

Analiza izvedljivosti avtomatizacije poravnave žarilnih nitk z uporabo strojnega vida pri izdelavi avtomobilskih žarnic

Gregor Klančar, Marko Lepetič, Sašo Blažič
Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko
Tržaška 25, SI-1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: gregor.klancar@fe.uni-lj.si, marko.lepetic@fe.uni-lj.si, saso.blazic@fe.uni-lj.si

Feasibility study of car bulb filament alignment automation by computer vision

Abstract: A methodology for alignment of filament to the contacts cap of the bulb in car bulbs production is presented. The set-up consists of three monochromatic cameras each measuring the projection of bulb filament to its CCD sensor. They are arranged in a plane at different angles to each other. The mathematic background together with fault sensitivity of suggested solution is analysed. It is shown that reliable and robust automation can be achieved.

1 Uvod

Strojni vid je dandanes čedalje bolj navzoč v avtomatizaciji industrijskih procesov. Predvsem ga zasledimo tam, kjer je težko ali nemogoče izvesti avtomatizacijo s preprostimi oziroma klasični senzori, ki sicer še vedno veljajo za zanesljivejše. Strojni vid se tako pogosto uporablja pri končni kontroli izdelkov, njihove oblike, ustrezne konfiguracije, pravilnosti in napak pri izdelavi [3,4].

V prispevku bomo prikazali primer uporabe strojnega vida pri izdelavi avtomobilskih žarnic (slika 1). Predstavljeni so rezultati študije omenjene avtomatizacije v tovarni žarnic Elvelux Iskra d.o.o.. Izdelana žarnica mora zadostiti številnim kakovostnim kriterijem, da jo proizvajalec lahko proda kot prvorazredno. Pomemben kakovostni kriterij žarnice je tudi kot, ki ga žarilna nitka oklepa z izboklinami kovinske kapice. Ta kot je predpisan, odstopa pa lahko največ za 10° . Trenutna proizvodna

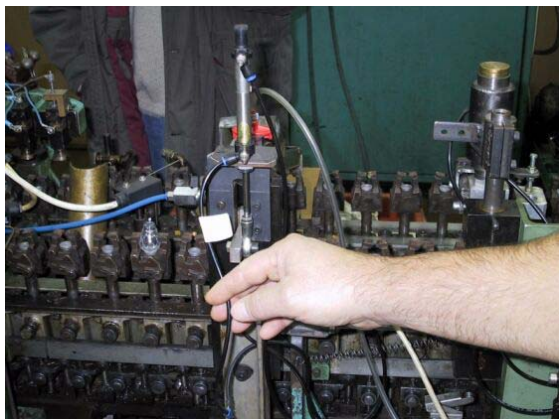
tehnologija ne zagotavlja tako velike točnosti, tako da se je podjetje odločilo preskusiti možnost avtomatizacije, ki bi bila podprta s strojnim vidom. Namen tega članka je pokazati, da bi bila takšna rešitev ustrezna. Pokazali bomo, da lahko s primerno postavitvijo kamer zadostimo tolerančnim zahtevam glede kota žarilne nitke.

Pred montažo kapice je tako potrebno izmeriti kot žarilne nitke, nato pa kapico montirati zavrteno za izmerjen kot. Meritev kota nitke je izvedena z uporabo strojnega vida.

2 Princip merjenja zasuka žarilne nitke

Razpoznavanje slike običajno poteka v dveh korakih [2]. Najprej je na sliki potrebno poiskati ustrezne slikovne elemente, nato pa jih ustrezno obdelati. V obeh fazah se uporabljajo različne metode. Izbira je odvisna od narave problema. Najpogostejša metoda za prepoznavanje slikovnih elementov je upravljanje [4]. V določenih primerih je sliko potrebno predhodno obdelati (odštevanje slik, odvajanje po x in y koordinati). Rezultat upravljanja je binarna slika, ki ima enako ločljivost kot osnovna slika, posamezen slikovni element binarne slike pa ima lahko le vrednosti 0 ali 1. Pri nadaljnji obdelavi se upoštevajo le slikovni elementi, ki imajo vrednost 1. Število slikovnih elementov je veliko, količina informacije, ki jo nosi posamezen slikovni element pa je majhna (1 bit). Zaradi tega so za nadaljnjo obdelavo primerne predvsem statistične metode, kot so histogram, prileganje po metodi najmanjših kvadratov in podobne. Iz povedanega sledi, da

je obdelava slike precej zapleten postopek in zaradi tega včasih tudi manj zanesljiv.



