

# Natančnost atributivnega laserskega merilnika prisotnosti

Andrej LEBAR, Mihael JUNKAR

**Povzetek:** Laserski merilniki za zaznavanje prisotnosti so pomemben instrument v avtomatizaciji proizvodnje. Nekatere izvedbe teh merilnikov lahko uporabljamo tudi za merjenje dimenzij. Zanimalo nas je, kako natančne so te meritve in kako bi se lahko izognili napaki pri merjenju zaradi napačne lege merjenca. Pokazali smo, kako lahko simuliramo meritve širine senčnega polja in kako uskladimo izmerke in modelno funkcijo pri meritvah rotirajočega merjenca.

**Ključne besede:** laserski senzor prisotnosti, napaka meritve, pozicioniranje, simulacija meritve,

## 1 Uvod

Laserski so že kmalu po iznajdbi našli svoje mesto v merilni tehniki. Danes uporabljamo laserske merilnike za tako različne aplikacije, kot so merjenje razdalje, hitrosti, tlaka, pretoka in onesnaženja atmosfere. Od leta 1983 je celo osnovna dolžinska enota meter definirana kot razdalja, ki jo svetloba He-Ne laserja prepotuje v  $1/299.792.458$  sekunde.

V inženirski metrologiji se laserski merilniki uporabljajo za merjenje razdalje. Iz te osnovne aplikacije so izpeljane metode za merjenje 3D oblik, hrapavosti površin, kotov in prisotnosti predmetov.

V tem prispevku predstavljamo rezultate preverjanja natančnosti razširjenega delovanja laserskega merilnika prisotnosti. Ker je pri tovrstnih merilnikih natančnost meritve ključno odvisna od postavitve merjenca glede na merilnik, poročamo tudi o simulaciji napake, ki nastane zaradi napačnega pozicioniranja merjenca,

Dr. Andrej Lebar, univ. dipl. inž., prof. dr. Mihael Junkar, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

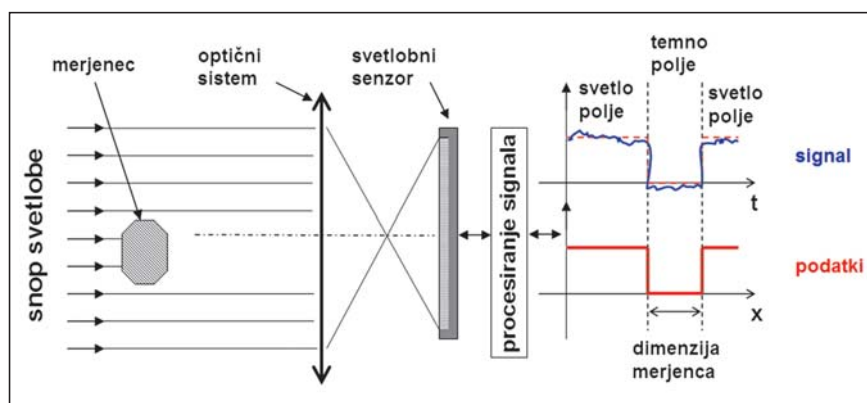
in predlagamo metodo, pri kateri bi se lahko izognili tej napaki.

## 2 Optični mikrometri in merilniki prisotnosti

Optični mikrometri so naprave, sestavljene iz izvora svetlobe in sensorja, ki meri velikost svetlega oz. temnega polja, kot vidimo na *sliki 1*.

merjeni objekt, svetlejši dele pa kot ozadje. Nenazadnje mora biti merilnik tudi neobčutljiv na nenadne spremembe svetlosti ozadja.

