

Obogateno kinestetično učenje finih robotskih gibov

Zagovor doktorske disertacije

Aljaž Baumkircher

Mentor: prof. dr. Matjaž Mihelj

Agenda

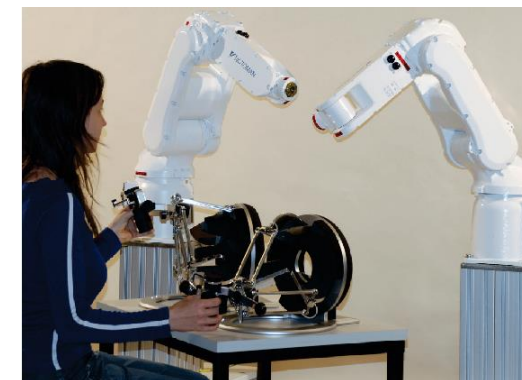
- Uvod
- Cilji doktorske disertacije
- Predstavitev študij
 - Demonstriranje finih robotskih gibov
 - Analitični zapis finih robotskih gibov
 - Študija kinestetičnega učenja finih robotskih gibov z uporabo učnega vmesnika v laboratorijskem okolju
- Sklepne ugotovitve
- Izvirni prispevki znanosti

Učenje z demonstracijo

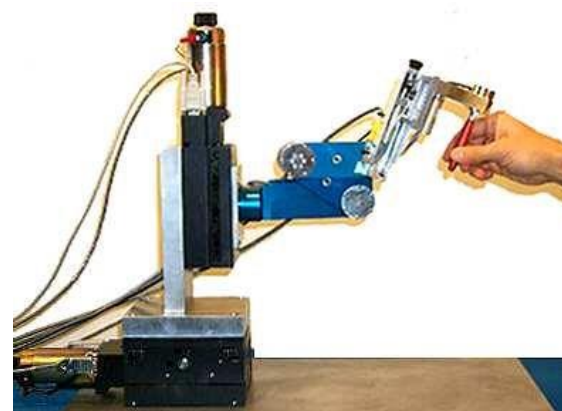
- Operater nauči robotski gib z demonstracijo zahtevanega giba
 - Intuitivno tudi za neizkušene operaterje.
- Kako demonstrirati gibe?
 - Kinestetično učenje,
 - teleoperacija,
 - kooperativno robotsko orodje (CRT) [1],
 - imitacijsko učenje.
- Za neizkušenega operaterja je kinestetično učenje najbolj intuitiven pristop izvedbe demonstracije [2].



Kinestetično učenje



Teleoperacija



Kooperativno robotsko orodje



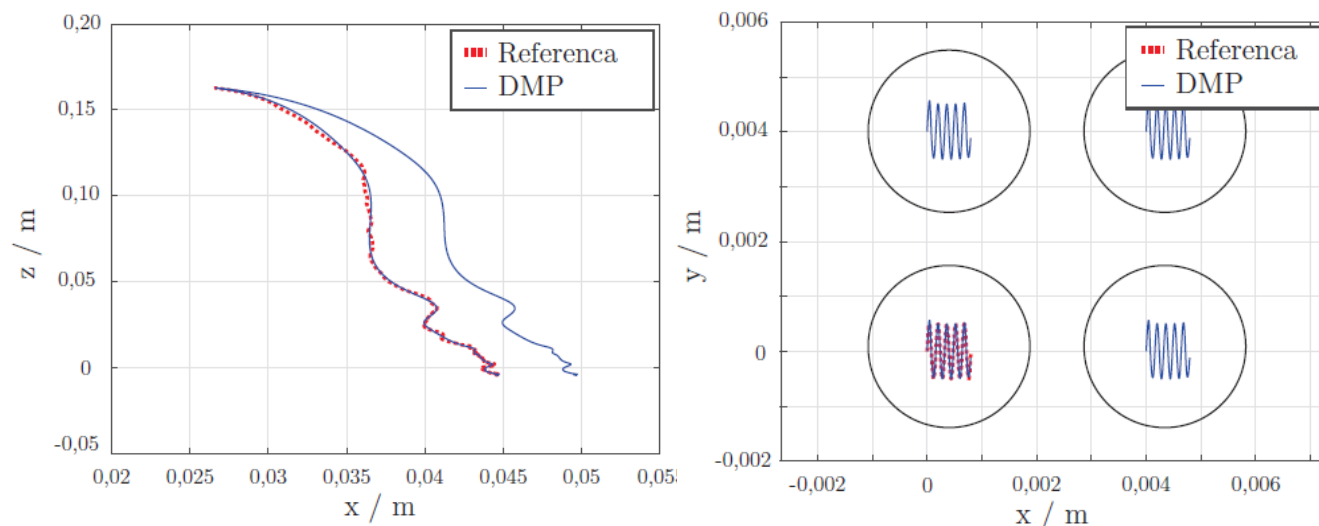
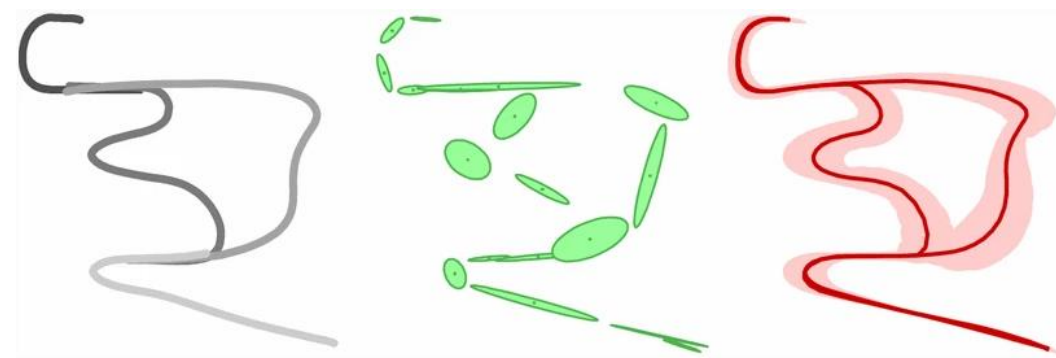
Imitacijsko učenje

[1] Abbott, Jake J., Gregory D. Hager, and Allison M. Okamura. "Steady-hand teleoperation with virtual fixtures." The 12th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 2003. Proceedings. ROMAN 2003.. IEEE, 2003.

[2] Fischer, Kerstin, et al. "A comparison of types of robot control for programming by demonstration." 2016 11th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI). IEEE, 2016.

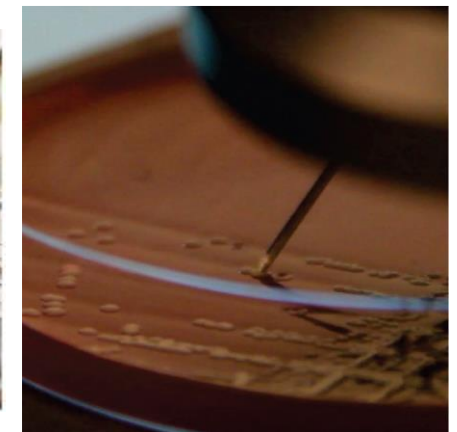
Učenje z demonstracijo

- Zajete demonstracije so opisane z množico vzorčenih točk.
 - Tak zapis ni primeren za nadaljnje učenje.
- Metode zapisa demonstracij se uporablja za:
 - posredni zapis trajektorij,
 - posploševanje iz množice demonstracij,
 - nadaljnje prilagajanje naučenih trajektorij.
- Metode se razlikujejo glede na:
 - število potrebnih demonstracij,
 - računsko kompleksnost,
 - možnost prilagajanja poteka.
- Primeri metod:
 - dinamični generatorji gibov (DMP),
 - mešani Gaussovi modeli (GMM),
 - ProMP, KMP, ...



Tipi gibov

- Grobi gibi
 - Ohlapne zahteve glede natančnosti pozicioniranja tekom izvedbe demonstracije.
 - Enostavna izvedba za neizkušene operaterje.
 - Primeri: zajem z žlico, zlaganje blokov itd.
- Fini gibi
 - Stroge zahteve glede natančnosti pozicioniranja tekom izvedbe demonstracije.
 - Zahtevna izvedba za neizkušene operaterje.
 - Laboratorijsko okolje vsebuje več opravil, ki zahtevajo izvedbo finega giba.
 - Teleoperacija in CRT sta uveljavljena pristopa.
 - Je kinestetično učenje tudi primerno?

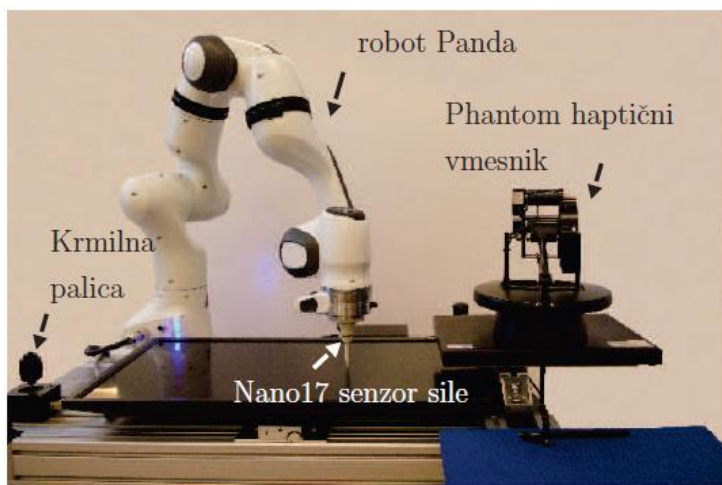
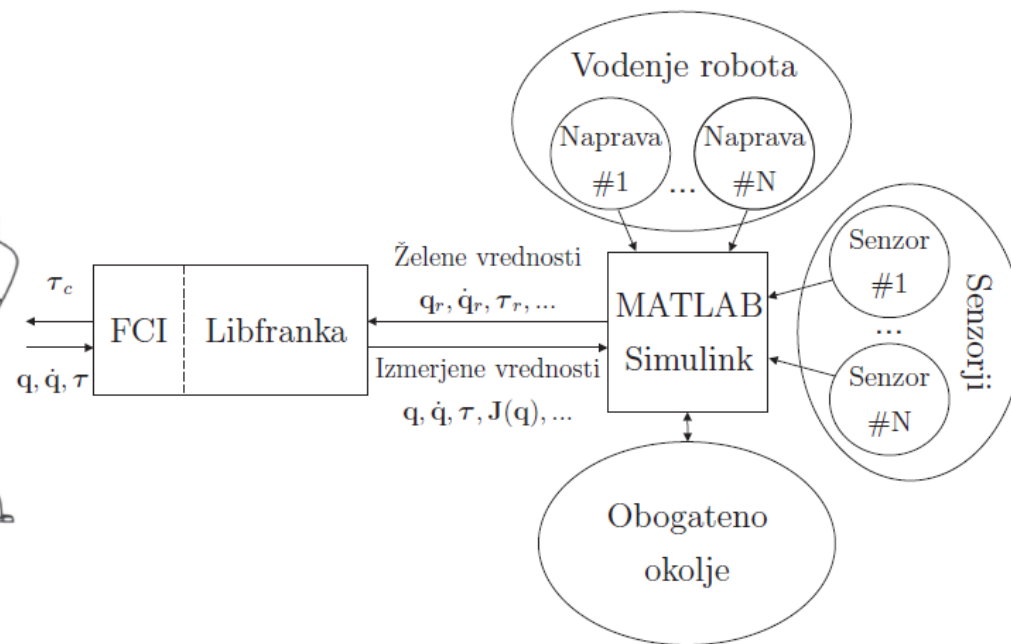
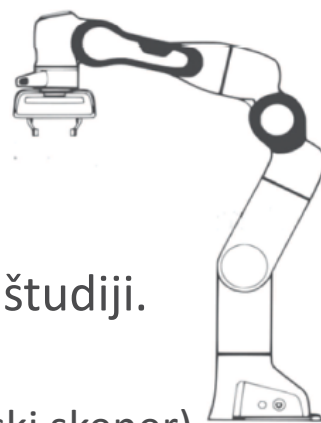


Cilji doktorske disertacije

1. Študija natančnosti in uporabniške izkušnje učenja finih robotskih gibov z različnimi pristopi učenja z demonstracijo.
2. Študija zapisa finih robotskih gibov.
3. Študija kinestetičnega učenja finih robotskih gibov z uporabo učnega vmesnika v sklopu laboratorijske aplikacije.

