
PERSONALIZIRANA SENZORNO IN ROBOTSKO PODPRTA VADBA ZA ZGORNJE UDE

DOKTORSKA DISERTACIJA

Eva Čebašek

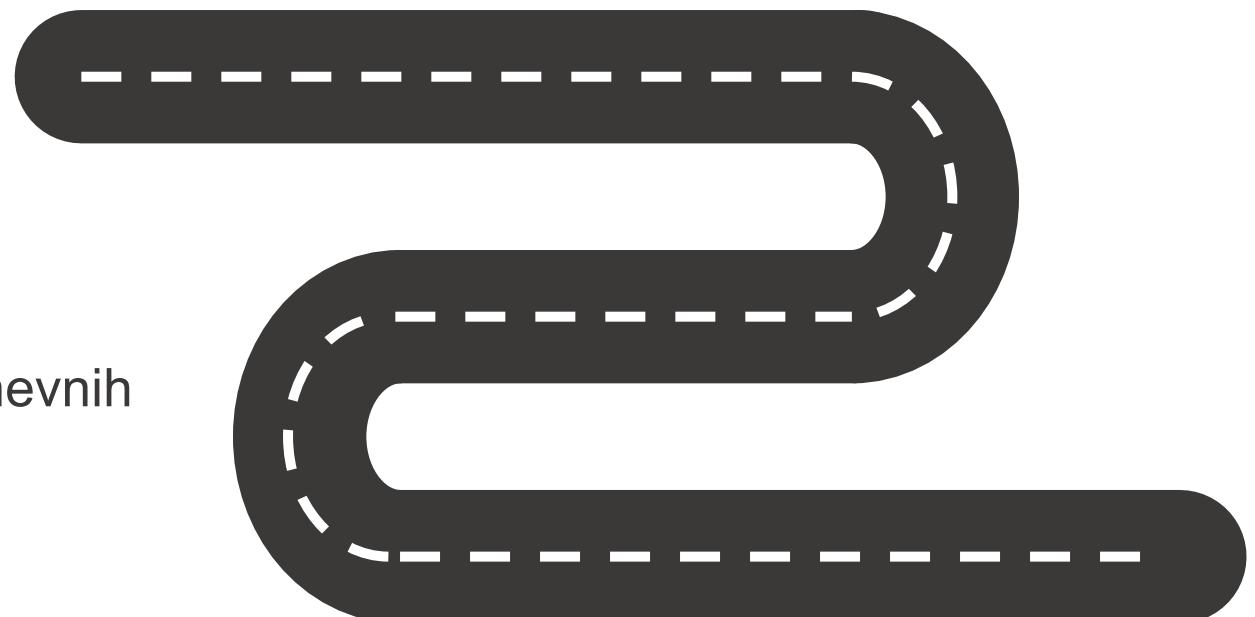
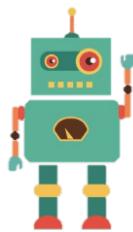
Mentor: prof. dr. Matjaž Mihelj

Somentorica: doc. dr. Urška Puh

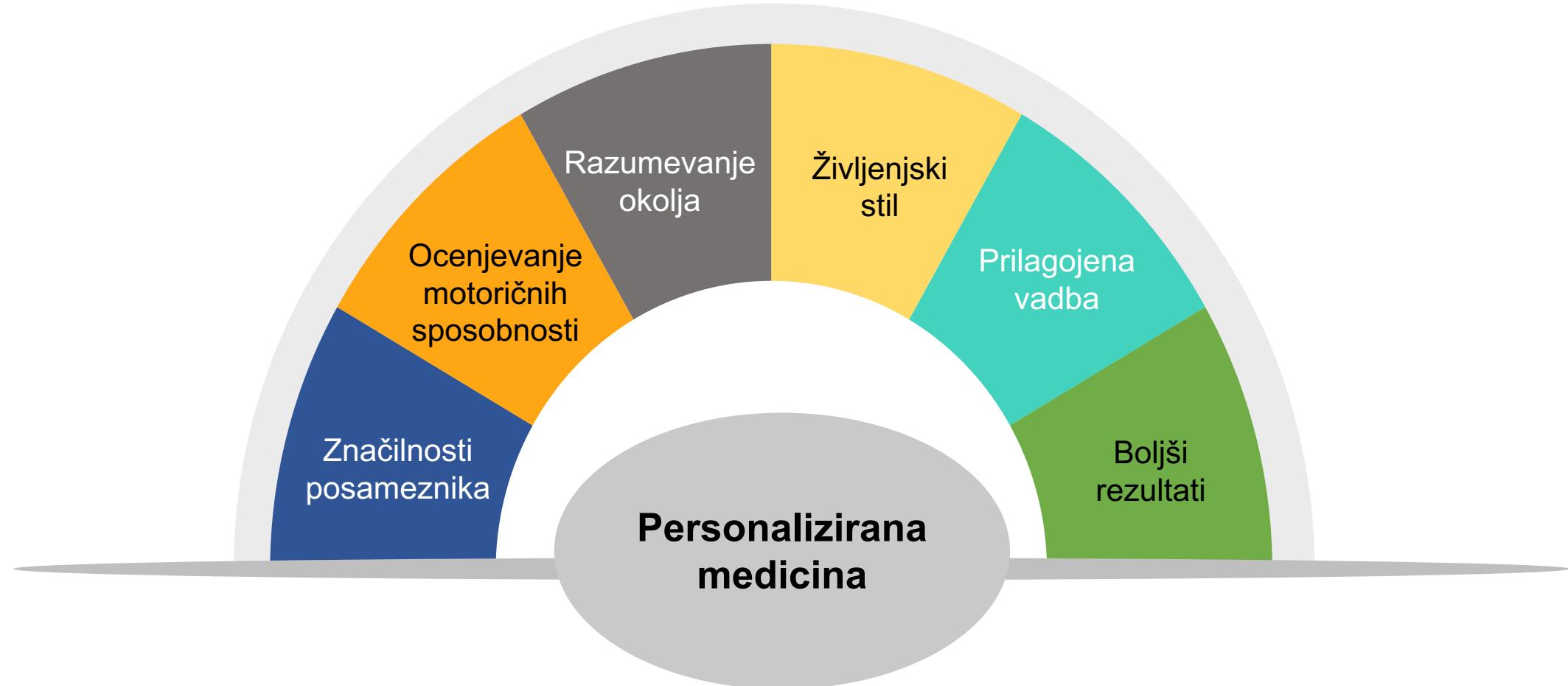
Ljubljana, oktober 2019

Potek predstavitev

- Uvod
- Cilji
- Nosljivi merilni sistem
- Analiza kliničnih testov
 - Parametri ocenjevanja motoričnih sposobnosti
 - Validacija parametrov glede na izid testa
- Analiza gibanja med izvajanjem vsakodnevnih dejavnosti
 - Časovna kvantizacija in segmentacija gibanja
 - Koordinirano gibanje zgornjih udov
- Ocenjevanje dvoročne vadbe z robotom
 - Ocenjevanje interakcije na osnovi senzorjev sil
- Izvirni prispevki disertacije



Personalizirana medicina



Spremljanje gibanja

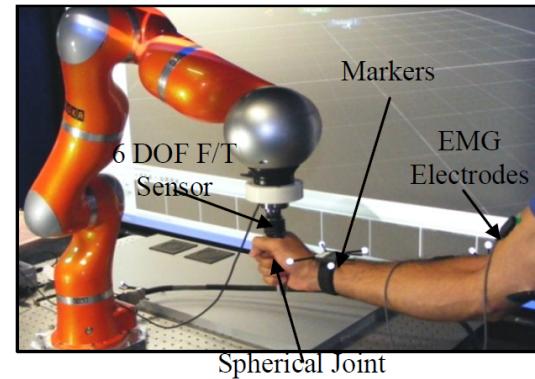
¹ Optični senzorji



² Inercialne
merilne enote



⁴ Senzorji sil in
navorov



³ Senzorji za
merjenje mišične
aktivnosti EMG



¹ El-Gohary, Mahmoud, and James McNames. "Shoulder and elbow joint angle tracking with inertial sensors." *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on* 59.9 (2012): 2635-2641.

² Wade, Eric, Avinash Rao Parnandi, and Maja J. Mataric. "Automated administration of the wolf motor function test for post-stroke assessment." *Pervasive Computing Technologies for Healthcare (PervasiveHealth), 2010 4th International Conference on-NO PERMISSIONS*. IEEE, 2010.

³ Stein, Joel, et al. "Electromyography-controlled exoskeletal upper-limb-powered orthosis for exercise training after stroke." *American journal of physical medicine & rehabilitation* 86.4 (2007): 255-261.

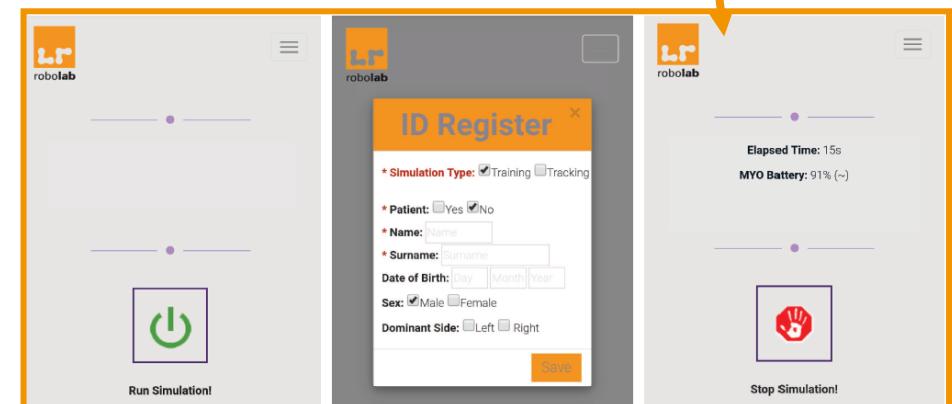
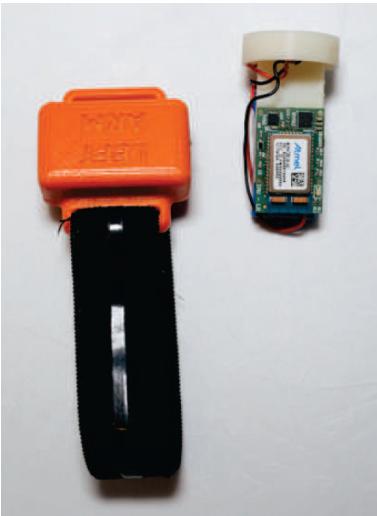
⁴ Ajoudani, Arash. *Transferring human impedance regulation skills to robots*. Vol. 110. Springer, 2016.

Cilji doktorske disertacije

- Analiza **kinematičnih parametrov** za ocenjevanje ter klasifikacijo gibov med izvajanjem **kliničnih testov** zgornjih udov.
- Analiza **dolgotrajnih meritev** in ocenjevanje posameznih dejavnosti pri izvajanju **vsakodnevnih opravil**.
- Zasnova **dvoročne robotske vadbe** in **analiza sil interakcije** med koordiniranim izvajanjem nalog.
 - ***Nosljivi meritni sistem z mobilno aplikacijo za zajem signalov***
 - ***Vzpostavitev meritnega protokola nalog z robotom***

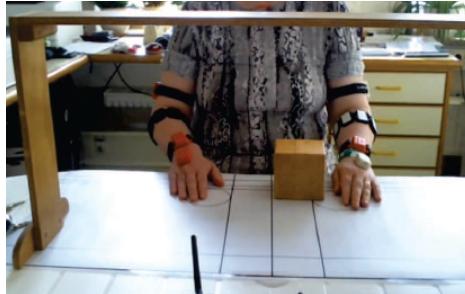
Nosljivi merilni sistem

- Sedem **IMU**
- Dve **EMG zapestnici**
- **Palični računalnik** z zunanjim baterijom
- **Mobilna aplikacija** za zajem signalov

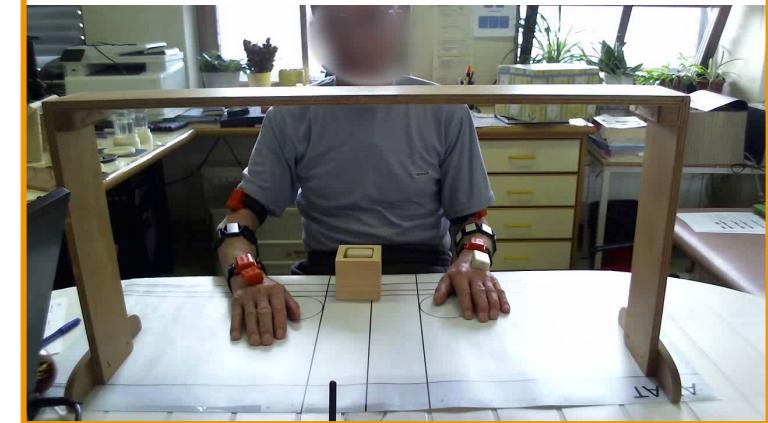


Ocenjevanje gibanja med izvajanjem kliničnih testov

- Funkcijski test zgornjega uda¹ARAT
 - Podskupina **grobi prijemi**
 - Podskupina **cilindrični prijemi**
 - Podskupina **pincetni prijemi**
 - Podskupina **grobi gibi**



Neokvarjen zgornji ud



Okvarjen zgornji ud



¹U. Puh in S. Lubej, "Merske lastnosti funkcijškega testa zgornjega uda," Fizioterapija, vol. 25, št. 1, str. 9–20, 2017.