Zahtevnejše izvedbe merilnikov uporabljajo kot izvir svetlobe polprevodniške svetilne diode (LED), za senzorje pa posebne izvedbe CCD-kamer in merijo s ponovljivostjo 0,5

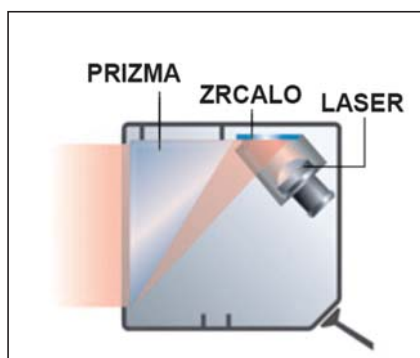


Slika 1. Shematični prikaz principa delovanja optičnega mikrometra [1]

Merjenec postavimo v snop svetlobe tako, da meče senco na svetlobno tipalo, ki je lahko linijsko ali matrično. Elementi takšnega tipala so občutljivi na intenziteto vpadlega svetlobnega toka. Signal s tipala obdela procesna enota, ki mora biti nastavljena tako, da pravilno loči med svetlimi in temnimi polji, torej prepozna vse temnejše dele senčnega polja kot

$\mu\text{m}$ , natančnost pa je ocenjena na 2–3  $\mu\text{m}$ . Najpreprostejše izvedbe tovrstnih merilnikov služijo kot atributivni merilniki, ki z ozirom na prednastavljeno vrednost širine senčnega polja dajejo na izhodu le digitalni signal z dvema vrednostma: ustreza oz. ne ustreza (logična ena oz. logična nič). Običajno jih uporabljamo za določanje prisotnosti ustreznega

izdelka na tekočem traku ali kot tolerančni merilnik dimenzije.



Slika 2. Izvor svetlobe [2]

Shemo izvora svetlobe takšnega merilnika vidimo na *sliki 2*. Snop svetlobe iz polprevodniške laserske diode vpada na zrcalo, ki ga odbije na stekleno prizmo. Prizma svetlobo enakomerno porazdeli v svetlobno črto, in tako definira ravnino, ki jo presekaemo z merjenecem.

Na *sliki 3* vidimo tipično izvedbo tipala atributivnega laserskega merilnika.



Slika 3. Linijsko tipalo svetlobe [2]

### ■ 3 Meritve

Meritve smo izvedli z univerzalnim laserskim merilnikom LV-H300 (Keyence, Japonska) s kontrolno enoto LV-H51M (Keyence, Japonska). Kontrolna enota ima dva atributivna digitalna izhoda, ki podajata rezultat primerjalno glede na prednastavljeno vrednost. Za razliko od preprostejših merilnikov ima LV-H51M tudi analogni izhod. Napetost na tem izhodu je sorazmerna velikosti svetlega polja (*slika 1*), tj. širini tistega dela svetlobnega senzora, ki ni zastrt s senco predmeta [2].

Pri našem delu smo analogni signal merilnika Keyence LV-H300 vzorčili

z analogno-digitalnim (A/D) pretvornikom, ki smo ga krmilili iz programskega okolja Matlab [3] preko USB-vmesnika. Uporabljali smo A/D-pretvornik NI USB-6008, ki ima osem analognih vhodov z 12-bitno ločljivostjo. Dovoljeno območje vhodnih signalov je programsko nastavljivo vse do  $\pm 20$  V. Pretvornik lahko vzorči signale z maksimalno frekvenco vzorčenja  $10^4$  izmerkov v sekundi, če uporabljamo le en analogni vhod.

Najprej smo merilnik umerili z vrsto merilnih kladic od 3 do 10 mm. Meritev smo ponovili trikrat, tako da smo kladice vsakič ponovno postavili v svetlobno polje. Po vsaki postavitvi kladice je računalnik zajel 10 meritev, pri čemer je vsaka trajala 0,1 s, analogni signal pa smo vzorčili s frekvenco 1 kHz. Zajete podatke smo povprečili in določili še standardno deviacijo. Iz tako pridobljenih podatkov smo z linearno regresijo dobili funkcijsko odvisnost med dimenzijo merjenca in izmerjeno napetostjo tipala. Na *sliki 4* vidimo vrednosti napetosti, izmerjene na analognem izhodu merilnika LV-H300, v odvisnosti od dimenzije merjenca, in premico, prilagojeno izmerkom.

