

Hitre in točne brezkontaktné meritve razdalj v industrijskem okolju

Doktorska disertacija

Jure Rejc

Mentor: prof. dr. Marko Munih



Univerza v *Ljubljani*
Fakulteta za *elektrotehniko*



Potek predstavitve

- Uvod
- Cilji doktorske disertacije
- Utemeljitev
- Metodologija
- Programska oprema
- Rezultati
- Zaključki
- Izvirni prispevki

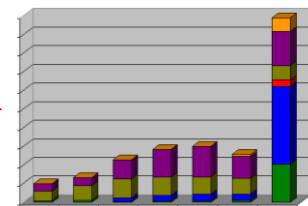
Uvod



Industrijska
proizvodnja
(ETA Cerčno)



Kvalitetni in
cenejši izdelki



Obstoj in
konkurenčnost

Uvajanje novosti v proizvodnjo
(stroji, meritve)



masa,



razdalja (dimenzija),



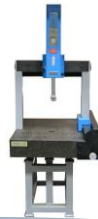
temperatura,...



Uvod

Najpogostejši načini merjenja razdalj oz. dimenzij v industriji

kontaktni:



– koordinatni merilni stroji (KMS),



– mikrometri,



– kljunasta merila.

brezkontaktni:



– (laserski) merilniki oddaljenosti,



– sistemi z video kamero,



– indukcijski merilniki, itd.

Uvod

Doktorska disertacija



Razvoj metod in sistemov za hitro merjenje dimenzij večjih objektov ter točno merjenje raztezkov v območju mikrometrov za potrebe industrije.

Primer A



Sistem za merjenje dimenzij rešetke za plinski štedilnik.

Primer B



Sistem za merjenje raztezka membrane diastata med polnjenjem z oljem.



Cilji doktorske disertacije – Primer A

- Razviti **brezkontaktni način za merjenje dimenzije objekta iz sive litine** v fazi pred robotiziranim raziglenjem oziroma čiščenjem, **časovna omejitev** opravljanja meritev na zadostnem številu izmerjenih točk je **1 minuta**.
- Določiti mejo pogreška razvitega merilnega sistema glede na **želeno mejo pogreška ± 0.2 mm**.
- **Najti način za matematični opis robov merjenih objektov**, saj je brušenje potrebno ravno na mestih, kjer meritve ne podajo dejanske geometrije roba in je potrebno področje čiščenja matematično opisati.

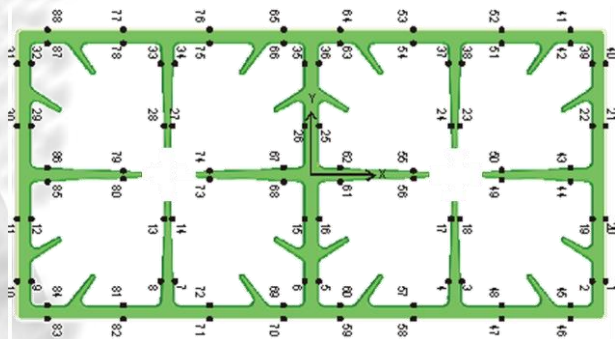


Cilji doktorske disertacije – Primer B

- Razviti in izdelati namenski merilni sistem za spremljanje raztezanja membrane diastata s keramičnim gumbom v fazi polnjenja s posebnim oljem z zahtevano mejo pogreška $\pm 5 \mu\text{m}$.
- Izbrati merilnik razdalje, ki bi s svojo **majhnostjo, točnostjo in varnostjo za delavce** izpolnil zahteve, v nasprotnem primeru pa z uporabo ustreznih metod poskušati njegove karakteristike izboljšati.
- Z meritvami in poskusi pokazati, koliko na meritve raztezka in njihov prenos vpliva zahtevno industrijsko okolje; vplive kompenzirati oziroma minimizirati.



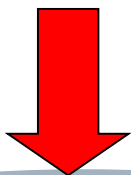
Utemeljitev – Primer A



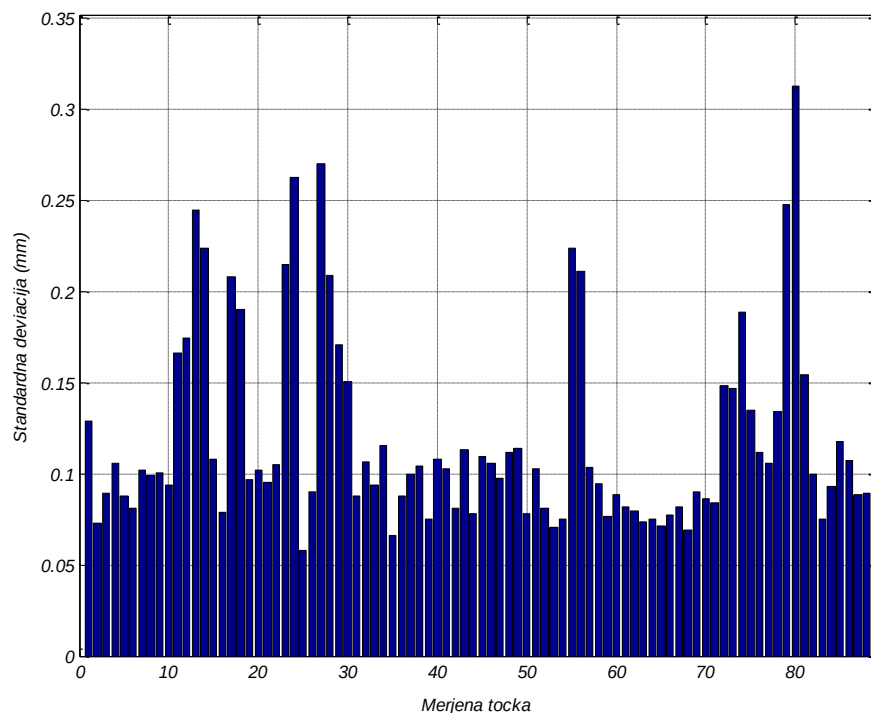
- **Material:** siva litina (ogljik in železo),
- **Dimenzije:** 552 x 274 x 19 mm (D x Š x V),
- **Granulacija peska:** 0.2 mm,
- **Merilna naprava:** KMS,
- **Število izmerjenih točk:** 88,
- **Število izmerjenih rešetk:** 30,
- **Trajanje meritev na rešetki:** 7 min.

Rezultati:

povprečni std. odklon: 0.13 mm,
največji std. odklon: 0.31 mm,
povprečni abs. pogrešek: 0.5 mm,
max. abs. pogrešek: 1.47 mm.



Vsako rešetko potrebno
dimenzijsko izmeriti!





Utemeljitev – Primer A

Principi za izmero dimenzij rešetke:

- **kontaktni princip (KMS)** $\Rightarrow$ časovno potratno, //
- **sistem z video kamero** $\Rightarrow$ vidnost področij čiščenja, //
- **robot in laserski merilnik oddaljenosti.** ✓



Merilni sistem:

- robot Epson E2S651 (4DOF),
- laserski točkovni triangulacijski merilnik oddaljenosti Micro-Epsilon ILD2200-10,
- namenska programska oprema.

Hitro merjenje

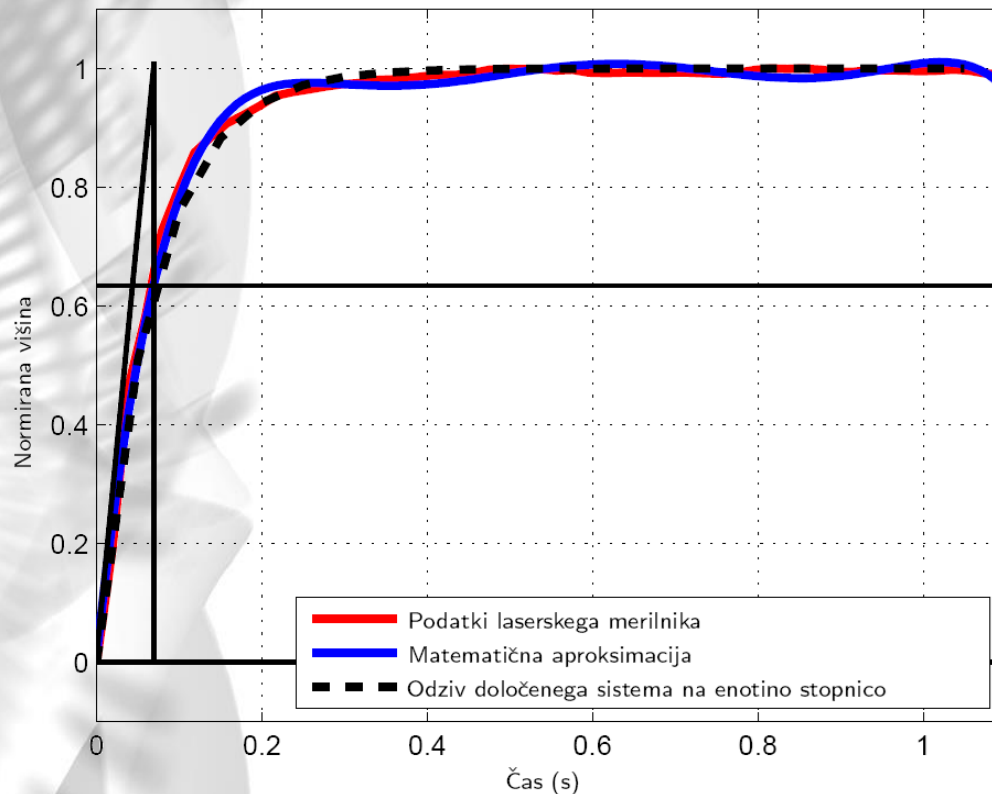
Merjenje večjih objektov



Utemeljitev – Primer A

Dinamika spreminjanja robov rešetke – je uporabljen laserski triangulacijski merilnik ustrezen?

- proizvajalec ne podaja dinamične karakteristike merilnika.



Hitrost gibanja robota: 50 mm/s.

Rob obravnavamo kot sistem 1. reda.

Mejna frekvenca (ω_m): cca. 10-15 Hz.

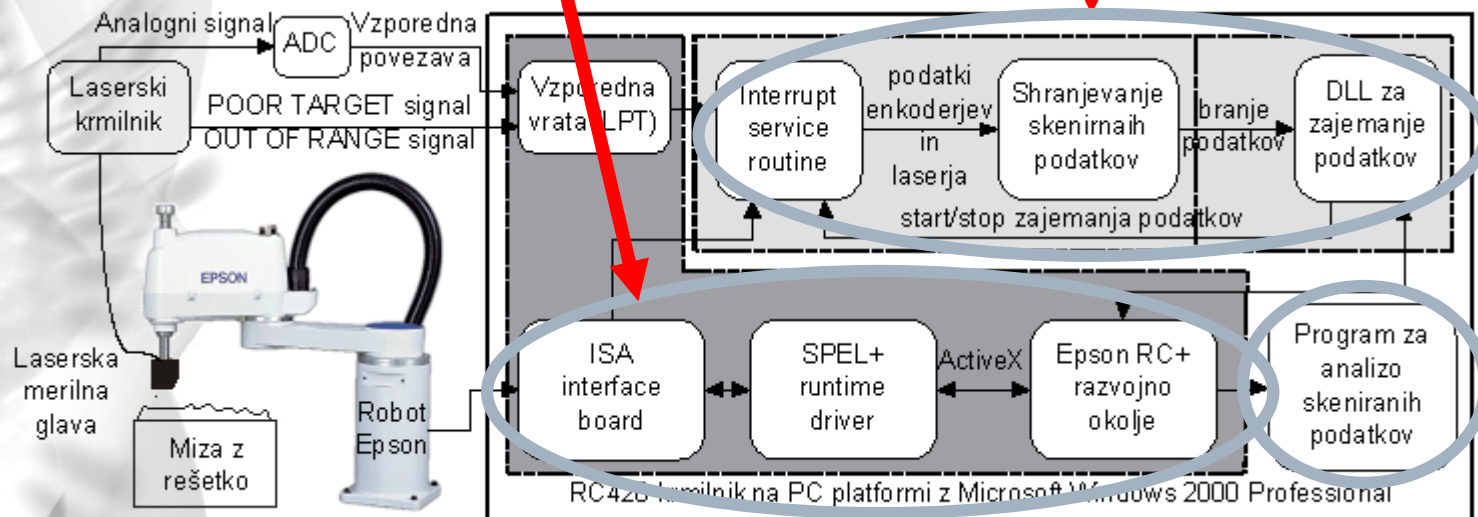
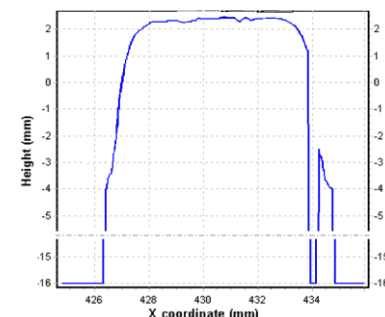
Frekvenca osveževanja podatkov merilnika ILD2200-10: 10 kHz.



