



Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko



robolab
laboratorij za robotiko

Matic Trlep

ROBOTSKO IN SENZORNO PODPRTO DVOROČNO URJENJE

Doktorska disertacija

Mentor: izr. prof. Matjaž Mihelj

Ljubljana, april 2013

Predstavitev

- uvod
- koncept robotske in senzorno podprte dvoročne vadbe
- standardni robotski sistem
- prilagojen robotski sistem
- merilna naprava za samostojno senzorno podprto urjenje
- izvirni prispevki

Uvod – rehabilitacijska robotika



MIT Manus, Boston



ARMin II, Zurich



GentleS, Ljubljana



BioRobotics, Washington

- **pacientu prijazni roboti**

zaznajo motorične sposobnosti pacienta in pomagajo le toliko, kot je nujno potrebno



Uvod – dvoročna vadba

- vsakodnevna dvoročna opravila
- nevrološka povezava med udoma
- dvoročna vadba izboljša koordinacijo med udoma
- zagotovitev šablone za prizadeto hemisfero





Uvod – dvoročna vadba

- **samostojna** dvoročna vadba
 - simetrični gibi obeh udov brez zunanje pomoči
- terapija z **ogledalom**
 - “normalna” vizualna povratna informacija
- **predhodna aktivacija** motoričnega sistema
 - manj prizadeti ud pred pričetkom urjenja razgibava prizadeti ud
- dvoročne **mehanske** naprave



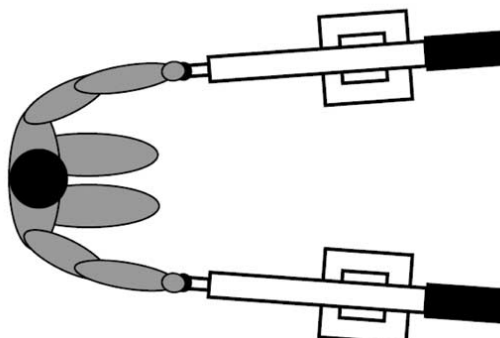


Uvod – dvoročni robotski mehanizmi

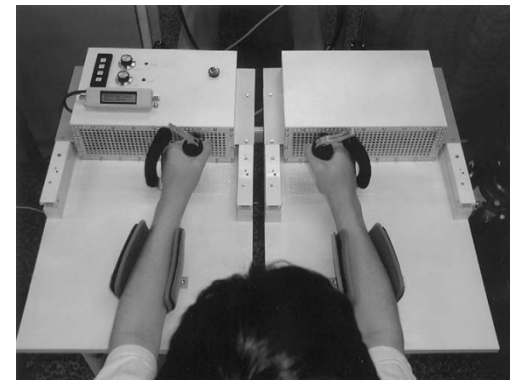
pasivno razgibavanje paretičnega uda



MIME, Palo Alto

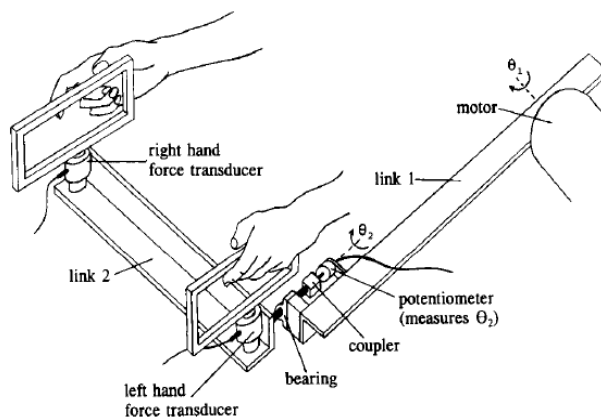


Bi-HapticMaster, Chicago



Arm trainer, Berlin

aktivna soudeležba paretičnega uda



Bimanual Lifting Rehabilitator, Berkeley



Driver's SEAT, Palo Alto



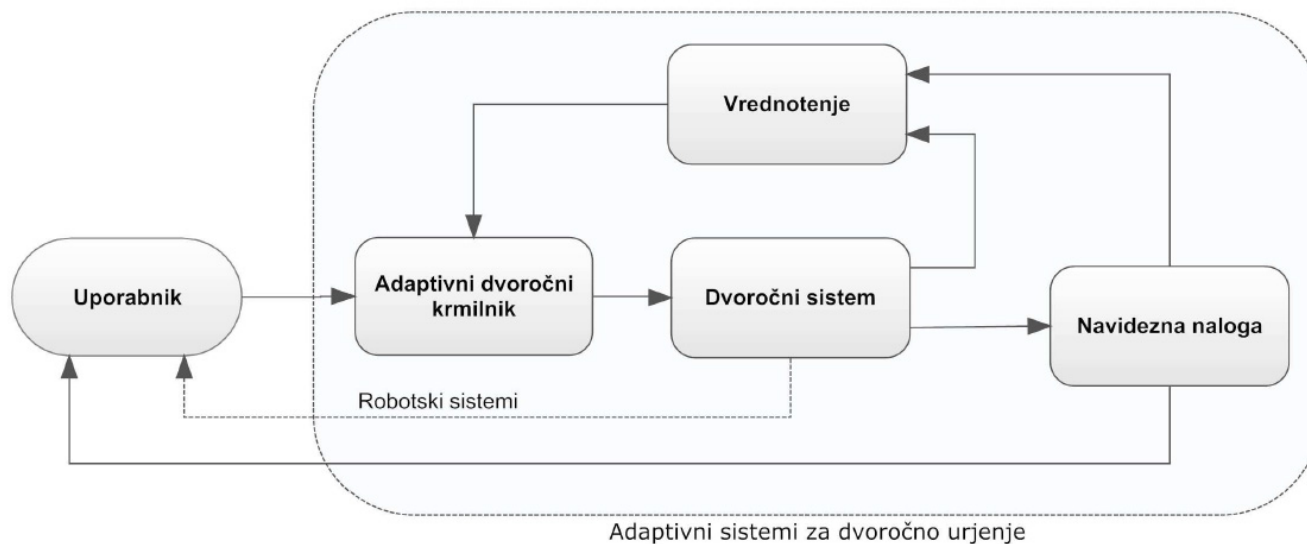
Motorično učenje

- učenje **novih gibov**
- predhodne raziskave analizirajo motorično učenje s spreminjanjem **dinamike gibanja**
- vpliva na potek **rehabilitacije**



Koncept dvoročne vadbe

- **dvoročna vadba** → aktivna uporaba prizadetega uda in minimalna pomoč manj prizadetega (če potrebno)
- vrednotenje gibov
- adaptivno prilagajanje pomoči manj prizadete roke

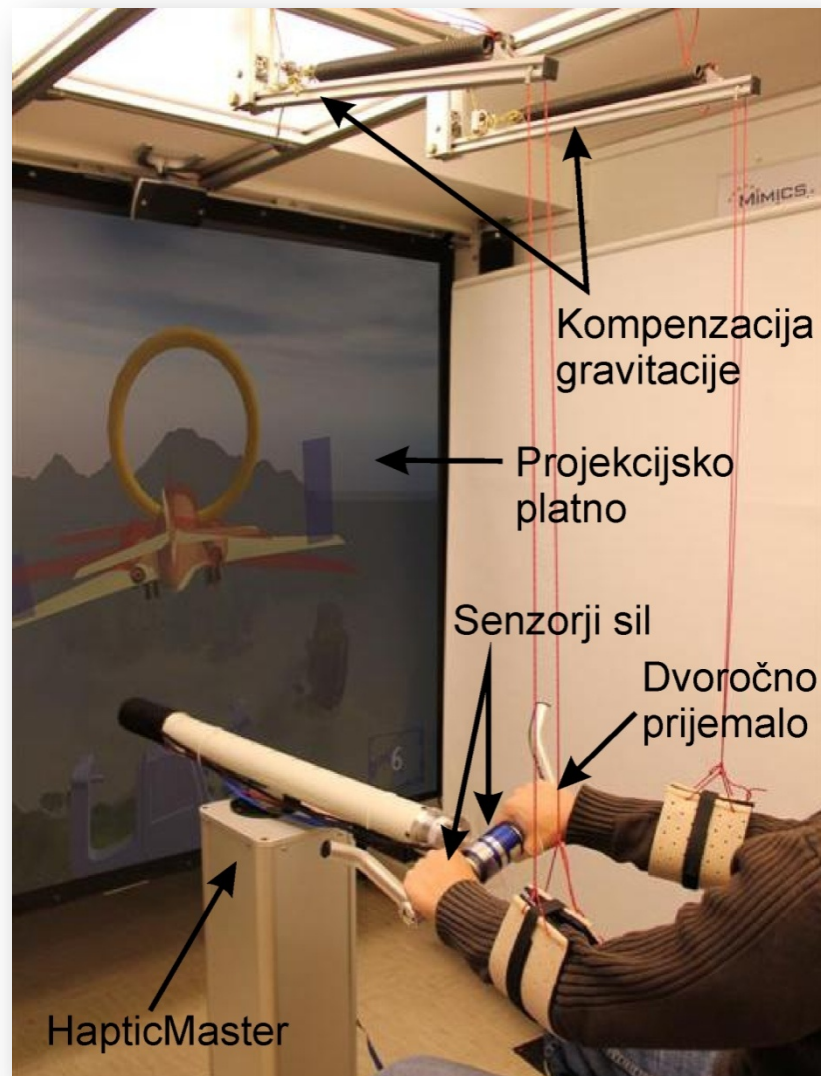


Predstavitev

- uvod
- koncept robotske in senzorno podprte dvoročne vadbe
- **standardni robotski sistem**
- prilagojen robotski sistem
- merilna naprava za samostojno senzorno podprto urjenje
- izvirni prispevki

Razširjen standardni robotski sistem

- dodana aktivna rotacijska stopnja na vrhu
- dva senzorja sil za neodvisno merjenje sil obeh rok
- pasivna kompenzacija gravitacije
- vizualizacija
- robot ne nudi aktivne pomoči

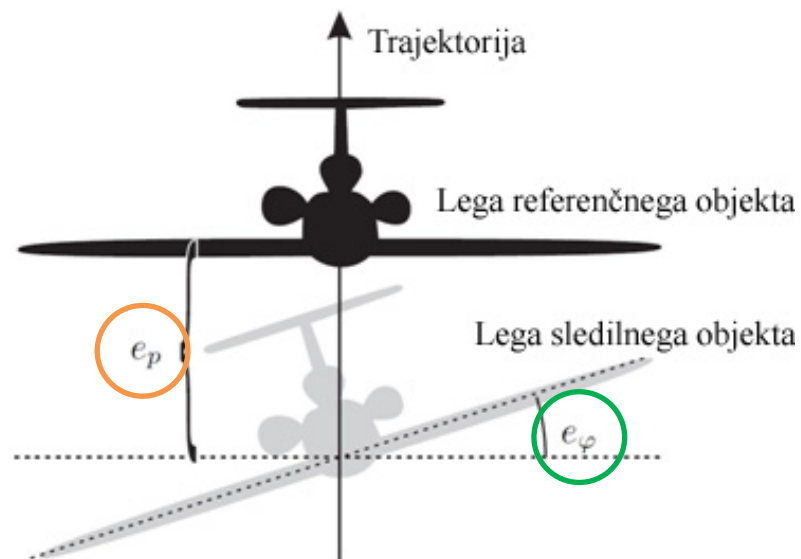
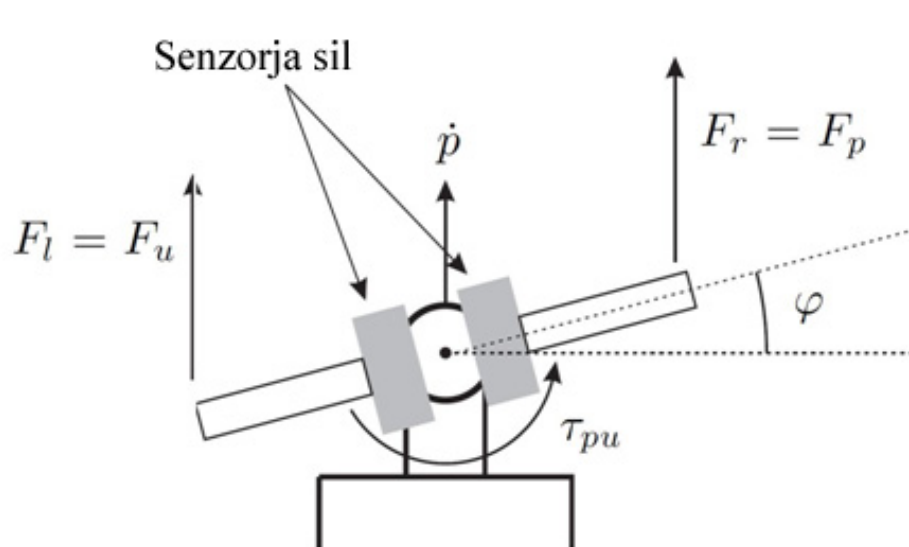


Razširjen standardni robotski sistem

- prilagajanje posamezniku prek **adaptivnih faktorjev**
 K_φ in K_p

$$K_{\varphi,i+1} = (1 + \mu_\varphi)K_{\varphi,i} - g_\varphi e_\varphi \quad 0,1 < K_\varphi \leq 1$$

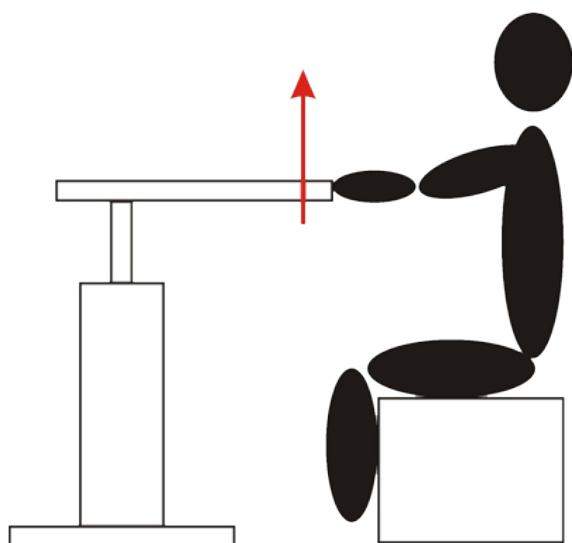
$$K_{p,i+1} = (1 - \mu_p)K_{p,i} + g_p e_p \quad K_p \geq 1$$





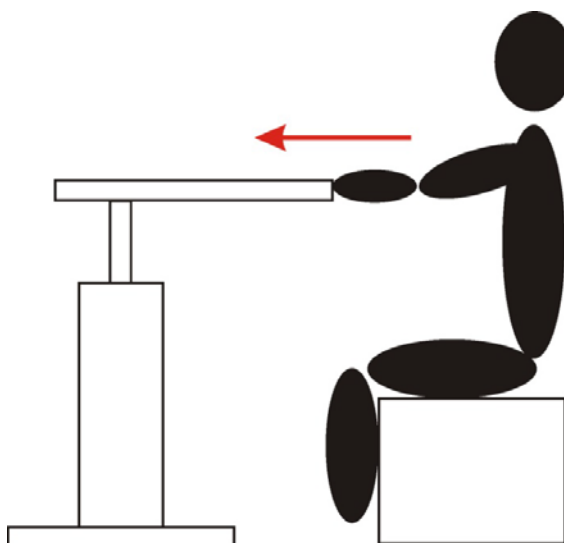
Naloge

Vertikalni gib



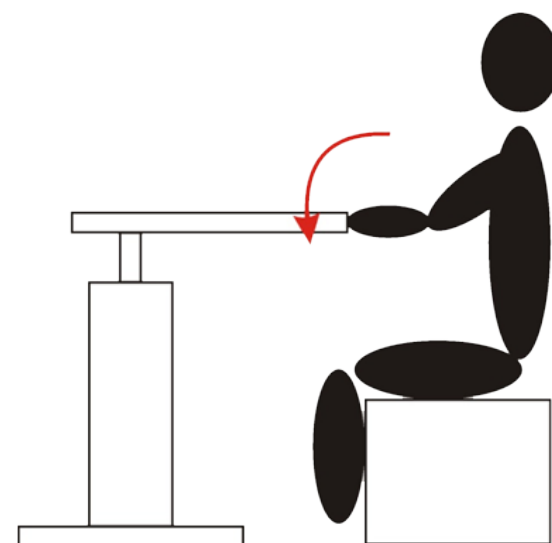
*fleksija ramenskega sklepa z
iztegnjenim komolcem*

Horizontalni gib



*ekstenzija komolčnega sklepa in
protrakcija ramenskega obroča*

Ekstenzija komolca



*izolirana ekstenzija komolčnega sklepa,
nadlahti ob telesu*

- **stimuliran gib:** robot nudi upor – stimulacija specifičnih mišičnih skupin
- **povraten gib:** brez robotskega upora



