

Umjeravanje 1D mjernog uređaja

Mikulić, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:078352>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-28**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ivan Mikulić

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Dr.sc. Marko Katić, dipl.ing.

Student:

Ivan Mikulić

Zagreb, 2022.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se cjelokupnoj obitelji i prijateljima na neizmornoj podršci tijekom studiranja. Posebice bih zahvalio mentoru Dr.sc. Marku Katiću, dipl. ing. i asistentu Marku Horvateku, mag. ing. na vrijednoj pomoći i korisnim savjetima.

Ivan Mikulić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602-04/22-6/1	
Ur. broj: 15-1703-22-	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **IVAN MIKULIĆ** Mat. br.: 0035200650

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Umjeravanje 1D mjernog uređaja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Calibration of 1D measuring machine**

Opis zadatka:

U Laboratoriju za precizna mjerenja dužina FSB-a razvijen je novi 1D mjerni uređaj za umjeravanje mjerila s krutom podjelom, koji koristi optički sustav za detekciju mjernih linija i magnetni linearni enkoder za mjerenje pomaka. U radu je potrebno:

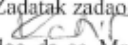
1. opisati navedeni mjerni uređaj
2. definirati sastavnice mjerne nesigurnosti i postaviti matematički model mjerenja
3. eksperimentalno utvrditi iznose glavnih sastavnica mjerne nesigurnosti, s posebnim naglaskom na utjecaj temperature, rezolucije optičkog sustava i rezolucije linearnog enkodera.

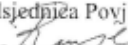
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
20. siječnja 2022.

Rok predaje rada:
24. ožujka 2022.

Predviđeni datum obrane:
28. ožujka do 1. travnja 2022.

Zadatak zadao:

doc. dr. sc. Marko Katić

Predsjednika Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS GRAFIKONA	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
1.1. Uvod.....	1
1.2. Kruta mjerila s podjelom duljine	2
1.2.1. Mjerno ravnalo	2
1.2.2. Mjerna letva	3
1.2.3. Tračni metar	3
1.3. Umjeravanje krutih mjerila	4
1.3.1. Pregled postojećih uređaja na tržištu	4
1.3.2. Načini mjerenja	6
1.3.3. Tipične performanse	8
2. SUSTAV ZA UMJERAVANJE KRUTIH MJERILA S PODJELOM U FSB-LPMD	9
2.1. Enkoder	11
2.1.1. RLS AS10 magnetska traka	11
2.1.2. RLS LA11 linearni apsolutni magnetni enkoder	12
2.2. Kamera	14
2.3. Objektiv Opto Engineering MC3-03X.....	16
2.4. Canny algoritam.....	17
2.5. Koračni motor	19
2.6. Optički stol Melles Griot.....	20
2.7. Sustav za mjerenje temperature	21
2.8. NSK klizač i vodilica	23
3. MATEMATIČKI MODEL.....	24
3.1. Greška susosnosti	24
3.2. Korekcija greške uslijed toplinskog rastezanja enkodera i predmeta mjerenja	25
3.3. Korekcija greške uslijed toplinskog rastezanja enkodera	25
3.4. Abbe-ova greška	26
3.5. Korekcija greške osvjetljenja	27
3.6. Korekcija greške utvrđivanja centra linije	27
4. EKSPERIMENTALNI DIO RADA.....	32
4.1. Opis	32
4.2. Renishaw laserski sustav	32
4.2.1. Renishaw ML10.....	32
4.2.2. Renishaw EC10 (Enviromental compesation)	33

4.3. Mjerenja	35
4.3.1. Prvo mjerenje: Mjerenje ponovljivosti	35
4.3.2. Drugo mjerenje: Odstupanja nakon prijeđenog puta iz početne pozicije na sredini skale do početka skale i natrag.....	36
4.3.3. Treće mjerenje: Utjecaj osvjetljenja	36
4.3.4. Četvrto mjerenje: Odstupanja nakon prijeđenog puta iz početne pozicije na sredini skale do početka skale i natrag nakon korekcije	37
4.3.5. Peto mjerenje: Utjecaj osvjetljenja nakon korekcije.....	38
4.3.6. Šesto mjerenje: Utjecaj odabira rezolucije.....	39
4.3.7. Sedmo mjerenje: Mjerenje skale s korakom od 50 mm.....	40
4.3.8. Osmo mjerenje: Mjerenje skale s korakom od 1 mm	43
4.4. Matematički model nakon mjerenja.....	47
4.4.1. Korekcija zbog osvjetljenja.....	47
4.4.2. Korekcija greške utvrđivanja centra linije	47
4.4.3. Korekcija greške uslijed toplinskog rastezanja enkodera i predmeta mjerenja ..	47
4.4.4. Korekcija greške uslijed toplinskog rastezanja enkodera	47
5. ZAKLJUČAK.....	50
LITERATURA.....	51
PRILOZI.....	53

POPIS SLIKA

Slika 1.	Lanac sljedivosti [2]	2
Slika 2.	Mjerno ravnalo [3].....	2
Slika 3.	Mjerna letva [4]	3
Slika 4.	Tračni metar [5].....	3
Slika 5.	PLM 600-E [7]	4
Slika 6.	Precimar CiM 1000 [8].....	5
Slika 7.	BMG 2000 [9]	5
Slika 8.	Zeiss ULM 01-600 C [10]	6
Slika 9.	Shema pomičnog načina mjerenja [11]	7
Slika 10.	Uređaj za mjerenje duljine [11].....	7
Slika 11.	Točnost i preciznost [2].....	8
Slika 12.	3D model umjeravanja mjernog ravnala	9
Slika 13.	Spoj pogonskog remena i klizača	9
Slika 14.	Umjeravanje mjernog ravnala	10
Slika 15.	Prikaz sustava u laboratoriju za precizna mjerenja	11
Slika 16.	Struktura magnetske trake RLS AS10 [12].....	12
Slika 17.	Opis oznake magnetske trake RLS AS10 [12].....	12
Slika 18.	Prikaz tolerancija prilikom montaže [13].....	13
Slika 19.	DMK 37AUX264 kamera [17].....	15
Slika 20.	Objektiv Opto Engineering MC3-03X [19]	17
Slika 21.	Filter šuma [22]	18
Slika 22.	Traženje rubova [23]	18
Slika 23.	Bez visokih vrijednosti u okolini i s visokim vrijednostima u okolini [23].....	19
Slika 24.	Pregled komponenti koračnog motora [24].....	20
Slika 25.	Prikaz pričvršćivanja elemenata na optički stol	21
Slika 26.	Digitalni termometar Dt10	22
Slika 27.	NSK klizač i vodilica [28].....	23
Slika 28.	Greška suosnosti.....	24
Slika 29.	Abbe-ova greška [29]	26
Slika 30.	Centar linije	28
Slika 31.	Simetrična pravokutna razdioba.....	30
Slika 32.	Simetrična trokutasta razdioba	30
Slika 33.	Studentova razdioba [2].....	31
Slika 34.	Laserski interferometar Renishaw ML10.....	33
Slika 35.	Mjerna sonda uređaja Renishaw EC10	34
Slika 36.	Mjerenje utjecaja rezolucije kamere.....	40

POPIS TABLICA

Tablica 1. Tolerancijski razredi tračnog metra [6]	4
Tablica 2. Performanse uređaja	8
Tablica 3. Tehnički podatci enkodera [13].....	13
Tablica 4. Tehnički podatci kamere DMK 37AUX264 [17].....	15
Tablica 5. Tehnički podatci objektiva Opto Engineering MC03-03X [19]	17
Tablica 6. Komponente sastavljene standardne nesigurnosti	29
Tablica 7. Tehnički podatci Renishaw ML10	33
Tablica 8. Tehnički podatci Renishaw EC10	34
Tablica 9. Procijenjeno standardno odstupanje mjerenja ponovljivosti.....	35
Tablica 10. Izvadak iz Dixonove tablice kritičnih vrijednosti	42
Tablica 11. Tablica mjerne nesigurnost nakon mjerenja.....	49

POPIS GRAFIKONA

Grafikon 1. Otpor i temperatura Pt100 sonde [27]	22
Grafikon 2. Odstupanje pri povratku	36
Grafikon 3. Utjecaj osvjetljenja	37
Grafikon 4. Odstupanje pri povratku nakon korekcije	38
Grafikon 5. Utjecaj osvjetljenja nakon korekcije	39
Grafikon 6. Mjerenje skale s korakom od 50 mm	41
Grafikon 7. Mjerenje skale s korakom od 50 mm nakon izbacivanja grube greške.....	42
Grafikon 8. Mjerenje skale s korakom od 50 mm nakon izbacivanja druge grube greške.....	43
Grafikon 9. Prvo mjerenje	44
Grafikon 10. Prvo mjerenje uz korekciju	44
Grafikon 11. Usporedba prvog i drugog mjerenja bez korekcije	45
Grafikon 12. Usporedba prvog i drugog mjerenja nakon korekcije greške	45
Grafikon 13. Drugo mjerenje uz korekciju greške	46
Grafikon 14. Skupni prikaz mjerenja	46

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
E_x	μm	Procjena greške modela
L_e	mm	Očitanje duljine na enkoderu
δ_{ixs}	μm	Korekcija zbog greške suosnosti enkodera i predmeta mjerenja
δ_{Abbe}	μm	Korekcija zbog Abbe-ove pogreške
Δt	$^{\circ}\text{C}$	Razlika u temperaturi između enkodera i predmeta mjerenja
α	K^{-1}	Koeficijent temperaturnog rastezanja enkodera
δ_o	μm	Korekcija zbog osvjetljenja
δ_r	μm	Pogreška utvrđivanja centra linije
d	mm	Abbe-ov razmak
θ	$^{\circ}$	Kut greške
s		Procijenjeno standardno odstupanje
x	mm	Pojedinačno mjerenje
\bar{x}	mm	Aritmetička sredina uzorka
n		Veličina uzorka
Q		Oznaka Dixonovog test
$u(\Delta t)$	μm	Mjerna nesigurnost razlike temperatura
$u(\delta_{l_m})$	μm	Mjerna nesigurnost utjecaja Abbe-ove greške
$u(\delta_o)$	μm	Mjerna nesigurnost utjecaja rezolucije
$u(\delta_r)$	μm	Mjerna nesigurnost određivanja centra linije
$u(\delta_{ixs})$	μm	Mjerna nesigurnost greške suosnosti
$c_{\Delta t}$		Koeficijent osjetljivosti temperaturne razlike
$c_{\delta_{l_m}}$		Koeficijent osjetljivosti utjecaja Abbe-ove greške
c_{δ_o}		Koeficijent osjetljivosti utjecaja rezolucije
c_{ixs}		Koeficijent osjetljivosti utjecaja greške suosnosti
c_r		Koeficijent osjetljivosti određivanja centra linije
x_n	mm	Najveća vrijednost niza
x_{n-1}	mm	Druga po veličini vrijednost niza
x_1	mm	Najmanja vrijednost niza
Q_k		Kritična vrijednost
R100	Ω	Vrijednost otpora pri 100 $^{\circ}\text{C}$
R0	Ω	Vrijednost otpora pri 0 $^{\circ}\text{C}$

SAŽETAK

Cilj ovog diplomskog rada je opis 1D mjernog uređaja za umjeravanje mjerila s krutom podjelom te defniranje sastavnice mjerne nesigurnosti uz postavljeni matematički model.

U prvom dijelu su opisani osnovni mjeriteljski pojmovi, sastavni dijelovi uređaja te postavljen matematički model mjerenja.

U drugom dijelu su prikazani opis izvođenja i grafički prikaz eksperimentalnog dijela rada koji su imali za zadatak utvrditi iznose glavnih sastavnica mjerne nesigurnosti.

Ključne riječi: umjeravanje, mjerna nesigurnost, mjerni uređaj, mjerenje pomaka

SUMMARY

The aim of this master thesis is to describe the 1D measuring device used for calibration of measuring instruments with rigid division and to define the component of measurement uncertainty with the mathematical model.

The first part describes the basic metrological concepts, the composition of the device parts and sets the mathematical model of measurement.

The second part presents a description of the performance and a graphical presentation of the experimental part of the work, which had the task of determining the amounts of the main components of measurement uncertainty.

Key words: calibration, measurement uncertainty, measuring device, shift count

1. UVOD

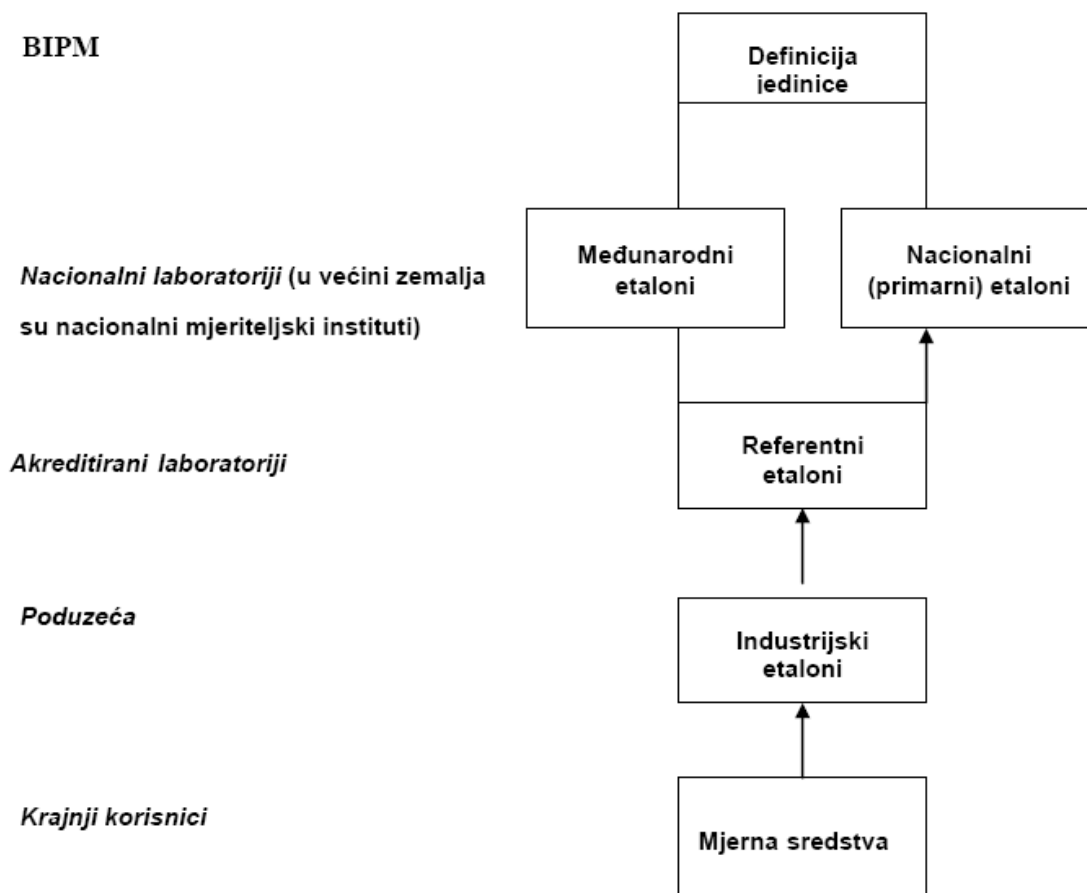
1.1. Uvod

Mjerenje je sastavni dio ljudskog života od pojave sjedilačkog načina života. Mjeralo se najčešće koristilo na tržnicama pri razmjeni dobara. Mjerne jedinice su najčešće bili dijelovi ljudskog tijela poput palca ili lakta. Tako se primjerice u Dubrovniku nalazi Orlandov stup, srednjovjekovni spomenik viteza na čijem se laktu uzimala mjera za dužinu od 51,2 cm koja je bila zvana dubrovački lakat. Duljina se također mjerila i posrednim putem preko vremena potrebnog za određeni prijedeni put primjerice dan plovidbe ili dan hoda.

Razvojem industrije i društva kao cijelog uvidjela se potreba za standardiziranim mjernim jedinica pa je tako 20. svibnja. 1875. u Parizu potpisan Dogovor o metru. 17 država je bilo među potpisnicima dogovora a među njima i Hrvatska koja je tada bila u sastavu Austro-Ugarske.

U današnjoj proizvodnji mjeriteljstvo je neizostavan dio procesa ako želimo osigurati ponovljivost procesa, kvalitetu i poznavanje prave mjere predmeta. Pogrešne mjere mogu dovesti do lošeg spoja pri sklapanju više dijelova što vodi do povećanja troškova u vidu potrošnje dodatnog vremena i dodatnih resursa. Također ako loše izrađen proizvod izađe na tržište, klijenti će iskazati nezadovoljstvo što negativno utječe na tvrtku. Da bi osigurali sljedivost izmjera potrebno je držati se međunarodno dogovorenih normi mjerenja koje opisuju način i potrebne uvjete u kojima je potrebno provesti mjerenje.

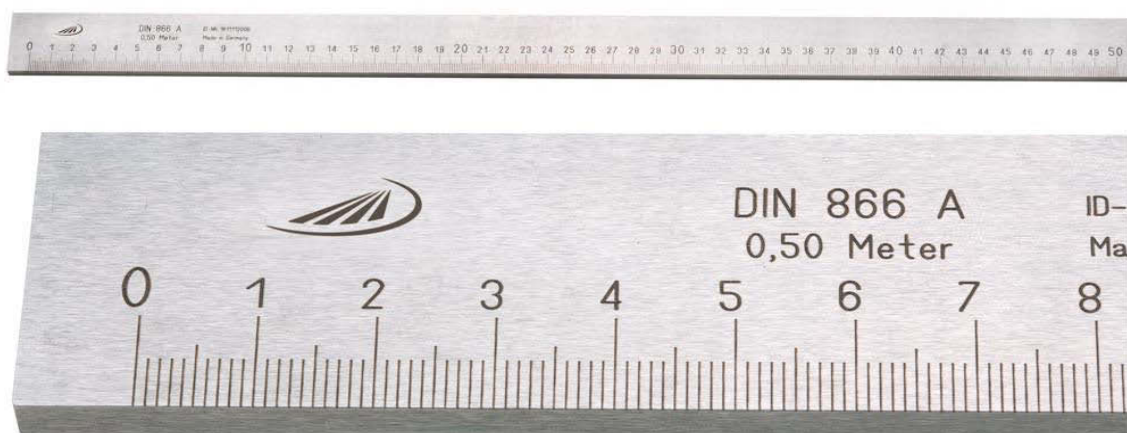
Umjeravanje je radnja kojom se pod određenim uvjetima u prvome koraku uspostavlja odnos između vrijednosti veličine s mjernim nesigurnostima koje daju mjerni etaloni i odgovarajućih pokazivanja kojima su pridružene mjerne nesigurnosti, a u drugome koraku ti se podaci upotrebljavaju za uspostavljanje odnosa za dobivanje mjernog rezultata iz pokazivanja. Umjeravanje mjerila provodi se mjernim etalonima, tj. mjerilima koja služe kao referenca za utvrđivanje vrijednosti veličina i pridružene mjerne nesigurnosti za dodjelu mjernih rezultata druge veličine iste vrste, uspostavljajući mjeriteljsku sljedivost [1].