Programska oprema 1 – Primer A

Zajem koordinat gibanja robota in laserskih meritev $\Rightarrow$ profil skeniranega dela

Frekvenca zajema podatkov $\Rightarrow$ konstantna in visoka



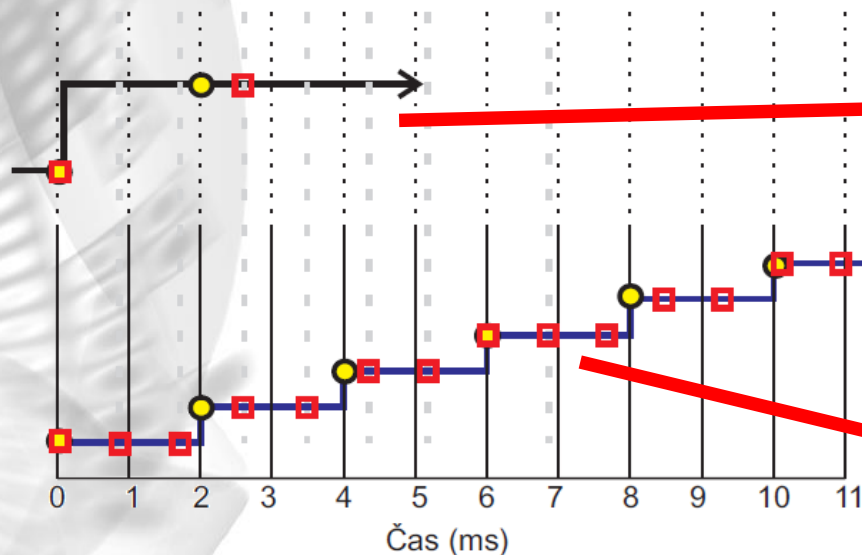
**konstantna
frekvenca
500 Hz**



Programska oprema 1 – Primer A

Delovanje gonilnika za zajem koordinat robota in razdalje

- osveževanje registrov s spremembami pulzov enkoderjev: 500 Hz,
- prekinitvena vrata – proženje branja vrednosti - gonilnik: ≥ 1 kHz.



Pogrešek meritev pri merjenju objektov z ostrimi robovi – prekratke in predolge izmerjene dimenzije.

Zaobljeni objekti –
nekonstantna histereza –
rešili s fiksnimi premiki
izmerjenih točk.

Legenda:

— Vrednost registra s podatki enkoderja

● Čas osveževanja registra

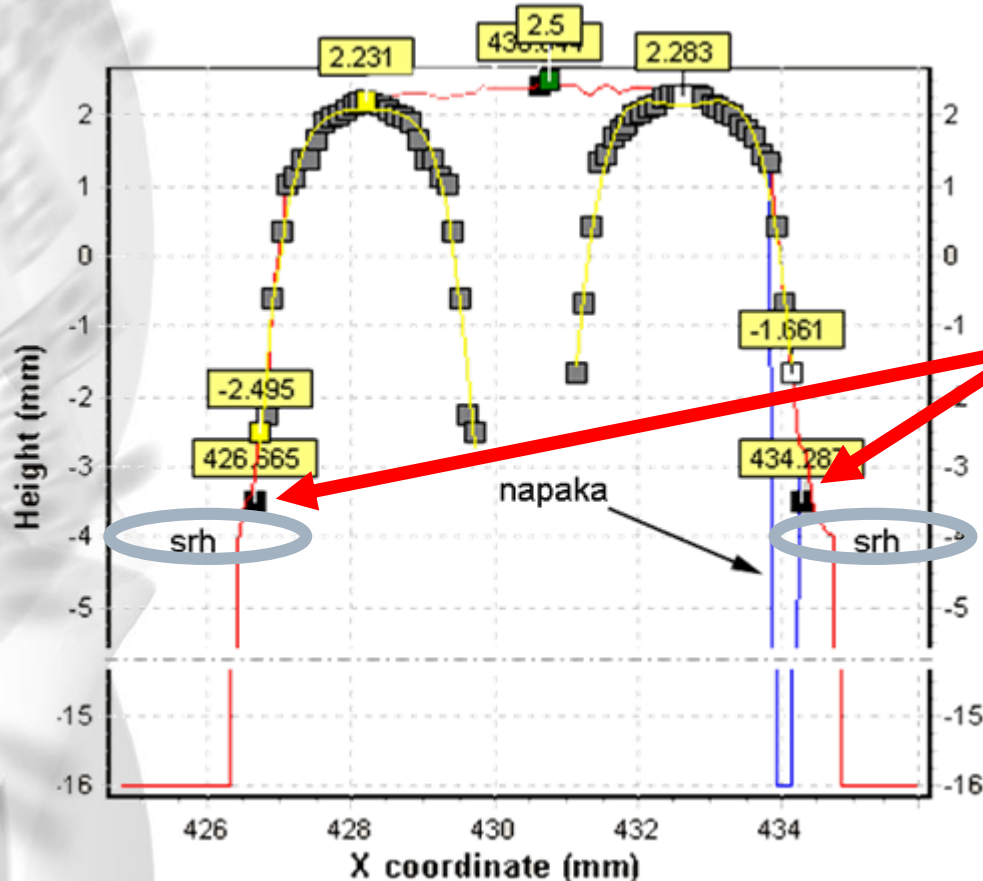
■ Čas prekinitve ISA kartice oz. čas shranjevanja vrednosti



Programska oprema 2– Primer A

Naloge:

- popravljanje skenirnih napak $\Rightarrow$ linearna interpolacija,
- aproksimacija robov rešetke $\Rightarrow$ polinomska aproksimacija.



Stopnje 4, 6 in 8,
variabilno število točk.

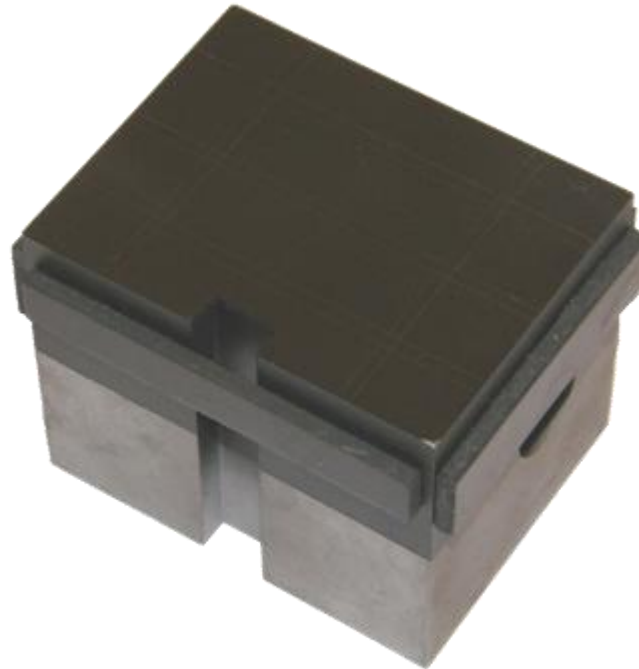
Točki čiščenja



Metodologija– Primer A

Določanje merilnega pogreška sistema robot-laser s kalibracijskim kvadrom:

- razdeljen na dve polovici – ena pobarvana črno mat barvo,
- izmerjena s KMS [$U_2(\mu\text{m}) = \pm(4 + 4.5 \cdot L(\text{mm})/1000)$] $\Rightarrow$ prava dimenzija,
- izmerili koordinate 10ih točk z 10 ponovitvami,
- dimenzije: cca. $50.3 \times 51.2 \times 64.7$ mm (Š $\times$ V $\times$ D).

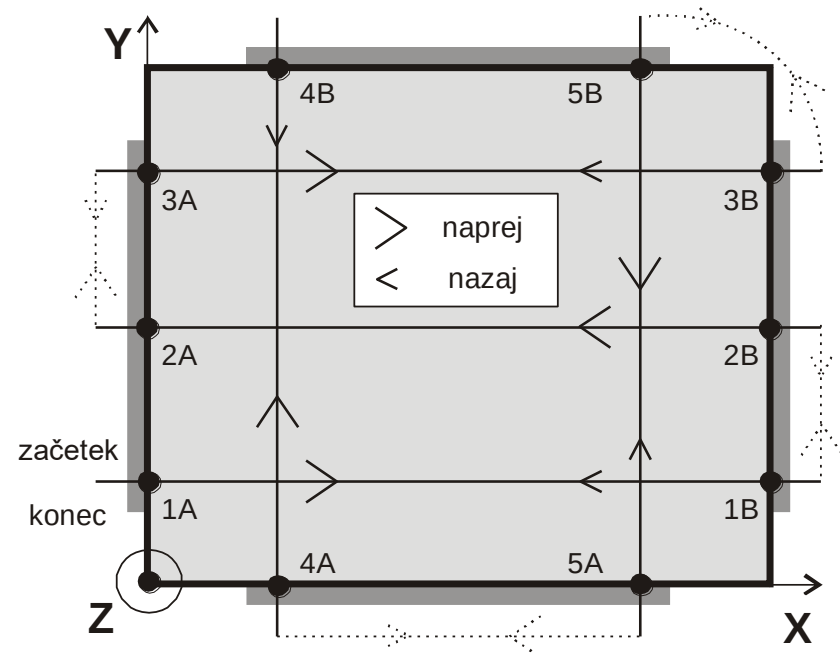




Metodologija– Primer A

Merilni pogrešek sistema robot-laser s kalibracijskim kvadrom:

- kvader v 9ih pozicijah v delovnem območju robota,
- pozicija točk enaka kot pri kontaktni meritvi,
- izmerili tako nepobarvano kot pobarvano stran kvadra,
- hitrosti gibanja robota: 10 mm/s, 20 mm/s, 50 mm/s in 100 mm/s,
- gibanje naprej in nazaj – ena meritev,
- število ponovitev: 30.