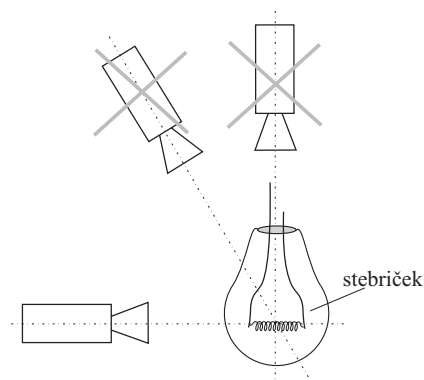
Slika 1: Del linije pri izdelavi žarnic

Da bi zanesljivost povečali, moramo sistem zasnovati tako, da so slike, ki jih zajame kamera čim preprostejše. Slika naj vsebuje le tisti segment, ki je zanimiv za obdelavo (slika 2) in naj bo čim bolj kontrastna.



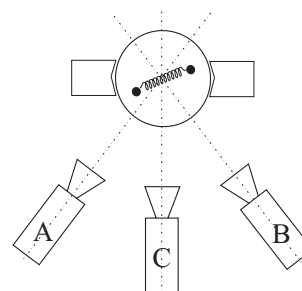
Slika 2: Detajlni pogled na žarnico in njeno ležišče

Nezaželeni so tudi vsi odsevi in sence. Navpična postavitvev ni možna, ker iz tega položaja nitke sploh ni mogoče videti zaradi staljenega stekla na vrhu žarnice (slika 3). Postavitvev pod kotom, na katero tudi zelo hitro pomislimo, pa tudi ni primerna, ker ni dovolj kontrastna. V ozadju nitke se namreč nahaja del prijemala, ki je podobne barve kot nitka in je zato ne moremo ločiti od ozadja. Edina možna postavitvev kamer v našem primeru je vodoravna.



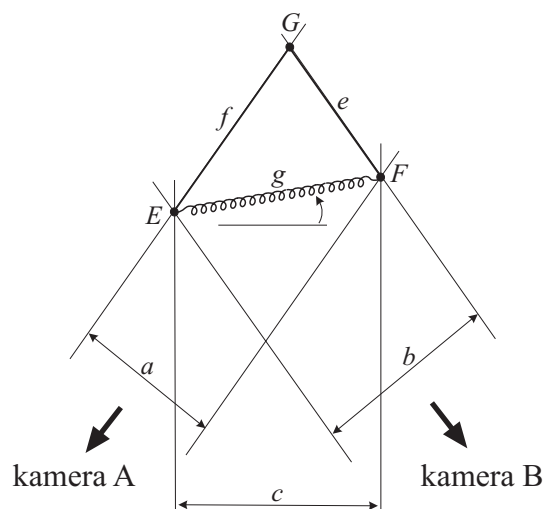
Slika 3: Možni pogledi kamer

Namesto nitke pri tem opazujemo stebričke, na katere je nitka pritrjena. V ozadju namestimo svetel zaslon, tako da stebrička izstopata iz svetlega ozadja. Da bi iz horizontalnega pogleda določili kot nitke, moramo uporabiti tri kamere, kot kaže slika 4.



Slika 4: Razporeditev kamer v isti ravnini

Za izračun pravzaprav potrebujemo le dve kameri, vendar pri tem dobimo dve možni rešitvi. Tretja kamera (slika 3, kamera C) to nedoločenost odpravi.



Slika 5: Prikaz oznak merilnega mesta

Najprej si oglejmo trikotnik s slike 5. V ogliščih E in F se nahajata stebrička, na katera je pritrjena žarilna nitka. Velja sinusni izrek:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{e}{f}. \quad (1)$$

Vsota notranjih kotov trikotnika je 180° , torej lahko napišemo:

$$\begin{aligned} f \sin \alpha &= e \sin(180^\circ - \alpha - \gamma) \\ &= e \sin(\alpha + \gamma), \\ &= e \sin \alpha \cos \gamma + e \cos \alpha \sin \gamma \end{aligned} \quad (2)$$

od koder sledi

$$\sin \alpha (f - e \cos \gamma) = e \cos \alpha \sin \gamma \quad (3)$$

in

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{e \sin \gamma}{f - e \cos \gamma} = \frac{\frac{e}{f} \sin \gamma}{1 - \frac{e}{f} \cos \gamma}. \quad (4)$$

