

Ocena natančnosti sistema robotskega vida

Drago Torkar, Gregor Papa

Odsek za računalniške sisteme, Institut "Jožef Stefan", Jamova c. 39, 1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: drago.torkar@ijs.si, gregor.papa@ijs.si

Povzetek. Umerjeno povratnozančno vodenje industrijskih robotov v trirazsežnem(3D) prostoru še ni popolnoma zaživel v industrijskih aplikacijah. Za to obstaja več razlogov, med katerimi posebej omenjamo nepoznavanje in zato nezaupanje v tehnološke zmožnosti vizualnih sistemov vodenja. Natančnost in ponovljivost sta pomembna parametra pri načrtovanju vsakega dela z robotom, zato v tem članku predlagamo postopek za določitev natančnosti sistema robotskega stereovida v dvo- in trirazsežnem prostoru in predstavimo rezultate.

Ključne besede: vodenje robotov, umerjeno povratnozančno vodenje

Robot Vision Accuracy Estimation

Extended abstract. In the paper we describe a procedure for the accuracy estimation in a 2D and a 3D environment of a calibrated robot stereo vision system consisting of two identical 1 Megapixel cameras and present results of the evaluation.

Within the static 2D test, the IR-LED array was moved by a linear drive perpendicular to the camera optical axes and the increments in the image were measured. The purpose was to detect the smallest linear response in the image (see Figure 2). The IR-LED centroids were determined in two ways: on binary images and on grey-level images as centers of mass. During image grabbing, the array did not move thus eliminating any dynamic effects. We averaged the movement of centroids of 10 IR-LEDs in a sequence of 16 images and calculated the standard deviation to obtain accuracy confidence intervals (Table 1 and Figure 3).

The dynamic 2D test revealed the shape distortions in the images due to fast 2D movements of linear drive. We compared a few images of the IR-LED array taken during movement to the statically obtained ones which provided information of photo-center displacements and an estimation of the dynamic error (Table 2).

The static 3D accuracy evaluation was performed with two fully calibrated cameras in a stereo setup. Using a linear drive, the array of IR-LEDs was moved along the line in a 3D space with different increments and the smallest movement producing a linear response in the reconstructed 3D space was sought (Table 3 and Figure 4).

In the 3D dynamic test, we attached the IR-LED array to the wrist of an industrial robot. We dynamically guided it through some predefined points in space and simultaneously recorded the trajectory with fully calibrated stereo cameras. Then, we compared the reconstructed 3D points from images to the predefined points fed to the robot controller (Table 4).

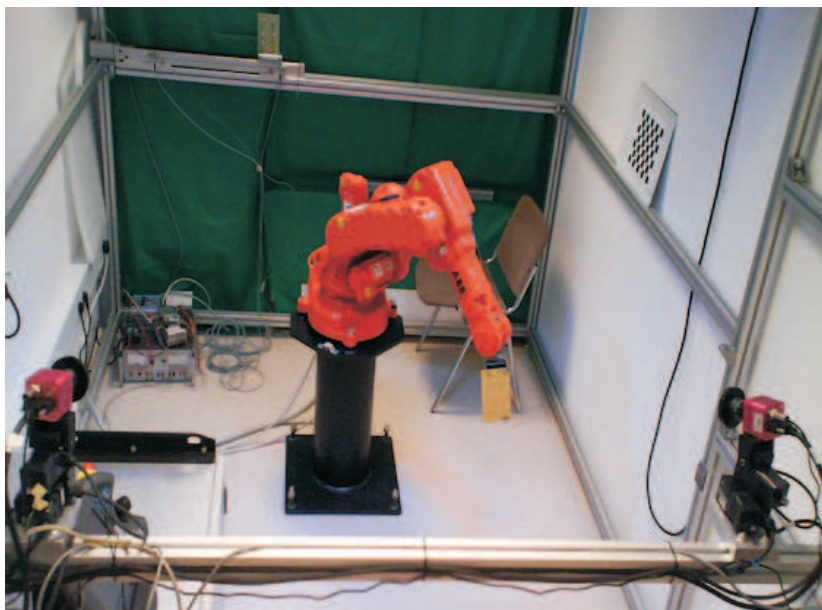
The obtained results show the accuracy 1/5 of a pixel in static 2D and 1/3 of a pixel in dynamic 2D conditions. In 3D, both the static and dynamic accuracy drop to 1/2 of a pixel.