Metodologija– Primer A

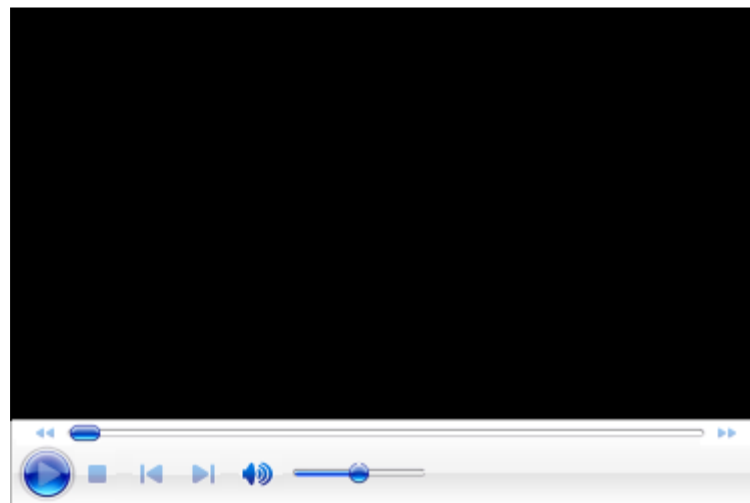
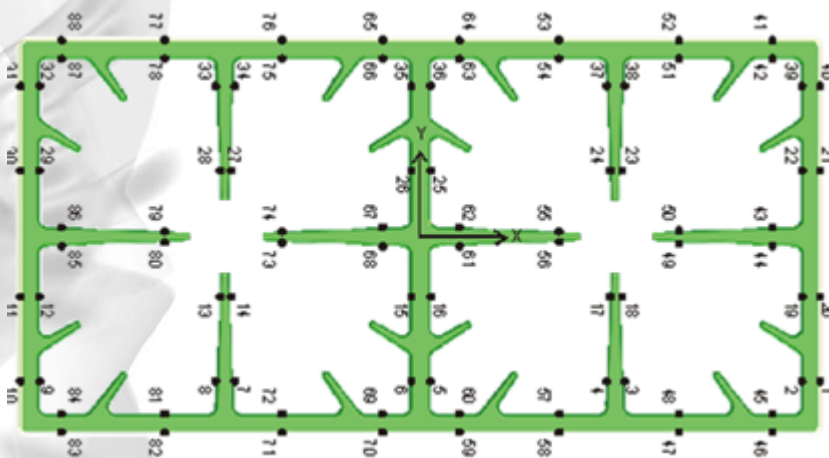
Primerjalne meritve na rešetkah:

Meritve s KMS:

- izmerjenih 30 rešetak,
- izmerjenih 88 točk, 1 mm nad zgornjim robom srha,
- čas meritve: 7 minut.

Meritve z izdelanim sistemom:

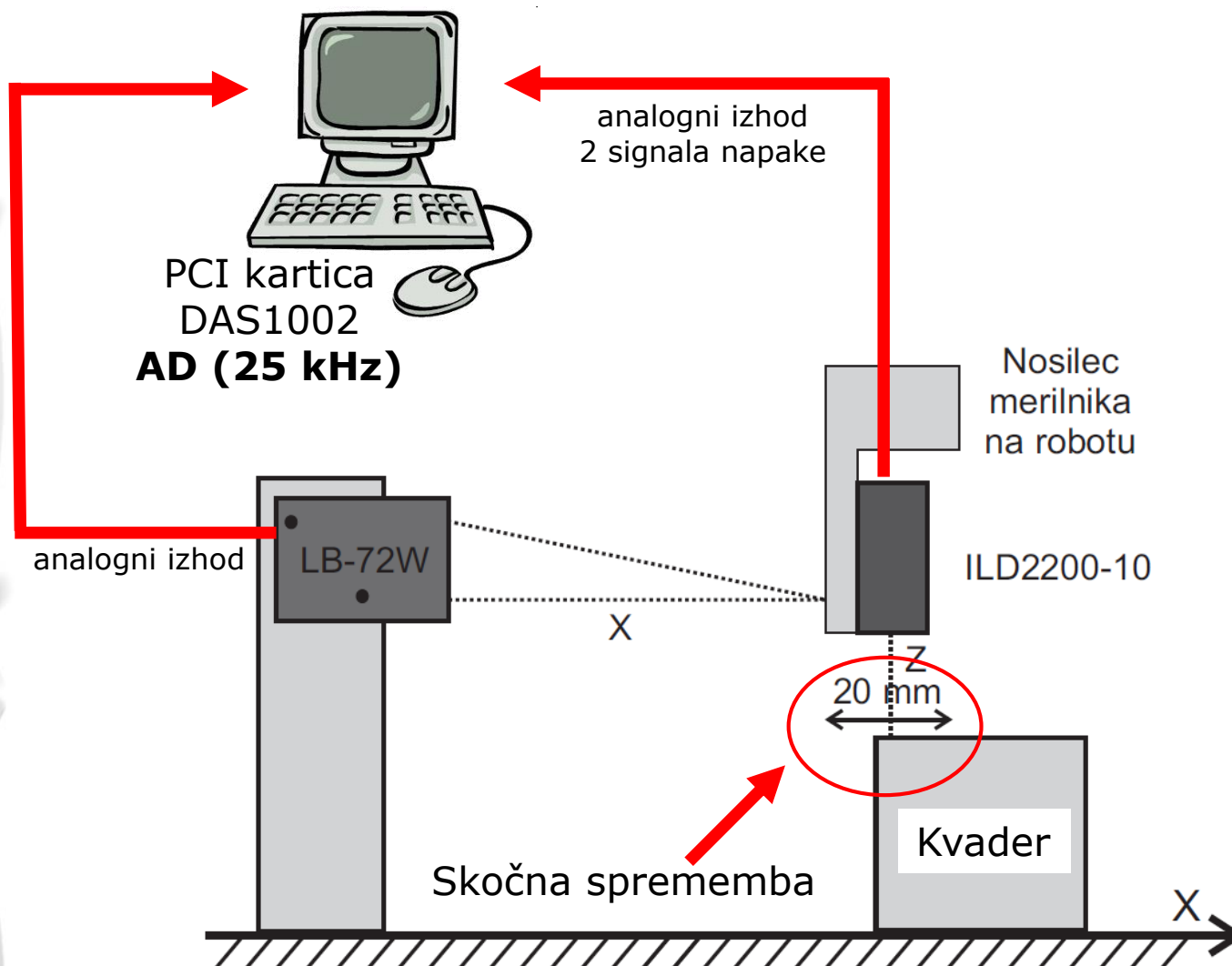
- izmerjenih 42 rešetak,
- izmerjenih 88 točk, 1 mm nad zgornjim robom srha,
- čas meritve: 45 sekund.





Metodologija– Primer A

Določanje dinamičnega odziva laserskega merilnika Micro-Epsilon ILD2200-10

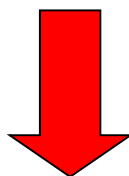




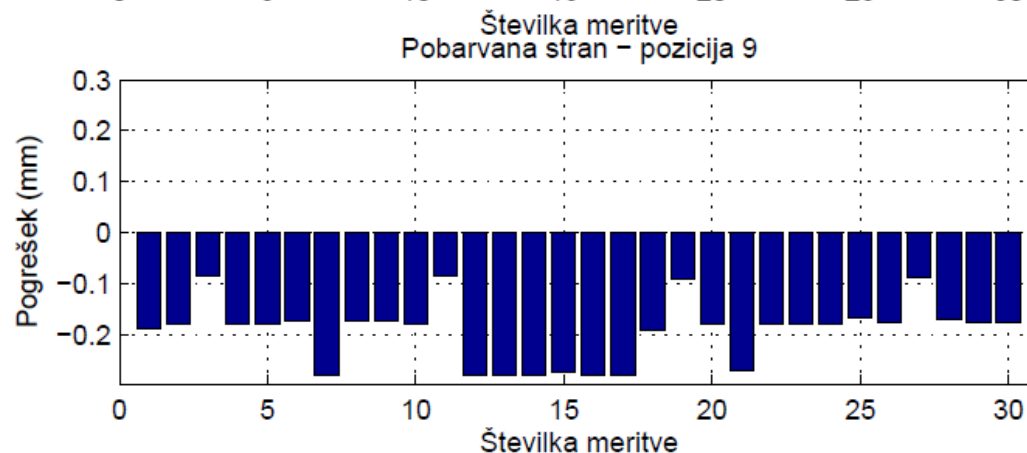
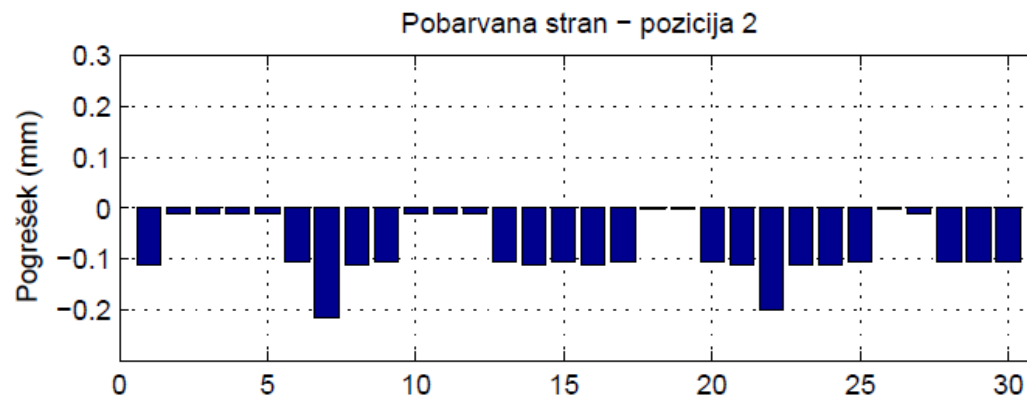
Rezultati- Primer A

Merilni pogrešek sistema robot-laser s kalibracijskim kvadrom:

Površina kocke	Nepobarvana		Pobarvana	
	Pogrešek		Pogrešek	
Hitrost skeniranja (mm/s)	min	max	min	max
10	-0.01	0.33	-0.16	0.19
20	-0.06	0.30	-0.17	0.15
50	-0.17	0.31	-0.30	0.13
100	-0.31	0.29	-0.54	0.12



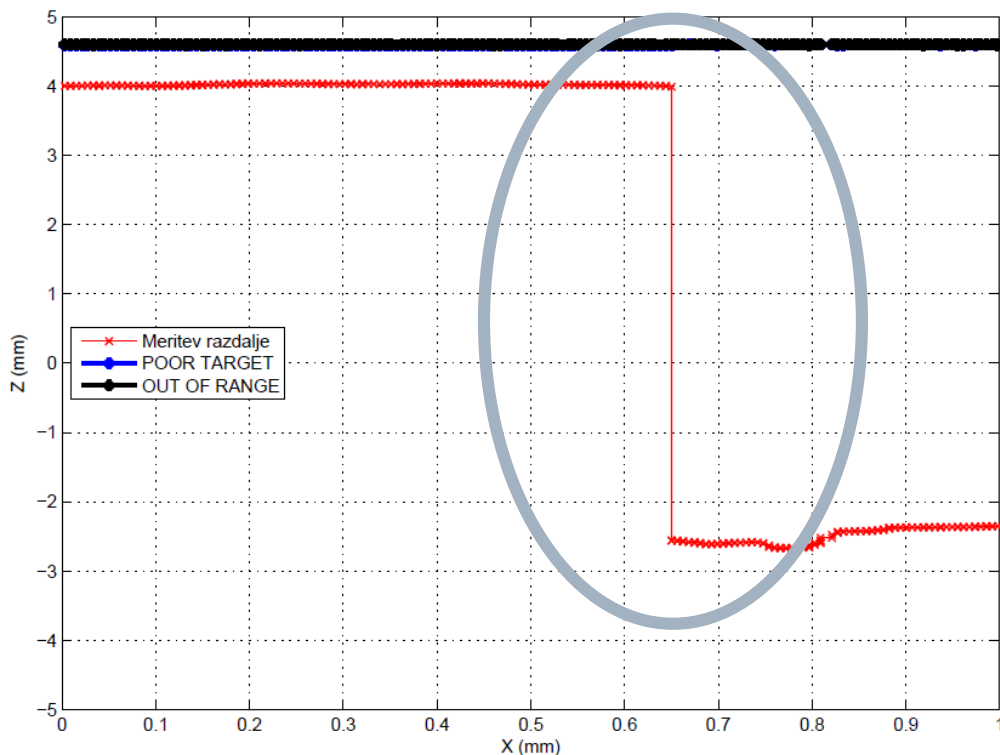
**Merilni pogrešek
na kvadru pri hitrosti
50 mm/s je ± 0.3 mm.**