Robotski sistem

- Robotski manipulator: Franka Emika Panda
 - 7 rotacijskih prostostnih stopenj,
 - Ponovljivost pozicioniranja 0,1 mm,
 - (Kalibrirana) točnost pozicioniranja 0,1 mm.
- Eksperimentalni sistem prilagojen posamezni študiji.
 - Upravljalne naprave (teleoperacija, CRT),
 - Zaznavanje okolice (RGB kamera, linijski laserski skener),
 - Prikazovanje relevantne informacije (LCD zaslona, VR očala).



Demonstriranje finih gibov

- Izbrani pristopi demonstriranja finih gibov:

- Kinestetično učenje

- Upravljalna naprava: robotski manipulator

- Kooperativno robotsko orodje (CRT)

- Upravljalna naprava: senzor sile Nano 17

- Teleoperacija

- Upravljalna naprava: haptični vmesnik Phantom in krmilna palica za določanje skalirnega faktorja



Kinestetično učenje



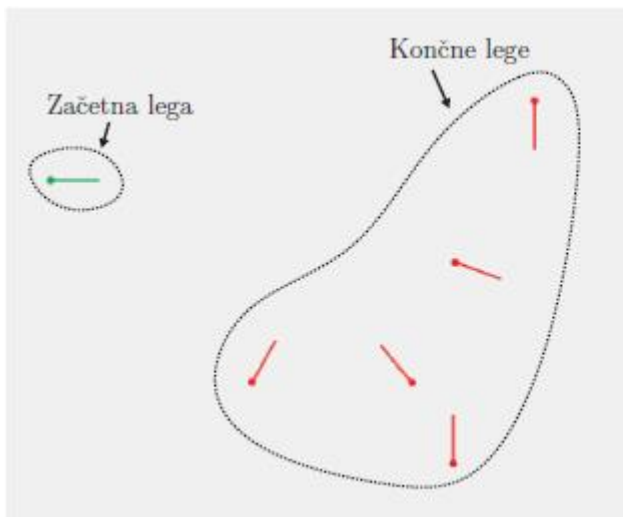
CRT



Teleoperacija

Demonstriranje finih gibov

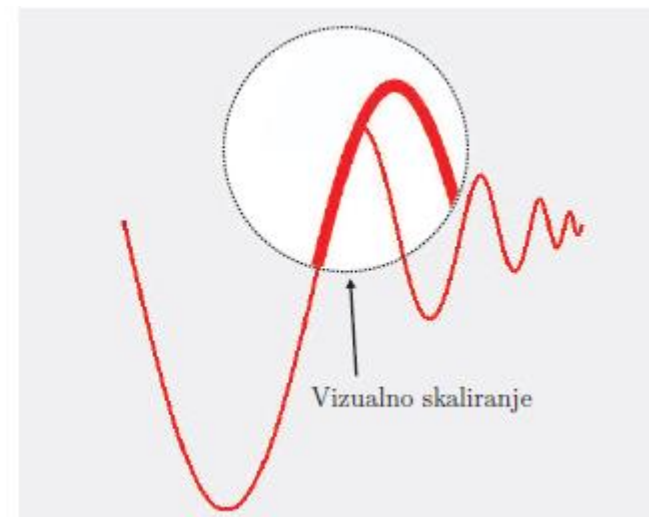
- Tip nalog:
 1. Premik od točke do točke
 2. Sledenje poti
- Vpliv funkcionalnosti vizualnega in prostorskega (teleoperacija) skaliranja.
- 31 udeležencev
 - 20 moških / 11 žensk, 11 strokovnjakov iz področja robotike in 20 nestrokovnjakov, povprečna starost 32 +/- 9,8 let.



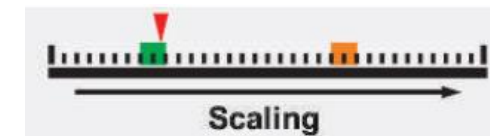
Premik od točke do točke



Sledenje poti



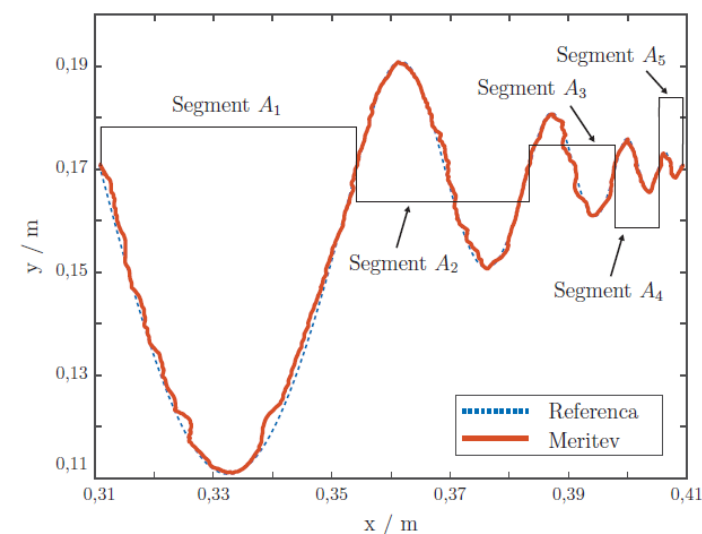
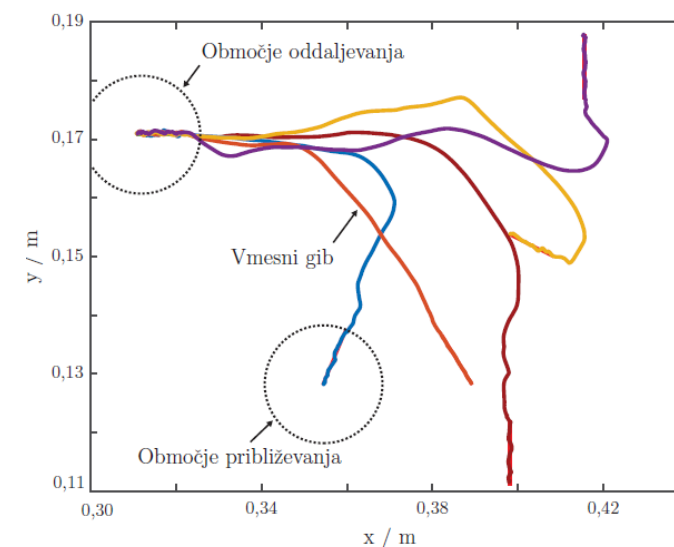
Vizualno skaliranje



Indikator prostorskega skaliranja (teleoperacija)

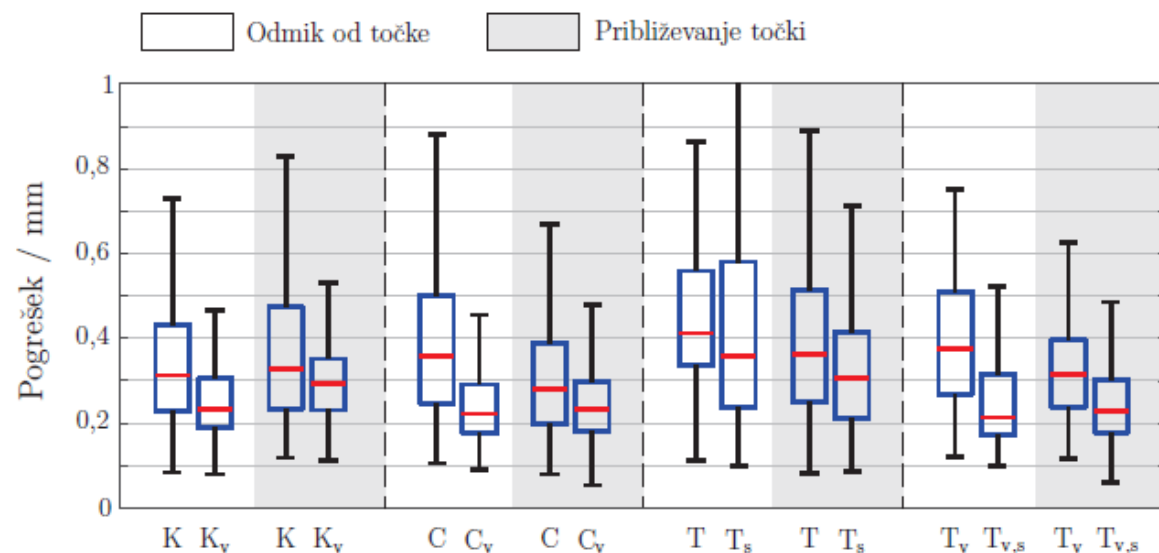
Demonstriranje finih gibov

- Analiza podatkov:
 - Pogrešek pozicioniranja,
 - Točka do točke: najmanjša razdalja med vrhom robota in črto približevanja/oddaljevanja.
 - Sledenje trajektoriji: evklidska razdalja med vrhom robota in referenčno trajektorijo (po časovni poravnavi)
 - hitrost gibanja vrha robota,
 - gladkost generiranega giba (SAL) [1].
- Vprašalnik:
 - enostavnost uporabe,
 - percepcija o doseženi natančnosti,
 - predvidena možnost izboljšave,
 - Dve odprti vprašanji:
 - “Za katerega od pristopov bi se odločil, v kolikor bi moral izvesti fin gib in zakaj?”
 - “Ali se vam je zdelo vizualno skaliranje koristno in zakaj?”



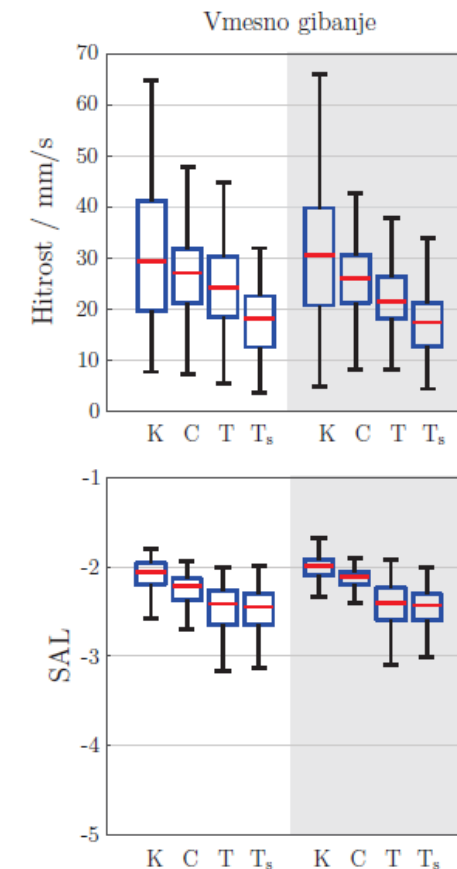
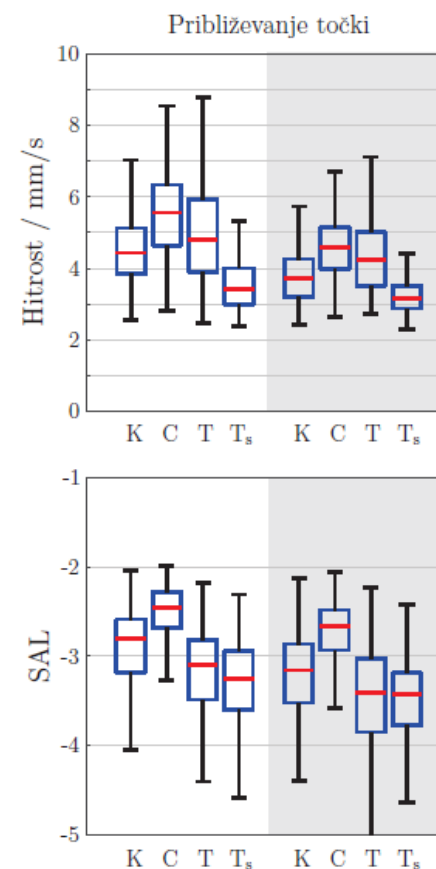
Premik od točke do točke

K - kinestetično (brez vizualnega skaliranja) T - teleoperacija (brez viz. skal., brez prost. skal.)
 K_v - kinestetično (z vizualnim skaliranjem) T_s - teleoperacija (brez viz. skal., s prost. skal.)
 C - CRT (brez vizualnega skaliranja) T_v - teleoperacija (z viz. skal., brez prost. skal.)
 C_v - CRT (z vizualnim skaliranjem) T_{v,s} - teleoperacija (z viz. skal., s prost. skal.)