Sodelujoči

- 4 osebe s hemiparezo v kroničnem obdobju po možganski kapi

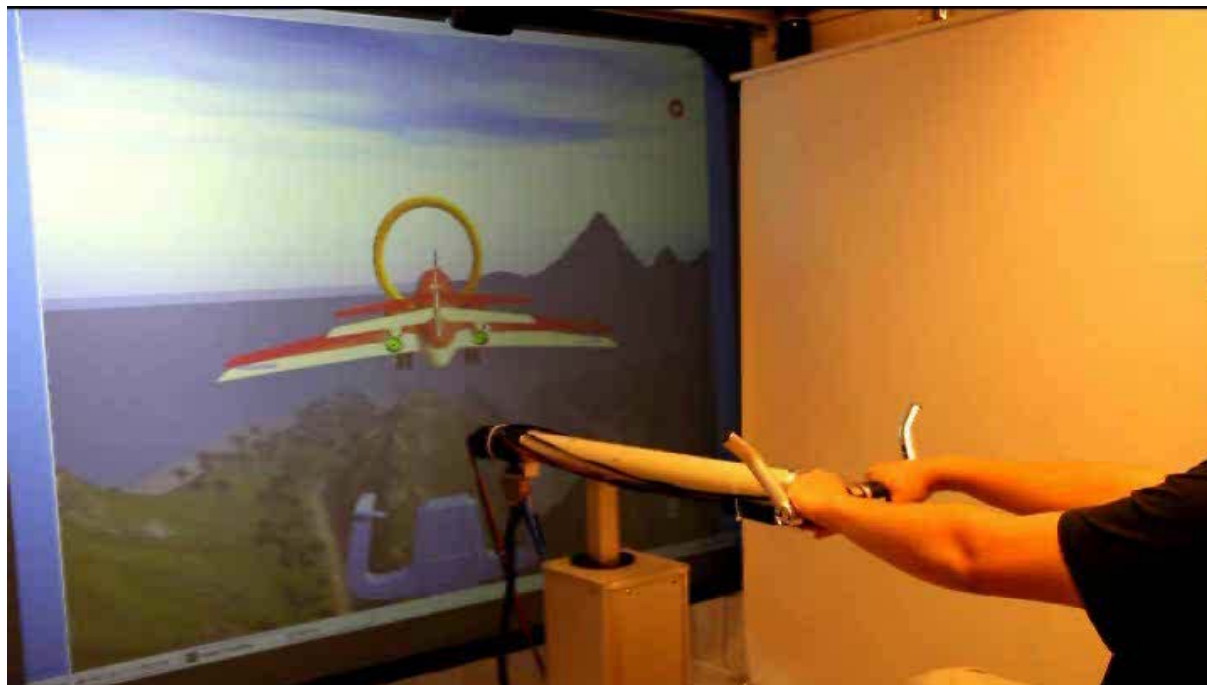
Pacient	S1	S2	S3	S4
Spol	ženski	moški	ženski	ženski
Starost (leta)	42	50	47	45
Čas po kapi (leta)	11.5	6	5	13
Prizadeta stran telesa	desna	desna	leva	desna
Funkcija zgornjega dela roke po MAS*	3	1	4	6

*Motor Assessment Scale



Testni protokol

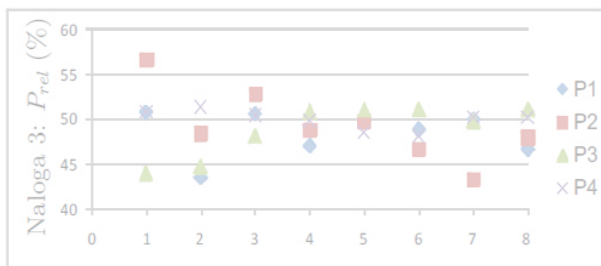
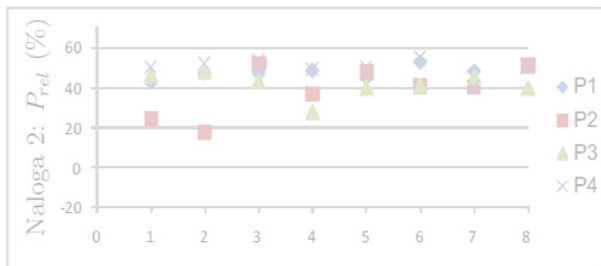
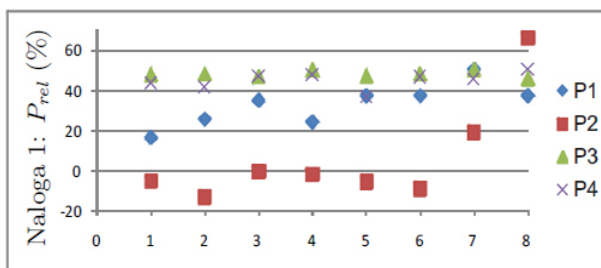
- 2 vadbi na teden, skupaj 4 tedne
- vadba traja 30 min
- vertikalni gib → horizontalni gib → izteg komolca
- gibi izvedeni tako dvoročno kot enoročno



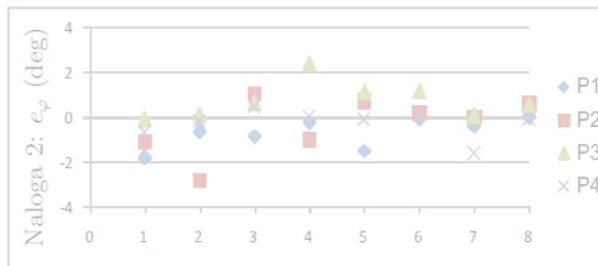
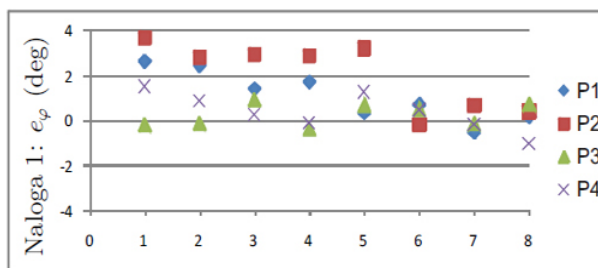


Dvoročna vadba

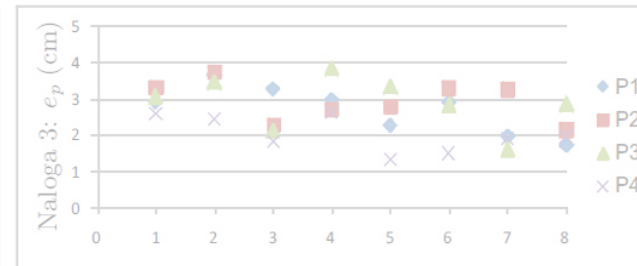
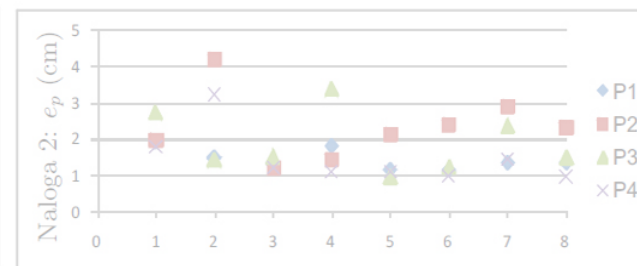
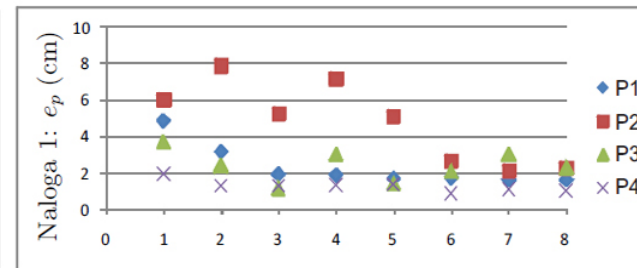
Relativna moč



Rotacijska napaka

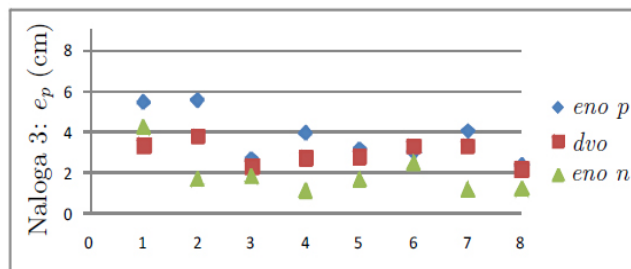
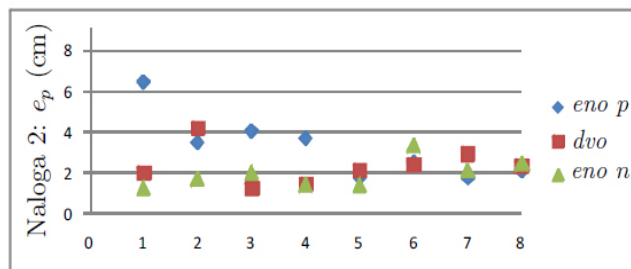
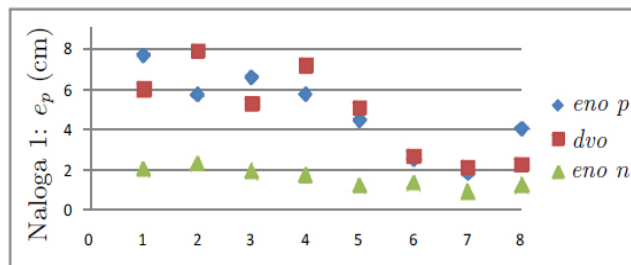


Napaka sledenja



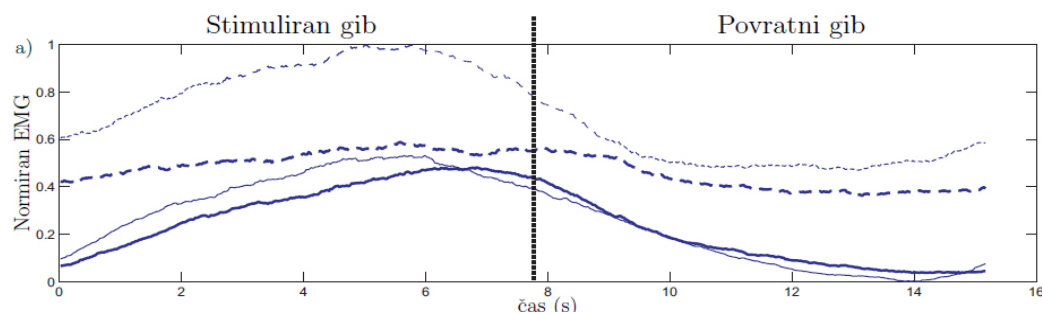


Enoročna in dvoročna vadba



Pacient P2

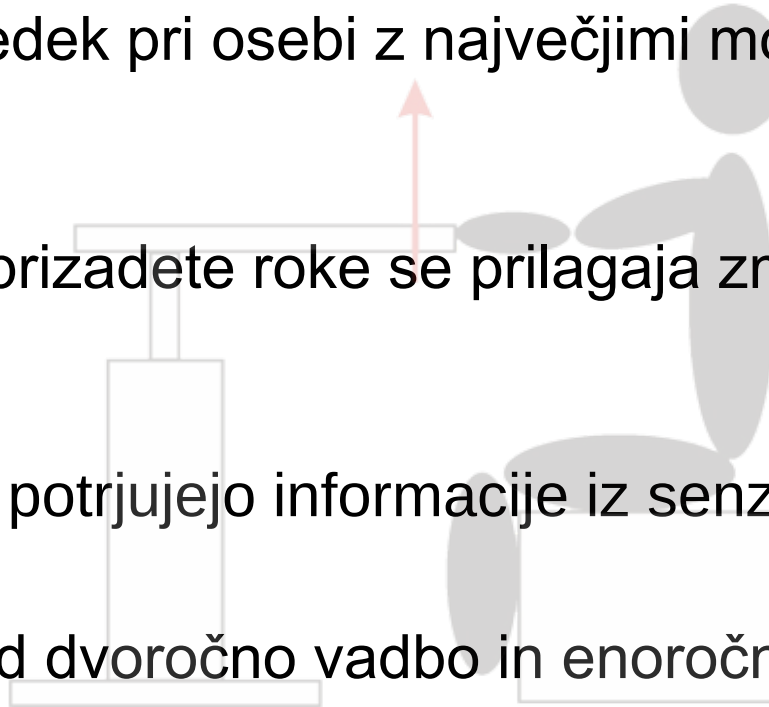
EMG signal deltaste mišice med vertikalnimi gibi



	enoročna vadba	dvoročna vadba
neprizadeti ud	-----	—————
prizadeti ud	— — — — —	—————

Ugotovitve

- izvedba naloge se izboljšuje skozi vadbo
- največji napredek pri osebi z največjimi motoričnimi težavami
- pomoč manj prizadete roke se prilagaja zmoglostim bolj prizadete
- meritve EMG potrjujejo informacije iz senzorjev sil
- korelacija med dvoročno vadbo in enoročno izvedbo naloge



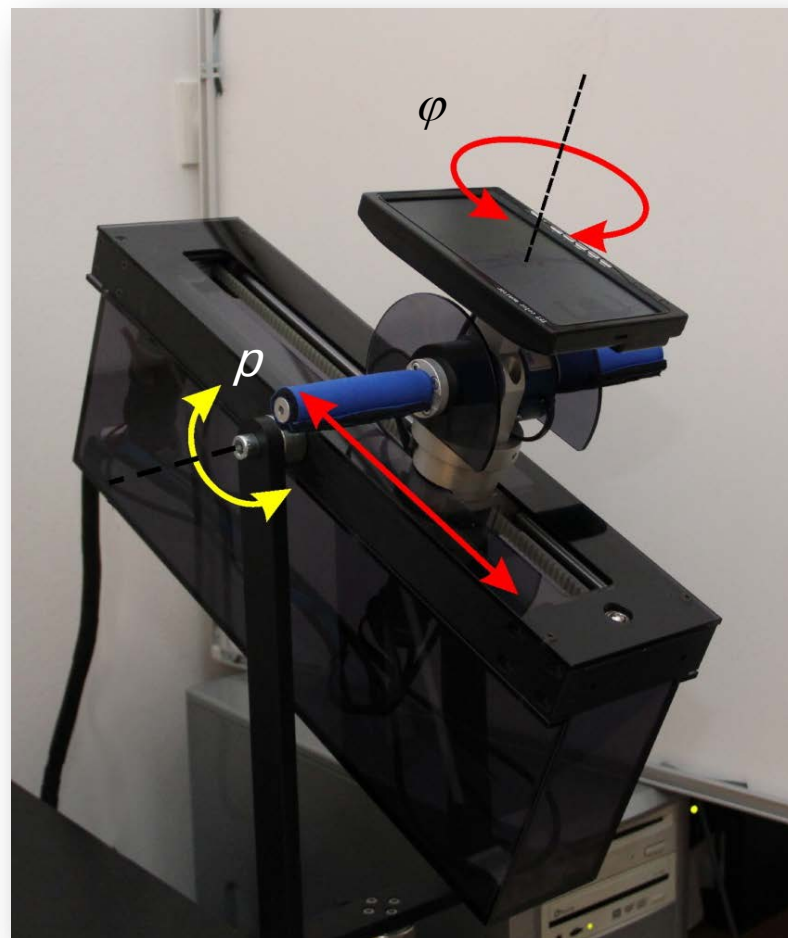
Predstavitev

- uvod
- koncept robotske in senzorno podprte dvoročne vadbe
- standardni robotski sistem
- **prilagojen robotski sistem**
- merilna naprava za samostojno senzorno podprto urjenje
- izvirni prispevki

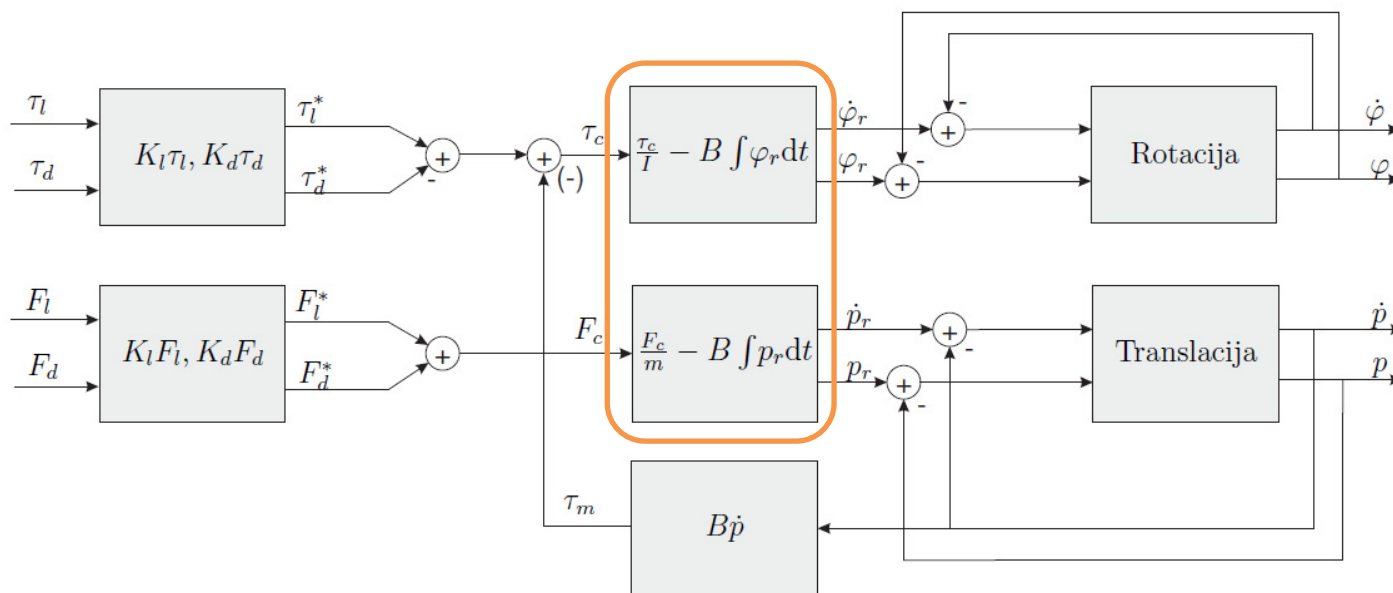


Prilagojen robotski sistem

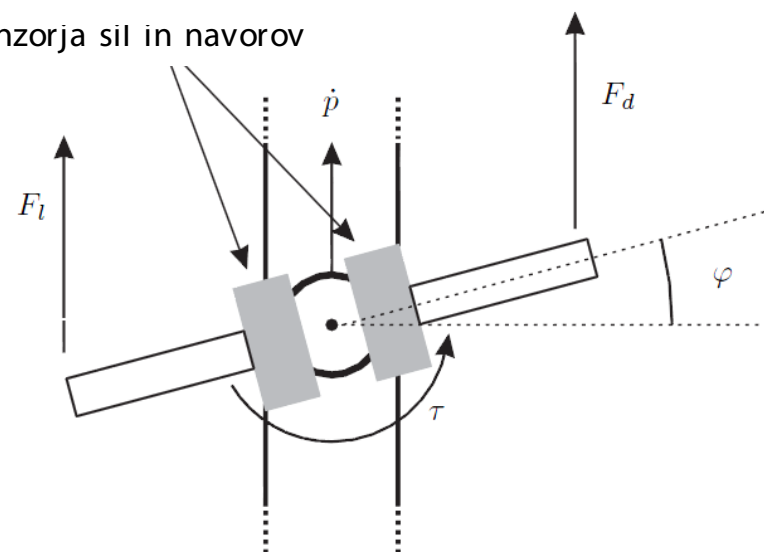
- 2 aktivni prostostni stopnji 
- prilagodljiv naklon 
- dvoročno držalo:
 - 2 neodvisna senzorja sil in navorov
 - LCD zaslon