Od surovih podatkov do parametrov ocenjevanja



- Čas giba
- Gladkost giba
- Podobnost trajektorij giba
- Stabilnost trupa
- Mišična aktivnost

1

Surovi podatki iz IME in EMG in interpolacija signalov

2

Izračun kinematičnih parametrov

4

Segmentacija na dele gibanja in dele mirovanja

3

Odstranitev časovne spremenljivke

5

Parametri analize gibanja



Od surovih podatkov do parametrov ocenjevanja

- Koti v sklepih
- Pozicija roke
- Mišična aktivnost

Časovno parametrizirane trajektorije

$$\bar{s} = \frac{s(t)}{L}$$

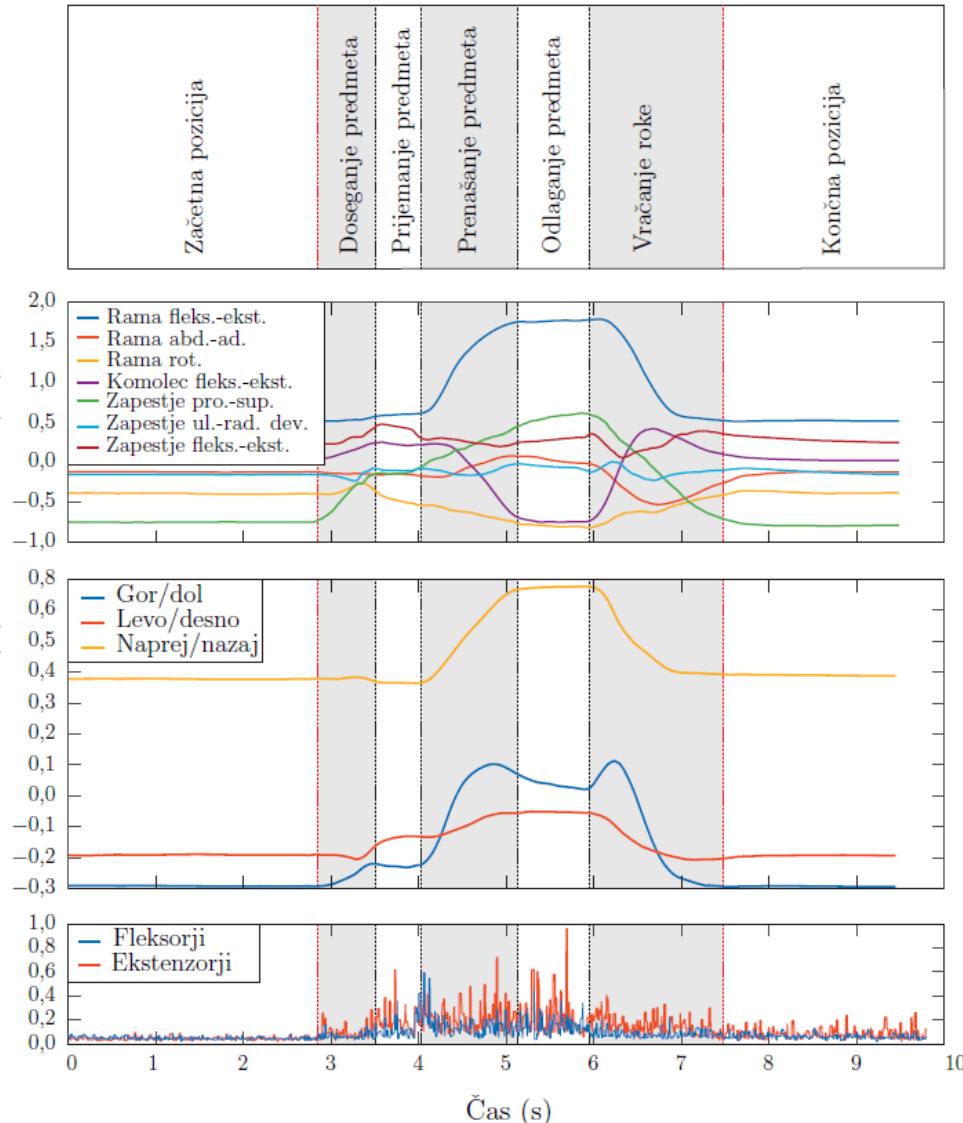
normalizirana dolžina loka

$$s(t) = \int_0^t \|\dot{\mathbf{p}}(t)\| dt$$

dolžina loka

$$L = \int_0^{T_m} \|\dot{\mathbf{p}}(t)\| dt$$

dolžina poti gibanja



Segmentacija gibanja

$$\mathbf{p}(\bar{s})$$



zaporedne točke v časovni domeni, kjer je hitrost enaka nič, so preoblikovane v eno točko

$$\nu(\bar{s})$$



spremembe v smeri gibanja

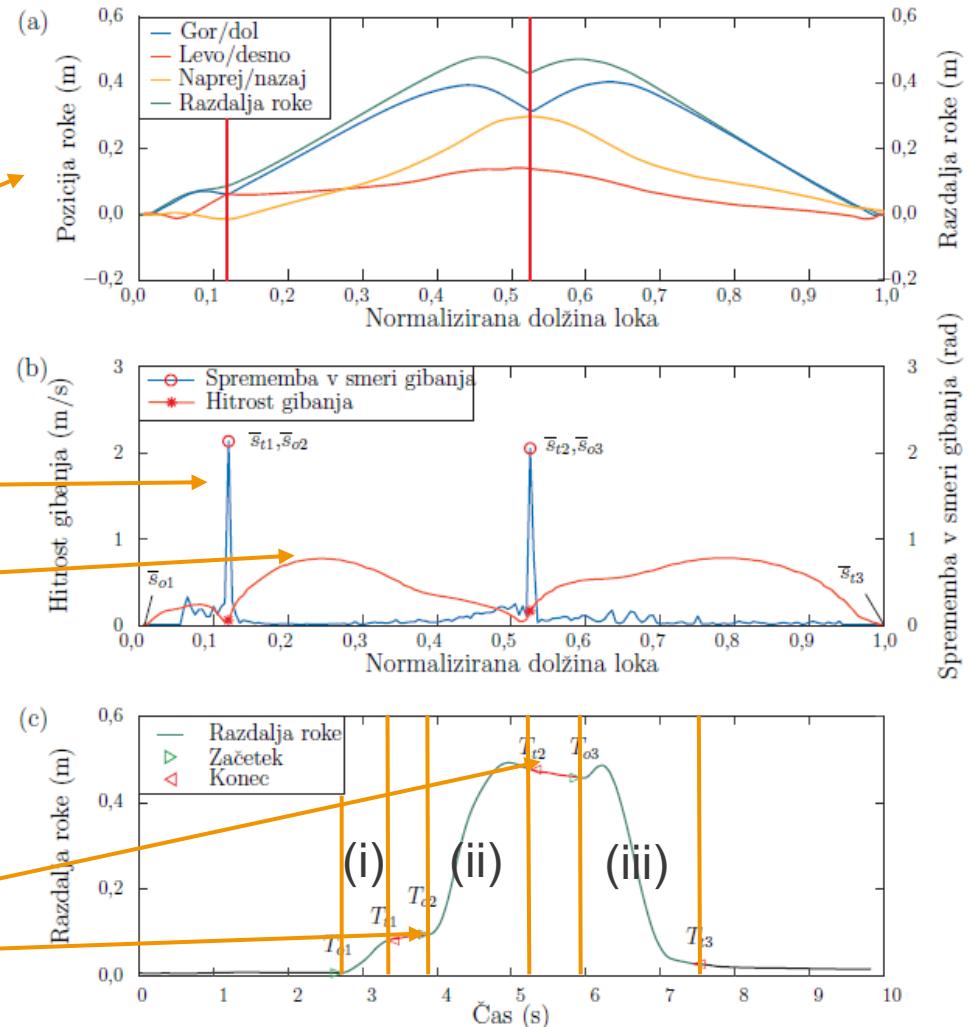
$$\|\dot{\mathbf{p}}(\bar{s})\|$$



spremembe hitrosti

$$x(t) = \begin{cases} x_o & t \leq t_o \\ x_o + \frac{1}{6}\eta_m(t - t_o)^3 & t_o \leq t \leq t_1 = t_o + \Delta T \end{cases}$$

Metoda minimalnega trzaja



Parametri analize gibanja

$$T_{m_i} = T_{t_i} - T_{o_i}$$

čas gibanja

$$\eta_{rot_i} = \ln \sqrt{\frac{(T_{t_i} - T_{o_i})^5}{2\theta^p} \int_{T_{o_i}}^{T_{t_i}} \left\| \frac{d^2 \boldsymbol{\omega}(t)}{dt^2} \right\|^2 dt}$$

gladkost giba

$$\rho_i = \max_{\bar{s} \in [\bar{s}_{o_i}, \bar{s}_{t_i}]} \left(\sqrt{(\varphi(\bar{s}) - \varphi(0))^2 + (\vartheta(\bar{s}) - \vartheta(0))^2 + (\psi(\bar{s}) - \psi(0))^2} \right)$$

stabilnost trupa

$$D_i = \sqrt{\frac{1}{\bar{s}_{t_i} - \bar{s}_{o_i}} \int_{\bar{s}_{o_i}}^{\bar{s}_{t_i}} \|\mathbf{p}(\bar{s}) - \mathbf{p}_r(\bar{s})\|^2 d\bar{s}}$$

