



Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za elektrotehniko



**robolab**  
laboratorij za robotiko

---

Jaka Zihrl

# **Haptični primitivi v rehabilitacijski robotiki**

Doktorska disertacija

---

Mentor: prof. dr. Marko Munih

Ljubljana, marec 2013



# Vsebina

- Uvod
- Cilji
- Vsebina disertacije
  - Haptične pomoči v rehabilitacijski robotiki
  - Površinske lastnosti v haptičnem okolju
- Originalni prispevki disertacije

# Uvod

- Rehabilitacijska robotika
  - Pasivni sistemi
    - Eksoskeletni
  - Prijemanje

Prednost uporabe robotov:  
objektivno merjenje sprememb  
motoričnih sposobnosti



## Podobnik, UL

J. Podobnik in M. Munih, Robot-assisted evaluation of coordination between grasp and load forces in a power grasp in humans, 2006.



## Armeo, Hocoma



R. Sanchez et al., Automating arm movement training following severe stroke: functional exercises with quantitative feedback in a gravity-reduced environment, 2006.

## Kurillo, UL

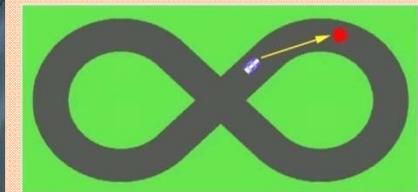


G. Kurillo, A. Zupan, T. Bajd, Force tracking system for the assessment of grip force control in patients with neuromuscular diseases, 2004.

# Uvod

- Aktivni sistemi
  - Vpetje na vrhu
  - Pomoč robota

Prednost uporabe robotov:  
aktivni roboti lahko reproducirajo  
ponovljive gibe ter z različnimi pomočmi  
pomagajo osebam



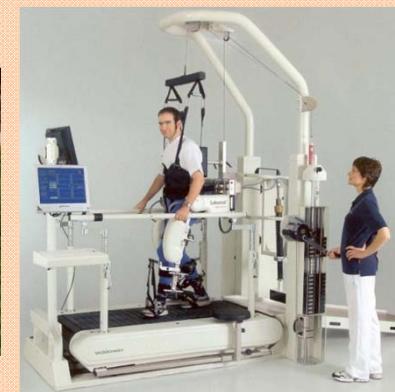
Braccio di Ferro, UG

Vergaro et al., Self-adaptive robot training of stroke survivors for continuous tracking movements, 2010.

- Spodnje ekstremitete

ETH

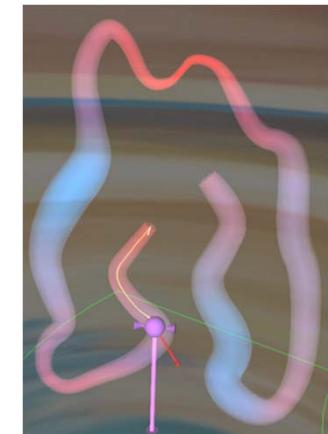
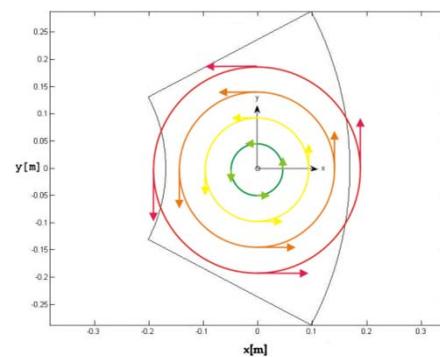
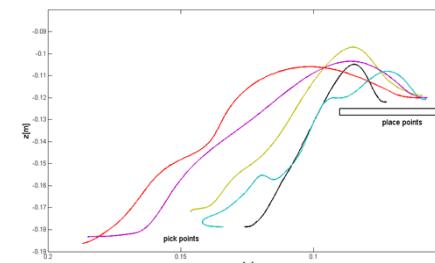
Duschau-Wicke et al., Adaptive support for patient-cooperative gait rehabilitation with the Lokomat, 2008.



Lokomat,  
Hocoma AG

# Uvod

- Haptični primitiv
  - objekt ali algoritem, ki osebi prikazuje razmerje med gibanjem in silo v navideznem okolju
- Razvoj haptičnih primitivov
  - gibi od začetne do končne točke
  - gibi po zavitem tunelu
  - P&P gibi
  - prijemanje objektov
  - polja sil



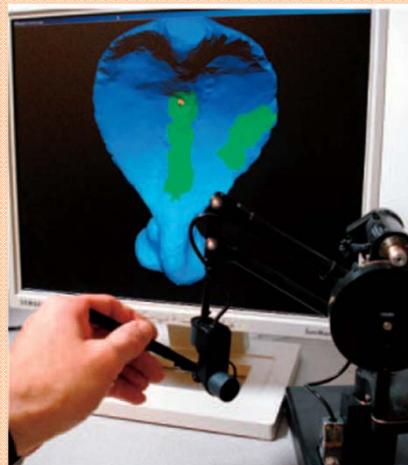
Podobnik, UL



HIRO, GIFU

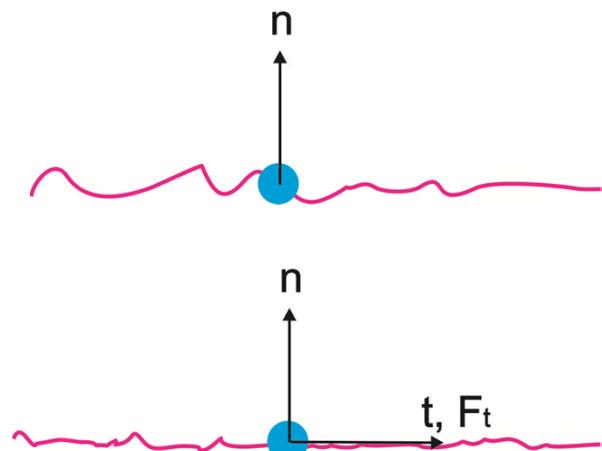
## Uvod

- Površine haptičnih objektov
  - Zaznavanje trkov, normalna smer
  - Teksture, variacija profila površine
  - Trenje, tangencialna smer

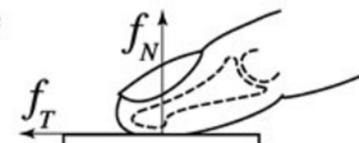


Lang in Andrews,  
University of Ottawa

J. Lang in S. Andrews, Measurement-based modeling of contact forces and textures for haptic rendering, 2011.



Campion et al.,  
IRIS, Canada



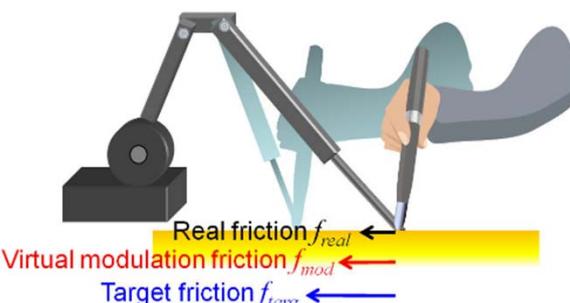
G. Campion, The Synthesis of Three Dimensional Haptic Textures: Geometry, Control, and Psychophysics, 2011.