Slika 1. Lanac sljedivosti [2]

1.2. Kruta mjerila s podjelom duljine

1.2.1. Mjerno ravvalo



Slika 2. Mjerno ravvalo [3]

Na slici je prikazano mjerno ravnalo duljine 500 mm izrađeno od visokolegiranog čelika prema DIN 866 A normi. Skala je izražena u milimetrima uz 10 mm zaštitni rub s obje strane mjernog ravnala. Tolerancija iznosi 0,030 mm, odnosno 30 µm prema DIN 866 A normi.

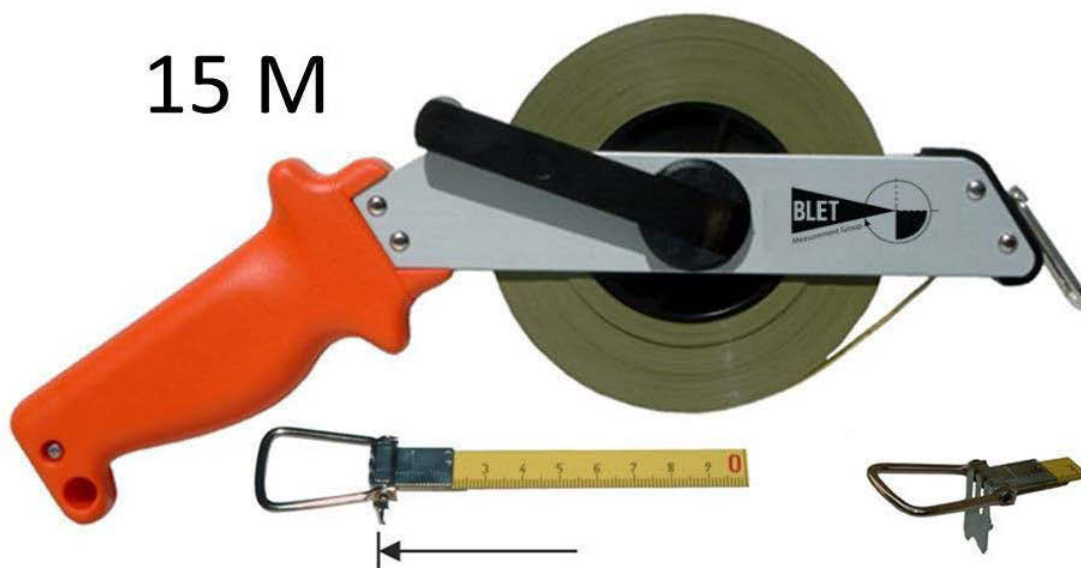
1.2.2. Mjerna letva



Slika 3. Mjerna letva [4]

Primjer uporabe mjerne letve je mjerenje količine goriva u rezervoaru. U tom slučaju mjerna letva mora biti otporna na kemijsko nagrizanje goriva pa se izrađuje od drveta ili metala sa zaštitnim premazima za dulje očuvanje. Isto tako mjerna letva ne smije biti izrađena od materijala koji može zaškriti zbog opasnosti od požara.

1.2.3. Tračni metar



Slika 4. Tračni metar [5]

Tračni metar nije primjer mjerila s krutom podjelom ali ga je zato moguće umjeravati na uređajima za umjeravanje poput BMG 3000. Za zateznu silu koja je potrebna pri umjeravanju se koriste utezi od 5, 20 i 50 N.

Tablica 1. Tolerancijski razredi tračnog metra [6]

Class	1 m	2 m	3 m	5 m	10 m	15 m	20 m	30 m	50 m
I	0,2	0,3	0,4	0,6	1,1	1,6	2,1	3,1	5,1
II	0,5	0,7	0,9	1,3	2,3	3,3	4,3	6,3	10,3
III	1,0	1,4	1,8	2,6	4,6	6,6	8,6	12,6	20,6

Tolerancijske vrijednosti su određene pri 20 °C , sili od 50 N i odnose se na \pm mm

1.3. Umjeravanje krutih mjerila

1.3.1. Pregled postojećih uređaja na tržištu

- PLM 600 - E



Slika 5. PLM 600-E [7]

PLM 600-E je uređaj za precizno mjerenje duljine koji se odlikuje brzim kretanjem motoriziranog nosača i mjernim područjem do 600 mm. Softverski paket uključuje i kompenzaciju okolišnih uvjeta, a sam mjerni uređaj je usklađen s Abbe-ovim principima.

- Precimar CiM 1000



Slika 6. Precimar CiM 1000 [8]

Odlike ovog uređaja za mjerenja duljine su kruto postolje zahvaljujući granitnoj podlozi, kontrola pozicioniranja pomoću upravljačkog štapa te automatsko pozicioniranje graničnika preko zračnih ležajeva. Mjerni način je u skladu s Abbe-ovim principima.

- BMG 2000

Mjerni uređaj ima dva načina rada, potpuno automatiziran ili poluautomatiziran uz motorom pogonjeno predpozicioniranje mjernih točaka. Rezolucija iznosi 1 μm . Pomoću utega je moguće ostvariti silu protuteže ako je ona potrebna za umjeravanje mjerila poput tračnog metra.



Slika 7. BMG 2000 [9]

- Zeiss ULM 01-600 C



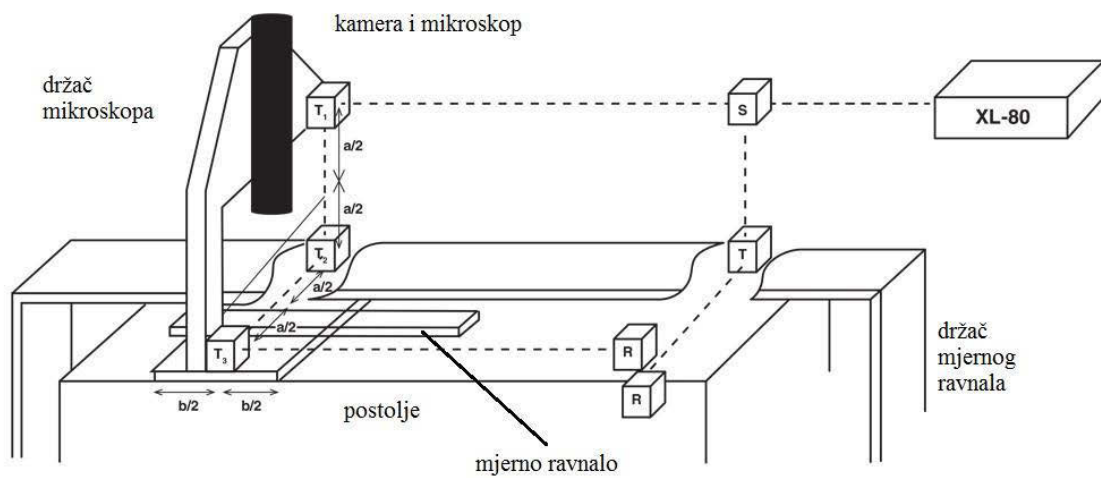
Slika 8. Zeiss ULM 01-600 C [10]

Zeiss univerzalni uređaj za mjerenje duljine je razvijen 1983. godine. Uz različite setove dodatka moguće je na ovome uređaju izvesti niz preciznih mjerenje različitih objekata poput zupčanika, ležajeva ili osovina.

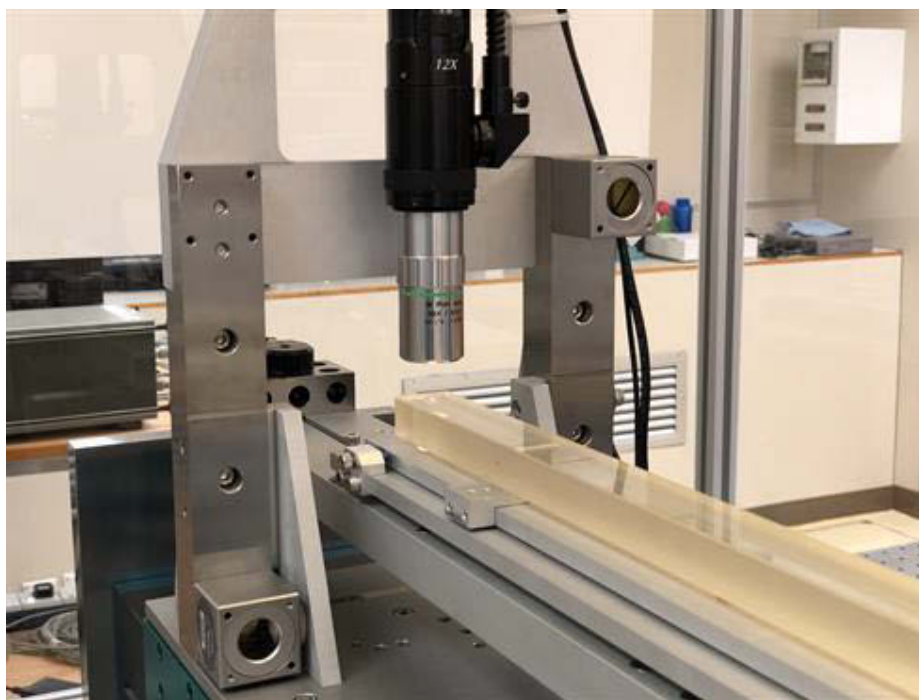
1.3.2. Načini mjerenja

Postoje dva osnovna načina mjerenja predmeta. U prvom je optički sustav fiksiran a predmet mjerenja je pomičan. Zbog svoje preciznosti i jednostavnosti upravljanja pozicioniranjem, gibanja se najčešće izvode koračnim motorima ili koračnim motorima s piezoelektričnim efektom.

Drugi tip mjerenja se odvija tako da je optički sustav pomičan a predmet mjerenja fiksiran. Primjer takvog uređaja je i uređaj opisan u ovom radu.

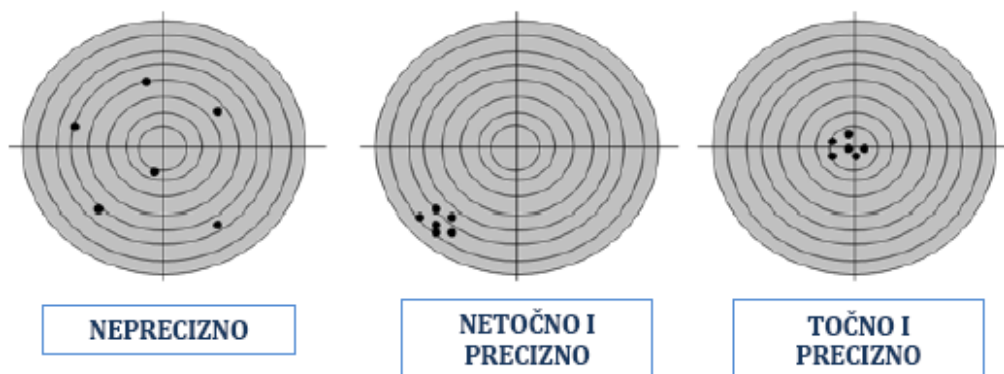


Slika 9. Shema pomičnog načina mjerenja [11]



Slika 10. Uređaj za mjerenje duljine [11]

1.3.3. Tipične performanse



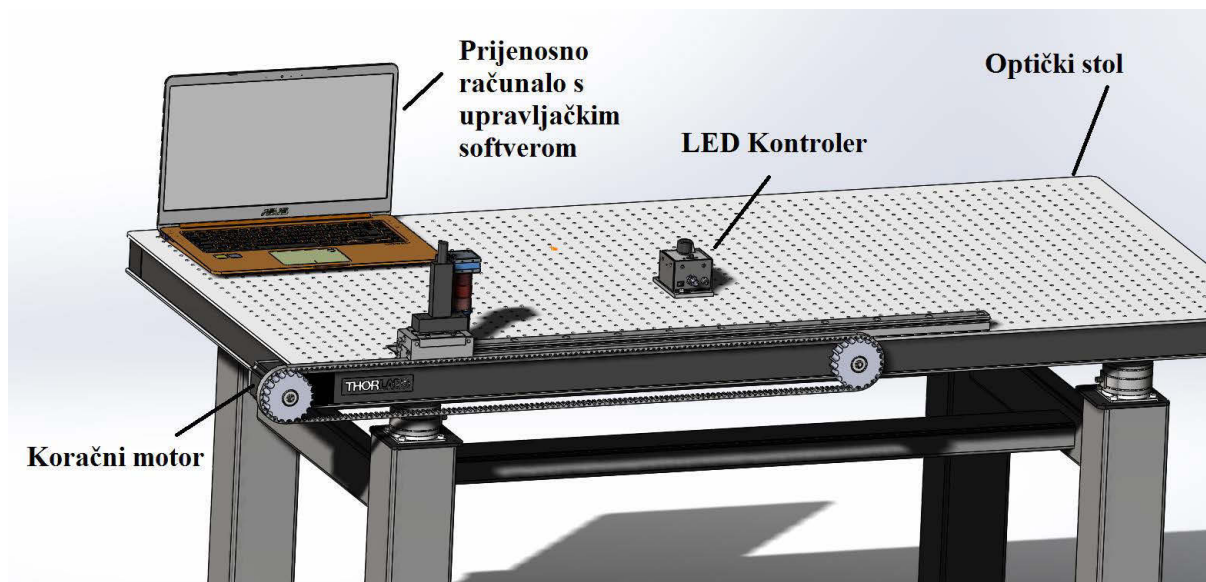
Slika 11. Točnost i preciznost [2]

Tablica 2. Performanse uređaja

Uređaj	Točnost	Mjerna nesigurnost	Pogon	Mjerno područje
Zeiss ULM 01-600 C	0,1 μm	$(0,3 + L/1500) \mu\text{m}$	ručni, motor	0 - 100 mm
PLM 600-E	$<0,05 \mu\text{m}$	$(0,085 + L/1500) \mu\text{m}$	motor, CNC upravljano	0 - 600 mm
CiM 1000	$<0,03 \mu\text{m}$	$(0,055 + L/1500) \mu\text{m}$	motor, CNC upravljano	0 - 1000 mm
BMG 2000	$< 0,15 \mu\text{m}$	$< 50 \mu\text{m}$	motor, CNC upravljano	0 - 2000 mm

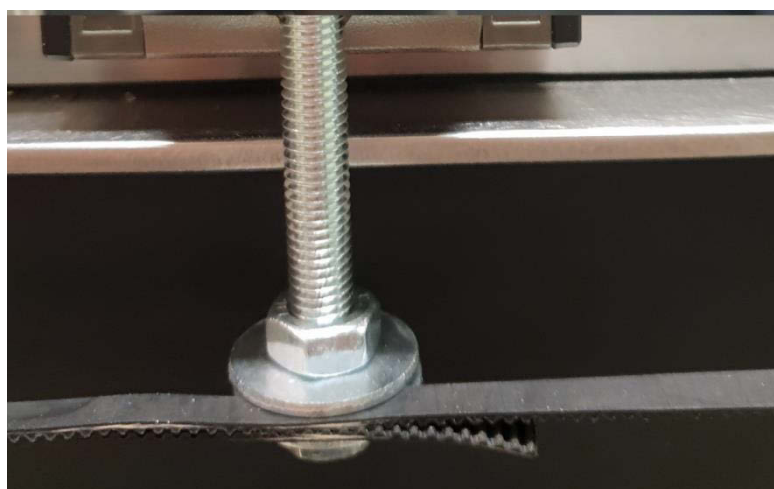
2. SUSTAV ZA UMJERAVANJE KRUTIH MJERILA S PODJELOM U FSB-LPMD

U laboratoriju za precizna mjerenja dužine koji se nalazi na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, razvijen je sustav s karakteristikama koje su opisane u sljedećim poglavljima.