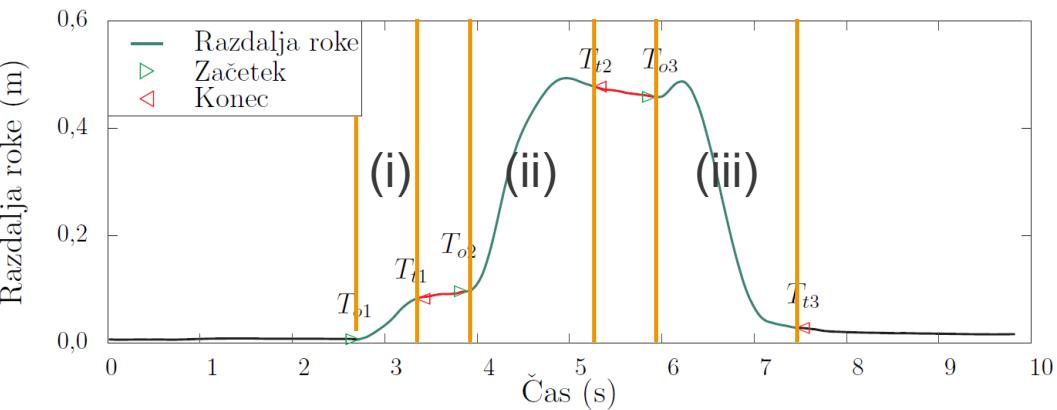
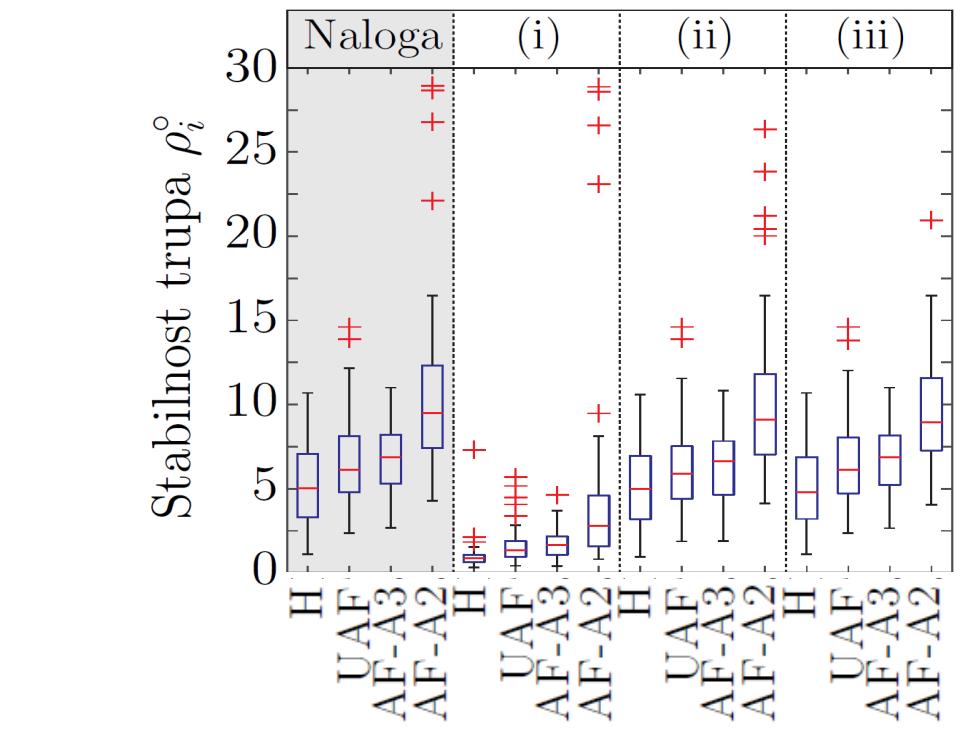
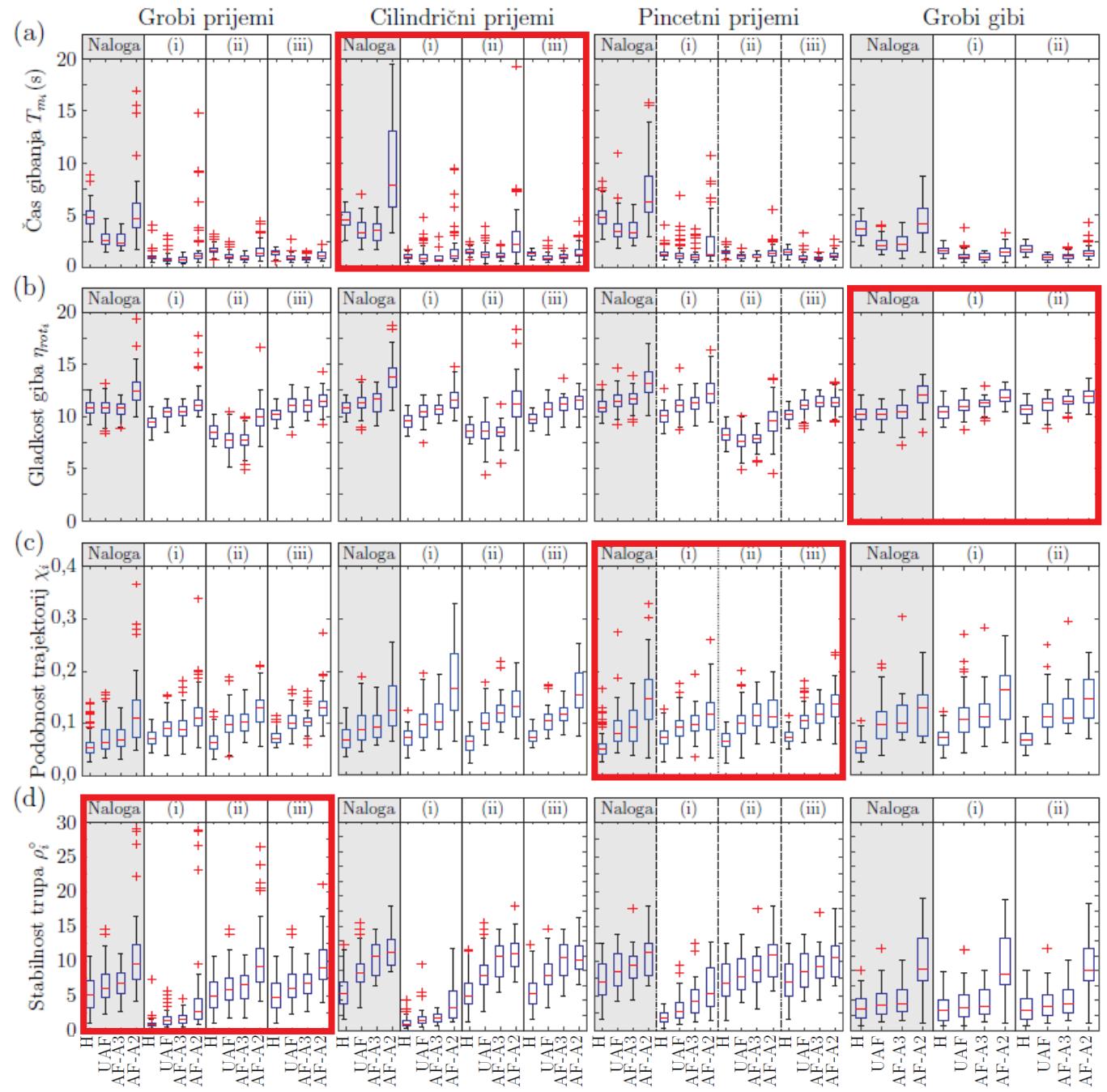
$$\chi_i = \alpha D_i + \beta \hat{\nu}_i$$

podobnost trajektorij

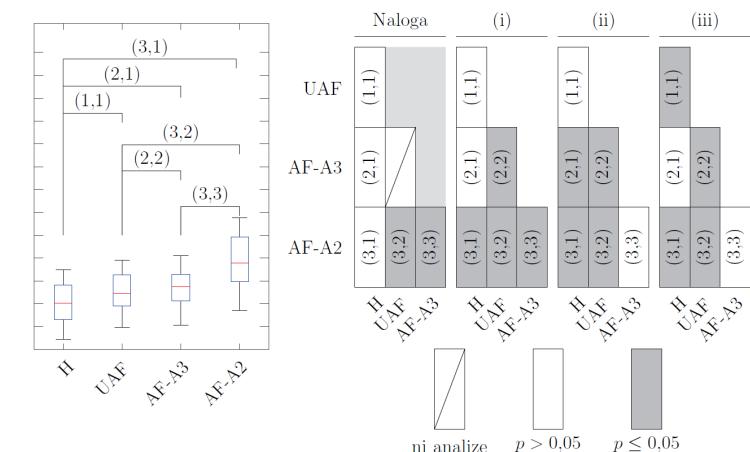
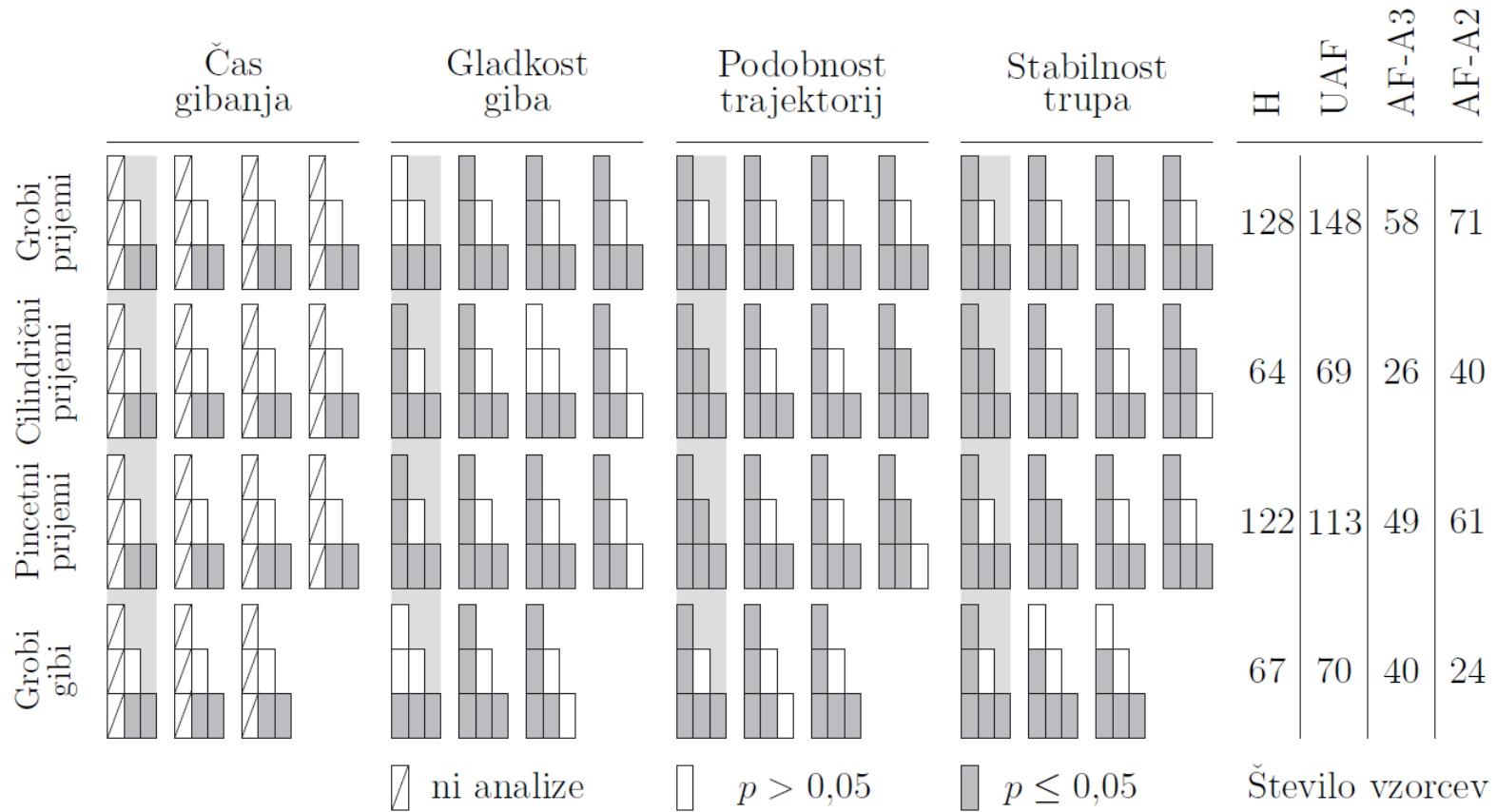
Evklidska razdalja

$$\hat{\nu}_i = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{1}{\bar{s}_{t_i} - \bar{s}_{o_i}} \int_{\bar{s}_{o_i}}^{\bar{s}_{t_i}} \nu^2(\bar{s}) d\bar{s}}$$

sprememba smeri gibanja



Parametri analize gibanja



Veljavnost parametrov glede na izid testa

	Grobi prijemi				Cilindrični prijemi				Pincetni prijemi				Grobi gibi		
	naloga	(i)	(ii)	(iii)	naloga	(i)	(ii)	(iii)	naloga	(i)	(ii)	(iii)	naloga	(i)	(ii)
$T_{m_i}(s)$	-0,77	-0,61	-0,60	-0,50	-0,81	-0,54	-0,68	-0,61	-0,62	-0,43	-0,66	-0,38	-0,64	-0,64	-0,45
η_{rot_i}	-0,80	-0,41	-0,78	-0,22	-0,76	-0,43	-0,82	-0,23	-0,67	-0,47	-0,69	-0,30	-0,64	-0,48	-0,22
χ_i	-0,47	-0,49	0,36	-0,28	-0,62	-0,38	-0,66	-0,39	-0,41	-0,29	-0,26	-0,33	0,03	0,02	-0,03
$\rho_i(^{\circ})$	-0,46	-0,46	-0,43	-0,37	-0,15	-0,33	-0,09	-0,06	-0,29	-0,39	-0,27	-0,26	-0,57	-0,55	-0,59