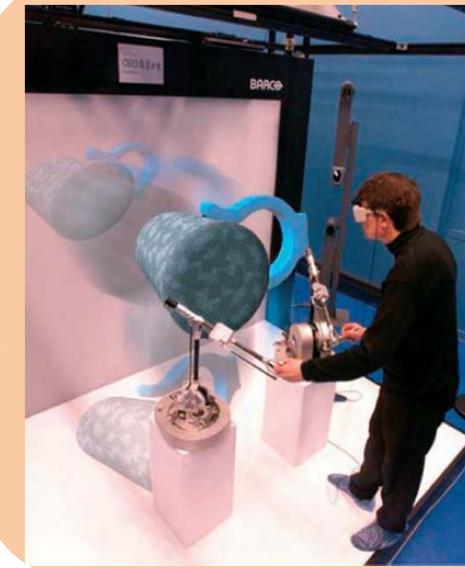
## Uvod

- Prikazovanje trenja
  - 6-DOF prikazovalniki
    - Coulomb-ov model trenja
  - 1-DOF prikazovalniki
    - identifikacija trenja
    - aluminij na različnih površinah
    - dinamični modeli

Jeon et al.,  
ETH Zurich

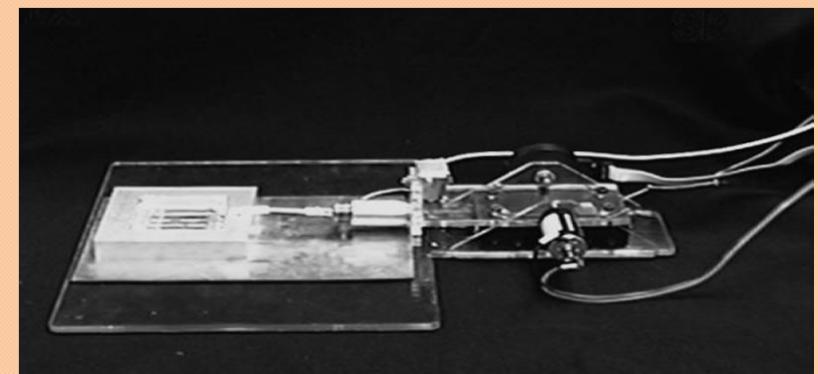


S. Jeon, J. Metzger, S. Choi, in M. Harders, Extensions to haptic augmented reality: Modulating friction and weight, 2011.



Duriez et al.,  
CIMIT

Duriez et al., Realistic Haptic Rendering of Interacting Deformable Objects in Virtual Environments, 2006.



Richard, Stanford

Richard, On the identification and haptic display of friction, 2000



## Cilji

- Izvedba haptičnih pomoči v obstoječi sistem za rehabilitacijo
  - Pomoč pri seganju
  - Pomoč pri prijemanju
  - Haptični tunel
- Evalvacija vpliva haptičnih pomoči na podlagi izbranih parametrov za ocenjevanje gibanja in uspešnosti
- Modeliranje in izvedba haptičnih površinskih lastnosti
  - Trenje
  - Teksture
- Evalvacija ločevanja haptičnih površin v navidezni nalogi



# Metodologija

- Haptični rehabilitacijski sistem



Projekcijski sistem



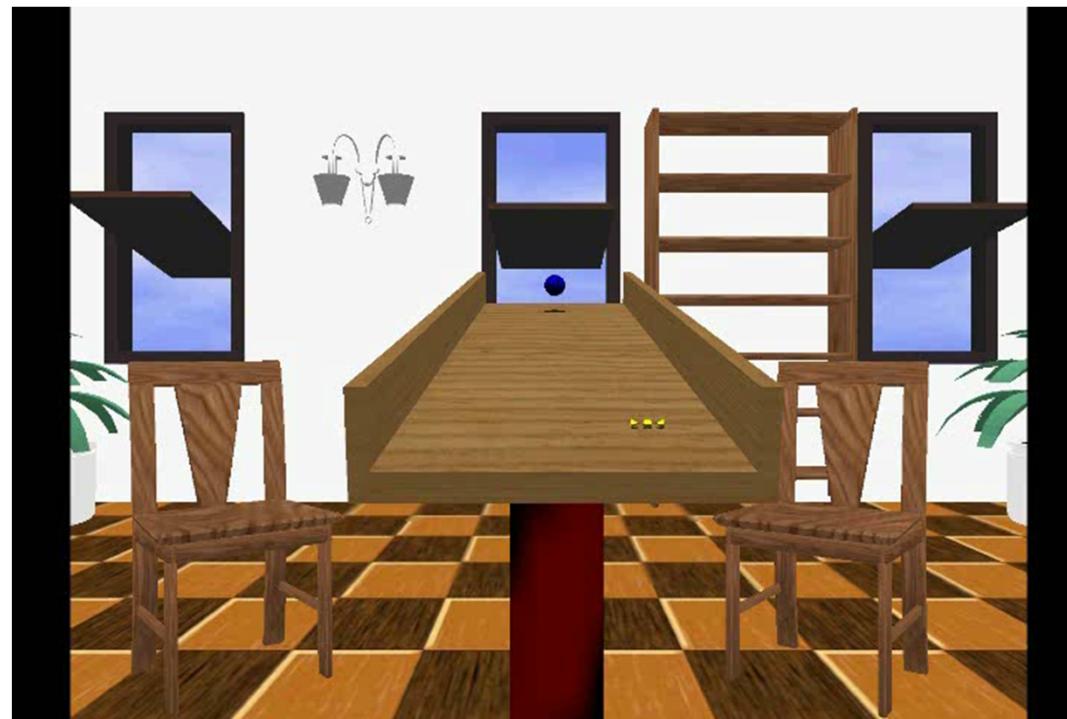
Robot HapticMASTER z napravo za prijemanje



Mehanizem za kompenzacijo gravitacije

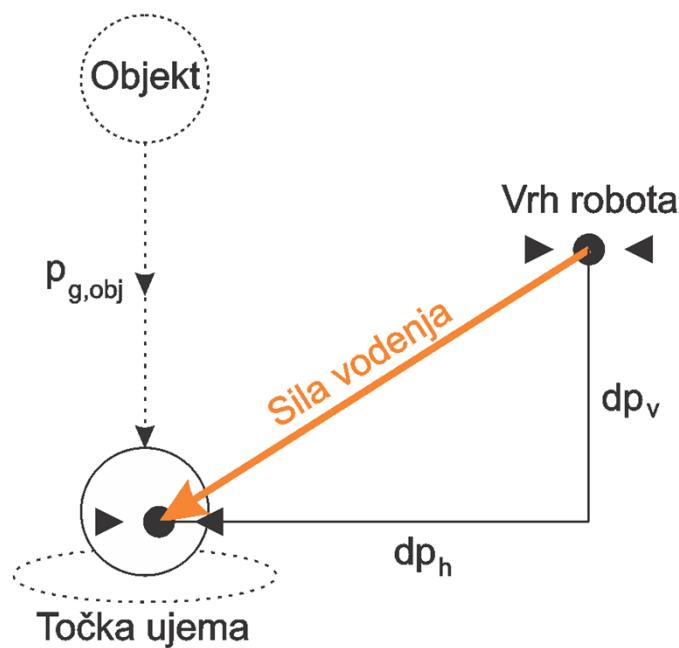
# Metodologija

- Navidezna naloga
  - Kombinacija seganja, prijemanja, ter gibanja
  - Žoga se prikotali po mizi
  - Oseba mora ujeti žogo in jo odložiti v košaro

