

Zagovor doktorske disertacije

RAZISKAVA VPLIVA MANIPULACIJE Z ROBOTOM NA NEGOTOVOST MERITEV DIMENZIJ IZDELKOV

Aleš Zore

Mentor: prof. dr. Marko Munih

Ljubljana, 23. 9. 2024

Vsebina

1. Uvod.
2. Raziskovalna vprašanja in cilji.
3. Eksperimentalni sistem.
4. Kompleksnost manipulacije z robotom.
5. Parametri trajektorije gibanja vrha robota.
6. Prijemanje z robotom.
7. Izvirni prispevki doktorske disertacije.

1. Uvod

Uvod

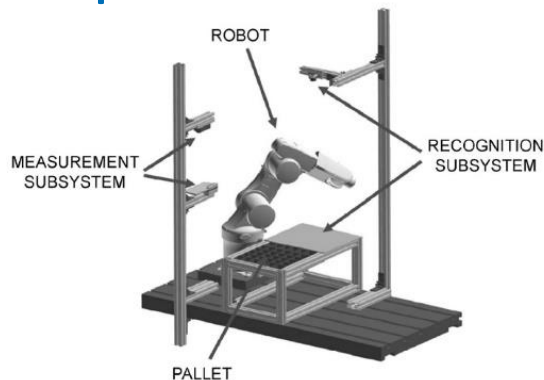
- **Vedno večje zahteve** po kakovosti narekujejo **stalen razvoj** proizvodnega procesa.
- **Robot** v osnovi zagotavlja točne in natančne gibe → nadomesti operaterja/človeka → **postane del merilnega sistema**.
- **Robotizacija** proizvodnih meritev **je mogoča in se že izvaja**, toda nobena izmed raziskav ne navaja vpliva manipulacije z robotom na procesne meritve.

Procesne/proizvodne meritve

- Statistična procesna kontrola (SPC) – metoda vodenja, ki temelji na uporabi statistike za vodenje celotnega procesa.
- Sposobnost **zgodnje zaznave in odprave** nepravilnosti.
- Groba razdelitev kriterijev zmogljivosti/sposobnosti procesov:
 - Primerjava predvidenega tolerančnega območja z variabilnostjo merilnega sistema.
 - Ujemanje variabilnosti procesa z variabilnostjo merilnega sistema.

Nadzor kakovosti in robotika

- Dvostopenjski nadzor kakovosti in vodenja procesa. Robotizacija procesnih meritev **skrajša čas procesa meritev** in bistveno poveča zanesljivost.
- Robot uporabljen kot **manipulator objektov ali kot nosilec opreme.**



G. Rosati, G. Boschetti, A. Biondi, A. Rossi, "On-line dimensional measurement of small components on the eyeglasses assembly line," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 47, pp. 320-328, 2009.

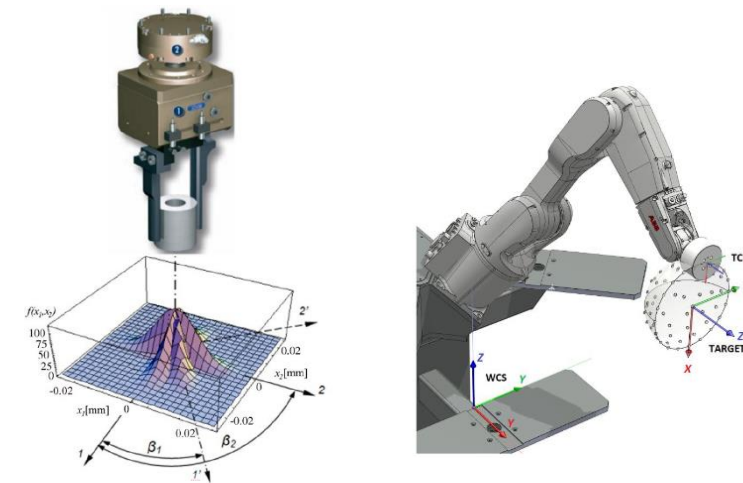
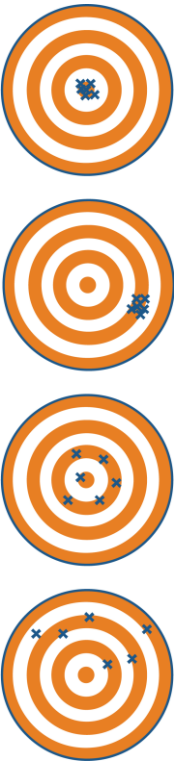
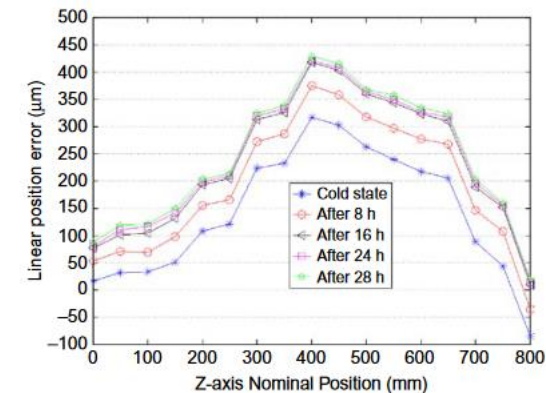
Moschos Papananias, Simon Fletcher, S. Lemes, M. Cabaravdic, N. Zaimovic-Uzunovic, "Robotic manipulation in dimensional measurement," in 2013 XXIV International Conference on Information, Communication and Automation Technologies (ICAT), 2013.

Armagan Altinisik, Emre Bolova, "A comparison of off-line laser scanning measurement capability with coordinate measuring machines," *Measurement*, vol. 168, 2021.

Ercihan Kiraci, Pasquale Franciosa, Glen A. Turley, Alan Olifent, Alex Attridge, Mark A. Williams, "Moving towards in-line metrology: Evaluation of laser system or in-line dimensional inspection for automotive assembly systems," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 91, pp. 69-78, 2017.

Omejitve robotov

- Vedno meriti enako in na enak način.
- Točnost in natančnost robotov:
 - Vibracije robota.
 - Vpliv hitrosti.
 - Obremenitev vrha robota.
 - Lokacija vrha robota znotraj delovnega prostora
 - Ostali kinematični vplivi.
- Precizno **prijemanje**.



O. Felix Offodile, Kingsley Ugwu, "Evaluating the effect of speed and payload on robot repeatability," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 8, no. 1, 1991.

J. Brink, B. Hinds, A. Haney, "Robotics repeatability and accuracy: Another approach," *Texas Journal of Science*, vol. 56, pp. 149-156, 2004.

Sirinterlikci, Murat Tiryakioğlu, Adam Bird, Amee Harris, Kevin Kweder, "Repeatability and Accuracy of an Industrial Robot: Laboratory Experience for a Design of Experiments Course," *Technology Interface Journal*, vol. 9, 2009.

M. Vocetka, R. Huňady, M. Hagara, Z. Bobovský, T. Kot, V. Kryš, "Influence of the approach direction on the repeatability of an industrial robot," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, pp. 1-24, 2020.

2. Raziskovalna vprašanja in cilji

Raziskovalno vprašanje 1

- **Vprašanje:** Ali ima manipulacija z robotom **vpliv na dimenzijske meritve**?
- **Cilj:** Pokazati, da se **večja kompleksnost manipulacije** (večje število operacij manipulacije) objekta z robotom preslika v **večjo negotovost meritev** dimenzij.

Raziskovalno vprašanje 2

- **Vprašanje:** Kateri **parametri trajektorije vrha robota** vplivajo na kontaktne dimenzijske meritve?
- **Cilj:** Z variacijo posameznih vplivnih parametrov (hitrost, dolžina in način robotskega giba ter število aktivnih sklepov) **iskati odstopanje v negotovosti meritev**, posledično v legi vstavljenega objekta.

Raziskovalno vprašanje 3

- **Vprašanje:** Kateri so **vplivni parametri preciznega prijemanja** z robotskim prijemalom?
- **Cilj:** **Zaznavanje spremembe orientacije objekta** pri različnih parametrih prijemanja (prijemanje ter izpust in zaporedje operacij manipulacije – kompleksnost prijema).

3. Eksperimentalni sistem

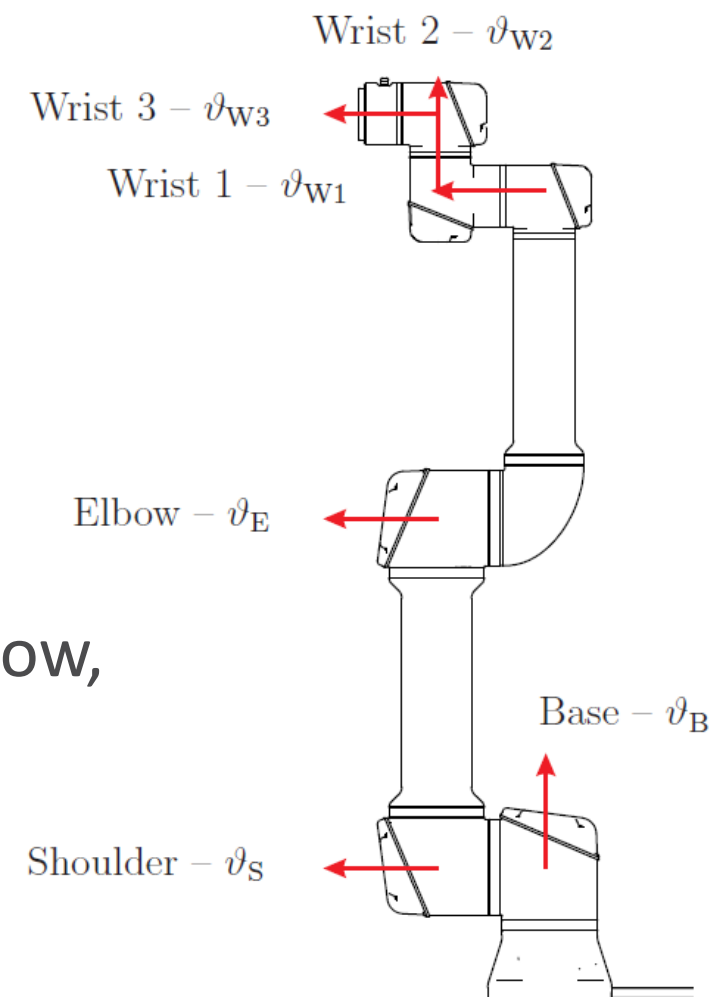
Adaptivna robotska celica - ARC

- Namenjena statistični procesni kontroli.
- Dimenzijske meritve izvedene **samodejno**, brez posredovanja operaterja → **izničen vpliv operaterja!**
- Razvita v Laboratoriju za robotiko UL FE v sodelovanju skupaj s podjetjem KOLEKTOR v okviru projekta GOSTOP (Gradniki, orodja in sistemi za tovarne prihodnosti).
- Modularna zasnova – mehansko in programsko.