nizke korelacije

visoke korelacije

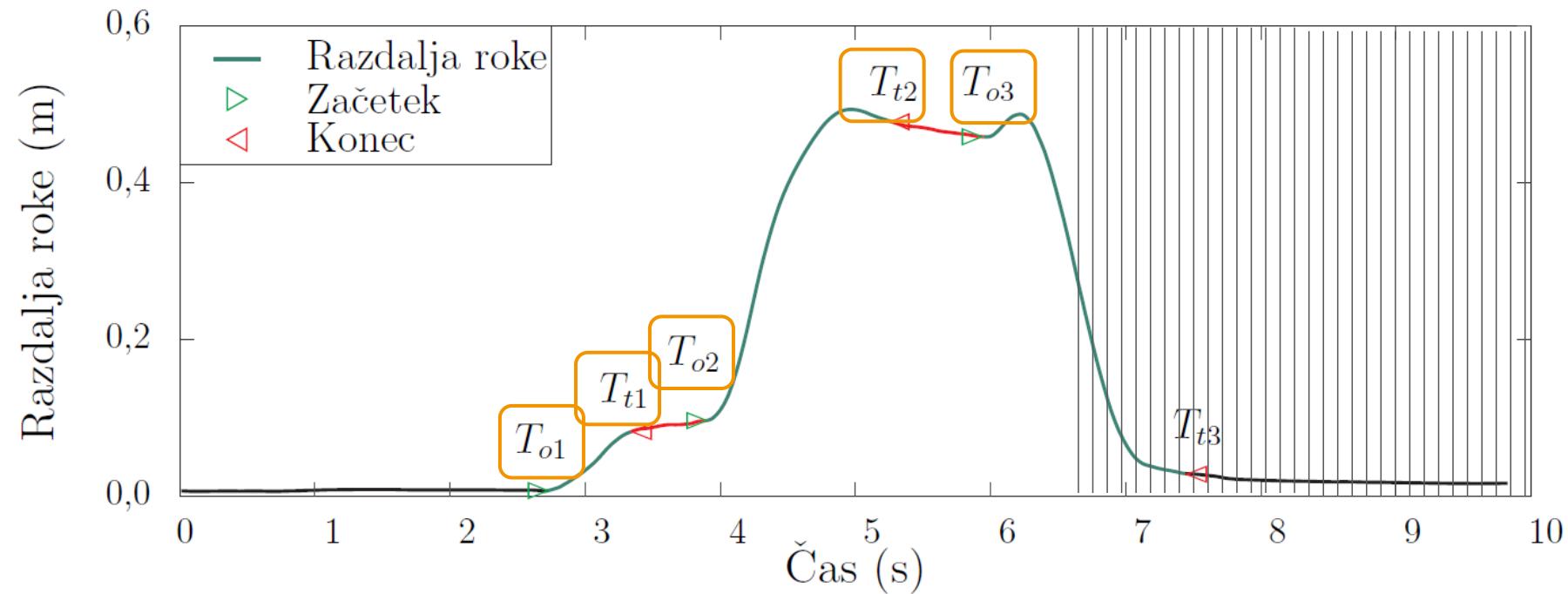
Segmentacija gibanja na posamezne faze omogoča podrobnejšo analizo specifičnih funkcionalnih omejitev zgornjega uda

Gibanje zgornjih udov je mogoče oceniti preko numeričnih parametrov

Merilni sistem je uporaben tudi izven laboratorijskega okolja

Analiza gibanja zgornjih udov med izvajanjem vsakodnevnih dejavnosti





Metoda segmentacije glede na gibe

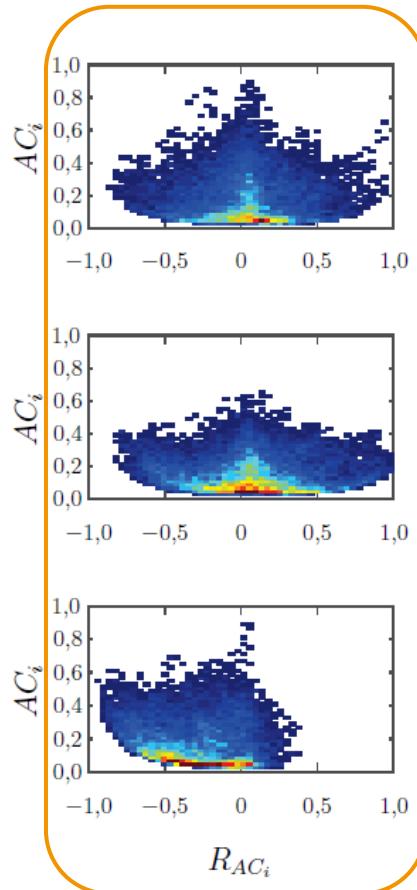
- analiza zaključenih gibov
- ocenjevanje dvoročnega gibanja

Časovna segmentacija z izbranim intervalom

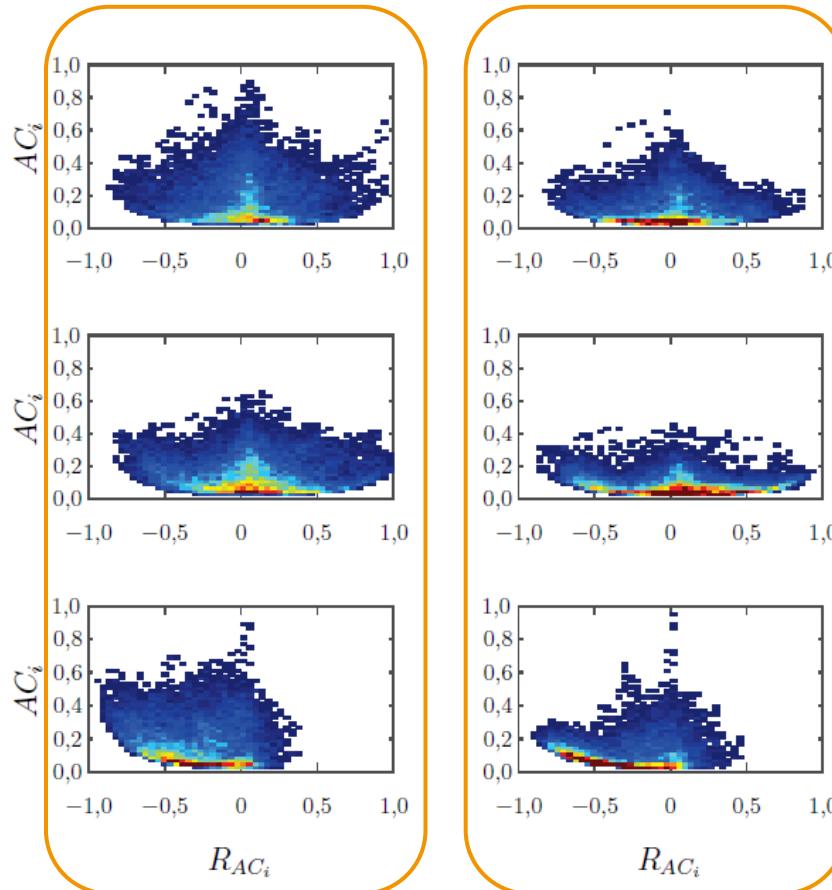
- kvanti aktivnosti
- vsota pospeškov
- bolj dejavni ali manj dejavni zgornji ud

Časovna kvantizacija

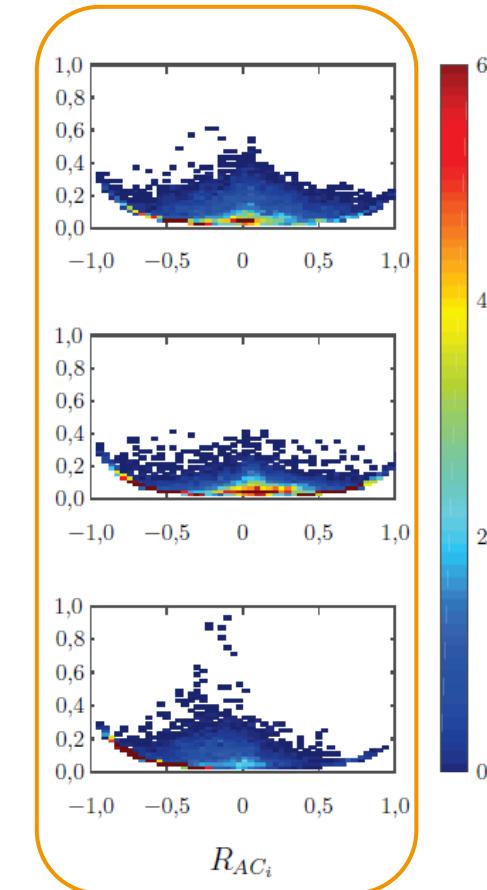
Zdrava oseba



Pacient z **nižjo** stopnjo okvare zgornjega uda



Pacient z **višjo** stopnjo okvare zgornjega uda



Čas (s)

$$AC_{(L,R)_i} = \frac{1}{T} \int_{T_{i-1}}^{T_i} \|\mathbf{a}_h(t)\| dt$$

$$AC_{(L,R)_i} = \frac{1}{T} \int_{T_{i-1}}^{T_i} \|\mathbf{a}_h(t) - \mathbf{g}\| dt$$

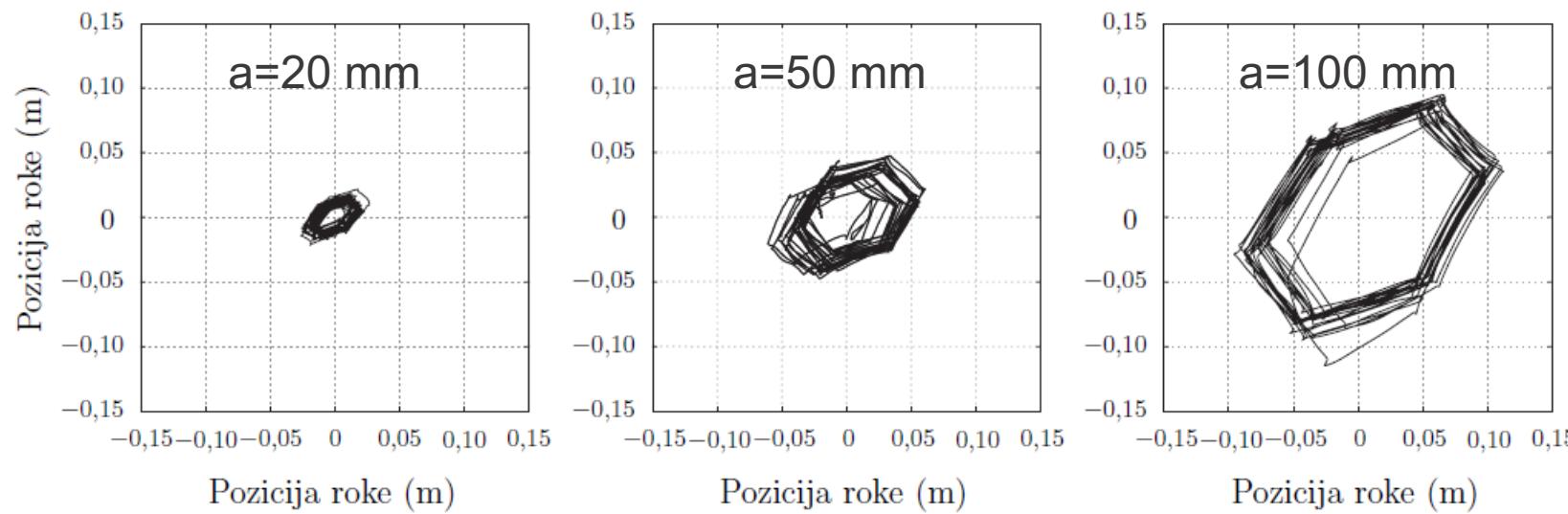
$$AC_{(L,R)_i} = \frac{1}{T} \int_{T_{i-1}}^{T_i} \|\mathbf{a}_h(t) - \mathbf{a}_t(t)\| dt$$