K - kinestetično
 C - CRT
 T - teleoperacija (brez prostorskega skaliranja)
 T_s - teleoperacija (s prostorskim skaliranjem)

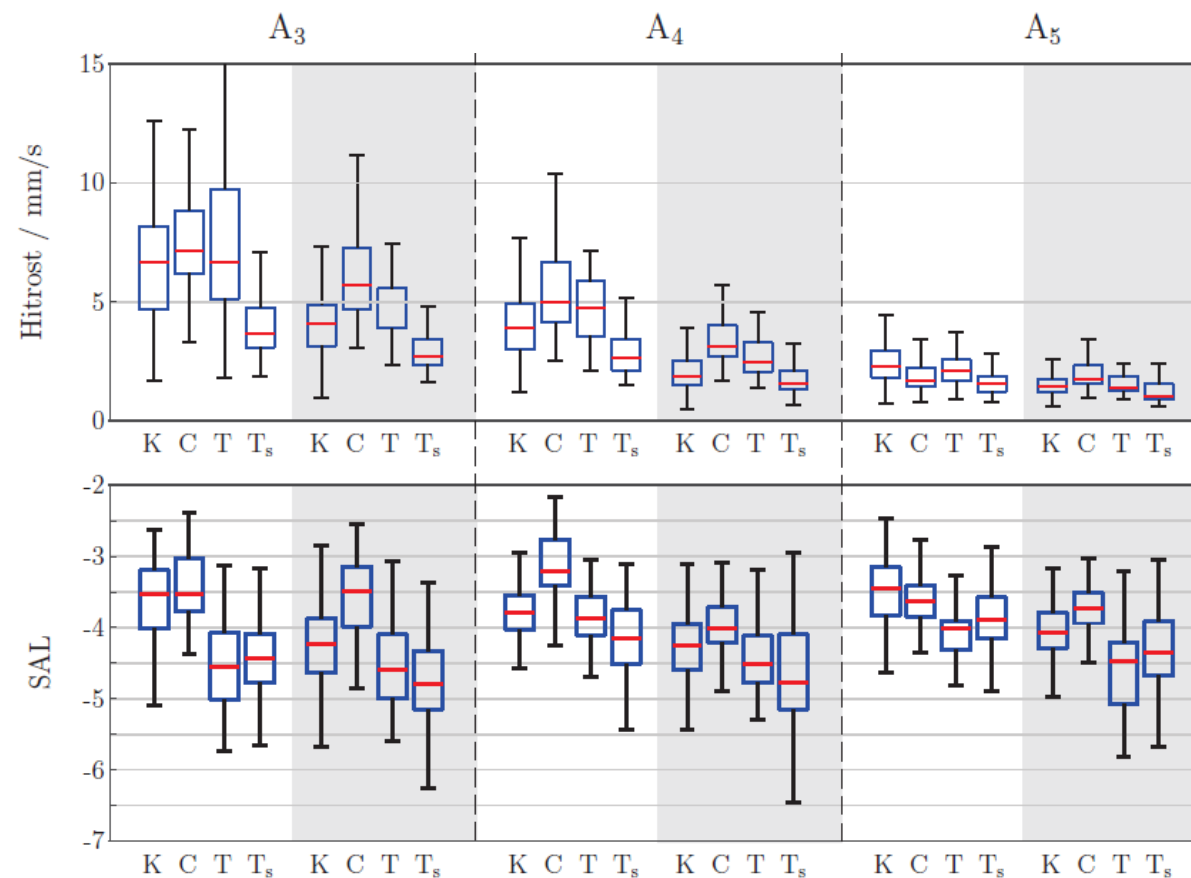
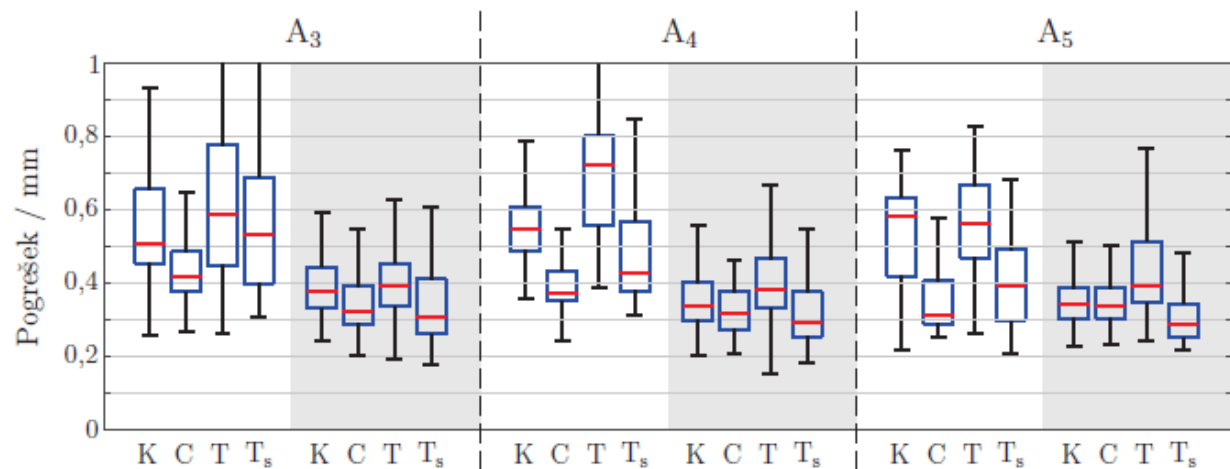
Brez vizualnega skaliranja
 Z vizualnem skaliranjem



Sledenje poti

K - kinestetično
 C - CRT
 T - teleoperacija (brez prostorskega skaliranja)
 T_s - teleoperacija (s prostorskim skaliranjem)

Brez vizualnega skaliranja
 Z vizualnim skaliranjem




Vprašalnik


K - kinestetično

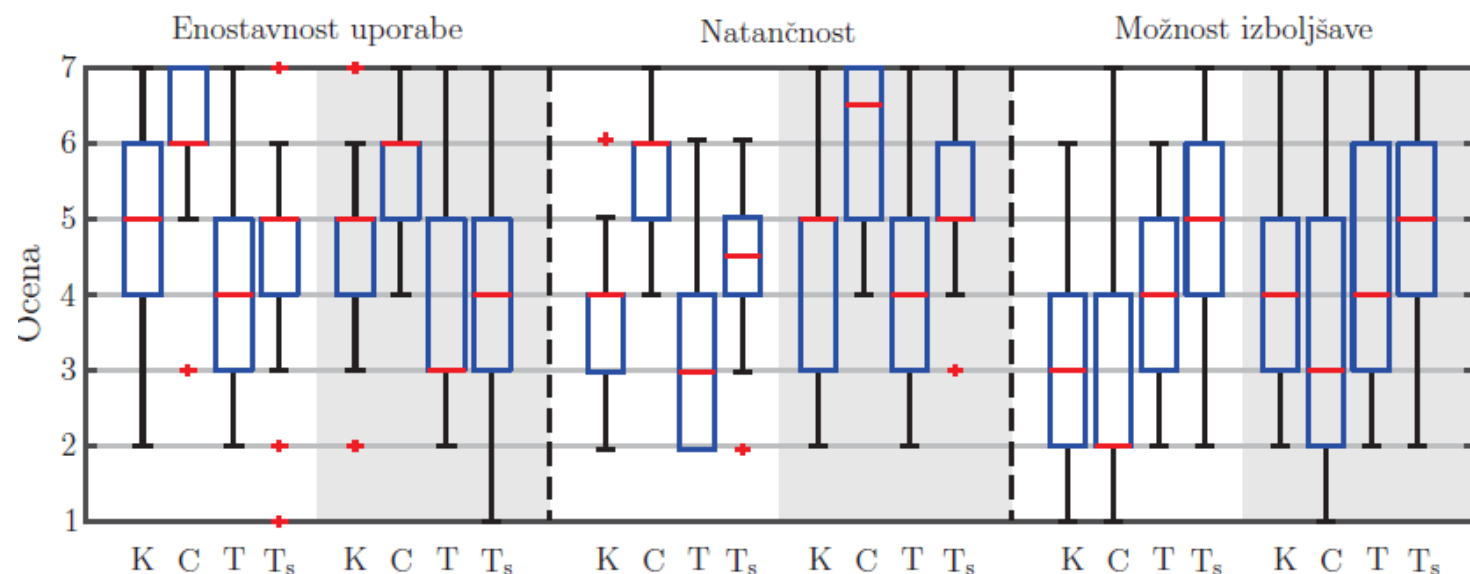
C - CRT

T - teleoperacija (brez prostorskega skaliranja)

T_s - teleoperacija (s prostorskim skaliranjem)

 Brez vizualnega skaliranja

 Z vizualnim skaliranjem



Odgovori na odprti vprašanji:

1. Večina operaterjev bi uporabila pristop CRT zaradi enostavnosti generiranja gladkega giba z uporabo nesignifikantnih sil.
2. Večini operaterjev se je vizualno skaliranje zdelo uporabno, a so hkrati opazili povečano zahtevnost pri generiranju giba.

Ugotovitve

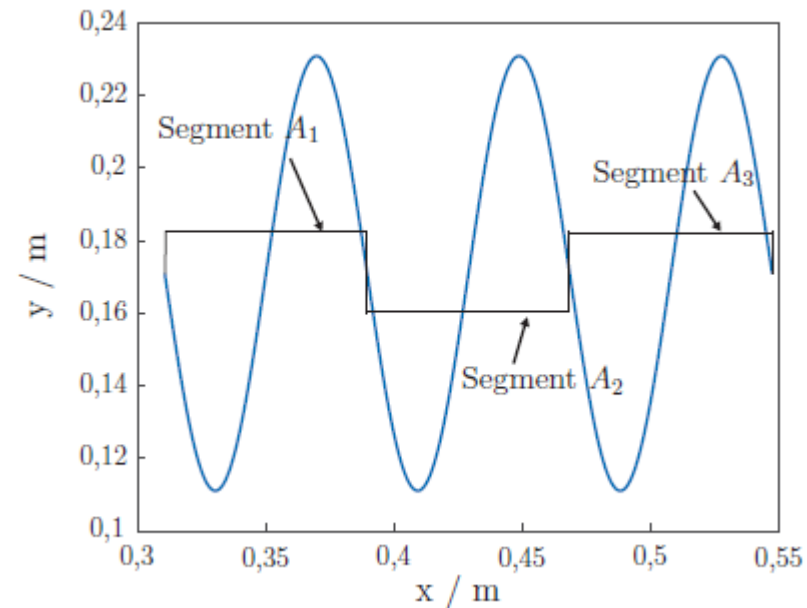
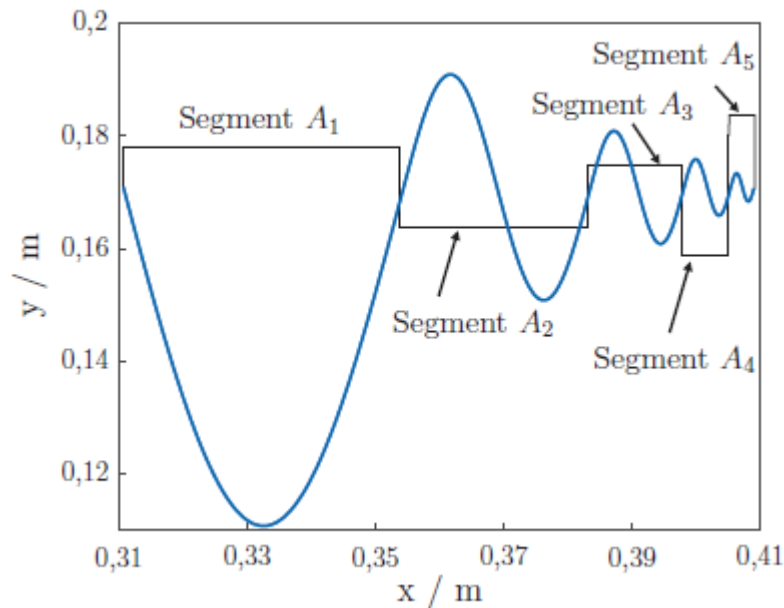
1. Kinestetično učenje je konsistentno dosegalo submilimetrski pogrešek pozicioniranja.
 - Natančno pozicioniranje težje zaradi nepopolne kompenzacije dinamičnega modela.
 - Primerno za demonstracijo finih gibov.
2. Vizualno skaliranje signifikantno zmanjša generiran pogrešek pozicioniranja.
 - Tudi po mnenju operaterjev je ta funkcionalnost uporabna zaradi povečanega zaznavanja odstopanj pozicioniranja.
3. Pristop CRT generira najmanjši pogrešek pozicioniranja.
 - Hkrati omogoča tudi hitre in gladke gibe.
 - Tudi po mnenju operaterjev najprimernejši pristop.
4. Teleoperacija lahko omogoča majhne pogreške pozicioniranja.
 - Zaradi visoke motorične zahtevnosti neprimerna za neizkušene operaterje.