Rezultati– Primer A

Določanje dinamičnega odziva laserskega merilnika Micro-Epsilon ILD2200-10



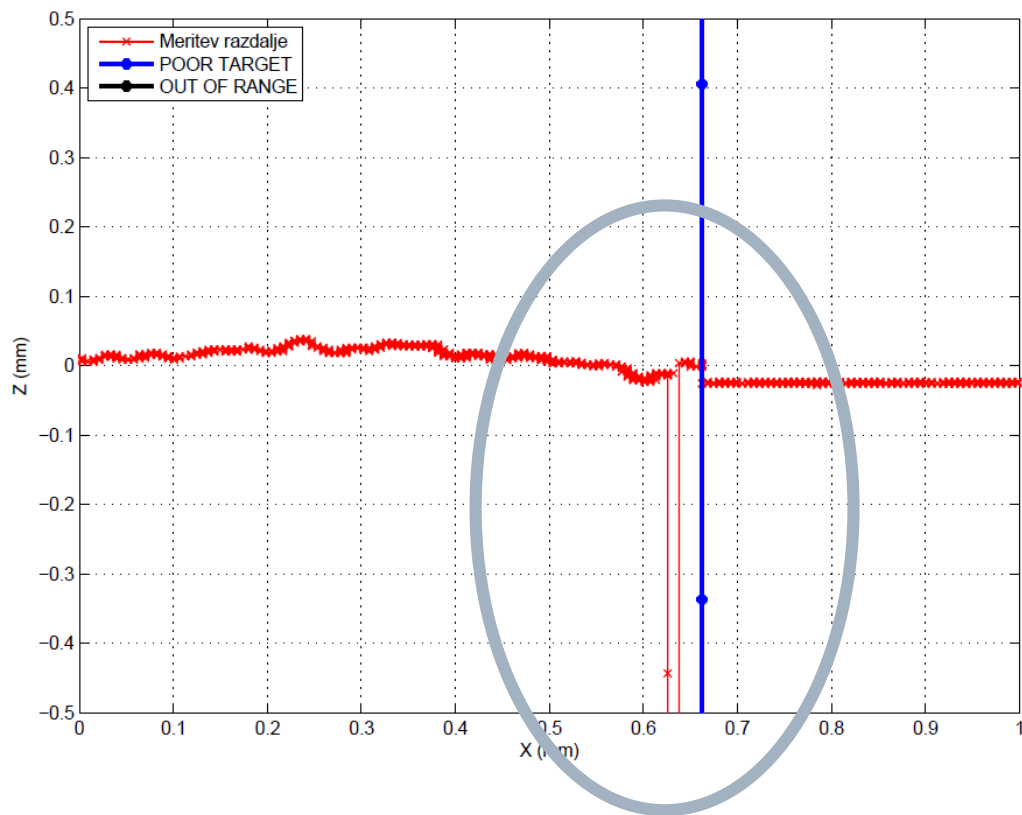
Ob prehodu čez oster rob ni opaziti vmesnih vrednosti – osveževanje z 10 kHz.





Rezultati– Primer A

Določanje dinamičnega odziva laserskega merilnika Micro-Epsilon ILD2200-10



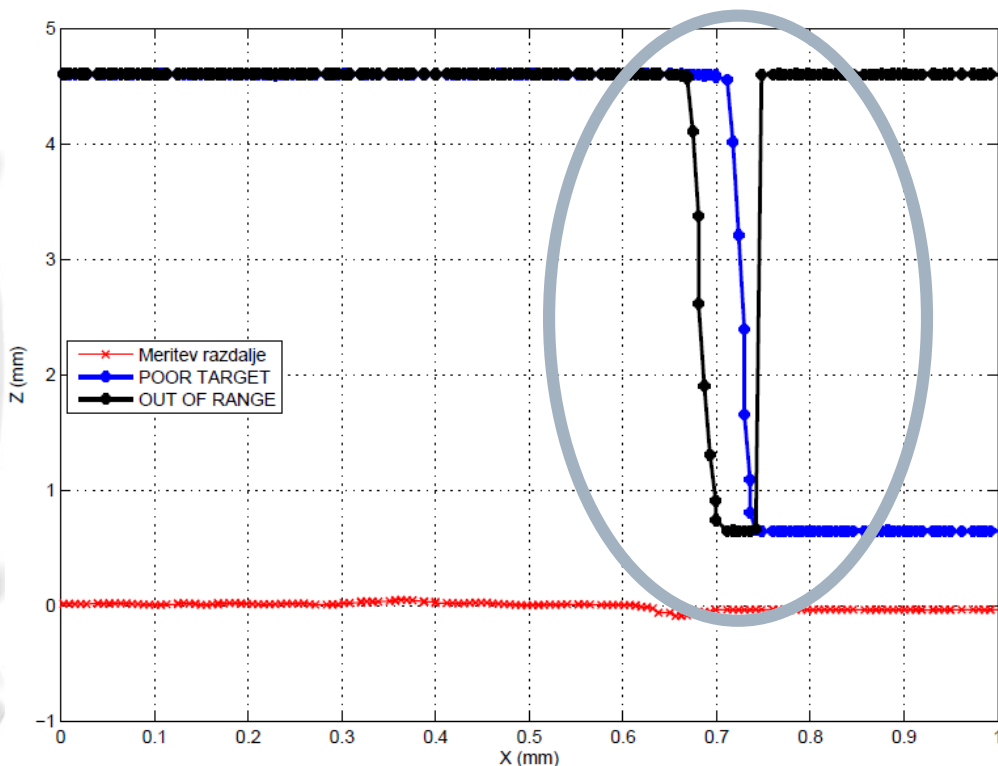
V bližini ostrega robu kvadra je prišlo do nepravilne meritve, merilnik pa tega ne signalizira (Curless et. al).





Rezultati- Primer A

Določanje dinamičnega odziva laserskega merilnika Micro-Epsilon ILD2200-10



Sprememba
nivoja signala
napake traja do
0.35 ms.

Pri hitrosti skeniranja
100 mm/s to lahko
povzroči do 0.02 mm
pogreška.

Analogna signala napake potrebujeata določen čas za spremembo logičnega nivoja.



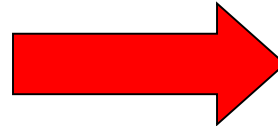


Rezultati– Primer A

Ovrednotenje delnih pogreškov in določitev neovrednotenih pogreškov

Hitrost (mm/s)	Rob (mm)	Kinematika (mm)	Gonilnik (mm)	Pogrešek (mm)
10	-0.005	-0.003	-0.050	-0.060
	+0.005	+0.003	+0.015	+0.030
20	-0.005	-0.004	-0.100	-0.110
	+0.005	+0.004	+0.030	+0.040
50	-0.010	-0.010	-0.200	-0.220
	+0.010	+0.010	+0.070	+0.100
100	-0.015	-0.010	-0.400	-0.430
	+0.015	+0.010	+0.150	+0.180

Ovrednotenje delnih pogreškov



Nepobarvan kvader					
Rezultati testiranja (mm) - tabela 7.3		Ovrednotenje pogreška (mm) - tabela 7.4		Razlika (mm)	
-0.01	0.33	-0.06	0.03	-0.05	0.30
-0.06	0.30	-0.11	0.04	-0.05	0.26
-0.17	0.31	-0.22	0.10	-0.05	0.21
-0.31	0.29	-0.43	0.18	-0.12	0.11
Povprečje:				-0.07	0.22
Pobarvan kvader					
Rezultati testiranja (mm) - tabela 7.3		Ovrednotenje pogreška (mm) - tabela 7.4		Razlika (mm)	
-0.16	0.19	-0.06	0.03	0.10	-0.16
-0.17	0.15	-0.11	0.04	0.06	-0.11
-0.30	0.13	-0.22	0.10	0.08	-0.03
-0.54	0.12	-0.43	0.18	0.11	0.06
Povprečje:				0.09	-0.06

Določitev neovrednotenega pogreška

Zaključki:

- pri hitrosti 50 mm/s in 100 mm/s je glavni vir pogreška način delovanja gonilnika,
- pri nižjih hitrostih so pogreški preveliki in razloga zanje nismo našli.

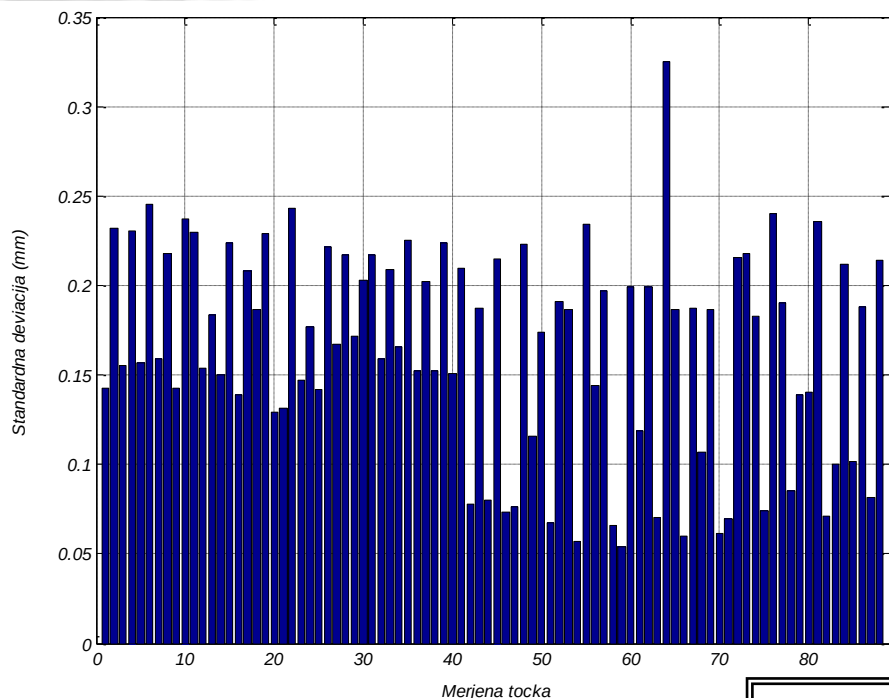
Viri pogreškov:

- 1) način delovanja napisanega gonilnika,
- 2) ostri robovi kvadra in nepravilne meritve na robovih,
- 3) povečevanje premera laserskega žarka, če le-ta pade preveč izven merilnega območja,
- 4) zračnost sklepov in dimenzijsko odstopanje dimenzij robota od navedenih,
- 5) uporaba kinematičnih enačb za izračun planarnih koordinat robota,
- 6) neznana vrednost zakasnitve med zajemom enkoderjev, vrednostjo laserskega merilnika ter časom preskoka nivoja obeh signalov napak.