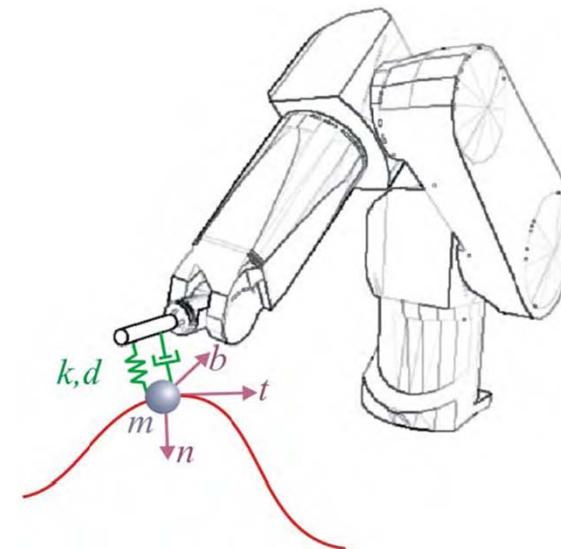


# Haptične pomoči

- Pomoč pri seganju
  - Gibanje od začetne do končne točke
  - Merjenec mora slediti objektom
  - Impedančna regulacija v frontalni ravnini

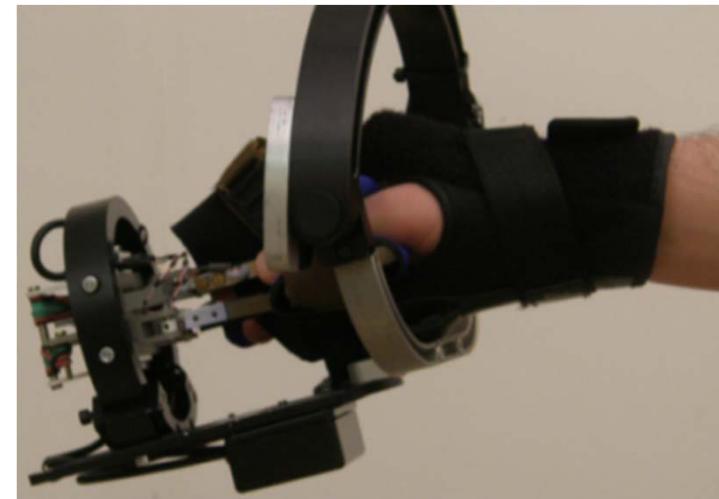
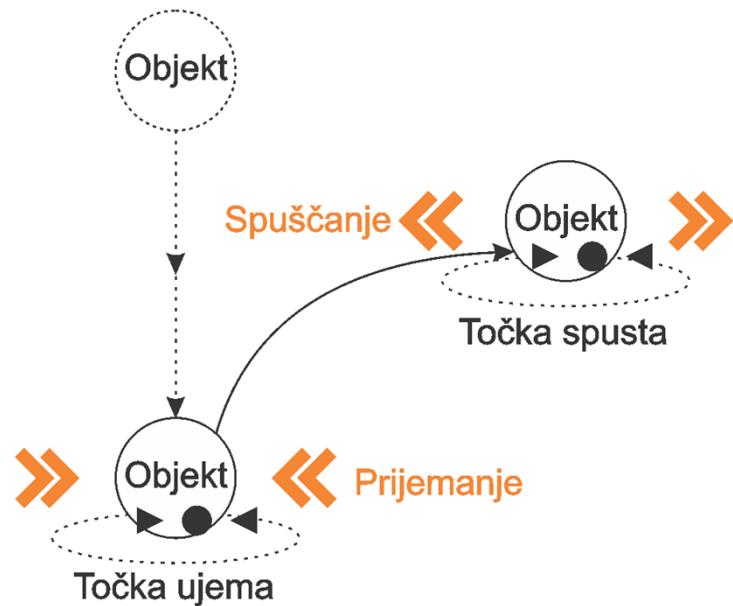


$$F = M\ddot{x} + B\dot{x} + Kx$$



# Haptične pomoči

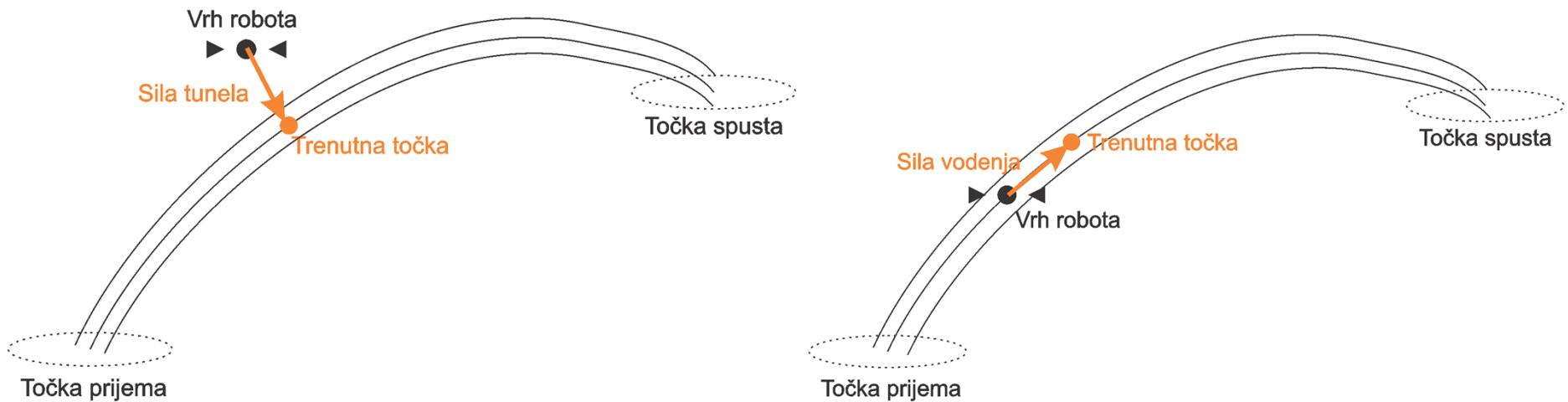
- Pomoč pri prijemanju
  - Objekt se samodejno prilepi na vrh robota
  - Ko merjenec doseže mesto odlaganja objekta, se objekt samodejno odlepi