Analitični zapis finih gibov

- Demonstrirane trajektorije je potrebno zapisati z uporabo ustreznih metod
 - Je mogoče zapisati fine gibe?
- Primerjava dveh metod:
 - Dinamični generatorji gibov (DMP)
 - Mešani Gaussovi modeli (GMM)
- Kvaliteta zapisa je pri obeh metodah odvisna od števila izbranih parametrov
 - Baznih funkcij (DMP)
 - Komponent (GMM)
- Večanje števila parametrov izboljša kvaliteto zapisa, a hkrati poveča računsko kompleksnost.
- Predlagamo nadgradnjo metode GMM, ki izboljša kvaliteto zapisa finih gibov brez povečanja računske kompleksnosti.

Analitični zapis finih gibov

- Analizirane trajektorije:
 - trajektorija s finimi gibi,
 - trajektorija brez finih gibov.
- Uporabili smo simulirane trajektorije.
 - Zapis DMP izveden na podlagi 1 demonstracije, GMM pa na podlagi 10.
 - Set 10 demonstracij je vključeval izvorno trajektorijo in njene kopije z dodanim nesignifikantnim šumom.



Dinamični generatorji gibov

- Podatki zapisani z nel. dif. enačbo 2. reda in setom baznih funkcij.

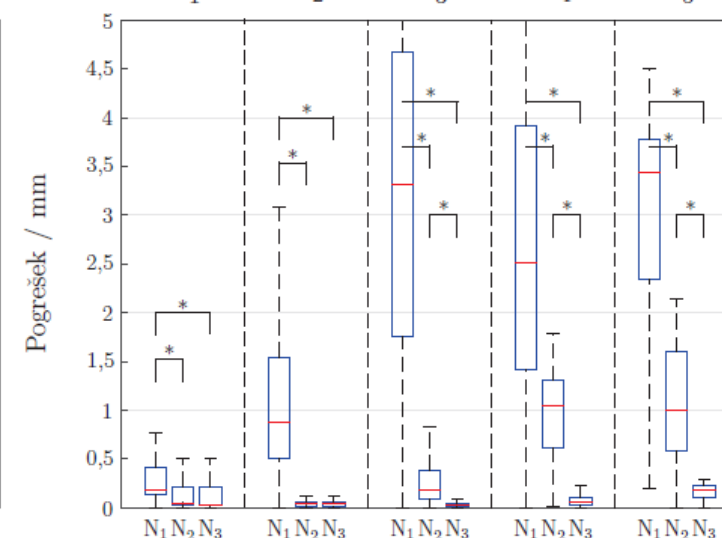
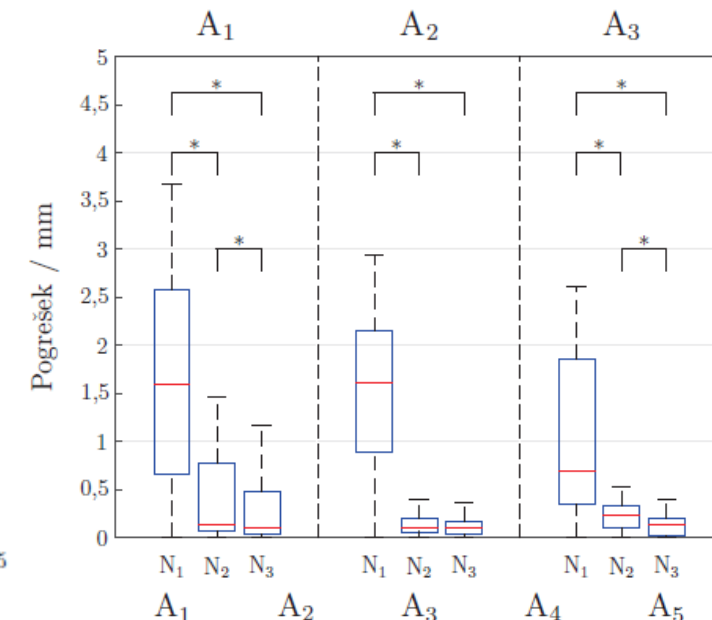
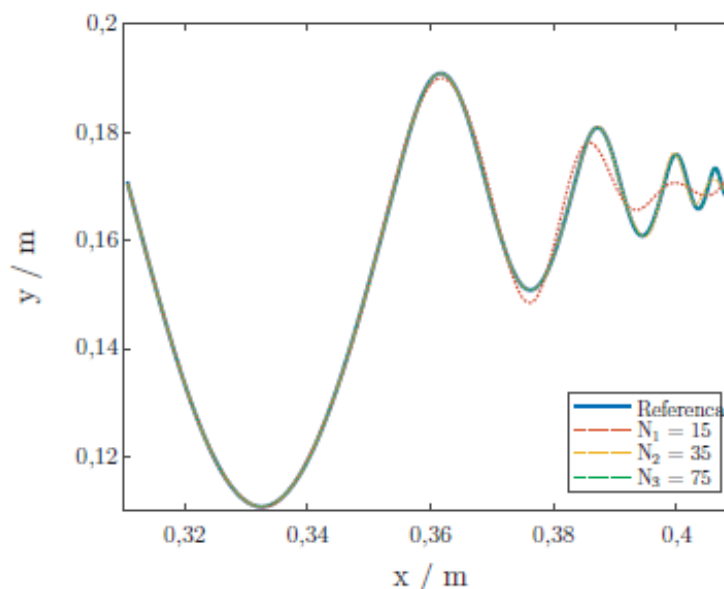
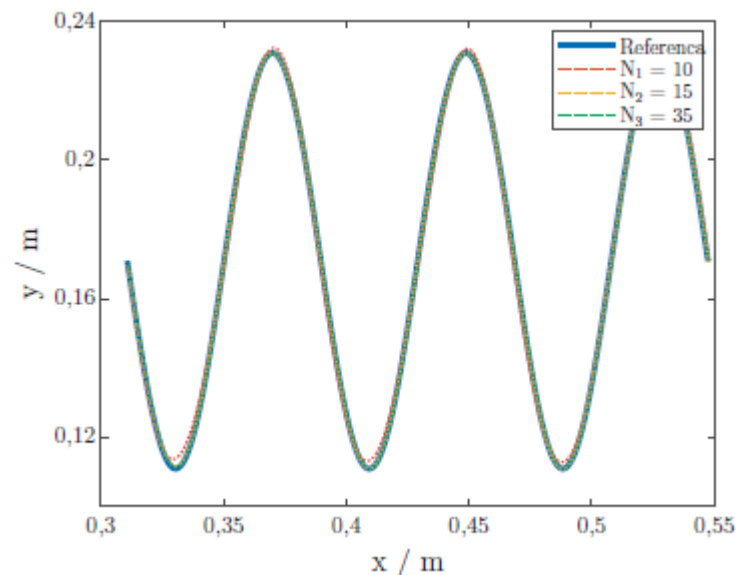
$$\tau \ddot{\mathbf{x}}_{\mathbf{r}}(t) = \alpha_p(\beta_p(\mathbf{g} - \mathbf{x}_{\mathbf{r}}(t)) - \tau \dot{\mathbf{x}}_{\mathbf{r}}(t)) + \mathbf{f}(s)$$

$$\mathbf{f}_{\mathbf{x}}(s) = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i \psi_i(s)}{\sum_{i=1}^N \psi_i(s)} s, \quad \psi_i(s) = e^{-h_i(s-c_i)^2}$$

$$\tau \dot{s} = -\alpha_s s$$

Ugotovitve:

- Povečevanje št. baznih funkcij N izboljša zapis referenčne trajektorije.
- Vrednost N s katero se ustrezno opiše trajektorijo brez finih gibov ni zadostna za opis finih gibov.
- Metoda DMP je računsko nepotrata, tako da se z večanjem vrednosti N računaska kompleksnost ne povečuje.



Mešani Gaussovi modeli

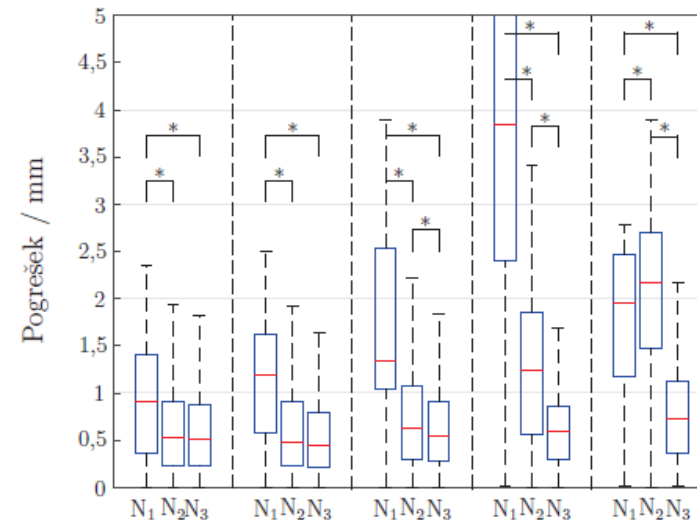
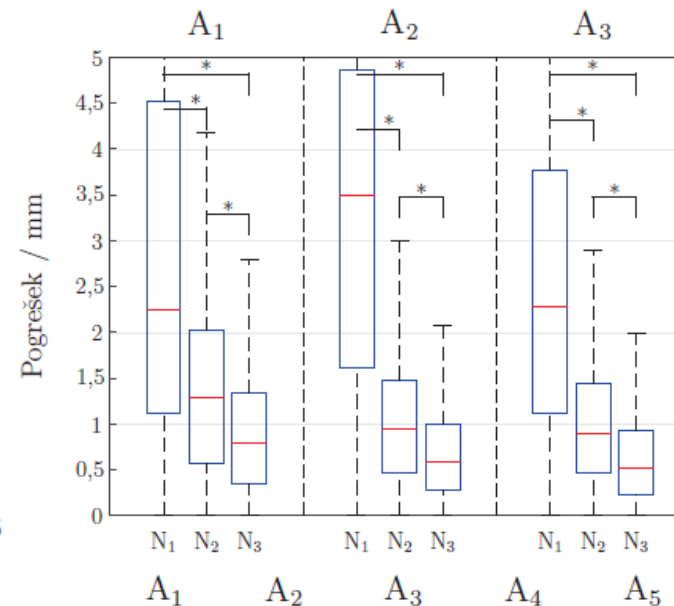
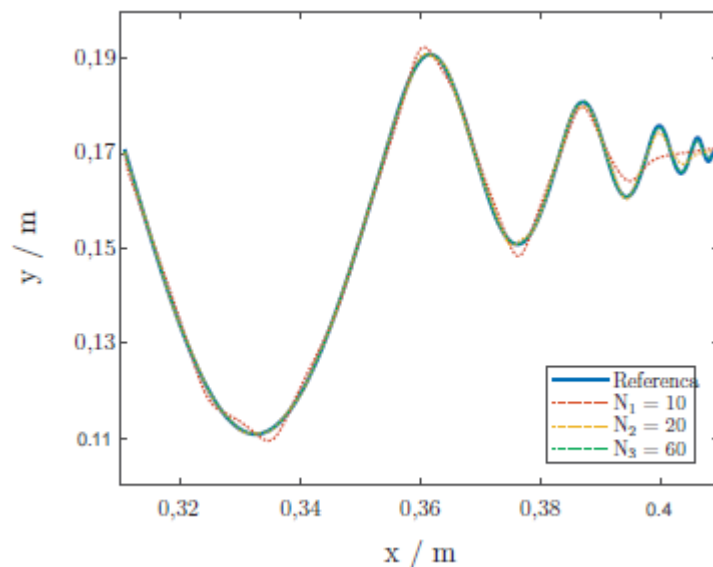
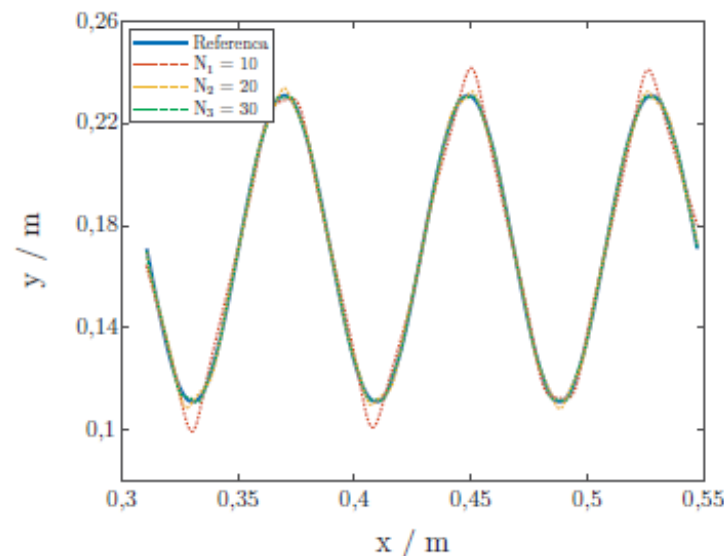
- Podatki zapisani z kombinacijo 2D Gaussovih komponent.