Admitančno vodenje



Senzorja sil in navorov

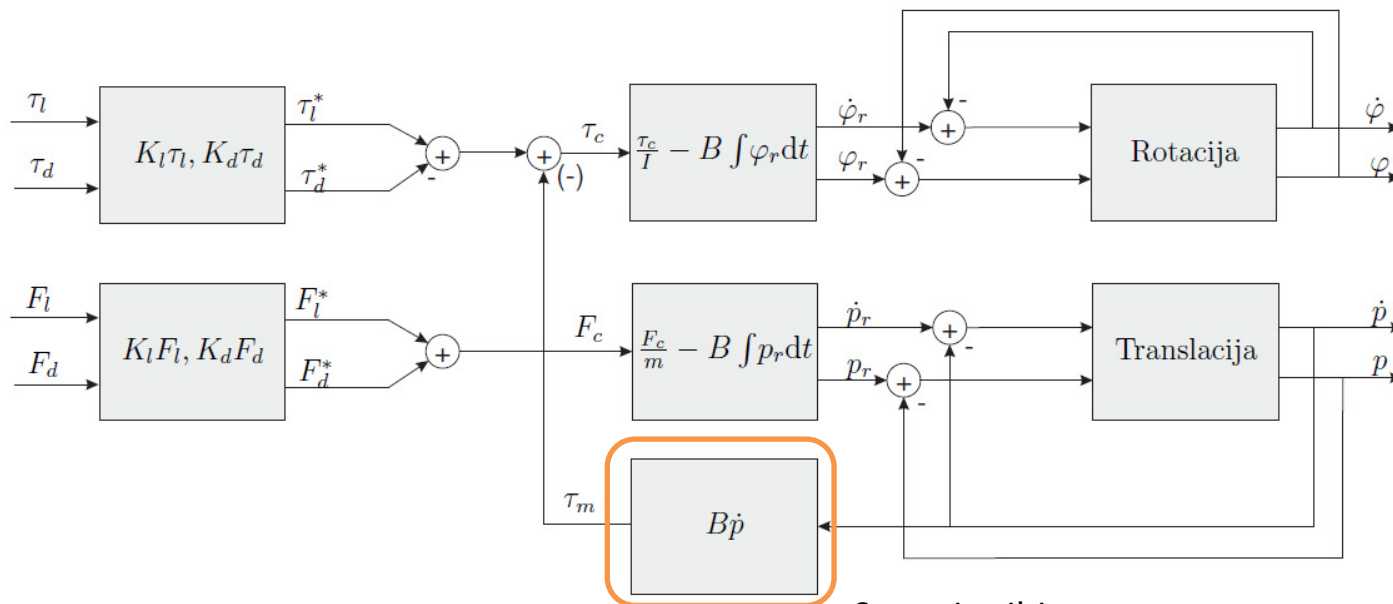


Admitančni model vodenja

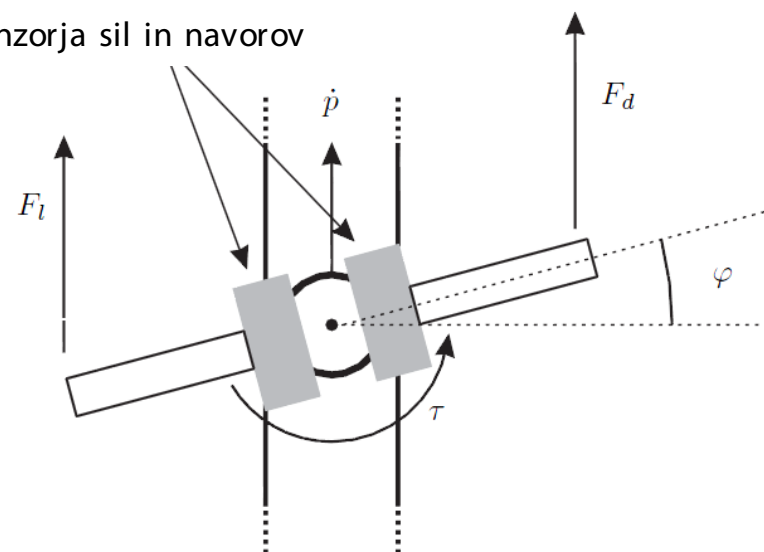
$$F_c = m\ddot{p}_r + b_p\dot{p}_r$$

$$\tau_c = I\ddot{\phi}_r + b_\phi\dot{\phi}_r$$

Hitrostno odvisen motilni navor



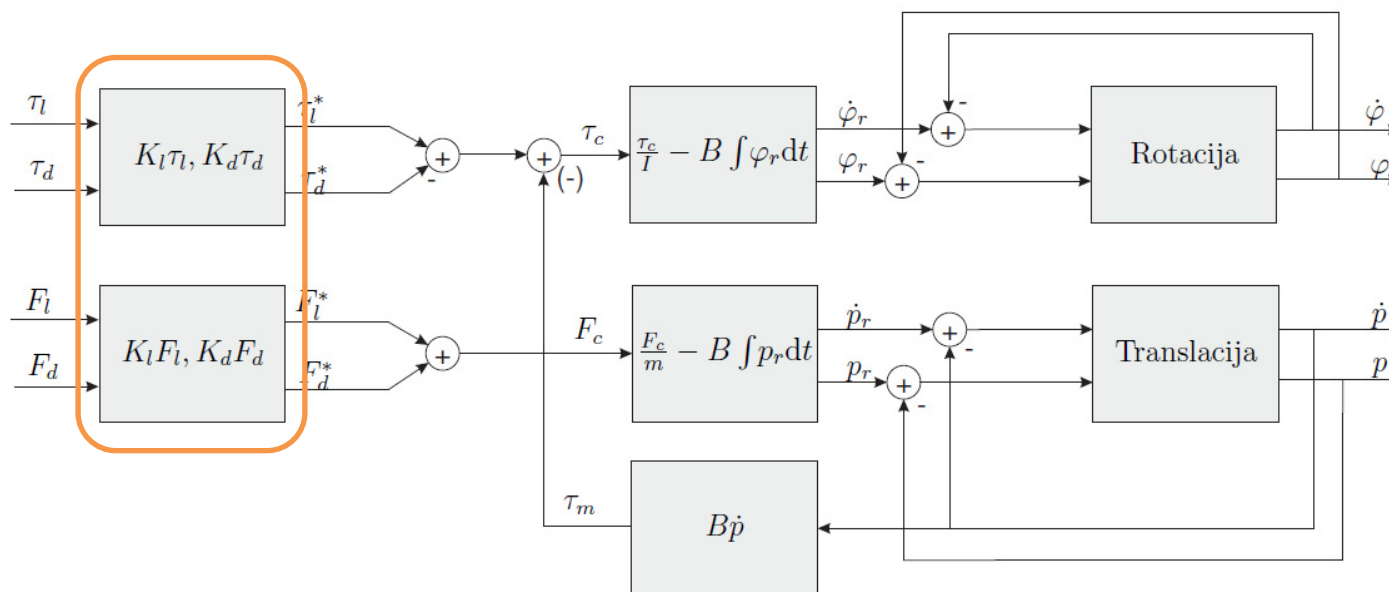
Senzorja sil in navorov



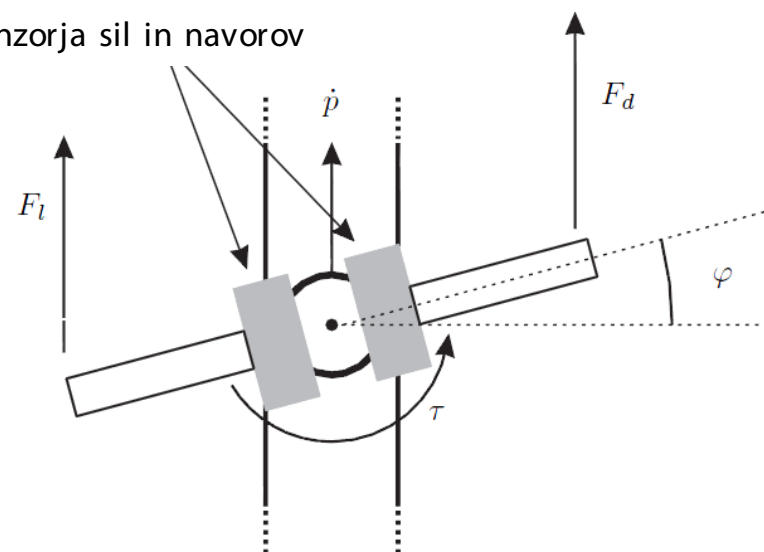
Hitrostno odvisen
motilni navor

$$\tau_m = \begin{cases} 10 \dot{p} & \dot{p} > 0 \\ 0 & \dot{p} \leq 0 \end{cases}$$

Razmerje sil obeh rok



Senzorja sil in navorov



Spremenljivo **razmerje sil**

Simetrična vadba

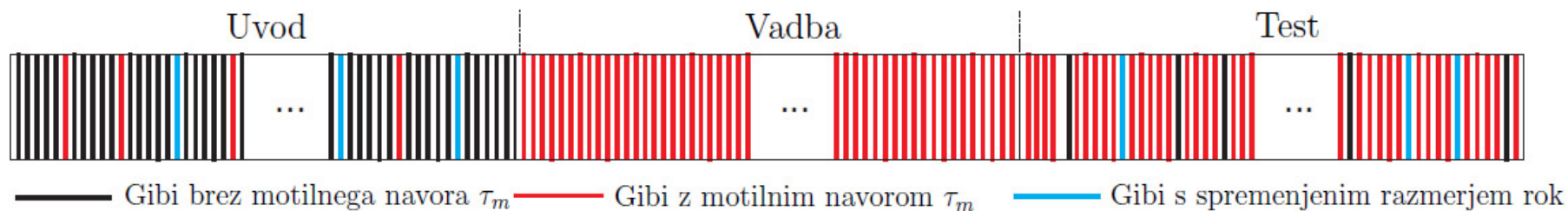
50% : 50% $\rightarrow K_l = K_d = 1$

Asimetrična vadba

75% : 25% $\rightarrow K_l = 1,5; K_d = 0,5$

Merilni protokol

- 255 gibov:
 - **Uvod** – 85 gibov brez motilnih navorov τ_m , občasni *preizkusni gibi* (aktivacija τ_m ali sprememba razmerja sil)
 - **Vadba** – 85 gibov z vključenim motilnim navorom τ_m
 - **Test** – 85 gibov z vključenim motilnim navorom τ_m , naključni *preizkusni gibi* (deaktivacija τ_m ali sprememba razmerja sil)





Merilni protokol

- 35 zdravih oseb (5 skupin, 7 oseb v vsaki)
- stari od 19 do 30 let
- 31 oseb z desno dominanco, 4 z levo

Skupina	Uvod	Vadba	Test
DS	dvoročno simetrično	dvoročno simetrično	dvoročno simetrično
DA	dvoročno asimetrično	dvoročno simetrično	dvoročno asimetrično
ES	enoročno	dvoročno simetrično	enoročno
EA	enoročno	dvoročno asimetrično	enoročno
E	enoročno	enoročno	enoročno

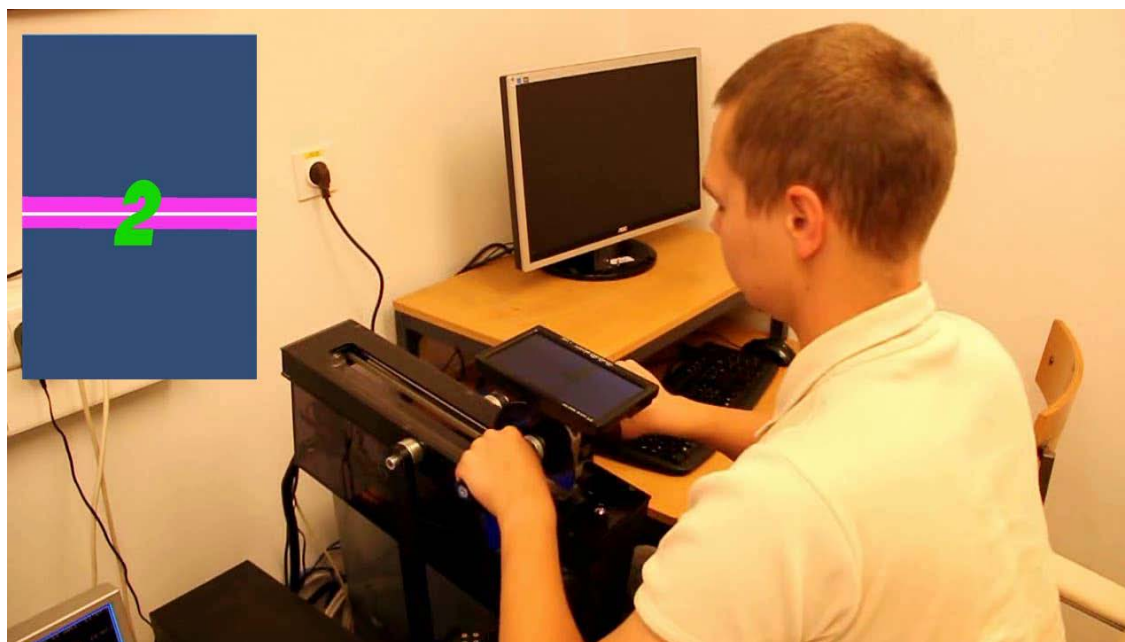
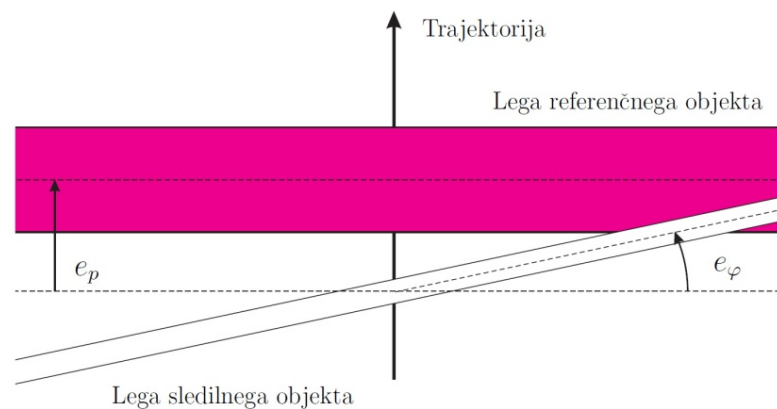
dvoročno simetrično – razmerje sil 50 % : 50 %

dvoročno asimetrično – razmerje sil 75 % : 25 %, večje sile nedominantne roke



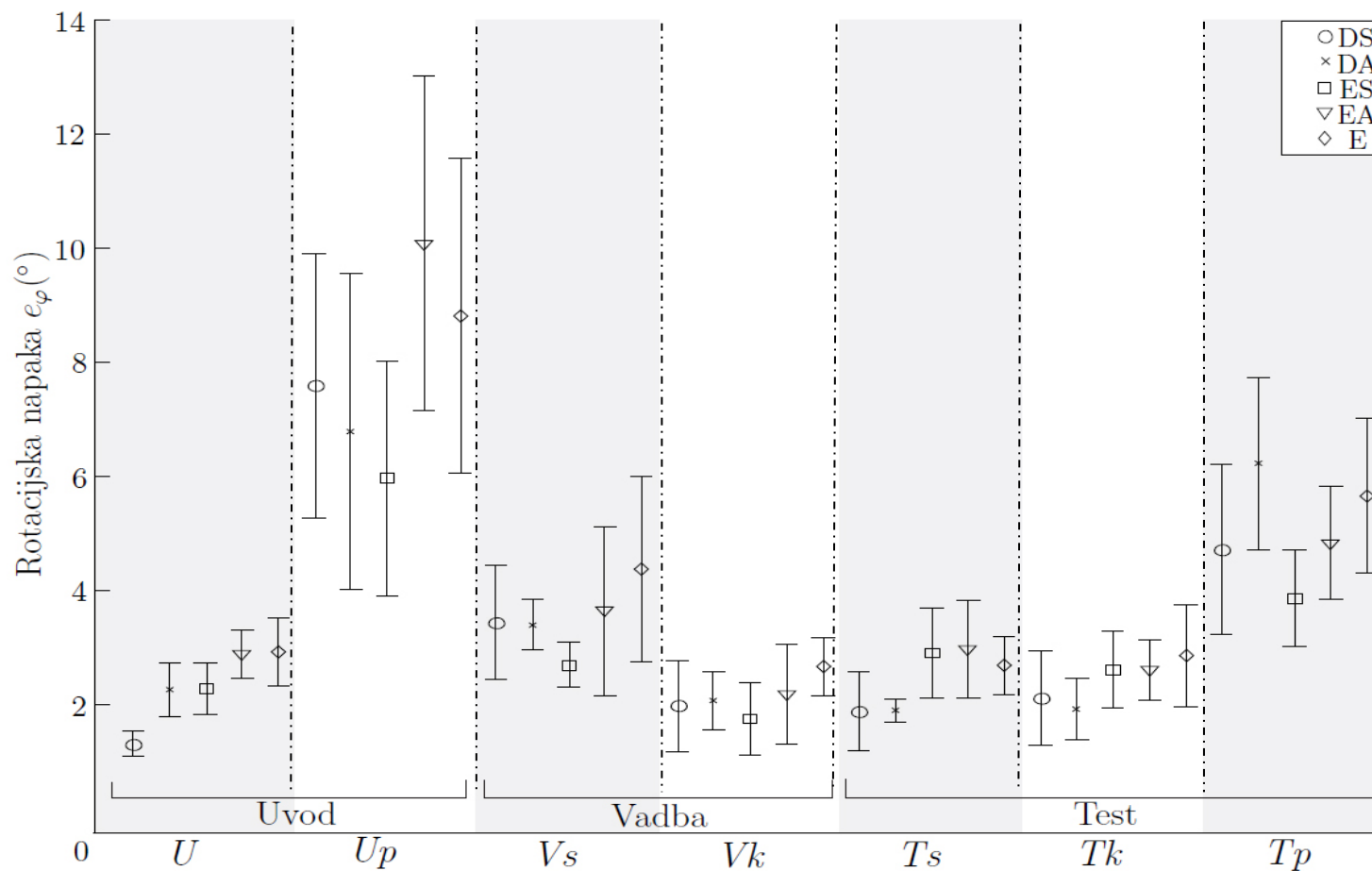
Naloga sledenja

- **referenčni objekt** se giblje po vnaprej definirani trajektoriji
- lega **sledilnega objekta** = lega dvoročnega držala