Kot α je nato

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{\frac{e}{f} \sin \gamma}{1 - \frac{e}{f} \cos \gamma}, \quad (5)$$

in kot φ , ki podaja izračunani zasuk žarilne nitke, je

$$\varphi = 90^\circ - \frac{\gamma}{2} - \alpha. \quad (6)$$

Kot γ (kot med kamerama A in B) je konstanten, torej je potrebno izmeriti le razmerje stranic e in f . S kamerama A in B pravzaprav izmerimo projekciji stranic a in b , kot kaže slika 5. Velja:

$$e = \frac{a}{\sin(\gamma)} \quad \text{in} \quad f = \frac{b}{\sin(\gamma)} \quad (7)$$

in sledi:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{\frac{a}{b} \sin \gamma}{1 - \frac{a}{b} \cos \gamma}. \quad (8)$$

Enačbe (1)-(8) veljajo, če se kot φ nahaja med $-90^\circ + \frac{\gamma}{2}$ in $90^\circ - \frac{\gamma}{2}$. Ko φ preseže te meje,

je potrebno trikotnik s slike 5 narisati na novo in ponoviti izpeljavo. Razmerje $\frac{a}{b}$ vstavimo v enačbo (8) z negativno vrednostjo, torej je rezultat:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{\left(-\frac{a}{b}\right) \sin \gamma}{1 - \left(-\frac{a}{b}\right) \cos \gamma}. \quad (9)$$

Ko izmerimo a in b , torej ne vemo ali moramo upoštevati razmerje kot pozitivno ali kot negativno. Za to odločitev uporabimo meritev kamere C. Če uporabimo kosinusni izrek, lahko izračunamo stranico g :

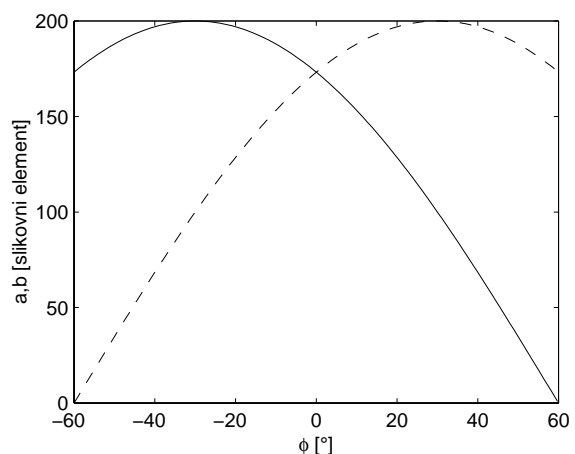
$$\begin{aligned} g &= \sqrt{e^2 + f^2 - 2ef \cos(\gamma)} \\ &= \frac{1}{b \sin(\gamma)} \sqrt{\left(\frac{a}{b}\right)^2 + 1 - 2\left(\frac{a}{b}\right) \cos \gamma} \end{aligned} \quad (10)$$

Ker razmerje $\frac{a}{b}$ v enačbi (10) enkrat vstavimo kot pozitivno drugič pa kot negativno (podobno kot v enačbah (8) in (9)). Tako dobimo dva možna para (g, φ) . Odločimo se za tisto rešitev, ki bolj ustreza enačbi:

$$c = g \cos(\varphi), \quad (11)$$

kjer je c meritev kamere C.

Poteka meritev velikosti žarilne nitke na kameri A in B, torej projekciji a in b glede na kot zasuka žarilne nitke prikazuje slika 6. Kjer je dejanska dolžina žarilne nitke $g=200$ slikovnih elementov.



Slika 6: Velikost a in b glede na kot zasuka žarilne nitke ($\gamma=60^\circ$, $g=200$)

3 Analiza občutljivost na napake meritev

Izračunali smo kot nitke φ , sedaj pa se vprašajmo, kako točna je ta ocena, glede na pričakovano točnost a in b . Odstopanje [1] ocene kota $\Delta\varphi$ dobimo z

$$\Delta\varphi = \frac{\partial\varphi}{\partial a}\Delta a + \frac{\partial\varphi}{\partial b}\Delta b, \quad (12)$$

kjer sta Δa in Δb odstopanje meritev kamer A in B.