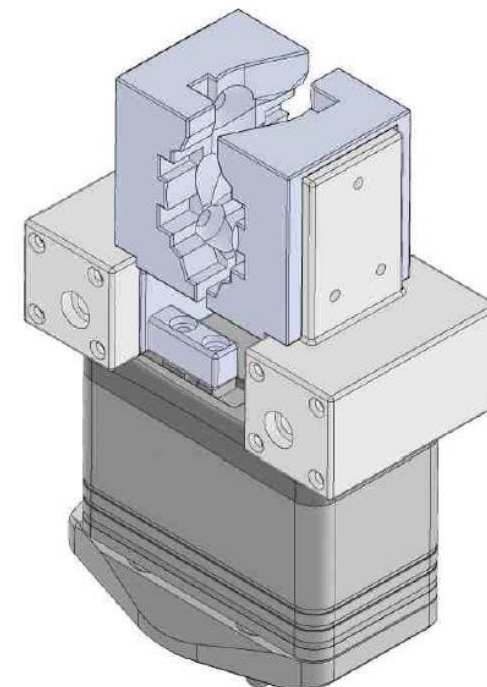
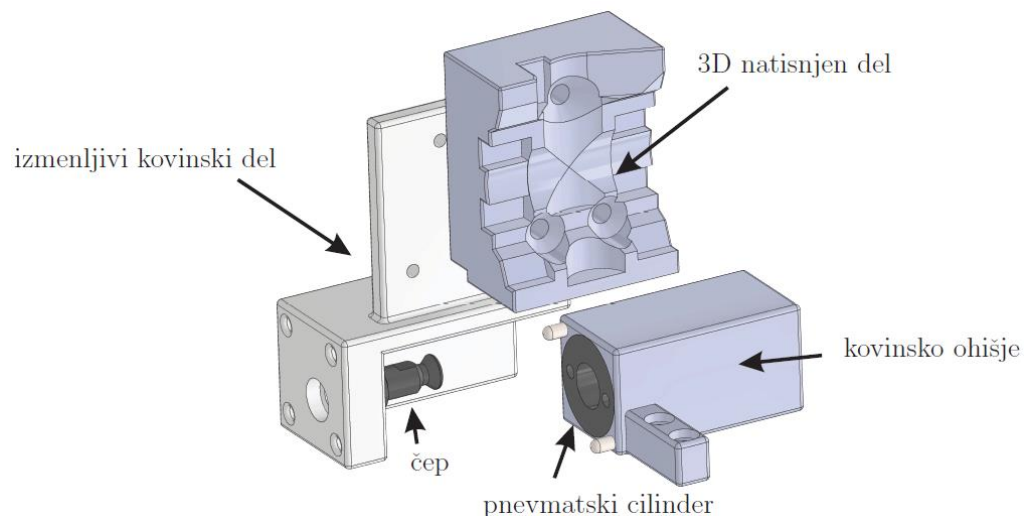
Sodelujoči robot UR5e

- 6-osni robot antropomorfne konfiguracije.
- $\pm 360^\circ$ rotacije v sklepih.
- Maksimalna obremenitev: 5 kg.
- Maksimalni doseg: 850 mm.
- Vgrajen senzor sile in navorov.
- Poimenovanje sklepov: B-Base, S-Shoulder, E-Elbow, W1-Wrist 1, W2-Wrist 2 in W3-Wrist 3.



Sodelujoče prijemalo Weiss CRG 30-050

- 30 N maksimalne sile prijema.
- 50 mm pomika med prstoma.
- IO-Link komunikacija z robotom.
- Sistem izmenljivih prstov.



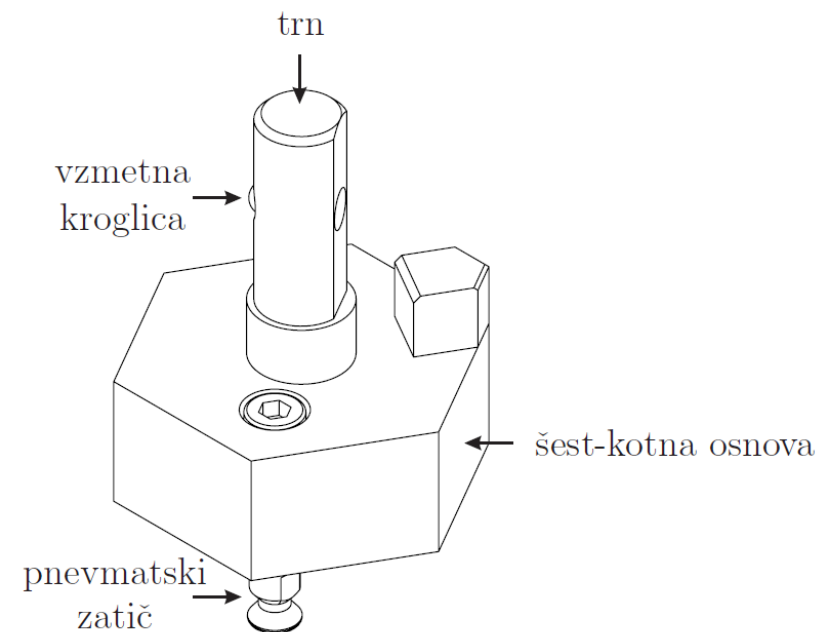
Primerjalni merilnik Renishaw Equator - PME

- Robot paralelne konfiguracije in temelji na poenostavljeni osnovi KMS.
- Ovrednotena merilna negotovost ponovljivosti $\pm 0,002$ mm in ločljivost $\pm 0,0002$ mm.
- 1000 točk/s v načinu skeniranja.
- **Ni absolutni merilnik dimenzij!**
- Primerjalni način delovanja:
 1. Procedura umerjanja (re-master).
 2. Kontaktno merjenje.
- Ne potrebuje temperaturno stabilne komore.



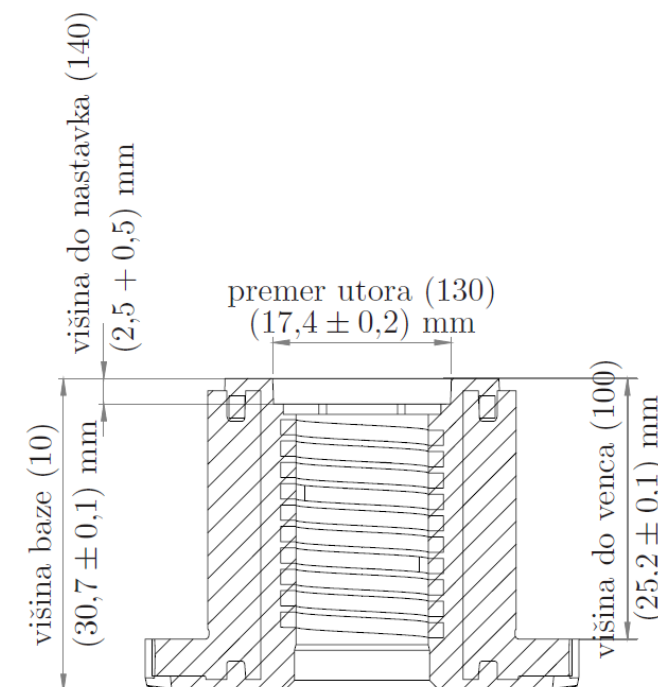
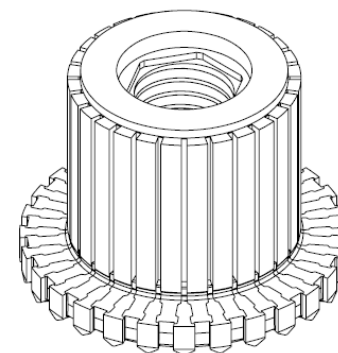
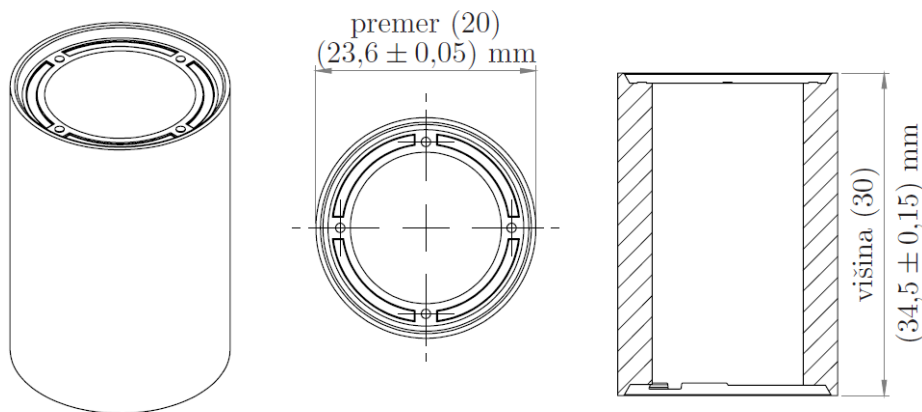
Vpenjalna naprava - ležišče

- Specialna pasivna mehanska vpenjala.
- Trn se z zunanjim premerom prilega notranjemu premeru merilnega objekta.
- Togo vpeto s pomočjo pnevmatskega cilindra in zatiča.



Merilna objekta

- Dva geometrijsko in dimenzijsko različna tipa serijskih produktov:
 1. Magnet → dve geometrijski karakteristiki
 2. Komutator PKR → štiri geometrijske karakteristike
- 6 geometrijskih karakteristik:
 - Dve karakteristiki premerov.
 - Štiri dolžinske karakteristike (višina oziroma globina).



Statistične metode

- Analiza merilnega sistema (MSA) procedura 1 – **sposobnost merila**.
- Uporaba kalibriranega merilnega vzorca (etalon), ki mora biti pomejen najmanj 25-krat.
- Iz izmerjenih vrednosti se izračuna **odklon** $(\bar{x} - x_e)$ od referenčne vrednosti in **standardni odklon** σ .
- Zaradi omejenega števila meritev se uporablja eksperimentalni standardni odklon $s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$
- Parameter sposobnosti $C_g = \frac{0,2 T}{6 s}$

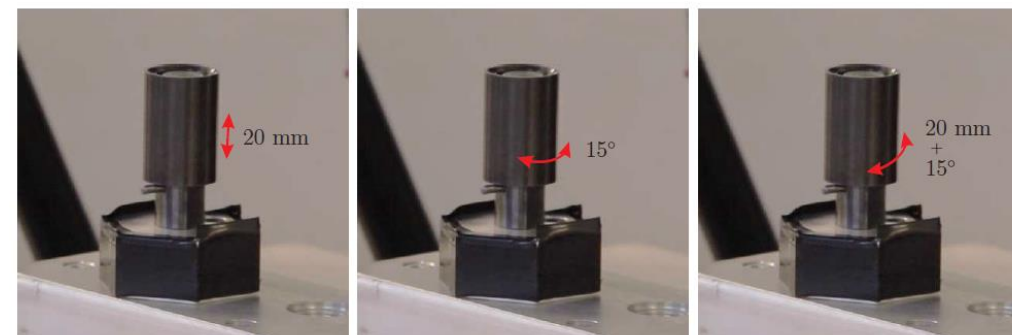
4. Kompleksnost manipulacije z robotom

Vpliv manipulacije z robotom

- Tri ključna vprašanja:
 1. Ali ima manipulacija z robotom **vpliv** na dimenzijske meritve?
 2. Ali se negotovost meritev (variabilnost meritev) **spreminja** pri različni kompleksnosti robotove manipulacije?
 3. Katere so **kritične operacije manipulacije** z robotom?
- Vpliv manipulacije z robotom izražen skozi različne negotovosti dimenzijskih meritev.
- **9 scenarijev** manipulacije. Izhodišče predstavlja scenarij brez robotove manipulacije.
- Cilj je pokazati, da se **večja kompleksnost manipulacije** merjenja z robotom preslika v **večjo negotovost meritev dimenzij**.

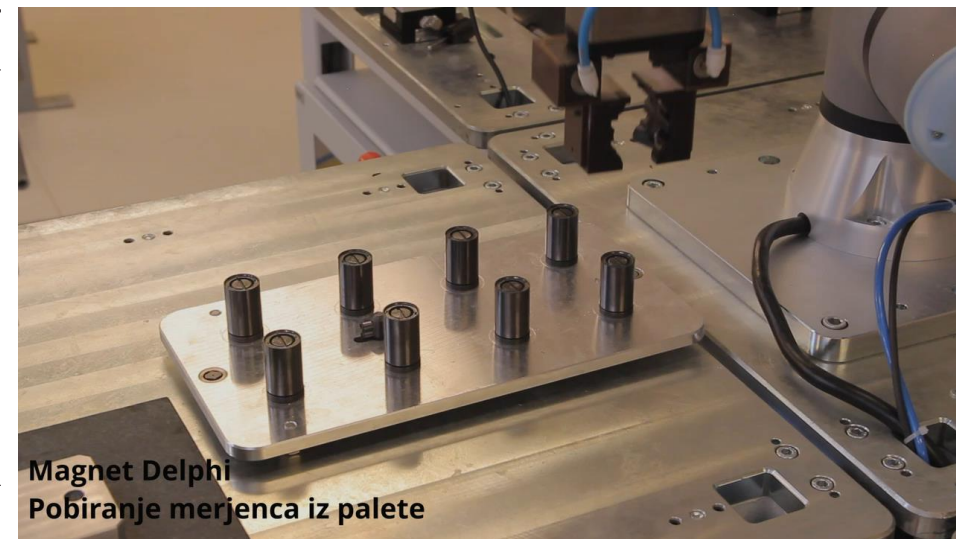
Eksperimentalni scenariji

Scenarij manipulacije	Kratek opis scenarija
Scenarij 1	Brez robotske manipulacije.
Scenarij 2	Prijem in spust.
Scenarij 3	Prijem in translacija.
Scenarij 4	Prijem in rotacija.
Scenarij 5	Prijem, rotacija in translacija.
Scenarij 6	Prijem, translacija in izpust.
Scenarij 7	Izpenjanje.
Scenarij 8	Preprijemanje.
Scenarij 9	Celoten avtomatiziran merilni cikel.