$$\mathcal{N}(\mathbf{x} | \boldsymbol{\mu}_i, \boldsymbol{\Sigma}_i) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^N |\boldsymbol{\Sigma}_i|}} e^{-\frac{1}{2}(\mathbf{x}-\boldsymbol{\mu}_i)^T \boldsymbol{\Sigma}_i^{-1} (\mathbf{x}-\boldsymbol{\mu}_i)}$$

$$p(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N \phi_i \mathcal{N}(\mathbf{x} | \boldsymbol{\mu}_i, \boldsymbol{\Sigma}_i), \quad \sum_{i=1}^N \phi_i = 1,$$

Ugotovitve:

- Povečevanje št. komponent N izboljša zapis referenčne trajektorije.
- Vrednost N s katero se ustrezno opiše trajektorijo brez finih gibov ni zadostna za opis finih gibov.
- Metoda GMM je računsko potratna, tako da se z večanjem vrednosti N računska kompleksnost močno povečuje.
 - Čas računanja v primeru finih gibov
 - $N_1 = 31$ s, $N_2 = 155$ s, $N_3 = 571$ s.

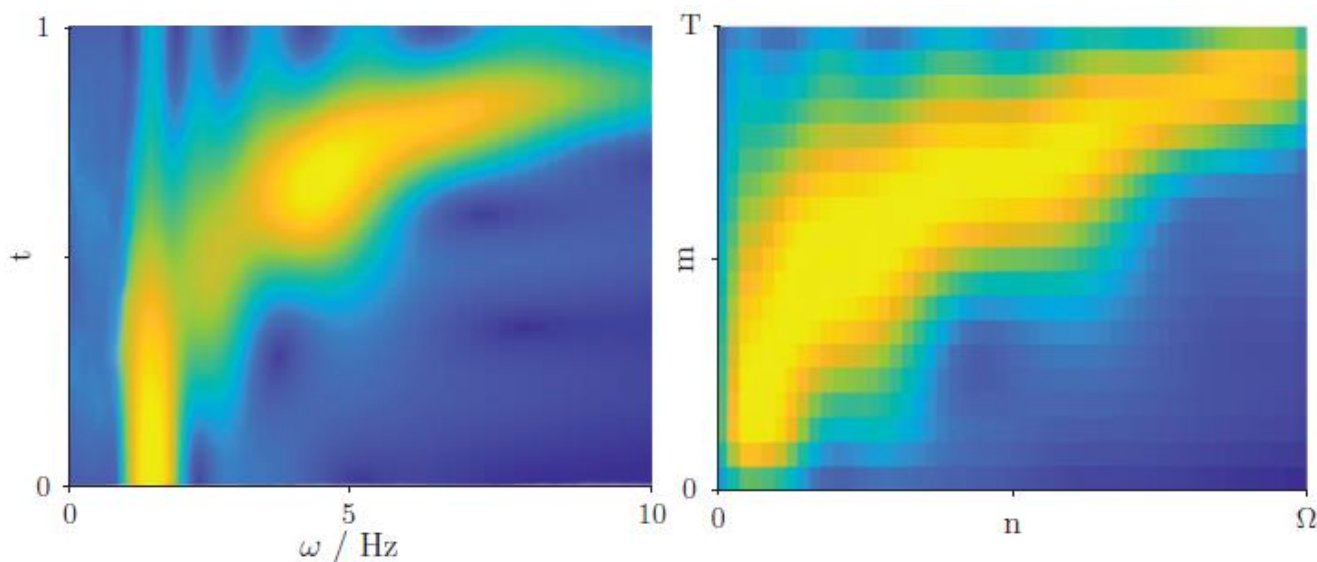


Nadgradnja metode mešanih Gaussovih modelov s prilagajanjem gostote komponent na podlagi frekvenčne analize

- Namesto enakomerne porazdelitve komponent vzdolž podatkov naj bo njihova gostota pametno prilagojena prisotnosti finih gibov.
 - Tako za opis finih gibov ne bo potrebno povečevati vrednosti N .
 - Fini gibi imajo navadno vsebnost višjih frekvenc.
 - Algoritem naj tako omogoča višjo gostoto komponent na območju z višjimi frekvencami.
- Za frekvenčno analizo smo uporabili Welchevo transformacijo.

$$\hat{S}(t, \omega_i) = \frac{S(t, \omega_i)}{\max\{S(t, \omega_i)\}}$$

$$s_{m,n} = \begin{bmatrix} \hat{S}(\Delta T(m-1), \Delta \Omega(n-1)) & \dots \\ \vdots & \hat{S}(\Delta T m, \Delta \Omega n) \end{bmatrix}$$

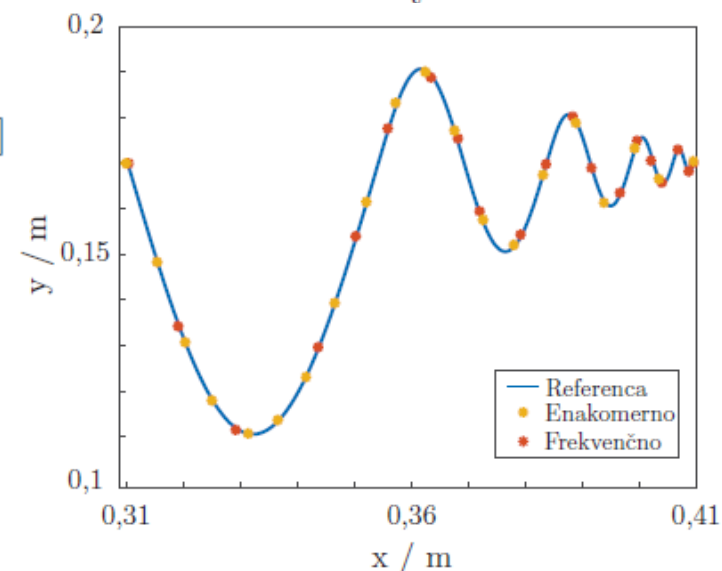
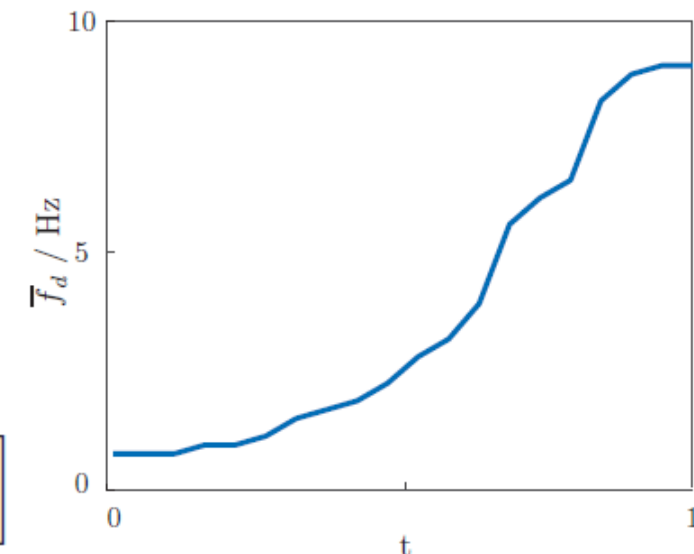


$$\mu_{m,n} = \bar{s}_{m,n}$$

$$f_d(m) = [f_{d1}, \dots, f_{dT}]$$

$$A = \sum_{t=1}^M \bar{f}_d(t) \Delta t$$

$$\Delta A = \frac{A}{K}$$



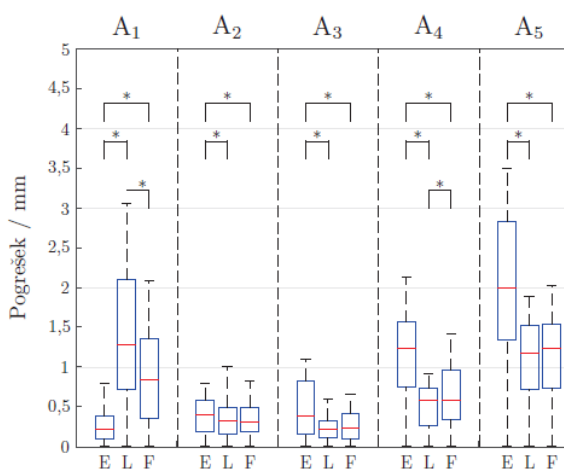
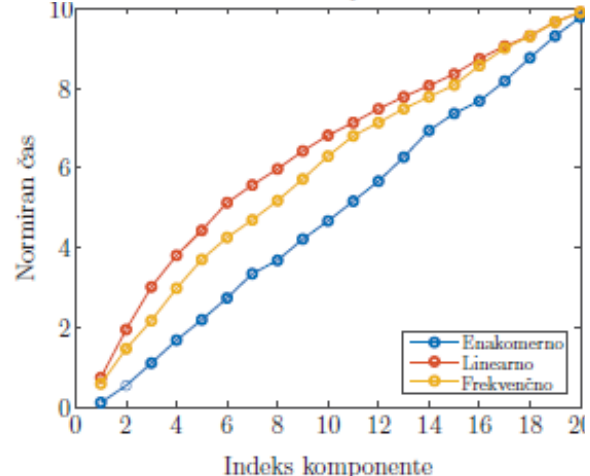
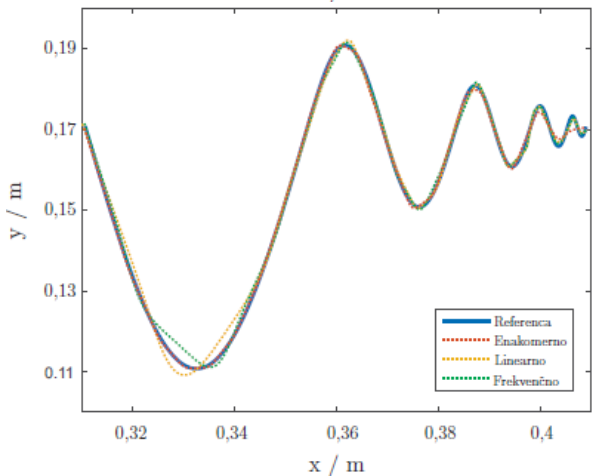
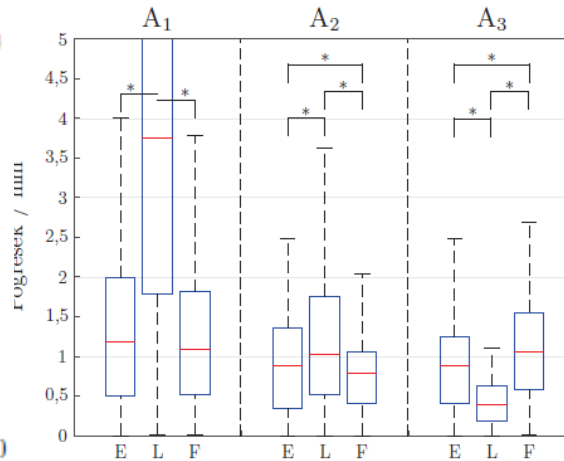
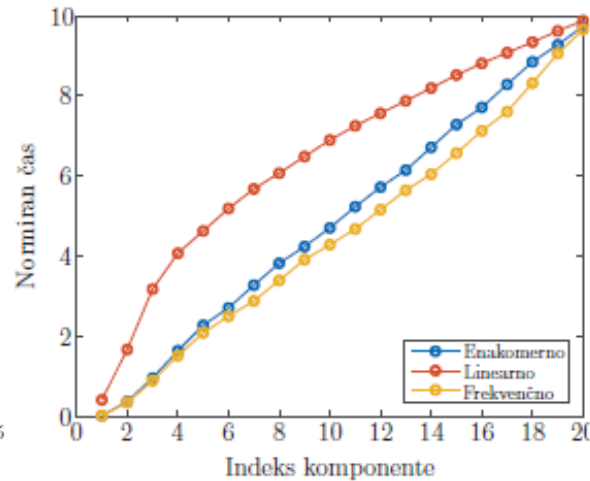
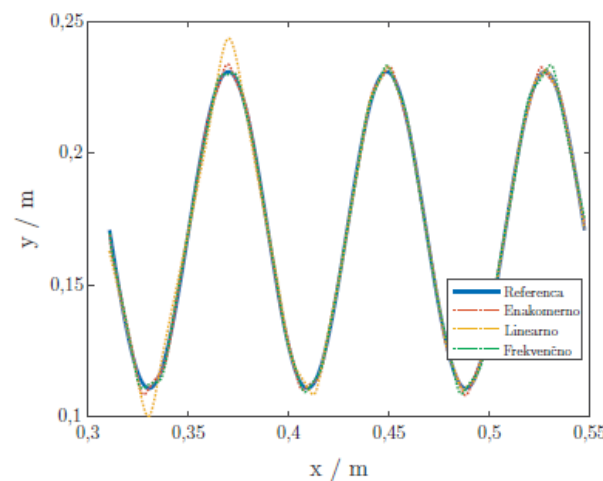
Nadgradnja metode mešanih Gaussovih modelov s prilagajanjem gostote komponent na podlagi frekvenčne analize

