v slikovnih točkah), $x_L - x_D$ pa razliko lokacij izbranega objekta med levo in desno sliko (slika 5).



Slika 5: Shema stereoskopskega sistema

Figure 5. Scheme of stereoscopic system



Slika 6: Uporabniški vmesnik aplikacije Stedimat

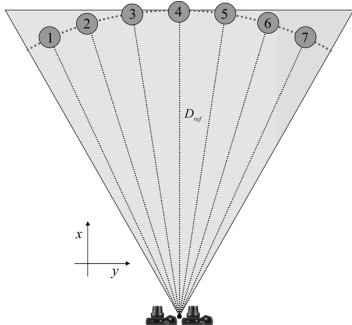
Figure 6. Stedimat (user interface).

V nadaljevanju smo na podlagi izbranega »Plumb Bob« modela distorzije in parametrov distorzije v aplikacijo Stedimat vgradili funkcijo odpravljanja napake distorzije. Slednje je treba za posamezno razdaljo uporabiti samo v dveh točkah, in sicer v točki izbranega objekta leve slike in v točki najdenega objekta desne slike. Napaka distorzije se tako samodejno upošteva pri izračunu razdalje. Uspešnost delovanja funkcije za odpravljanje distorzije smo preizkusili na množici tesnih slik.

4.1 Testne slike in rezultati

Za zajem testnih slik smo uporabili stereoskopski sistem dveh kamer Canon PowerShot A640. Slike smo zajeli pri največji resoluciji desetih milijonov slikovnih točk (3648x2736) in najmanjši goriščni razdalji (35 mm). Velikost stereoskopke baze je bila konstantna (56 cm). Na posameznem stereoskopskem paru slik smo zajeli 7 testnih tablic, razporejenih na enaki referenčni oddaljenosti (D_{ref}) od stereoskopskega sistema. Tablice smo razporedili tako, da so se znotraj celotnega horizontalnega zornega polja stereoskopskega sistema nahajale čim bolj enakomerno. Shema razporeditve testnih tablic je prikazana na sliki 7. Postavitev tablic smo zajeli pri štirih različnih oddaljenostih, in sicer 30, 40, 50 in 60 metrov od stereoskopskega sistema. Pri tem je treba opozoriti, da smo tablice namestili ročno in s tem že takoj vnesli določena odstopanja od referenčne razdalje ($\Delta D_{ref}=0.4$ m).

Razdaljo do posamezne tablice smo izračunali dvakrat. V prvem primeru smo za izračun uporabili originalne, geometrijsko popačene stereoskopske slike. V drugem primeru smo pri izračunu razdalje dodatno aktivirali vgrajeno funkcijo odpravljanja napake distorzije. Zaradi centralne lege tablice 4 smo slednjo izbrali za referenčni objekt, ki se nahaja na referenčni razdalji (D_{ref}).



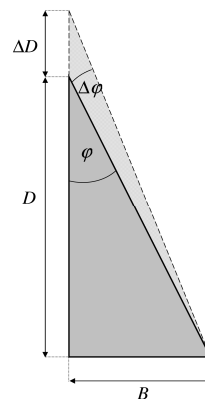
Slika 7: Shema razporeditve testnih tablic na oddaljenosti D_{ref} od stereoskopskega sistema

Figure 7. Schematic arrangements of test objects

Izračunane razdalje za posamezne testne objekte (tablice) so predstavljene v tabelah 1-4. Na slikah 9-12 so rezultati predstavljeni tudi grafično. Črtkane krivulje na grafikonih predstavljajo izračunane razdalje brez upoštevanja napake distorzije, polne krivulje pa izračunane razdalje z odpravljenjo napake distorzije. Ker lokalizacija izbranega objekta leve slike na desni sliki poteka po korakih ene slikovne točke, za posamezni izračun podajamo tudi napako razdalje zaradi lokalizacije objekta (za \pm eno slikovno točko):

$$\Delta D = \frac{D^2}{B} \tan \Delta \varphi, \quad (3)$$

kjer je $\Delta \varphi$ horizontalni zorni kot, ki pripada eni slikovni točki (slika 8).