$$R_{AC_i} = \ln \frac{AC_{L_i} + 1}{AC_{R_i} + 1}$$

razmerje kvantov aktivnosti

Segmentacija gibanja

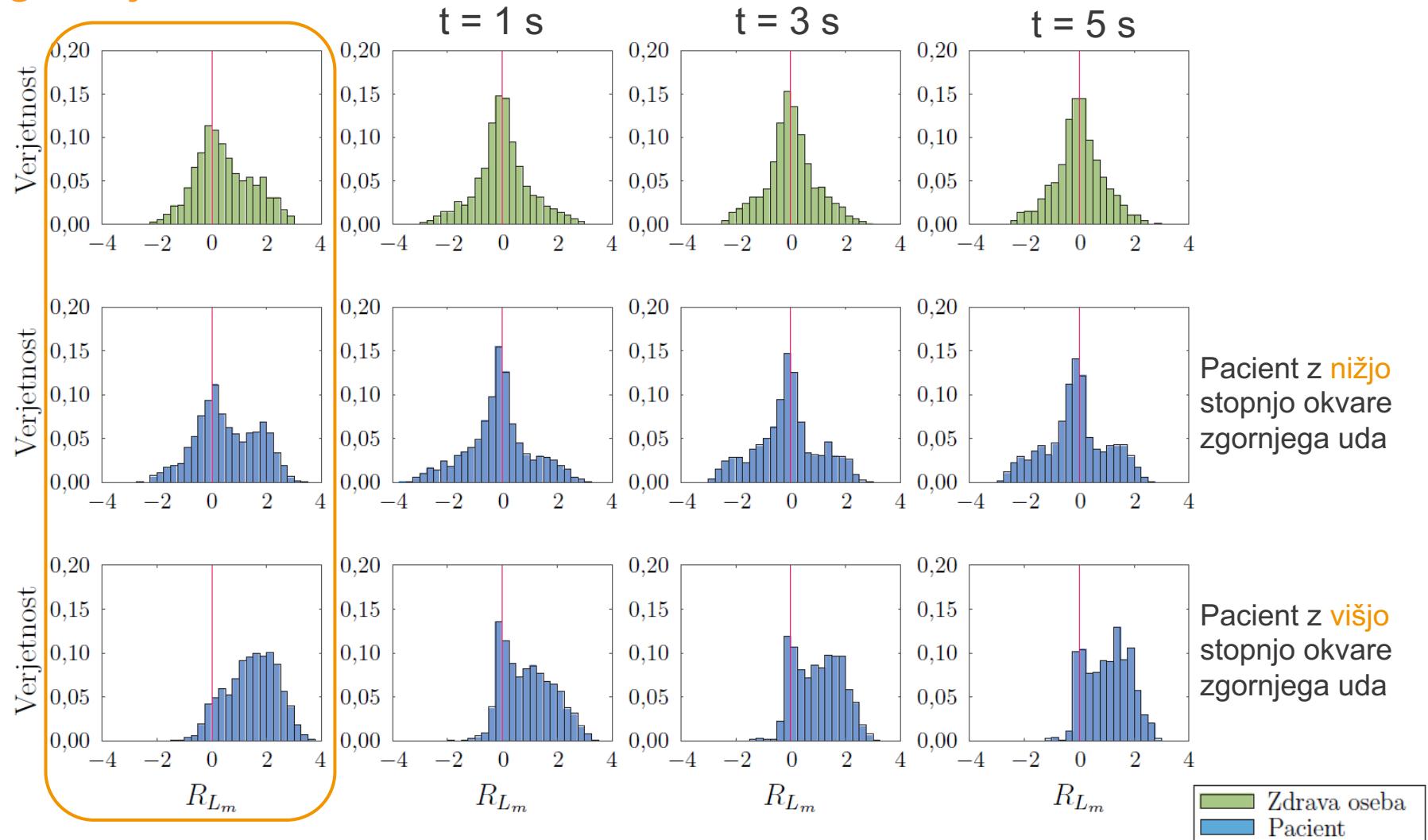
- **Veljavnost** metode segmentacije
- Spreminjanje **smeri** gibanja
- Spreminjanje **hitrosti**



Segmentacija gibanja

Razmerje
dolžine poti roke

$$R_{L_m} = \ln \frac{L_{mUAF}}{L_{mAF}}$$



Ocenjevanje koordinacije

Pearsonov linearni korelacijski koeficient

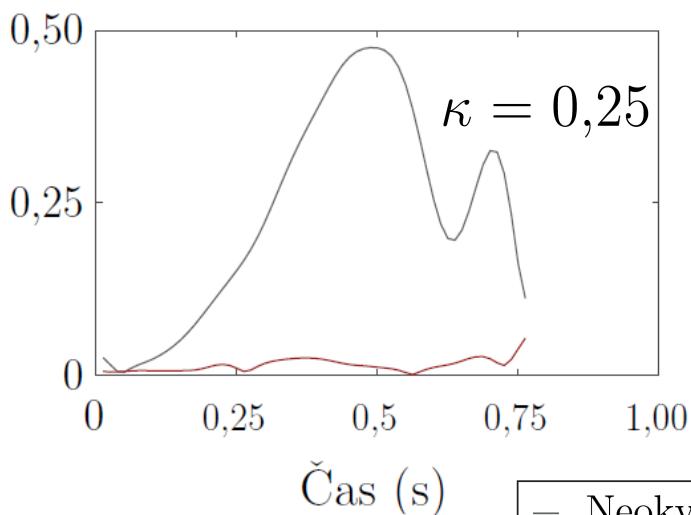
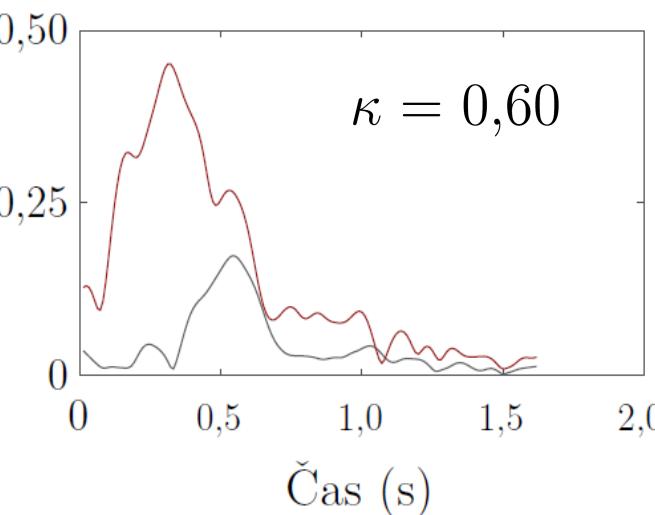
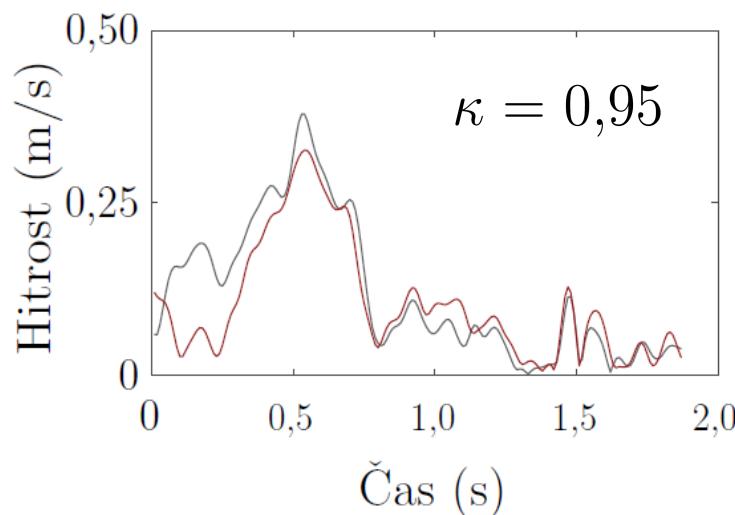
Fréchetova razdalja

$$R_V = \ln \frac{V_{UAF}}{V_{AF}}$$

$$R_{L_m} = \ln \frac{L_{m_{UAF}}}{L_{m_{AF}}}$$

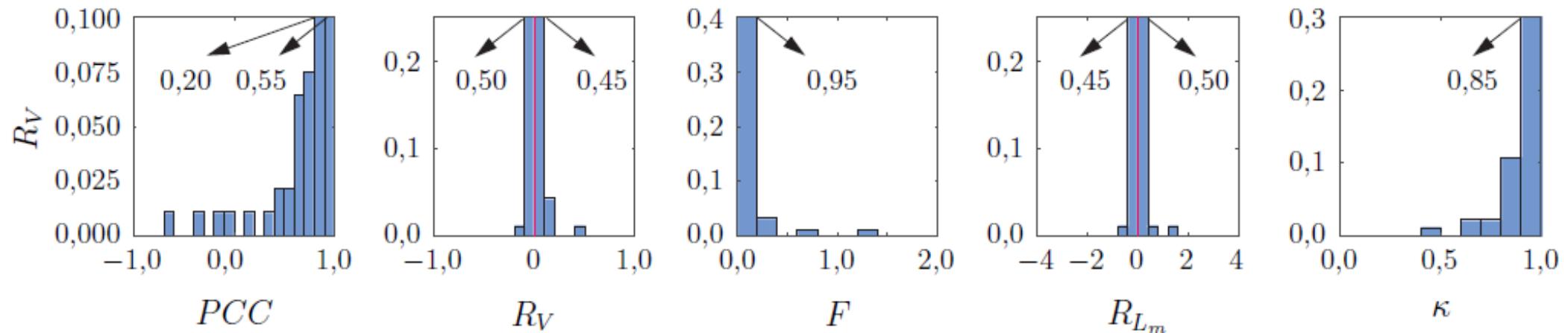
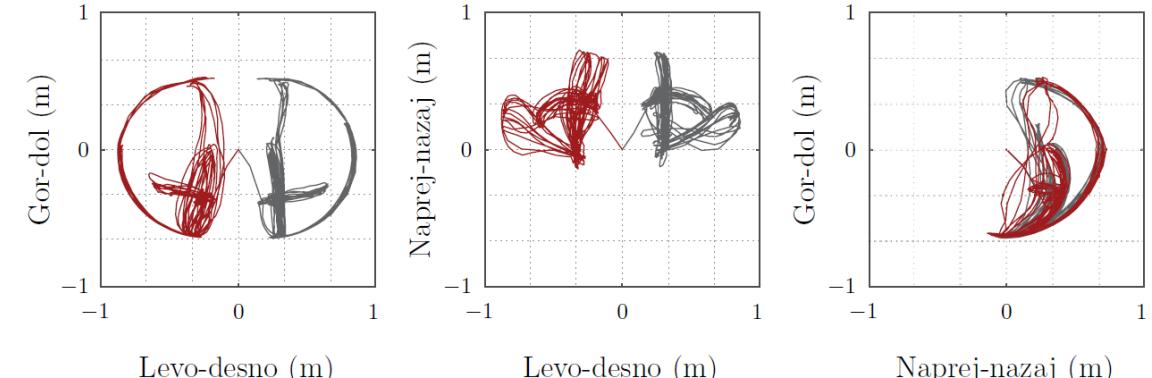
$$0 \leq \kappa \leq 1$$

$$\kappa = 1 - \frac{1}{4} \left(\frac{PCC}{\alpha_{PCC}} + \frac{F}{\alpha_F} + \frac{R_V}{\alpha_{R_V}} + \frac{R_{L_m}}{\alpha_{R_{L_m}}} \right)$$

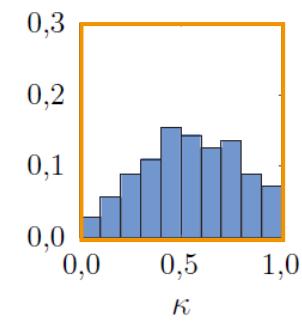
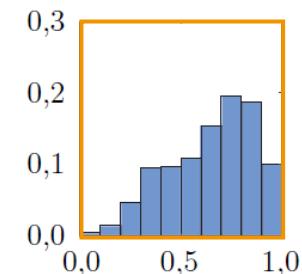
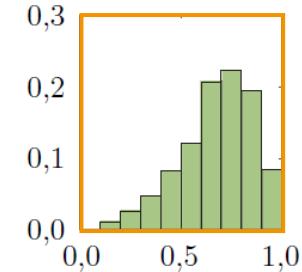
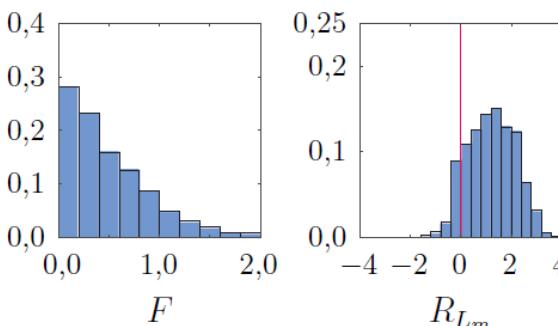
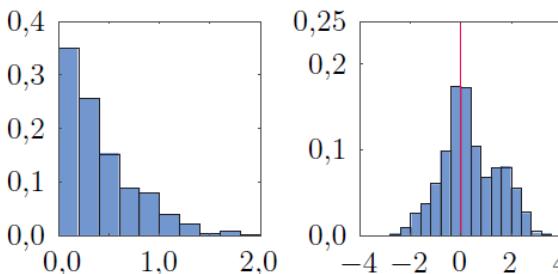
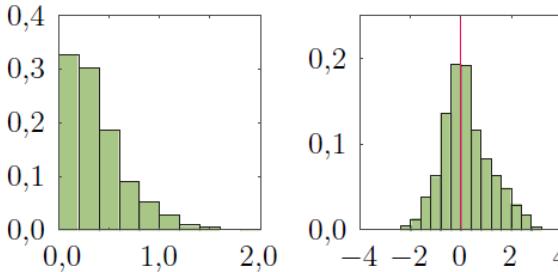
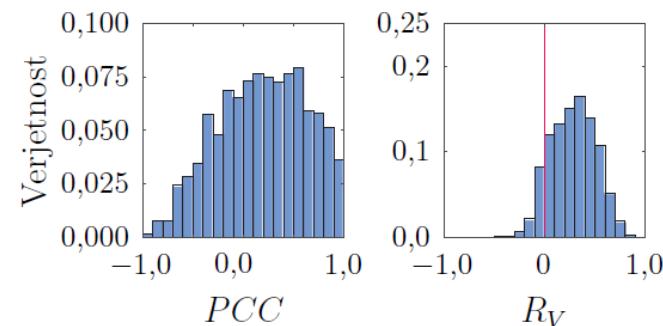
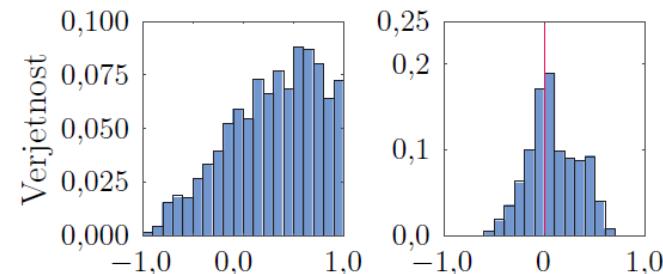
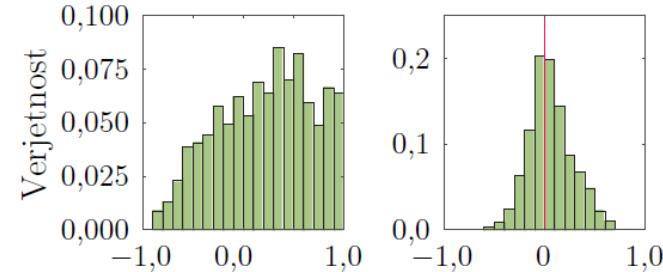