# Haptične pomoči

- Haptični tunel
  - Gibanje po trajektoriji od začetne do končne točke
  - Referenčno trajektorijo dobimo na podlagi baze izmerjenih gibov zdravih oseb
  - Zaznavanje trkov je modelirano kot vzmet-dušilka
  - Vodenje po trajektoriji osebi pomaga doseči končno mesto

$$F = M\ddot{x} + B\dot{x} + Kx$$



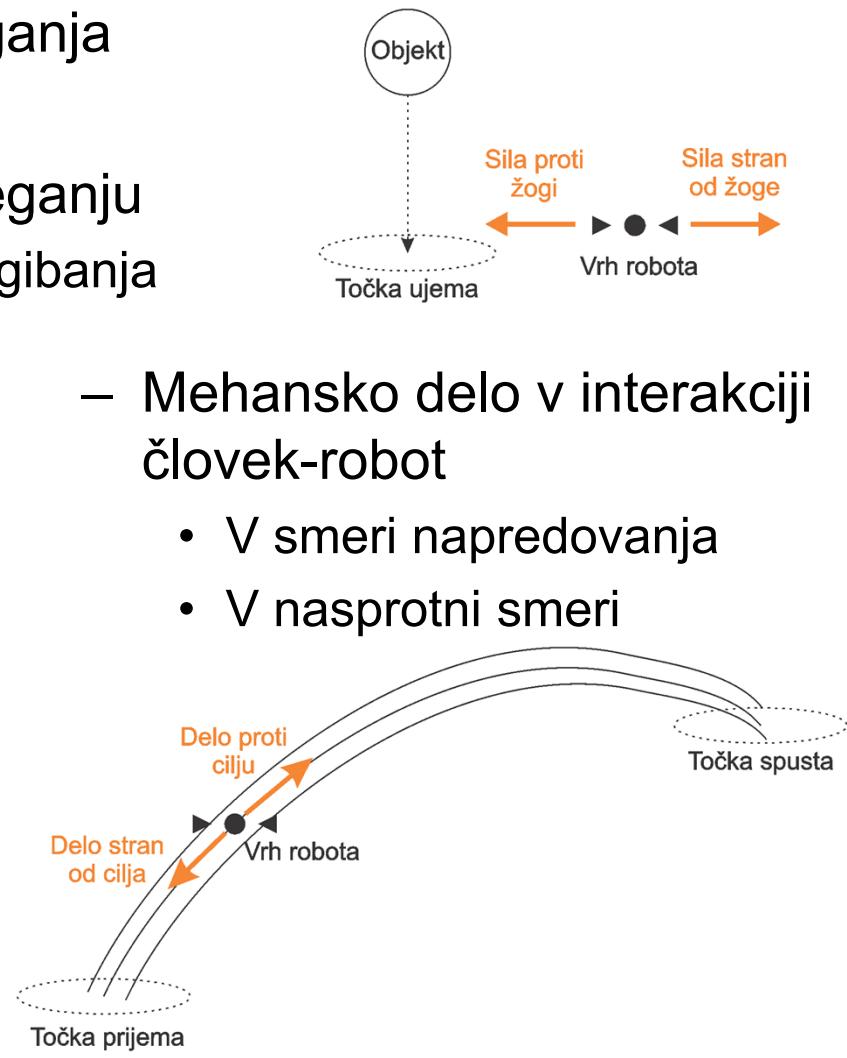
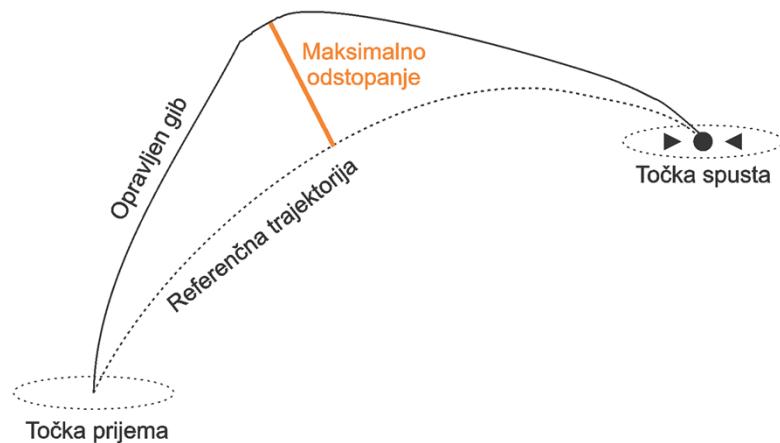


# Eksperimentalna evalvacija

- Kako različne pomoči vplivajo na gibanje in uspešnost merjenca
- Osebe
  - 23 oseb v subakutnem obdobju po možganski kapi
  - 10 oseb v kroničnem obdobju po možganski kapi
  - 23 zdravih oseb, kontrolna skupina
- Vadba 2 x 3 minute, 2 vadbi
- Haptične pomoči so vključene, če merjenec ni zmožen sam opraviti dela naloge

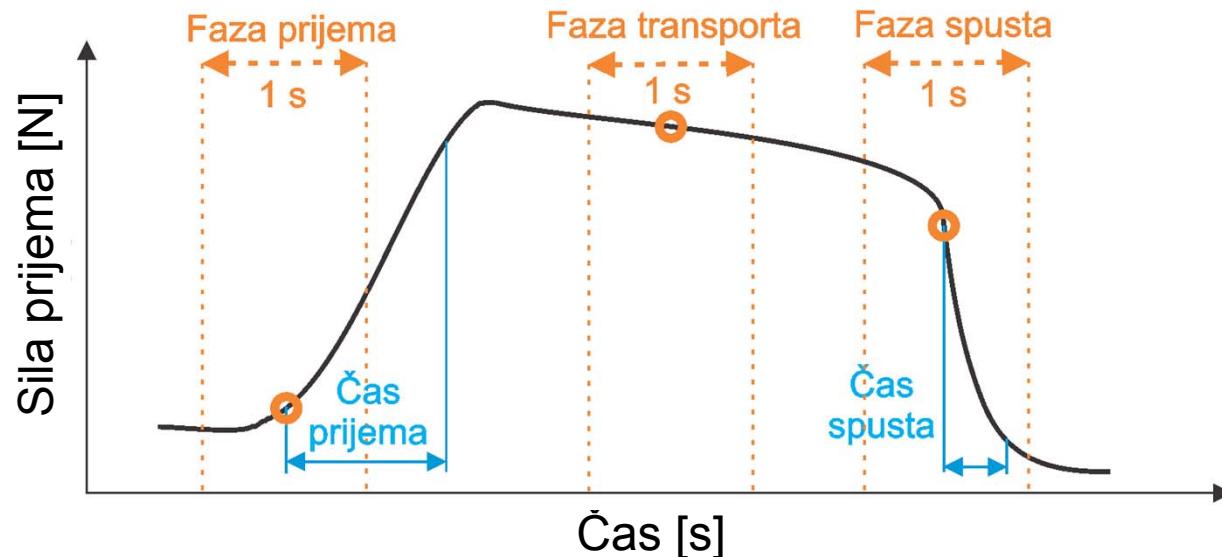
# Parametri za ocenjevanje

- Uspešnost seganja in odlaganja
- Srednje vrednosti sile pri seganju
  - Informacija o želeni smeri gibanja
- Odstopanje trajektorije giba od želene trajektorije, napaka odklona



# Parametri za ocenjevanje

- Časi prijema in spusta
- Korelacija med silo prijema in silo obremenitve
  - Faza prijema
  - Faza transporta
  - Faza spusta