- Za ustrezno analizo algoritma smo primerjali metodo GMM z enakomerno (E), linearno naraščajočo (L) in frekvenčno (F) porazdelitvijo $N_2 = 20$ komponent.

- Enakomerna porazdelitev je optimalna za zapis trajektorije brez finih gibov, linearna za zapis finih gibov.

- Ugotovitve:

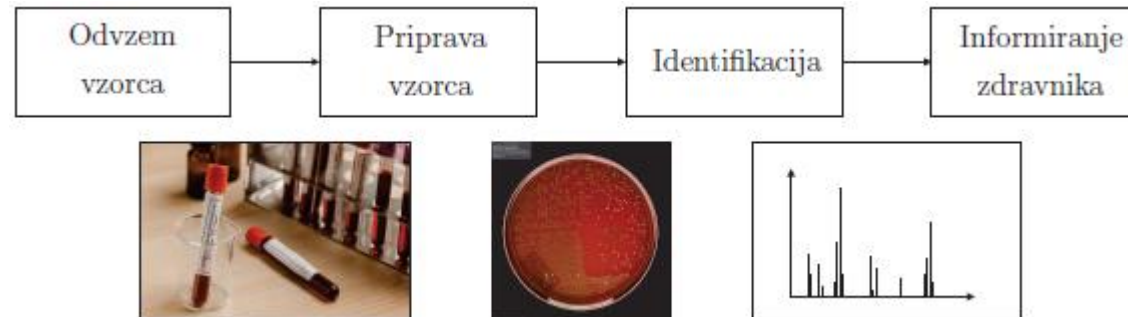
1. V primeru obeh trajektorij algoritem generira gostoto komponent podobno optimalni.
2. Opis finih gibov se izboljša na račun segmenta A_1 , kjer je opis slabši.
3. Z uporabo algoritma smo se približali kvaliteti zapisa z uporabo $N_3 = 60$ komponent, pri čemer je bil čas izračunavanja krajši za 415 s oz. 73 %.





Študija kinestetičnega učenja finih robotskih gibov z uporabo učnega vmesnika v laboratorijskem okolju

- V laboratoriju veliko opravil zahteva fine gibe pri katerih je potrebna submilimetrsko natančnost.
- Na podlagi prejšnjih študij vemo, da:
 - je s kinestetičnim učenjem možna demonstracija finih gibov,
 - z uporabo ustreznih metod je možen zapis demonstriranih finih gibov,
 - uporaba vizualnega skaliranja pripomore k natančnosti izvedene demonstracije.
- Ali je uspešnost vpeljave sodelujočega robota v laboratorijsko okolje primerljiva z uspešnostjo laboratorijskega tehnika?
- Študija primera:
 - Proces odvzema in nanosa kolonij bakterij iz petrijevke z namenom njihove identifikacije z uporabo masne spektrometrije.



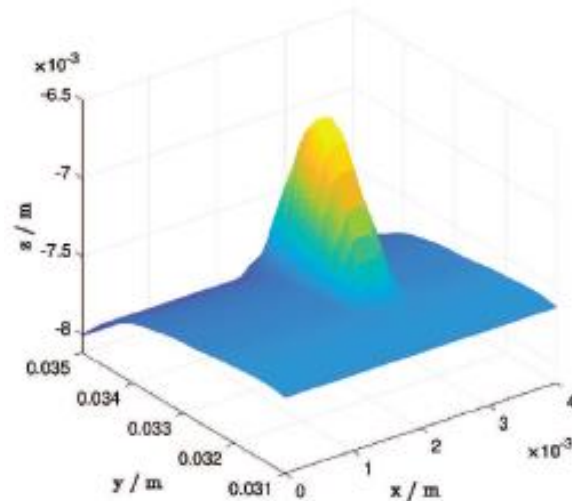
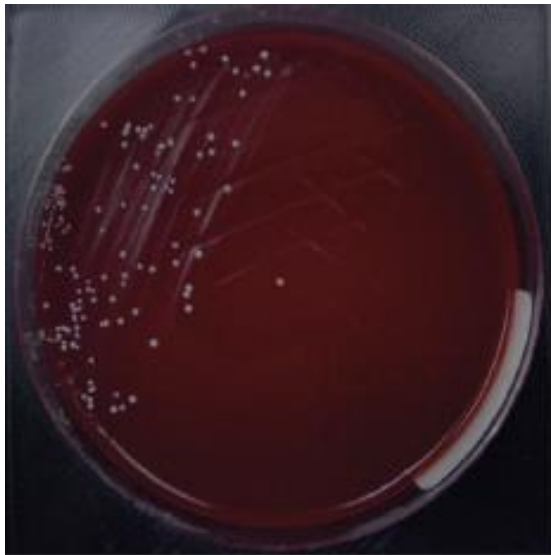
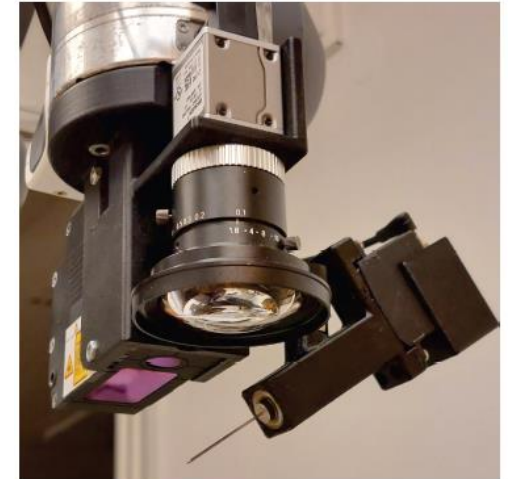
Eksperimentalni sistem



Univerza v Ljubljani | Medicinska fakulteta
INŠTITUT ZA MIKROBIOLOGIJO IN IMUNOLOGIJO



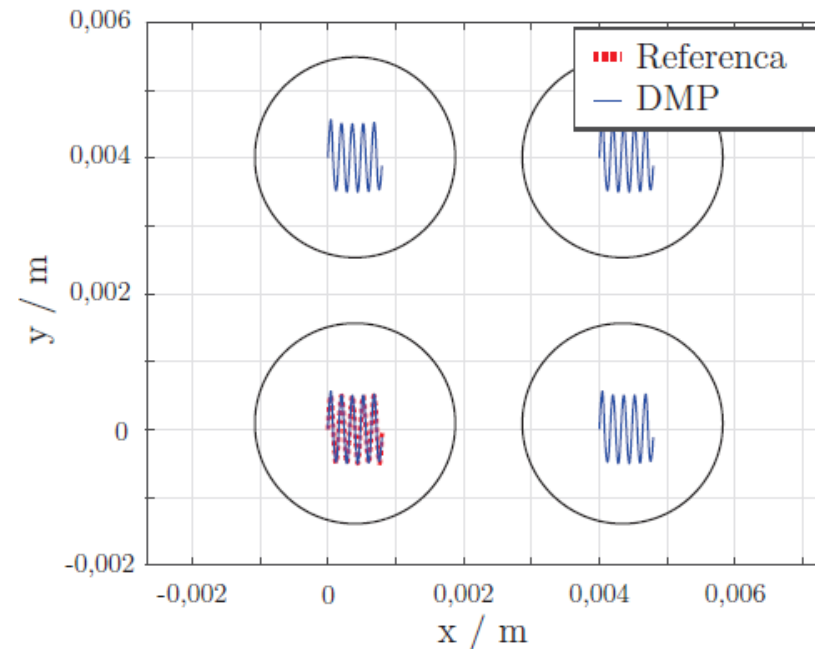
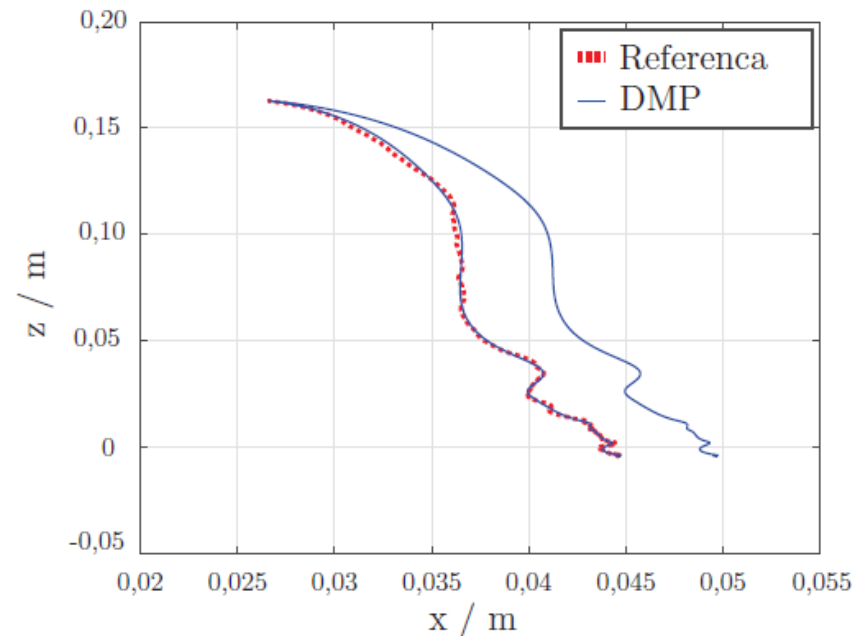
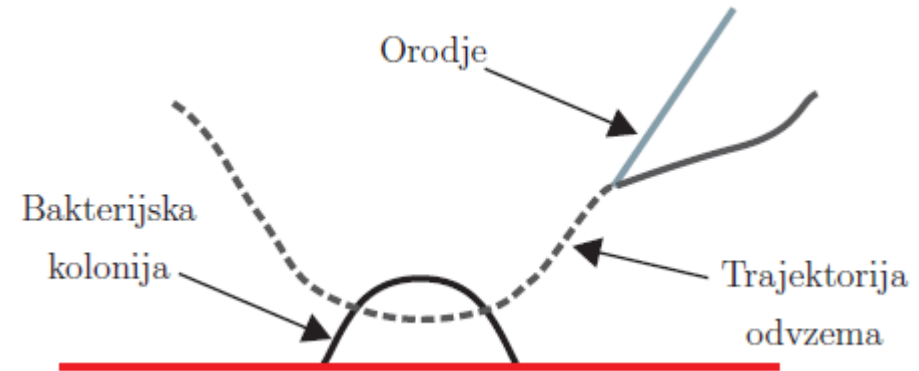
- Orodje manipulatorja:
 - Slikovna analiza petrijevke: RGB kamera
 - Podroben 3D model kolonije: laserski linijski senzor
 - Odvzem/nanos kolonije: igla premera 1 mm s premerom špice 0,5 mm vpeta v mehanizem s servo motorjem
 - Nanos kolonije: senzor sile.