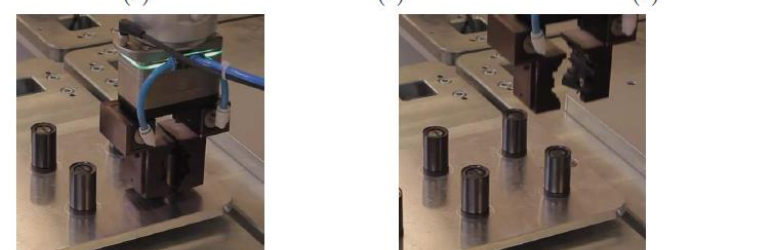
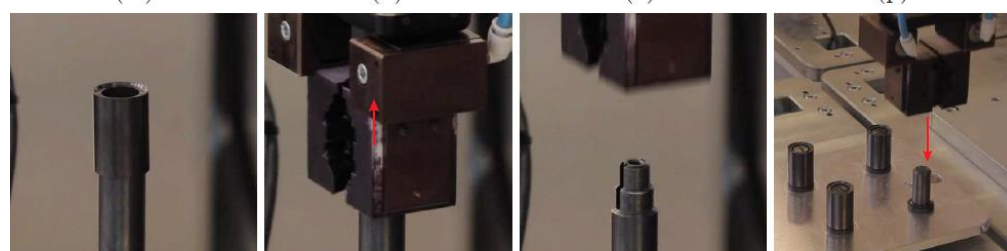
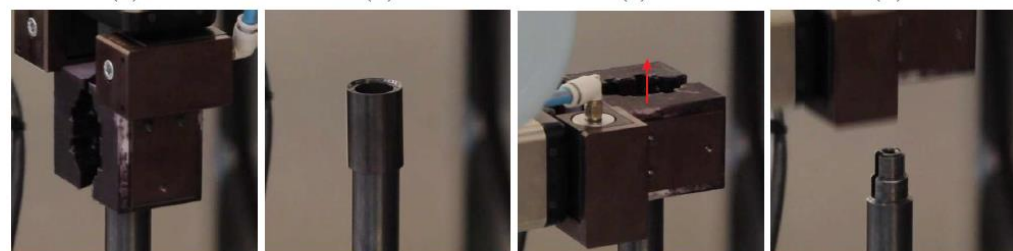
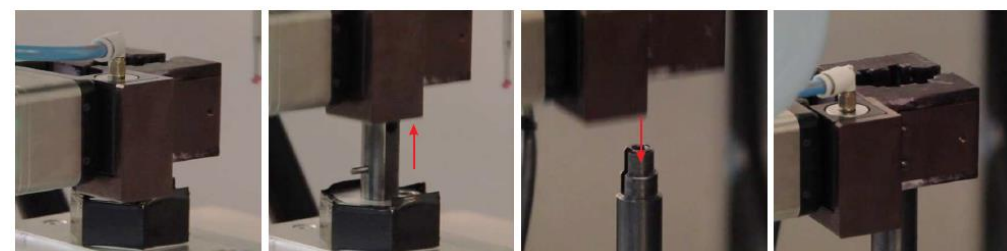
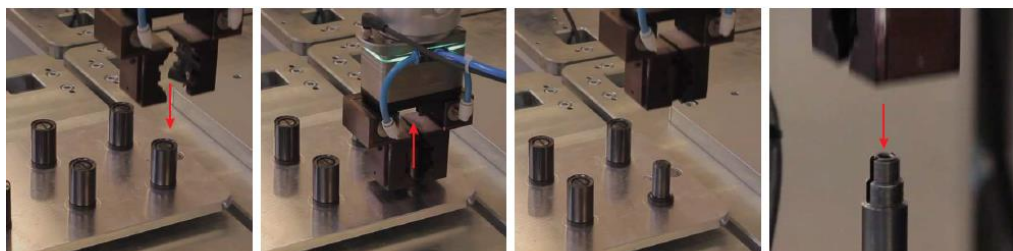
Operacije manipulacije	Način giba	V scenariju	a	v
Približevanju objektu v ležišču PME	linearen	2, 6-9	$0,5 \text{ m/s}^2$	$0,5 \text{ m/s}$
Odmikanje od objekta v ležišču PME	linearen	2, 6-9	$0,5 \text{ m/s}^2$	$0,5 \text{ m/s}$
Vstavljanje objekta	linearen	3-9	$0,5 \text{ m/s}^2$	$0,5 \text{ m/s}$
Odstranjevanje objekta	linearen	3-9	$0,5 \text{ m/s}^2$	$0,5 \text{ m/s}$
Preprijem (V v H in H v V)	po sklepih	8-9	$2,5 \text{ rad/s}^2$	$1,5 \text{ rad/s}$
Lega za preprijem do roba delovnega območja PME (in v obratno smer)	po sklepih	8-9	$5,0 \text{ rad/s}^2$	$3,0 \text{ rad/s}$
Pobiranje in odlaganje v paleti	linearen	9	$0,5 \text{ m/s}^2$	$0,5 \text{ m/s}$
Od palete do lege za preprijem (in v obratno smer)	po sklepih	9	$5,0 \text{ m/s}^2$	$3,0 \text{ m/s}$

V–vertikalna orientacija, H–horizontalna orientacija



Magnet Delphi
Pobiranje merjenca iz palete

Operacije manipulacije z robotom



(i)

(j)

(k)

(l)

(u)

(v)

Načini dimenzijskih meritev in merilni cikel

- Magnet:
 - Diskretno dotikanje **TTM** (touch triggering metoda).
 - Način skeniranja **SM** (scanning mode).
 - Način skeniranja z zgoščenim vzorčenjem **SM+**.
- PKR:
 - Hibridni način **TTM+SM**.
- **25 ponovitev** robotske manipulacije (odvisno od scenarija) in dimenzijskih meritev.
- Skupek 25 meritev \rightarrow MSA procedura 1 $\rightarrow C_g, R, \sigma$

Statistična porazdelitev

- Uporaba indeksa C_g pogojuje normalno porazdelitev meritev.
- Anderson-Darling preizkus normalnosti porazdelitve rezultatov dimenzijskih meritev s 95 % stopnjo zaupanja.
- Metoda ovrže hipotezo normalne porazdelitve, v kolikor $p < p_{min} = 0,05$.
- Preizkus za scenarija 1 in 9.

Objekt	Karakteristika	Scenarij	p -vrednost
Magnet	20	1	0,910
		9	0,518
	30	1	0,754
		9	0,441
PKR	10	1	0,743
		9	0,639
	100	1	0,226
		9	0,086
	130	1	0,588
		9	0,678
	140	1	0,968
		9	0,717

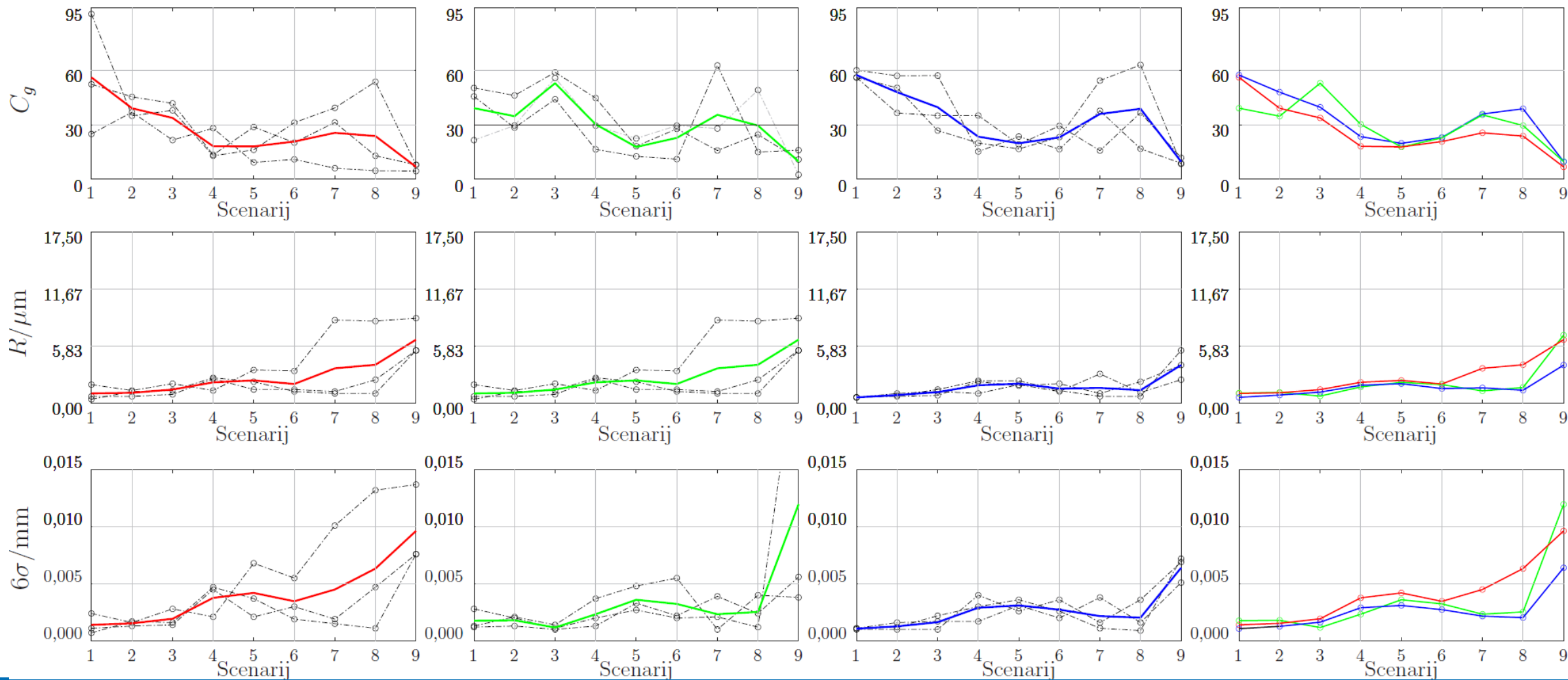
Rezultati MSA procedure 1, višina magneta (30)

Metoda TTM

Metoda SM

Metoda SM+

Povprečje



Ugotovitve

- Posredovanja robotske manipulacije **imajo vpliv** na raztros dimenzijskih meritev.
- **Različni posegi** robota imajo različne vplive.
- Vpliv manipulacije z robotom **bolj opazen v primeru merjenja dolžin**.
- Pri merjenju premerov vpliv ni tako izrazit.
- Različne merilne metode PME nimajo vpliva.