Napako meritev Δa in Δb lahko razdelimo na dva dela [1]. Absolutni del (v enačbi (13) označen z indeksom a) je neodvisen od merjene razdalje in nastane zaradi napak pri prepoznavanju slike. Relativni del (v enačbi (13) označen z indeksom r) pa je odvisen od merjene razdalje in nastane predvsem iz dveh razlogov. Prvi je namestitev kamere na napačni razdalji, drugi pa gledanje stebričkov na napačni višini (stebrička nista povsem vertikalna glede na nitko). Zaradi obeh razlogov je razdalja med stebričkoma relativno manjša oziroma večja od pravilne. Zapišimo:

$$\begin{aligned} \Delta a &= \Delta a_a + a\Delta a_r \\ \Delta b &= \Delta b_a + b\Delta b_r \end{aligned} \quad (13)$$

Če parcialno odvajamo enačbo (12), dobimo:

$$\begin{aligned} \frac{\partial\varphi}{\partial a} &= \frac{-b}{a^2 + b^2 - 2ab\cos\gamma} \\ \frac{\partial\varphi}{\partial b} &= \frac{a}{a^2 + b^2 - 2ab\cos\gamma} \end{aligned} \quad (14)$$

Naj bo zgornja meja absolutnega pogreška obeh meritev definirana z $\Delta_a = \Delta a_{a\max} = \Delta b_{a\max}$, relativnega pogreška pa z $\Delta_r = \Delta a_{r\max} = \Delta b_{r\max}$. Za zgornjo mejo pogreška (absolutni maksimalni pogrešek) ocene kota $\Delta\varphi_{\max}$ lahko ob upoštevanju enačb (13) in (14) napišemo:

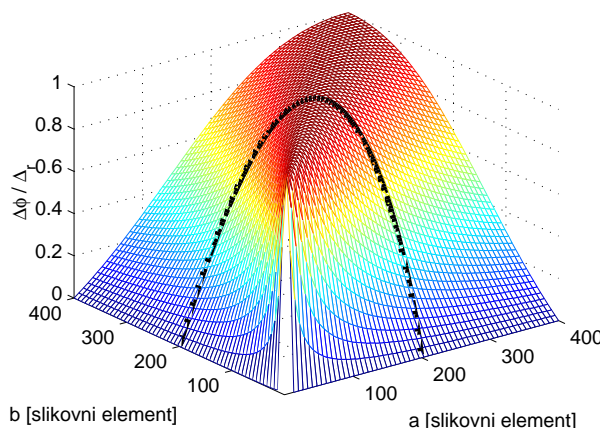
$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{\max} &= \left| \frac{\partial\varphi}{\partial a} \right| \Delta a + \left| \frac{\partial\varphi}{\partial b} \right| \Delta b \\ &= \frac{(a+b)\Delta_a + 2ab\Delta_r}{a^2 + b^2 - 2ab\cos\gamma} \end{aligned} \quad (15)$$

3.1 Relativna napaka meritve

Vpliv relativne napake meritve na odstopanje ocene kota $\Delta\varphi$ prikazuje drugi del enačbe (15)

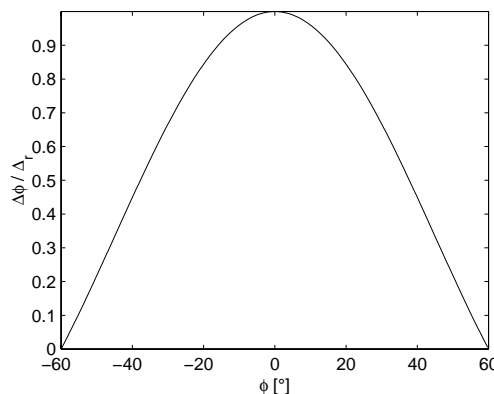
$$\Delta\varphi = \frac{2ab}{a^2 + b^2 - 2ab\cos\gamma} \cdot \Delta_r \quad (16)$$

Prvi del enačbe (16) predstavlja občutljivost kota zasuka žarilne nitke na relativno napako meritve. Njen potek prikazuje slika 7.



Slika 7: Občutljivost kota zasuka φ na relativno napako meritve a in b ($\gamma=60^\circ$)

Na sliki 7 odebeltjena krivulja predstavlja občutljivost kota zasuka φ na relativno napako meritve pri dolžini žarilne nitke $g=200$ slikovnih elementov. Podobno slika 8 podaja potek občutljivost kota zasuka φ na relativno napako meritve v odvisnosti od kota zasuka žarilne nitke φ .