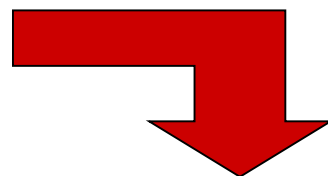


Rezultati- Primer A

Primerjalne meritve na rešetkah:



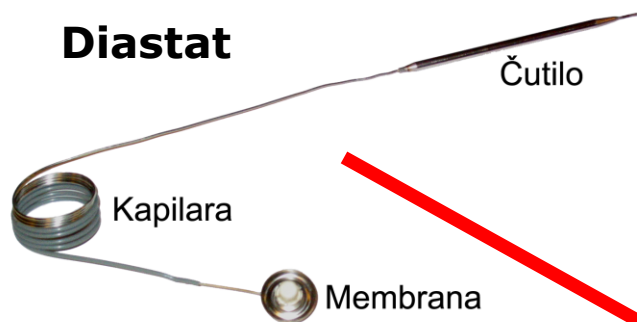
- **Material:** siva litina (ogljik in železo),
- **Dimenzije:** 552 x 274 x 19 mm (D x Š x V),
- **Granulacija peska:** 0.2 mm,
- **Merilna naprava:** robot+laser,
- **Število izmerjenih točk:** 88,
- **Število izmerjenih rešetki:** 42,
- **Trajanje meritev na rešetki:** 45 sekund.



povprečni std. odklon: 0.17 mm ($\Delta=0.04$ mm),
največji std. odklon: 0.32 mm ($\Delta=0.01$ mm),
povprečni abs. pogrešek: 0.8 mm ($\Delta=0.3$ mm),
max. abs. pogrešek: 1.94 mm ($\Delta=0.47$ mm).



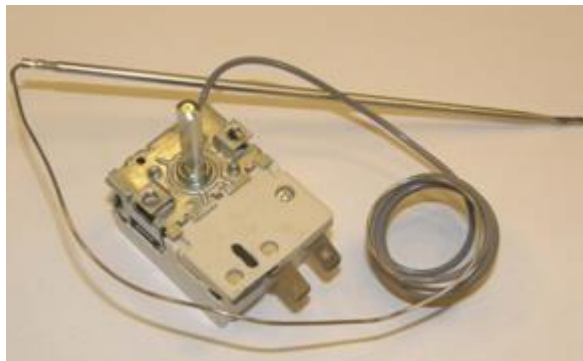
Utemeljitev – Primer B



**Polnjenje
diastatov na
rotirajočih
polnilnih napravah**



Mehanski termostat

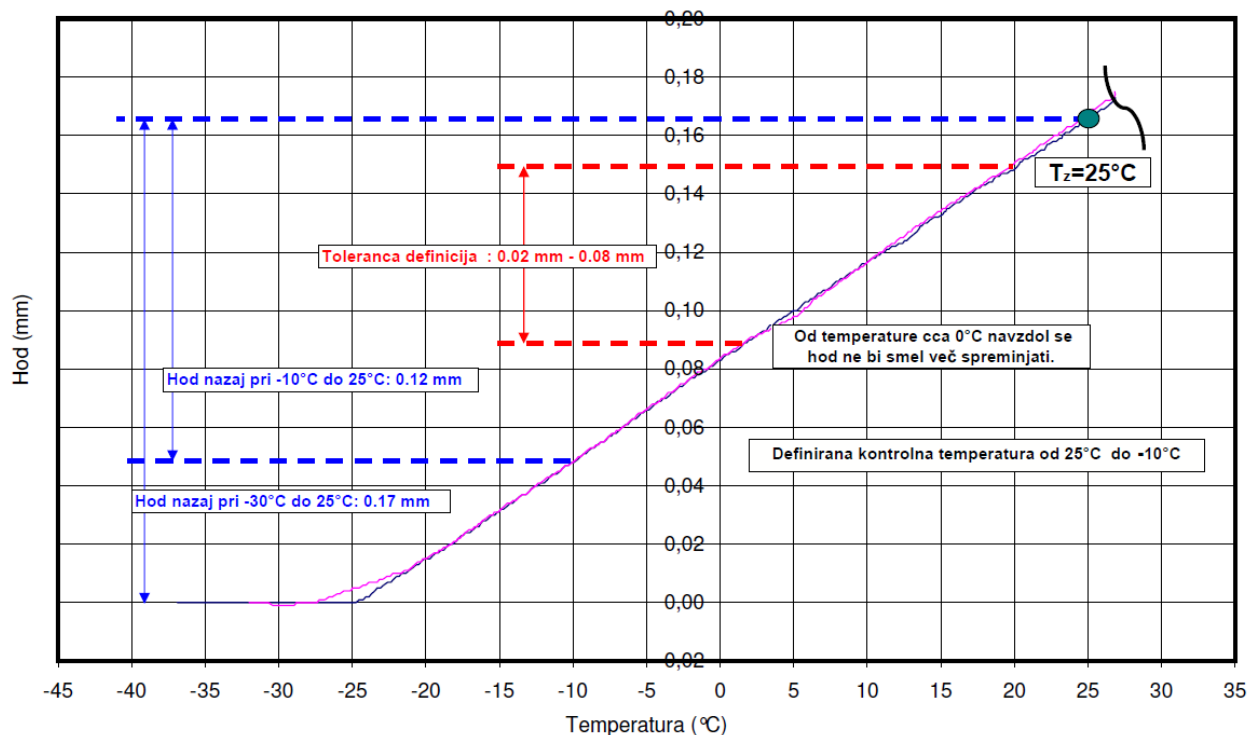




Utemeljitev – Primer B

Za pravilno delovanje termostata $\Rightarrow$ pravilno napolnjen diastat:

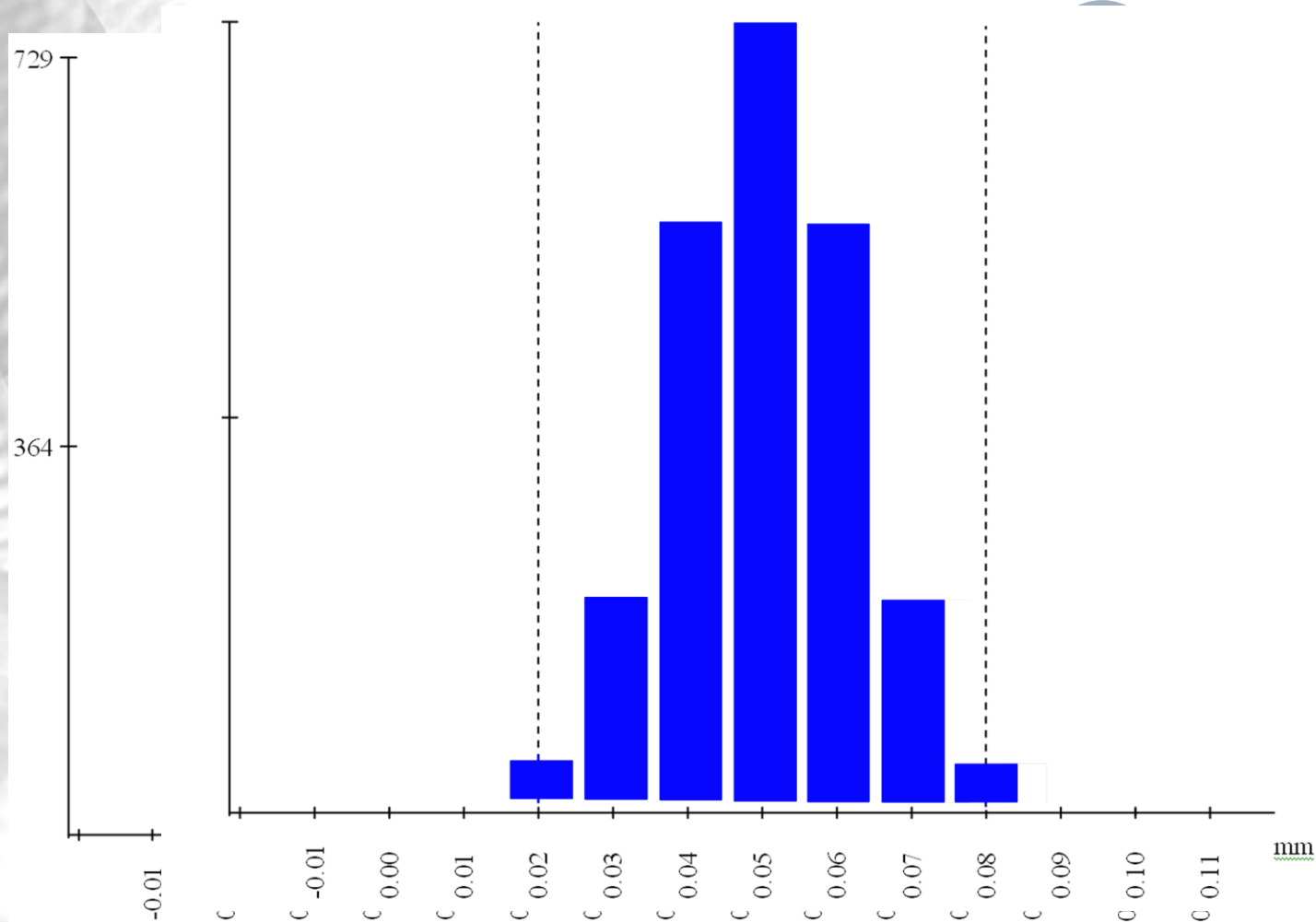
- termostat oziroma membrana ima dovolj raztezne območja za celotno delovno območje termostata (t.i. hod naprej),
- izključen termostat ne sme nikoli vklopiti grelnega telesa (t.i. hod nazaj) - varnost,
- zmanjšanje stroškov zaradi slabo napolnjenih diastatov (100% kontrola),
- izpolniti kriterije, ki jih postavljajo standardi (vklop grela pri sobni temperaturi).





Utemeljitev – Primer B

Hod nazaj – brezpodprizorja vretena – prehod 2006/2007



je membran
lovilj!

avtomatsko
polnilni tlak!



Utemeljitev – Primer B

Principi za merjenje raztezka membran med polnjenjem:

- **kontaktni princip** ⇒ najtočnejše meritve,
⇒ samo 2.5 s za ročno vpenjanje, //
- **sistem z video kamero** ⇒ pomanjkanje prostora, //
- **merilnik oddaljenosti** ⇒ ustrezna meja pogreška ($< \pm 0.01$ mm),
⇒ majhna merilna glava – za eno polnilno glavo,
⇒ varnost za delavce (oči),
⇒ analogen izhod (slabost).