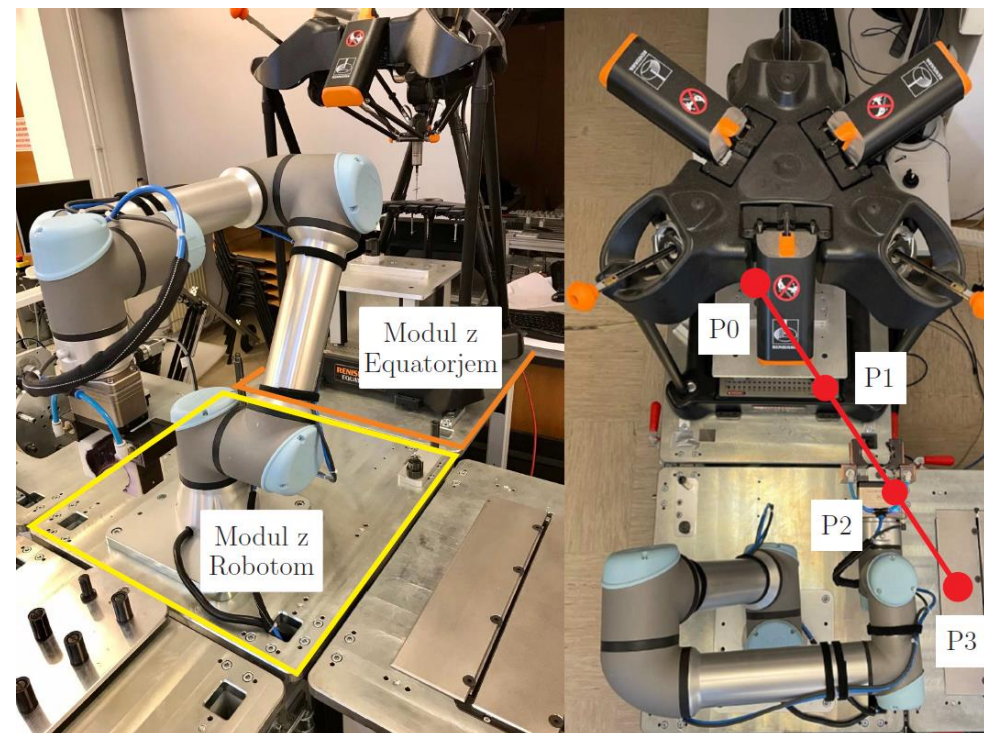
5. Parametri trajektorije gibanja vrha robota

Trajektorija vrha robota

- Specializirana raziskava ozkogledno obravnava specifično vpliv trajektorije vrha robota na **raztros dimenzijskih meritev**.
- Primerjava **linearne giba** vrha robota z **gibom po sklepih** robota.
- Primerjava gibov z **različnimi aktivnimi sklepi** robota.
- **Opazovanje spremembe variabilnosti meritev** dimenzij.

Navidezna daljica

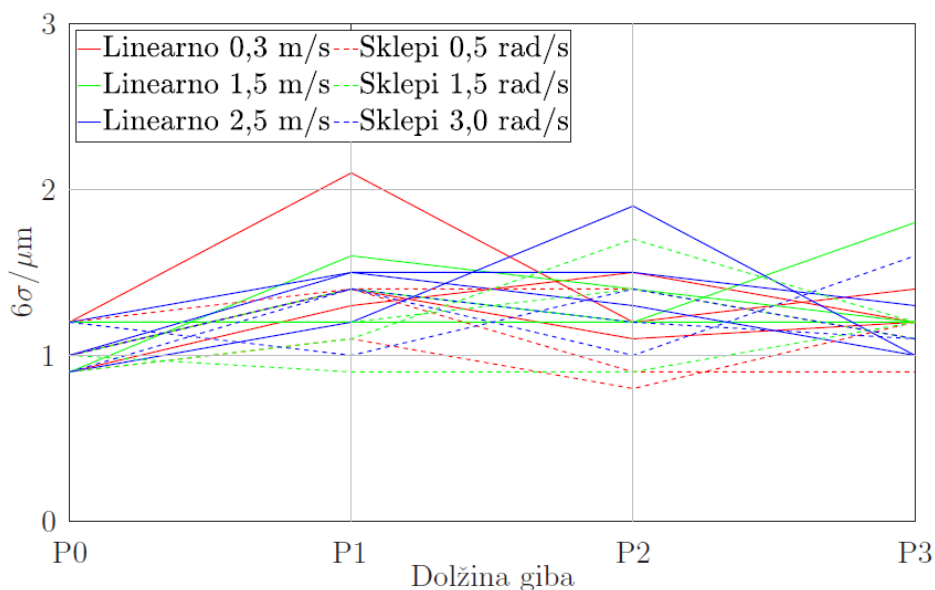
- Daljica definirana vzporedno z XY ravnino baznega KS robota.
- Točke P0, P1, P2 in P3 definirane tako, da je robot sposoben izvesti linearne gibe in gibe po sklepih.



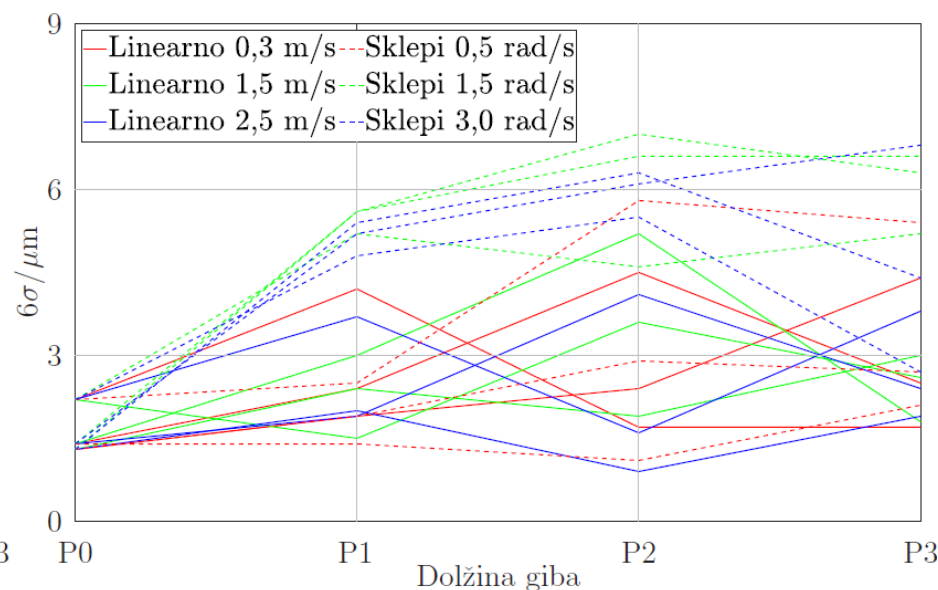
Primerjava: Linearen gib in gib po sklepih

- Pozornost tudi na **vplivu hitrosti in dolžini** robotskega giba.
- Cikel se ponovi **26-krat**: 1x re-master PME + 25 zaporednih ponovitev manipulacije in meritev.
- Linearne hitrosti: 0,3 m/s, 1,5 m/s, 2,5 m/s.
- Hitrosti sklepov: 0,5 rad/s, 1,5 rad/s, 3,0 rad/s.

Linearen gib in gib po sklepih - magnet



(a) Magnet karakteristika 20

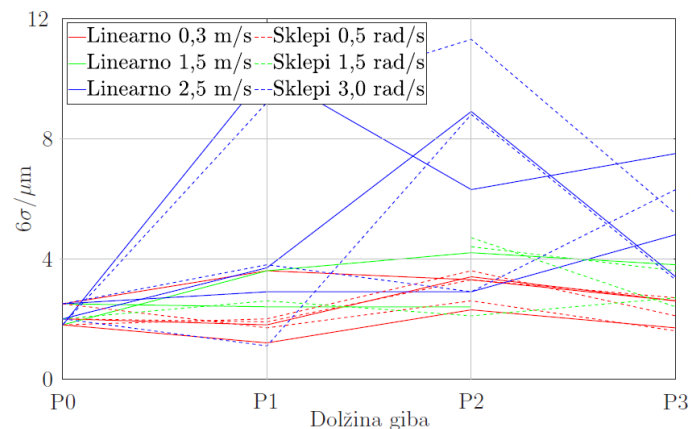


(b) Magnet karakteristika 30

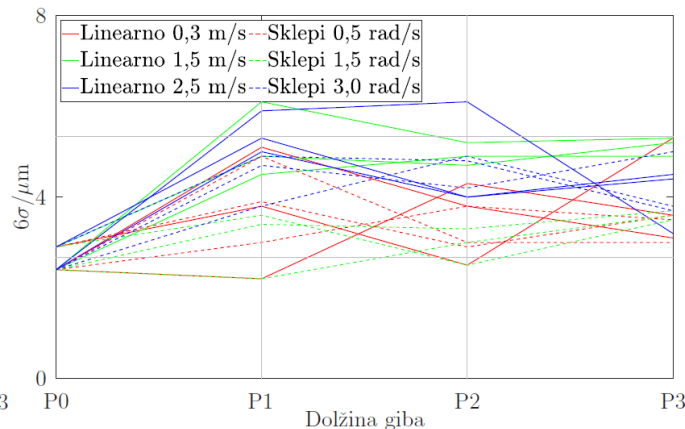
Izračuni ANOVA

Vir	F -vrednost (p -vrednost)	
	20	30
Gib	5.97 (0.018)	28.38 (0.000)
Hitrost	0.13 (0.876)	5.51 (0.007)
Dolžina	6.11 (0.001)	14.72 (0.000)
Gib × Hitrost	0.30 (0.746)	7.08 (0.002)
Gib × Dolžina	1.07 (0.370)	3.36 (0.025)
Hitrost × Dolžina	1.11 (0.367)	0.83 (0.553)

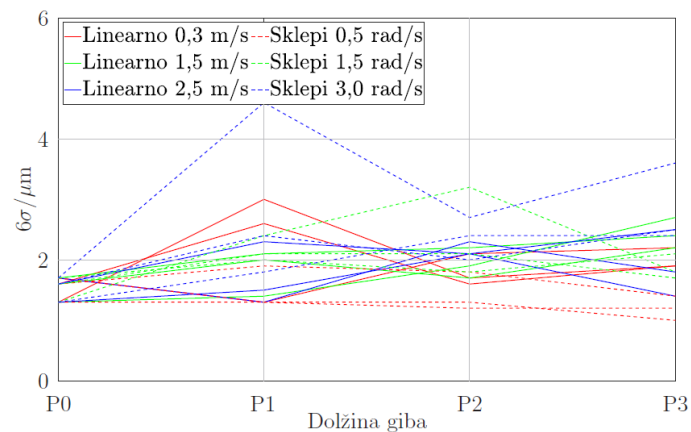
Linearen gib in gib po sklepih - PKR



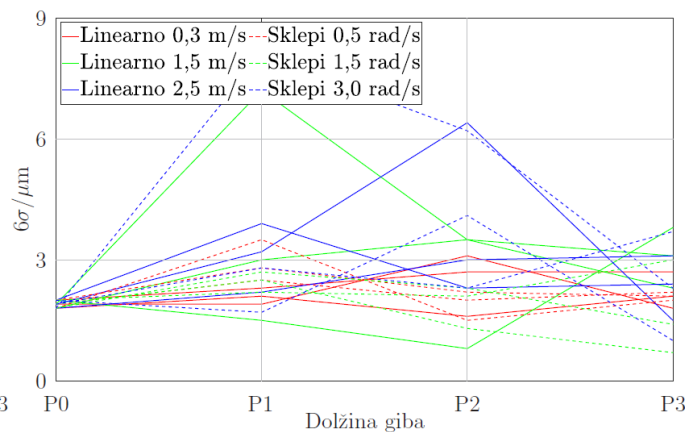
(a) PKR karakteristika 10



(b) PKR karakteristika 100



(c) PKR karakteristika 130



(d) PKR karakteristika 140

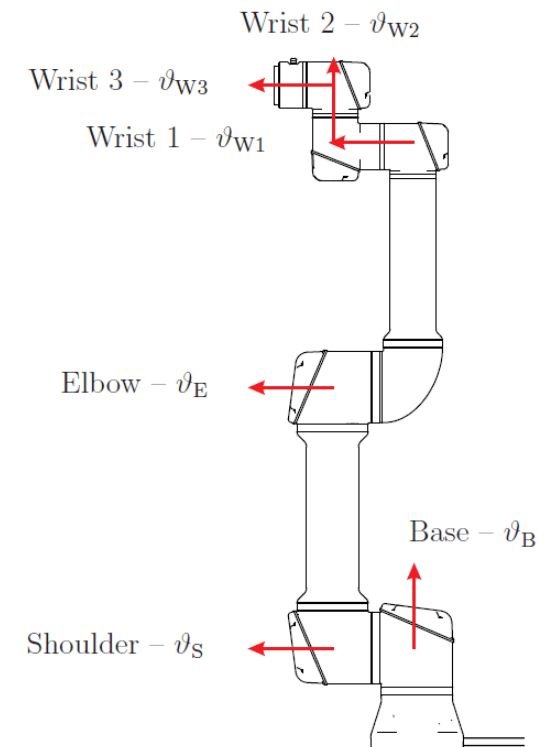
Izračuni ANOVA

Vir	<i>F</i> -vrednost (<i>p</i> -vrednost)			
	10	100	130	140
Gib	0.03 (0.866)	13.86 (0.000)	0.17 (0.679)	0.32 (0.577)
Hitrost	15.53 (0.000)	6.38 (0.003)	4.97 (0.010)	2.69 (0.077)
Dolžina	5.71 (0.002)	23.58 (0.000)	4.49 (0.007)	3.59 (0.019)
Gib × Hitrost	0.07 (0.934)	6.29 (0.003)	6.76 (0.002)	1.64 (0.203)
Gib × Dolžina	0.43 (0.734)	1.65 (0.190)	0.48 (0.695)	0.27 (0.847)
Hitrost × Dolžina	1.57 (0.175)	1.58 (0.170)	0.83 (0.555)	1.07 (0.391)