Key words: Robot control, Calibrated visual servoing.

1 Uvod

V zadnjih desetletjih je vse več in več primerov uporabe robotov v industrijski proizvodnji, kar je posledično povzročilo povečane zahteve po robustnosti, prilagodljivosti in natančnosti. Odgovor na te zahteve je bil v številnih primerih podan s povečanjem mehanskih sposobnosti robotov. Za dosego mikrometrске pozicionirne natančnosti je bila povečana togost robotske roke, zmanjšana zračnost zglobov in uporabljeni precizni pogoni, kar pa je pogosto vodilo do načrtovalskih kompromisov, kot na primer zahteva za povečanje togosti in zmanjšanje vztrajnosti. To je privedlo do približevanja robu mehanskih zmožnosti, naraščanju cene in zmanjšanju tržne kompetitivnosti robotskih sistemov [1].

V zadnjem času je opaziti povečane napore izdelovalcev industrijskih robotskih sistemov za integracijo različnih senzorjev v sam sistem, kar zagotavlja povečanje natančnosti, fleksibilnosti in prilagodljivosti. Strojni vid je še vedno eden najperspektivnejših senzorjev [6] za uporabo v 3D povratnozančnem vodenju realnih industrijskih robotov [3]. To področje je bilo v raziskovalnem pogledu zadnji dve desetletji zelo aktivno, vendar šele zdaj doživlja prve praktične uporabne učinke v industriji [5] v nasprotju s strojnim vidom samim, ki je postal dobro razvita industrija v zadnjih letih [8]. Za to je več razlogov. Sistem robotskega vida mora zadostiti nekaterim zahtevam, ki ga razlikujejo npr. od merilnega sistema strojnega vida. Najprej je delovna razdalja kamer veliko večja, tudi nekaj metrov pri večjih robotih. Merjenje z visoko natančnostjo pri teh razdaljah je problem, saj zahteva veliko večjo ločljivost senzorjev, ki hitro preseže tehnološke in cenovne zmožnosti. Na primer, kamere z ločljivostjo 4 milijonov točk so danes v serijski proizvodnji, vendar si jih v številnih robotskih aplikacijah ne morejo privoščiti,



Slika 1. Testno okolje

Figure 1. Test environment

saj cena sistema vida, ki vključuje take kamere, že skoraj doseže ceno robota. Dinamika industrijskih procesov zahteva kamere z visoko hitrostjo generiranja slik, kar pa v povezavi z zahtevo po obdelavi slik v realnem času pomeni dodatno omejitev pri integraciji sistema. Naslednji velik problem je spremenljiva osvetlitev v nestrukturiranem industrijskem okolju, ki lahko močno oteži obdelavo slike.

Pri načrtovanju sistema vida za uporabo v robotski aplikaciji je posebej pomembno, da izberemo optimalno opremo, ki bo zagotavlja maksimalen učinek posameznih komponent. V tem članku predstavljamo postopek za določanje natančnosti umerjenega sistema stereovida v dvo- in trirazsežnem prostoru. Tak sistem je mogoče uporabiti za vizualno povratnozančno vodenje za natančno pozicioniranje centra robotskega orodja (TCP).

2 Metodologija

Izvedli smo štiri načine testiranja natančnosti: statični 2D-test, dinamični 2D-test, statični 3D-test in dinamični 3D-test. Pri vseh testih smo uporabili matriko desetih infrardečih diod LED (IR-LED), s čimer smo želeli preveriti primernost teh diod za označevanje in za kalibracijski vzorec pri robotskih vizualnih povratnozančnih aplikacijah.