Merilni sistem – na polnilni napravi:

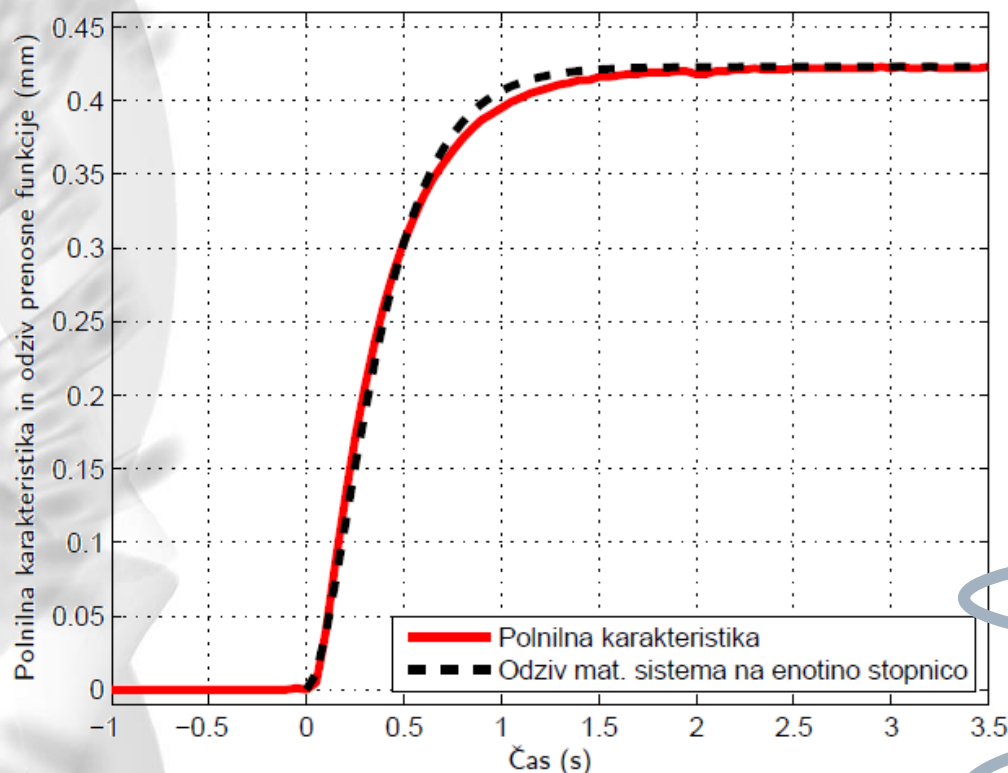
- točkovni merilnik oddaljenosti Keyence PT-165,
- mikrokrmilnik – zajem, analiza in oddaja izmerjenih vrednosti,
- WLAN vmesnik MOXA NPort W2150.



Utemeljitev – Primer B

Dinamika raztezanje membrane med polnjenjem na polnilnih napravah – je uporabljen brezkontaktni merilnik ustrezen?

- proizvajalec podaja dinamično karakteristiko merilnika – mejna frekvenca (1 ms): 400 Hz.



Polnilna naprava št. 4 – najstrmejša karakteristika.

Polnilni tlak: 7 bar.

Temperatura polnilnega olja: 27.1°C.

Strejceva metoda – sistem 2. reda.

$$G(s) = \frac{0.06043}{0.03928s^2 + 0.3964s + 1}$$

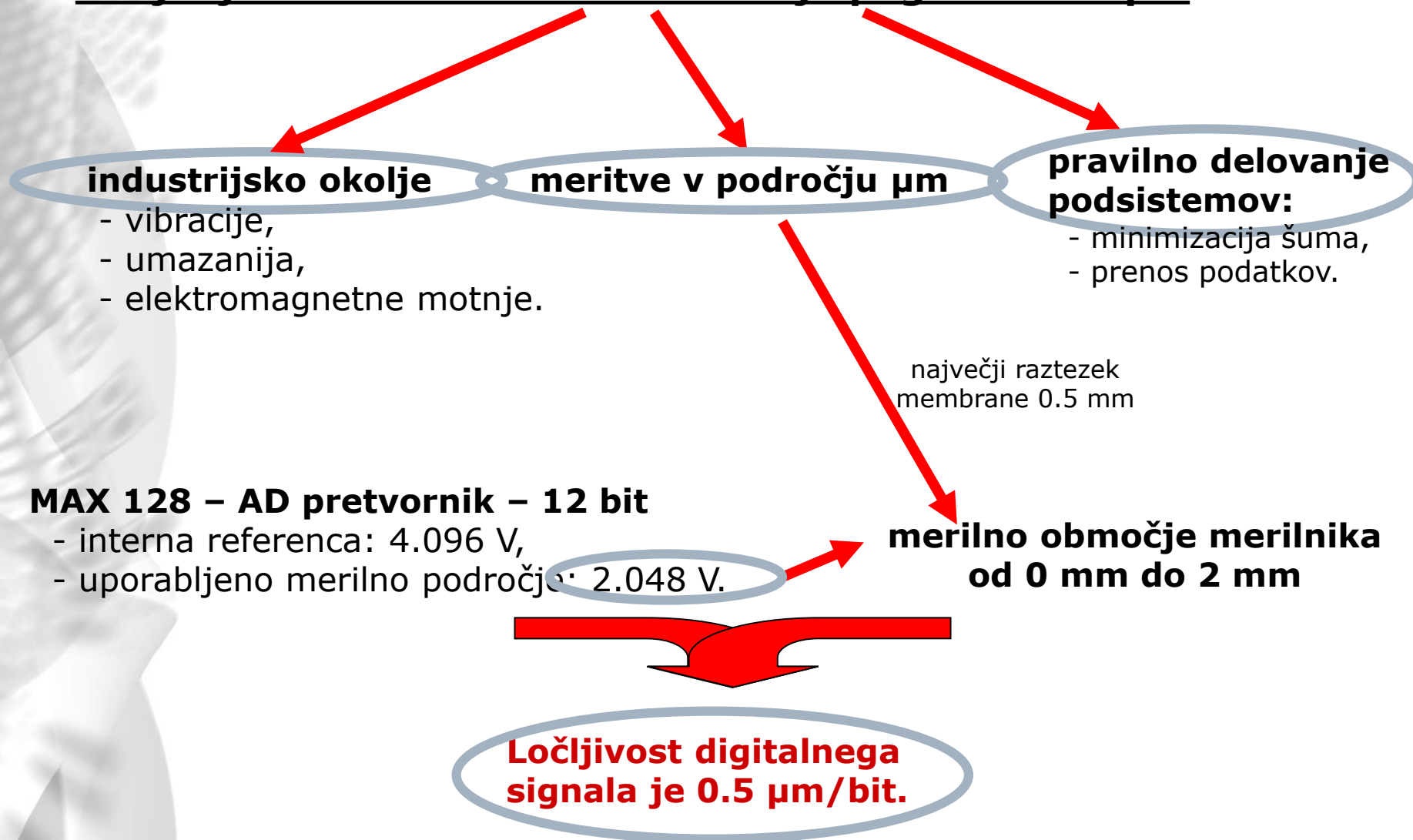
Mejna frekvenca (ω_m): cca. 5 Hz.

Mejna frekvenca uporabljenega merilnika: 400 Hz.



Metodologija– Primer B

Merjenje raztezka membrane z mejo pogreška $\pm 5 \mu\text{m}$





Metodologija– Primer B

Merilna karakteristika merilnika oddaljenosti Keyence PT-165:

- merilno območje: ± 2 mm,
- velikost pike: 1.5 mm,
- vir svetlobe: rdeča LED,
- **linearnost in merilna negotovost: nista podani.**

merilnik oddaljenosti

merilni mehanizem



referenčni mikrometer
Mitutoyo MHD-164-161:

- merilna negotovost: ± 2 μm ,
- ločljivost: 1 μm .



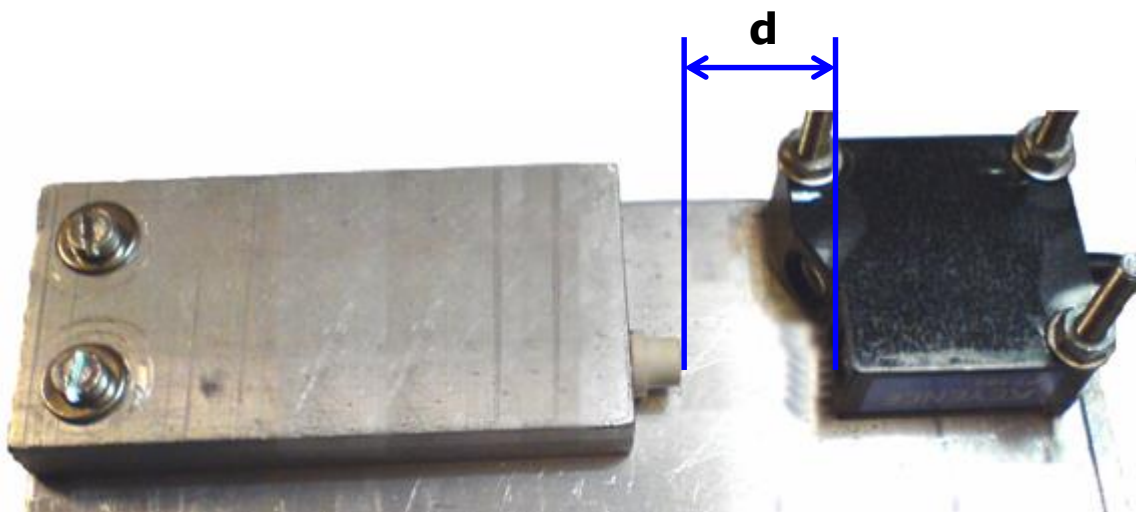
Metodologija– Primer B

Stabilnost meritev merilnika oddaljenosti Keyence PT-165:

↓
proizvodni prostori

↙
merjenje fiksne razdalje (d)
(AD MAX197 – 12bit - $\pm 5V$)

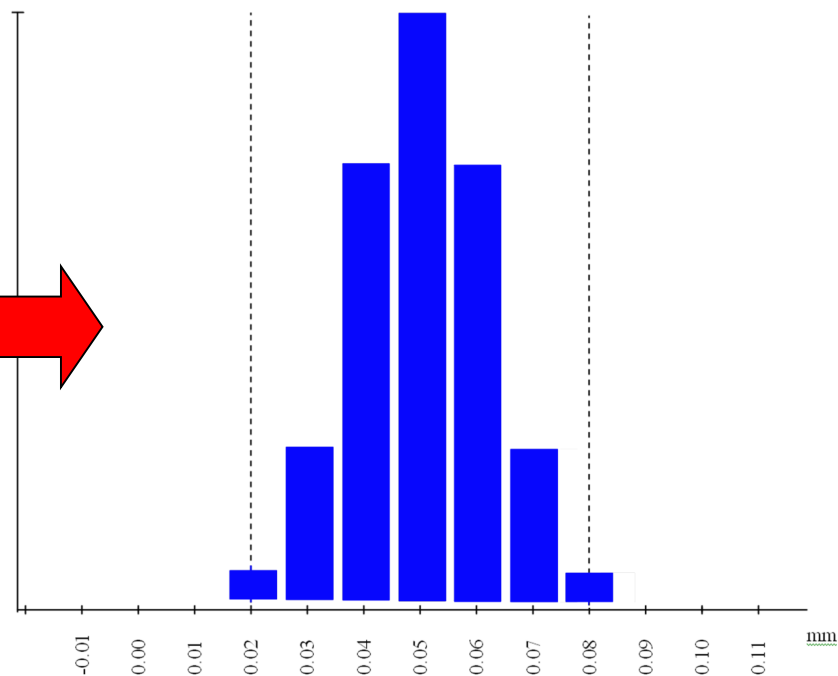
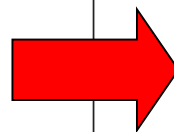
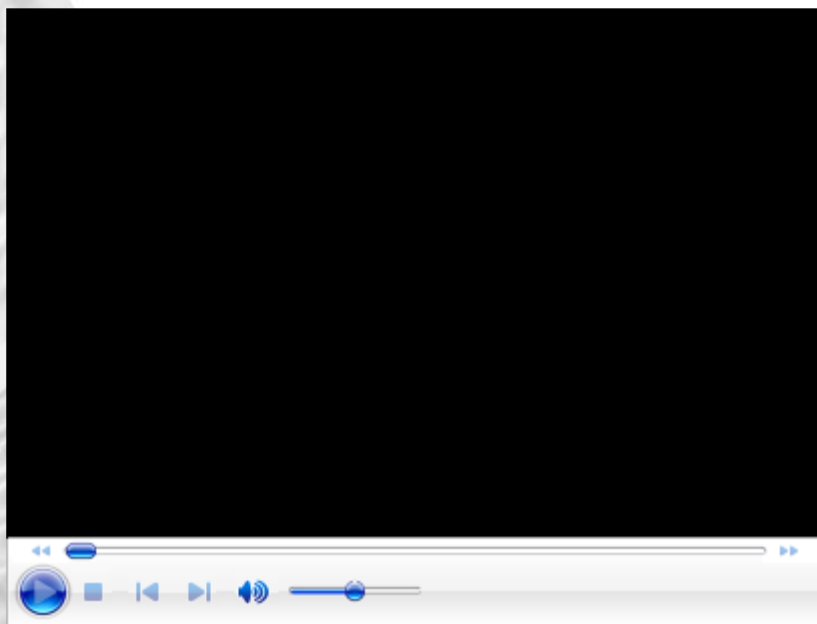
↘
čas: 4 ure
 ΔT : cca. $4^{\circ}C$