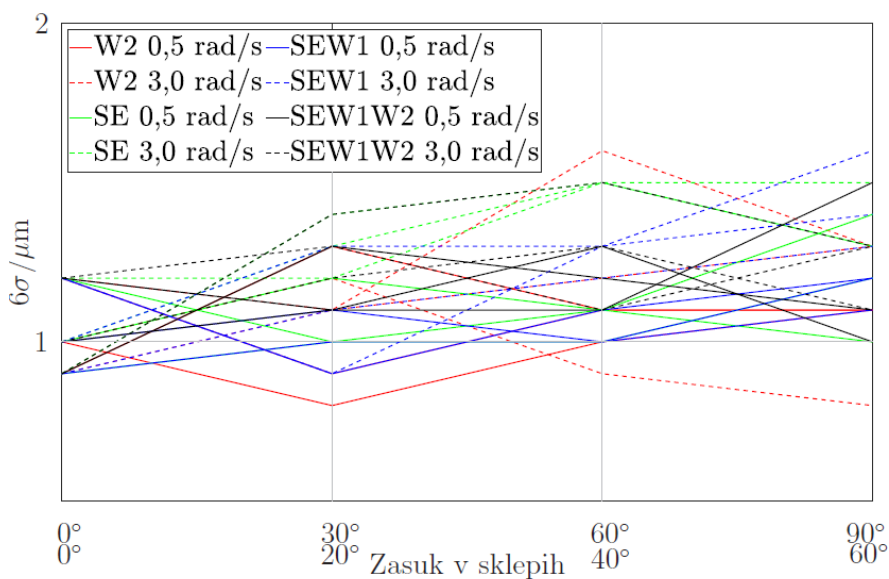
Kombinacija sklepov

- Variabilnost dimenzijskih meritev zaradi **različnega števila aktivnih sklepov** robota potrebnih za izvedbo giba.
- Hitrosti gibanja sklepov: 0,5 rad/s, 3,0 rad/s.

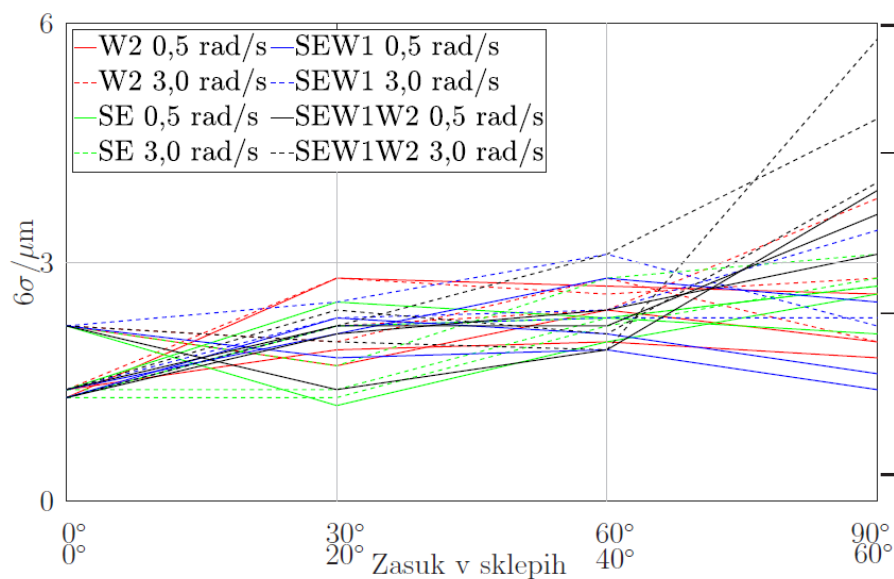
Kombinacija sklepov	B	S	E	W1	W2	W3	$\Delta\varphi$
W2					✓		30°
SE		✓	✓				20°
SEW1		✓	✓	✓			20°
SEW1W2		✓	✓	✓	✓		20°



Število aktivnih sklepov - magnet



(a) Magnet karakteristika 20

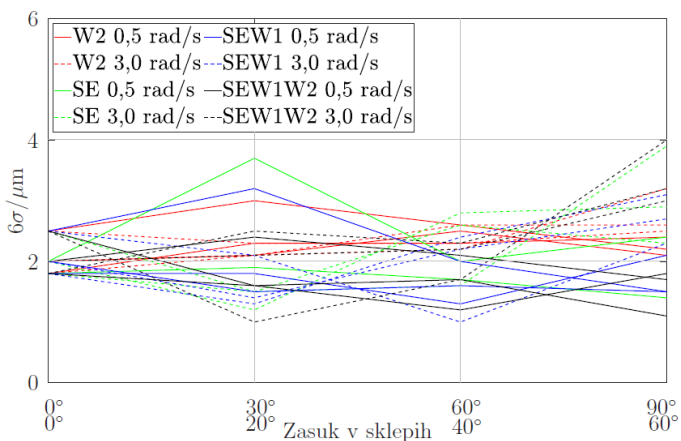


(b) Magnet karakteristika 30

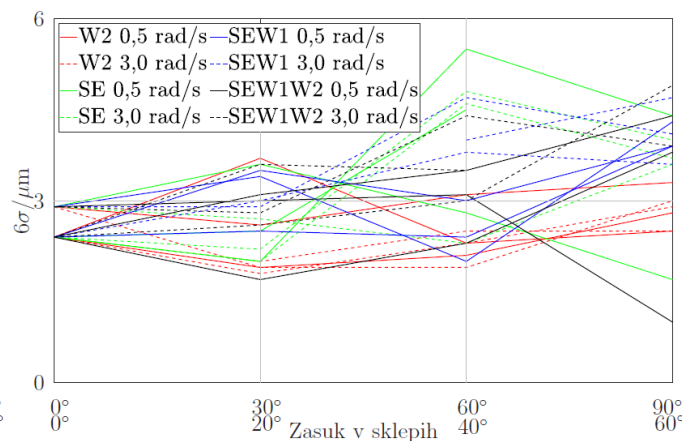
Izračuni ANOVA

Vir	<i>F</i> -vrednost (<i>p</i> -vrednost)	
	20	30
Kombinacija	2.41 (0.074)	4.79 (0.004)
Hitrost	16.94 (0.000)	9.08 (0.004)
Zasuk	8.24 (0.000)	32.35 (0.000)
Kombinacija × Hitrost	1.11 (0.350)	0.92 (0.435)
Kombinacija × Zasuk	0.91 (0.520)	6.43 (0.000)
Hitrost × Zasuk	2.45 (0.071)	3.89 (0.012)

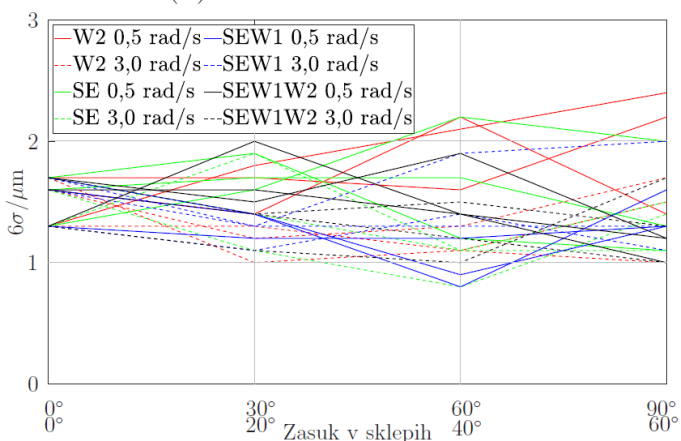
Število aktivnih sklepov - PKR



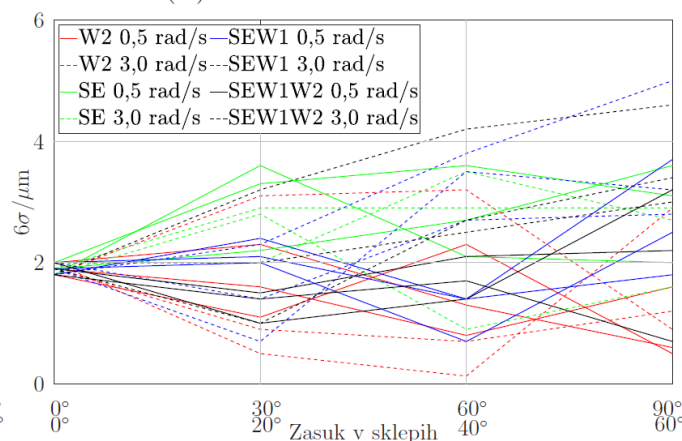
(a) PKR karakteristika 10



(b) PKR karakteristika 100



(c) PKR karakteristika 130



(d) PKR karakteristika 140

Izračuni ANOVA

Vir	<i>F</i> -vrednost (<i>p</i> -vrednost)			
	10	100	130	140
Kombinacija	2.34 (0.081)	5.17 (0.003)	1.61 (0.195)	6.49 (0.001)
Hitrost	4.42 (0.039)	1.45 (0.232)	9.67 (0.003)	4.40 (0.039)
Zasuk	3.30 (0.025)	9.90 (0.000)	0.98 (0.410)	2.67 (0.054)
Kombinacija × Hitrost	1.53 (0.214)	2.00 (0.122)	4.49 (0.006)	3.05 (0.034)
Kombinacija × Zasuk	0.52 (0.855)	1.76 (0.091)	1.18 (0.320)	1.97 (0.055)
Hitrost × Zasuk	12.22 (0.000)	1.24 (0.301)	1.67 (0.180)	2.18 (0.098)

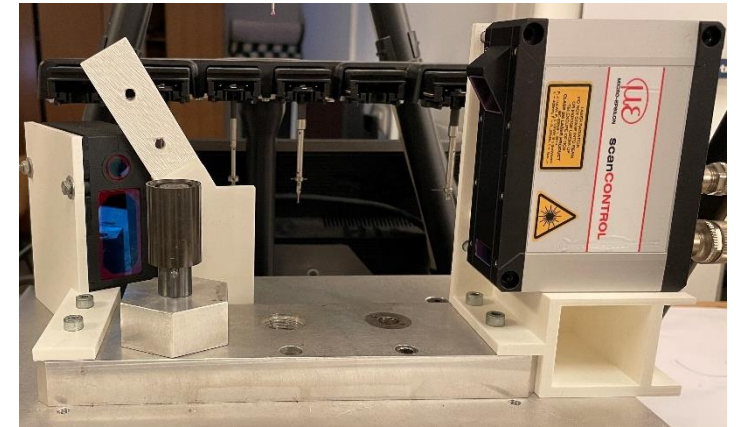
Ugotovitve

- Večji vpliv na meritve dolžin/višin.
- **Linearni gibi** vrha robota se odražajo v večji variabilnosti meritev dimenzij → **aktivnih več sklepov** za izvedbo giba.
- **Višja** ko je **hitrost**, **večja je variabilnost** meritev dimenzij.
- Daljši gibi/večji zasuki v sklepih se odražajo v **večji variabilnosti**.
- **Napake v točnosti in natančnosti robota**, ki so neločljivo povezane z vplivnimi parametri trajektorije gibanja vrha robota, neposredno **vplivajo na variabilnost** meritev dimenzij.