# Evalvacija vpliva haptičnih pomoči

- Seganje

	Bolniki-S bPS (N = 18)	Bolniki-S PS (N = 5)	Bolniki-K bPS (N = 6)	Bolniki-K PS (N = 4)	Zdravi bPS (N = 23)
US [%]	63 ± 17	86 ± 14	62 ± 21	78 ± 27	86 ± 13
SS [N]	0,26 ± 0,26	-0,28 ± 0,51	0,11 ± 0,15	-0,42 ± 0,43	0,03 ± 0,07

bPS – brez pomoči seganja

PS – s pomočjo seganja

- Gibanje

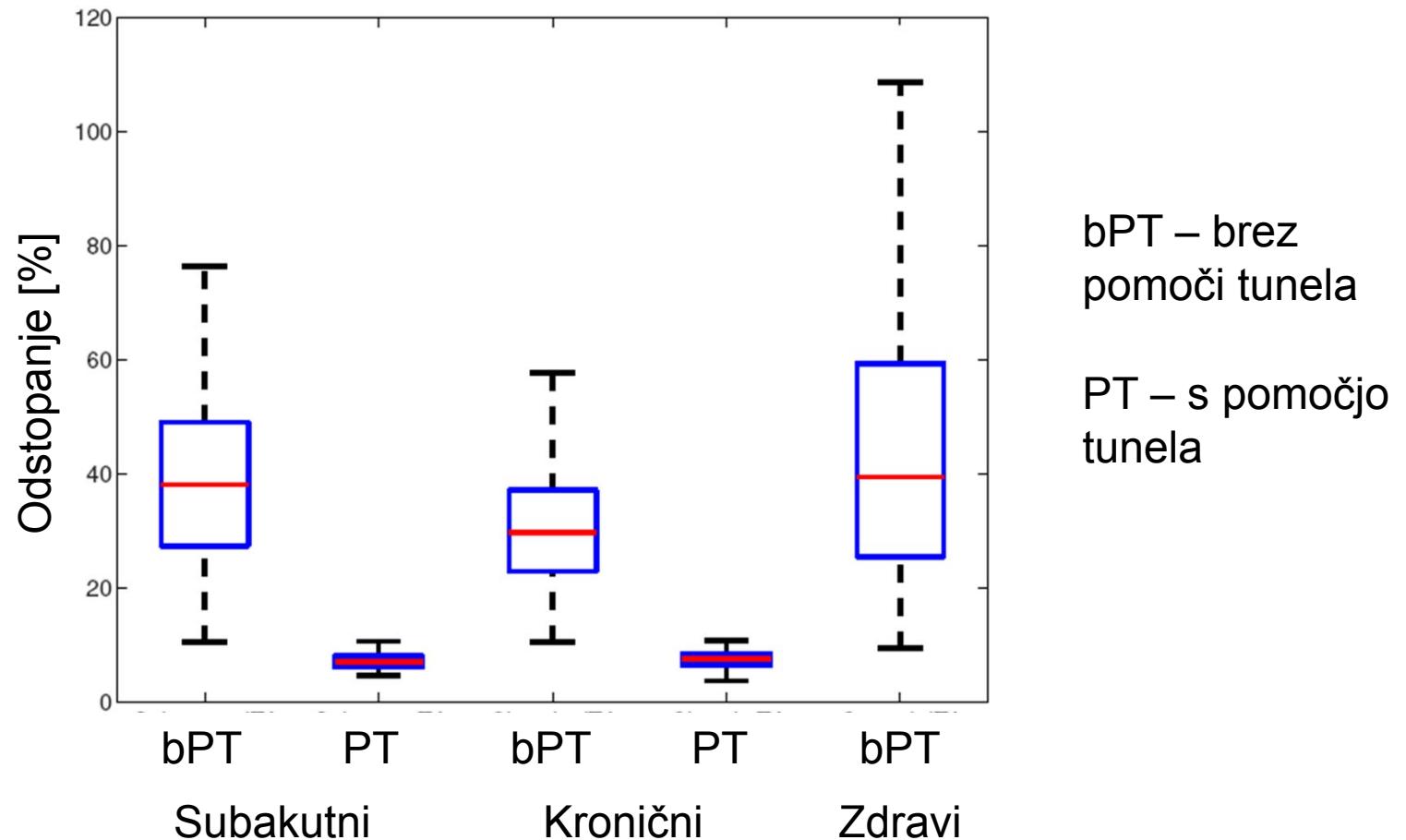
	Bolniki-S bPT (N = 16)	Bolniki-S PT (N = 7)	Bolniki-K bPT (N = 5)	Bolniki-K PT (N = 5)	Zdravi bPT (N = 23)
UO [%]	79 ± 14	98 ± 6	78 ± 16	100 ± 0	91 ± 9
NO [%]	37,9 ± 16,4	6,9 ± 1,8	29,4 ± 18,2	7,4 ± 3,4	39,4 ± 26,8
DPC [J]	1,39 ± 0,65	0,12 ± 0,38	1,87 ± 1,55	0,01 ± 0,17	1,23 ± 0,91
DSC [J]	0,02 ± 0,40	0,18 ± 0,28	0,19 ± 0,38	0,66 ± 0,83	0,03 ± 0,27

bPT – brez pomoči haptičnega tunela

PT – s pomočjo haptičnega tunela

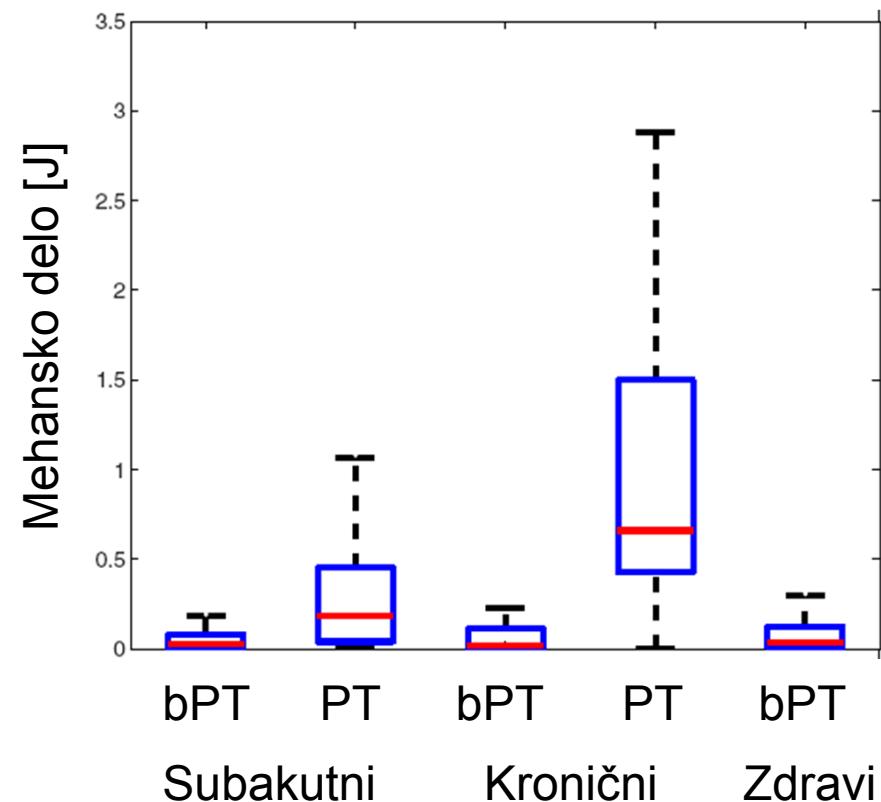
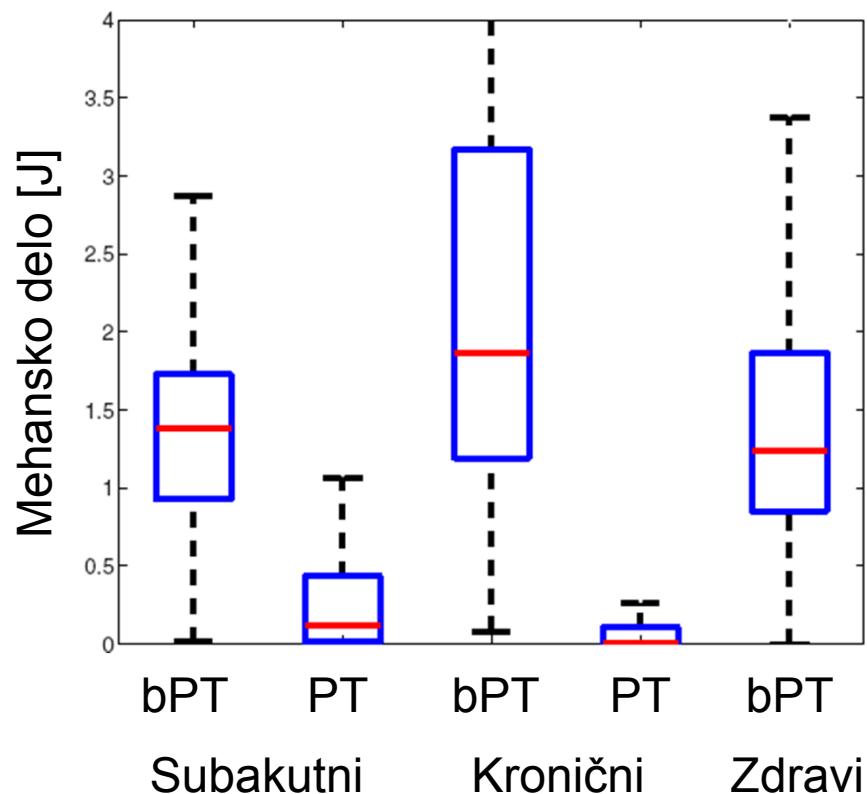
# Evalvacija vpliva haptičnih pomoči