Pri statičnem 2D-testu smo matriko IR-LED premikali z linearnim pogonskim vodilom pravokotno na optično os kamere in merili premike na zajeti sliki. Namen tega je bil poiskati najmanjši linearni odziv na sliki. Centroidi IR-LED so bili določeni na dva načina: na binarni sliki in na sivinski sliki kot masno središče. Med zajemom slike se matrika IR-LED ni premikala, s čimer smo izničili

morebitne napake, ki nastanejo zaradi premikanja med zajemanjem. Povprečili smo premike centroidov desetih IR-LED diod v sekvenci 16 slik in izračunali standardno deviacijo, ki določa interval zaupanja.

Pri dinamičnem 2D-testu smo preverjali popačenje oblik na slikah zaradi hitrih 2D-premikov linearnega gonila, na katerem je bila pritjena matrika diod IR-LED. Primerjali smo slike diod IR-LED, zajete med premikanjem, s statično zajetimi. Tako smo ocenili premike fotocentrov ter dinamično napako.

3D-test smo izvedli z dvema kalibriranimi kamerama v načinu stereo. Z uporabo linearnega gonila smo premikali matriko diod IR-LED v 3D-prostoru z različnimi velikostmi premikov. Iskali smo najmanjši premik, ki bi predstavljal linearni odziv in bi ga lahko uporabljali za 3D-rekonstrukcijo.

Pri dinamičnem 3D-testu smo namestili matriko diod IR-LED na zapestje industrijskega robota. Robota smo nato vodili prek vnaprej definiranih prostorskih točk ter posneli njegovo trajektorijo s stereo kamerama. Rekonstruirane 3D-točke smo primerjali z definiranimi točkami v robotskem krmilniku.

3 Testno okolje

Testno okolje (slika 1) sestavljajo:

- kamera PhotonFocus MV-D1024-80-CL-8 s senzorjem CMOS in frekvenco zajemanja 75 slik na sekundo (fps) pri polni resoluciji (1024×1024 točk),
- zajemalnik slik Active Silicon Phoenix-DIG48 PCI,

- matrika diod IR-LED (standardna deviacija natančnosti diod IR-LED je pod 0,007 točke [4]) na razdalji približno 2 m. Matrika je pritrjena na linearno vodilo Festo (DGE-25-550-SP) s ponovljivostjo +/-0,02 mm.

Pri statičnem 2D-testu se je matrika diod IR-LED premikala pravokotno na optično os. Razdalja med kamero in premikajočo se matriko je bila (v srednjem položaju) 195 cm; vidno polje kamere je bilo 220 cm×220 cm, kar pomeni, da je bila velikost točke 2,148 mm; Schneider-Kreuznach leče CINEGON 10mm/1,9F z IR filtrom (780 nm); odprtost zaslonke je bila 10,73 ms, čas za eno sliko pa 24,04 ms (oboje določeno eksperimentalno).

Pri dinamičnem 2D-testu so bile razmere enake kot pri statičnem testu, le da se je linearno vodilo z matriko diod IR-LED premikalo s hitrostjo 460 mm/s, čas odprtosti zaslonke pa je bil 1 ms.

Pri statičnem testu rekonstrukcije 3D sta bili razdalji leve in desne kamere do matrike diod IR-LED 205 cm; razdalja med optičnima centroma kamer je bila 123 cm; Schneider-Kreuznach leče CINEGON 10mm/1,9F z IR filtrom (780 nm); kalibracijsko območje: 342 × 333 točk; kalibracijski vzorec: 6 × 8 črno/belih kvadratov; kalibracijska metoda [7]; rekonstrukcijska metoda [2]. Rekonstrukcija je bila izvedena naknadno, stereo korendenca ni bila problematična, zaradi preproste geometrije matrike diod IR-LED.