Metodologija– Primer B

Polnilne karakteristike – končna kontrola:

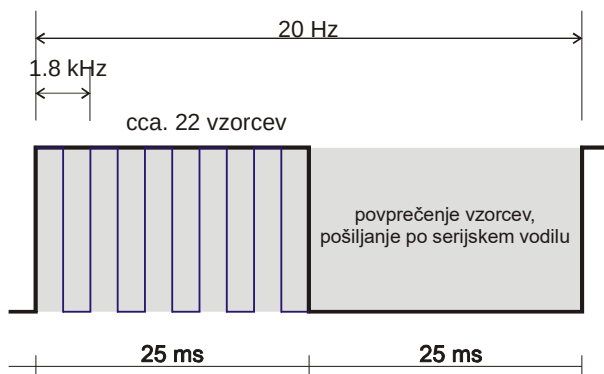
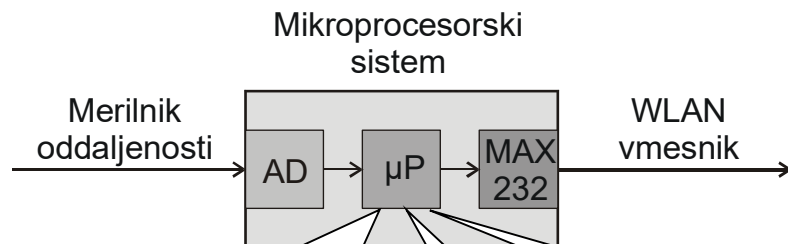


- merilnik oddaljenosti,
- mikrokrmilniški sistem,
- brezžični prenos podatkov,
- obstoječe matematične formule.

Primerjava meritev raztezka glede na rezultate končne kontrole.

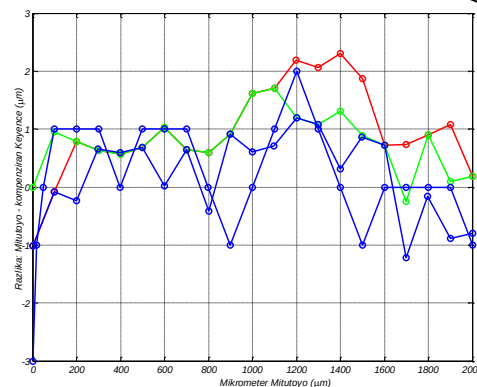


Programska oprema– Primer B



zajem, analiza in pošiljanje izmerjenih podatkov

uporabniški vmesnik

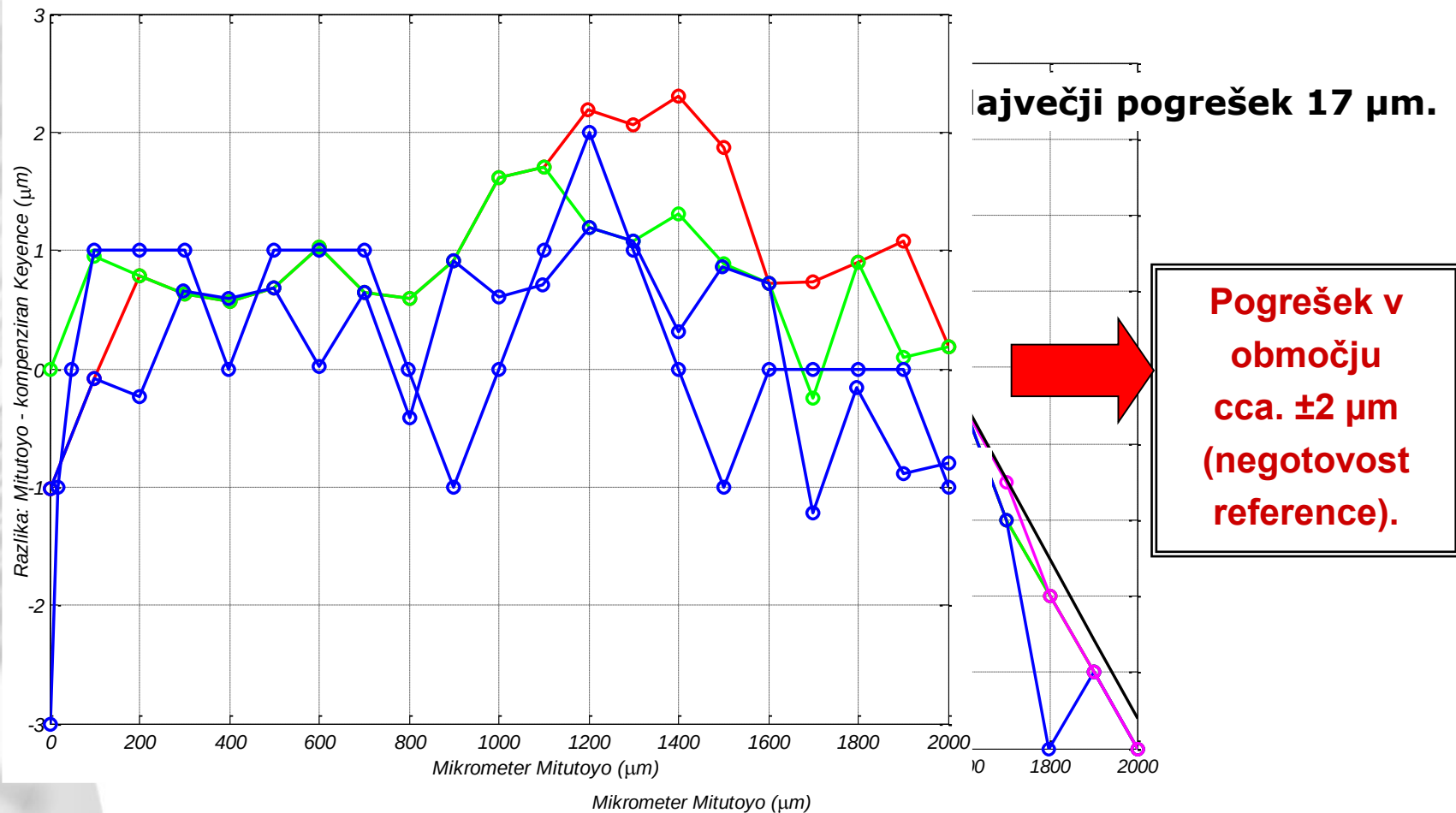


linearizacija merilne karakteristike s polinomom 4. stopnje



Rezultati– Primer B

Merilna karakteristika merilnika oddaljenosti Keyence PT-165:





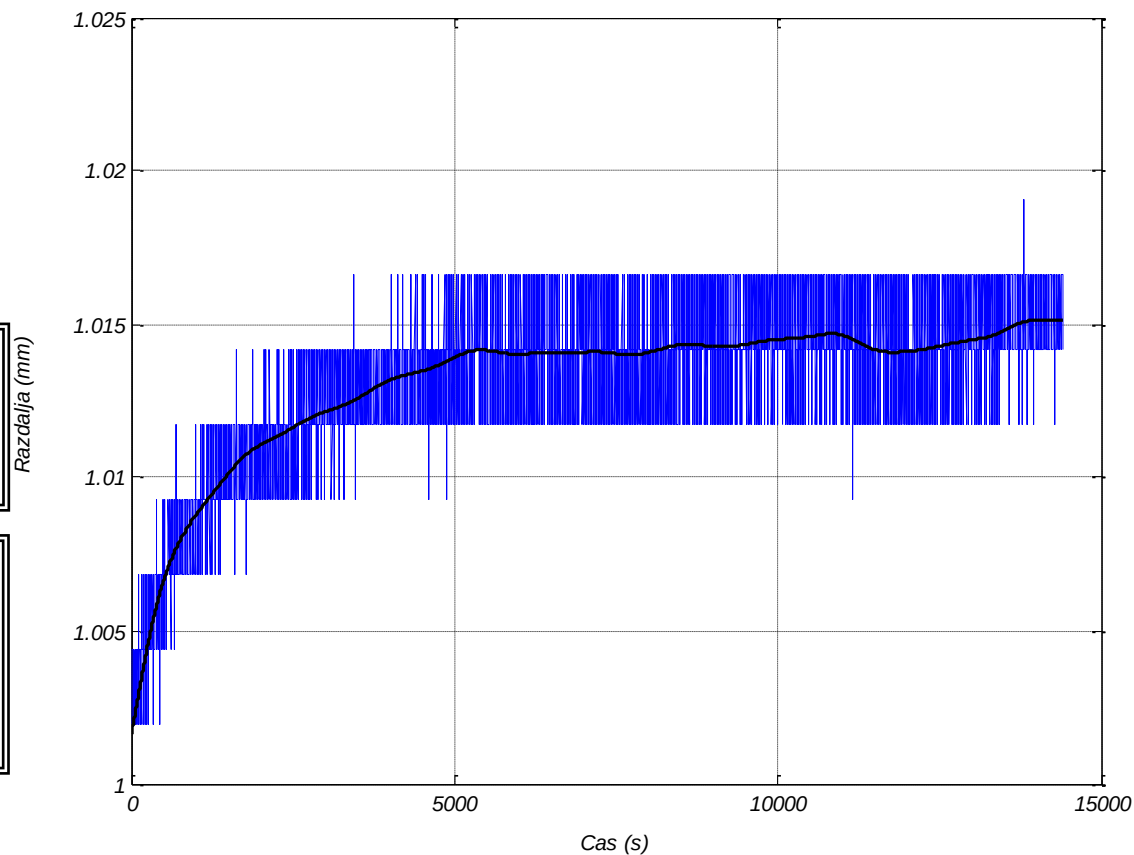
Rezultati– Primer B

Stabilnost meritev merilnika oddaljenosti Keyence PT-165:

Čas: 4 ure, ΔT : cca. 4°C
 Δd : $15\text{ }\mu\text{m}$.