- Napaka odklona



# Evalvacija vpliva haptičnih pomoči

- Delo v smeri napredovanja in nasprotni smeri

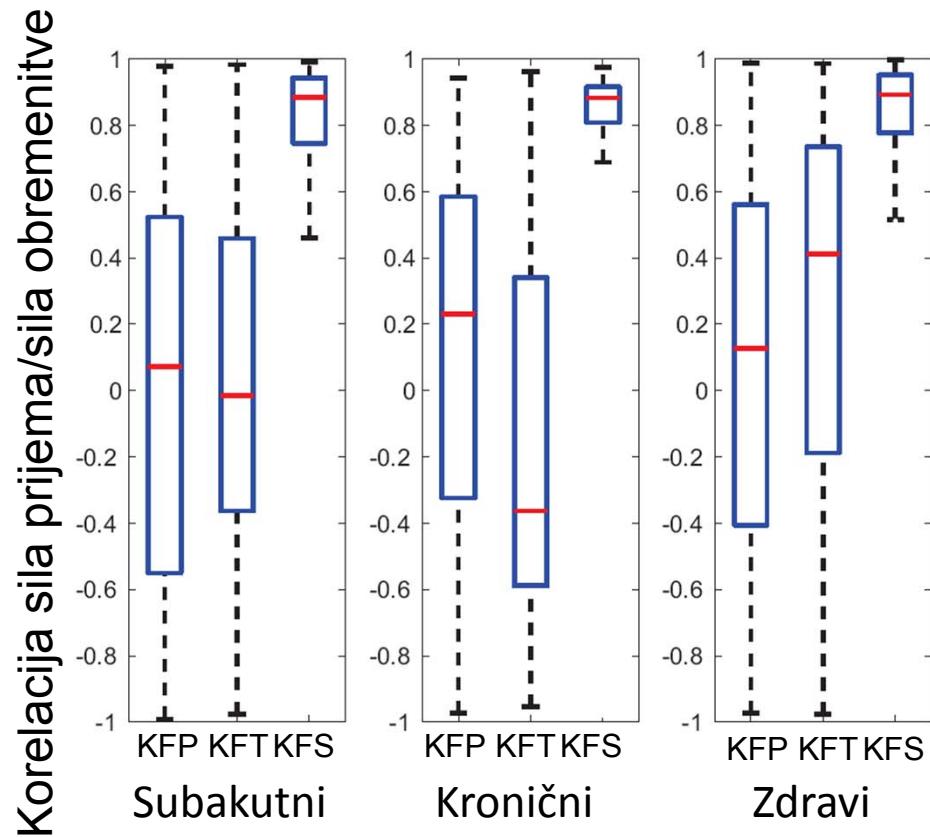


PT – s pomočjo tunela

bPT – brez pomoči tunela

# Evalvacija vpliva haptičnih pomoči

- Prijemanje



	Bolniki-S bPP (N = 16)	Bolniki-K bPP (N = 3)	Zdravi bPP (N = 23)
CP [s]	0,14 ± 0,45	0,47 ± 0,40	0,17 ± 0,34
CS [s]	0,33 ± 0,30	0,54 ± 0,15	0,29 ± 0,39
KFP	0,03 ± 0,58	0,23 ± 0,58	0,12 ± 0,58
KFT	0,01 ± 0,51	-0,36 ± 0,59	0,41 ± 0,58
KFS	0,90 ± 0,40	0,88 ± 0,42	0,89 ± 0,30

bPP – brez pomoči prijemanja

KFP – korelacija faza prijema

KFT – korelacija faza transporta

KFS – korelacija faza spusta



## Ugotovitve

- Bolniki so imeli manjšo uspešnost seganja kot zdrave osebe
  - Bolniki so dosegli podobno uspešnost kot zdravi, ko so imeli vključeno pomoč pri seganju
  - Sila interakcije je kazala v nasprotno smer od gibanja robota, ko je bila vključena pomoč pri seganju
- Bolniki so imeli manjšo uspešnost odlaganja kot zdrave osebe
  - Bolniki s pomočjo haptičnega tunela so imeli skoraj popolno uspešnost



## Ugotovitve

- Haptični tunel močno omeji gibanje
  - osebe brez pomoči tunela imajo večje odklone
- Bolniki s pomočjo so opravili manj dela v smeri napredovanja in več dela v smeri stran od cilja
  - Pasivnost pri gibanju osnovno želimo preprečiti
- Pomoč pri prijemanju je izkazala največje pomanjkljivosti
  - Brez možnosti nastavljanja stopnje pomoči

# Haptični primitivi

- Razvoj haptičnih primitivov
  - gibi od začetne do končne točke
  - P&P gibi
  - gibi po zavitem tunelu
  - prijemanje
  - polja sil