Pri dinamičnem 3D-testu smo uporabili industrijskega robota ABB IRB 140. Kalibrirani stereo video sistem je bil postavljen približno 2 m od robota in kalibriran na zgoraj opisan način. Zapestje robota se je premikalo prek oglišč navideznega trikotnika z dolžino stranice približno 12 cm. Slike smo zajemali med premikanjem robota prek oglišč s približno hitrostjo 500 mm/s. Relativne razdalje rekonstruiranega trikotnika smo primerjali s stranicami trikotnika, dobljenimi in rekonstruiranimi v statičnih razmerah. Robotova izvorna ponovljivost je 0,03 mm, njegova linearna točnost pa 0,01 mm.

4 Rezultati

4.1 Testiranje natančnosti 2D

Podani so rezultati testiranja, kjer smo upoštevali tako binarne kakor tudi sivinske centroide. Za vsak premik sta predstavljena dva grafa.

Podana je razlika v točkah med začetno sliko in zaporednimi slikami (na zaporednih položajih). Pri tem je za vsak položaj izračunan povprečen zamik vseh desetih markerjev (diod IR-LED), pri čemer je položaj vsakega izračunan kot povprečen položaj v sekvenci 16 slik, zajetih v statičnem načinu v vsakem položaju. Črte v grafih bi bile v idealnem primeru popolnoma ravne.

Rezultati premikov 0,01 mm, 0,1 mm in 1 mm za 2D-test so predstavljeni na sliki 2.

Slika 3 predstavlja normalizirane razlike pri korakih premikanja za sivinske slike. Normalizacija je izvedena tako, da razliko točk v dveh sosednjih položajih delimo s širino celotnega intervala. Črtkana črta predstavlja idealni odziv.

Nad izmerjenimi podatki je bil uporabljen linearni regresijski model in izračunana vrednost kvadrata Pearsonovega produkta R^2 (enačba 1) za določitev kakovosti ujemanja. Rezultati so predstavljeni v tabeli 1 za 2D-teste in v tabeli 3 za 3D-teste. Vrednost R^2 lahko interpretiramo tudi kot razmerje variance niza meritev y glede na varianco niza pravih vrednosti x (glej enačbo 1) izračunano iz vseh meritev (N); kjer vrednost 1 pomeni popolno ujemanje, nižje vrednosti pa nakazujejo določeno odstopanje.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y - \bar{y})^2}} \right)^2 \quad (1)$$

premik (mm)	standardna deviacija (mm)		R^2	
	binarno	sivine	binarno	sivine
0,01	0,045	0,027	0,4286	0,9825
0,1	0,090	0,042	0,8727	0,9937
1	0,152	0,069	0,9971	0,9999

Tabela 1. Primerjava standardnih deviacij in R^2 vrednosti za različne velikosti premikov v 2D