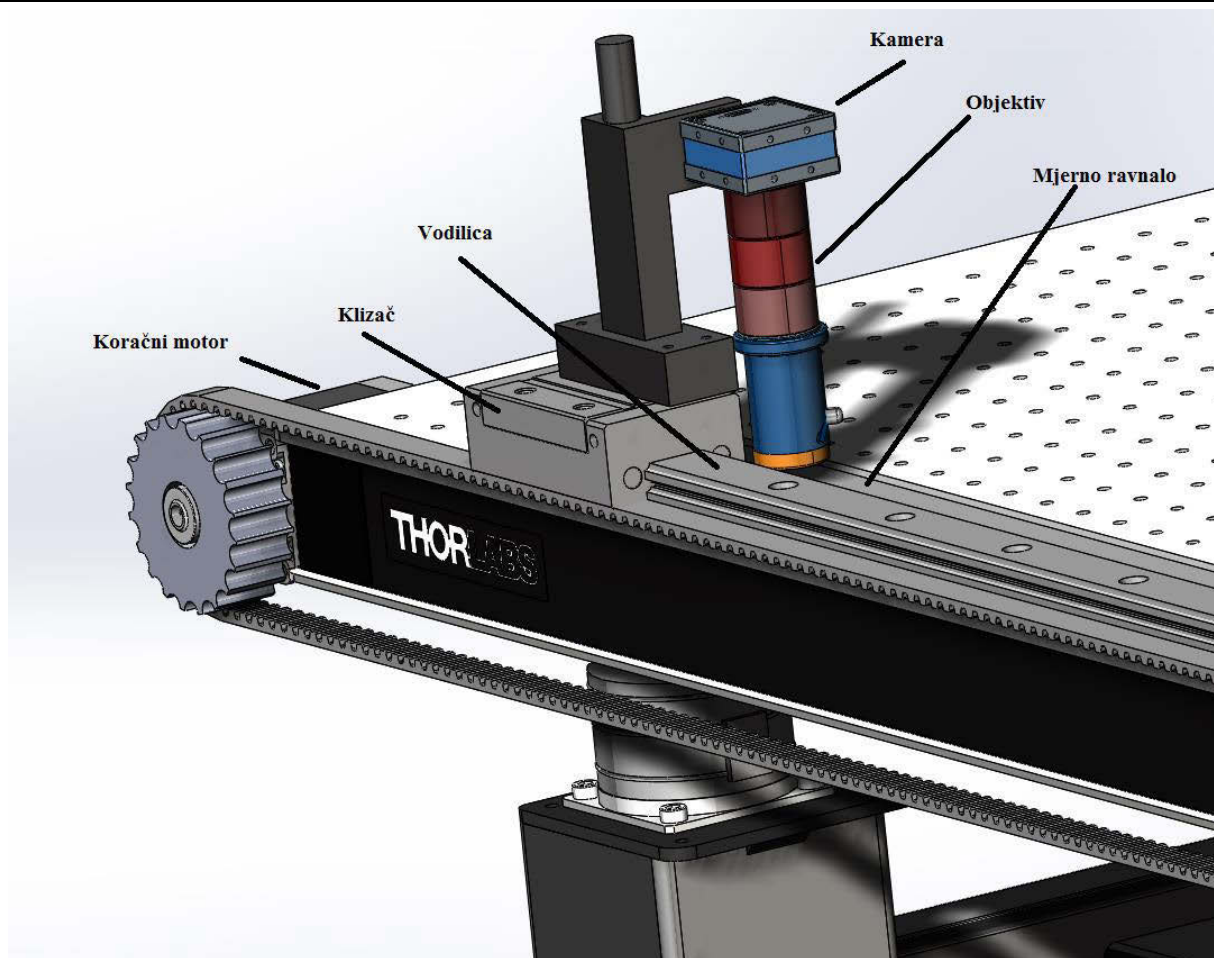


Slika 12. 3D model umjeravanja mjernog ravnala

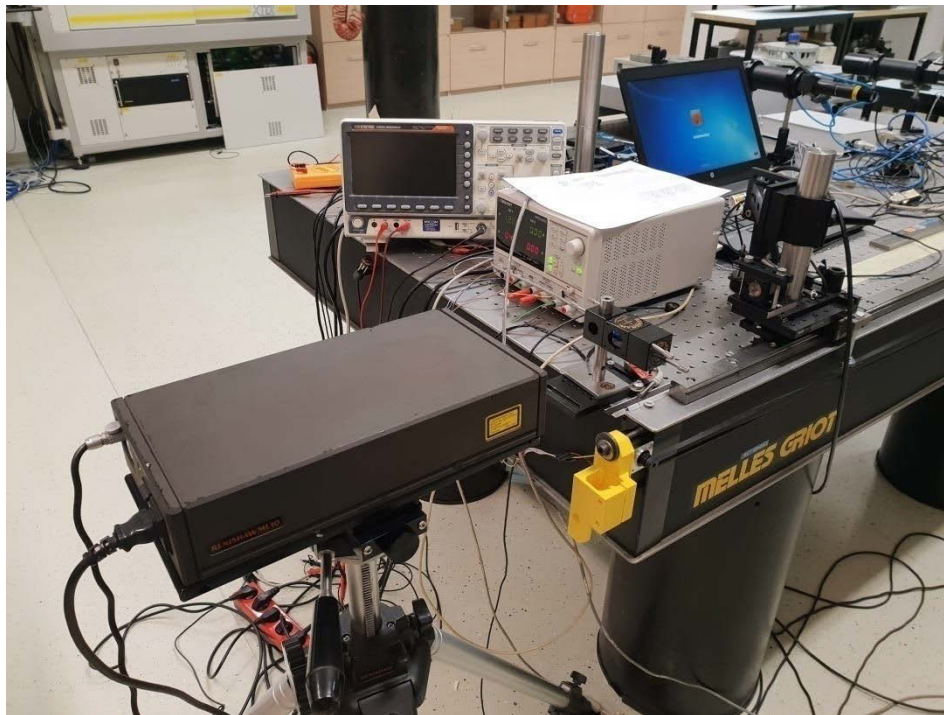
Na 3D modelu se nalaze još i enkoder i pripadajuća glava enkodera koji nisu označeni jer nisu vidljivi iz kuta gledanja slike. Na slici [14] je prikazan krupni plan postupka umjeravanja mjernog ravnala od 500 mm. Kablovi za napajanje i prijenos podataka nisu prikazani radi preglednosti slike. Klizač je za pogonski remen mehanički pričvršćen dvjema maticama na vijku preko dvije podloške što je vidljivo na slici [13].



Slika 13. Spoj pogonskog remena i klizača



Slika 14. Umjeravanje mjernog ravnala



Slika 15. Prikaz sustava u laboratoriju za precizna mjerenja

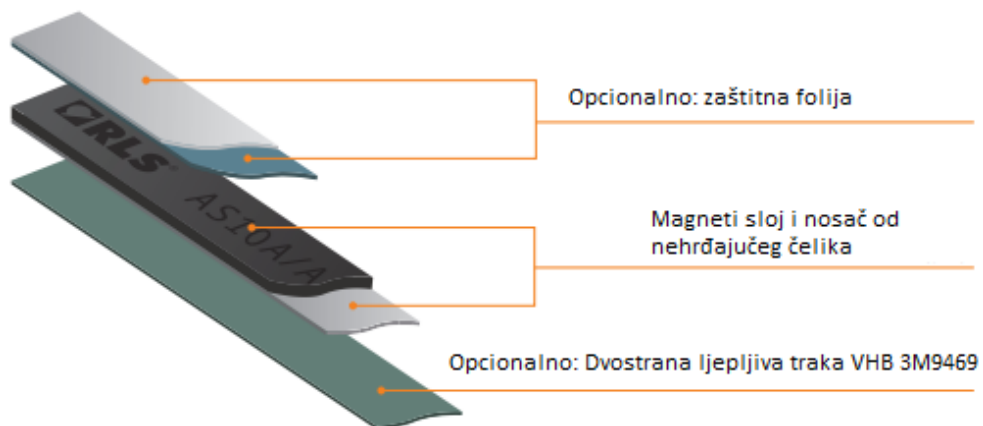
2.1. Enkoder

Sustav enkodera se sastoji od dva dijela, magnetske trake RLS AS10 i glave čitača RLS LA11

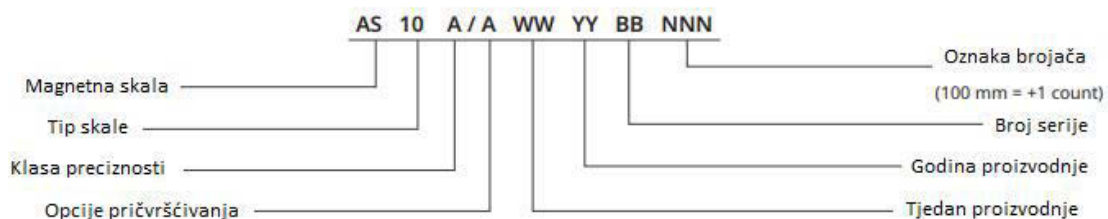
2.1.1. RLS AS10 magnetska traka

RLS AS10 traka apsolutne magnetske skale se sastoji od nosača trake napravljenog od nehrđajućeg čelika i ferita vezanog elastomerom. Traka je pričvršćena na radni stol pomoću vijaka s podloškama. Elasto-feritni sloj je magnetiziran inkrementalnim magnetskim uzorkom i pseudo-slučajnim kodom za očitavanje apsolutnog položaja. Odlike ove trake su dobra otpornost na vanjske utjecaje poput prljavštine, vlage ili prašine. Maksimalna duljina je 16,3 m uz širinu trake od 10 mm.

Struktura



Slika 16. Struktura magnetske trake RLS AS10 [12]



Slika 17. Opis oznake magnetske trake RLS AS10 [12]

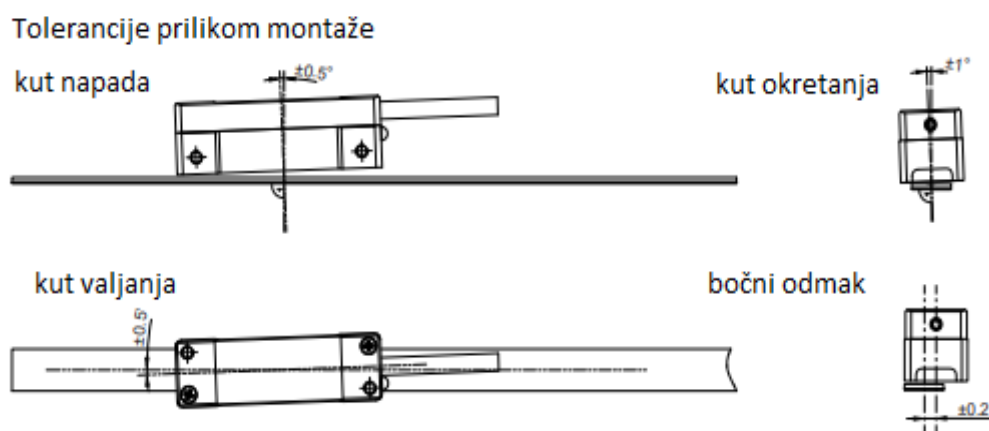
2.1.2. RLS LA11 linearni apsolutni magnetni enkoder

LA11 je apsolutni linearni enkoderski sustav napravljen u svrhu kontrole gibanja i pozicioniranja te kao element u povratnoj vezi brzine gibanja. Njegova visoka pouzdanost je proizašla iz činjenice da se radi o beskontaktnom apsolutnom mjerenju položaja, ugrađenim sigurnosnim algoritmima te visokoj kvaliteti materijala od kojih su komponente izrađene.

Elasto-feritni sloj je magnetiziran s dvije trake. Inkrementalna traka je magnetizirana s naizmjenično postavljenim južnim i sjevernim polovima svaka 2 mm, a apsolutna traka je magnetizirana s PRBS (Pseudo nasumična binarna sekvenca) apsolutnim kodom duljine 13 bitova. PRBS kod je binarna sekvenca koja je generirana determinističkim algoritmom što znači da je teško za predvidjeti njen izgled i predstavlja statistički nasumično ponašanje slično kao kod nasumične sekvence. U odnosu na pravu nasumičnu sekvencu koda, kod pseudo nasumične sekvence se određuju funkcije generiranja koda i početak koda. PRBS kod se očitava preko senzora Hallovog efekta a inkrementalni kod preko AMR senzora. Enkoder nosi oznaku IP68 što mu osigurava dobru zaštitu od prašine i utjecaja vode na rad sustava. Komunikacija s operativnim sustavom se vrši preko enkoderskog sučelja RLS ES201.

Tip enkodera	Apsolutni enkoder
Tip očitavanja	Linearni
Preciznost sustava	$\pm 40 \mu\text{m/m}$
Preciznost na kratkom dometu	$< \pm 10 \mu\text{m}/10 \text{ mm}$
Rezolucija	Do $0,244 \mu\text{m}$
Brzina	Do 7 m/s pri $0,977 \mu\text{m}$ rezolucije
Napajanje	4,75 V to 5,75 V, 8 V do 30 V
Masa	41 g uključujući 1 m kabela bez konektora
Temperaturni raspon djelovanja	0 °C to +55 °C

Tablica 3. Tehnički podatci enkodera [13]



Slika 18. Prikaz tolerancija prilikom montaže [13]

2.2. Kamera

Osnovni dio vizijskog sustava je kamera i u ovom slučaju je odabran model DMK 37AUX264 tvrtke The Imaging Software. Kamera se odlikuje rezolucijom od 5 megapiksela (2448 x 2048) i brzinom kadra do 38 slika po sekundi. Da bi se kamera mogla koristiti u industrijskoj primjeni potrebno je skeniranje predmeta koji se kreću velikom brzinom. Dosadašnje CMOS (komplementarni metal oksidni poluvodič) kamere ne mogu dovoljno brzo prepoznati objekte zbog efekta bljeskalice i izobličenja žarišne ravnine. Zahvaljujući CMOS senzoru slike s globalnim zatvaračem i veličinom piksela od 3,45 μm , ostvarena je veća osjetljivost i manji šum što dovodi do visoke kvalitete slike, rezolucije i snimanja bez izobličenja žarišne ravnine.

Mogućnosti kamere:

- Kontrola očitavanja senzora
- Odabir rezolucije (minimalno 256, maksimalno 2448)
- Različiti načini očitavanja
 - Način preskakanja

Pri zadanim postavkama kamera prikazuje sve piksele senzora slike dok u načinu preskakanja se neki redovi ili stupci piksela preskaču. Time se dobiva manja izlazna slika koja sadrži isto polje pregleda.

- Način spajanja

U načinu spajanja se susjedni pikseli spajaju u jedan izlazni piksel tijekom očitavanja. Prednost ovakvog načina je bolja kvaliteta slike nego u načinu preskakanja ali način preskakanja uglavnom daje viši maksimalni broj slika po sekundi.

- Različita brzina kadra
- Djelomični odmak skenirane slike
- Zakretanje slike horizontalno ili vertikalno
- Kontrola vremena ekspozicije, pojačanja i intenziteta crne boje
- Automatska korekcija pojačanja i vremena ekspozicije
- Okidač slika na zadanom vremenu
- Bljeskalica



Slika 19. DMK 37AUX264 kamera [17]

Vizijski standard	USB3 Vision
Dinamični raspon	12 bit
Rezolucija	2448x2048
Okvir kadra pri najvećoj rezoluciji	38
Formati piksela	8-bitni monokromatski 16-bitni monokromatski
Tip senzora	Sony IMX264LLR-C
Tip zatvarača	globalni
Format senzora	2/3 inča
Veličina piksela	3,45 μm
Napajanje	5 VDC, 360 mA
Zatvarač	25 μs do 4 s
Pojačanje	0 dB do 48 dB
Temperaturni raspon radnog područja	-5 °C do 45 °C

Tablica 4. Tehnički podatci kamere DMK 37AUX264 [17]

2.3. Objektiv Opto Engineering MC3-03X

Zadaća objektiva je fokusiranje svjetla iz okoline do fiksne žarišne točke kamere. Svjetlost u digitalnim fotoaparatom pada na digitalni senzor. Sama leća se sastoji jedne ili od niza konveksnih ili konkavnih staklenih ploča.

Žarišna duljina je mjera udaljenosti između točke konvergencije leće i senzora koji snima sliku. Raspon žarišne duljine objektiva izražava se brojem koji govori koliko će scene moći kamera snimiti. Manji brojevi znače da će se moći snimiti širi kut gledanja i samim time više scene a veći brojevi znače užu kut gledanja i manji prikaz.

F-broj označava omjer između promjera otvora blende i žarišne duljine samog objektiva i tako označava količinu svjetlosti koja prolazi kroz leću. Što je veći F broj to je manji otvor. Sam otvor blende utječe i na dubinu polja na način da veći otvori stvaraju manju dubinu polja dok manji otvori čine više slike u fokusu [21].

Objektiv Opto Engineering je makro objektiv s više konfiguracija koje je moguće postići nastavcima iz seta za produživanje cijevi. Makro leća služi za snimanje predmeta izbliza uz bolju vidljivost detalja. Dodavanje odstojnika pomiče se žarišna duljina prema naprijed što omogućava snimanje iz veće blizine. Moguće je pregledavati objekte veličine od nekoliko milimetara do nekoliko centimetara. Prednost više konfiguracija je fleksibilnost kod raznovrsnih zadataka te mogućnost primjene u sustavu strojnog vida. Povećanje i fokus se također mogu podesiti što se izvršava preko okretnog gumba s mogućnošću zaključavanja. F-broj se također povećava s povećanjem pa se razlučivost slike i svjetlina uz optimalnu kombinaciju dubine također održava u bilo kojoj konfiguraciji leće.



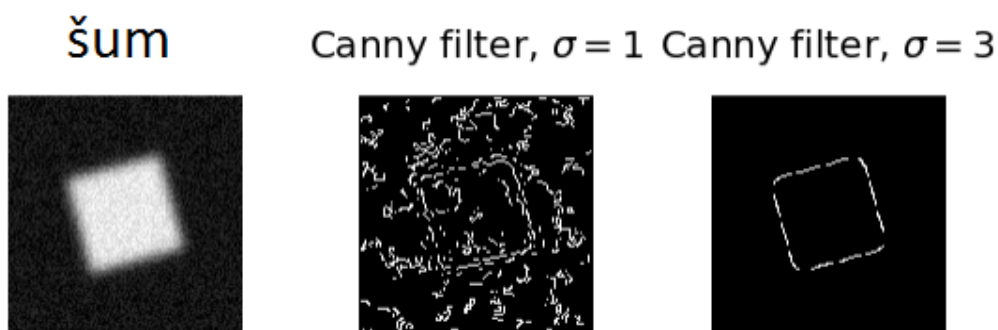
Slika 20. Objektiv Opto Engineering MC3-03X [19]

Tablica 5. Tehnički podatci objektiva Opto Engineering MC03-03X [19]

Tip detekcije	Do 11.00 mm (2/3 inča)
Povećanje bez odstojnika	Od 0,1x 0,9x
Povećanje s jednom odstojnikom	Od 0,7x do 1,6x
Povećanje s dva odstojnika	Od 1,4x do 2,3x
Povećanje s tri odstojnika	Od 2,1 do 3,0x
Raspon valne duljine	450 - 650 nm
Distorzija	<0,07%
Radna distanca	28,0 - 275,0 mm
F/#	5,5 - 3,0

2.4. Canny algoritam

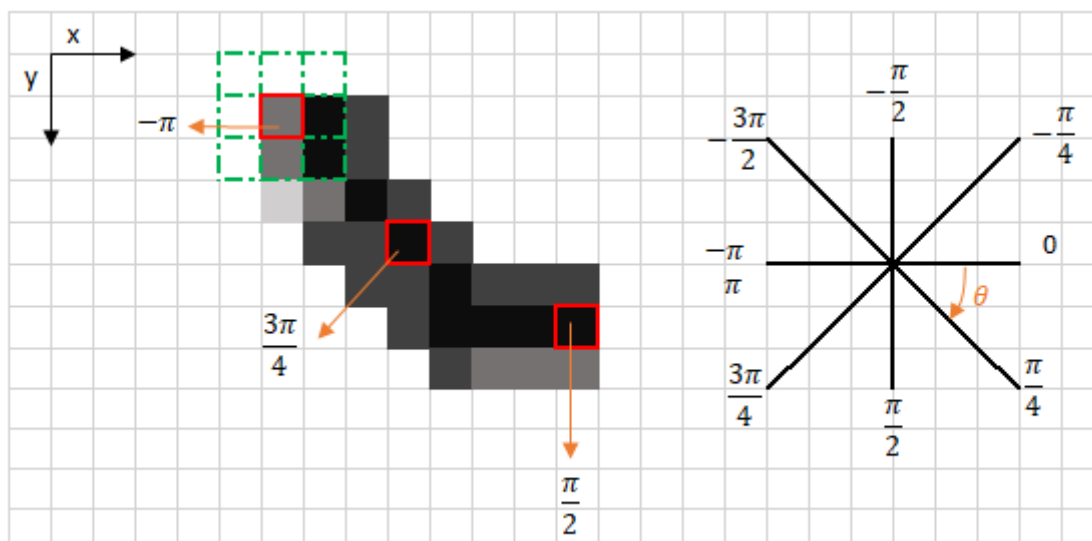
Canny algoritam je softverski dio koji služi u svrhu pronalaska širokog raspona rubova u slikama. To je višekoračni algoritam razvijen od strane John F. Cannyja. Ulazni parametar je slika u sivim tonovima dok je izlazni parametar crno-bijela slika s jasno istančanim rubovima [22].