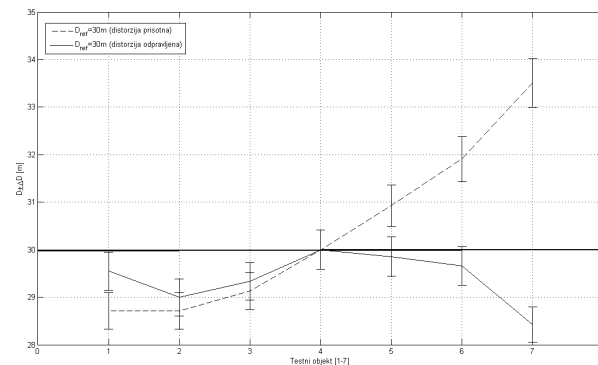
Slika 8: Napaka razdalje zaradi napačne lokalizacije objekta

Figure 8. Distance error caused by the positioning error

Tabela 1: Izračunane razdalje za testne objekte na oddaljenosti 30 metrov

Table 1: Calculated distances for 30-meter distant test objects

Testni objekt	Prisotna distorzija $D_1 \pm \Delta D_1$ [m]	Odpravljena distorzija $D_2 \pm \Delta D_2$ [m]
1	28,71 \pm 0,38	29,55 \pm 0,40
2	28,71 \pm 0,38	29,00 \pm 0,39
3	29,13 \pm 0,39	29,34 \pm 0,40
4	30,00 \pm 0,42	30,00 \pm 0,42
5	30,93 \pm 0,44	29,86 \pm 0,41
6	31,91 \pm 0,47	29,66 \pm 0,41
7	33,51 \pm 0,52	28,42 \pm 0,37



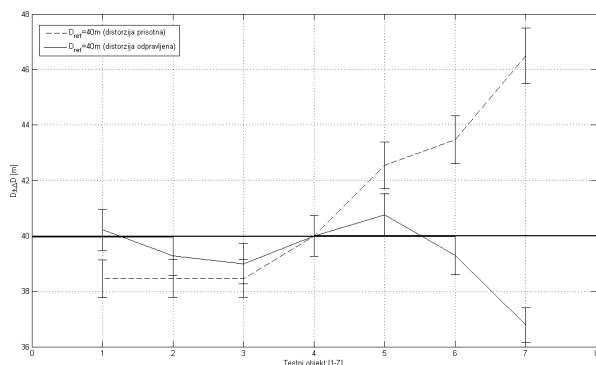
Slika 9: Izračunane razdalje za testne objekte na oddaljenosti 30 metrov

Figure 9: Calculated distances for 30-meter distant test objects

Tabela 2: Izračunane razdalje za testne objekte na oddaljenosti 40 metrov

Table 2: Calculated distances for 40-meter distant test objects

Testni objekt	Prisotna distorzija $D_1 \pm \Delta D_1$ [m]	Odpravljena distorzija $D_2 \pm \Delta D_2$ [m]
1	38,46±0,68	40,22±0,75
2	38,47±0,68	39,29±0,71
3	38,47±1,68	39,01±0,70
4	40,00±0,74	40,00±0,74
5	42,55±0,84	40,75±0,77
6	43,47±0,87	39,31±0,71
7	46,49±1,00	36,79±0,62



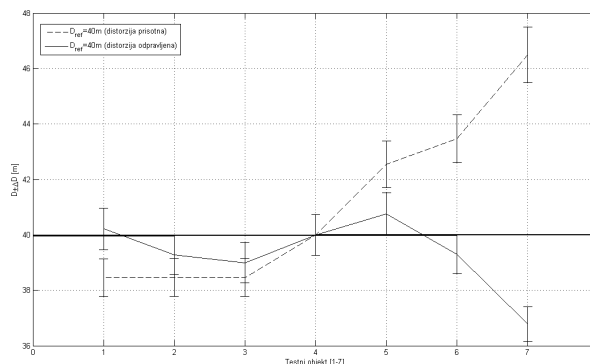
Slika 10: Izračunane razdalje za testne objekte na oddaljenosti 40 metrov