- Neokvarjen zgornji ud
- Okvarjen zgornji ud

Ocenjevanje koordinacije



Ocenjevanje koordinacije



$\kappa < 0,4\%$	$\text{med}(L_{m_{UAF}})(\text{m})$	$\text{med}(L_{m_{UAF}})(\text{m})$	$0,4 \leq \kappa < 0,7\%$	$\text{med}(L_{m_{UAF}})(\text{m})$	$\text{med}(L_{m_{UAF}})(\text{m})$	$\kappa \geq 0,7\%$	$\text{med}(L_{m_{UAF}})(\text{m})$	$\text{med}(L_{m_{UAF}})(\text{m})$
9	0,21	0,06	41	0,16	0,15	50	0,13	0,14
16	0,33	0,08	36	0,14	0,16	48	0,16	0,16
28	0,35	0,04	42	0,18	0,09	30	0,11	0,09

Pacient z **nižjo**
stopnjo okvare
zgornjega uda

Pacient z **višjo**
stopnjo okvare
zgornjega uda

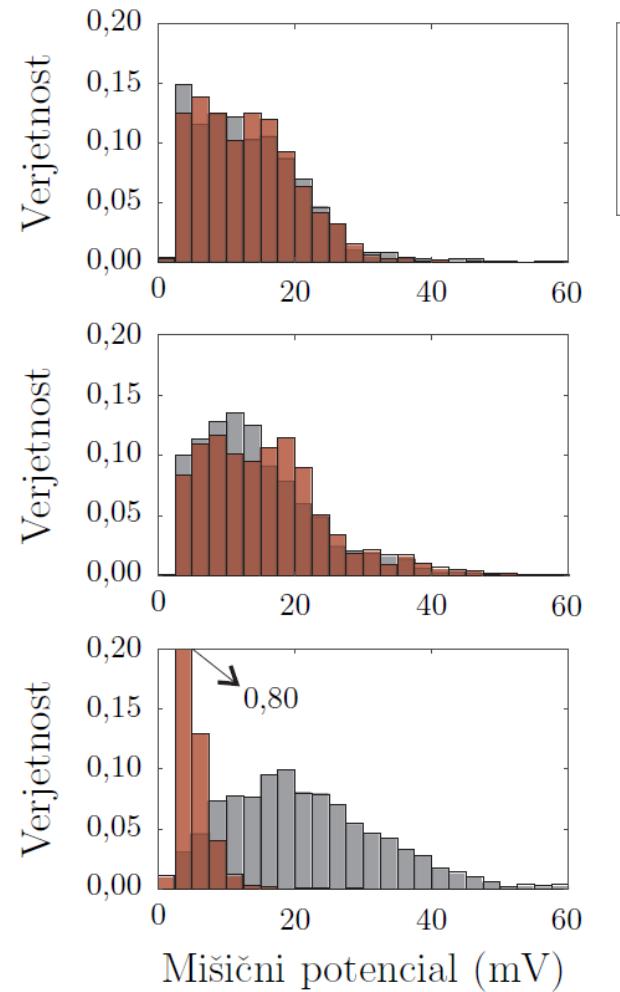
Zdrava oseba
Pacient

Mišična aktivnost



$$\hat{w}_{(L,R)_m} = \frac{1}{T_m} \int_{T_{om}}^{T_{tm}} \sqrt{\sum_{n=1}^8 w_n^2(t)} dt$$

$$R_{\hat{w}_m} = \ln \frac{\hat{w}_{(AF)_m}}{\hat{w}_{(UAF)_m}}$$



Dominanten/
neokvarjen zgornji ud

Nedominanten/
okvarjen zgornji ud

Dominanten/
neokvarjen zgornji ud

Nedominanten/
okvarjen zgornji ud

Zdrava oseba

Pacient

Pacient z **nižjo**
stopnjo okvare
zgornjega uda

Pacient z **nižjo**
stopnjo okvare
zgornjega uda

Pacient z **višjo**
stopnjo okvare
zgornjega uda

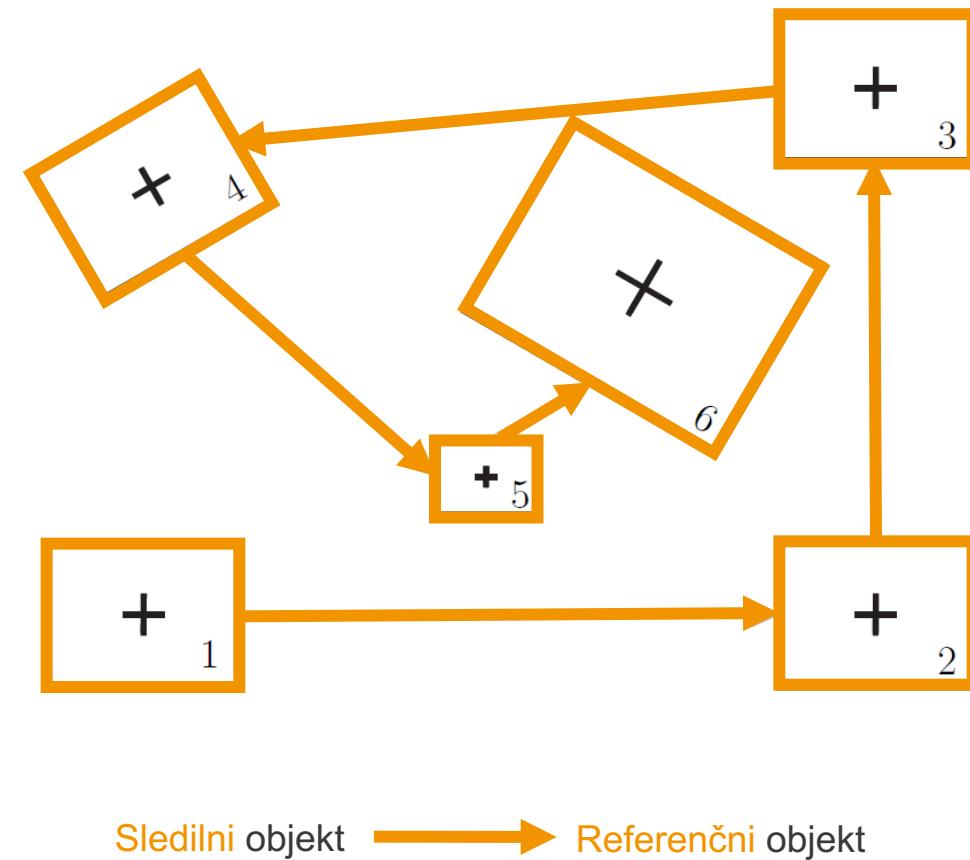
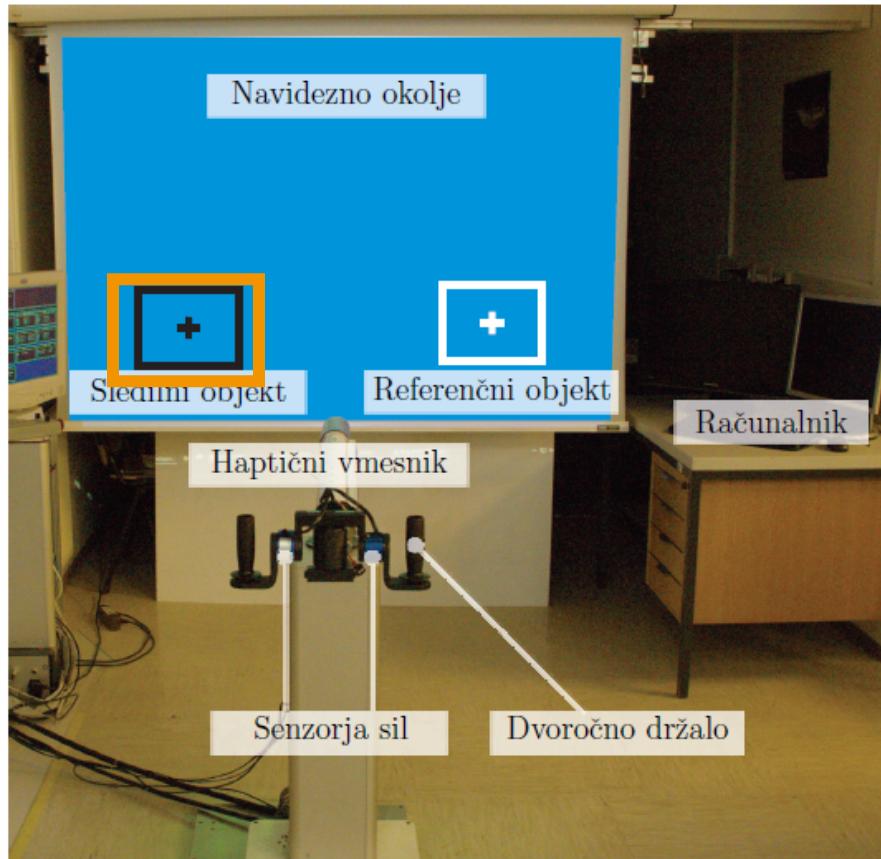
Pacient z **višjo**
stopnjo okvare
zgornjega uda