Slika 21. Filter šuma [22]

Prvi korak je micanje šumova sa slike pomoću Gaussove 5x5 matrice nakon čega slijedi pronalazak gradijenta intenziteta slike koji je uvijek okomit na rub koji se nalazi na slici.

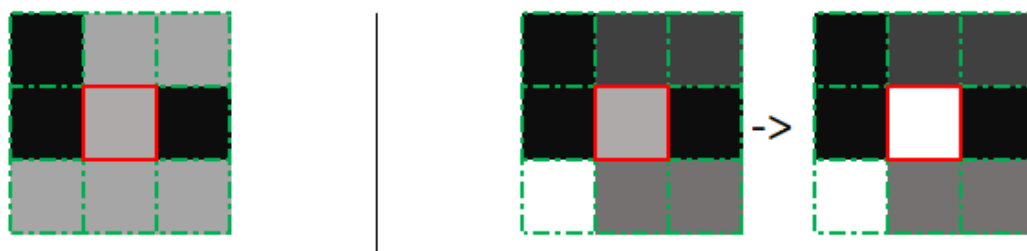
Nakon pronalaska gradijenta intenziteta i smjera radi se na micanju neželjenih piksela sa slike koji nemaju veze s rubom. To se radi tako da se provjerava svaki piksel u matrici intenziteta gradijenta i pronalaze pikseli s maksimalnom vrijednošću u smjerovima ruba [23].



Slika 22. Traženje rubova [23]

U predzadnjem koraku se radi na filtraciji dobivenih rubova gdje se po pridodanim vrijednostima intenziteta razdvaja moguće rubove u tri kategorije. U prvoj se nalaze rubovi s vrijednostima iznad gornje granice i to su zasigurno rubovi koje želimo zadržati. Rubove ispod minimalne granice sigurno odbacujemo a sve rubove koji se nalaze između tih vrijednosti dalje provjeravamo. Ako su vezani na rub koji je zasigurno potvrđen rub, onda se taj rub zadržava ili se u protivnom odbacuje sa slike.

U zadnjem koraku se izoštravaju rubovi pomoću dodjeljivanja vrijednosti na temelju okolnih piksela. Ako je vrijednost bila srednja a u susjedstvu se ne nalazi niti jedan piksel visoke vrijednosti onda se tom pikselu daje niska vrijednost. Ako se u susjedstvu nalazi piksel visoke vrijednosti onda se piksel srednje vrijednosti pridodaje njemu i postaje piksel visoke vrijednosti. Raspon vrijednosti piksela je od 0-255.

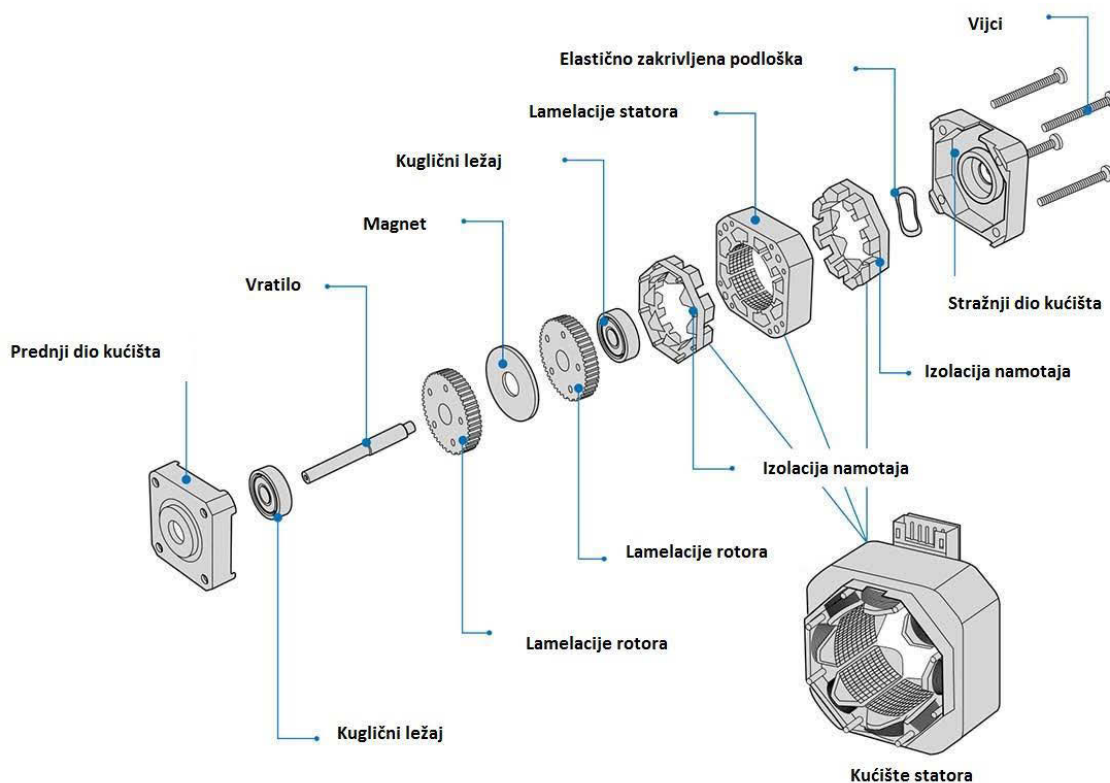


Slika 23. Bez visokih vrijednosti u okolini i s visokim vrijednostima u okolini [23]

2.5. Koračni motor

Za linearno kretanje kamere je upotrebljen koračni motor koji kameru pogoni preko nazubljenog pogonskog remena. Standardni istosmjerni motor se najčešće kontinuirano okreće sve dok mu se ne prekine dovod struje što jako otežava kontrolu točke zaustavljanja motora. Koračni motor su sinkroni istosmjerni motori bez komutatorskih četkica koji za razliku od ostalih tipova motora mogu ostvarivati precizno pokretanje i zaustavljanje na dijelu kuta zakreta. Umjesto rotora žičane zavojnice koji se vrti unutar kućišta magneta kod koračnog motora je kućište s elektromagnetom u sredini koji se vrti te zadrži zupce na sebi. Konstrukcija se sastoji od niza zavojnica koje su raspoređene u fazama i mogu se u brzim sekvencama isključivati i uključivati. Time postizemo male korake što je od iznimne važnosti u situacijama koje zahtijevaju precizno pozicioniranje.

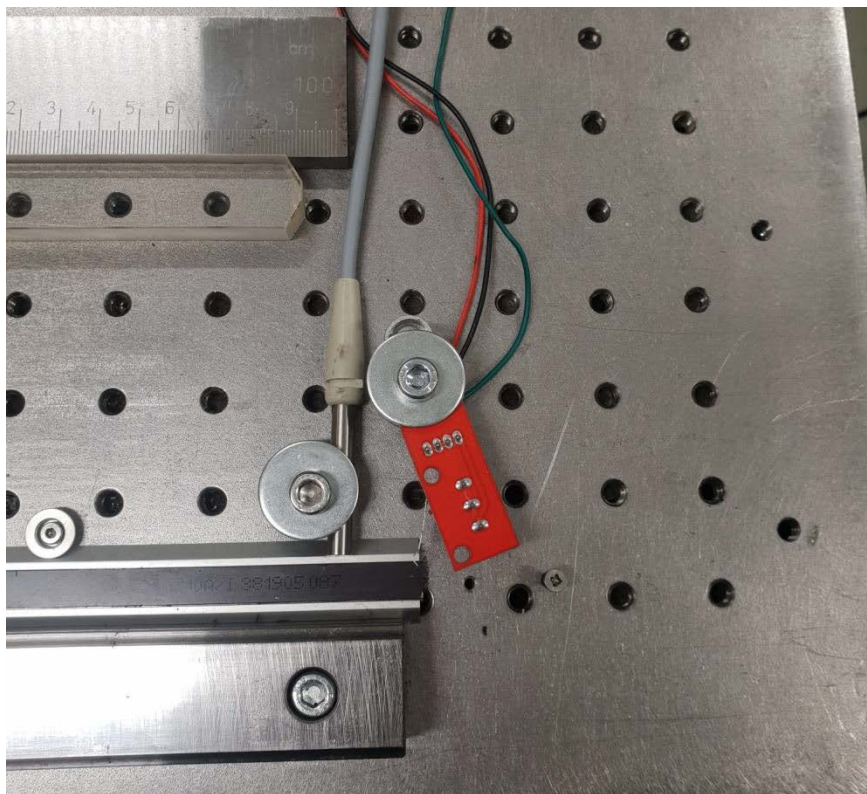
Koračni motori služe kao ključne komponente u sustavu pozicioniranja otvorene petlje i pomoću digitalnog kontroliranja možemo dobiti usko definirane rotacijske položaje. Koriste se u područjima gdje je potrebna visoka preciznost poput robotike ili u pisačima za papir i 3D print. Također prednost koračnih motora je i ponovljivost unaprijed određenih pokreta i jednostavno upravljanje otvorene petlje uz poznat korak.



Slika 24. Pregled komponenti koračnog motora [24]

2.6. Optički stol Melles Griot

Optički stol služi za kontrolu vibracija pri radu sustava koji se koriste za laserske i optičke eksperimente. Sama gornja površina je izrađena od pravokutne ploče nehrđajućeg čelika s pravokutnom mrežom narezanih M6 utora s razmakom od 25 mm. Utori služe za pričvršćivanje komponenti a alternativa tomu su komponente s magnetskim postoljem. Zbog potrebnih što manjih vibracija stolovi su teški i koriste niz elemenata za smanjenje vibracija poput pneumatskih izolatora između poda i same ploče stola. Ravnost stola je posebno bitna kod laserskih sustava da bi osigurali dobar kontakt s površinom stola i time smanjili uvođenje moguće greške u sustav. Nekada su se stolovi radili od velikih blokova granita ali zbog lošijeg prigušivanja vibracija bilo je potrebno pronaći bolje rješenje. Danas se optički stolovi rade od ploha nehrđajućeg čelika na podlozi od rešetkaste saćaste strukture aluminija ili ugljičnih vlakana koje prigušuju vibracije.



Slika 25. Prikaz pričvršćivanja elemenata na optički stol

2.7. Sustav za mjerenje temperature

Sustav za mjerenje temperature se sastoji od digitalnog termometra DT10 tvrtke Lik elektronika na koji su bile priključene tri Pt100 sonde za mjerenje temperature. Maksimalno je moguće priključiti deset Pt100 sonda. Sonde su ravnomjerno raspoređene i pričvršćene za optički stol da bi se osiguralo optimalno prikupljanje temperaturnog stanja. Mjerna nesigurnost uređaja je ± 30 mK. Oznaka PT označuje da se radi o sondi izrađenoj od platine. Brojka 100 u imenu oznake označava vrijednost otpora od 100Ω pri temperaturi od $0 \text{ }^\circ\text{C}$ [27]. Temperaturno mjerno područje sonde je od $-200 \text{ }^\circ\text{C}$ do $850 \text{ }^\circ\text{C}$. Najčešći temperaturni koeficijent je $3,851 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$ što se očituje u oznaci "385" Pt100. Ovisno o čistoći platine korištene u izradi sonde alfa će poprimiti različite vrijednosti.

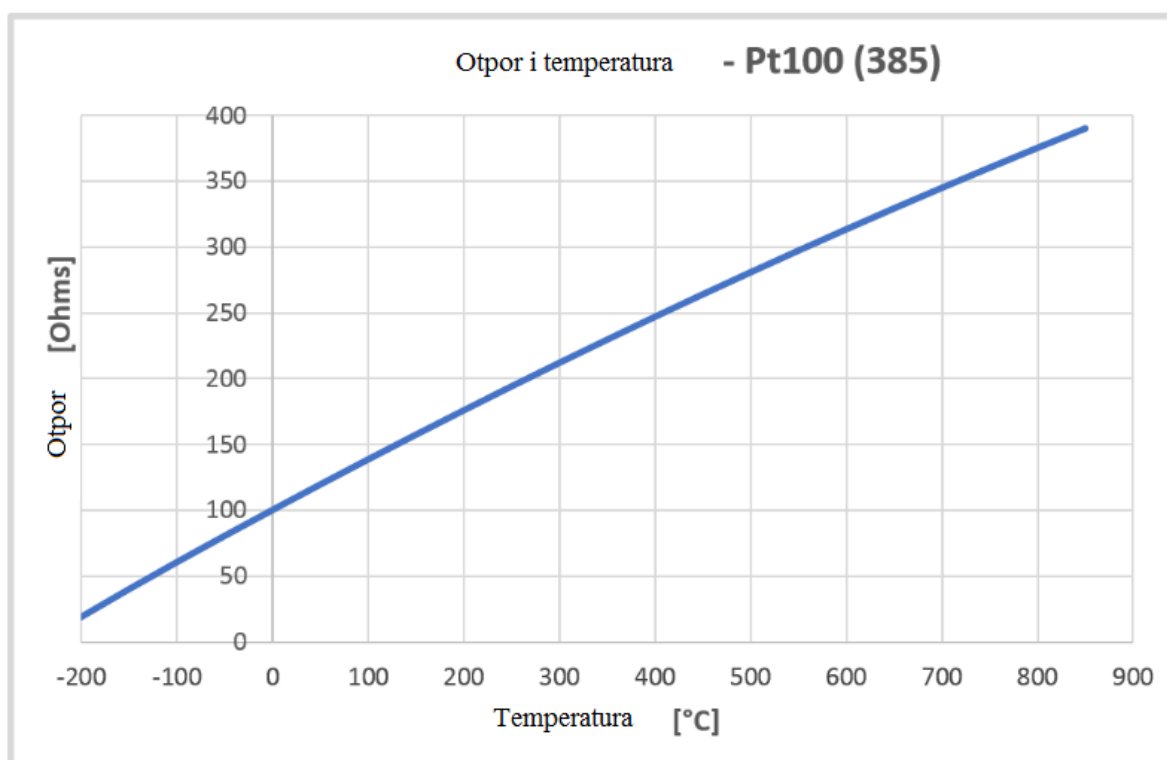
$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{R_0 \cdot 100 \text{ }^\circ\text{C}} \quad (1)$$

R_{100} = vrijednost otpora pri $100 \text{ }^\circ\text{C}$

R_0 = vrijednost otpora pri $0 \text{ }^\circ\text{C}$



Slika 26. Digitalni termometar Dt10



Grafikon 1. Otpor i temperatura Pt100 sonde [27]

2.8. NSK klizač i vodilica

NSK vodilice se odlikuju visokom preciznošću i kvalitetom izrade te otpornosti na utjecaj prašine. Serija LS se posebice odlikuje mogućnošću samoporavnjanja zbog toga što se križna točka kontaktnih linija ležaja nalazi u sredini klizača. Osim toga odlikuje se i te otpornošću na udarna opterećenja zbog pozicije kontaktnih kuglica ležaja te visokom nosivošću u vertikalnom smjeru . Oznaka vodilice je NSK LS30Z 73, a klizača S30 Z 72. Oznaka Z označava blago predopterećenje, a LS je naziv serije. Na klizaču se nalazi otvor za podmazivanje i zaštitni čepovi na rubovima klizača.