Rezultati

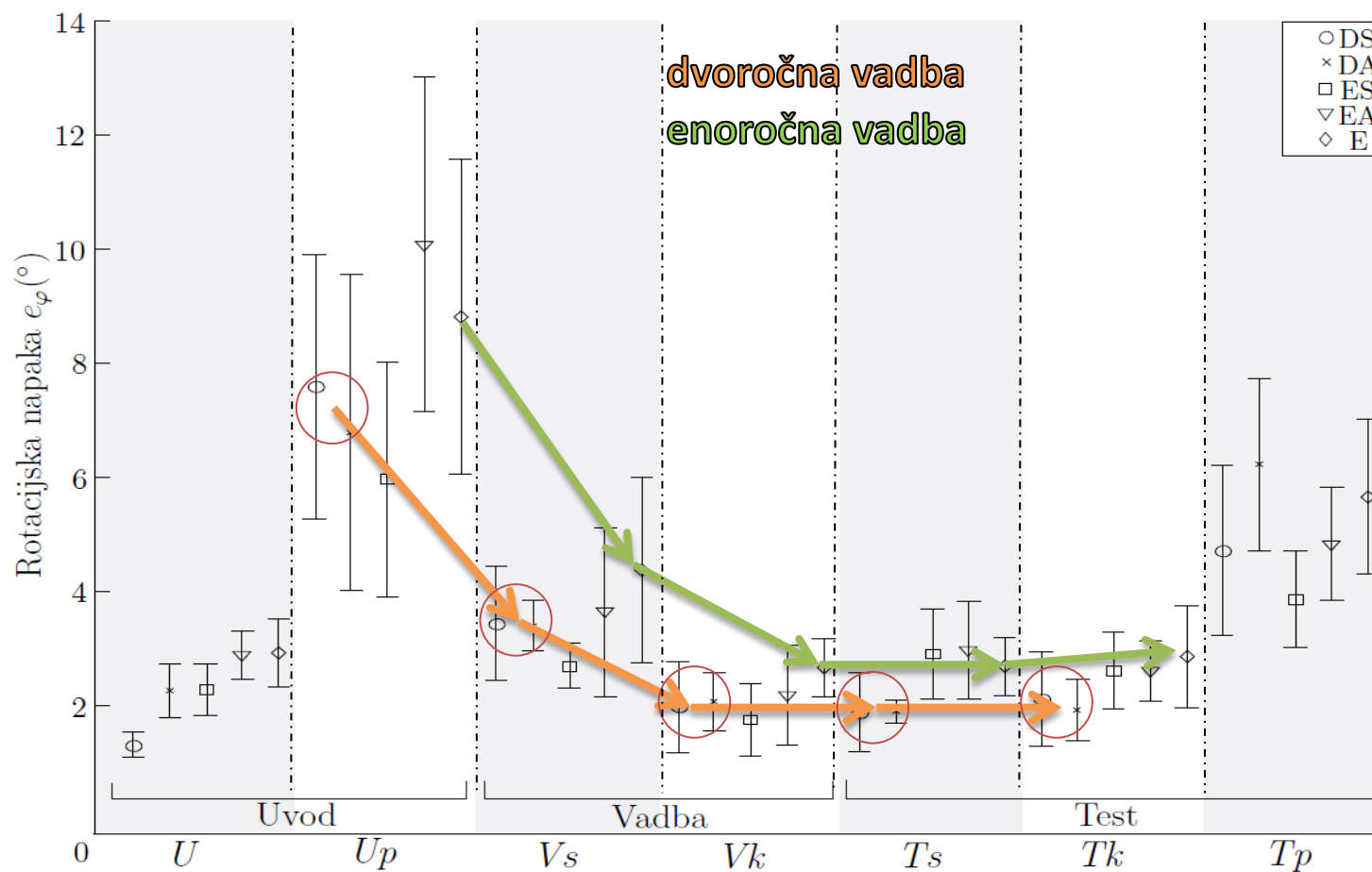


U – uvod brez motilnega navora
 U_p – uvod z motilnim navorom
 V_s – začetek učenja z motilnim navorom
 V_k – konec učenja z motilnim navorom

T_s – začetek testa z motilnim navorom
 T_k – konec testa z motilnim navorom
 T_p – test brez motilnega navora



Rezultati – motorično učenje

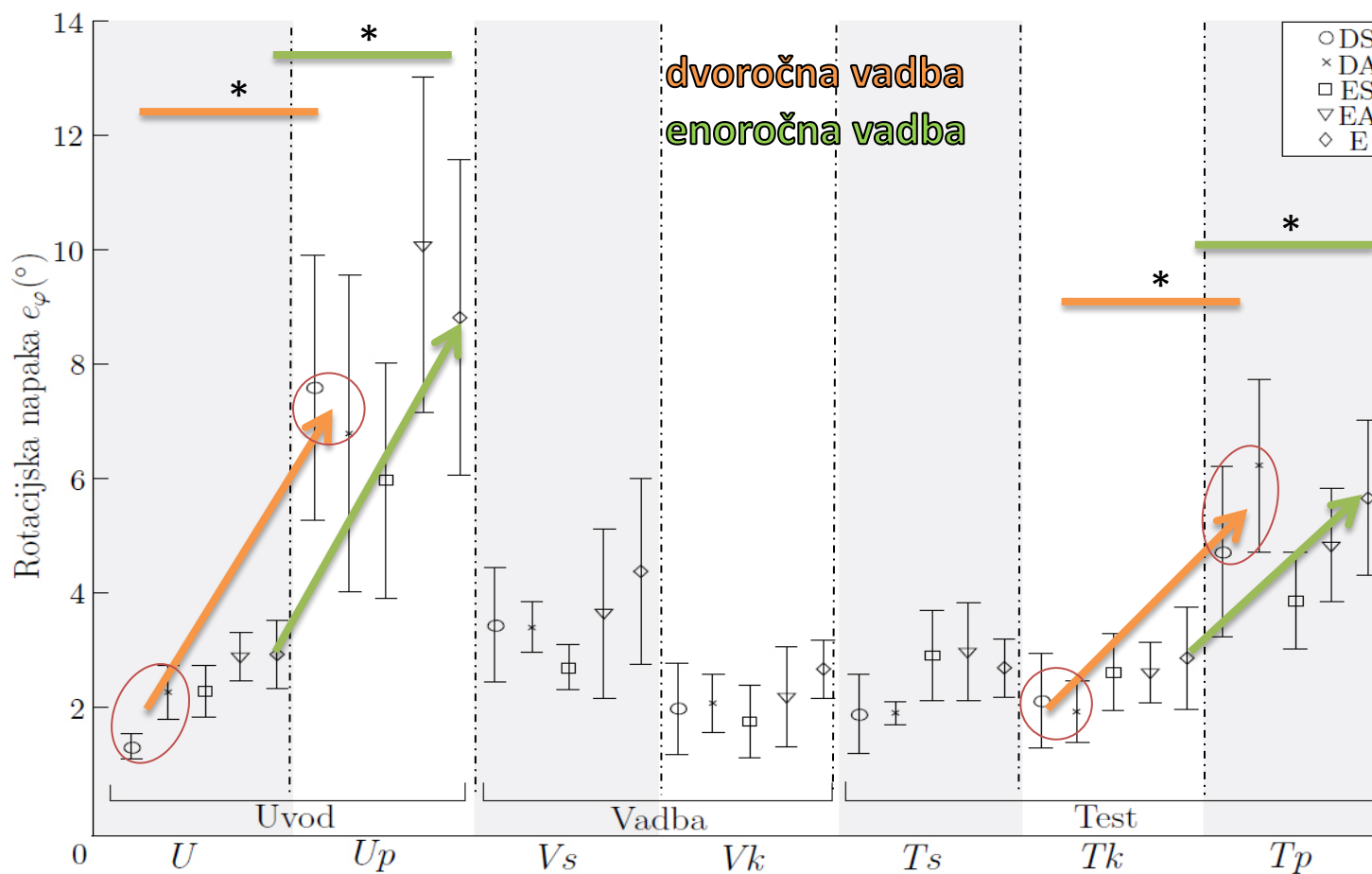


U – uvod brez motilnega navora
Up – uvod z motilnim navorom
Vs – začetek učenja z motilnim navorom
Vk – konec učenja z motilnim navorom

Ts – začetek testa z motilnim navorom
Tk – konec testa z motilnim navorom
Tp – test brez motilnega navora



Rezultati – preizkusni gibi



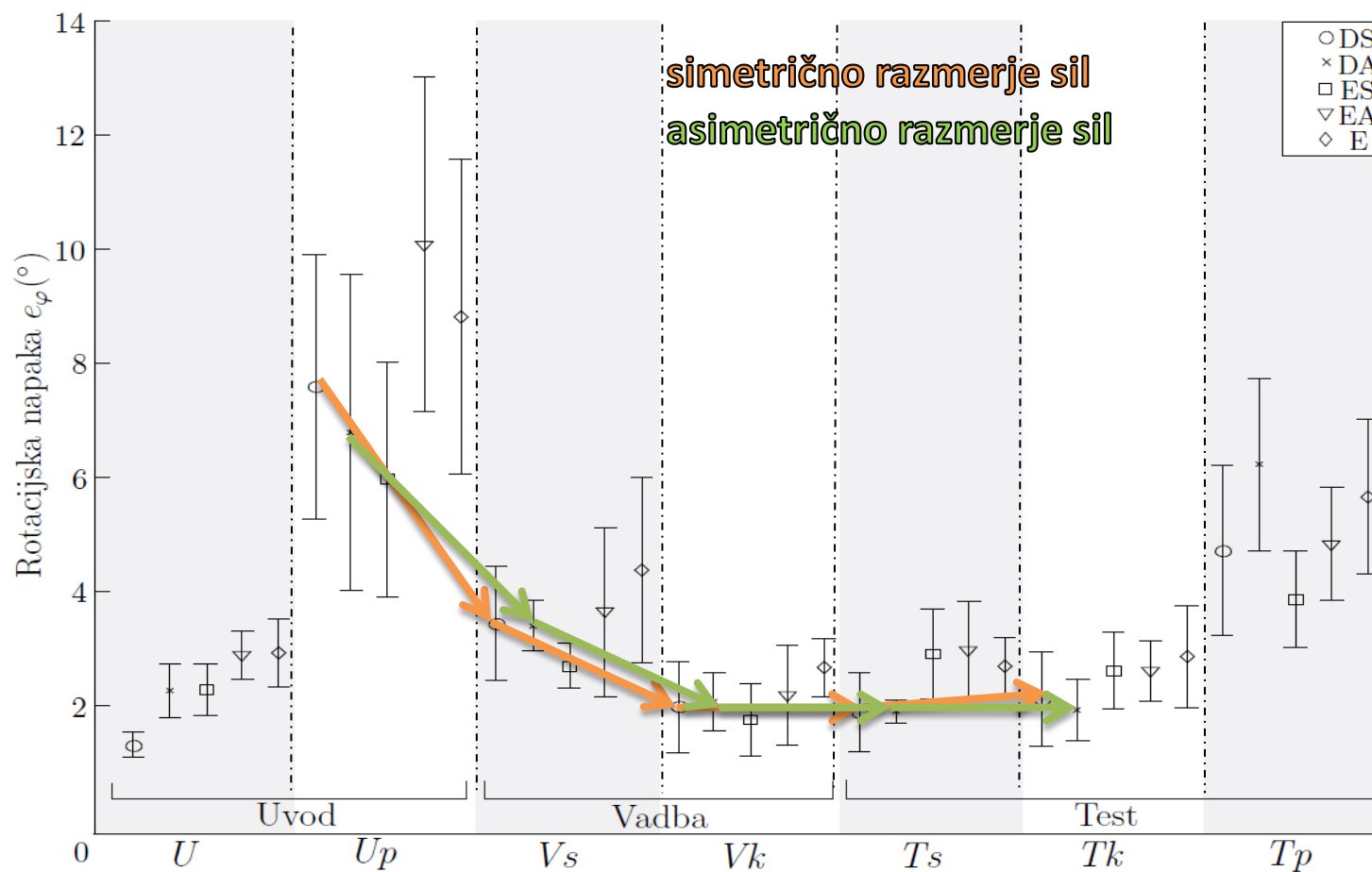
U – uvod brez motilnega navora
Up – uvod z motilnim navorom
Vs – začetek učenja z motilnim navorom
Vk – konec učenja z motilnim navorom

Ts – začetek testa z motilnim navorom
Tk – konec testa z motilnim navorom
Tp – test brez motilnega navora

* $p < 0.05$



Rezultati – dvoročna vadba po dvoročnem Uvodu

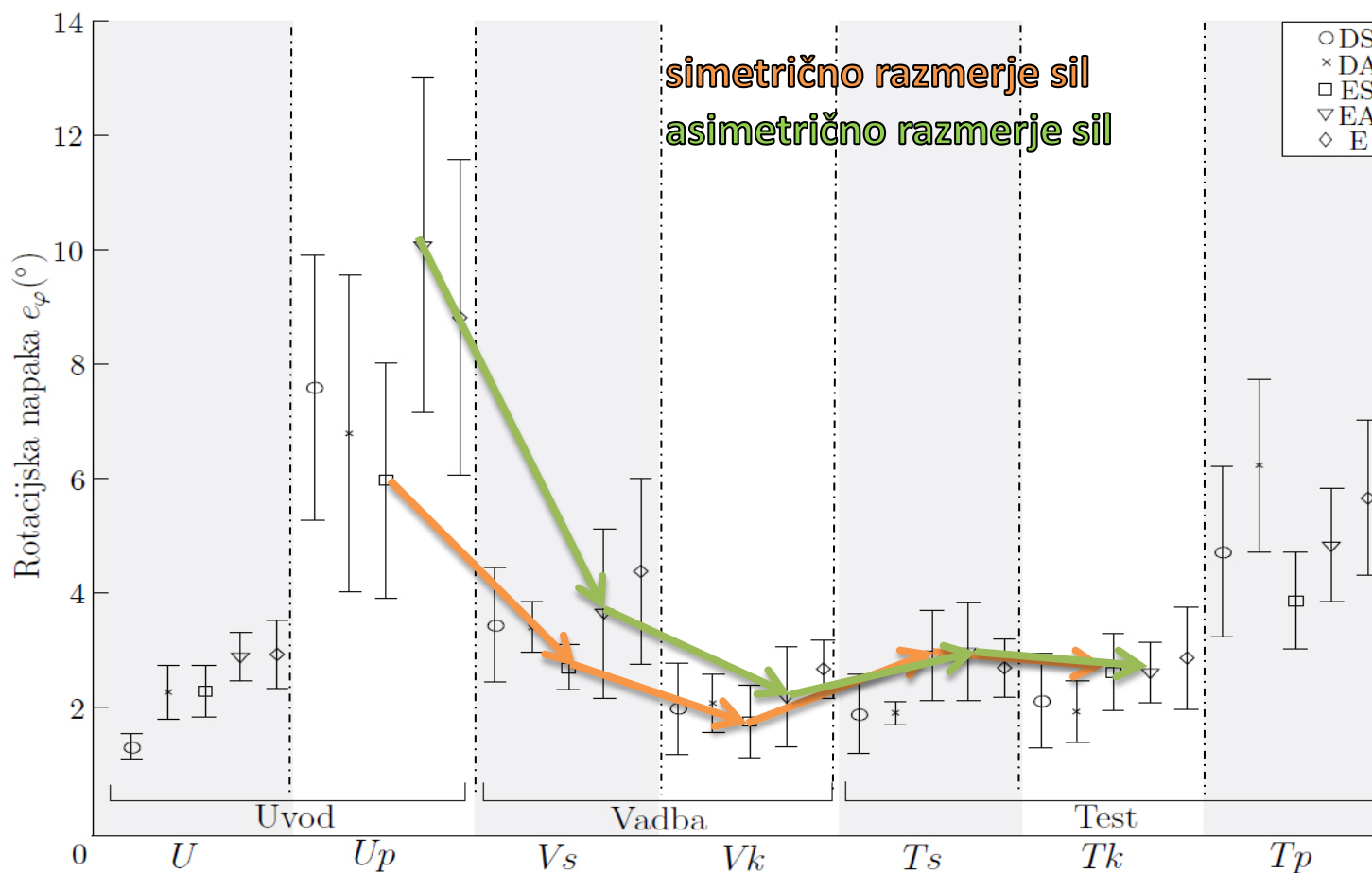


U – uvod brez motilnega navora
 U_p – uvod z motilnim navorom
 V_s – začetek učenja z motilnim navorom
 V_k – konec učenja z motilnim navorom