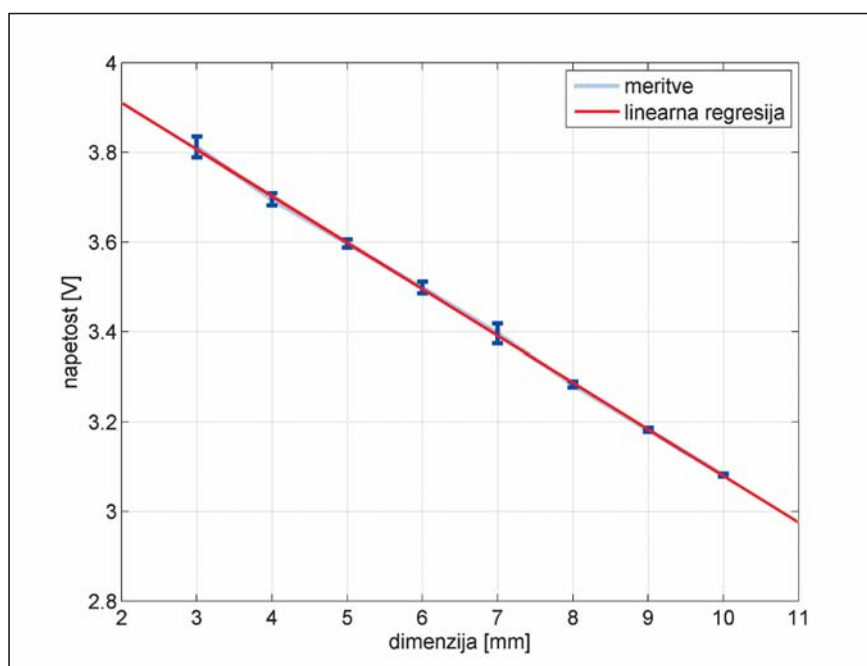
V nadaljevanju smo izmerili velikost in šum signala pri povsem odprtem in povsem zaprtem tipalu. Ker smo

merilnik že umerili, lahko sedaj podajamo podatke v dolžinskih enotah. Naredili smo 100 izmerkov s frekvenco vzorčenja 1 kHz v trajanju po 0,1 s.

Pri povsem odprtem svetlobnem polju znaša standardna deviacija signala 0,032 mm. Pri meritvah zaprtega izvora in tipala smo dobili povsem enaka rezultata. Standardna deviacija je znašala 0,026 mm.

Izmerjene skrajne vrednosti so bile pri povsem zaprtem tipalu 29,90 mm, kar je za desetinko milimetra manj od nominalne maksimalne širine 30 mm. Če je merjenec odsoten, dobimo vrednost  $-0,69$  mm, kar kaže na to, da merilnika ne moremo uporabljati za kvantitativne meritve poljubno majhnih merjenecov.

V nadaljevanju smo preverili, kakšna je ponovljivost meritve, če merjenec vsakič ponovno postavimo v merilnik. S tem bolj kot merilnik preverjamo, ali je mogoče ponovljivo meriti z optičnim merilnikom. Merjenec smo 100-krat postavili na ravno podlago na isto mesto v snop svetlobe. Tako kot prej smo pri vsaki od stotih meritev zajeli po 10 signalov s frekvenco vzorčenja 1kHz, pri čemer je vsak signal trajal po 0,1 s. Shranili smo srednjo vrednost 107 zajetih meritev in pripadajočo standardno deviacijo



Slika 4. Umeritvena krivulja

signala. Histogram porazdelitve izmerkov lahko vidimo na *sliki 5*.

#### ■ 4 Razprava

Ponavljajoče se ročno postavljanje merjenca prosto v svetlobno polje je pokazalo, da pazljiv merilec lahko znotraj uporabnega intervala, katerega meje bo potrebno še natančneje določiti, doseže raztros meritev znotraj 2 % dimenzije merjenca. Ko smo postavljali merjenec ob dobro pozicioniran prislon, smo dobili pri 100 ponovitvah meritve raztros 0,5 % dimenzije merjenca. Izmerjena napaka pri 100-kratni ponovitvi je celo primerljiva s kvantizacijsko napako 12-bitnega analogno-digitalnega pretvornika merjenega signala.