Slika 27. NSK klizač i vodilica [28]

3. MATEMATIČKI MODEL

$$E_x = L_e + \delta_{ixs} + \delta_{Abbe} + \Delta t \cdot \alpha \cdot L_l + \delta_o + \delta_r \quad (2)$$

E_x = procjena greške modela

L_e = očitavanje duljine na enkoderu

δ_{ixs} = korekcija zbog greške suosnosti enkodera i predmeta mjerenja

δ_{Abbe} = korekcija zbog Abbe-ove pogreške

Δt = razlika u temperaturi između enkodera i predmeta mjerenja

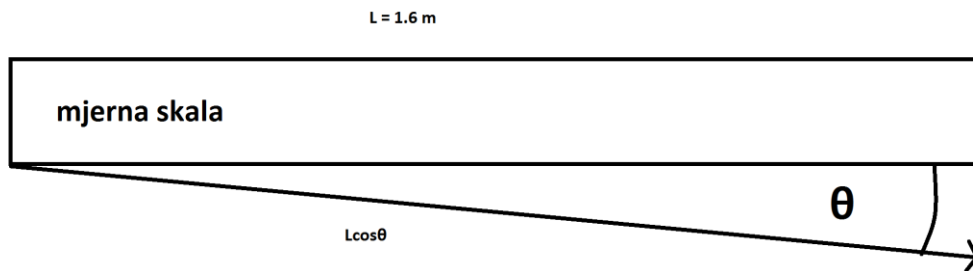
α = koeficijent temperaturnog rastezanja enkodera

δ_o = korekcija zbog osvjetljenja

δ_r = pogreška utvrđivanja centra linije

Δt_2 = razlika u temperaturi enkodera između stvarne i očitane vrijednosti

3.1. Greška suosnosti



Slika 28. Greška suosnosti

Greška suosnosti se javlja zbog kuta između stvarne linije enkodera i pretpostavljene idealno paralelne linije. Kut koji se javlja između njih nije moguće primijetiti te je stoga nužno uzeti u obzir ovaj tip greške. Uzeta je pretpostavka razmaka od 3 mm na duljini enkodera od 1.6 m.

$$\tan\theta = \frac{a}{L_e} = \frac{3}{1600} = 0,001875 \quad (3)$$

$$\theta = 0.1074^\circ$$

$$\delta_{ixs} = L - L \cdot \cos \theta = L \cdot (1 - \cos \theta) = L \cdot (1 - 0.99999842) = 1,58 \cdot L \text{ nm, } L \text{ u mm} \quad (4)$$

3.2. Korekcija greške uslijed toplinskog rastezanja enkodera i predmeta mjerenja

$$\delta(\Delta t) = \Delta t \cdot \alpha \cdot L = 13,6 \text{ } \mu\text{m} \quad (5)$$

$$\alpha = 17 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t = 20.5 - 20 = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$L = 1600 \text{ mm}$$

Pretpostavka temperaturne razlike između enkodera i predmeta mjerenja od $0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$

Mjerna nesigurnost uslijed toplinskog rastezanja $u(\Delta t)$

Usprkos temperaturnoj stabilizaciji koja će se dogoditi nakon određenog vremena moguća su temperaturna odstupanja između enkoderskog sustava i predmeta mjerenja. Pretpostavka temperaturne razlike je $\pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Standardna nesigurnost:

$$u(\Delta t) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0,5}{\sqrt{3}} = 0,2887 = 0,289 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6)$$

3.3. Korekcija greške uslijed toplinskog rastezanja enkodera

$$\delta(\Delta t_2) = \Delta t_2 \cdot \alpha \cdot L = 8,16 \text{ } \mu\text{m} \quad (7)$$

$$\alpha = 17 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t = 20.3 - 20 = 0,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$L = 1600 \text{ mm}$$

Pretpostavka temperaturne razlike za enkodera je $0,3 \text{ } ^\circ\text{C}$

Mjerna nesigurnost uslijed toplinskog rastezanja $u(\Delta t_2)$

Osim temperaturne razlike između predmeta mjerenja i enkodera, javlja se i razlika između stvarne i očitane temperature enkodera. Prilikom zagrijavanja enkodera, povećava se razmak između linija koda enkodera koje služe za očitavanje pozicije što uvodi grešku u sustav. Također i pri hlađenju linije se smanjuju što opet dovodi do pojave greške u sustavu. Pretpostavka temperaturne razlike je $\pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$.

Standardna nesigurnost:

$$u(\Delta t_2) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0,3}{\sqrt{3}} = 0,2887 = 0,173 \text{ }^\circ\text{C} \quad (8)$$

3.4. Abbe-ova greška

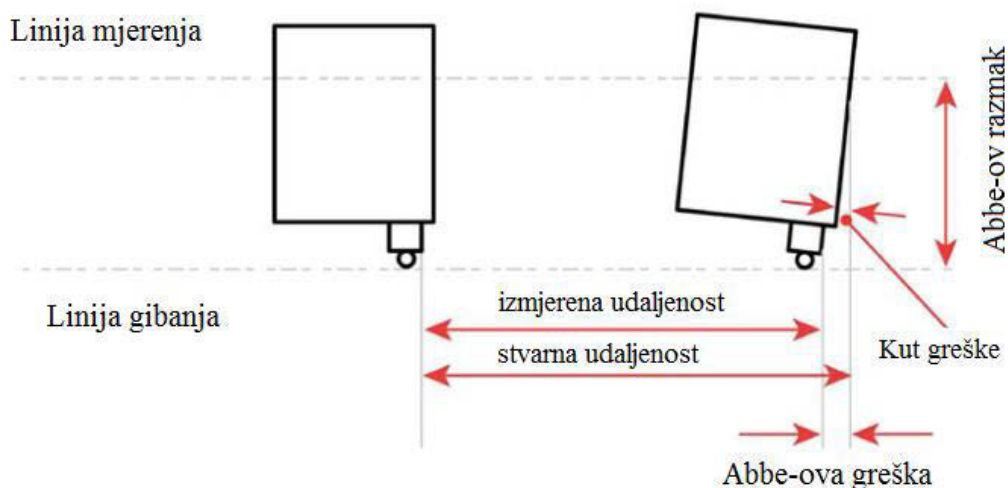
Abbe-ova greška nastaje zbog nepozicioniranja predmeta mjerenja u istu ravninu s mjerilom.

$$\delta_{Abbe} = d \cdot \tan \theta = 100 \cdot 0,00872687 = 0,0192 \text{ mm} = 19,2 \text{ } \mu\text{m} \quad (9)$$

$$\theta = 0,011^\circ$$

$$\tan \theta = 0,000192$$

$$d = \text{Abbe-ov razmak} = 100 \text{ mm}$$



Slika 29. Abbe-ova greška [29]

Mjerna nesigurnost uslijed mehaničkih utjecaja $u(\delta l_m)$

Izvor ove mjerne nesigurnosti su Abbe-ova greška i greška suosnosti enkodera. Procjena ukupne varijabilnosti iznosi $\pm (3 + 4L) \text{ } \mu\text{m}$, L u m.

$$u(\delta l_m) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{3+4L}{\sqrt{3}} = 1,732 + 2,309 \cdot L \text{ } \mu\text{m}, (L \text{ u m}) \quad (20)$$

3.5. Korekcija greške osvjetljenja

Mjerna nesigurnost greške osvjetljenja

Razina osvjetljenja utječe na vidljivost mjernih linije što dovodi do različitih rezultata pri različitim razinama mjerenja te ju je zbog toga nužno uključiti u model. Pretpostavljena vrijednost raspona greške iznosi $\pm 5 \text{ } \mu\text{m}$.

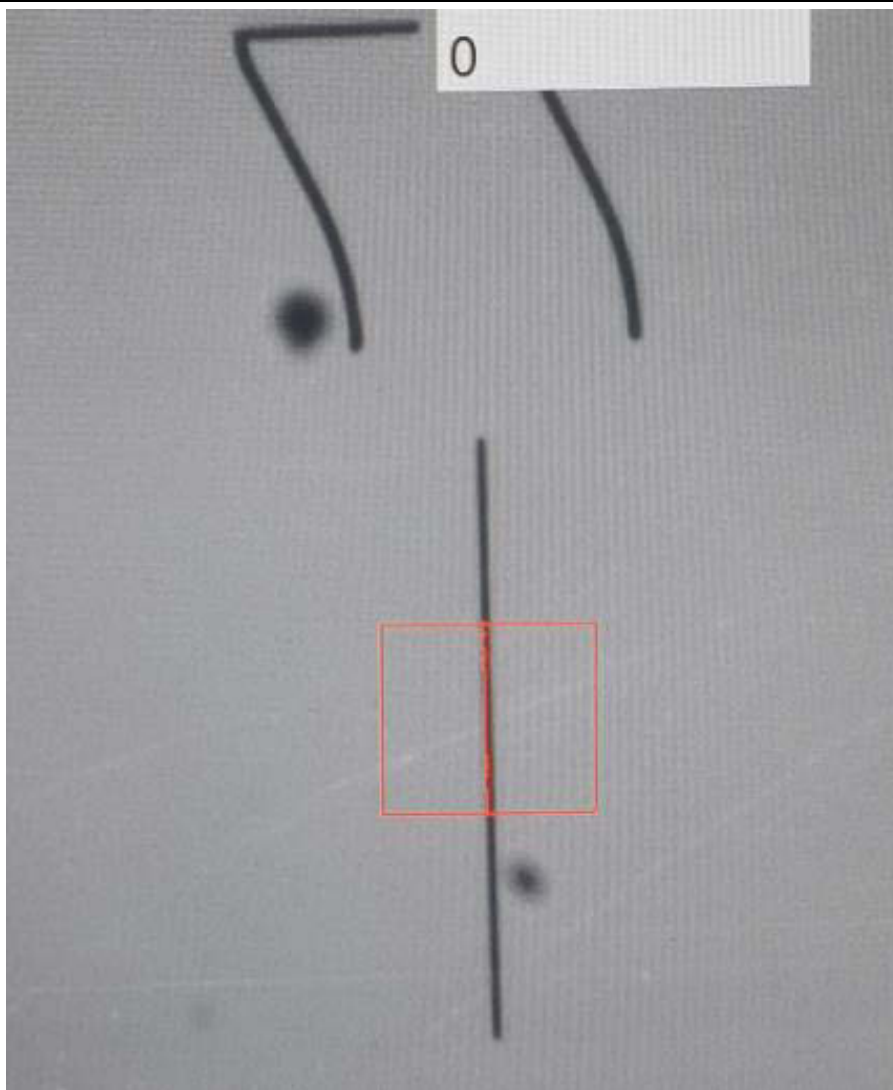
$$u(\delta_o) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{5}{\sqrt{3}} = 2,887 = 2,89 \text{ } \mu\text{m} \quad (31)$$

3.6. Korekcija greške utvrđivanja centra linije

Mjerna nesigurnost utvrđivanja centra linije

Dobivena linija centra ovisi o veličini označenog područja i broju linija koje prolaze okomito na mjernu liniju a određuju njen centar. Odabirom većeg mjernog područja povećavamo broj linija i samim time smanjujemo veličinu nastale greške. Odabran pretpostavljeni raspon greške od $\pm 3 \text{ } \mu\text{m}$.

$$u(\delta_r) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{3}{\sqrt{3}} = 1,73 \text{ } \mu\text{m} \quad (42)$$



Slika 30. Centar linije

Sastavljena standardna mjerna nesigurnost

$$u_c u_c^2 = c_{\Delta t}^2 \cdot u(\Delta t)^2 + c_{\delta l_m}^2 \cdot u(\delta l_m)^2 + c_{\delta_o}^2 \cdot u(\delta_o)^2 + c_{\delta_r}^2 \cdot u(\delta_r)^2 + c_{i_x s}^2 \cdot u(\delta_{i_x s})^2 + c_{\Delta t}^2 \cdot u(\Delta t_2)^2 + c_{\delta l_m}^2 \quad (53)$$

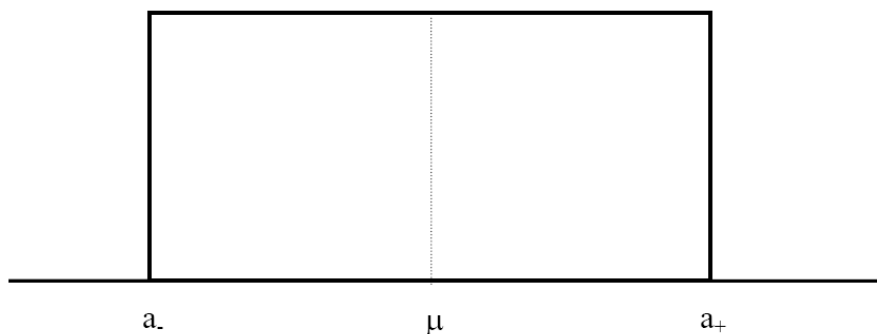
Faktor k izražava razinu pouzdanosti i u ovom slučaju vrijednost $k = 2$ predstavlja razinu pouzdanosti od približno 95%.

Linearizirana proširena mjerna nesigurnost U, k = 2, P = 95%

Tablica 6. Komponente sastavljene standardne nesigurnosti

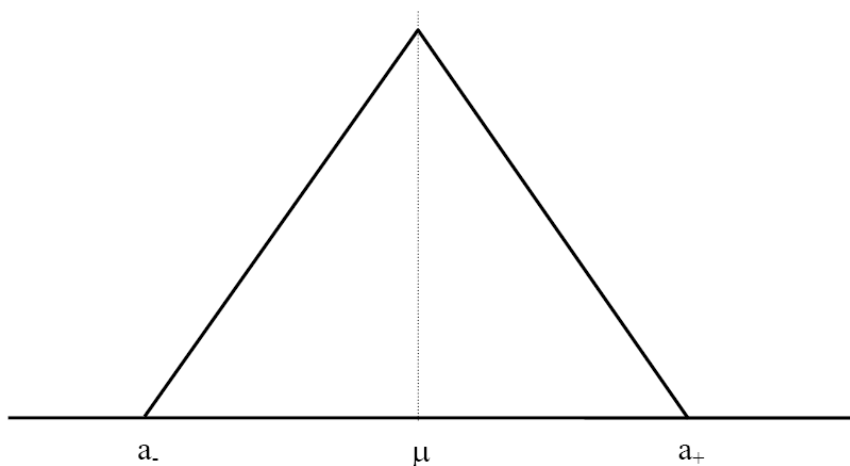
Sastavnica standardne mjerne nesigurnosti	Izvor nesigurnosti	Iznos standardizirane nesigurnosti	Koeficijent osjetljivosti c_i	Razdioba	Doprinos mjernoj nesigurnosti, μm , L u m
$u(\Delta t)$	Razlika temperatura enkodera i predmeta mjerenja	0,289°C	$L \cdot \bar{\alpha}$	Pravokutna	$0,289 \cdot 17 \cdot L_S$
$u(\delta l_m)$	Mehanički utjecaji i Abbe-ov princip	1,732 + 2,309L μm	1	Pravokutna	1,732 + 2,309 · L
$u(\delta_o)$	Utjecaj rezolucije	2,89 μm	1	Pravokutna	2,89 μm
$u(\delta_r)$	Nesigurnost u određivanju centra linije	1,73 μm	1	Pravokutna	1,73 μm
$u(\delta_{ixs})$	Greška suosnosti	1,58 · L μm	1	Pravokutna	1,58 · L μm
$u(\Delta t_2)$	Razlika temperatura enkodera	0,173°C	$L \cdot \bar{\alpha}$	Pravokutna	$0,173 \cdot 17 \cdot L$
Sastavljena mjerna nesigurnost $u_c = \sqrt{3,6^2 + (3,48 \cdot L)^2}$					
Linearizirana proširena mjerna nesigurnost U, k=2, P=95%				U = 7,2 + 6,9 · L	

Ako se procjena ulazne veličine temelji na procjeni granica intervala pojavljivanja (od $-a$ do $+a$), uz vjerojatnost nula da ulazna veličina leži van tog intervala, tada se standardna nesigurnost dobiva iz pravokutne razdiobe mogućih vjerojatnosti. Svođenje procijenjenog standardnog odstupanja na razinu standardne nesigurnosti izvodi se dijeljenjem s $\sqrt{3}$ [2].



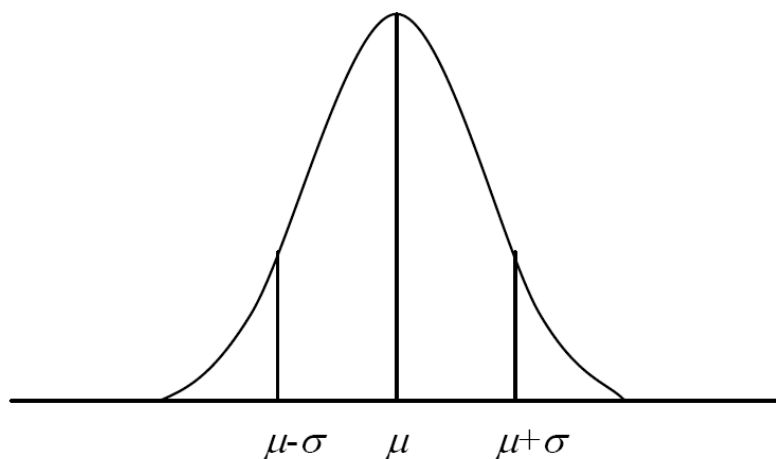
Slika 31. Simetrična pravokutna razdioba

Simetrična trokutasta razdioba se koristi kada se pretpostavlja procjena ulazne veličine određene vrijednosti, a vjerojatnost pojavljivanja u granicama od $-a$ do a u okolini pretpostavljene vrijednosti je nepoznata. Dijeljenjem s $\sqrt{6}$ dobivamo standardnu nesigurnost [2].



Slika 32. Simetrična trokutasta razdioba

Ako se procjena x_i ulazne veličine X_I temelji na nizu ponovljenih mjerenja n , standardna nesigurnosti $u(x_i)$ dobiva se iz Studentove razdiobe uz faktor Studentove razdiobe $t_p(v)$ koji ovisi o broju stupnjeva slobode v i traženoj vjerojatnosti P . Svođenjem procijenjenog standardnog odstupanja na razinu standardne nesigurnosti izvodi se dijeljenjem s t_p – faktorom Studentove razdiobe [2].



Slika 33. Studentova razdioba [2]

4. EKSPERIMENTALNI DIO RADA

4.1. Opis

Navedena oprema je postavljena u laboratoriju za precizna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu gdje se nalazi u kontroliranim uvjetima. Koračni motor pogoni kameru s postavljenim objektivom na sebi. Kamera je fiksirana u držaču koji se giba putem kanalice postavljene na optičkom stolu. Prijenos gibanja se provodi preko zupčastog remena koji se giba linearno uzduž optičkog stola. Za očitavanje položaja su koristi apsolutni enkoder RLS AS10.

4.2. Renishaw laserski sustav

4.2.1. Renishaw ML10

Renishaw ML10 je laserski interferometar jačine <1 mW korišten za mjerenje duljine. Služi za mjerenje duljine i identifikaciju i kompenzaciju grešaka na CNC alatnim strojevima. Interferometri su mjerni uređaji visoke preciznosti koji rade na principu mjerenja interferencijskog uzorka nastalog spajanjem valova koji dolaze iz dva ili više izvora svjetlosti. Moguće je postići preciznost mjerenja u nanometrima zahvaljujući velikoj preciznosti laserske zrake. Kao mjerni uređaj veće klase je bio iskorišten u svrhu etalona po kojem je napravljena korekcija mjerenja dobivenih preko vizijskog sustava. Uz ML 10 i EC10 korišteni su bili usmjerivač zrake LS350, stalak za laserski inferometar ML10 te Renishaw softver za prikaz rezultata mjerenja. Komunikacija s računalom se odvija preko DX10 USB razdjelnika. Moguće je provjeriti pravokutnosti, izmjeriti položaj, kut nagiba i ravnost.



Slika 34. Laserski interferometar Renishaw ML10

Tablica 7. Tehnički podatci Renishaw ML10

Izvor laserske zrake	Helij-neonska HeNe laserska cijev Klasa II IEC 60825-1 (2002)
Snaga lasera	<1 mW
Vakuumska valna duljina	632,990577 nm
Dugoročna frekventna preciznost	±0,055 ppm (parts per million) dijelova na milijun
Napajanje	100-240 VAC 50/60 Hz
Temperaturno područje djelovanja	0-40 °C
Dimenzije	335 x 176 x 75 mm

4.2.2. Renishaw EC10 (Environmental compensation)

Renishaw EC10 služi za kompenzaciju razlike između okolišnih varijabli prilikom mjerenja na terenu ili laboratoriju i onih pri kojima je laser bio umjeren pri izradi. Primjerice za kompenzaciju temperature, vlažnosti zraka i pritisak tlaka. Zahvaljujući aluminijskom kućištu i njegovoj anodizaciji, sustav ima dobru zaštitu od korozije i otpornost na udarna oštećenja.