T_s – začetek testa z motilnim navorom
 T_k – konec testa z motilnim navorom
 T_p – test brez motilnega navora



Rezultati – dvoročna vadba po enoročnem Uvodu

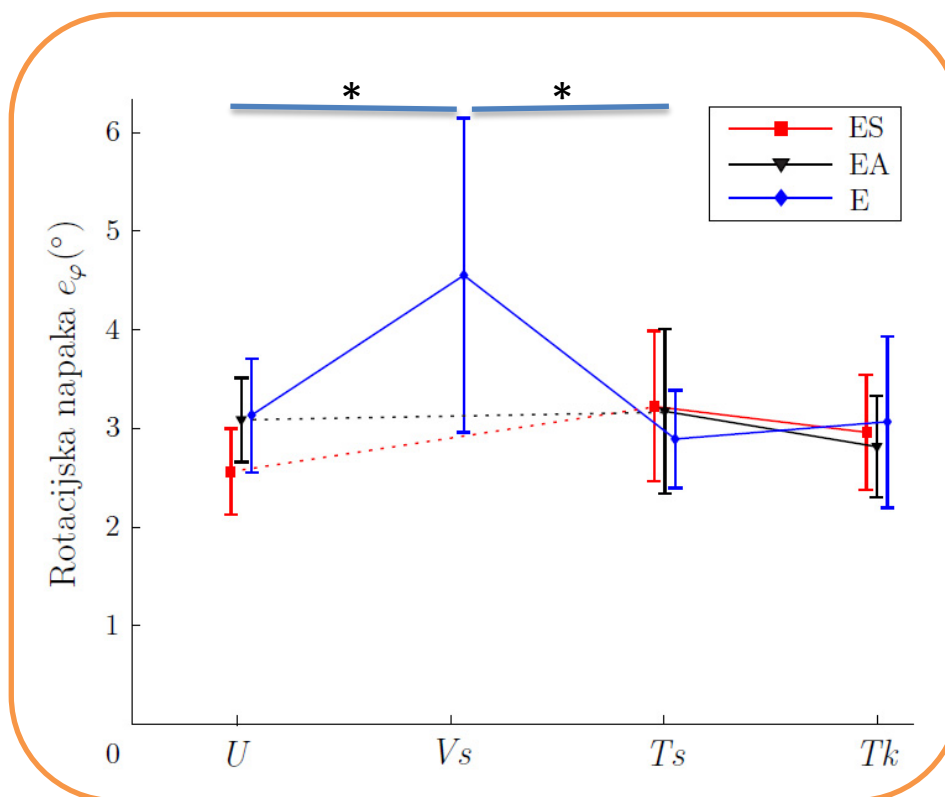


U – uvod brez motilnega navora
 U_p – uvod z motilnim navorom
 V_s – začetek učenja z motilnim navorom
 V_k – konec učenja z motilnim navorom

T_s – začetek testa z motilnim navorom
 T_k – konec testa z motilnim navorom
 T_p – test brez motilnega navora



Vpliv dvoročnega učenja na enoročno izvedbo



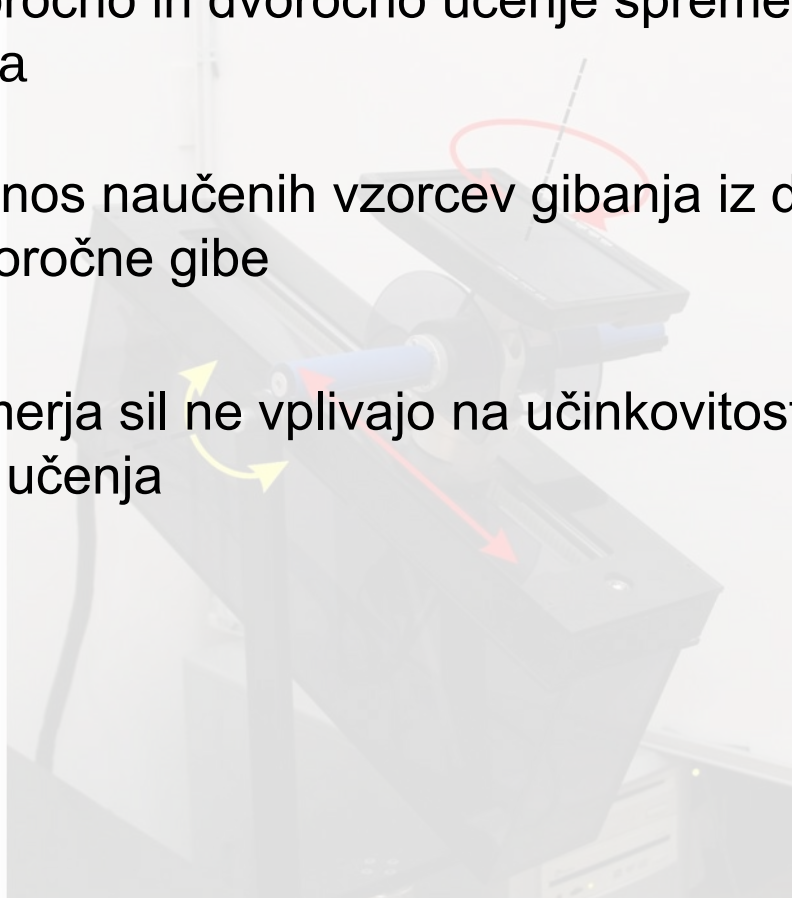
U – uvod brez motilnega navora
Vs – začetek učenja z motilnim navorom
Ts – začetek testa z motilnim navorom
Tk – konec testa z motilnim navorom

* $p < 0.05$



Ugotovitve

- uspešno enoročno in dvoročno učenje spremenjene dinamike giba
- pozitiven prenos naučenih vzorcev gibanja iz dvoročne vadbe na enoročne gibe
- različna razmerja sil ne vplivajo na učinkovitost motoričnega učenja



Predstavitev

- uvod
- koncept robotske in senzorno podprte dvoročne vadbe
- standardni robotski sistem
- prilagojen robotski sistem
- **merilna naprava za samostojno senzorno podprto urjenje**
- izvirni prispevki



Sistem za samostojno senzorno podprto dvoročno vadbo



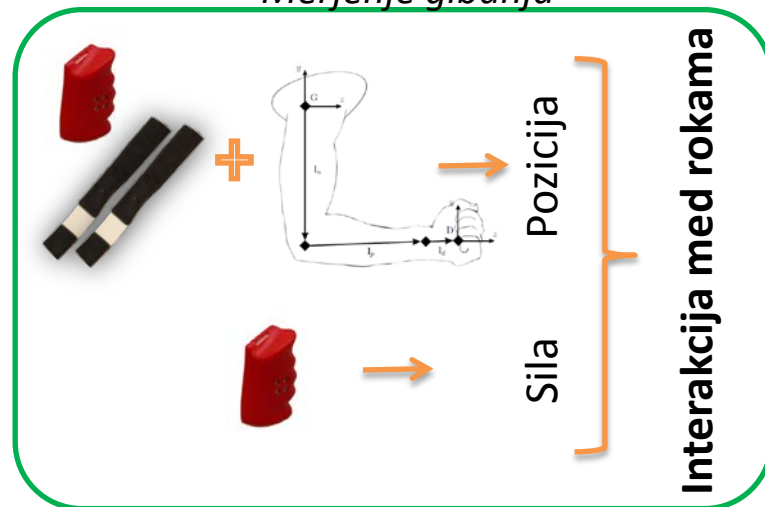
Ročna naprava:

- senzor orientacije
- senzor sile



Senzorja orientacije

Merjenje gibanja



Naloge v
navideznem okolju





Tipi gibov



Enoročna vadba v
razbremenitvi



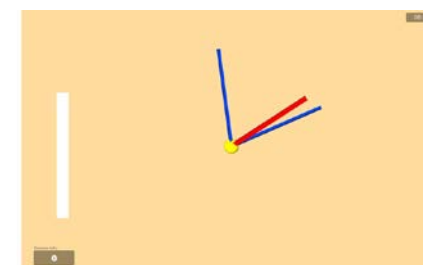
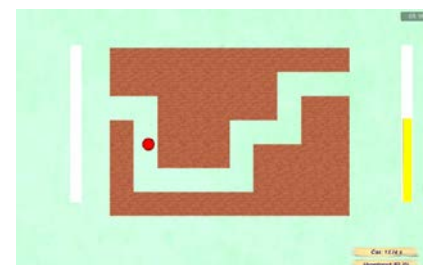
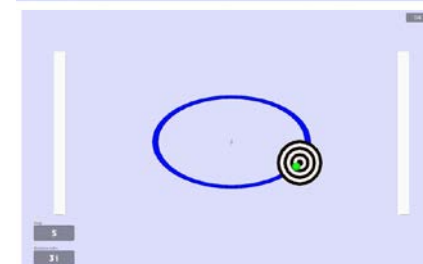
Enoročna vadba po
mizi



Dvoročna vadba

Naloge v navideznem okolju

- **Sončki** – linearni gibi v ravnini (2D)
- **Kroženje** – krožni gibi v ravnini (2D)
- **Labirint** – kompleksni gibi v ravnini (2D)
- **Rotacije** – rotacija ročne naprave (1D)





Vrednotenje gibanja

- T_{60} število točk v igri
- p moč bolj prizadete roke
- E skupna energija bolj prizadete roke
- R koeficient natančnosti
- dX odstopanje od sledilne trajektorije
- T_{ex} čas izvedbe gibanja
- v_t hitrost gibanja
- η_{sal} gladkost giba

$$R = \frac{l_t}{l_n}$$

l_t – dolžina opravljene trajektorije

l_n – dolžina optimalne trajektorije

$$\eta_{sal} = \int_0^{\omega_c} \sqrt{\left(\frac{1}{\omega_c}\right)^2 + \left(\frac{d\hat{V}(\omega)}{d\omega}\right)^2} d\omega$$

$$\hat{V}(\omega) = \frac{V(\omega)}{V(0)}$$

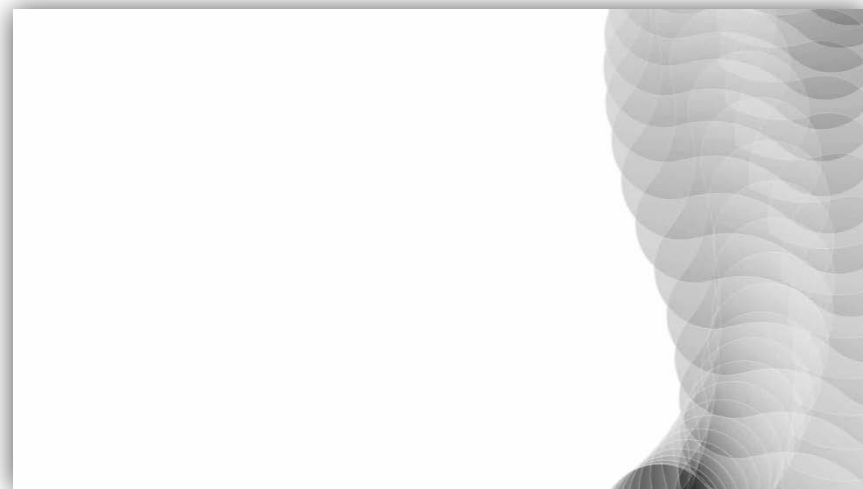
- I_k indeks kvalitete gibanja

$$I_k = \frac{T_{60}}{\tilde{T}} + \frac{\tilde{R}}{R} + \frac{\bar{v}_t}{\tilde{v}_t} + \frac{\widetilde{dX}}{dX} + \frac{\tilde{\eta}_{sal}}{\eta_{sal}} + \frac{1}{|p|/\tilde{p} + 1}$$



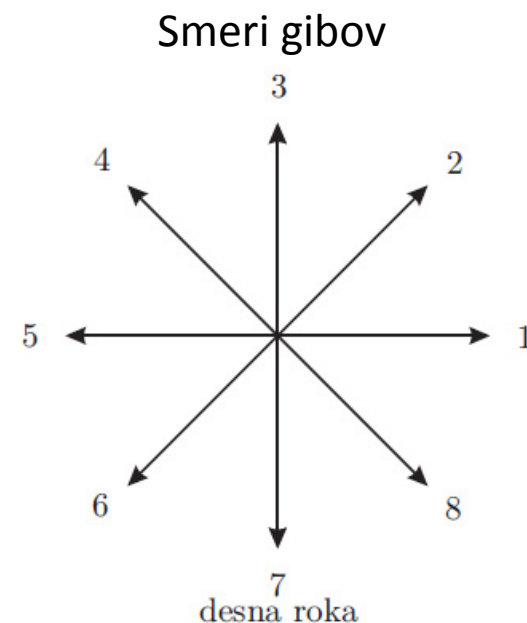
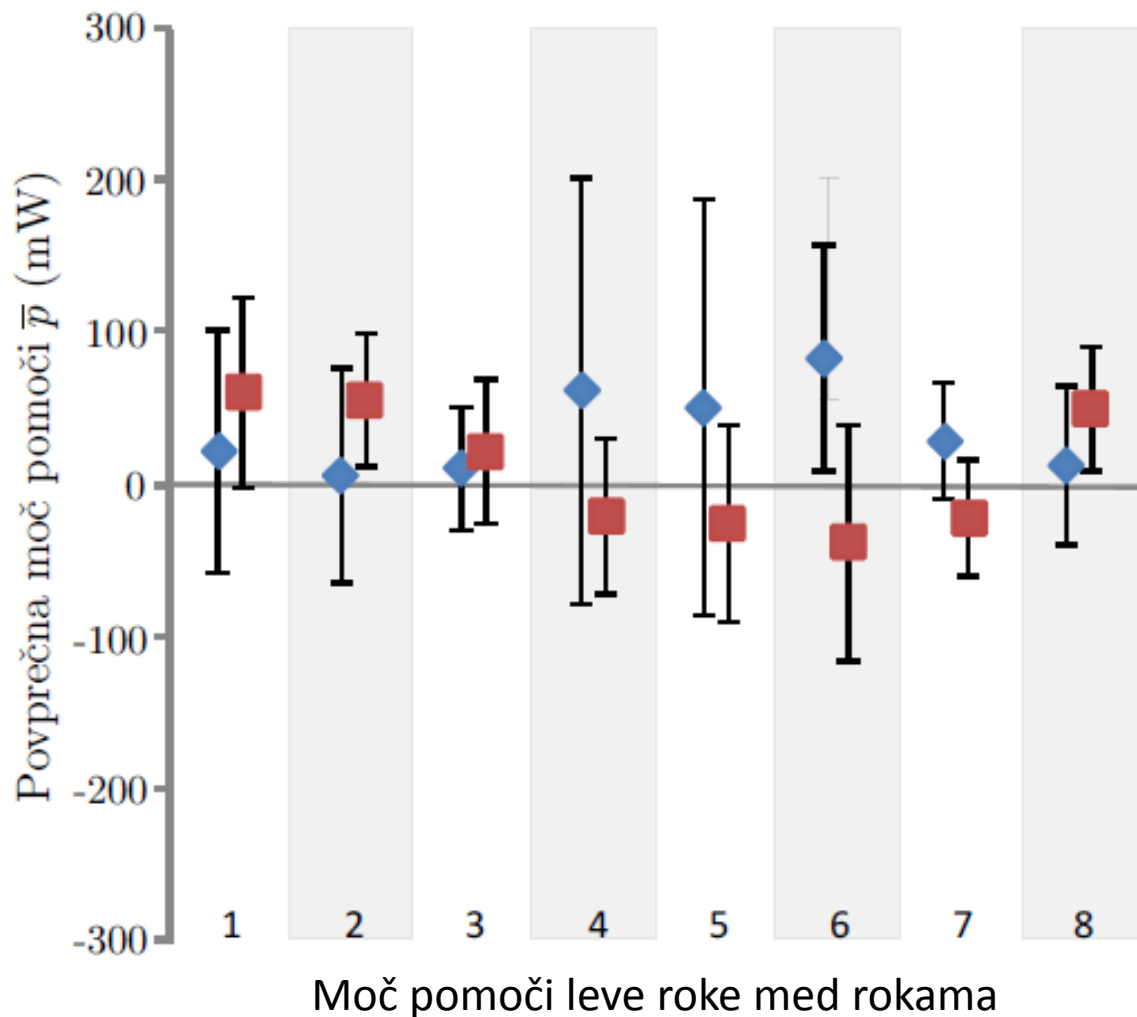
Raziskave

- analiza moči med dvoročno vadbo zdrave osebe
- študija primera
 - ena oseba v kronični fazi po možganski vadbi
 - vadba 3-krat tedensko, 4 tedne
 - izvaja večino opisanih nalog
- vadba pacientov z različnimi patologijami
 - 25 pacientov z različnimi patologijami in stopnjami motorilnih okvar
 - vadbo izvajajo enkrat (nekateri tudi večkrat)
 - izvajata se enoročna vadba po mizi z nalogo Sončki in dvoročna vadba z nalogo Sončki





Analiza moči med dvoročno vadbo



- premički proti cilju
- premički proti izhodišču



Študija primera

Mišični tonus okvarjenega zgornjega uda ocenjen z Modificirano modificirano Ashworthovo lestvico.