Uporaba časovne kvantizacije za hitro oceno motoričnih sposobnosti

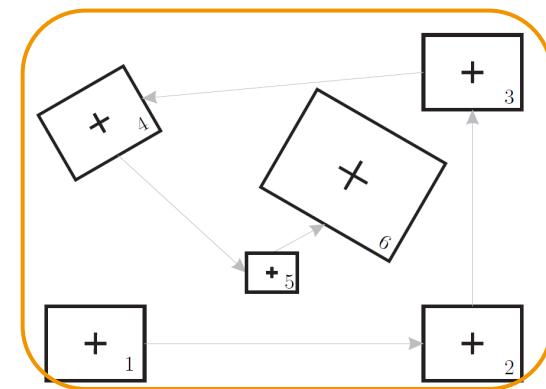
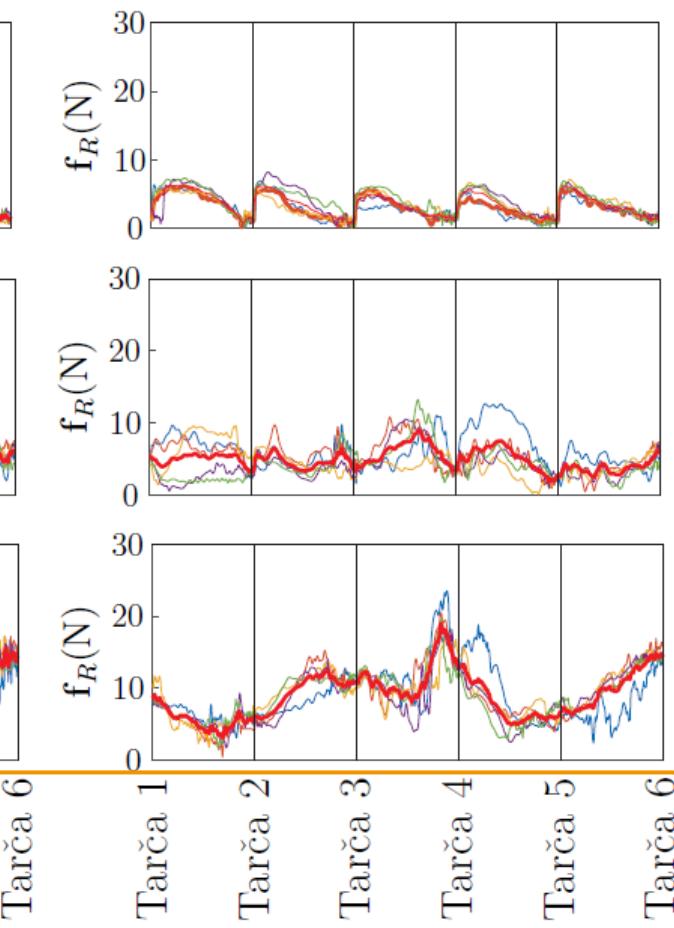
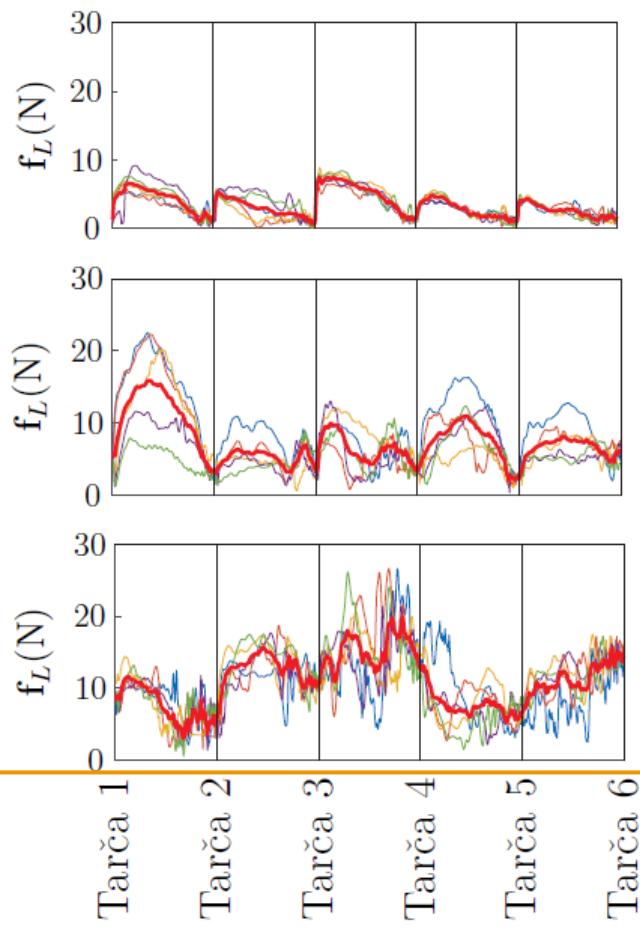
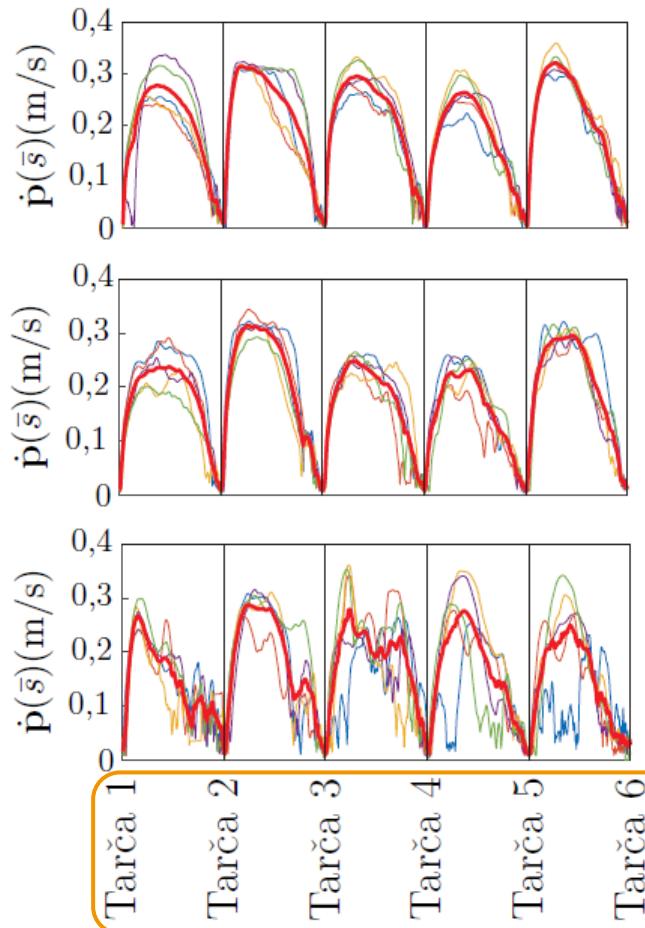
Segmentacija gibanja omogoča funkcionalno analizo dejavnosti

Lahko določimo stopnjo koordinacije gibanja

Zasnova dvoročne vadbe z robotom in analiza sil interakcije med izvajanjem nalog



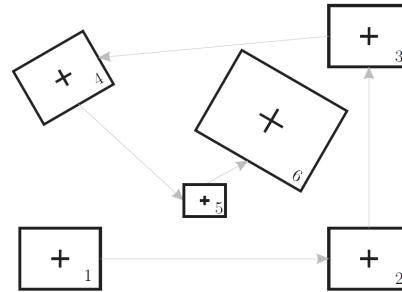
Hitrost in sile roke



Zdrava oseba

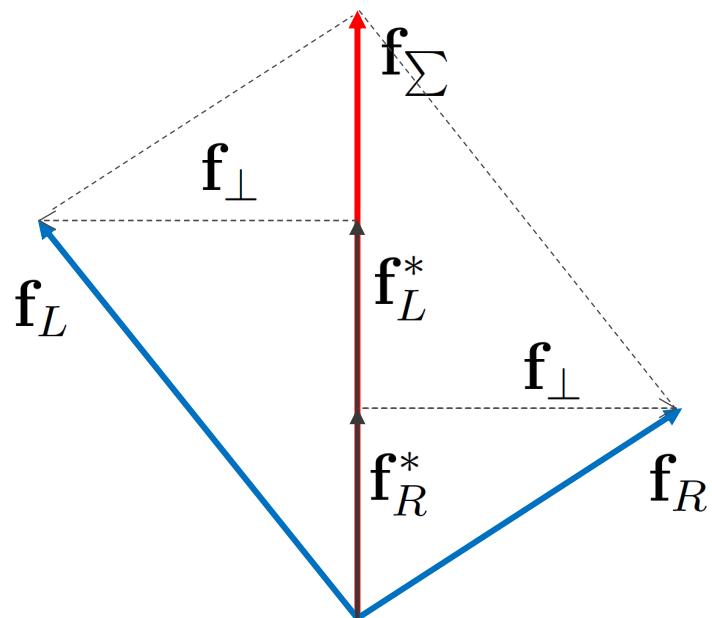
Pacient z **nižjo**
stopnjo okvare
zgornjega uda

Pacient z **višjo**
stopnjo okvare
zgornjega uda



Dekompozicija sil interakcije z robotom

$$\mathbf{f}_{\Sigma} = \mathbf{f}_L + \mathbf{f}_R = m\ddot{\mathbf{p}} + b\dot{\mathbf{p}} \quad \text{omogoča gibanje}$$



$$\mathbf{f}_R = (1 - \alpha)\mathbf{f}_{\Sigma} + \mathbf{f}_{\perp}$$

$$\mathbf{f}_L = \alpha\mathbf{f}_{\Sigma} - \mathbf{f}_{\perp} \quad \delta = \frac{1}{2} - \alpha$$

aktivni sili

$$\mathbf{f}_L^* = \alpha\mathbf{f}_{\Sigma} = \left(\frac{1}{2} - \delta\right) \mathbf{f}_{\Sigma} = \frac{1}{\|\mathbf{f}_{\Sigma}\|^2} (\mathbf{f}_L \cdot \mathbf{f}_{\Sigma}) \mathbf{f}_{\Sigma}$$

$$\mathbf{f}_R^* = (1 - \alpha)\mathbf{f}_{\Sigma} = \left(\frac{1}{2} + \delta\right) \mathbf{f}_{\Sigma} = \frac{1}{\|\mathbf{f}_{\Sigma}\|^2} (\mathbf{f}_R \cdot \mathbf{f}_{\Sigma}) \mathbf{f}_{\Sigma}$$

Ocenujemo sodelovanje, usklajenost in kakovost giba

$$\mathbf{f}_{\perp} = \mathbf{f}_{R\perp} = -\mathbf{f}_{L\perp} = \mathbf{f}_R - \mathbf{f}_R^* = \mathbf{f}_L - \mathbf{f}_L^*$$

Kooperativnost

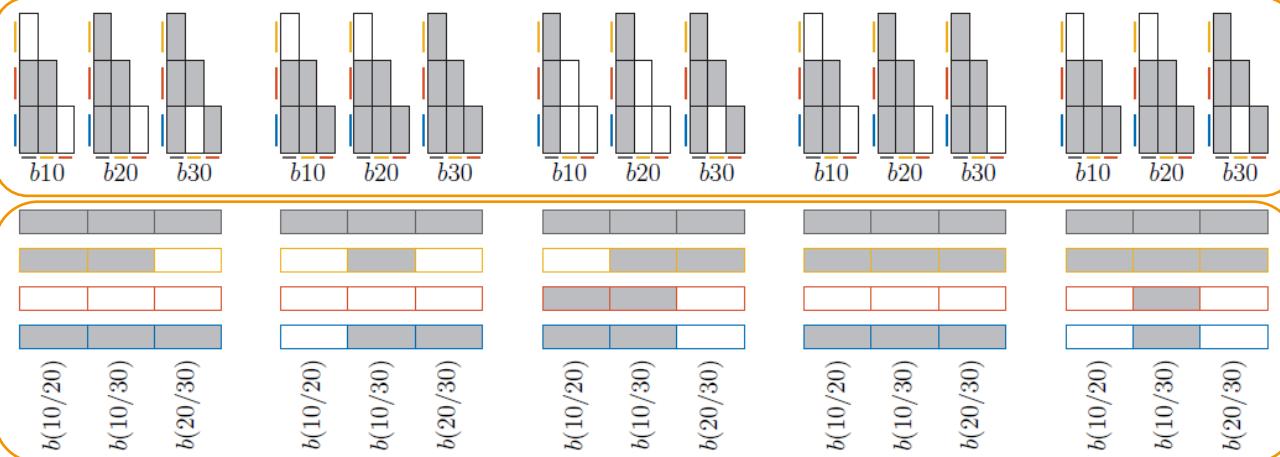
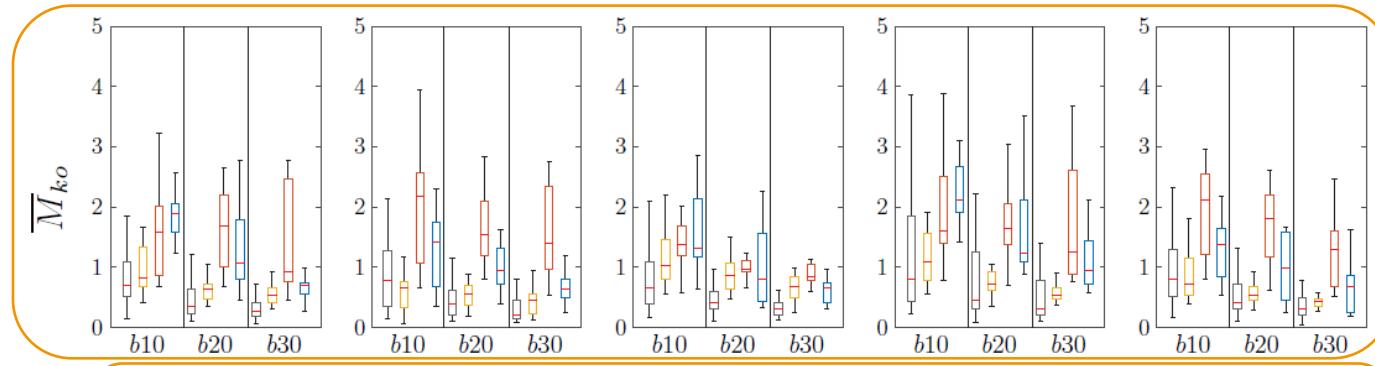
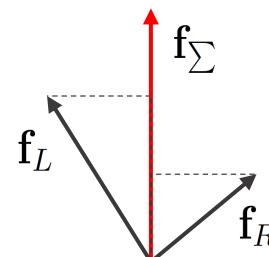
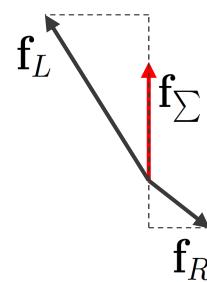
$$\overline{M}_{ko} = \frac{\sum_{k=1}^N \delta_k \|\mathbf{f}_{\sum_k}\|}{\sum_{k=1}^N \|\mathbf{f}_{\sum_k}\|}$$