6. Prijemanje z robotom

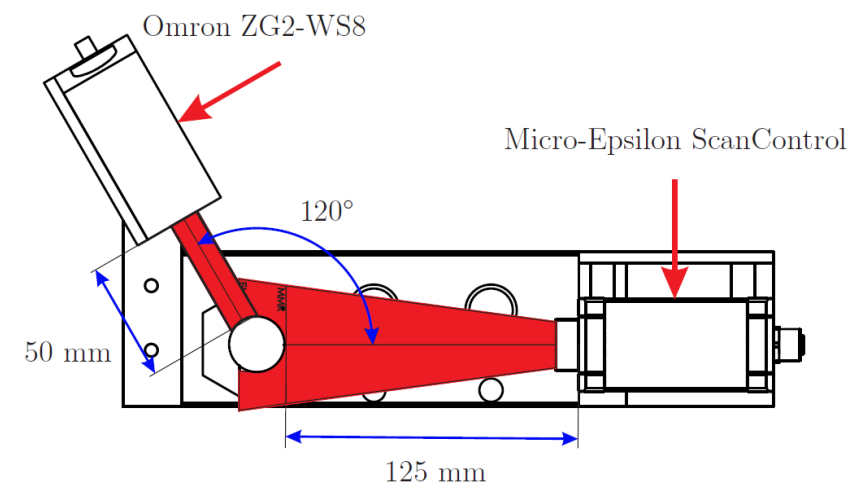
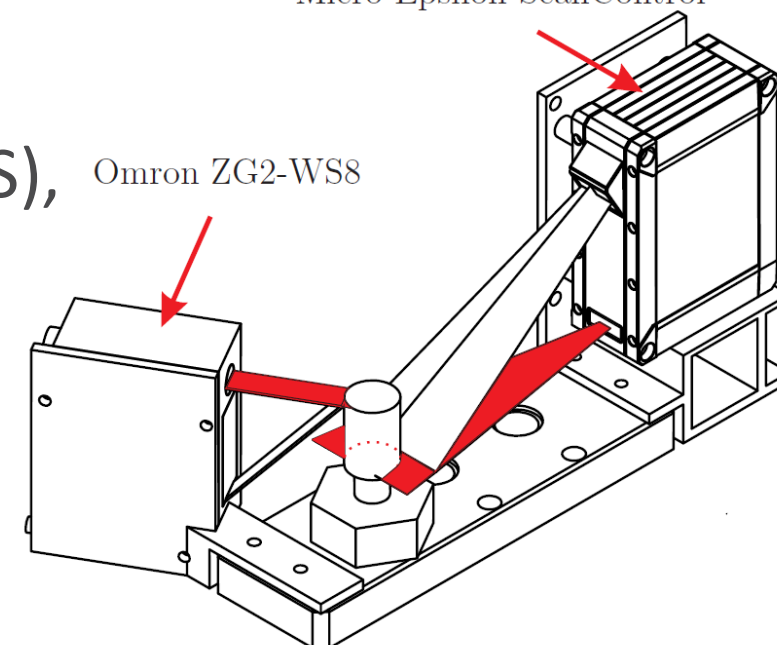
Precizno prijetanje

- Zadnji manjkajoči del manipulacije z robotom.
- Zaznavanje spremembe orientacije objekta v ležišču PME.
- Vpliv razdeljen na:
 1. Sile prijetanja → 3 (2) sili prijetanja.
 2. Kompleksnosti prijema → dve zaporedji operacij manipulacije.
- Uporabljena oprema:
 - Sodelujoči robot UR5e.
 - Prijemalo Weiss Robotics CRG 30-050.
 - PME.
 - Optični merilni sistem.



Merilni sistem

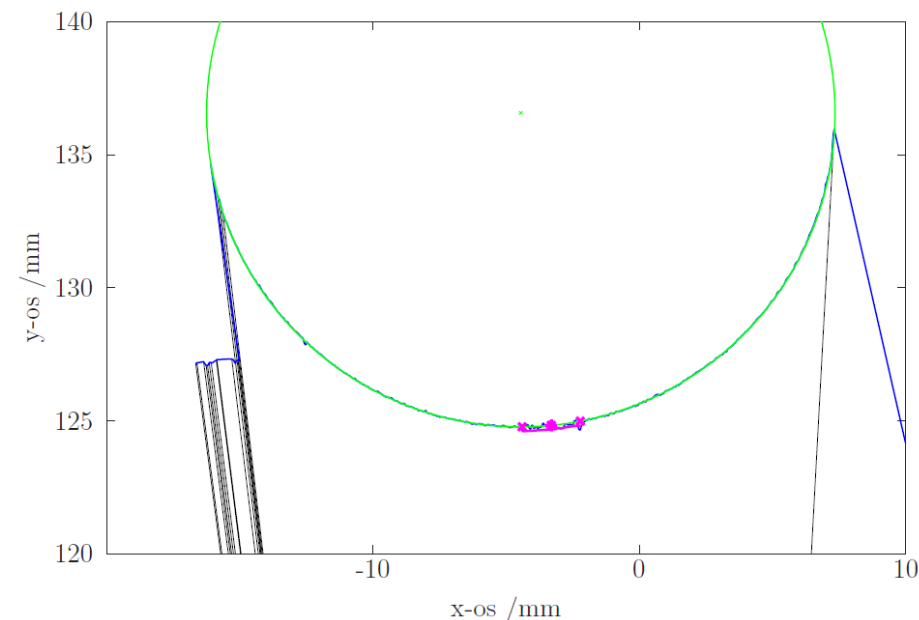
- Dva linijska triangulacijska laserska senzorja (LLS), Omron ZG2-WS8 in Micro-Epsilon ScanControl 3000-50/BL.
- Podatki v obliki **linijskega profila**.
- Iz poznane premera objekta in na podlagi krožnega loka iz profila lahko **aproksimiramo krožnico**.
- Dve krožnici na različnih višinah posledično definirata **valj** (privzeta soosnost objekta).



Zaznavanje zasukov

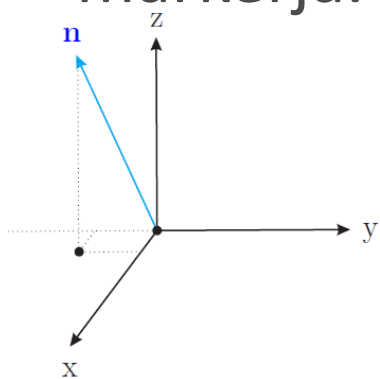
- 2 LLS merilnika → 2 profila meritev v ločenih (lokalnih) KS → medsebojna kalibracija.
- Aproksimacija krožnice na profil LLS → minimizacija funkcije napake po **metodi najmanjših kvadratov**.

$$E(x_c, y_c, r) = \sum_{i=1}^n \left| \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2} - r \right|$$

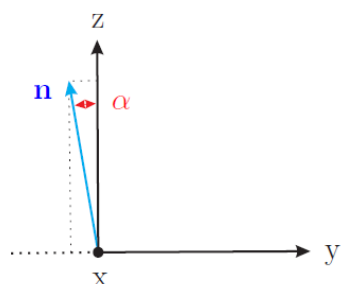


Zasuki α , β in γ

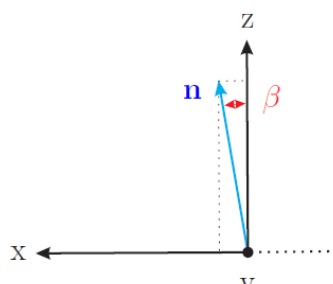
- Daljica, ki povezuje obe središči krožnic (iz profilov LLS) \rightarrow glavna os n .
- α predstavlja zasuk okoli **osi-x**.
- β predstavlja zasuk okoli **osi-y**.
- γ predstavlja zasuk okoli **osi-z**. Daljica m od središča krožnice do markerja.



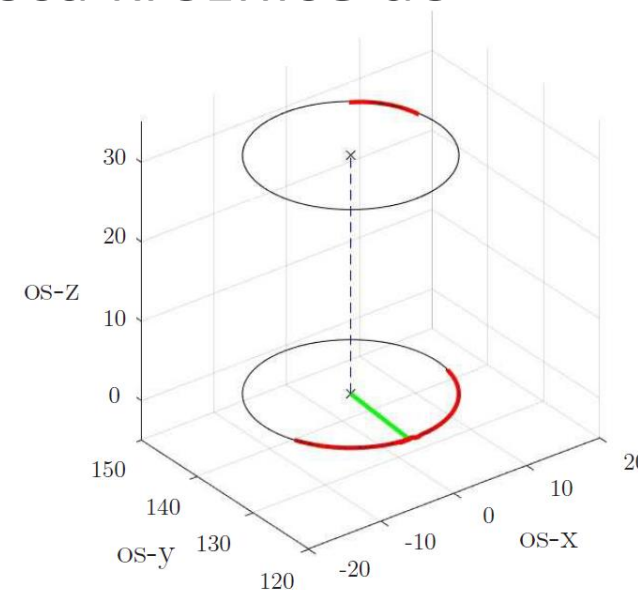
(a) Os valja n



(b) Zasuk α



(c) Zasuk β



Verifikacija optičnega merilnega sistema

- 4 različni pogoji/meritve:
 1. Referenčna meritev
 2. Zasuk okoli osi-z za 2°
 3. Zasuk okoli osi-z za 6° v nasprotno smer.
 4. Rahel zasuk okoli osi-x.