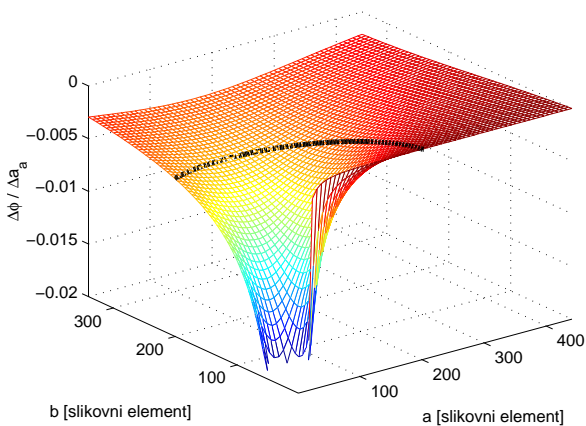
Slika 8: Občutljivost izračuna kota zasuka φ (kot posledica relativne napake meritve a in b) v odvisnosti od trenutnega zasuka ($\gamma=60^\circ$, $g=200$)

3.2 Absolutna napaka meritve

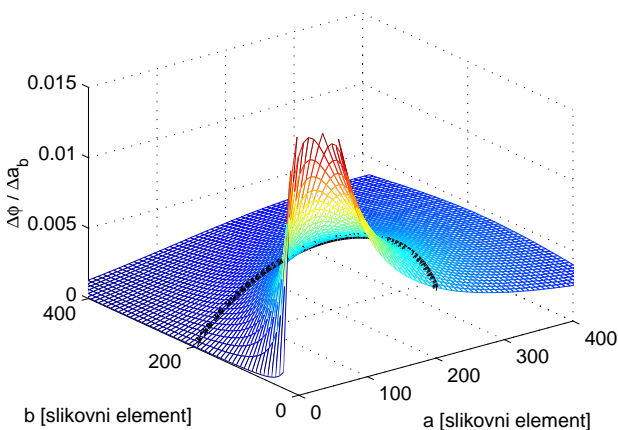
Vpliv absolutne napake meritve na odstopanje ocene kota $\Delta\varphi$, glede na enačbo (12), podaja enačba:

$$\Delta\varphi = \frac{1}{a^2 + b^2 - 2ab\cos\gamma} \cdot (-b\Delta a_a + a\Delta a_b). \quad (17)$$

Sliki 9 in 10 prikazujeta občutljivost kota zasuka žarilne nitke na absolutno napako meritve a -ja in b -ja.



Slika 9: Občutljivost kota zasuka φ na absolutno napako meritve a ($\gamma=60^\circ$)

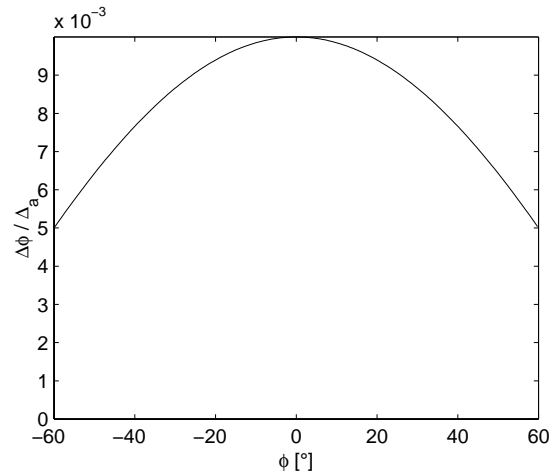


Slika 10: Občutljivost kota zasuka φ na absolutno napako meritve b ($\gamma=60^\circ$)

Odebeljena krivulja na slikah 9 in 10 zopet predstavlja občutljivost kota zasuka φ na absolutno napako meritve pri dolžini žarilne nitke $g=200$ slikovnih elementov.

Slika 11 pa prikazuje območje občutljivosti kota zasuka φ glede na absolutno napako meritve (enačba (18)).