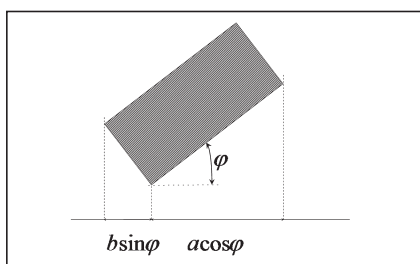
V industrijskem okolju zaradi nerazpoložnosti merilca ali naključnega pozicioniranja, npr. na tekočem traku, rezultati ne bi bili tako zanesljivi, kot smo jih dobili v laboratorijskem okolju. Zanimalo nas je, kolikšno bi bilo sipanje meritev, če bi merjenec namenoma izmaknili iz prave lege v svetlobnem polju merilnika, zato smo simulirali meritev pri napačni postavitvi merjenca.

#### ■ 5 Simulacija meritve

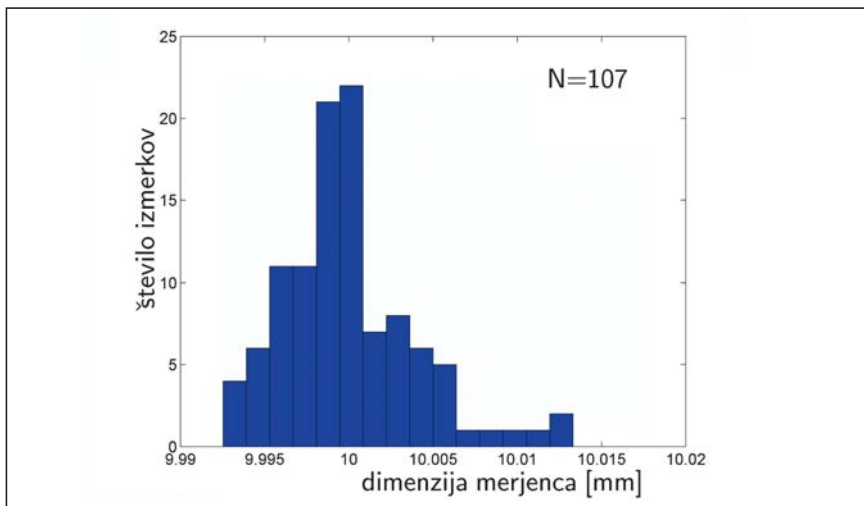
Če postavimo predmet, ki ni osno simetričen, v snop svetlobe, bo širina sence odvisna od zasuka merjenca okoli njegove osi, tako kot prikazuje *slika 6*.

Oglejmo si geometrijske razmere natančneje na *sliki 7*. Pri zasuku merjenca za kot  $\phi$  merilnik izmeri velikost senčnega polja:

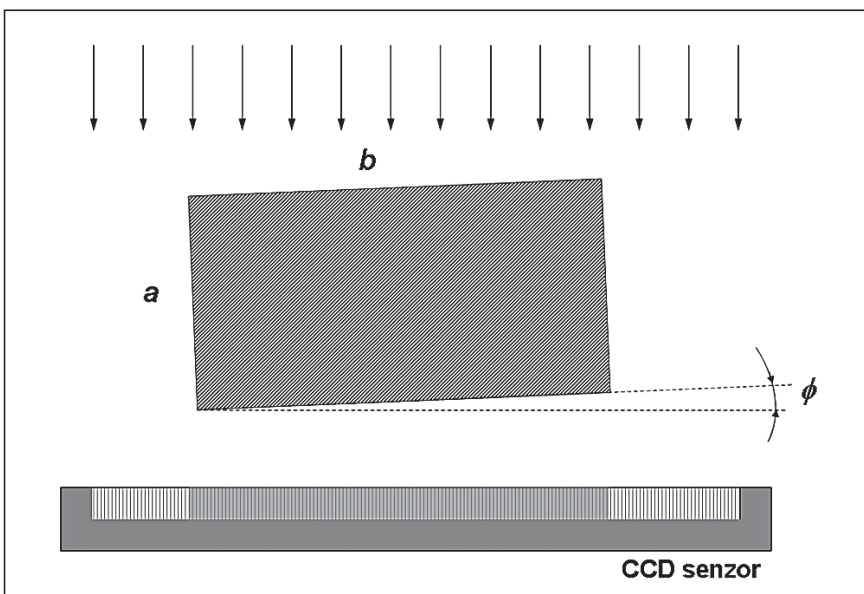
$$y = |a \sin \phi| + |b \cos \phi| \quad (1)$$