**Posledica
aluminijastega
vpetja?**

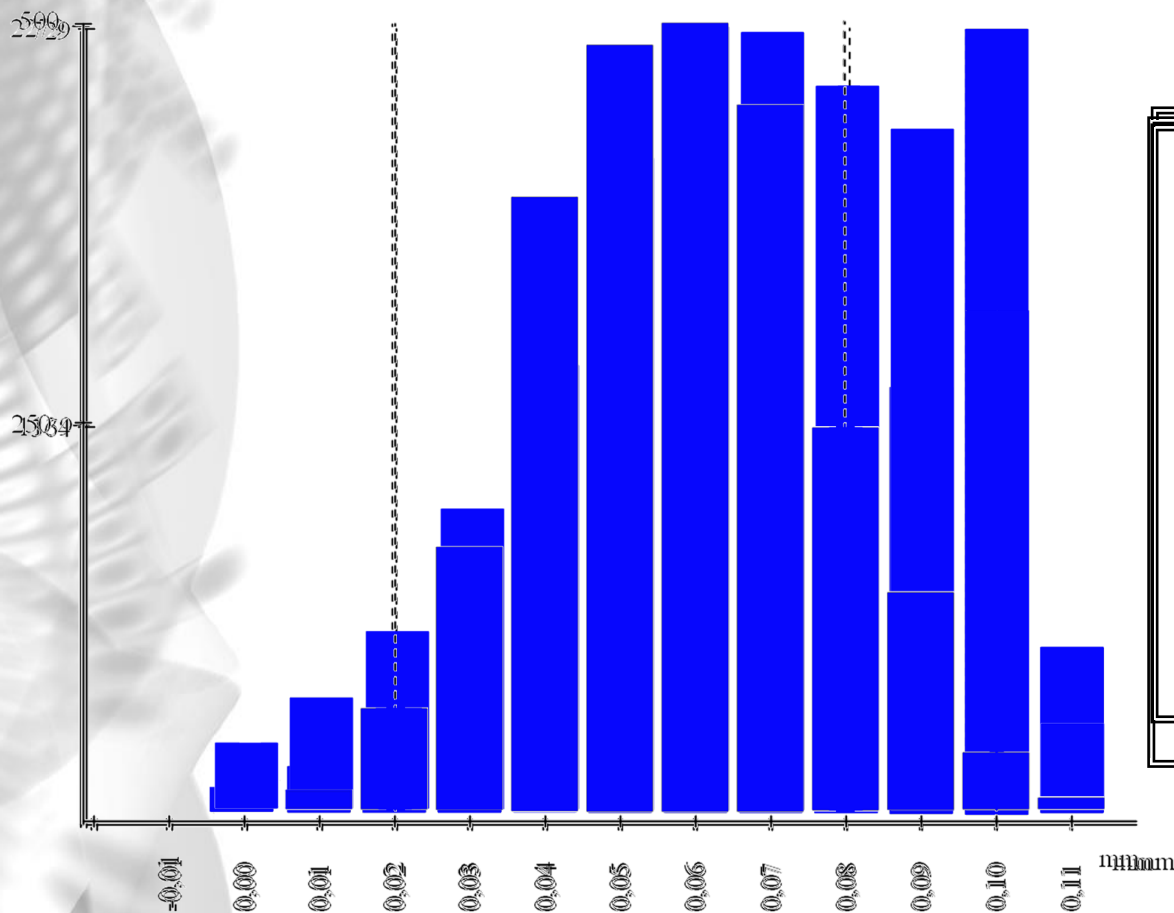
**Sprememba v časovni
enoti 120 sekund (čas
polnjenja diastata) je
zanemarljiva.**





Rezultati– Primer B

Hod nazaj – končna kontrola – tip 715-601:



**Z grupiranjem membran
in z nadzorom polnjenja**

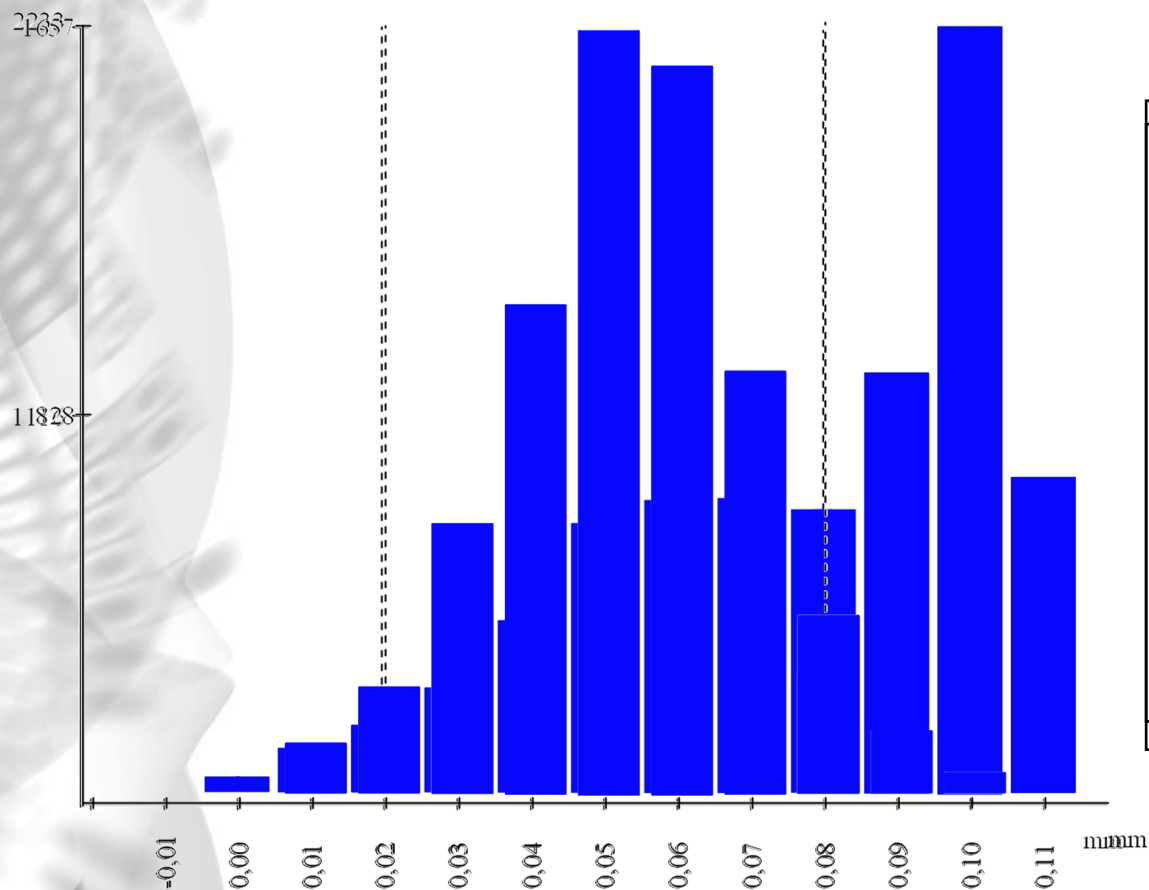
časovno obdobje:
01.11.2007 do
04.02.2008

število vzorcev: **2496**



Rezultati– Primer B

Hod nazaj – končna kontrola – tip 715-680:



**Z grupiranjem membran
in z nadzorom polnjenja**

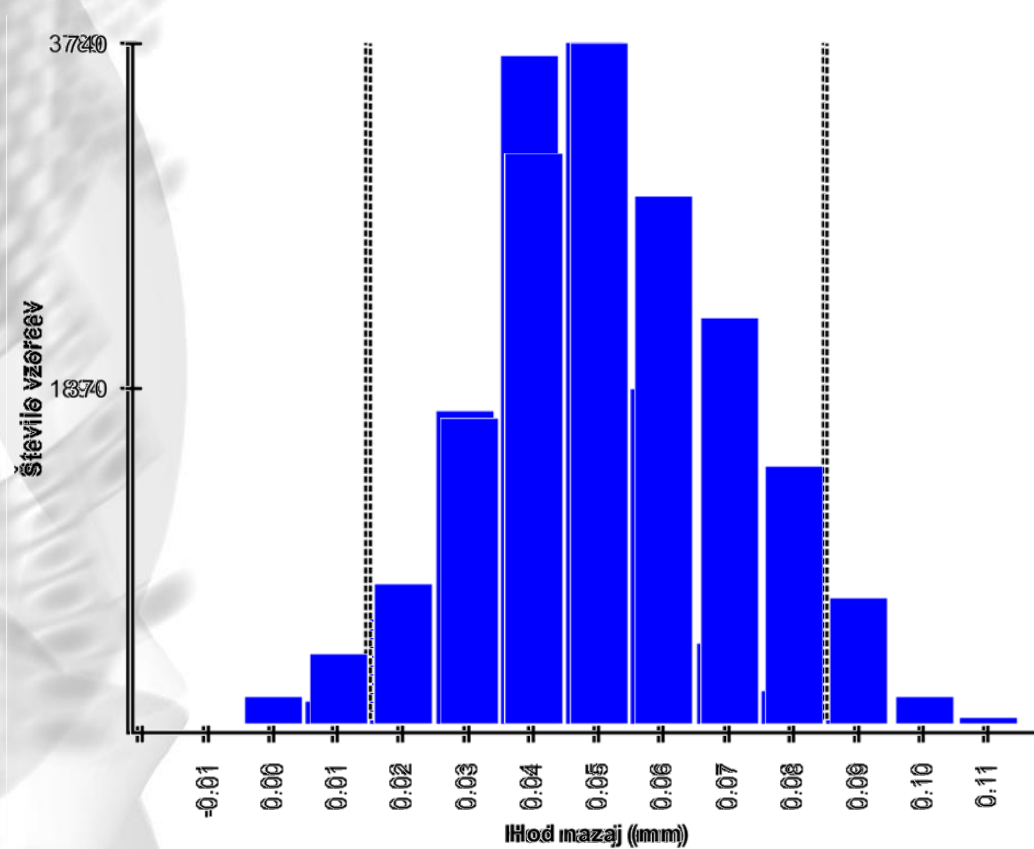
časovno obdobje:
01.11.2007 do
04.02.2008

število vzorcev: **6799**



Rezultati– Primer B

Hod nazaj – končna kontrola – tip 715-697:



**Z grupiranjem membran,
z nadzorom polnjenja in
polnjenje izven glave**

časovno obdobje:
04.02.2008 do
23.05.2008

število vzorcev: **3514**



Zaključki

Primer A:

- projekt robotiziranega raziglenja rešetk je zaključen in zaradi poslovnih razlogov ni bil implementiran,
- možna uporaba v drugih industrijskih projektih,
- izbira kvadra kot objekta za določanje meje pogreška sistema, zaradi ostrih robov, ni ustrezna.
- **primerjava kontaktnih in brezkontaktnih meritev ter rezultati robotskega brušenja (čiščenja) rešetk so bili zelo dobri.**

Primer B:

- sistem je v delovanju eno leto in deluje brez težav na vseh polnilnih napravah,
- zmanjšal se je izmet diastatov ter zmanjšal obseg kontrole hodov diastatov,
- omogočen je bil prehod polnjenja nekaterih diastatov iz ročnega polnjenja na bolj ekonomično polnjenje na rotirajočih napravah,
- regulacija polnilnega tlaka je omogočila prehod na polnjenje nekaterih tipov diastatov na način izven glave, kar se odraža pri prihranku materiala in manjšemu izmetu termostatov na justiranju ter posledično manjšemu obsegu popravil,
- **skupni letni prihranek na račun vpeljave sistema je vsaj 1 33.000,00 €,**
- trenutno se merijo raztezki membran s keramičnim gumbom, vendar so v proizvodnji tudi take z reflektivno kovinsko ploščico, ki pa trenutnemu merilniku predstavljajo težavo, saj je odboj zrcalen in ne difuzen.



Izvirni prispevki

- **Razvoj metodologije merjenja in umerjanje sistema za brezkontaktno dimenzijsko merjenje izdelkov iz sive litine z robotom in laserskim triangulacijskim merilnikom razdalje.**
- **Hitra izvedba brezkontaktnih dimenzijskih meritev rešetke** iz sive litine z robotom in laserskim triangulacijskim merilnikom razdalje.
- **Razvoj metodologije merjenja raztezka membrane** v fazi polnjenja diastata s polnilnim oljem.
- **Razvoj točnega merilnega sistema za merjenje raztezka membrane** v fazi polnjenja diastata s polnilnim oljem v mikrometrskem območju.
- **Uporaba polinomov višjih stopenj pri aproksimaciji robov merjenih objektov in kompenzaciji nelinearnosti merilnikov oddaljenosti.**



Hvala za pozornost!