Učenje z demonstracijo



- Demonstracije so bile zapisane z metodo DMP
 - nizka računska kompleksnost,
 - potrebna zgolj ena demonstracija.
- Rezultirajočo trajektorijo giba smo prilagodili glede na izračunano lego kolonije oz. mesta za nanos.
- Kinestetično učenje uporabljeno zgolj za gib odvzema kolonije.

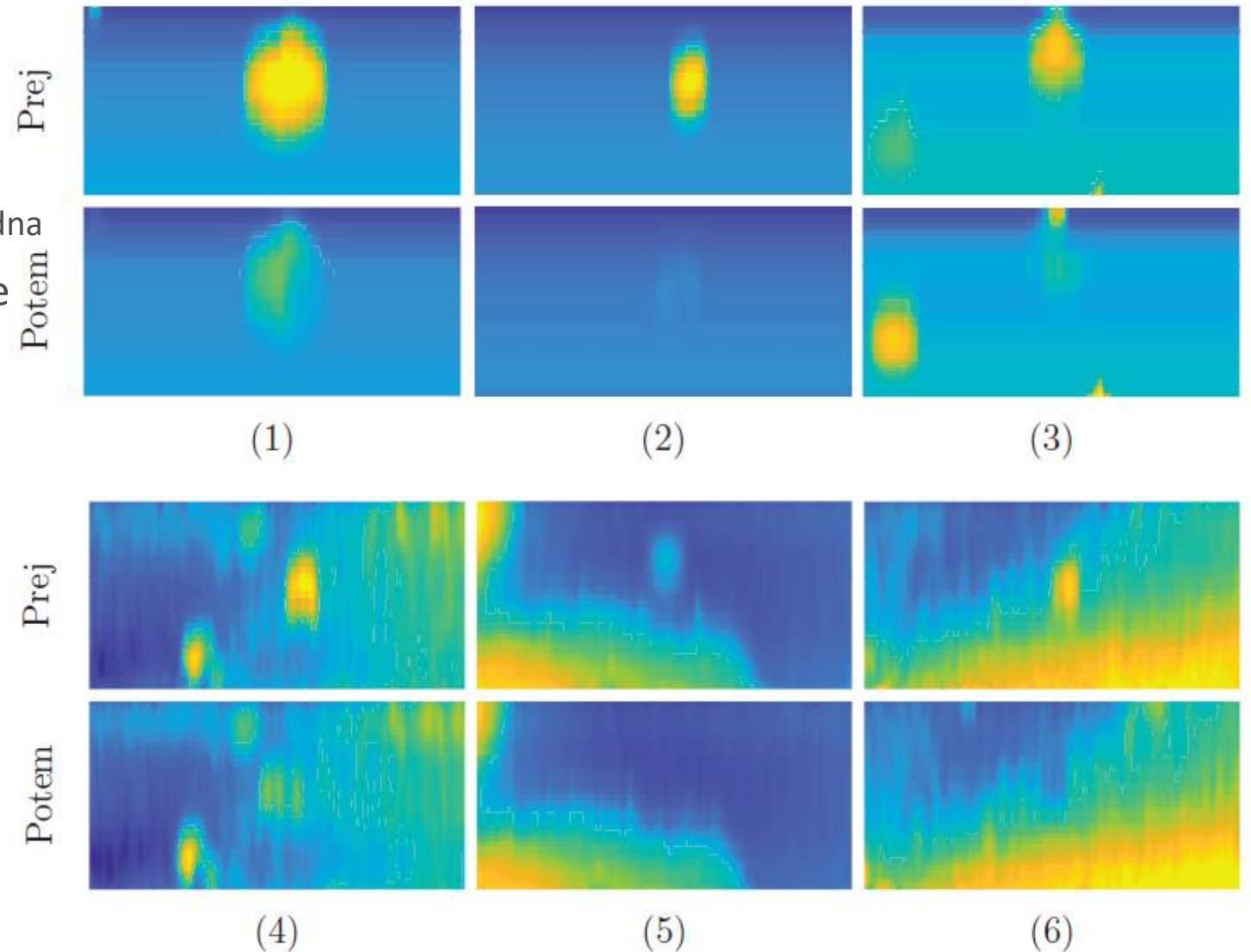


Odvzem kolonije bakterij



- Kvaliteta odvzema je ocenjena na podlagi sprememb v 3D modelu kolonij.
- V vseh primerih kolonija skoraj popolnoma izgine
 - (1) je imela prevelik začetni volumen zato je še vidna
- Področje po odvzemu ni temnejše od okolice
 - ni prišlo do nepotrebnega odvzema hranila.
- Uspešnost odvzemov potrjujejo tudi izračunani volumni
 - (6) je imela zelo majhen začetni volumen, zato je relativna sprememba tako velika.

ID	1	2	3	4	5	6
Začetni volumen [mm ³]	1.44	0.78	0.46	0.11	0.06	0.02
Končni volumen [mm ³]	0.41	-0.04	0.04	0.05	0.007	-0.02
Relativna sprememba [%]	-72	-105	-91	-54	-99	-193



Nanos in identifikacija kolonije bakterij

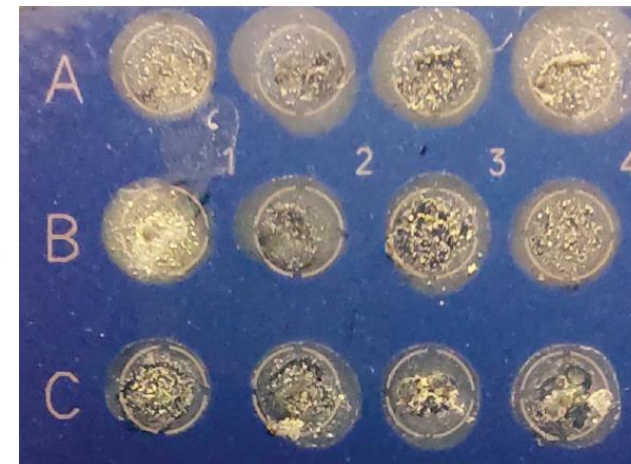
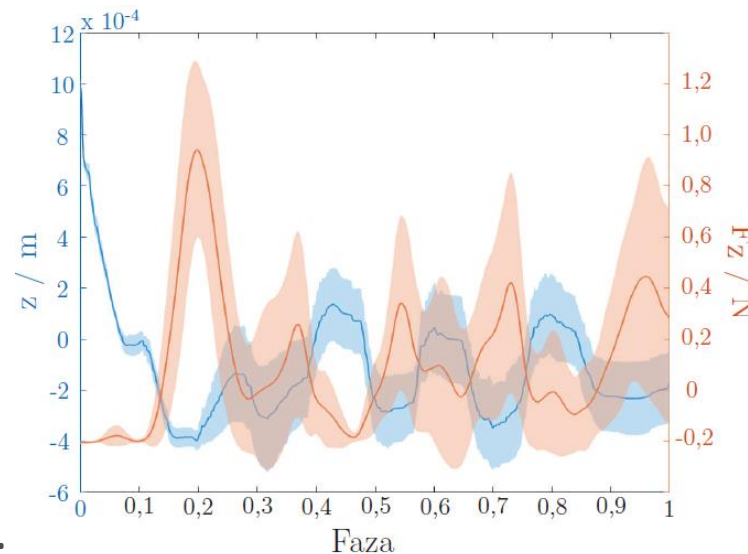


Univerza v Ljubljani | Medicinska fakulteta
INŠTITUT ZA MIKROBIOLOGIJO IN IMUNOLOGIJO



- Kvaliteta nanosa je ocenjena na podlagi:
 - poteka kontaktne sile med iglo in ploščo,
 - oblike strukture po nanosu na tarčno ploščo.
- Kompenzacija sile deluje ustrezno.
 - Povprečna sila po začetnem stiku znaša 0,3 N.
- Vzorci so na tarčnem mestu nanešeni različno.
 - Enakomerno ali skoncentrirano.
 - Nismo uspeli določiti vizualne značilke za ocenitev kvalitete nanosa.
- 11 % neuspešno identificiranih kolonij je primerljivo z uspešnostjo nanosa laborantov [1].
- Izboljšanje rezultatov identifikacije:
 - izboljšanje ponovljivosti nanosa,
 - zagotavljanje kvalitete matriksa.
 - Tekočina, ki je nanešena pred analizo z masnim spektrometrom.
 - Kvaliteta lahko vpliva na oceno identifikacije.

$$p(t) = p_r(t) + K \int f(t) dt, \quad K = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ K_Z \end{bmatrix}$$



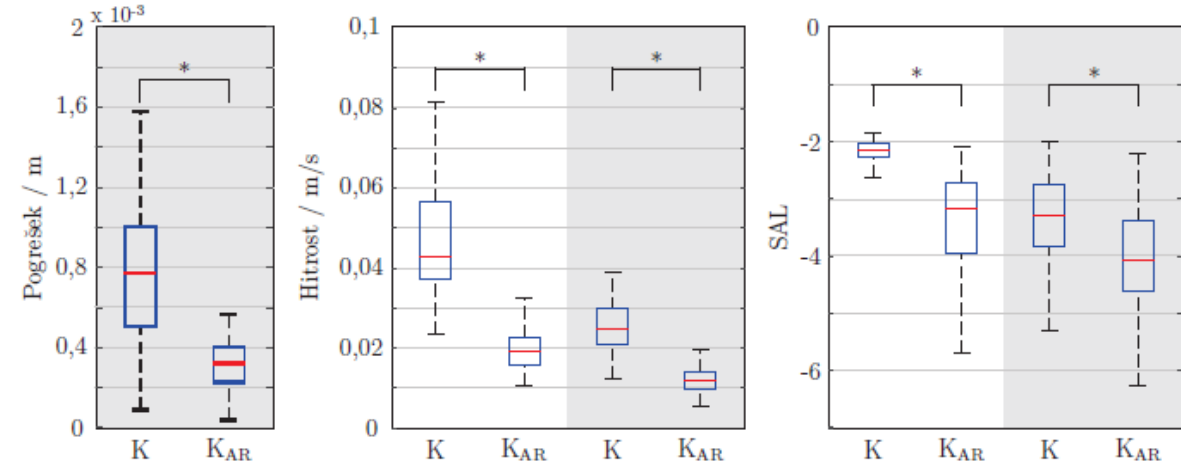
	<i>Acinetobacter baumannii</i>	<i>Staphylococcus epidermidis</i>
Št. vzorcev	36	20
Št. vzorcev z oceno pod 1.70	3	1
Št. vzorcev brez identifikacije	2	0
Št. neveljavnih vzorcev	5	1
Neuspešna identifikacija [%]	13.9	5
Povprečna ocena brez neveljavnih identifikacij	2.05 ± 0.21	2.06 ± 0.13
Povprečna ocena z neveljavnimi identifikacijami	1.94 ± 0.54	2.04 ± 0.16

[1] K. Chudejova, M. Bohac, A. Skalova, V. Rotova, C. C. Papagiannitsis, J. Hanzlickova, T. Bergerova in J. Hrabak, "Validation of a novel automatic deposition of bacteria and yeasts on maldi target for maldi-tof ms-based identification using maldi colonyst robot," *PLoS One*, vol. 12, st. 12, str. e0190038, 2017

Validacija učnega vmesnika

- Učni vmesnik sestavljata dve ključni funkcionalnosti:
 - sistem obogatene resničnosti kot pomoč pri izvajanju demonstracij,
 - sistem zapisa demonstracij z metodo DMP (validirano v sklopu procesa odvzema kolonije).
- Protokol eksperimenta:
 - 20 operaterjev,
 - 10 različnih referenčnih točk.
- Z uporabo sistema obogatene resničnosti je generirana napaka pozicioniranja signifikantno manjša.
 - Posledično nižja hitrost in manjša gladkost giba.