**Slika 7.** Komponenti senčnega polja na sensorju v odvisnosti od kota orientacije kladice



**Slika 5.** Histogram stotih meritev merjenca z dimenzijo 10,00 mm

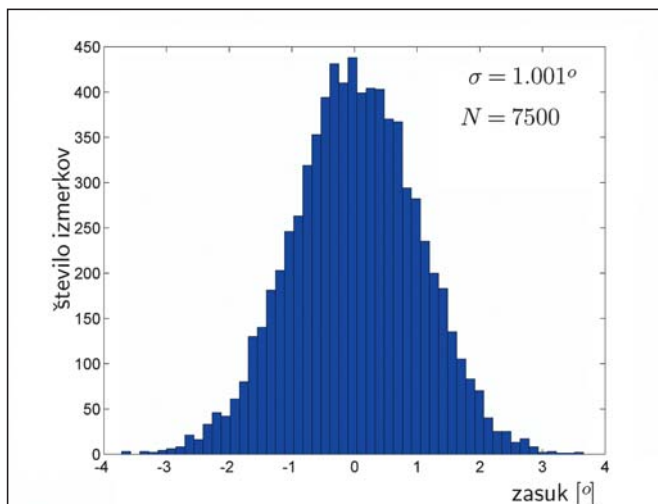


**Slika 6.** Širina senčnega polja na sensorju je odvisna od zasuka merjenca

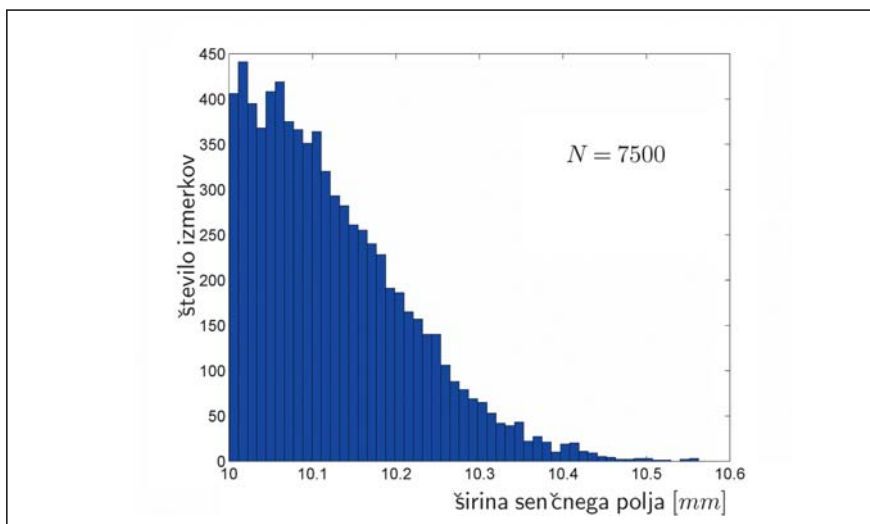
Če narišemo odvisnost senčnega polja od zasuka merjenca s stranica  $a = 5$  mm in  $b = 9$  mm, dobimo odvisnost, kot jo prikazuje modra krivulja  $y_I$  na *sliki 10*. Vidimo, da je graf pri sukanju merjenca za 360° simetričen glede na izhodišče, v katerem je stranica  $a$  pravokotna na svetlobni snop.

Poglejmo, kako se obnaša raztros simuliranih meritev, če pozicioniramo merjenec

v simulaciji tako, da je povprečna vrednost kota  $\bar{\phi} = 0$  in standardna deviacija zamika kota  $\sigma = 1^\circ$ . Na *sliki 8*



**Slika 8.** Histogram zamika pozicionirnega kota



Slika 9. Histogram širine senčnega polja

vidimo histogram generirane zaloge vrednosti kotov in na *sliki 9* histogram izračunanih vrednosti širine senčnega polja za simulirani merjenec z merama  $a = 10$  in  $b = 9$  mm.