Mišična skupina	Pred vadbo	Po vadbi
Notranji rotatorji ramenskega sklepa	3	↑ 2
Zunanji rotatorji ramenskega sklepa	2	↑ 1
Adduktorji ramenskega sklepa	3	↑ 1
Abduktorji ramenskega sklepa	2	→ 2
Ekstenzorji komolca	1	↑ 0
Fleksorji komolca	2	→ 2
Pronatorji komolca	1	→ 1
Volarni fleksorji zapestja	2	→ 2 ¹
Fleksorji prstov (II–V)	1	↑ 0
Fleksorji palca	1	↑ 0

¹ Klonus, se izčrpa po nekaj kontrakcijah.

Motorične funkcije okvarjenega zgornjega uda, ocenjene z Lestvico motoričnega ocenjevanja

Funkcija	Pred vadbo	Po vadbi
Funkcija ramenskega obroča in zgornjega dela roke	4	→ 4
Gibi roke	0	→ 0



Indeks kvalitete gibanja

	Naloga	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Enoročna vadba v razbremenitvi	Sončki	4,6	5,1	4,7	4,9	4,3	5,1	5,2	4,9	4,5	4,6	5,0	→
Dvoročni linearni vertikalni gibi	Sončki	3,5	3,5	4,0	4,0	4,4	5,0	4,9	4,7	5,2	4,4	4,9	↑
Dvoročni linearni horizontalni gibi	Sončki	/	/	3,6	4,2	3,0	4,3	4,7	4,2	3,2	4,3	3,6	→
Dvoročne rotacije	Rotacije	4,0	3,9	4,5	4,4	4,8	4,9	5,0	5,4	4,8	5,2	5,5	↑
Dvoročni krožni vertikalni gibi	Kroženje	3,6	4,3	4,3	4,7	3,9	5,6	5,6	6,0	6,1	5,6	5,0	↑
Dvoročni krožni horizontalni gibi	Kroženje	/	2,4	4,1	3,3	4,1	4,7	3,9	3,0	2,8	4,7	3,7	→
Dvoročni vertikalni labirint	Labirint	/	/	3,2	4,0	3,2	3,3	4,4	3,6	3,9	5,3	4,6	↑

Enoročna vadba v razbremenitvi



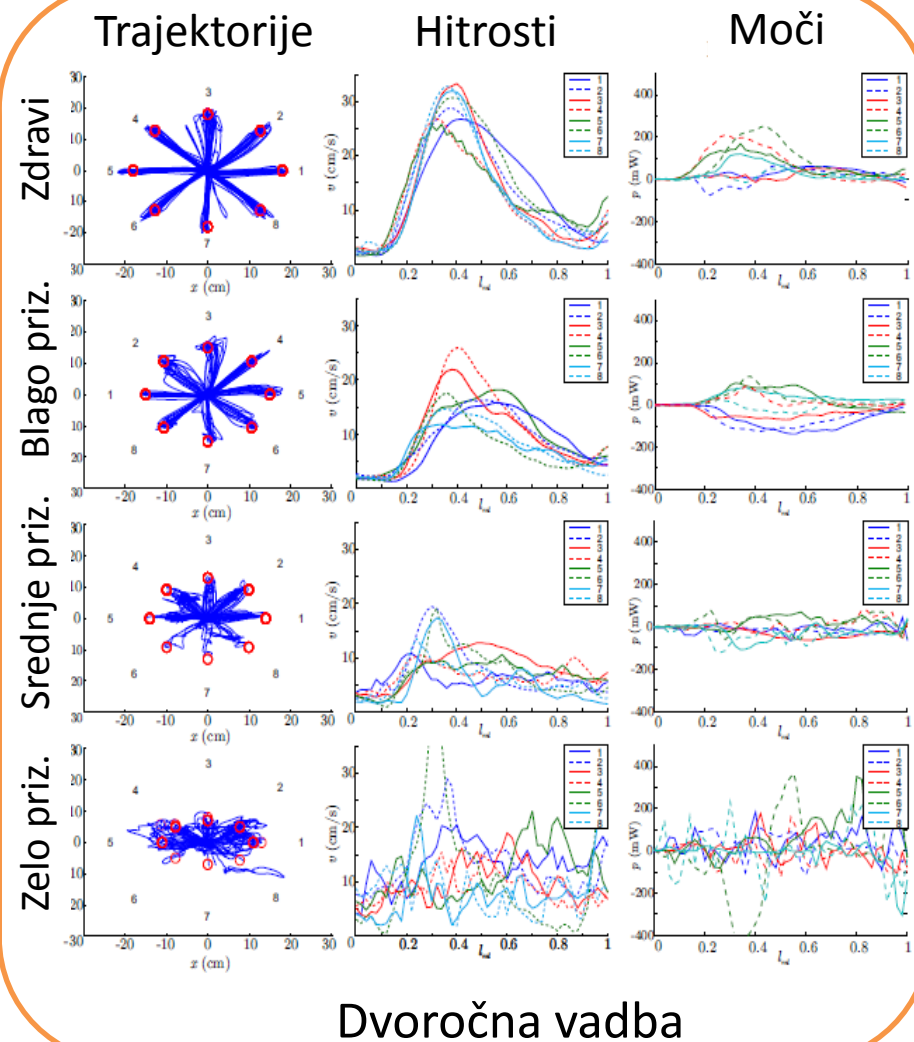
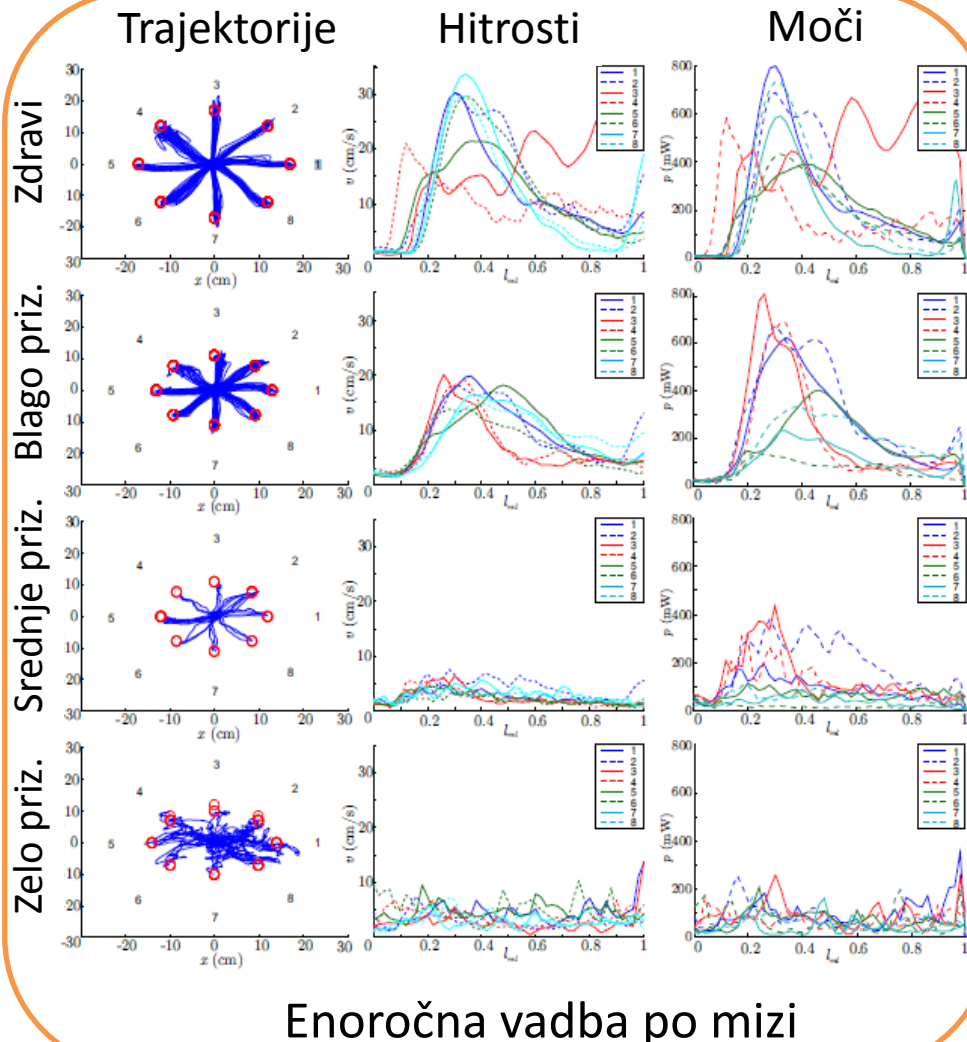
Dvoročna vadba





Vadba pacientov z različnimi patologijami

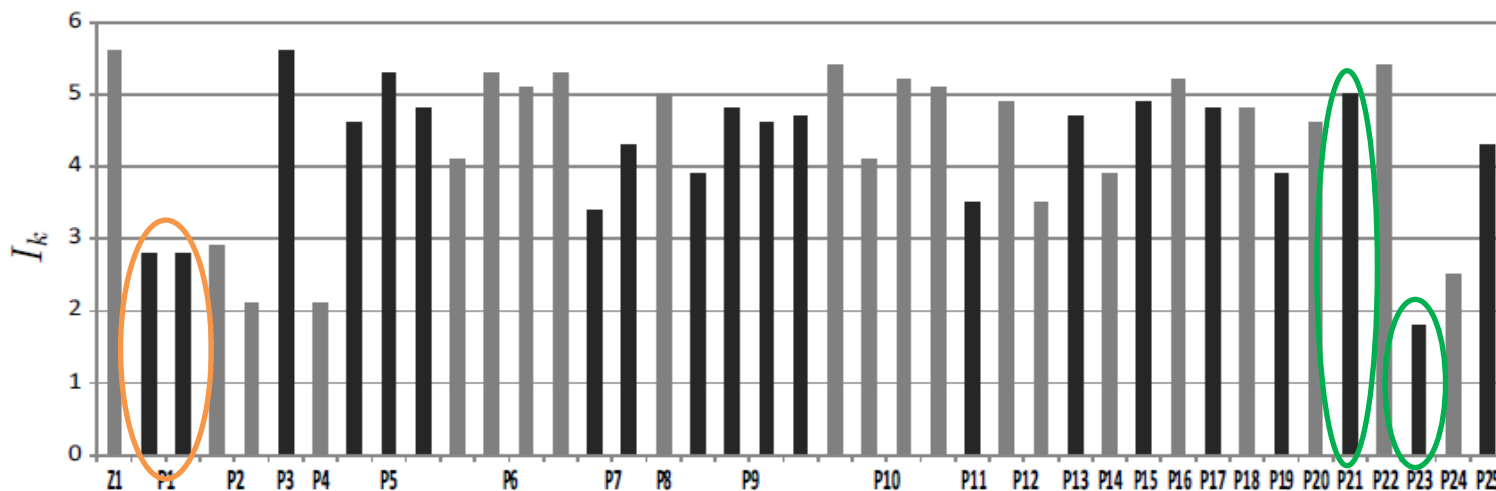
roboLab
laboratorij za robotiko



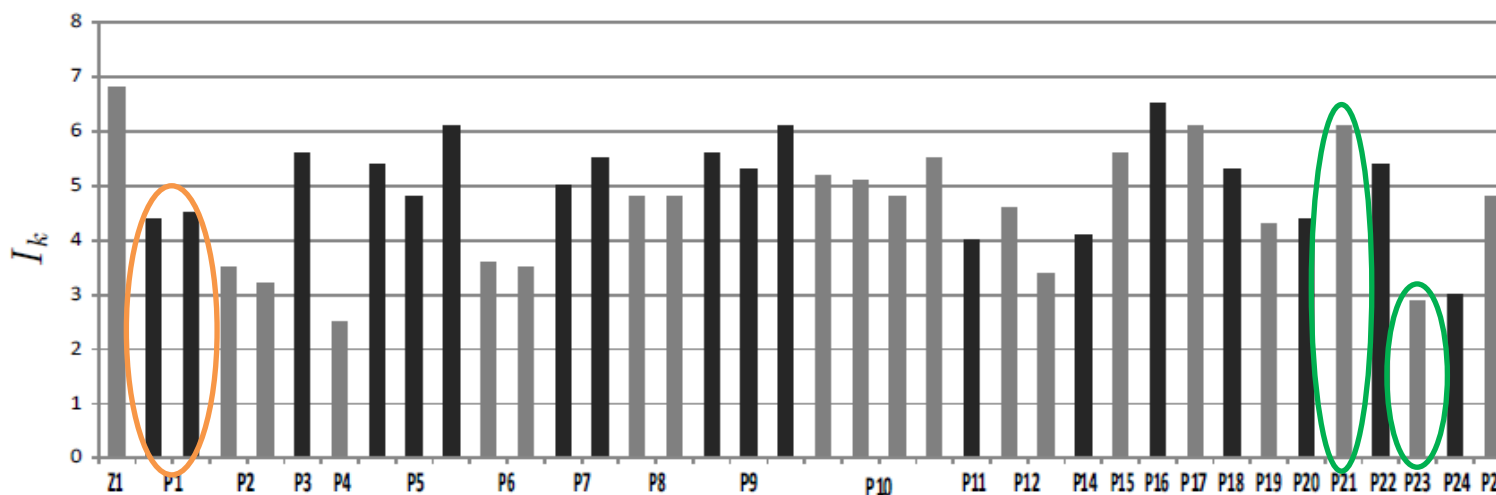


Indeks kvalitete gibanja

Enoročna vadba
po mizi



Dvoročna vadba



Ugotovitve

- nizka interakcija med rokama pri dvoročnih gibih zdrave osebe
- po enomesečni vadbi s sistemom se motorične funkcije in mišični tonus izboljša ali pa ostane nespremenjen
- napredek ni enak pri vseh nalogah – naloge je potrebno prilagoditi posameznim pacientom
- sistem je primeren za vadbo različnih pacientov
- I_k daje ustrezno oceno kvalitete gibanja



Originalni prispevki doktorske disertacije

- Koncept dvoročne vadbe, ki omogoča prilagodljivo pomoč neprizadete roke gibanju paretične roke. Razširjen standardni robotski sistem, razvit na podlagi predlaganega pristopa zajema, podatke o vadbi, jih posreduje pacientu, jih ovrednoti in določi stopnjo pacientovega napredka.
- Prilagojen robotski sistem za dvoročno vadbo hemiparetičnih oseb in adaptivni algoritmi vodenja.
- Izvedba sistema za samostojno senzorno podprto dvoročno vadbo, sposobnega merjenja interakcije (koordinacije) med rokama in primerne za klinično vadbo pod nadzorom fizioterapevta ali za vadbo na domu in analiza njegove uporabnosti.
- Analiza koordinacije zgornjih okončin med dvoročno vadbo in razvoj metod za ocenjevanje napredka vadbe, vključno s predlogom indeksa kvalitete gibanja.



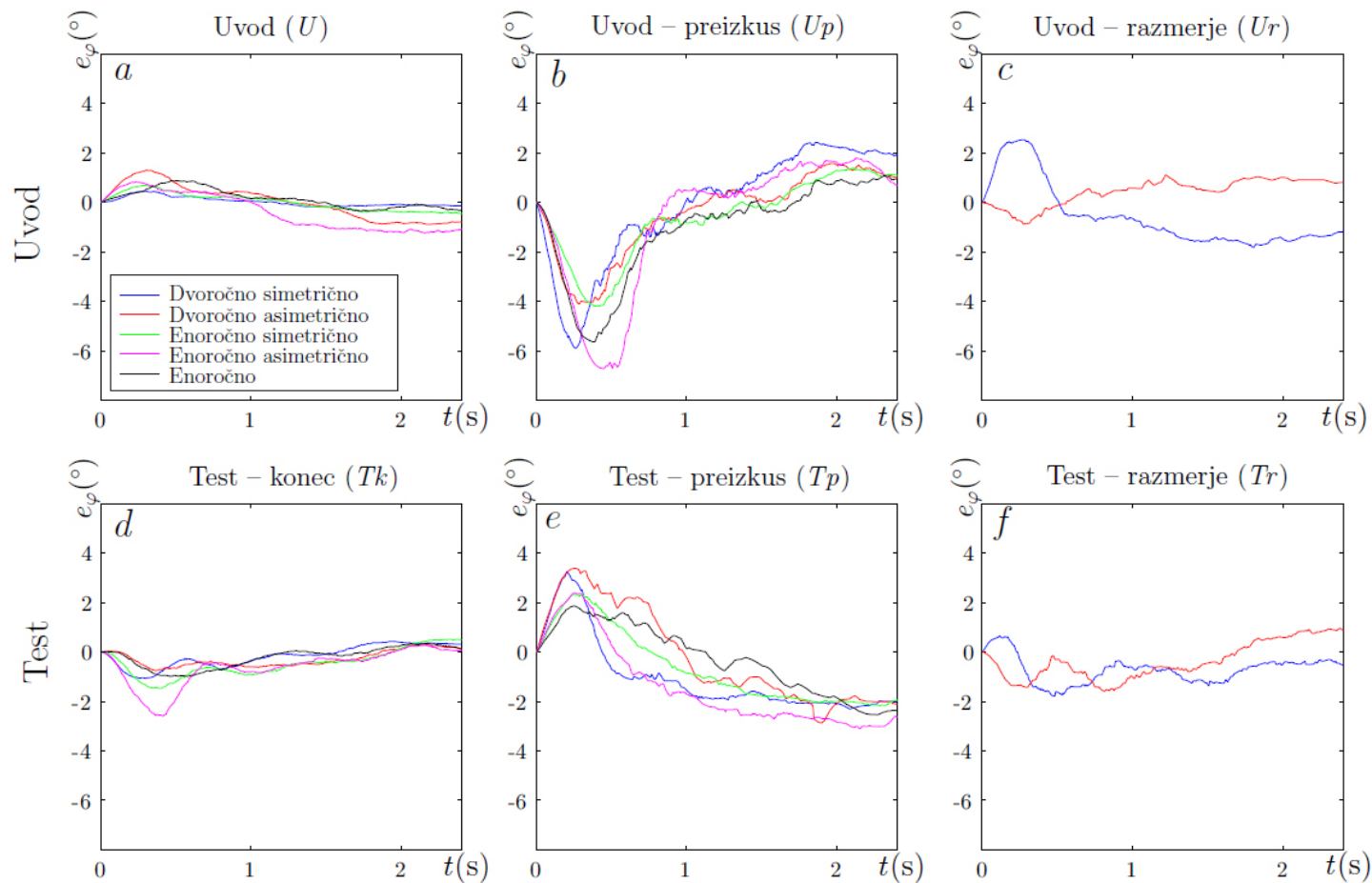
Hvala za pozornost.