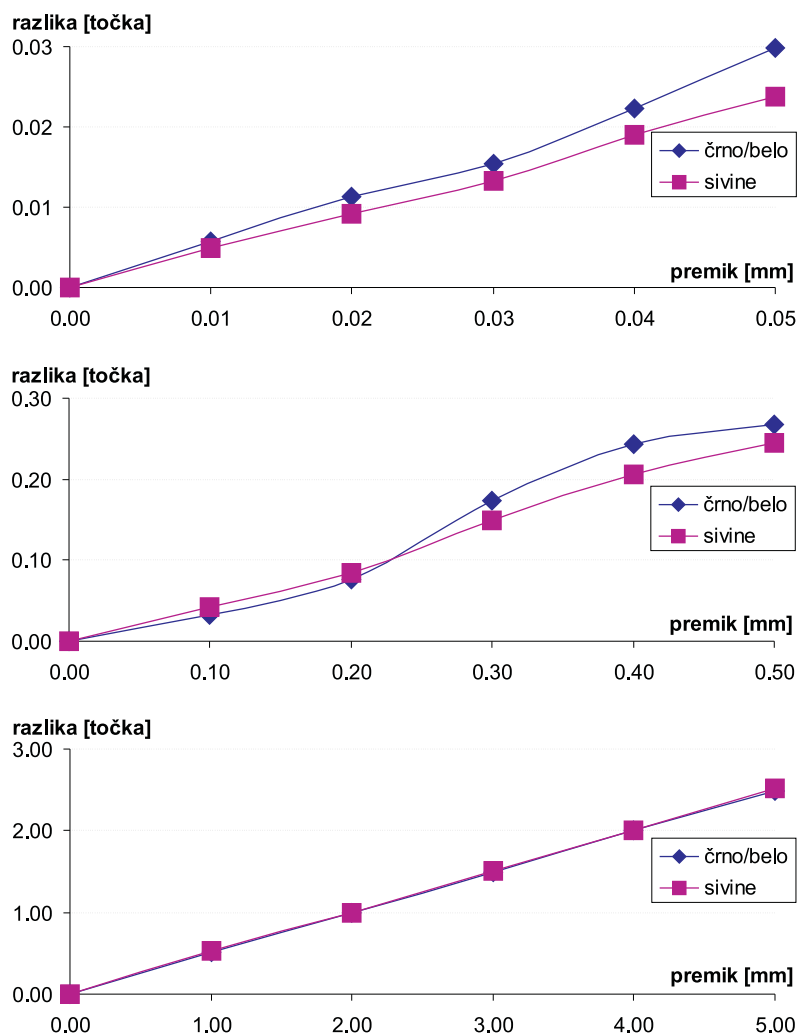
Table 1. Comparison of standard deviations and R^2 values for different moving increments in 2D

Upošteva empirično določen prag 0,994 za R^2 in podatke v tabeli 1, lahko sklepamo, da je mogoče zaznati premike premikajočega objekta v razponu 0,1 mm - 1 mm, kar ovrednotimo z velikostnim razredom 1/5 točke. Ocena je uporabna za hitro določanje natančnosti sorodnih sistemov vida. Vrednost praga je določena tako, da zagotavlja zadovoljivo dober približek linearnega regresijskega modela in obenem zagotavlja uporabne rezultate meritev.

Dinamični 2D-test kaže razliko centrov markerjev (diod IR-LED) in velikost markerjev med statično in dinamično (linearno vodilo se premika s polno hitrostjo) zajetimi slikami. Poleg zamika centrov so površine markerjev na dinamično zajetih slikah nekoliko večje kot na statično zajetih slikah.

Tabela 2 predstavlja položaj centrov (X, Y) markerjev ter razlike v velikostih (širina, višina, površina) markerjev za statično in dinamično zajete slike.

Glede na rezultate iz tabele 2 je natančnost pozicioniranja v smeri osi x dinamično zajetih slik v primerjavi



Slika 2. Razlike v točkah za premike 0,01 mm (zgoraj), 0,1 mm (sredina) in 1 mm (spodaj)
Figure 2. Pixel difference for 0.01 mm (top), 0.1 mm (middle), and 1 mm (bottom) increments

	X	Y	širina	višina	površina
statično	484,445	437,992	6	6	27
dinamično	484,724	437,640	7	6	32

Tabela 2. Primerjava slik zajetih v statičnem in dinamičnem načinu (vse mere so v slikovnih elementih)
Table 2. Comparison of the images grabbed in a static and dynamic mode (all measurements are in pixels)

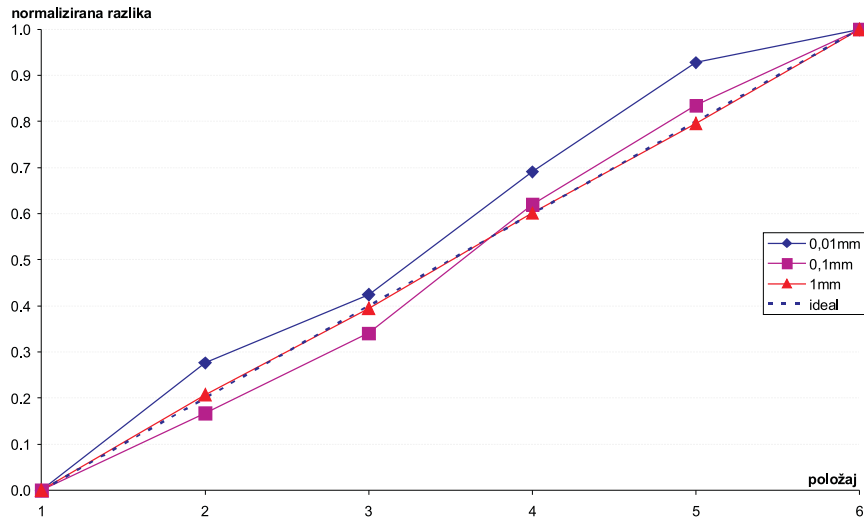
s statično zajetimi približno 1/3 točke. To je posledica zamika centra markerja med premikanjem linearnega vodila.