Vidimo, da bi se točnost merjenja znatno poslabšala glede na razmere, pri katerih smo merjenec prislonili ob fiksno oporo (*slika 5*).

## 6 Rotacija merjenca

Da bi se izognili napaki zaradi slabega pozicioniranja, smo postavili merjenec na vrtljivo mizico, ki smo jo obračali s koračnim motorjem. Pri vsaki meritvi smo zavrteli merjenec za  $360^\circ$ . Uporabljeni koračni motor ima korak  $7,5^\circ$ , tako da smo dobili 49 meritev. Vzorčili smo na enak način, kot je opisano v razdelku 2. Z vrtenjem merjenca dobimo vrsto izmerkov širine senčnega polja, še vedno pa ne poznamo začetnega zamika.

Zapišimo enačbi za širino senčnega senčnega polja pri nezamaknjem merjencu  $y_1$  (en. 2) in za primer, da je merjenec na začetku zasukan za  $\varphi_0$ ,  $y_2$  (en 3):

$$y_1 = |a \sin \varphi| + |b \cos \varphi|, \quad (2)$$

$$y_2 = |a \sin(\varphi + \varphi_0)| + |b \cos(\varphi + \varphi_0)|. \quad (3)$$

Če postavimo merjenec v začetnem položaju za kot  $\varphi_0 = 15^\circ$ , izmaknjen

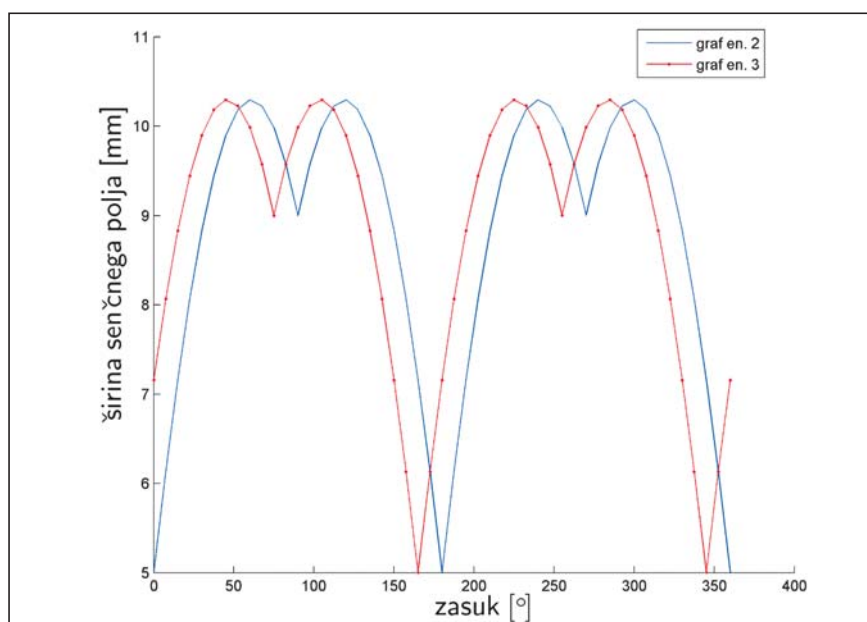
iz prave lege, bo krivulja premaknjena, tako kot kaže rdeča krivulja na *sliki 10*.

Neznani začetni zasuk  $\varphi_0$  je mogoče dobiti iz križne korelacije med  $y_1$  in  $y_2$ , ki jo v primeru diskretnih signalov zapišemo kot:

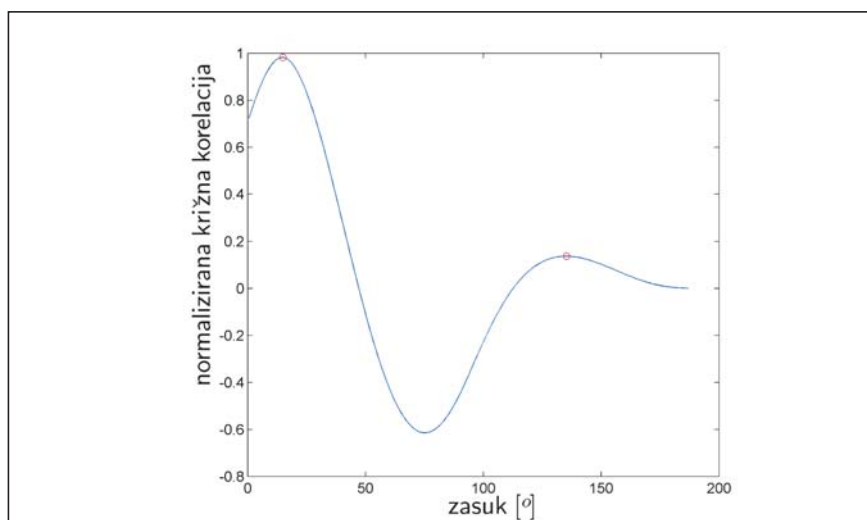
$$Y_{y_1, y_2}(n) = \sum y_{1,k} y_{2,k+n}. \quad (4)$$

Maksimume poiščemo z računalniškim programom in jih označimo z rdečim krožcem. Prvi je pri  $15^\circ$ , kolikor znaša vneseni zamik na *sliki 10*.

Izkaže se, da je preprosteje izraziti vsoto vseh razlik med modelno in fazno premaknjeno krivuljo kot funkcijo



Slika 10. Modra krivulja predstavlja odvisnost  $y_1(\varphi)$  (en. 2) in rdeča  $y_2(\varphi + \varphi_0)$  (en. 3). Simulirani merjenec ima stranici  $a = 5$  in  $b = 9$  mm, začetni zasuk  $\varphi_0$  je  $15^\circ$



Slika 11. Križna korelacija modelnega in zamaknjene signala s *slike 10*



(Rs) zamika med krivuljama in to funkcijo minimizirati. Ključne vrstice izvedbe tega pristopa v programskem okolju Matlab so na *sliki 12*.

Metodo iskanja smo preverili tudi na podatkih, pridobljenih z meritvami. Na *slikah 13* in *14* vidimo zelo dobro ujemanje med meritvami (rdeča krivulja) in modelno funkcijo (modra krivulja). V prvem primeru (sl. 13) je standardni odstopok med točkami modelne funkcije in izmerki 0,21 mm oz. 0,15 mm v drugem primeru (*slika 14*).

```
% yy: vektor podatkov
% s2: modelna funkcija
% rez_fi: iskani neznani zamik
% Rs: vsota odstopanj
% fminbnd: poišče minimum nelinearne f. na intervalu
s2 = @(fi_x) abs(a*cos(fi+fi_x))+abs(b*sin(fi+fi_x));
Rs = @(fio_rx) sum((s2(fi_x)-yy).^2);
rez_fi = fminbnd(Rs,-pi,pi);
```

**Slika 12.** Izsek iz računalniškega programa v jeziku Matlab, ki poišče zamik med krivuljama

## 7 Zaključek

Preprosti laserski merilniki prisotnosti lahko v nekaterih izvedbah služijo

tudi kot ekonomska alternativa mnogo dražjim optičnim mikrometrom. Tako pri prvih kot pri drugih se moramo zavedati, kako pomembno je pravilno pozicioniranje merjenja. Pokazali

smo, kako drastično naraste napaka, če niso izpolnjeni vsi pogoji pravilne meritve. Nakazali smo možnost, da rotiramo merjenec v svetlobnem snopu in s prilagajanjem parametrov modelne funkcije izboljšamo meritve.

## Literatura

- [1] Doebelin, Ernest O. 2004. Measurement systems application and design; 5th ed., McGraw-Hill series in mechanical engineering.
- [2] <http://www.keyence.co.uk/>.
- [3] <http://www.mathworks.com/>.