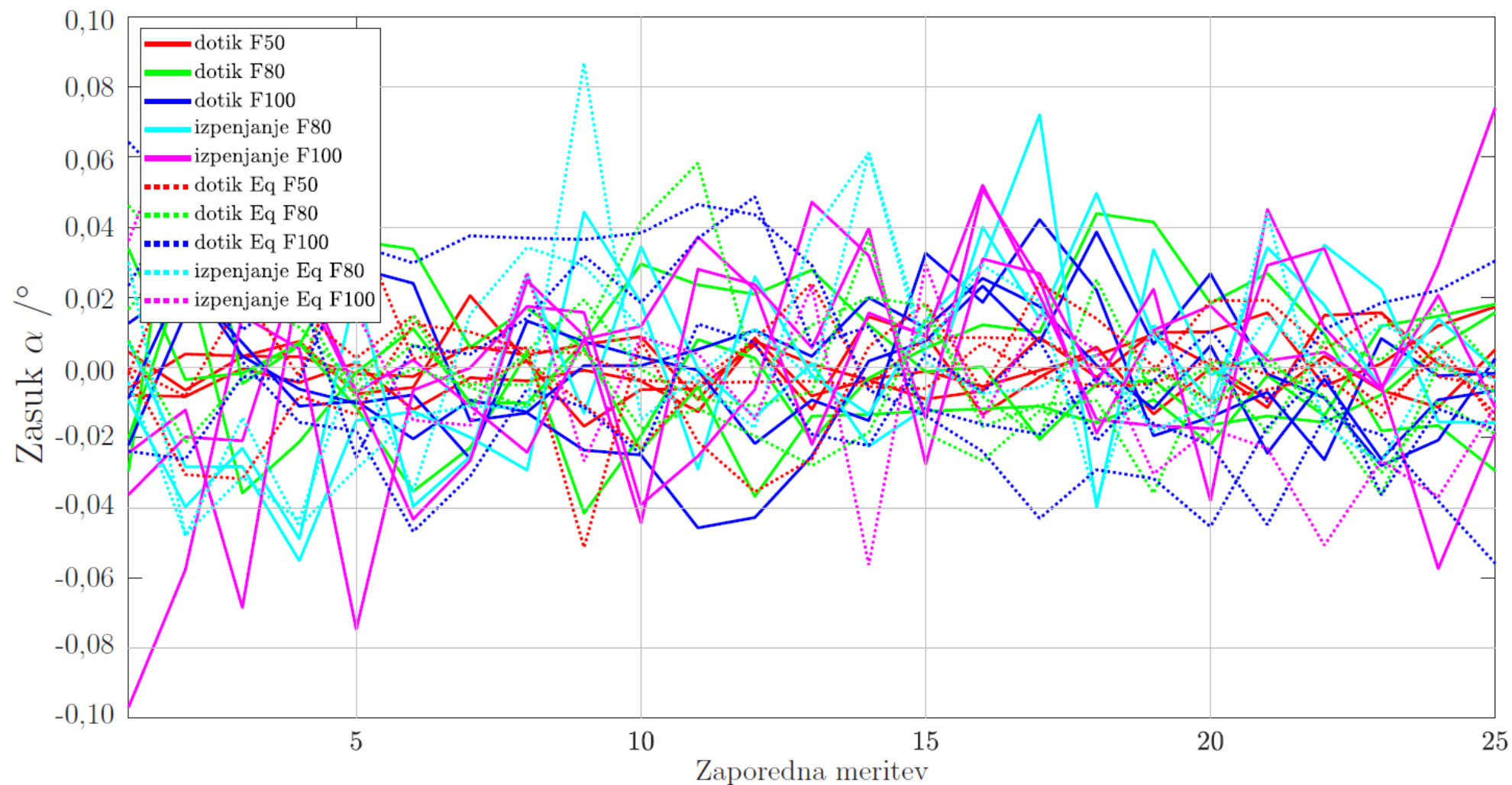
Standardna deviacija σ koordinat središč krožnice, markerja in zasukov

Meritev	ME		OM		M		α	β	γ
	x / μm	y / μm	x / μm	y / μm	x / μm	y / μm	/°	/°	/°
1	0,35	0,60	1,56	1,97	6,22	0,60	0,0037	0,0031	0,031
2	0,58	1,07	3,61	3,76	6,81	1,08	0,0071	0,0071	0,034
3	0,41	0,85	1,24	2,08	3,80	1,22	0,0043	0,0025	0,019
4	0,58	0,76	1,88	2,64	7,19	1,60	0,0054	0,0040	0,037

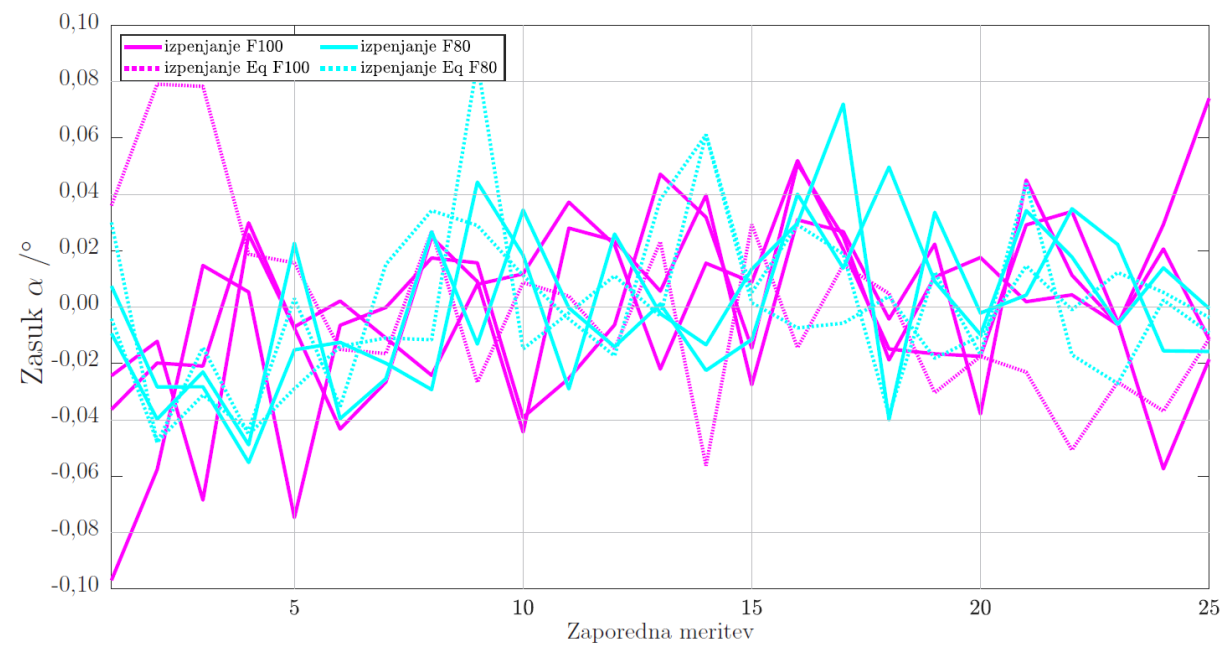
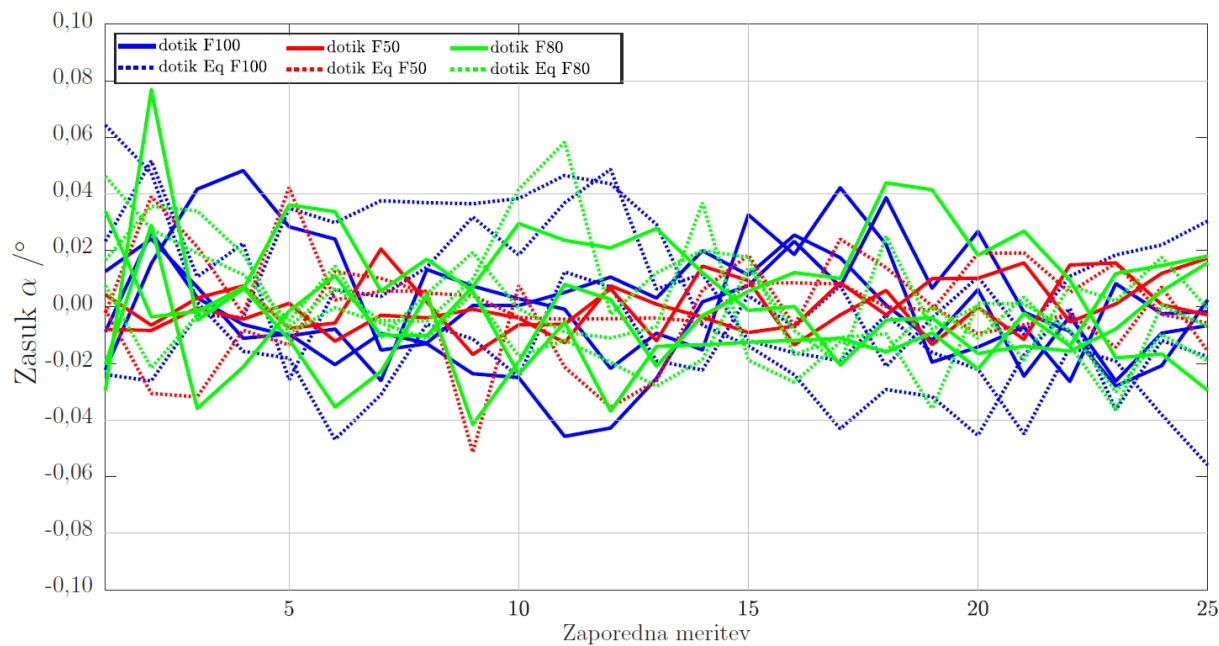
Srednje vrednosti zasukov

Meritev	α	β	γ
	/°	/°	/°
1	-0,0074	0,0058	-4,6771
2	-0,0700	-0,0658	-2,6913
3	-0,0129	-0,1380	-11,1458
4	0,7376	-0,1304	-11,3531