Parameter kooperativnosti

$$\delta = 0 \longrightarrow \mathbf{f}_L^* = \mathbf{f}_R^* = \frac{1}{2}\mathbf{f}_{\sum}$$

$$|\delta| > \frac{1}{2}$$

$$|\delta| < \frac{1}{2}$$



- Zdravi preiskovanci
- Pacienti z nižjo stopnjo okvare desnega zgornjega uda
- Pacienti z višjo stopnjo okvare desnega zgornjega uda
- Pacienti z okvarjenim levim zgornjim udom
- \square $p > 0,05$
- \blacksquare $p \leq 0,05$

Učinkovitost sodelovanja

$$\overline{M}_{us} = \frac{\sum_{k=1}^N M_{us k} \|\mathbf{f}_{\Sigma_k}\|}{\sum_{k=1}^N \|\mathbf{f}_{\Sigma_k}\|}$$

$$M_{us k} = \frac{\|\mathbf{f}_{\Sigma_k}\|}{\|\mathbf{f}_{L_k}\| + \|\mathbf{f}_{R_k}\|}$$

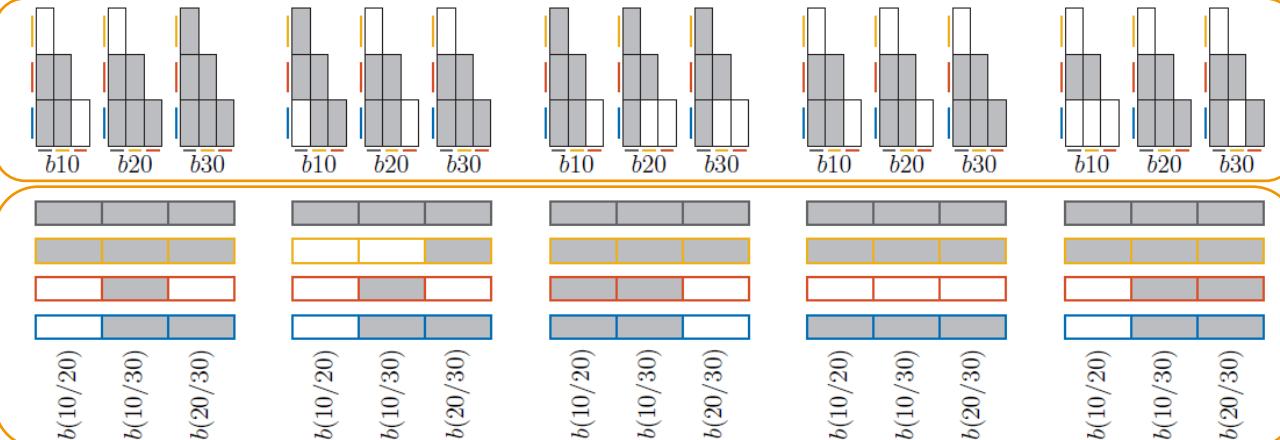
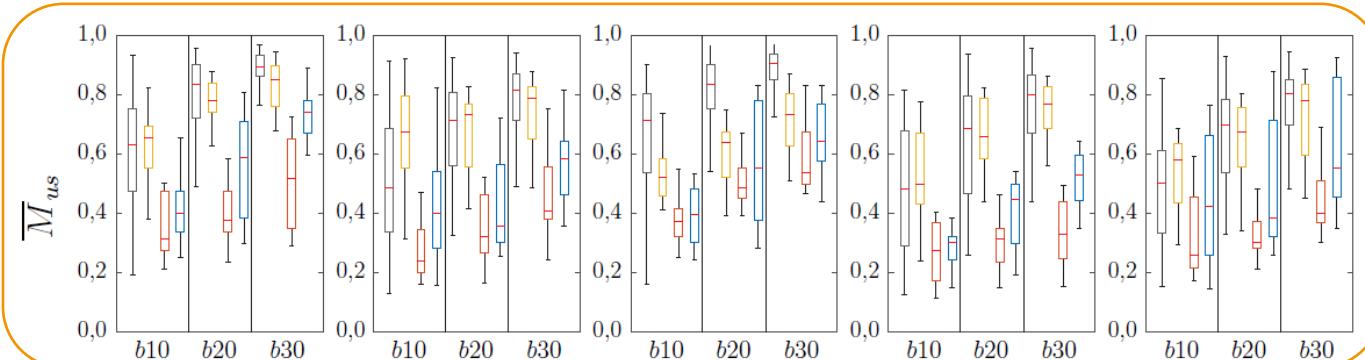
$$0 \wedge \overline{M}_{us} \wedge 1$$

\mathbf{f}_Σ

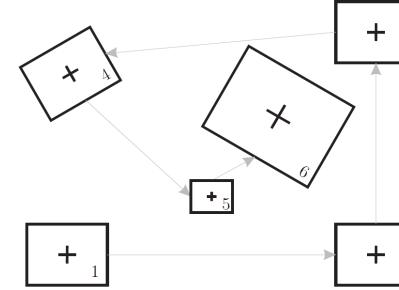
\mathbf{f}_L

\mathbf{f}_R

$$\|\mathbf{f}_\perp\| = 0$$



—	Zdravi preiskovanci	$p > 0,05$
—	Pacienti z nižjo stopnjo okvare desnega zgornjega uda	$p \leq 0,05$
—	Pacienti z višjo stopnjo okvare desnega zgornjega uda	
—	Pacienti z okvarjenim levim zgornjim udom	



Gladkost giba

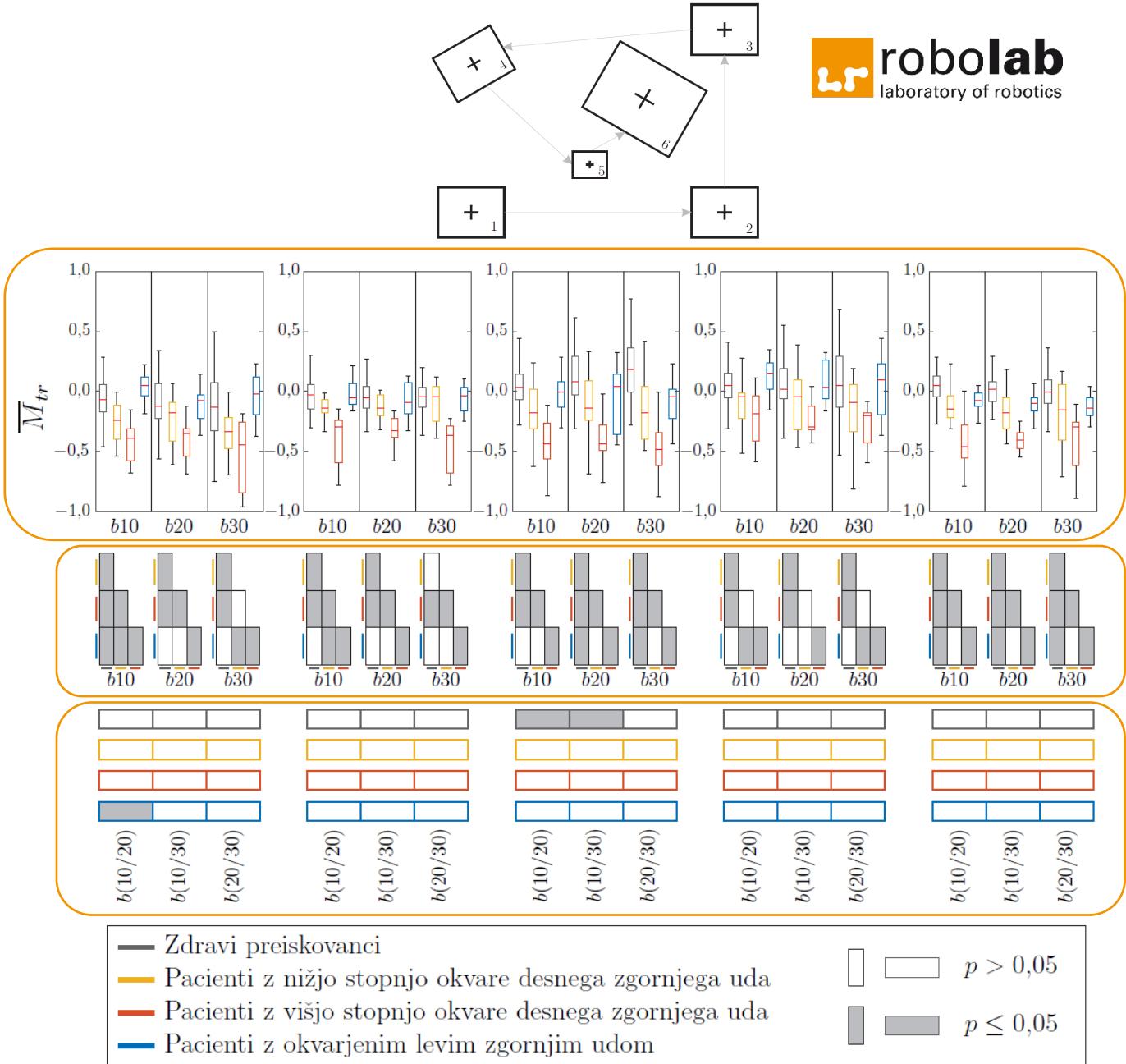
$$\overline{M}_{tr(L,R)} = \log \sqrt{\frac{(T_t - T_o)^6}{2mNS^2} \sum_{k=1}^N \|\dot{\mathbf{f}}_{(L,R)k}\|^2}$$

DESNA

$$\overline{M}_{tr} = \frac{1}{2} \log \left(\frac{\sum_{k=1}^N \|\dot{\mathbf{f}}_{R_k}\|^2}{\sum_{k=1}^N \|\dot{\mathbf{f}}_{L_k}\|^2} \right)$$

LEVA

$$\overline{M}_{tr} = \frac{1}{2} \log \left(\frac{\sum_{k=1}^N \|\dot{\mathbf{f}}_{L_k}\|^2}{\sum_{k=1}^N \|\dot{\mathbf{f}}_{R_k}\|^2} \right)$$



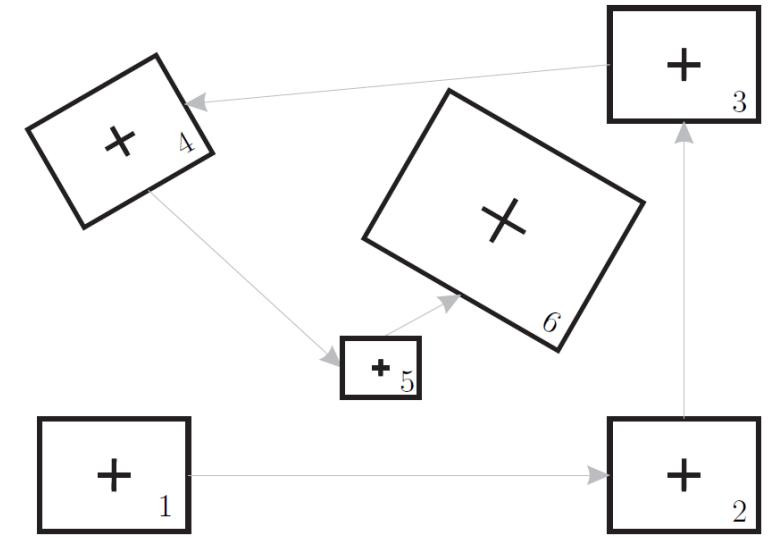
Enostavne
naloge na robotu

Omogočeno
sprotno
ocenjevanje uda

Podatki o
učinkovitosti
vadbe

Možnosti nadaljnega razvoja

- Poenostavitev nosilnega merilnega sistema,
- nadgradnja in uporaba **taktilnih dražljajev** za vzpodbujanje uporabe okvarjenega uda,
- nov protokol nalog z robotom s simetričnimi gibi, itd.



Izvirni prispevki znanosti

- Analiza parametrov seganja in prijemanja zdravih preiskovancev in pacientov po možganski kapi z uporabo standardiziranih kliničnih testov.
- Analiza dolgotrajnih meritev in ocenjevanje dejavnosti pri izvajanju vsakodnevnih opravil.
- Zasnova usmerjene dvoročne vadbe z robotom in analiza funkcijskih sposobnosti pacienta na osnovi sil interakcije.

HVALA ZA POZORNOST!