4.2 Testiranje natančnosti 3D

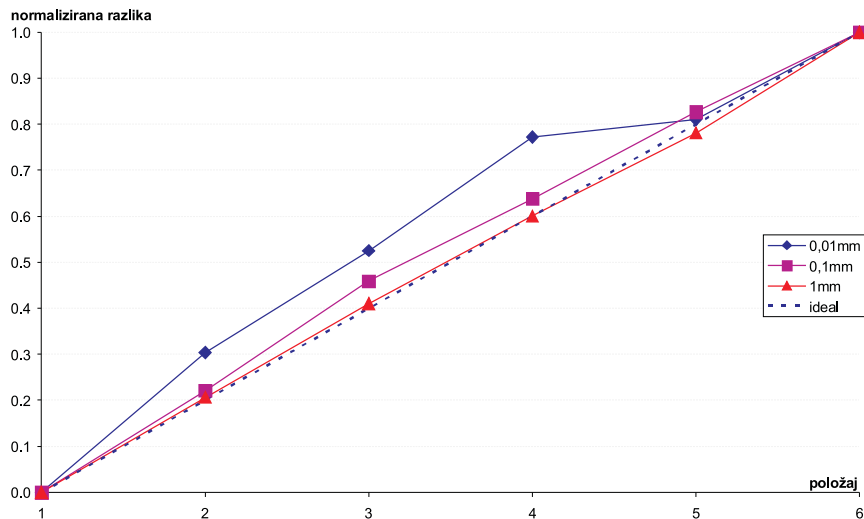
Statično relativno natančnost 3D-rekonstrukcije smo testirali s premikanjem matrike diod IR-LED na linearnem vodilu. Pri testu smo uporabili dve kalibrirani kameri Photonfocus, usmerjeni na matriko diod IR-LED. Matriko smo natančno premikali s serijami različnih korakov

(0,01 mm, 0,1 mm in 1 mm). Za vseh 10 diod smo v zajetih slikah določili masni center v vsakem položaju. Nato smo izračunali relativno 3D-pot in jo primerjali z dejansko potjo linearnega vodila. Zaradi boljših rezultatov pri statičnem 2D-testu (slika 3 in tabela 1) smo tokrat upoštevali samo sivinske slike. Premiki za 0,01 mm, 0,1 mm in 1 mm so predstavljeni na sliki 4.

Natančnost v 3D- je nižja kakor v 2D-primeru zaradi kalibracijskih in rekonstrukcijskih napak. Glede na dobljene rezultate (tabela 3) je 3D-natančnost približno 1/2 točke.



Slika 3. Normalizirane razlike za sivinske slike za vsak položaj pri vsakem koraku premika
 Figure 3. Normalized differences of grey-level images for each position comparing different increments



Slika 4. Razlika točk pri 3D-rekonstrukciji
 Figure 4. Pixel difference in the 3D reconstruction

premik (mm)	standardna deviacija (mm)	R^2
0,01	0,058	0,7806
0,1	0,111	0,9315
1	0,140	0,9974

Tabela 3. Primerjava standardnih deviacij in R^2 vrednosti za različne velikosti premikov v 3D

Table 3. Comparison of standard deviations and R^2 values for different moving increments in 3D

struiranega iz dinamično zajetih in statično zajetih slik. Primerjali smo 10 trikotnikov, dobljenih z vsako izmed diod v matriki. V tabeli so navedene povprečne dolžine stranic in njihova standardna deviacija.