“Learn from yesterday, live for today, hope for tomorrow. The important thing is to not stop questioning.”

Albert Einstein



Prilagojen robotski sistem – *potek napak*

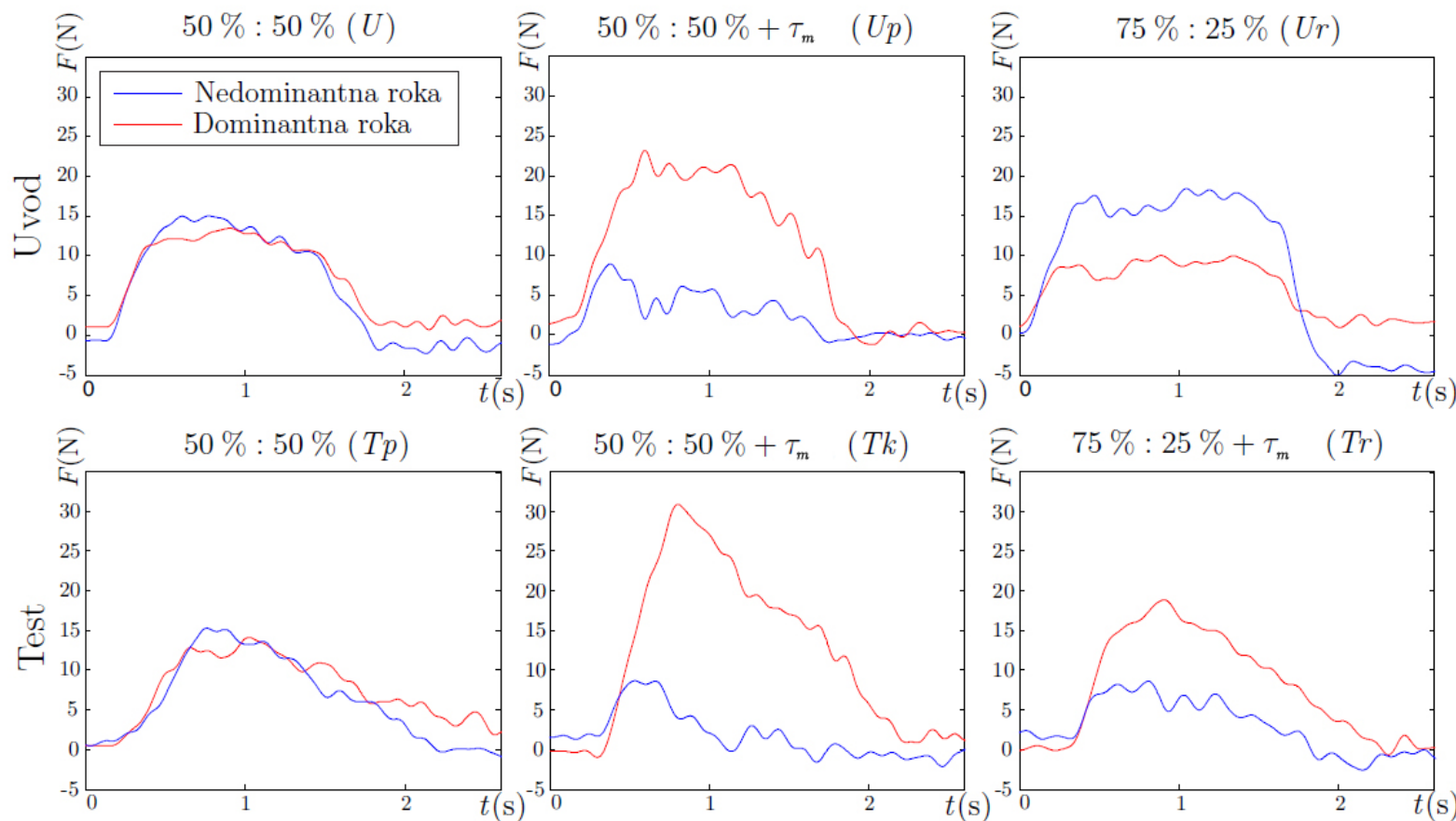


U – uvod brez motilnega navora
 U_p – uvod z motilnim navorom
 V_s – začetek učenja z motilnim navorom
 V_k – konec učenja z motilnim navorom

T_s – začetek testa z motilnim navorom
 T_k – konec testa z motilnim navorom
 T_p – test brez motilnega navora



Prilagojen robotski sistem – *potek sil*



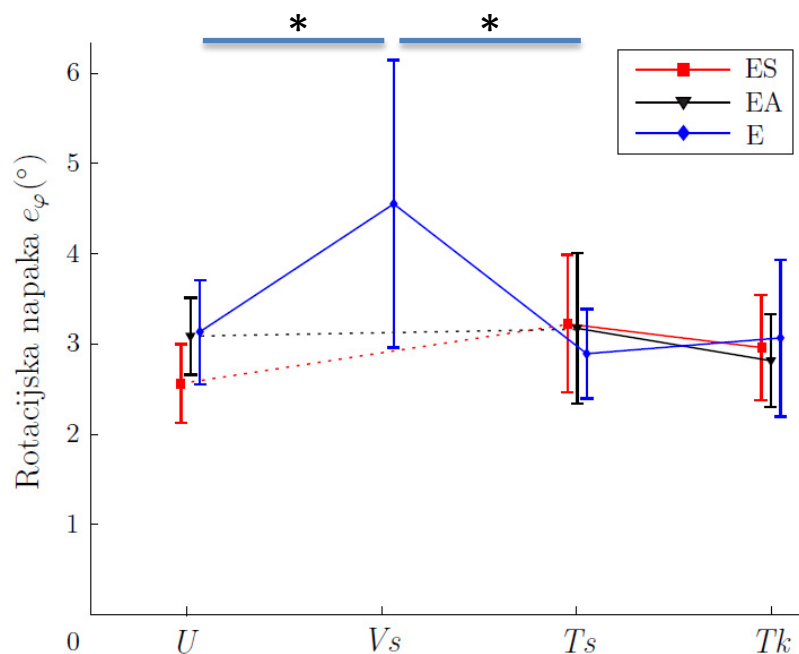
U – uvod brez motilnega navora
 Up – uvod z motilnim navorom
 Ur – uvod s spremenjenim razmerjem sil

Tk – konec testa z motilnim navorom
 Tp – test brez motilnega navora
 Tr – test s spremenjenim razmerjem sil



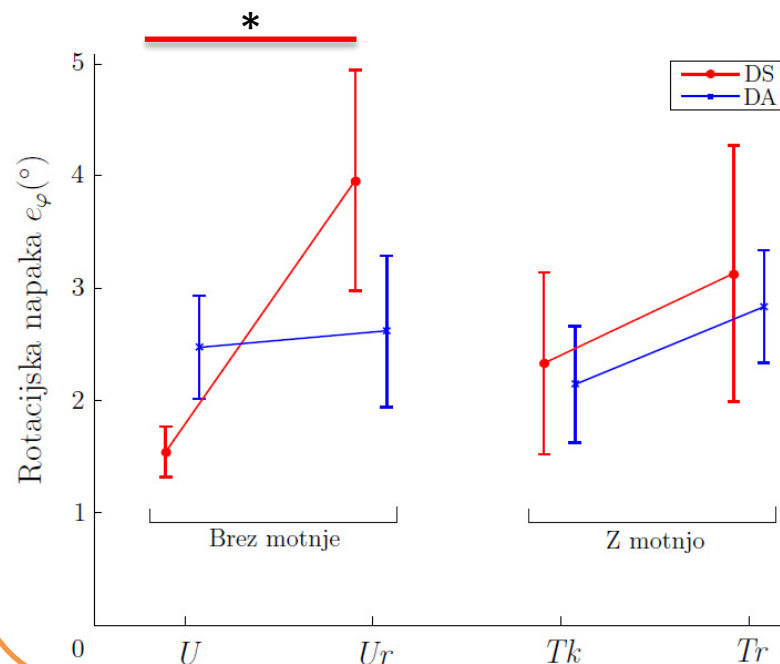
Rezultati – rotacijske napake

Vpliv dvoročnega učenja na enoročno izvedbo



U – uvod brez motilnega navora
Vs – začetek učenja z motilnim navorom
Ts – začetek testa z motilnim navorom
Tk – konec testa z motilnim navorom

Sprememba razmerja sil

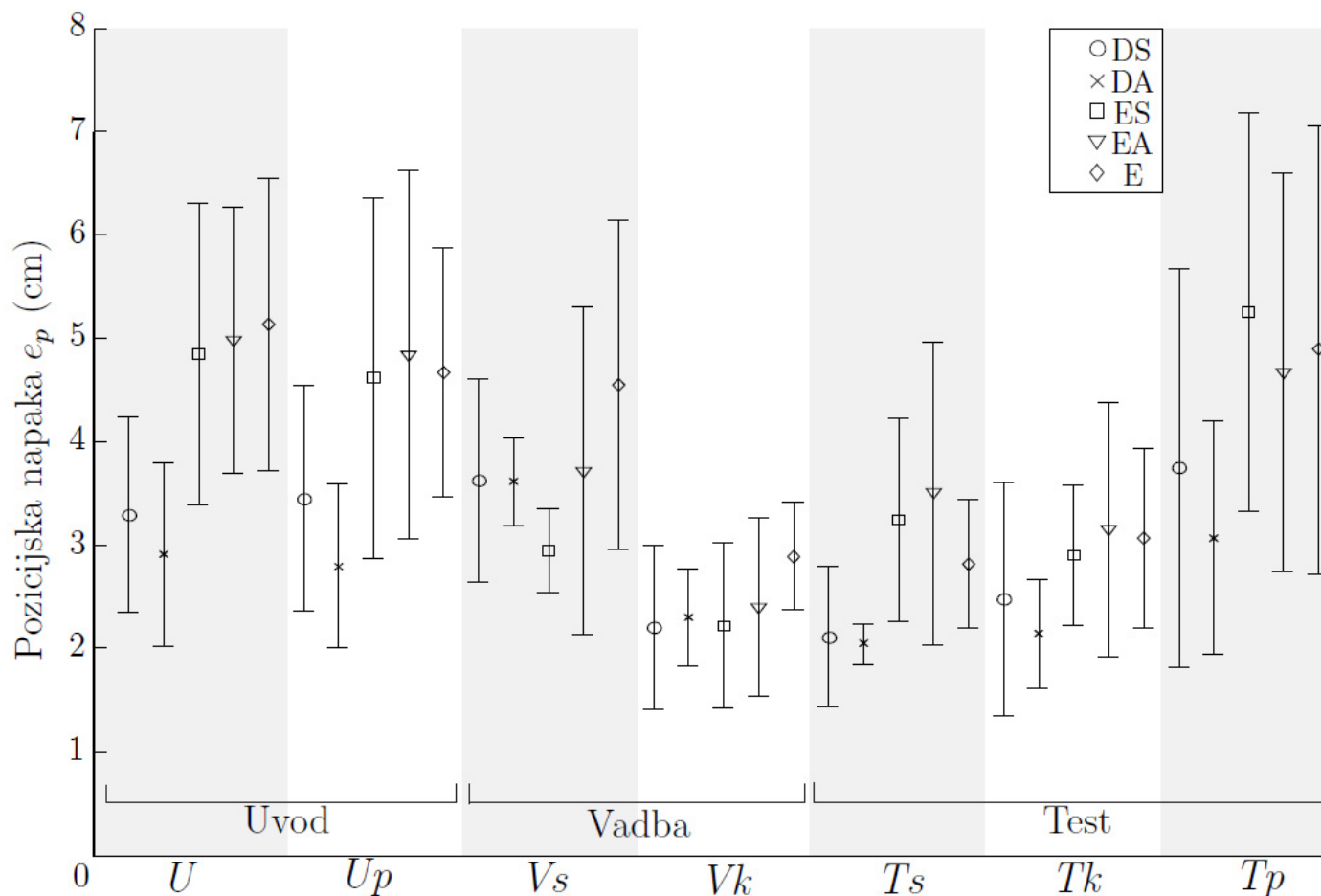


U – uvod brez motilnega navora
Ur – uvod s spremembo razmerja sil
Tk – konec testa z motilnim navorom
Tr – test s spremembo razmerja sil

*p<0.05



Prilagojen robotski sistem – *napake sledenja*



U – uvod brez motilnega navora
Up – uvod z motilnim navorom
Vs – začetek učenja z motilnim navorom
Vk – konec učenja z motilnim navorom

Ts – začetek testa z motilnim navorom
Tk – konec testa z motilnim navorom
Tp – test brez motilnega navora



Vrednotenje gibanja

- T_{60} število točk v igri
- p moč bolj prizadete roke

$$p(k) = (\mathbf{F}^T(k) - \mathbf{F}^T(k_1)) \cdot \dot{\mathbf{X}}(k)$$

- E skupna energija bolj prizadete roke

$$E(k_1, k_2) = T_s \sum_{i=k_1}^{k_2} p(i)$$

- R koeficient natančnosti

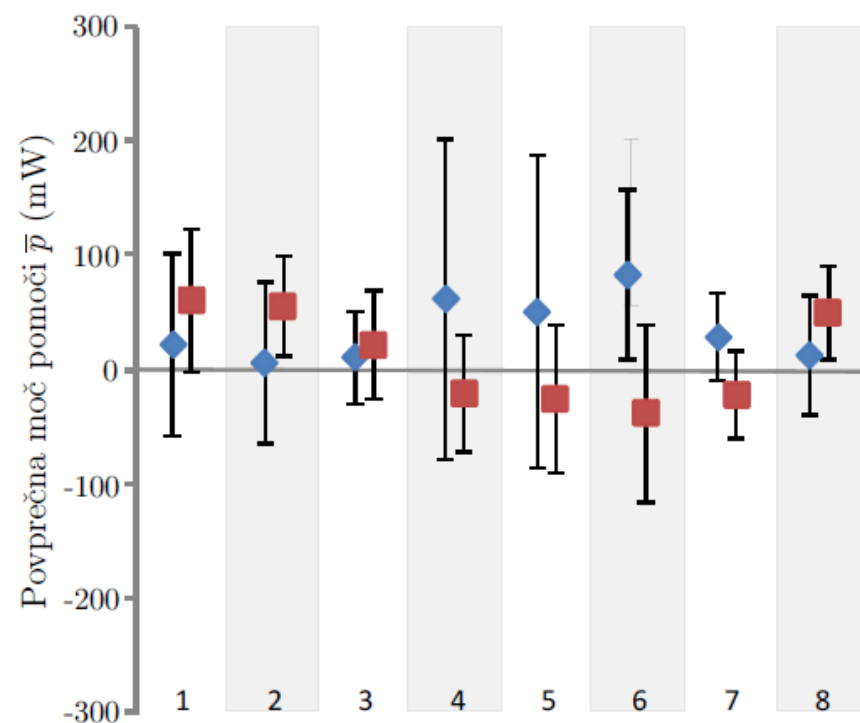
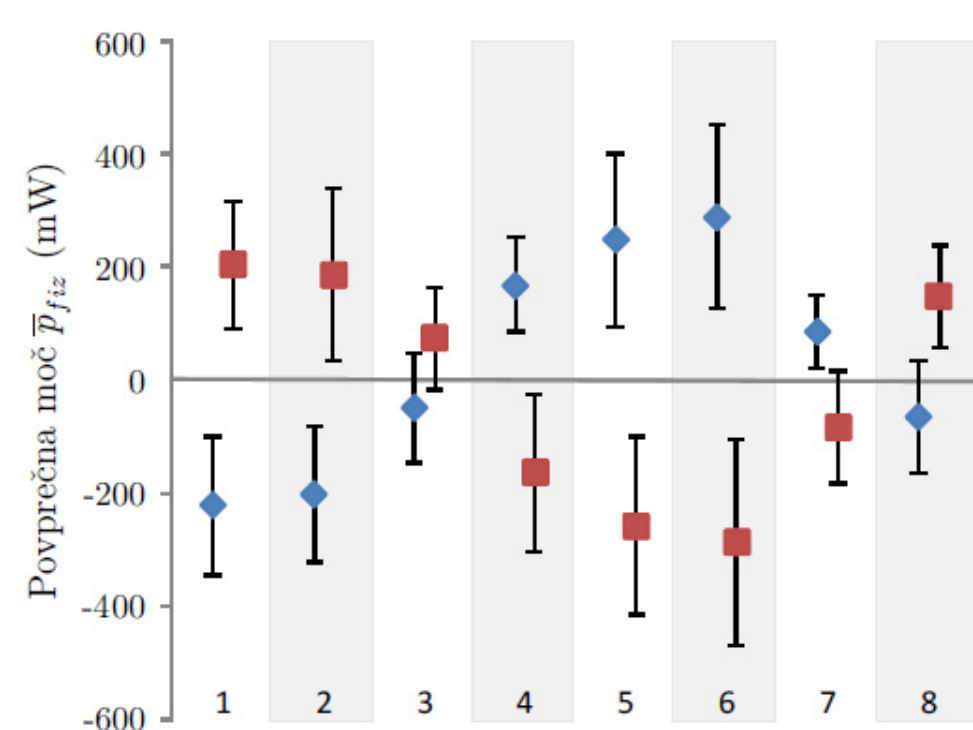
$$R = \frac{l_t}{l_n}$$