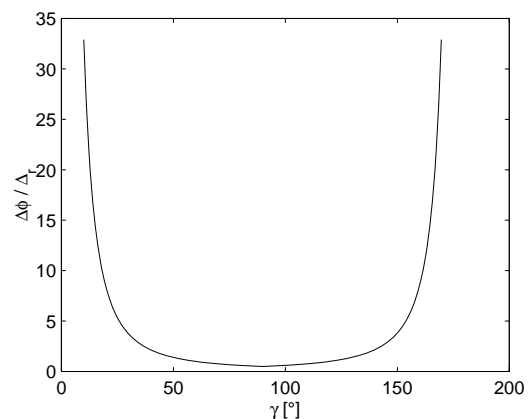
$$\Delta\varphi = \frac{(a+b)}{a^2 + b^2 - 2ab\cos\gamma} \cdot \Delta a. \quad (18)$$



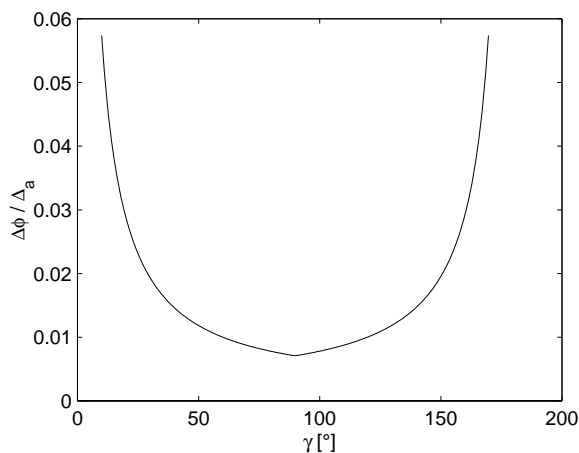
Slika 11: Občutljivost izračuna kota zasuka φ (kot posledica absolutne napake meritve a in b) v odvisnosti od trenutnega zasuka ($\gamma=60^\circ$, $g=200$)

3.3 Občutljivost glede na kot med kamerama

V nadaljevanju prikažemo maksimalno skupno (napaka meritve a -ja in b -ja) občutljivost kota zasuka žarilne nitke φ na napake meritve glede na spremenljiv kot med kamerama γ . Slika 12 prikazuje maksimalno občutljivost (dobimo jo pri vrtenju žarilne nitke), ki jo lahko pričakujemo, pri relativni napaki meritve, slika 13 pa pri absolutni napaki meritve.



Slika 12: Maksimalno občutljivost kota zasuka φ na relativno napako meritve glede na γ



Slika 13: Maksimalno občutljivost kota zasuka φ na absolutno napako meritve glede na γ

Pri obeh slikah (13 in 14) opazimo, da se krivulja maksimalne občutljivosti prelomi, ko kot med kamerama doseže 90° . Za kote $\gamma > 90^\circ$ si lahko predstavljamo, da eno od kamer (A ali B) prezrcalimo na drugo stran žarnice in tako se novi navidezni kot med žarnicama zopet zmanjšuje, občutljivost na napake meritve pa povečuje.

4 Sklep

Predstavljena je študija poravnave žarilnih nitk v avtomobilskih žarnicah s pomočjo strojnega vida. Analiza občutljivosti pokaže, da je izračunani kot nitke najbolj podvržen

napakam meritvam ravno takrat, ko obe kameri (A in B) izmerita podobni projekciji žarilne nitke. Izmerjeni kot je nato referenca postaji za regulacijo vrtenja kovinskih kontaktnih kopic, ki zavrti kapico, tako da le ta oklepa zahtevani kot glede na žarilno nitko. Ocenjujemo, da je skupna napaka merilnega mesta kot tudi izvršilnega mesta ne bo presegla zahtevane točnosti. Napaka predstavljenega algoritma pri oceni zasuka nebo presegla kota 5° , kar ustreza absolutni napaki meritve a -ja in b -ja 8 slikovnih elementov oziroma 5% relativni napaki obeh meritev pri 60° kotu med kamerama. Algoritem odlikuje preprostost, učinkovitost in s tem tudi robustnost.

5 Literatura

- [1] F. Bergelj, *Meritve*, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 2002.
- [2] G. Klančar, O. Orqueda, D. Matko, R. Karba, Robust and efficient vision system for mobile robots control - application to soccer robots, *Electrotechnical Review, Journal for Electrical Engineering and Computer Science*, letn. 68, št. 5, str. 306-312, 2001.
- [3] F. Lahajnar, *Avtomatizirano vizualno pregledovanje industrijskih izdelkov*, magistrska naloga, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 1999.
- [4] N. Pavešič, *Razpoznavanje vzorcev: Uvod v analizo in razumevanje vidnih in slišnih signalov*, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 2000.