Opazili smo precejšnjo standardno deviacijo pri dolžinah stranic trikotnika, kar smo pripisali popačenju leč, saj je skoraj enaka pri statičnem ali dinamičnem načinu zajema slik. Rekonstrukcija slik v dinamičnem načinu samo malenkostno odstopa od slik, zajetih in rekonstruiranih v statičnem načinu.

Tabela 4 predstavlja rezultate dinamičnega 3D-testa, kjer smo primerjali stranice a , b in c trikotnika, rekon-

	\bar{a}	σ	\bar{b}	σ	\bar{c}	σ
statično	193,04	12,46	89,23	2,77	167,84	12,18
dinamično	193,51	12,43	89,03	2,77	167,52	12,03

Tabela 4. Primerjava statično in dinamično zajetih trikotnikov (vse mere so v mm)
Table 4. Comparison of static and dynamic triangles (all measurements are in mm)

5 Sklep

Ocenili smo 2D- in 3D-natančnost sistema robotskega vida, sestavljenega iz dveh enakih kamer z ločljivostjo 1 milijon točk. Meritve so pokazale, da je statična 2D natančnost (brez dodatnega subtočkovnega procesiranja) in kompenzacije napak leč približno enaka 1/5 slikovnega elementa, ki pa se zmanjša na 1/2 slikovnega elementa, če so pozicije rekonstruirane v 3D.

V dinamičnem primeru je analiza pokazala, da ne pride do dodatnih napak glede na statični primer, če se markerji gibljejo v 2D ali v 3D prostoru. Tako ostaja natančnost za hitrosti, ki jih ponavadi dosegajo industrijski roboti, enaka kot pri statični analizi.

6 Zahvala

Delo je bilo izvedeno v okviru projekta Arflex (IST-NMP2-016680) iz 6. OP, ki ga je sofinancirala Evropska komisija.

7 Literatura

- [1] Arflex European FP6 project official home page: <http://www.arflexproject.eu>
- [2] O. Faugeras, *Three-Dimensional Computer Vision: A geometric Viewpoint*, The MIT Press, 1992.
- [3] S. Hutchinson, G. Hager, P.I. Corke, A tutorial on visual servo control, *Yale University Technical Report, RR-1068*, 1995.
- [4] G. Papa, D. Torkar, Investigation of LEDs with good repeatability for robotic active marker systems, *Jožef Stefan Institute technical report, No. 9368*, 2006.
- [5] D. Robson, Robots with eyes, *Imaging and machine vision-Europe*, Vol. 17, 2006, pp. 30-31.
- [6] A. Ruf, R. Horaud, Visual servoing of robot manipulators, Part I: Projective kinematics, *INRIA technical report, No. 3670*, 1999.
- [7] Z. Zhang, A flexible new Technique for Camera Calibration, *Technical report, MSRTR-98-71*, 1998.
- [8] N. Zuech, *Understanding and applying machine vision*, Marcel Dekker Inc., 2000.

Drago Torkar je raziskovalec na Institutu "Jožef Stefan". Ukvarja se z raziskavami vizualnega vodenja robotov, modeliranjem industrijskih procesov z nevronske mreže in s problemi strojnega vida. Njegovi rezultati so objavljeni v zbornikih mednarodnih konferenc in mednarodnih revijah.

Gregor Papa je raziskovalec na Institutu "Jožef Stefan". Raziskuje in deluje na področjih optimizacijskih tehnik, metahevrstičnih algoritmov, visokonivojske sinteze digitalnih vezij, strojnih implementacij kompleksnih algoritmov in izboljšav industrijskih izdelkov. Njegova znanstvena dela so objavljena v zbornikih mednarodnih konferenc, mednarodnih revijah in knjigah.