K - kinestetično (brez obogatene resničnosti) □ Območje približevanja
K_{AR} - kinestetično (z obogateno resničnostjo) ■ Neposredna bližina



Sklepne ugotovitve

1. Kinestetično učenje je primerno za demonstracijo finih gibov
 - S pristopom CRT so generirani pogreški pozicioniranja manjši.
 - Vizualno skaliranje signifikantno izboljša natančnost pozicioniranja.
 - Izzivi: študija na gibu, ki ni omejen v ravnino (referenca prikazana z uporabo očal za navidezno resničnost).
2. Metodi DMP in GMM sta primerni za zapis finih gibov
 - (z zadostnim povečevanjem števila baznih funkcij in komponent).
 - GMM je računsko potratna metoda.
 - Nadgradnja metode GMM s prilagajanjem gostote komponent omogoči enakovreden zapis finih gibov z manjšim številom uporabljenih komponent in posledično krajšim časom izračunavanja.
 - Izzivi: preizkus nadgradnje na drugih metodah (ProMP, KMP), podrobna analiza računske kompleksnosti in preizkus metode na zajetih demonstracijah.
3. Sodelujoči roboti in kinestetično učenje so primerni za vpeljavo v laboratorijsko okolje
 - Proces identifikacije bakterijskih kolonij je bil primerljiv z uspešnostjo laboranta.
 - Obogatena resničnost signifikantno vpliva na natančnost pozicioniranja izvedenih demonstracij.
 - Izzivi: ponovna izvedba študije z uporabo konsistentnega matriksa in z analizo vpliva dodatne obdelave nanešenih vzorcev (npr. z mravljično kislino).

1. Ocena primernosti kinestetičnega učenja za demonstracijo finih gibov v primerjavi z uveljavljenima pristopoma teleoperacije in kooperativnega robotskega orodja na podlagi dosežene natančnosti in uporabniške izkušnje.
 - Baumkircher, Aljaž, Marko Munih, and Matjaž Mihelj. "Performance analysis of learning from demonstration approaches during a fine movement generation." *IEEE Transactions on Human-Machine Systems* 51.6 (2021): 653-662.
2. Ocena primernosti metod DMP in GMM za zapis finih gibov in predlog nadgradnje metode GMM za bolj učinkovit zapis finih gibov.
 - Baumkircher, Aljaž, Marko Munih, and Matjaž Mihelj. "Improving Kinesthetic Teaching of Fine Tasks Using a Teaching Agent." *International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region*. Springer, Cham, 2022.
3. Metoda kinestetičnega učenja finih robotskih gibov z uporabo učnega vmesnika za namen klinično mikrobiološke aplikacije in validacija ustreznosti robotskih gibov na osnovi kvalitete izvedenih laboratorijskih preiskav.
 - Baumkircher, Aljaz, Katja Seme, Marko Munih, and Matjaž Mihelj. "Collaborative Robot Precision Task in Medical Microbiology Laboratory." *Sensors* 22.8 (2022): 2862.

Hvala za pozornost!

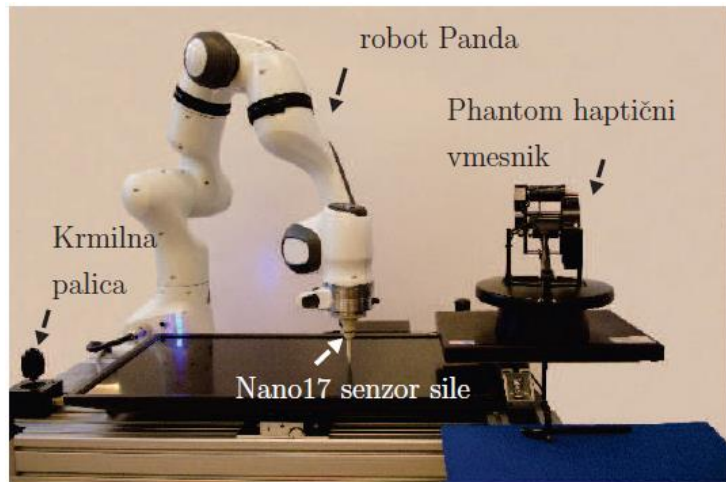
Obogateno kinestetično učenje finih robotskih gibov

Predzagovor doktorske disertacije

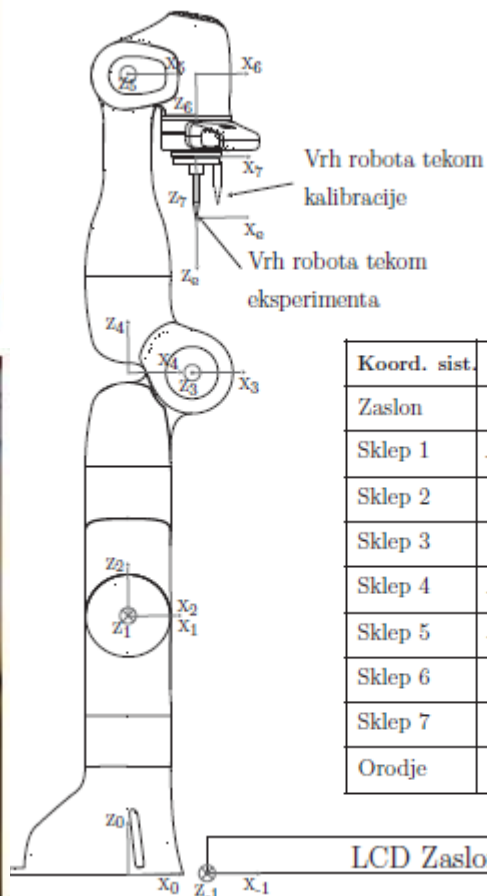
Aljaž Baumkircher

Mentor: prof. dr. Matjaž Mihelj

Kalibracija Denavit-Hartenberg parametrov

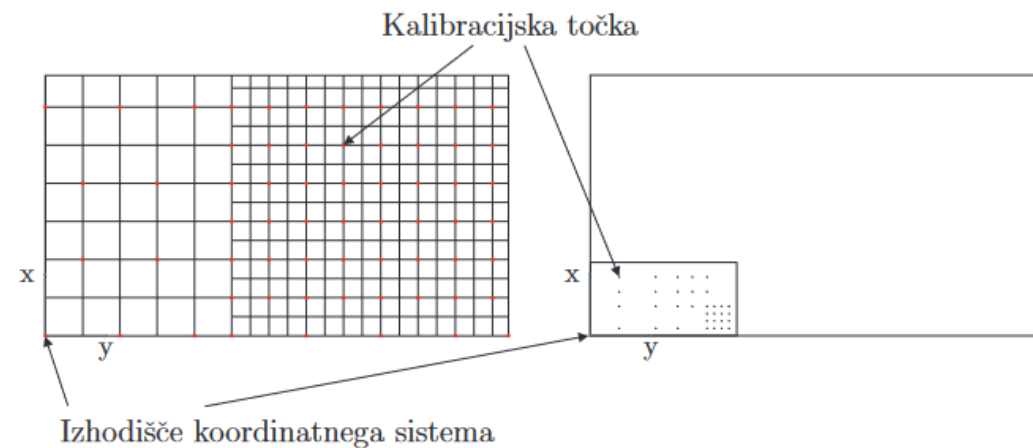


$$\varphi = [\alpha \ a \ d \ \theta \ q]^T \quad x = f(\varphi).$$



Koord. sist.	a (m)	d (m)	α (rad)	θ (rad)
Zaslon	0.0110	0.4637	1.5715	0.0066
Sklep 1	-0.0008	0.3352	-1.5677	0.0020
Sklep 2	0.0006	-0.0004	1.5682	-0.0011
Sklep 3	0.0828	0.3178	1.5733	-0.0009
Sklep 4	-0.0825	0.0020	-1.5737	-0.0020
Sklep 5	-0.0002	0.3852	1.5674	0.0147
Sklep 6	0.0876	-0.0001	1.5717	-0.0196
Sklep 7	0.0003	0.2011	0.0150	1.5882
Orodje	0.0000	0.0745	0.0000	0.0000

LCD Zaslon



Joint	a (m)	d (m)	α (rad)	θ (rad)
Joint 1	0	0.333	0	θ_1
Joint 2	0	0	$-\frac{\pi}{2}$	θ_2
Joint 3	0	0.316	$\frac{\pi}{2}$	θ_3
Joint 4	0.0825	0	$\frac{\pi}{2}$	θ_4
Joint 5	-0.0825	0.384	$-\frac{\pi}{2}$	θ_5
Joint 6	0	0	$\frac{\pi}{2}$	θ_6
Joint 7	0.088	0	$\frac{\pi}{2}$	θ_7
Flange	0	0.107	0	0

Demonstriranje finih dinamičnih robotskih gibov

- V nekaterih primerih je bolj kot pozicijski potek, pomembna ustrezna dinamika giba.
 - Ljudje nimamo razvitih sposobnosti za ocenjevanje odstopanja od dinamike giba.
- Za analizo sposobnosti operaterjev smo pripravili enostaven eksperiment v sklopu 1. študije.
 - Operaterji so generirali gib vzdolž 10 mm dolge ravne črte.
 - Z vrhom robota so sledili tarči, ki se je premikala vzdolž črte in določala dinamiko.
 - Enakomerno gibanje s frekvenco 0,8 Hz in 1,6 Hz.
- Ugotovitve:
 - Operaterji so uspešno generirali frekvenco giba.
 - Pri generiranju je prihajalo do opaznega časovnega zamika.
 - Verjetno zamik pri zaznavanju spremembe in generiranju giba.
 - Do amplitudnih odstopanj prihaja tako pri nizki kot pri visoki frekvenci.
 - Izmerjene sile so relativno visoke in se večajo s frekvenco.
 - Posledica nepopolno kompenziranih dinamičnih modelov robota.
 - V kolikor bi referenčni gibi zahtevali bolj kompleksen gib, lahko sklepamo, da operaterji z uporabo tako visokih sil ne bi bili sposobni generirati ustreznega giba z zahtevano natančnostjo.
 - V primeru teleoperacije sile niso problematične, je pa problem sočasne uporabe večih naprav (npr. robot Phantom in krmilna palica).

Kinestetično učenje

	$f_1 = 0,8 \text{ Hz}$	$f_2 = 1,6 \text{ Hz}$
<i>Izmerjena frekvenca</i> [Hz]	$0,81 \pm 0,02$	$1,61 \pm 0,03$
<i>Časovni zamik</i> [ms]	171 ± 25	480 ± 9
<i>Amplitudno odstopanje</i> [mm]	$0,19 \pm 0,49$	$0,22 \pm 0,36$
<i>Max. generirane sile</i> [N]	$34,7 \pm 20,7$	$48,9 \pm 28,6$

CRT

	$f_1 = 0,8 \text{ Hz}$	$f_2 = 1,6 \text{ Hz}$
<i>Izmerjena frekvenca</i> [Hz]	$0,81 \pm 0,04$	$1,60 \pm 0,08$
<i>Časovni zamik</i> [ms]	128 ± 22	482 ± 13
<i>Amplitudno odstopanje</i> [mm]	$0,32 \pm 0,63$	$0,30 \pm 0,52$
<i>Max. generirane sile</i> [N]	$32,6 \pm 9,9$	$63,5 \pm 18,1$

Teleoperacija

	$f_1 = 0,8 \text{ Hz}$	$f_2 = 1,6 \text{ Hz}$
<i>Izmerjena frekvenca</i> [Hz]	$0,82 \pm 0,04$	$1,61 \pm 0,06$
<i>Časovni zamik</i> [ms]	149 ± 15	482 ± 14
<i>Amplitudno odstopanje</i> [mm]	$0,39 \pm 0,82$	$0,36 \pm 0,64$