Figure 10: Calculated distances for 40-meter distant test objects

Tabela 3: Izračunane razdalje za testne objekte na oddaljenosti 50 metrov

Table 3: Calculated distances for 50-meter distant test objects

Testni objekt	Prisotna distorzija $D_1 \pm \Delta D_1$ [m]	Odpravljena distorzija $D_2 \pm \Delta D_2$ [m]
1	46,52±1,00	49,06±1,11
2	46,52±1,00	47,79±1,05
3	47,62±1,05	48,52±1,07
4	50,00±1,15	50,00±1,15
5	54,04±1,35	51,42±1,22
6	57,12±1,51	50,53±1,18
7	64,47±1,92	48,83±1,10



Slika 11: Izračunane razdalje za testne objekte na oddaljenosti 50 metrov

Figure 11: Calculated distances for 50-meter distant test objects

5 Sklepne ugotovitve

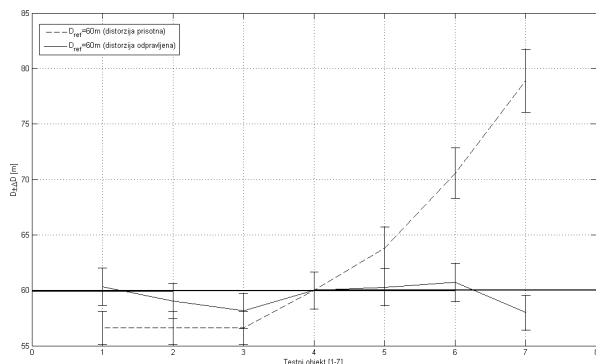
Napaka distorzije na uporabljenih kamerah tipa Canon PowerShot A640 je velika. V srednjem delu slik napaka zavzame vrednosti do 10 slikovnih točk, proti levemu in desnemu robu naraste na več kot 50 slikovnih točk, v kotih slike pa zavzame celo vrednosti do 90 slikovnih točk. Geometrijsko popačenje stereoskopskih slik na izračunano razdaljo vpliva manj, če je objekt v srednjem delu slike, kot če je slednji v robnih delih slike.

Vpliv distorzije na izračunane razdalje je razviden iz grafikonov na slikah 9–12. Zaradi neenakomerne razporeditve testnih objektov je napaka izračunane razdalje asimetrična. Testni objekti desne polovice slike (tablici 6 in 7) so bili umeščeni bližje desnemu robu kot testni objekti leve polovice slike (tablici 1 in 2) levemu robu. Absolutna napaka razdalj za tablici 6 in 7 je tako 4–8 slikovnih točk, za tablici 1 in 2 pa le 2–4 slikovne točke.

Tabela 4: Izračunane razdalje za testne objekte na oddaljenosti 60 metrov

Table 4: Calculated distances for 60-meter distant test objects

Testni objekt	Prisotna distorzija $D_1 \pm \Delta D_1$ [m]	Odpravljena distorzija $D_2 \pm \Delta D_2$ [m]
1	56,61±1,48	60,32±1,68
2	56,61±1,48	59,04±1,61
3	56,61±1,48	58,14±1,56
4	60,00±1,66	60,00±1,66
5	63,82±1,88	60,28±1,68
6	70,56±2,30	60,70±1,70
7	78,89±2,87	57,99±1,55



Slika 12: Izračunane razdalje za testne objekte na oddaljenosti 60 metrov

Figure 12: Calculated distances for 60-meter distant test objects

Tabela 5: Absolutne vrednosti napak razdalj v slikovnih točkah (prisotna distorzija)

Table 5: Absolute distance error in pixels (distorted image)