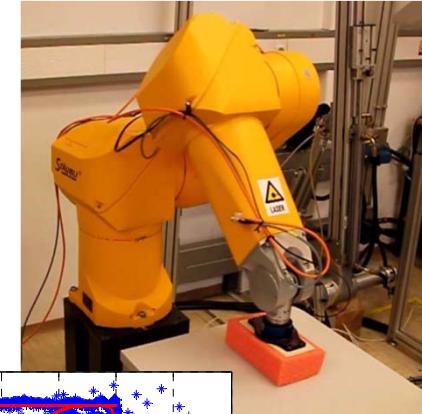
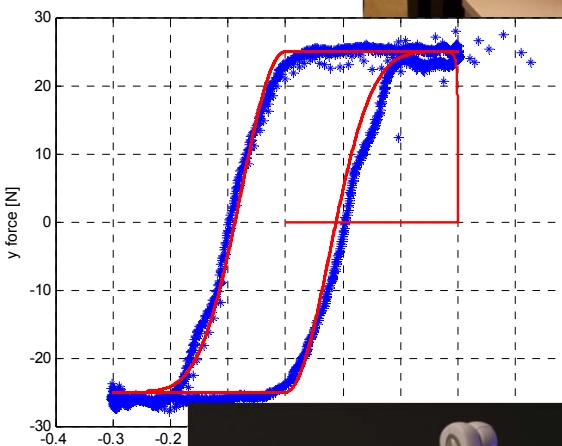
A woman ironing,  
Degas

- Površinske lastnosti
  - pri vsakem dotiku pri različnih aktivnostih se kažejo površinske lastnosti
  - želimo prikazati dotik s površino – trenje, tekture



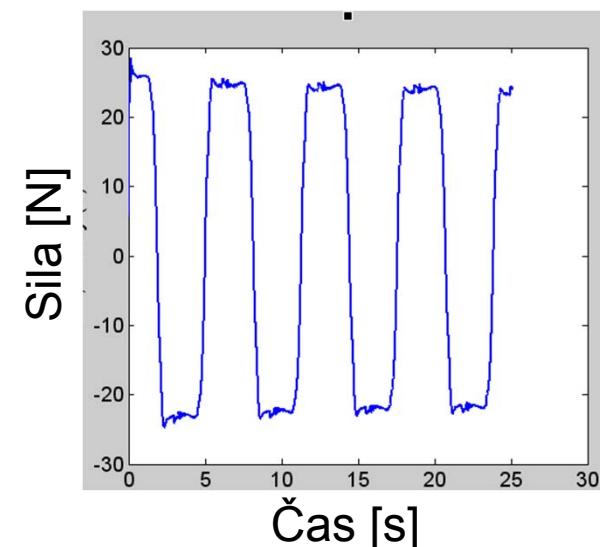
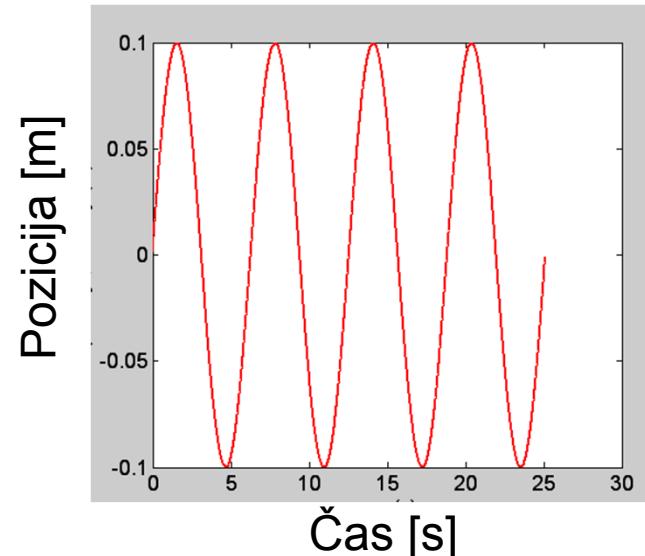
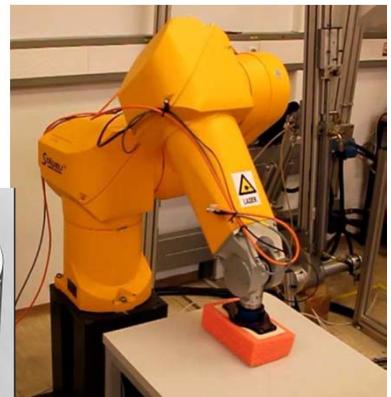
# Trenje

- Identifikacija trenja med realnimi objekti
- Zapis trenja z matematičnimi modeli
- Izvedba trenja na haptičnem robotu



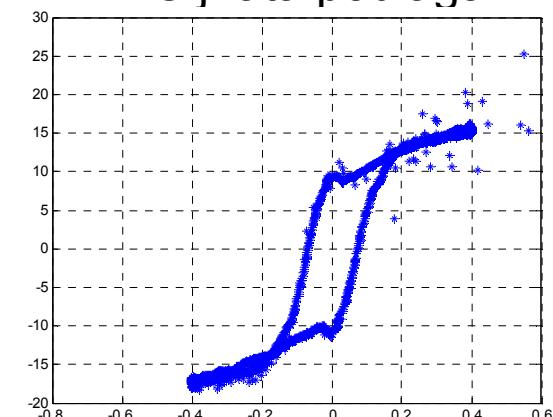
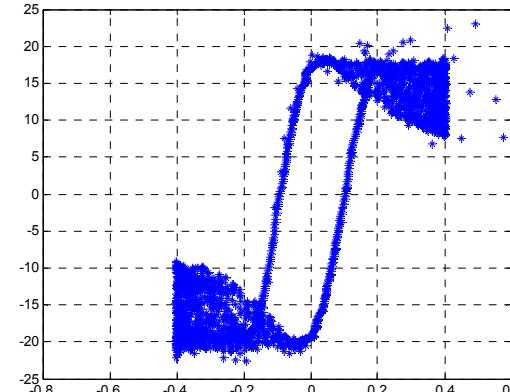
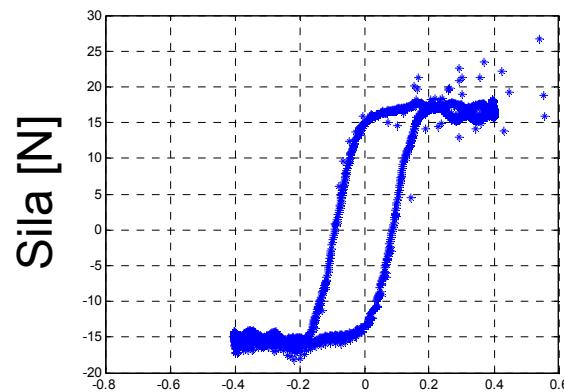
# Preliminarno modeliranje trenja

- Preveriti modele trenja in ugotoviti, kako se kažejo parametri modelov pri različnih pogojih
- Metodologija
  - Robot Staubli, senzor sile
  - Regulacija po poziciji
  - Merjenje pozicije in sile

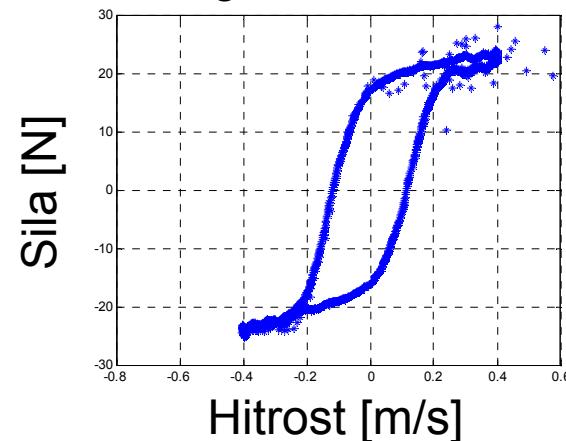


# Preliminarno modeliranje trenja

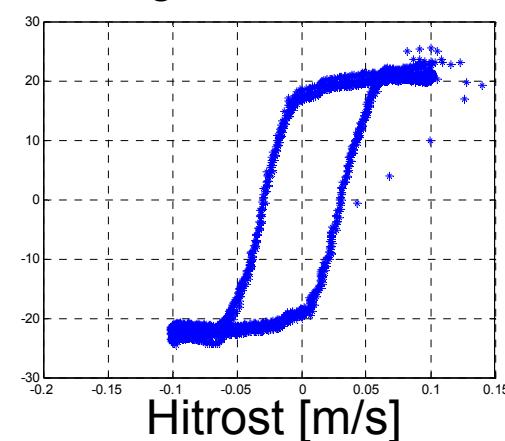
- Meritve pri različnih pogojih – goba/miza
- Suha podlaga
- Mokra podlaga