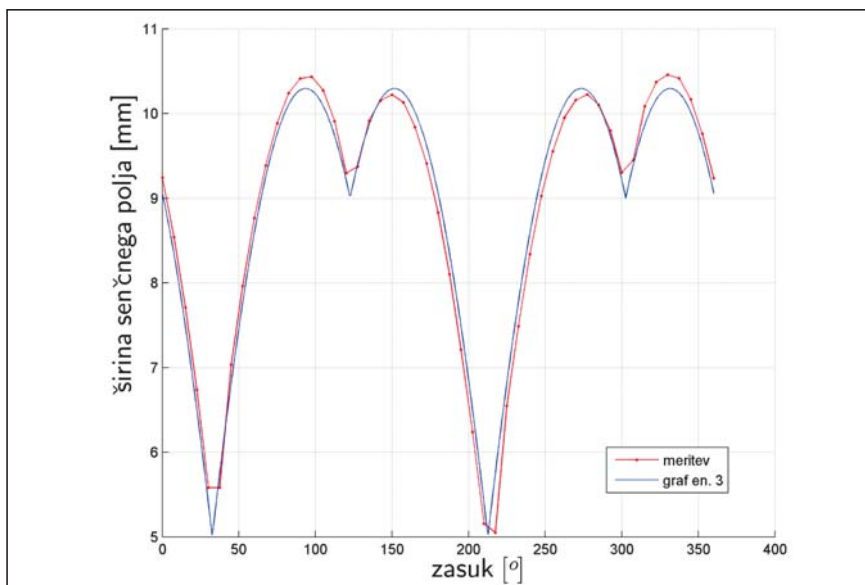
## Accuracy of an attributive laser through-beam sensor

**Abstract:** Universal laser through-beam sensors are important pieces of equipment in production automation. Some of the configurations can also be used for the measurement of dimensions. In this research we were interested in how precise these measurements are and how can the error due to the misalignment of the measured piece be avoided. We have shown how the dark-field width can be simulated and how the parameters of the model function can be fitted to measurement results performed with a rotating measured object.

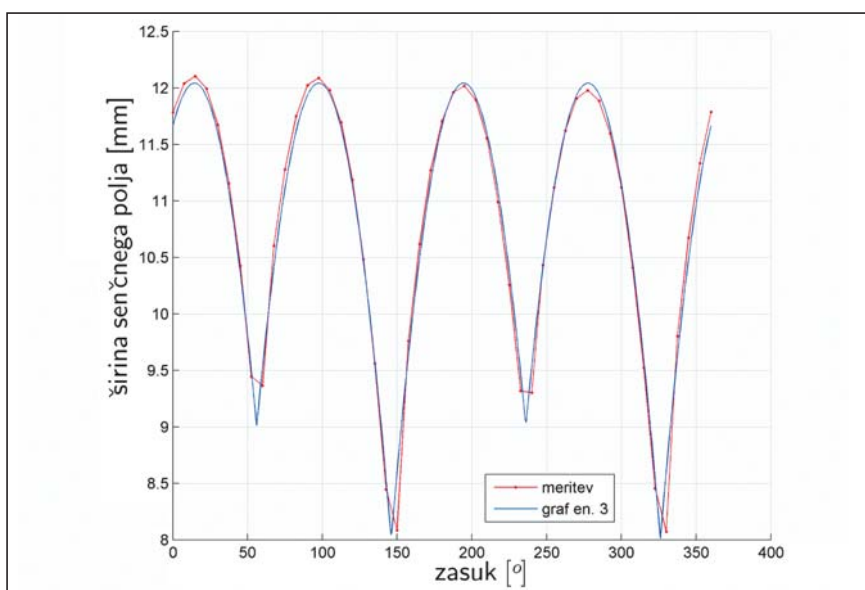
**Keywords:** through-beam laser sensor, alignment error, measurement simulation,

## Zahvala

Zahvaljujemo se podjetju Gazela, d. o. o., ki je odstopilo opremo, uporabljeno v tem prispevku.



**Slika 13.** Odvisnost, dobljena z merjenjem, in modelna funkcija potem, ko smo poiskali začetni zamik. Merjenec je imel stranici  $a = 5$  in  $b = 9$  mm



**Slika 14.** Odvisnost, dobljena z merjenjem, in modelna funkcija potem, ko smo poiskali začetni zamik. Merjenec je imel stranici  $a = 8$  in  $b = 9$  mm