Zbog upotrebe aluminija također ima manju težinu što omogućava lakše baratanje predmetom i bržu temperaturnu aklimatizaciju u odnosu na čelik.

Tablica 8. Tehnički podatci Renishaw EC10

Raspon temperature zraka	0-40 °C
Točnost temperature zraka	± 0,2 °C
Raspon pritiska tlaka	750-1150 mbar
Točnost pritiska tlaka	± 1,0 mbar
Raspon relativne vlažnosti	0-95 % (bez kondenzacije)
Točnost relativne vlažnosti	± 15% relativne vlažnosti
Raspon temperature materijala	0-40 °C
Točnost temperature materijala	± 0,1 °C
Napajanje	100-240 VAC, 200-240 nominalno
Težina	4 kg
Dimenzije	335 x 176 x 75 mm



Slika 35. Mjerna sonda uređaja Renishaw EC10

4.3. Mjerenja

4.3.1. Prvo mjerenje: Mjerenje ponovljivosti

Na početku mjerenja zapisani su datum, vrijeme i temperatura prostorije. Mjerenju ponovljivosti se pristupilo odabirom 2 nasumične oznake na mjernoj skali. Odabrani su bili brojevi 77 i 400 mm. Nakon odabir broja izvršilo se pozicioniranje kadra kamere na odabrani broj. U toj je poziciji Canny-ev detektor ruba prepoznao mjernu liniju koja je pridodana broju 77. Uz pomoć detektora ruba izvršeno je pozicioniranje na sredinu crte broja 77 i u toj poziciji je napravljeno postavljanje na nulu. Počevši s te pozicije gledala se ponovljivost tako da se kamera pomjerila nasumični broj koraka prema početku skale i zatim vratila u sredinu oznake koja označava pozicijsko ishodište. Nakon povratka u nulu, točna vrijednost je bila zapisana u tablicu i nakon zapisa u tablici izvršeno je ponovno postavljanje na nulu u toj poziciji. Prethodno navedeni postupak se ponovio dvadeset puta u smjeru prema početku skale i zatim na isti način dvadeset puta u drugom smjeru prema kraju skale. Na kraju mjerenja za oznaku broja 77, zapisana su sva mjerenja i temperatura prostorije nakon čega je kamera pozicionirana na oznaku broja 400 mm. Postupak je bio proveden na identičan način i rezultati su prikupljeni u tablicu programskog alata Excel.

Tablica 9. Procijenjeno standardno odstupanje mjerenja ponovljivosti

$s, \mu\text{m}$	Prvotno kretanje u smjeru početka skale	U smjeru kraja skale
Prvo mjerenje	0,46	0,24
Drugo mjerenje	0,82	2,05

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n}} \quad (64)$$

s = procijenjeno standardno odstupanje

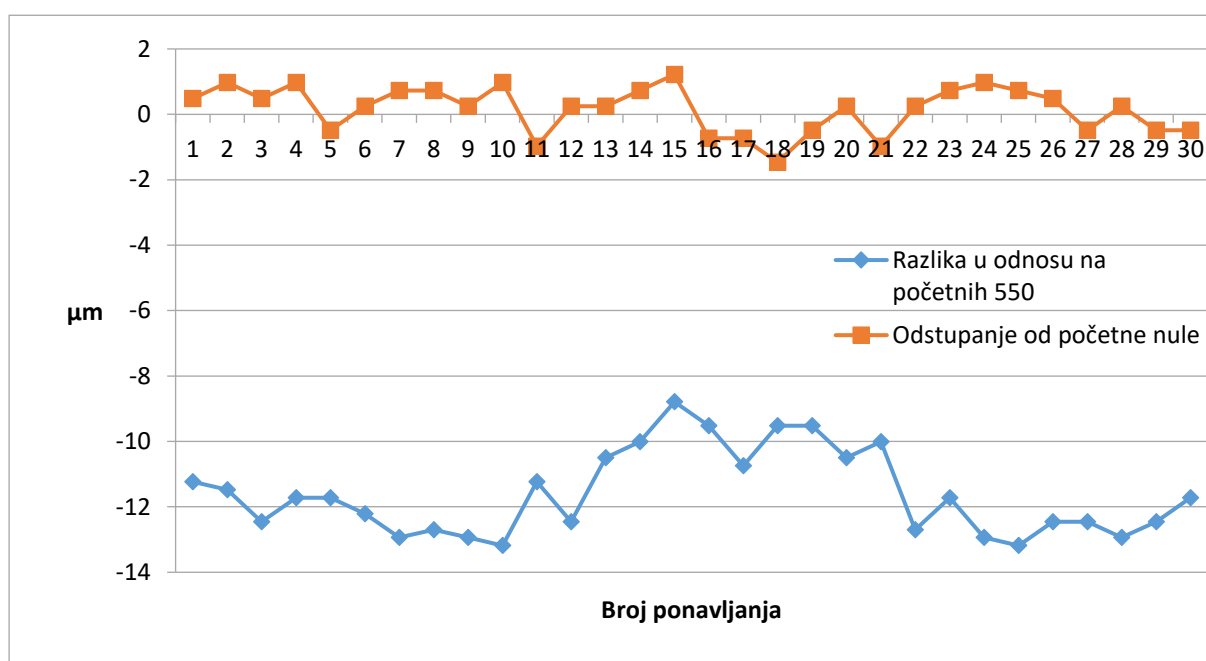
x = pojedinačno odstupanje

\bar{x} = sredina uzorka

n = veličina uzorka

4.3.2. Drugo mjerenje: Odstupanja nakon prijednog puta iz početne pozicije na sredini skale do početka skale i natrag

Drugo mjerenje je izvršeno tako da se kamera pozicionirala iznad nasumično odabrane vrijednosti od 550 mm. Nakon pronalaska sredine crte oznake broja uz pomoć Canny-evog detektora ruba, odrađeno je postavljanje na nulu na toj poziciji. Tako je određena početna pozicija i s nje se kretala kamera prema početku skale. Kamera je prešla put od početne pozicije do početka skale i natrag u prvotnu poziciju. Nakon povratka na početnu poziciju očitana je trenutna vrijednost i zapisana u tablicu podataka uz pripadajuće odstupanje pri povratku. Zatim je izvršeno ponovno postavljanje na nulu u trenutno poziciji i postupak je ponovljen trideset puta. Završivši svih trideset ponavljanja, rezultati su prikazani grafički iz tablice rezultata.



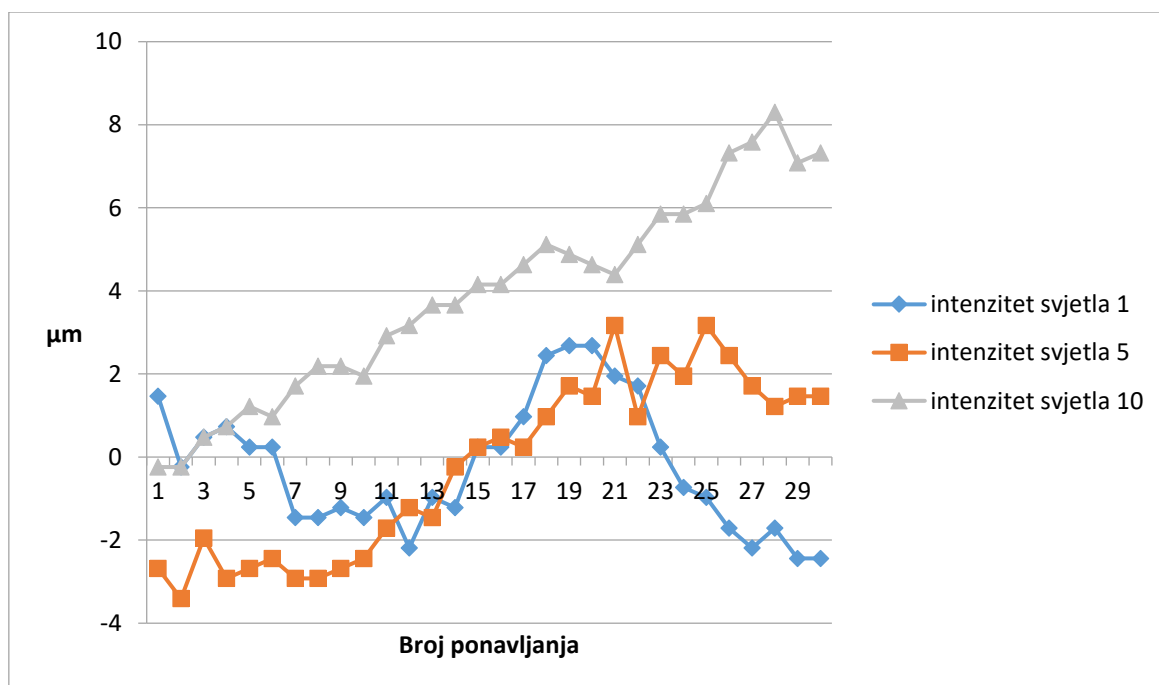
Grafikon 2. Odstupanje pri povratku

4.3.3. Treće mjerenje: Utjecaj osvjetljenja

Mjerenje razine utjecaja osvjetljenja je izvršeno pri tri različite razine osvjetljenja: minimalno, srednje i maksimalno. Svaki set ponavljanja se sastoji od trideset ponavljanja za svaku od razina osvjetljenja. Kamera je pozicionirana iznad nasumično odabrane vrijednosti na skali koja je služila kao ishodišna točka. Canny-ev algoritam za detekciju ruba je očitao sredinu oznake broja i na tom mjestu je izvršeno nuliranje očitavanja. Razina osvjetljenja je prvo postavljeno na minimalnu vrijednost označenu brojem 1 na kontroleru za osvjetljenje LEDD1B tvrtke Thorlabs. Nakon pokretanja kamere u smjeru početka skale proizvoljnim brojem koraka i naknadnim povratkom u početnu točku očitano je odstupanje i zapisano u

tablicu. Nakon zapisivanja trenutne vrijednosti izvršeno je ponovno postavljanje na nulu i taj postupak je ponovljen trideset puta. Poslije prikupljenih podataka za početnu vrijednost osvjetljenja vrijednost je pomaknuta na srednju razinu označenu brojem 5. Postupak je ponovljen i za naknadnu maksimalnu vrijednost osvjetljenja označenu brojem 10 na skali osvjetljenja. Iz prikupljenih podataka su izvučene minimalne i maksimalne vrijednosti odstupanja te procijenjeno standardno odstupanje za svaku od prethodno navedenih razina osvjetljenja. U usporedbi procijenjenih standardnih odstupanja uočeno je veliko odstupanje na razini maksimalnog osvjetljenja u odnosu na minimalnu i srednju razinu osvjetljenja.

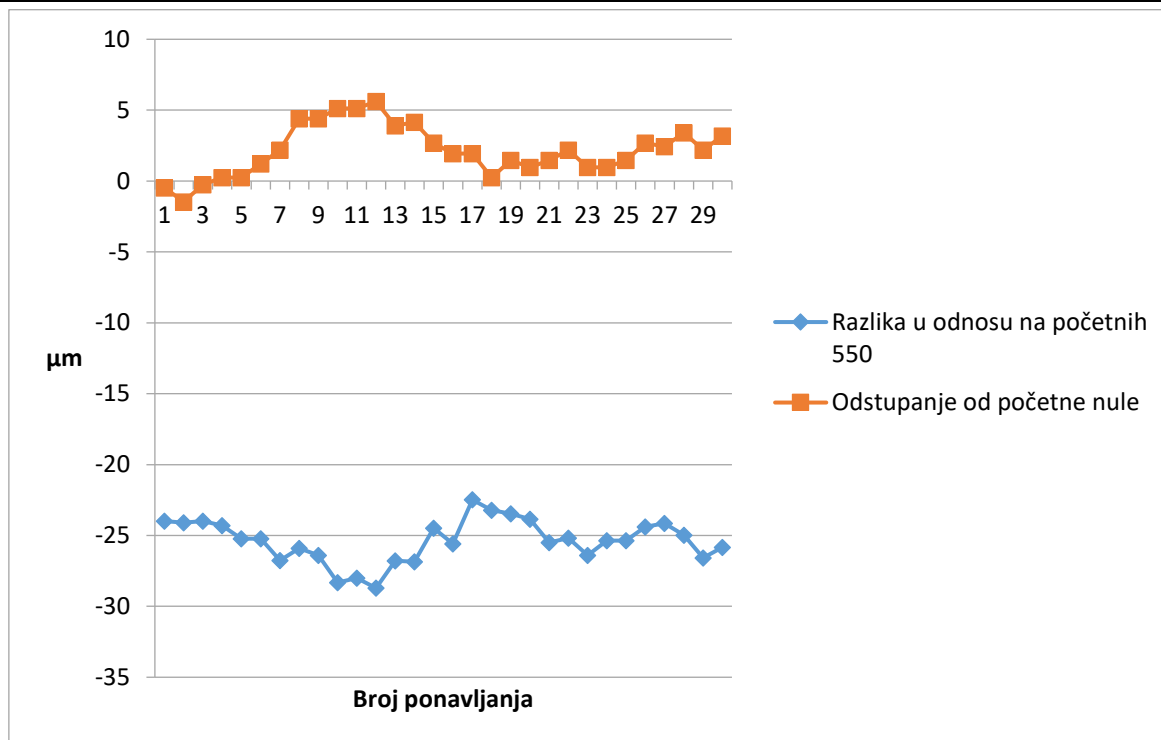
Naknadnim provjeravanjem dobivenih rezultata mjerenja uočena je kontinuirana greška zbog čega je izvršena korekcija mjerenja. Nakon izvršene korekcije ponovljena su mjerenja ponovnog povratka u početnu točku i utjecaja osvjetljenja.



Grafikon 3. Utjecaj osvjetljenja

4.3.4. Četvrto mjerenje: Odstupanja nakon prijednog puta iz početne pozicije na sredini skale do početka skale i natrag nakon korekcije

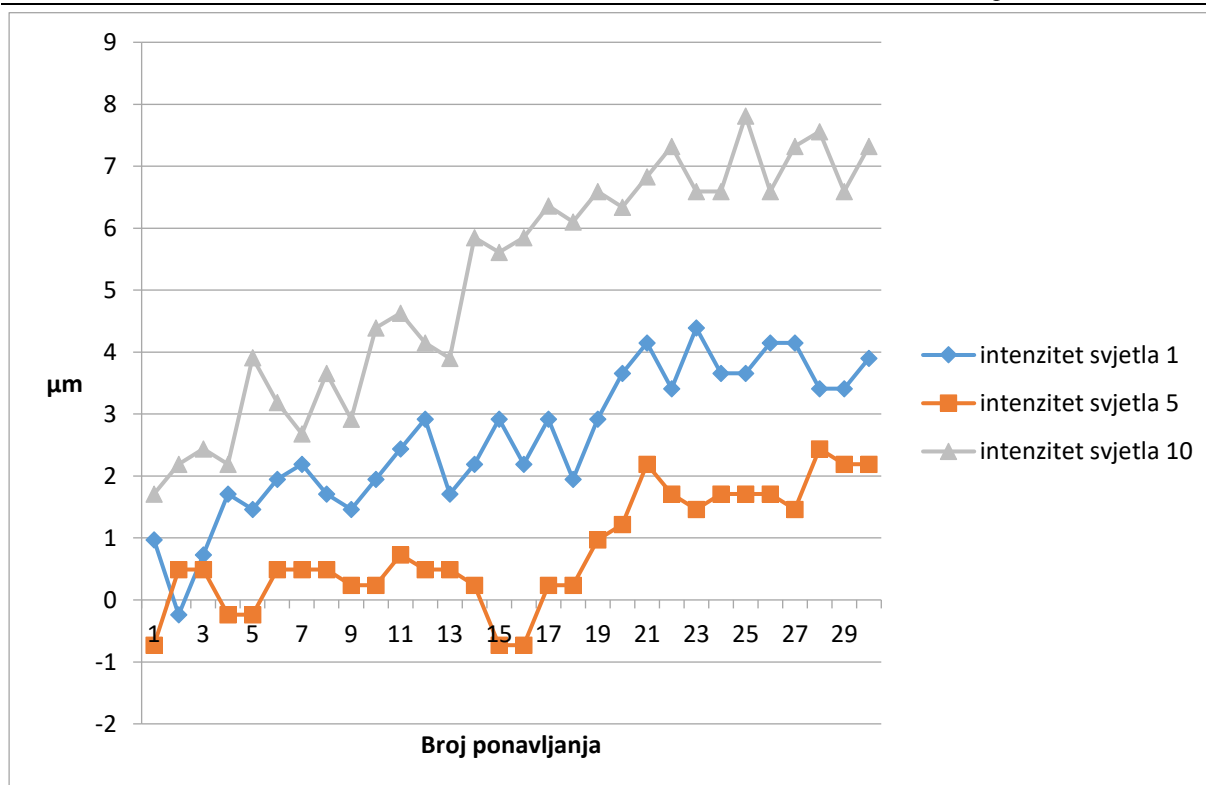
Ponovljeno je mjerenje i uzeta su odstupanja nakon korekcije. Ponovna mjerenja nisu pokazala poboljšanje na ovom mjerenju nakon korekcije.



Grafikon 4. Odstupanje pri povratku nakon korekcije

4.3.5. Peto mjerenje: Utjecaj osvjetljenja nakon korekcije

Izvršeno je ponovljeno mjerenje utjecaja osvjetljenja s tri razine osvjetljenja minimalna, srednja i maksimalna. Ponovljeno mjerenje je pokazalo značajno poboljšanje u vidu manjih odstupanja i manjeg procijenjenog standardnog odstupanja pri svim razinama osvjetljenja. Procijenjeno standardno odstupanje pri maksimalnom osvjetljenju je i nakon korekcije tri puta veće od procijenjenog standardnog odstupanja pri srednjoj razini osvjetljenja. Zaključak ovoga mjerenja donosi srednju razinu osvjetljenja kao optimalnu razinu osvjetljenja u usporedbi s minimalnom i maksimalnom razinom osvjetljenja. Procijenjeno standardno odstupanje je tri puta manja u odnosu na maksimalnu razinu. U usporedbi s minimalnom razinom, razlika u procijenjenom standardnom odstupanju je 0,0002 mm dok razina osvjetljenja daje puno bolji kontrast u odnosu na oznake brojeva što omogućava brži i precizniji rad Canny-evog algoritma.