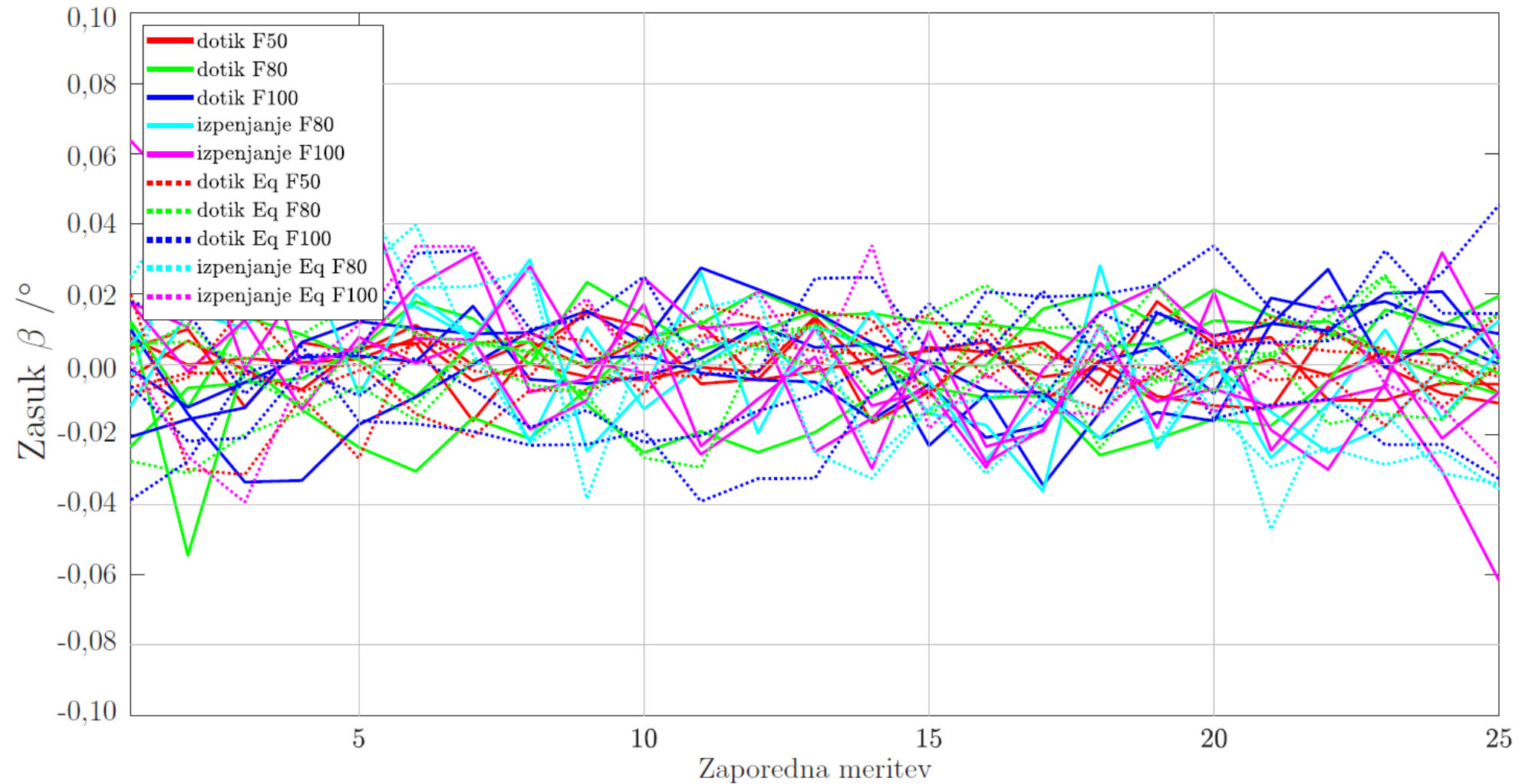
Manipulacija z robotom – zasuk α



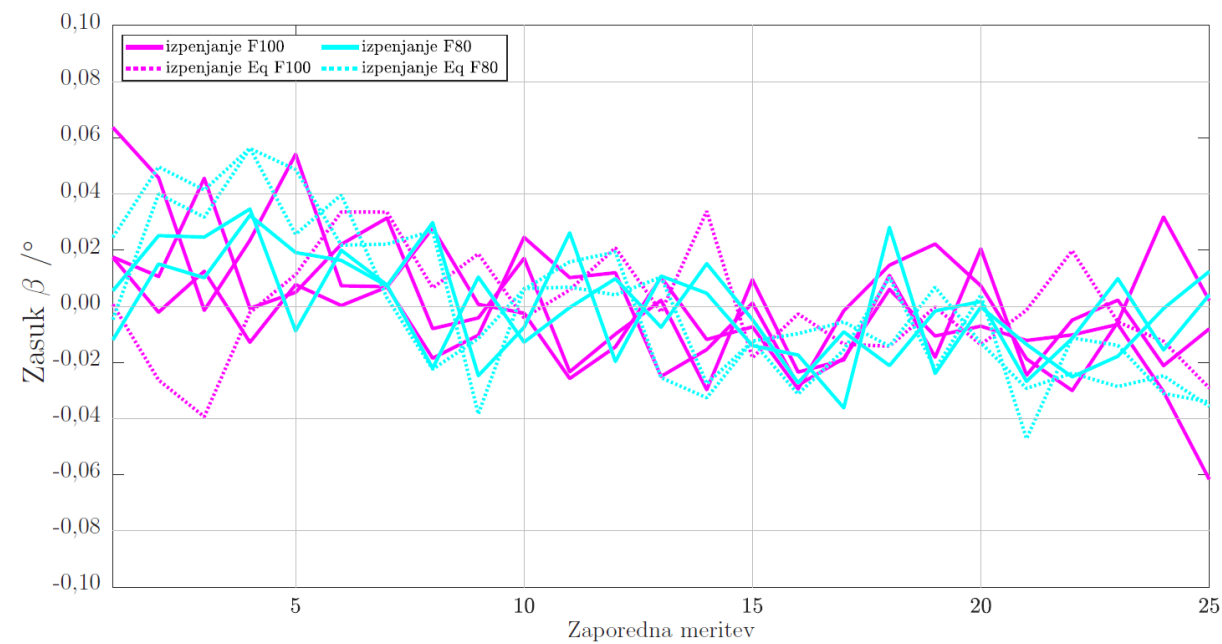
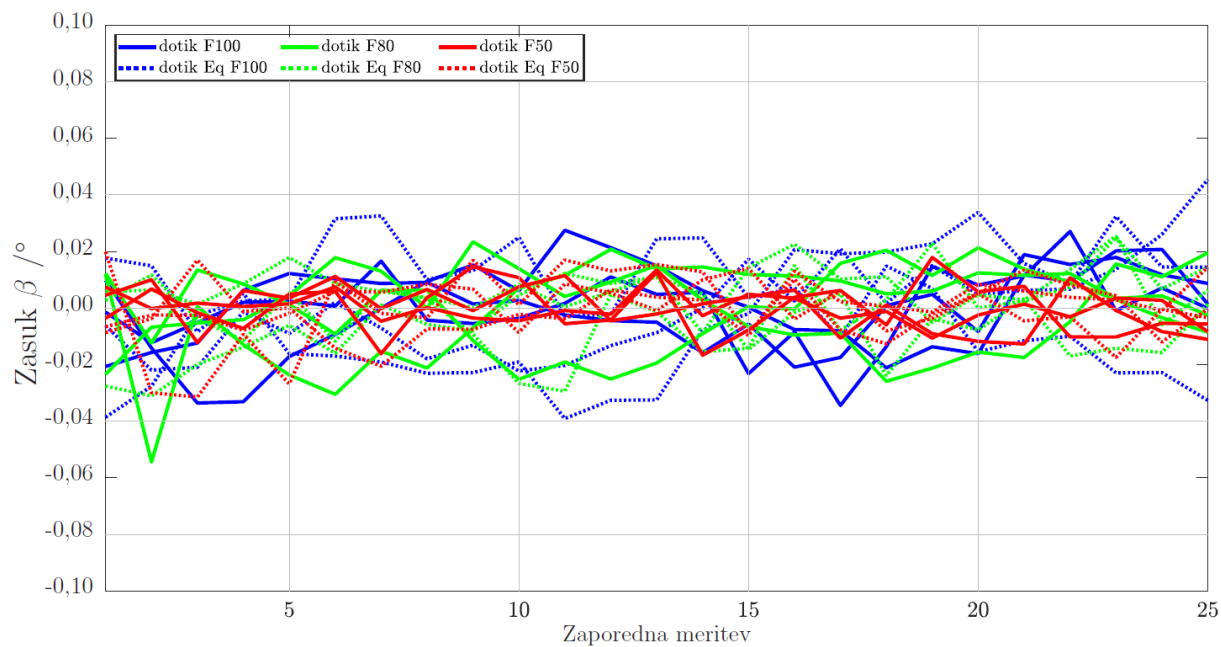
Manipulacija z robotom – zasuk α



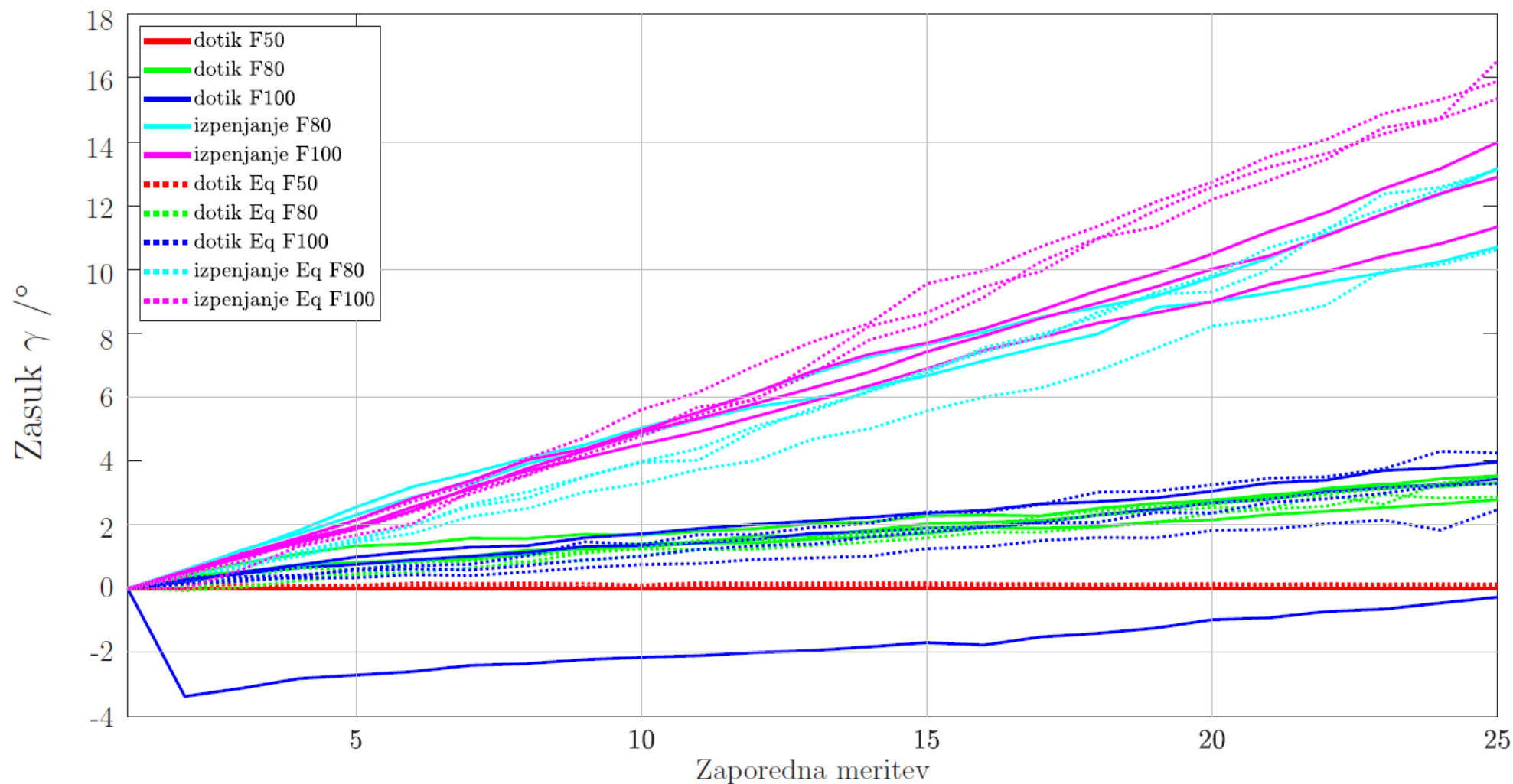
Manipulacija z robotom – zasuk β



Manipulacija z robotom – zasuk β



Manipulacija z robotom – zasuk γ



Manipulacija z robotom – statistični izračuni

Scenarij	Sila %	α		β		Sila %	$\Delta\gamma$ /°	$\Delta\gamma_a$ /°
		$\bar{\alpha}/^\circ$	$\sigma_\alpha/^\circ$	$\bar{\beta}/^\circ$	$\sigma_\beta/^\circ$			
Dotik	50	0,065	0,006	-0,018	0,006	50	0,000	0,000
	80	0,059	0,022	-0,004	0,015	80	0,134	0,118
	100	0,046	0,020	-0,005	0,014	100	0,155	0,093
Dotik + PME	50	0,076	0,015	-0,046	0,010	50	0,004	0,001
	80	0,098	0,014	-0,126	0,010	80	0,104	0,135
	100	0,109	0,028	-0,097	0,019	100	0,140	0,136
Izpenjanje	80	0,097	0,028	-0,028	0,018	80	0,498	0,477
	100	0,095	0,024	-0,025	0,016	100	0,398	0,523
Izpenjanje + PME	80	0,055	0,029	-0,088	0,028	80	0,512	0,389
	100	0,077	0,034	-0,126	0,019	100	0,676	0,688

MSA, premer Magneta (20)

Sila /%	Dotik		Izpenjanje	
	C_g	$6\sigma / \mu\text{m}$	C_g	$6\sigma / \mu\text{m}$
50	20,66	1,0	/	/
80	17,99	1,1	18,30	1,1
100	17,46	1,2	19,14	1,1

MSA, višina Magneta (30)

Sila /%	Dotik		Izpenjanje	
	C_g	$6\sigma / \mu\text{m}$	C_g	$6\sigma / \mu\text{m}$
50	47,21	1,3	/	/
80	45,97	1,3	11,17	6,0
100	35,53	1,7	9,25	6,5

Ugotovitve

- Meritve z **nižjo aplicirano silo** prijema imajo **manjše spremembe** v vseh zasukih.
- Merjenje s **PME** ima vpliv na zasuke \rightarrow dotikanje s tipalom **dodatno vpliva** na negotovost merjenja zasukov.
- Operaciji dotika in izpenjanja imata bistveno **večji vpliv na zasuk γ** kot na zasuka α in β .
- Opazen trend pri zasuku $\beta \rightarrow$ posledica ležišča.

7. Izvirni prispevki doktorske disertacije

- Ovrednotenje vpliva kompleksnosti manipulacije z robotom na dimenzijska merjenja v merilni robotski celici.
(Objavljeno v reviji Applied Sciences: Zore Aleš, Čerin Robert, Munih Marko. Impact of a Robot Manipulation on the Dimensional Measurements in an SPC-Based Robot Cell, Appl. Sci. 2021, 11(14), 6397.)
- Identifikacija vplivov hitrosti, razdalje in načina giba robota na dimenzijske meritve pri vstavljanju objektov v merilno napravo.
(Poslano v recenzijo v revijo IEEE Transactions on Automation Science and Engineering.)
- Opredelitev učinka robotskega prijetanja na negotovost dimenzijskih meritev kot posledica neželenega odstopanja orientacije osno-simetričnega merjenja.

Hvala za pozornost

Vprašanja