Testni objekt	$D_{ref}=30m$	$D_{ref}=40m$	$D_{ref}=50m$	$D_{ref}=60m$
1	3,4	2,3	3,5	2,3
2	3,4	2,2	3,5	2,3
3	2,2	2,2	2,3	2,3
4	0 (referenčna točka/reference point)			
5	2,1	3,1	3,0	2,0
6	4,1	4,0	4,7	4,6
7	6,8	6,5	7,5	6,6

Tabela 6: Absolutne vrednosti napak razdalj v slikovnih točkah (prisotna distorzija)

Table 6: Absolute distance error in pixels (undistorted image)

Testni objekt	$D_{ref}=30m$	$D_{ref}=40m$	$D_{ref}=50m$	$D_{ref}=60m$
1	1,1	0,3	0,8	0,2
2	2,6	1,0	2,1	0,6
3	1,7	1,4	1,4	1,2
4	0 (referenčna točka/reference point)			
5	0,4	1,0	1,2	0,2
6	0,8	1,0	0,5	0,4
7	4,2	5,2	1,1	1,3

Z uporabo funkcije odpravljanja distorzije se napaka izračunane razdalje izrazito zmanjša. Slednja se za večino testnih objektov tako nahaja znotraj tolerančnega območja 1–2 slikovnih točk. Pri tem nismo upoštevali napake, ki jo vnesemo z ročnim umeščanjem testnih objektov (ΔD_{ref}). Brownov »Plumb Bob« model distorzije se izkaže za učinkovitega.

Kljub upoštevanju napake distorzije pri skrajno desnem testnem objektu opazimo večje odstopanje od referenčne razdalje (5 slikovnih točk). Razlog za to bi

bil lahko nedosleden model distorzije, ki je sicer natančen v večjem delu slike, ne pa tudi na robnih območjih. Poudariti je treba, da so bile kalibracijske točke, ki so bile uporabljene za izračun parametrov distorzije, večinoma umeščene v srednjem delu slike in le v manjšem obsegu tudi na robnih območjih (zaradi kvadratne oblike kalibracijske table je bilo slednje težje zajeti prek celotnega zornega polja obeh kamer). Kalibracijska tabla pravokotne oblike bi verjetno bolje služila svojemu namenu.

6 Literatura

- [1] D. Schulte: Welt der stereoskopie. <http://www.stereoskopie.com>. Pridobljeno dne 30.4.2008.
- [2] H. Walcher (1994): Position sensing: Angle and distance measurement for engineers, 2nd Ed. Oxford: Butterworth-Heinemann Ltd.
- [3] J. Carnicelli: Stereo vision: measuring object distance using pixel offset. <http://www.alexandria.nu/ai/blog/entry.asp?E=32>. Pridobljeno dne 29.11.2007.
- [4] J. Mrovlje, D. Vrančič (2008): Distance measuring based on stereoscopic pictures. V: Proceedings of the 9th International PhD Workshop on Systems and Control: young generation viewpoint. Izola, Slovenia: October 2008.
- [5] J. Perš, S. Kovačič (2002): Nonparametric, Model-Based Radial Lens Distortion Correction Using Tilted Camera Assumption. V: Proceedings of the Computer Vision Winter Workshop, 2002. Bad Aussee, Austria. pp.286-295.
- [6] T. Luhmann, H. Hastedt, W. Tecklenburg, (2006): Modelling of chromatic aberration for high-precision photogrammetry. V: ISPRS Symposium Commission V. Dresden: September 2006.
- [7] J.-Y. Bouguet: Camera Calibration Toolbox for Matlab. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc. Pridobljeno dne 22.4.2009.
- [8] M. Vidmar (2008): ABC sodobne stereofotografije z maloslikovnimi kamerami. Ljubljana: Cetera.
- [9] Woods A.: Image distortions and stereoscopic video systems. <http://www.3d.curtin.edu.au> Pridobljeno dne 21.12.2007.

Jernej Mrovlje je diplomiral leta 2008 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Od leta 2008 je zaposlen na Odseku za sisteme in vodenje na Inštitutu »Jožef Stefan« v Ljubljani.