Grafikon 5. Utjecaj osvjetljenja nakon korekcije

4.3.6. Šesto mjerenje: Utjecaj odabira rezolucije

Odabrana je rezolucija 1280x1024 piksela i pri toj rezoluciji je izvršeno mjerenje. Mjerenje je izvedeno tako da se sredina oznake nasumično odabranog broja 330 postavila na lijevi rub vidnog polja kamere i u tom mjestu postavljena nula. Zatim se sredina te oznaka pozicionirala na desni rub vidnog polja i na tom mjestu izmjerila pređena udaljenost pomoću laserskog interferometra Renishaw RC10 i očitana vrijednost je zapisana u tablicu. Nakon očitavanja vrijednosti, sredina oznake je ponovno pozicionirana na lijevi rub vidnog polja i opet postavljena na nulu. Mjerenje je ponovljeno trideset puta i dobiveni su iznosi prosječne udaljenosti na uzetom skupu rezultata, procijenjenom standardnom odstupanju i iznos prosječne prijeđene udaljenosti po pojedinačnom pikselu.

Prosječno prijeđeni put vidnog polja ekrana = 1,79685 mm

$s = 0,002055 \text{ mm} = 2,055 \text{ } \mu\text{m}$

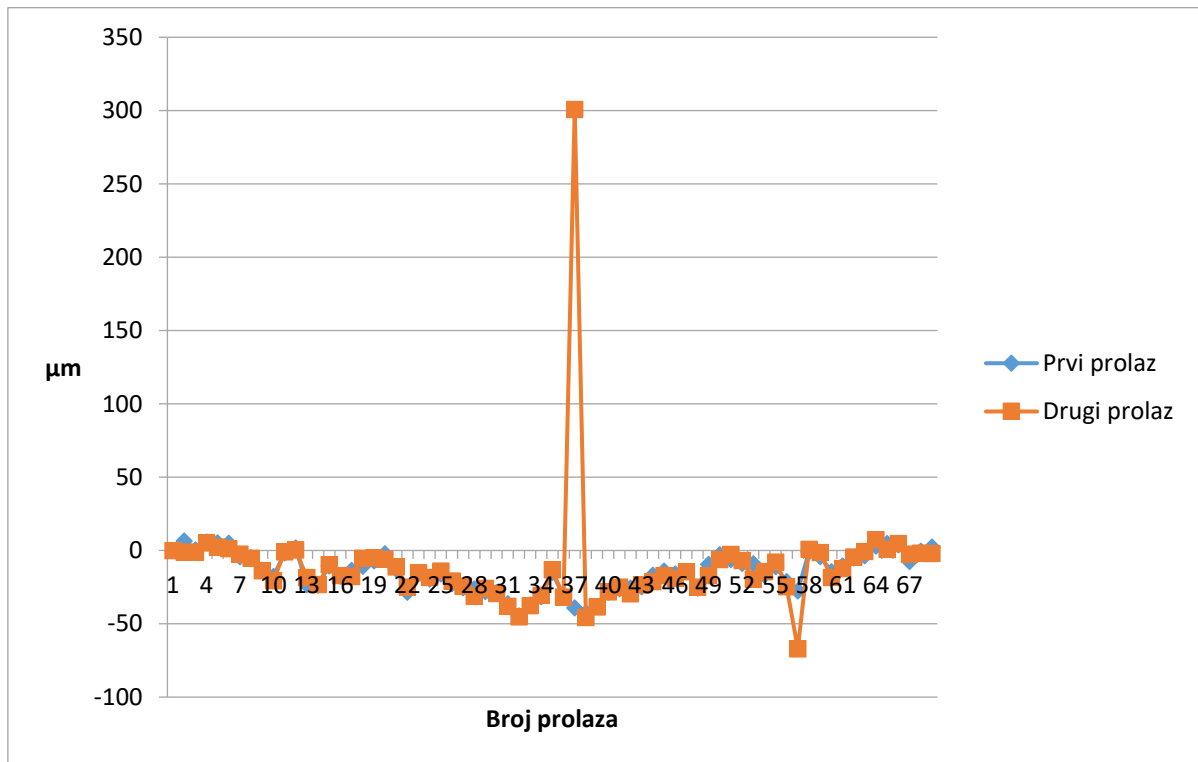


Slika 36. Mjerenje utjecaja rezolucije kamere

Drugi način mjerenja utjecaja rezolucije bi bio korištenjem sustava za detekciju rubova. Veći broj detekcijskih linija osigurava bolje prepoznavanje prave sredine mjerne oznake. Od tog mjesta se softverski pratio prijedeni broj piksela do ruba vidnog polja i broj koraka na enkoderu. Potrebno je prijeći cijelu duljinu vidljivog polja da bi osigurali uključivanje cjelokupne greške rezolucije. Mjerenje je također potrebno izvesti u trideset ponavljanja. Prednost ovakvog načina mjerenja je što isključujemo pogrešku pozicioniranja sredine linije točno na rubove vidnog polja kao što je bilo izvedeno na mjerenju u laboratoriju.

4.3.7. Sedmo mjerenje: Mjerenje skale s korakom od 50 mm

Mjerenje cijele skale je izvršeno s korakom od približno 50 mm. Mjerenje je započeto pozicioniranje kadra kamere na početak skale gdje je Canny-ev algoritam za detekciju ruba prepoznao sredinu oznake broja 0 gdje je izvršeno postavljanje na nulu i odabir početne točke. Uz korak od približno 50 mm započeto je mjerenje skale od početka do kraja skale. Kada se došlo do kraja skale okrenut je smjer mjerenja i opet se približnim koracima od 50 mm izmjerila skala u povratnom smjeru do početka skale. Prilikom svakog mjerenja uzeti su podatci o poziciji na skali dobiveni s laserskim interferometrom Renishaw AS10 i putem korigiranih podataka dobivenih iz enkodera. Njihovom usporedbom je dobivena razlika između mjerenja. Cijeli postupak je izveden dva puta.



Grafikon 6. Mjerenje skale s korakom od 50 mm

Iz grafičkog prikaza dobivenih rezultata vidljivo je značajno odstupanje jednog od rezultata. Služeći se Dixonovim testom provjerena je mogućnost *outliera*, odnosno podataka koji značajno odstupaju od ostatka niza brojeva.

Opći izraz

$$Q = \frac{|\text{sumnjiva vrijednost} - \text{najbliža vrijednost}|}{(\text{maksimalna vrijednost} - \text{minimalna vrijednost})} \quad (77)$$

$$Q = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_1} = \frac{0,301 - 0,045}{0,301 - 0,014} = 0.892 \quad (88)$$

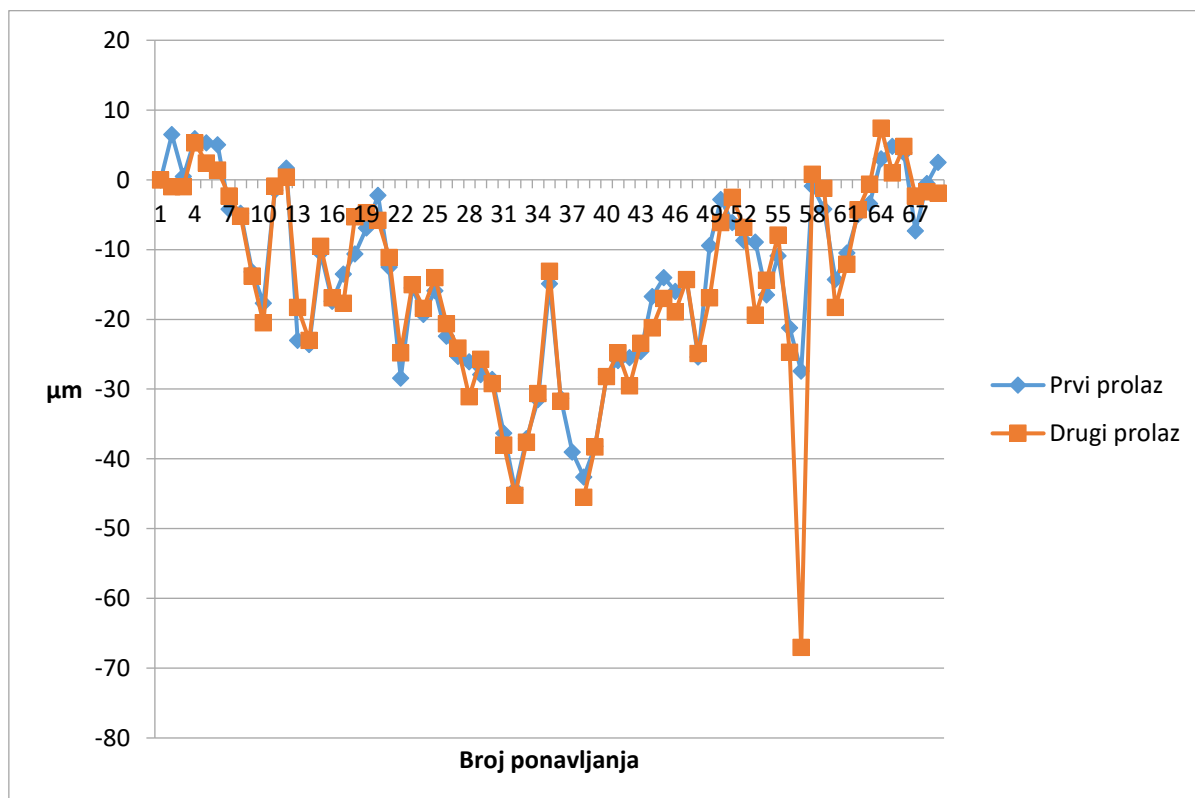
Tablica 10. Izvadak iz Dixonove tablice kritičnih vrijednosti

n	Q_k P = 90%	Q_k P = 95%	Q_k P = 99%
3	0,507	0,568	0,680
4	0,468	0,526	0,634
5	0,437	0,493	0,598
10	0,412	0,466	0,568

$Q = 0,892$, $Q_k = 0,568$ za $n = 10$

$$Q > Q_k,$$

Dobiveni rezultat je veći od kritične vrijednosti za niz od 10 podataka uz vjerojatnost od 99% pa se na temelju toga izbacuje iz analize.



Grafikon 7. Mjerenje skale s korakom od 50 mm nakon izbacivanja grube greške

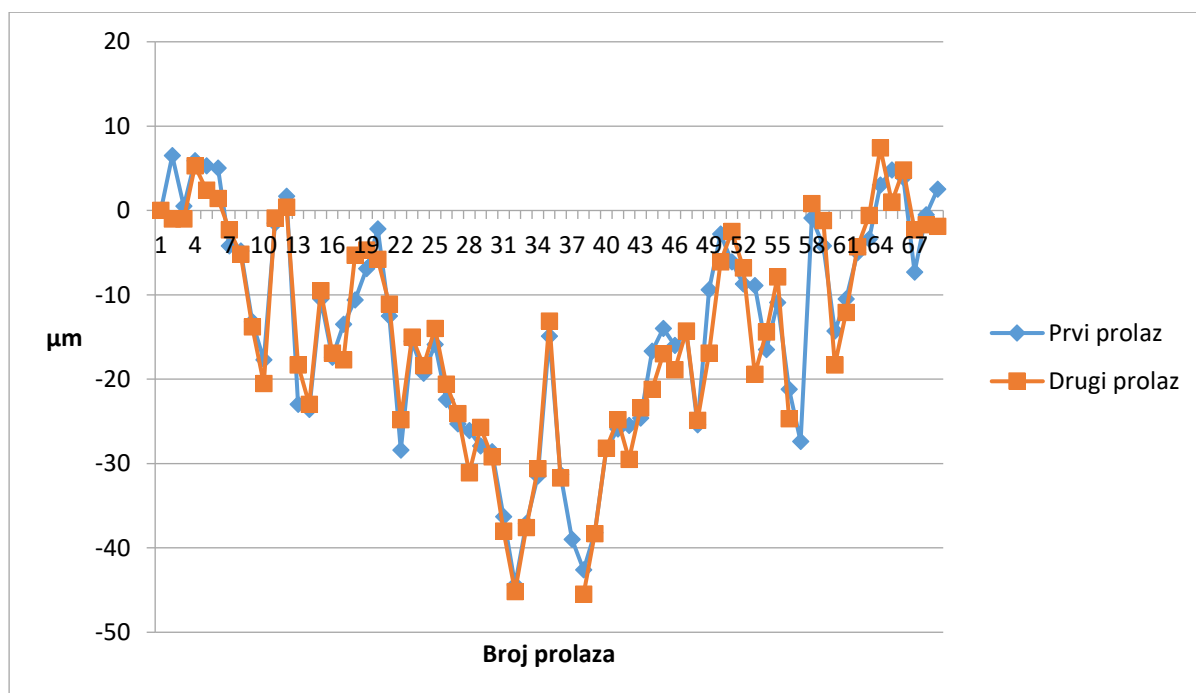
Nakon izbacivanja grube greške vidljiva je još jedna vrijednost na drugom prolazu koja je sumjiva pa je iz tog razloga i za nju napravljen Q test.

$$Q = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_1} = \frac{0,067 - 0,025}{0,067 - 0,003} = 0,656 \quad (99)$$

$$Q = 0,656, Q_k = 0,568 \text{ za } n = 10 \quad (20)$$

$$Q > Q_k,$$

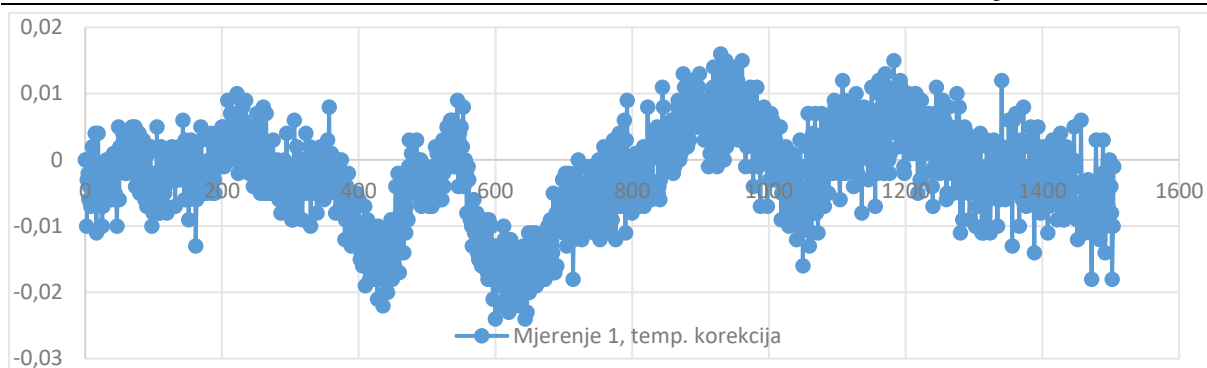
Dobiveni rezultat je veći od kritične vrijednosti za niz od 10 podataka uz vjerojatnost od 99% pa se na temelju toga izbacuje iz analize.



Grafikon 8. Mjerenje skale s korakom od 50 mm nakon izbacivanja druge grube greške

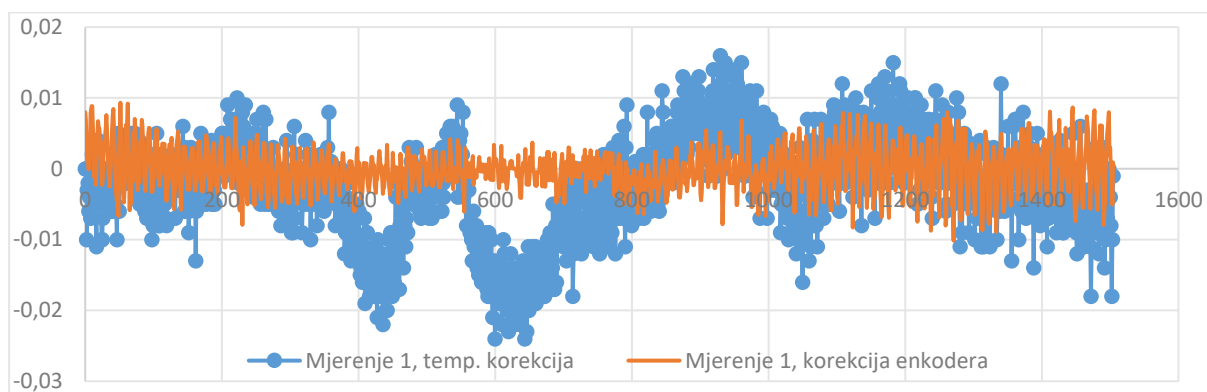
4.3.8. Osmo mjerenje: Mjerenje skale s korakom od 1 mm

Mjerenje cijele skale je izvršeno s korakom od približno 1 mm. Mjerenje je započeto pozicioniranje kadra kamere na početak skale gdje je Canny-ev algoritam za detekciju ruba prepoznao sredinu oznake broja 0 gdje je izvršeno postavljanje na nulu i odabir početne točke. Uz korak od približno 11 mm, započeto je mjerenje cijele skale od početka do kraja.. Prilikom svakog mjerenja uzeti su podatci o poziciji na skali dobiveni s laserskim interferometrom Renishaw AS10 i putem korigiranih podataka dobivenih iz enkodera. Njihovom usporedbom je dobivena razlika između mjerenja. Prva serija podataka je bila samo uz temperaturnu korekciju. Mjerno područje iznosi od 0 - 1500 mm.