Analiza moči med dvoročno vadbo

Moč interakcije med rokama

Moč pomoči leve roke med rokama



■ premiki proti cilju
◆ premiki proti izhodišču



Enoročna vadba v razbremenitvi

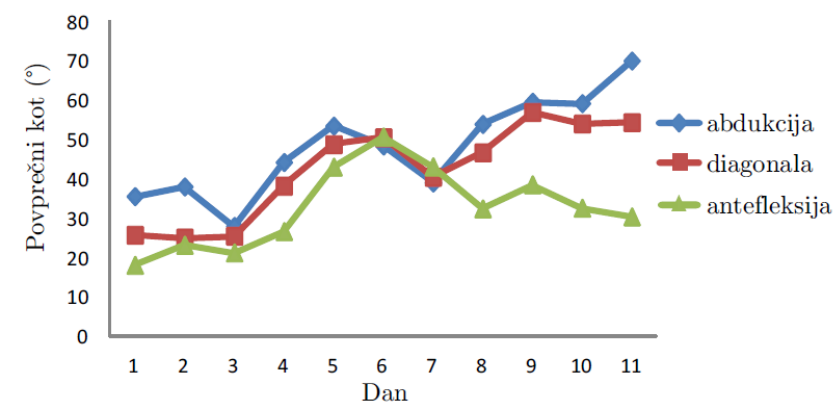
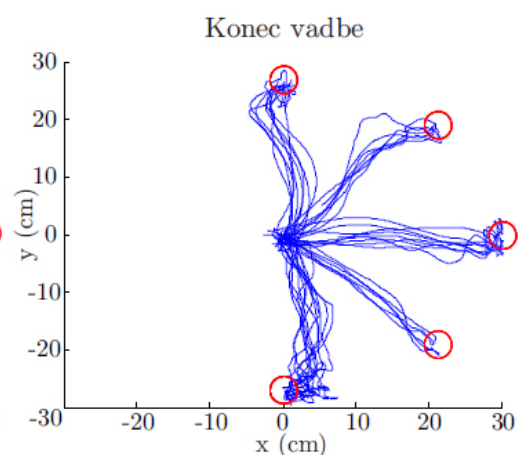
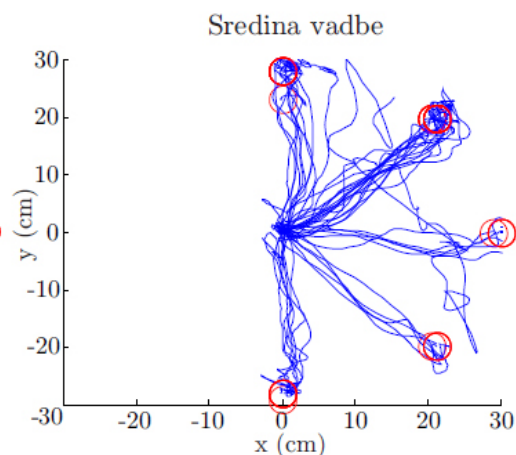
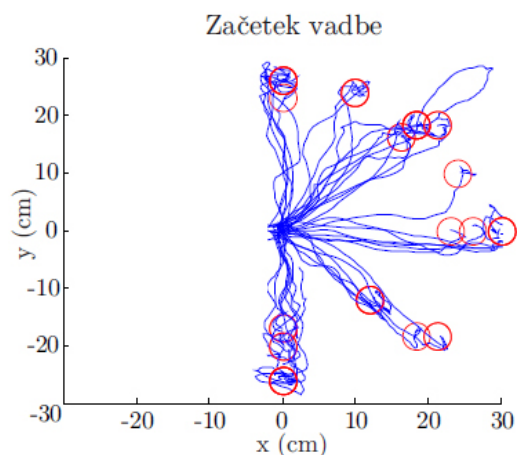
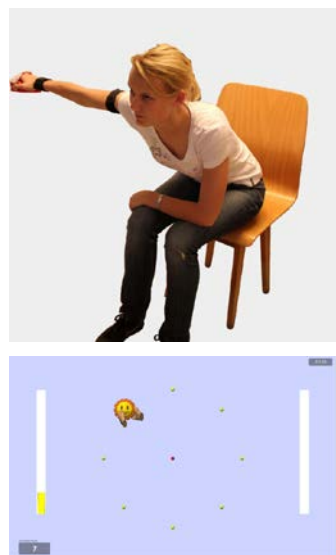


Tabela 5.3: Enoročna vadba v razbremenitvi – naloga Sončki.

Dan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
R	1,5	1,4	1,4	1,5	1,4	1,5	1,2	1,3	1,2	1,3	1,2
$\bar{v}_t$ (cm/s)	5,2	6,1	5,4	5,4	7,5	7,3	6,9	6,7	6,9	7,0	7,7
η_{sal}	4,2	3,4	3,4	3,2	4,8	2,9	2,9	3,3	4,1	4,3	3,1
T_{60} (min ⁻¹)	8,8	6,5	7,4	8,1	7,4	8,8	5,4	9,4	7,6	6,1	8,1
$\overline{dX}$ (cm)	1,6	1,2	1,4	1,3	1,5	1,4	1,1	1,6	1,7	1,3	1,5
I_k	4,6	5,1	4,7	4,9	4,3	5,1	5,2	4,9	4,5	4,6	5,0



Dvoročni linearni gibi v vertikalni ravnini

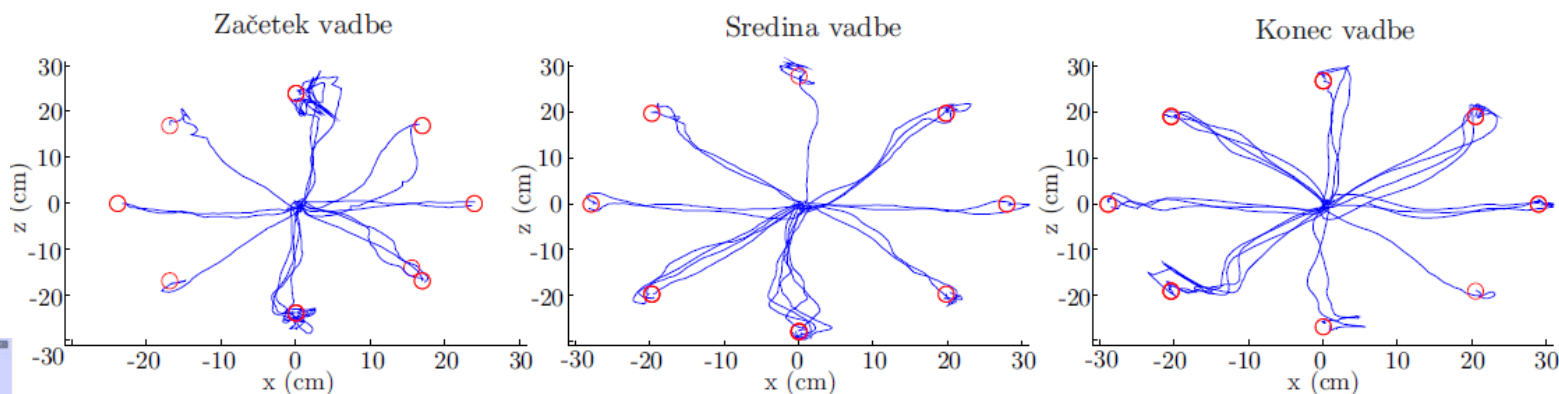
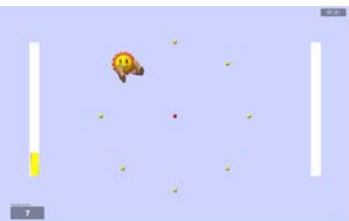


Tabela 5.4: Dvoročna vadba v vertikalni ravnini – naloga Sončki.

Dan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
R	1,52	1,49	1,36	1,35	1,38	1,26	1,24	1,19	1,11	1,26	1,27
$\bar{v}_t$ (cm/s)	6,9	5,4	6,9	8,0	9,0	8,21	9,7	9,3	13,2	10,0	8,6
η_{sal}	3,5	4,7	3,6	5,1	2,9	3,0	3,2	3,4	2,5	3,3	2,7
p_{ven} (mW)	-304	-99	-59	-88	-234	-132	-129	-145	-308	-302	-116
p_{not} (mW)	-219	-19	-126	-108	-193	-123	-110	-115	-269	-286	-234
T_{60} (min ⁻¹)	7,0	5,5	8,3	7,7	9,9	8,8	10,5	10,0	10,1	9,7	9,6
$\overline{dX}$ (cm)	2,4	1,7	2,1	1,3	1,7	1,0	1,1	1,4	1,2	1,4	1,4
I_k	3,5	3,5	4,0	4,0	4,4	5,0	4,9	4,7	5,2	4,4	4,9



Dvoročni linearni gibi v horizontalni ravnini

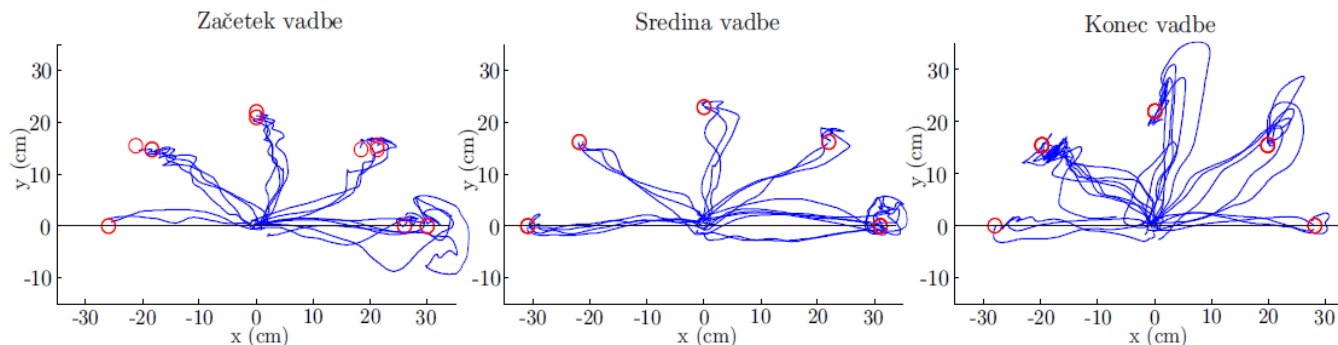


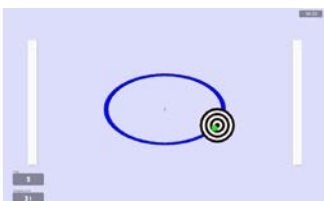
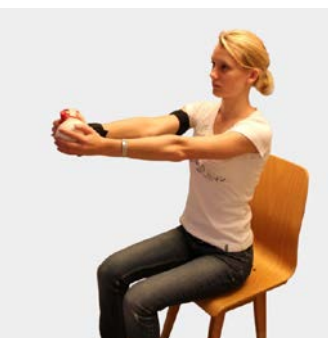
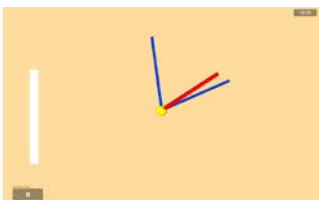
Tabela 5.5: Dvoročna vadba v horizontalni ravnini – naloga Sončki.

Dan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
R	/	/	1,47	1,37	1,64	1,27	1,15	1,46	1,64	1,39	1,68
$\bar{v}_t$ (cm/s)	/	/	5,4	6,3	6,5	6,9	10,2	9,2	9,3	6,0	7,5
η_{sal}	/	/	4,5	3,4	4,8	3,0	2,6	2,9	5,2	2,6	5,2
p_{ven} (mW)	/	/	-172	-120	-437	-321	-414	-371	-356	-197	-170
p_{not} (mW)	/	/	-252	-219	-242	-216	-244	-271	-384	-158	-152
T_{60} (min ⁻¹)	/	/	8,3	8,1	7,3	6,9	9,1	9,3	7,6	7,9	8,0
$\overline{dX}$ (cm)	/	/	1,8	1,5	2,3	1,3	1,4	1,7	1,9	1,8	1,4
I_k	/	/	3,6	4,2	3,0	4,3	4,7	4,2	3,2	4,3	3,6

Dvoročne rotacije

Tabela 5.6: Dvoročna vadba – naloga Rotacije.

Dan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
R	1,004	1,005	1,003	1,004	1,004	1,005	1,004	1,004	1,004	1,005	1,004
$\bar{v}_t$ ($^{\circ}/s$)	36,6	33,1	31,6	29,7	33,2	33,9	42,4	45,7	37,8	43,3	48,4
η_{sal}	4,5	5,5	3,7	3,7	2,9	2,9	3,1	2,7	3,1	3,1	3,0
p (mW)	-148	-40	-44	-31	-42	-36	-65	-83	-53	-87	-43
T_{60} (min^{-1})	10,2	7,8	11,5	9,6	11,1	11,1	12,7	14,6	10,8	16,5	16,1
I_k	4,0	3,9	4,5	4,4	4,8	4,9	5,0	5,4	4,8	5,2	5,5



Dvoročni krožni gibi v vertikalni ravnini

Tabela 5.7: Dvoročna vadba v vertikalni ravnini – naloga Kroženje.

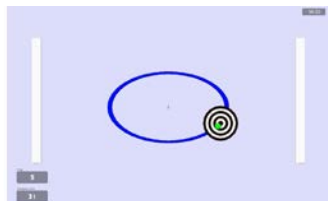
Dan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
R	1,44	1,19	1,25	1,41	1,30	1,11	1,12	1,09	1,05	1,03	1,08
$\bar{v}_t$ (cm/s)	5,6	7,1	5,7	4,3	5,5	7,3	8,5	6,7	9,7	7,9	10,7
η_{sal}	9,4	10,5	6,4	16,0	14,1	5,5	4,7	4,7	15,0	7,8	8,7
p (mW)	-220	-62	-22	-13	-30	-14	-21	-12	-7	-65	-20
$\overline{dX}$ (cm)	0,8	0,7	0,8	0,5	0,7	0,6	0,6	0,5	0,4	0,5	0,6
I_k	3,6	4,3	4,3	4,7	3,9	5,6	5,6	6,0	6,1	5,6	5,0



Dvoročni krožni gibi v horizontalni ravnini robolab laboratorij za robotiko

Tabela 5.8: Dvoročna vadba v horizontalni ravnini – naloga Kroženje.

Dan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
R	/	1,27	1,15	1,42	1,28	1,29	1,10	1,23	1,19	1,09	1,26
$\bar{v}_t$ (cm/s)	/	8,1	6,5	5,6	5,7	6,2	8,4	7,4	8,2	7,2	7,8
η_{sal}	/	11,2	9,9	11,1	28,9	9,0	7,1	11,3	10,6	8,2	10,6
p (mW)	/	-105	-97	-46	-127	-36	-89	-67	-39	-6	-15
$\overline{dX}$ (cm)	/	3,0	0,7	1,1	0,6	0,6	0,9	1,3	2,6	0,7	1,0
I_k	/	2,4	4,1	3,3	4,1	4,7	3,9	3,0	2,8	4,7	3,7





Dvoročni labirint v vertikalni ravnini

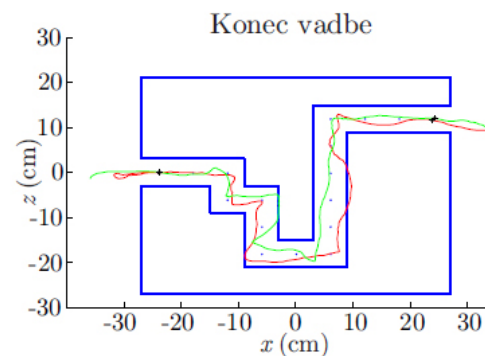
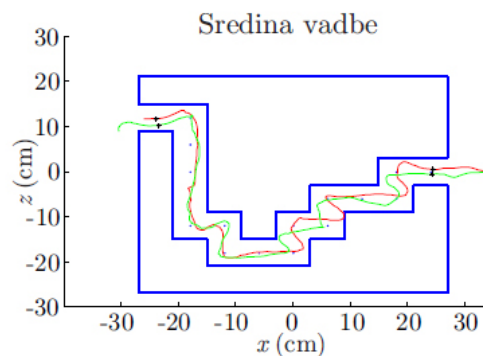
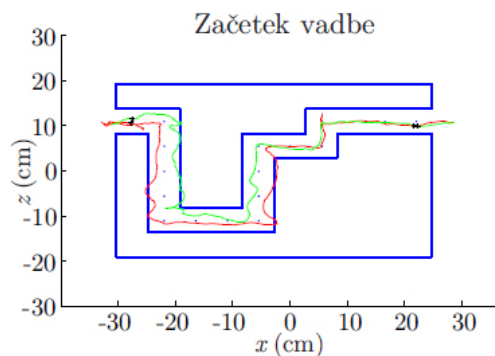
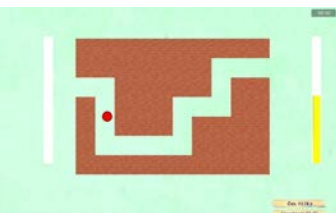


Tabela 5.9: Dvoročna vadba v vertikalni ravnini – naloga Labirint.

Dan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
R	/	/	1,20	1,22	1,59	1,44	1,14	1,17	1,19	1,04	1,14
$\bar{v}_t$ (cm/s)	/	/	7,4	10,5	11,3	9,0	12,7	12,3	11,7	11,9	11,3
η_{sal}	/	/	14,7	7,4	8,5	12,4	11,6	8,8	12,3	12,7	10,1
p (mW)	/	/	-71	-67	-32	-103	-41	-91	-29	-37	-19
$\overline{dX}$ (cm)	/	/	1,2	0,9	1,5	1,0	0,7	1,1	0,9	0,5	0,7
I_k	/	/	3,2	4,0	3,2	3,3	4,4	3,6	3,9	5,3	4,6