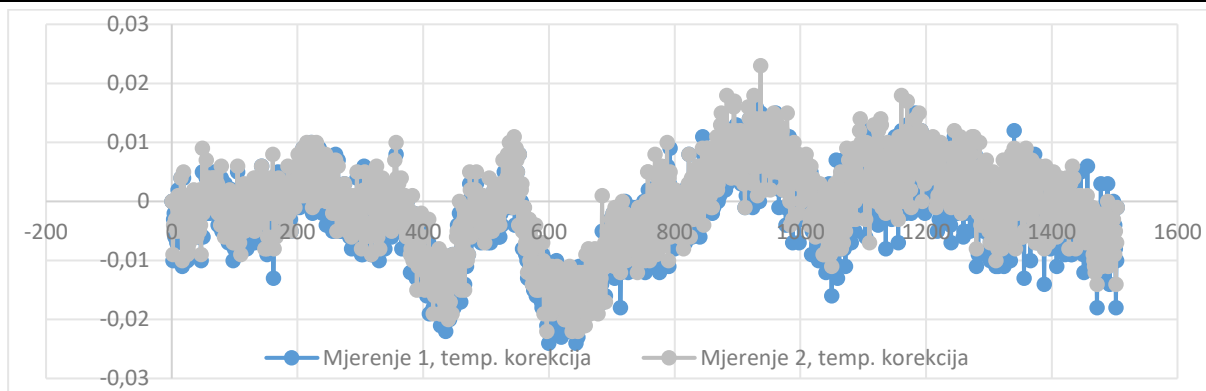
Grafikon 9. Prvo mjerjenje

Pozicija je praćena uz laserski interferometar Renishaw ML10 i usporedno su uzimane vrijednosti. Na grafikonu [9] je prikazano prvo mjerjenje enkoderom uz temperaturnu korekciju. Iz grafikona je vidljivo postojanje greške u sustavu za mjerenje duljine. Raspon odstupanja je od 16 μm do -24 μm .



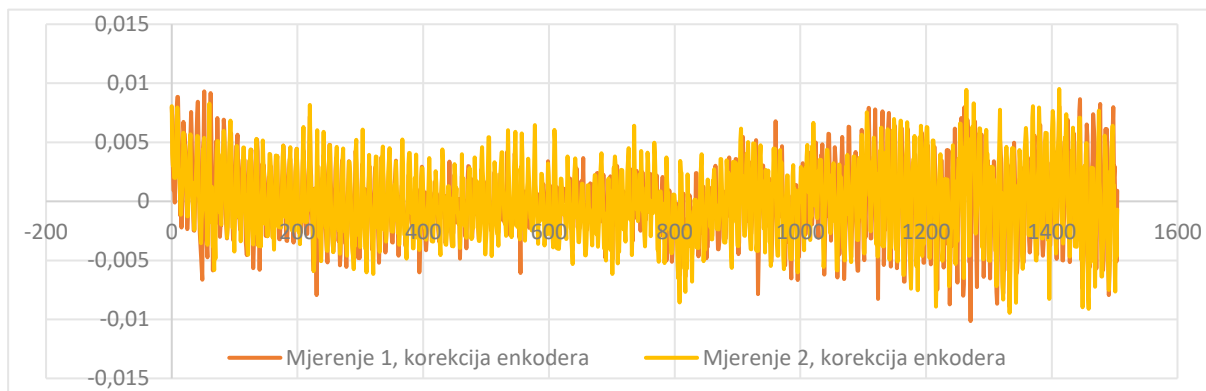
Grafikon 10. Prvo mjerjenje uz korekciju

Grafikon [10] prikazuje usporedbu prvog mjerenja bez i nakon korekcije greške enkoderskog sustava. Iz grafikona je jasno vidljivo znatno poboljšanje u vidu smanjena veličine greške i ujednačavanju linije odstupanja. Odstupanja se nalaze u rasponu od -8,6 do 5 μm uz procijenjeno standardno odstupanje od 3,12 μm .



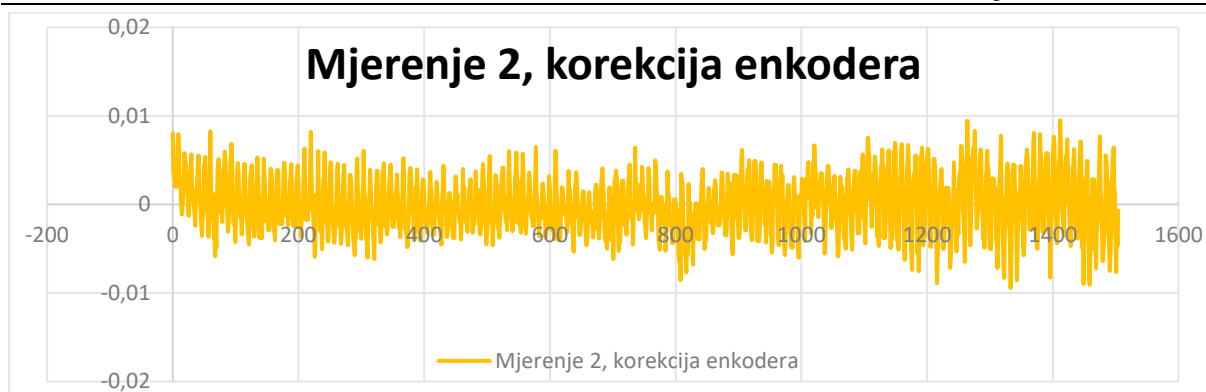
Grafikon 11. Usporedba prvog i drugog mjerenja bez korekcije

Grafikon [11] pokazuje usporedbu rezultata prvog i drugog mjerenja bez korekcije greške enkoderskog sustava. Iz prikazanih rezultata uočavamo ponavljanje greške i izvrsnu ponovljivost sustava.



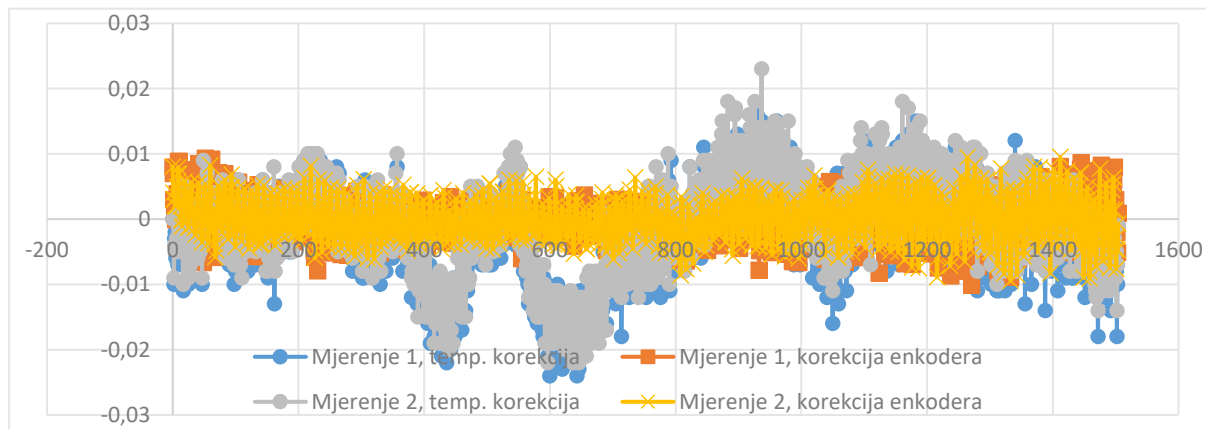
Grafikon 12. Usporedba prvog i drugog mjerenja nakon korekcije greške

Grafikon [12] prikazuje usporedbu između prvog i drugog mjerenja nakon korekcije greške enkoderskog sustava za mjerenje duljine. Rezultati prikazuju nastavak dobre ponovljivost sustava.



Grafikon 13. Drugo mjerenje uz korekciju greške

Grafikon [13] prikazuje drugo mjerenje nakon korekcije greške enkodera. Vidljivo je ravnomjerno odstupanje uz procijenjeno standardno odstupanje od $3,2 \mu\text{m}$. Iako su rezultati zadovoljavajući postoji mogućnost pojave *outliera*, odnosno greški u mjerenju koje previše odstupaju u odnosu na niz mjerenih točki. U prethodno izvedena dva mjerenja nije bilo pojavljivanja *outliera* ali to nije garancija sustava da ih ubuduće neće biti. Idući korak bi bio ponoviti mjerenja uz još manji razmak između točki gdje bi registirirali svaki *count* enkodera da bi osigurali što manju mogućnost pojave *outliera* i još dodatno poboljšali korekcijski model sustava.



Grafikon 14. Skupni prikaz mjerenja

Grafikon [14] prikazuje sve linije prije i nakon korekcije greške u sustavu gdje su jasno vidljivi otkrivena greška, dobiveno poboljšanje i cjelokupna ponovljivost sustava.

4.4. Matematički model nakon mjerenja

4.4.1. Korekcija zbog osvjjetljenja

Nakon mjerenja i obrade podataka dobiven je iznos procijenjenog standardnog odstupanja od 0,9 μm koji spada unutar pretpostavljenog područja.

4.4.2. Korekcija greške utvrđivanja centra linije

Nakon mjerenja i obrade rezultata dobiveno je procijenjeno standardno odstupanje od 2,055 μm .

4.4.3. Korekcija greške uslijed toplinskog rastezanja enkodera i predmeta mjerenja

$$\delta(\Delta t) = \Delta t \cdot \alpha \cdot L = 2,72 \mu\text{m} \quad (21)$$

$$\alpha = 17 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t = 20.1 - 20 = 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$L = 1600 \text{ mm}$$

Pretpostavka moguće temperaturne razlike između enkodera i predmeta mjerenja nakon softverske temperaturne korekcije je 0,1 $^\circ\text{C}$

Mjerna nesigurnost uslijed toplinskog rastezanja $u(\Delta t)$

Usprkos temperaturnoj stabilizaciji koja će se dogoditi nakon određenog vremena i softverskoj korekciji moguća su temperaturna odstupanja između enkoderskog sustava i predmeta mjerenja. Pretpostavka temperaturne razlike je $\pm 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Standardna nesigurnost:

$$u(\Delta t) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0,1}{\sqrt{3}} = 0,0577 = 0,058 \text{ } ^\circ\text{C}$$

4.4.4. Korekcija greške uslijed toplinskog rastezanja enkodera

$$\delta(\Delta t_2) = \Delta t_2 \cdot \alpha \cdot L = 2,72 \mu\text{m} \quad (22)$$

$$\alpha = 17 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t = 20.1 - 20 = 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$L = 1600 \text{ mm}$$

Pretpostavka temperaturne razlike za enkodera je 0,1 $^\circ\text{C}$

Mjerna nesigurnost uslijed toplinskog rastezanja $u(\Delta t_2)$

Osim temperaturne razlike između predmeta mjerenja i enkodera, javlja se i razlika između stvarne i očitane temperature enkodera. Prilikom zagrijavanja enkodera, povećava se razmak između linija koda enkodera koje služe za očitavanje pozicije što uvodi grešku u sustav.

Također i pri hlađenju linije se smanjuju što opet dovodi do pojave greške u sustavu. Usprkos temperaturnoj korekciji moguća su mala odstupanja koja uvode grešku u model. Pretpostavka temperaturne razlike je $\pm 0,1$ °C.

Standardna nesigurnost:

$$u(\Delta t_2) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0,1}{\sqrt{3}} = 0,0577 = 0,058 \text{ °C}$$

Tablica 11. Tablica mjerne nesigurnost nakon mjerenja

Sastavnica standardne mjerne nesigurnosti	Izvor nesigurnosti	Iznos nesigurnosti	Koeficijent osjetljivosti c_i	Razdioba	Doprinos mjernoj nesigurnosti, μm , L u m
$u(\Delta t)$	Razlika temperatura enkodera i predmeta mjerenja	0,058°C	$L \cdot \bar{\alpha}$	Pravokutna	$0,058 \cdot 11,5 \cdot L_S$
$u(\delta l_m)$	Mehanički utjecaji i Abbe-ov princip	1,732 + 2,309L	1	Pravokutna	1,732 + 2,309 · L
$u(\delta_o)$	Utjecaj rezolucije	0,9 μm	1	Pravokutna	0,9 μm
$u(\delta_r)$	Nesigurnost u određivanju centra linije	2,055 μm	1	Pravokutna	2,055 μm
$u(\delta_{ixs})$	Greška suosnosti	1,58 · L nm	1	Pravokutna	1,58 · L nm
$u(\Delta t_2)$	Razlika temperatura enkodera	0,058°C	$L \cdot \bar{\alpha}$	Pravokutna	$0,058 \cdot 11,5 \cdot L_S$
Sastavljena mjerna nesigurnost $u_c = \sqrt{2,791^2 + 1,955 \cdot L^2}$					
Linearizirana proširena mjerna nesigurnost U, k=2, P=95% U = 5.58 + 3.91L					

5. ZAKLJUČAK

Umjeravanje je osnovni preduvjet moderne i kontinuirane proizvodnje. Bez dimenzijske pouzdanosti ne možemo izraditi predmete koji će odgovarati danim zahtjevima što negativno utječe na sve tržišne sudionike poput kupaca i proizvođača.

U prvom dijelu ovog rada je napravljen uvod u mjeriteljstvo i dan opis pojedinih komponenti koje čine novorazvijen 1D mjerni uređaj za umjeravanje mjerila s krutom podjelom. Pretpostavljen je model greške i opisani pojedini članovi tog modela.

U drugom dijelu ovog rada predstavljen je eksperimentalni dio koji se odvijao u Laboratoriju za precizna mjerenja dužine na zagrebačkoj Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Opisana su pojedina mjerenje i grafički prikazani dobiveni rezultati. Procijenjena greška ovog sustava na cijeloj dužini iznosi 18,4 μm . Model greške je reviziran s procijenjenim standardnim odstupanjem dobivenim u eksperimentalnom dijelu. Prilikom umjeravanja odrađena je kompenzacija sustavnih grešaka.

Ponovljenim mjerenjima sustav je pokazao dobru ponovljivosti i pojavu greške koja je korigirana. Procijenjeno standardno odstupanje drugog mjerenja cijele skale po duljini od 0 - 1500 mm je pokazala iznos od 3,2 μm . Iznos koraka između uzimanja podataka točke je iznosio približno 1 mm. Sustav bi se mogao još poboljšati daljnim mjerenjima uz uzimanje manjeg koraka između točaka i dodatnom korekcijom greške nakon mjerenja.

LITERATURA

- [1] <https://www.svijet-kvalitete.com/index.php/najcitanije/1980-sto-je-calibration>
pristupljeno 12.01.2022
- [2] Biserka Runje : Predavanja iz kolegija TEORIJA I TEHNIKA MJERENJA, Zagreb, 2014
- [3] <https://gf-lotter.de/Arbeitsmassstab-DIN-866-Form-A--mm-Skalierung--10-mm-Schutzenden-3000-mm--item-E434404> pristupljeno 14.02.2022
- [4] <https://www.jmesales.com/bagby-gage-6-ft-one-piece-gauge-stick/> pristupljeno 14.02.2022
- [5] https://www.directusine-mesure.fr/en/measuring-tape-length-15m-steel-ecclass-ii-br-ref-rubr1b2mnsjs3d-xml-351_405_785_787-7454.html pristupljeno 14.02.2022
- [6] http://www.pewa.de/DATENBLATT/DBL_CT_BANDMASSERSATZ_DBL_DEUTSCH.pdf pristupljeno 25.02.2022
- [7] <https://metrology.mahr.com/de/produkte/artikel/5350700-precisionslaengenmessmaschine-precimar-plm-600-e> pristupljeno 28.02.2022
- [8] <https://emin.com.mm/mahr-cim-1000-cnc-mahr-cim-1000-cnc-precision-length-measuring-machine-outer-0-1000mm-inner-0-5-845mm-myanmar-86219/pr.html>
pristupljeno 28.02.2022
- [9] <https://www.feinmess-suhl.com/en/products/systems-for-monitoring-of-test-equipment/measuring-tape-test-systems/products/measuring-tape-test-systems/halbbautomatisches-und-vollautomatisches-bandmasspruefgeraet-bmg-2000-bv-3000-bv-5000-bv/> pristupljeno 01.03.2022
- [10] <https://bullseyecalibration.com/shop/mahr-zeiss-model-ulm-01-600d-universal-length-measuring-machine/> pristupljeno 01.03.2022
- [11] <https://www.renishaw.com/en/laser-interferometer-error-proofs-linear-scale-calibration-43754> pristupljeno 02.03.2022
- [12] <https://www.rls.si/eng/as10-absolute-magnetic-scale#downloads> pristupljeno 03.03.2022
- [13] <https://www.rls.si/eng/la11-linear-absolute-encoder> pristupljeno 03.03.2022
- [14] <https://eltra-encoder.eu/news/linear-encoders> pristupljeno 03.03.2022
- [15] https://en.wikipedia.org/wiki/Linear_encoder pristupljeno 04.03.2022
- [16] <https://www.dynapar.com/technology/absolute-rotary-encoders/> pristupljeno 04.03.2022

-
- [17] <https://www.theimagingsource.com/products/industrial-cameras/usb-3.1-monochrome/dmk37aux264/> pristupljeno 07.03.2022
- [18] https://s1-dl.theimagingsource.com/api/2.5/packages/publications/sensors-cmos/imx264llr/b24719dd-31b8-507c-b761-2688bdc7a5c7/imx264llr_1.0.en_US.pdf pristupljeno 07.03.2022
- [19] <https://www.opto-e.com/products/mc3-03x-specs> pristupljeno 07.03.2022
- [20] <https://www.masterclass.com/articles/basic-photography-101-understanding-camera-lenses#camera-lens-characteristics> pristupljeno 08.03.2022
- [21] <https://www.infiniioptics.com/glossary/f-number> pristupljeno 08.03.2022
- [22] <https://medium.com/@ssatyajitmaitra/what-canny-edge-detection-algorithm-is-all-about-103d94553d21> pristupljeno 15.02.2022
- [23] <https://towardsdatascience.com/canny-edge-detection-step-by-step-in-python-computer-vision-b49c3a2d8123> pristupljeno 15.02.2022
- [24] <https://www.moonsindustries.com/article/basic-structure-and-operating-principle-of-stepper-motor> pristupljeno 09.03.2022
- [25] <https://www.portescap.com/en/products/stepper-motors/understanding-can-stack-linear-actuator> pristupljeno 09.03.2022
- [26] <https://www.newport.com/g/optical-tables> pristupljeno 10.03.2022
- [27] <https://blog.beamex.com/pt100-temperature-sensor#Pt100-sensors> pristupljeno 14.03.2022
- [28] <https://www.tuli-shop.com/nah-nas-law-linear-nsk> pristupljeno 14.03.2022
- [29] Leach RK (2014) Fundamental principles of engineering nanometrology, 2nd edn. Elsevier, Berlin
- [30] http://www.arc-bg.com/prod_file/81.pdf pristupljeno 16.03.2022
- [31] <http://lab.fs.uni-lj.si/labod/old/eng/stroji15.php> pristupljeno 16.03.2022

PRILOZI

- I. CD-R disc