Goba/gladka tabla - suho



Goba/groba tabla - suho





# Modeliranje trenja

- Opis trenja z matematičnimi modeli

Dahl model

$$\frac{dF}{dx} = \sigma \left(1 - \frac{F}{F_C}\right)^\alpha v$$

2 parametra

Bliman-Sorine  
model

$$s = \int_0^t |v(\tau)| d\tau,$$

$$\frac{dx_s}{ds} = Ax_s + B \operatorname{sgn}(v), \quad F = Cx_s,$$

$$A = \begin{pmatrix} -1/(\eta\varepsilon_f) & 0 \\ 0 & -1/\varepsilon_f \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} f_1/(\eta\varepsilon_f) \\ -f_2/\varepsilon_f \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} 1 & 1 \end{pmatrix}$$

4 parametri

LuGre model

$$\frac{dz}{dt} = v - \sigma_0 \frac{|v|}{g(v)} z,$$

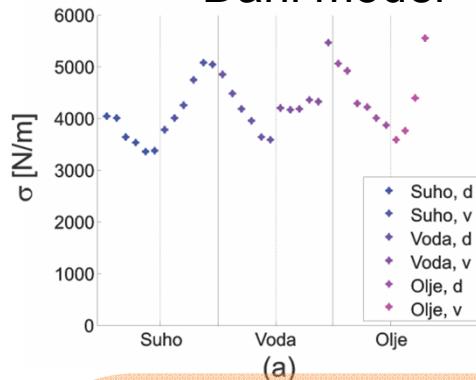
$$F = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + B v.$$

4 parametri

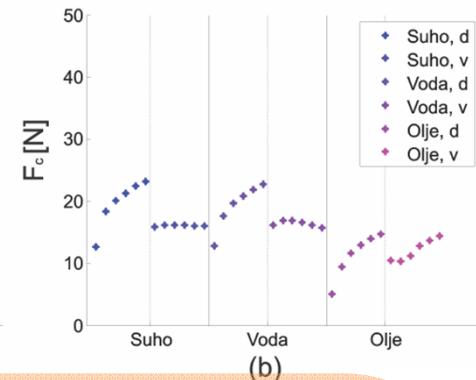
# Modeliranje trenja

- Vrednosti parametrov pri različnih amplitudah hitrosti in globinah stiska

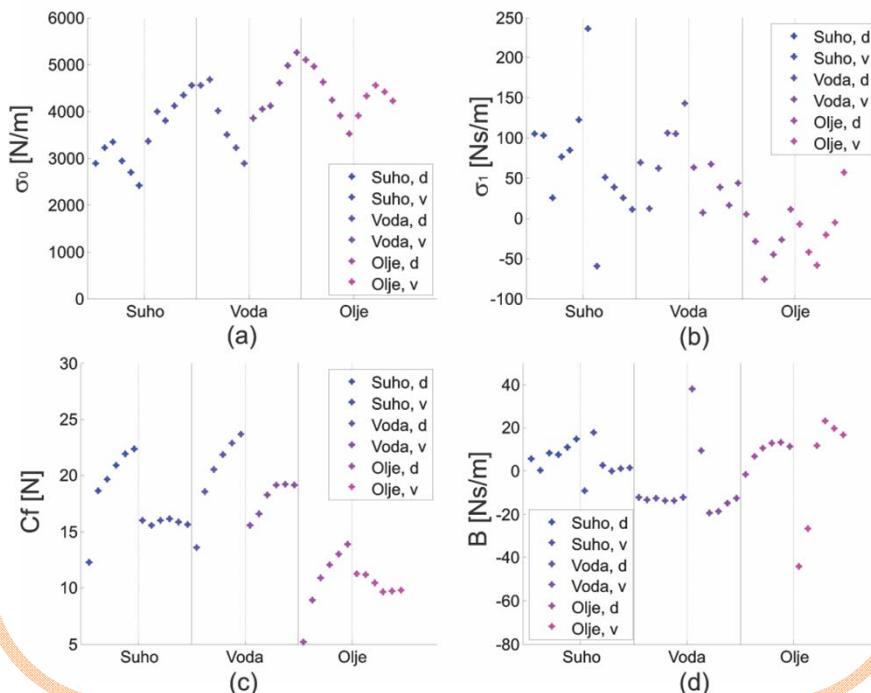
Dahl model



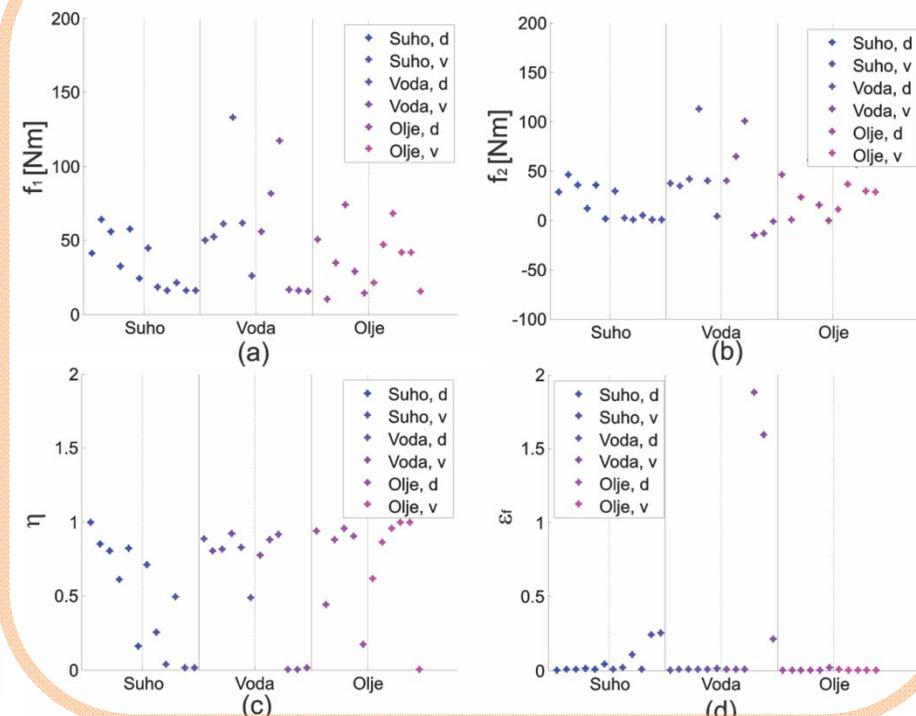
robolab



LuGre model



Bliman-Sorine model



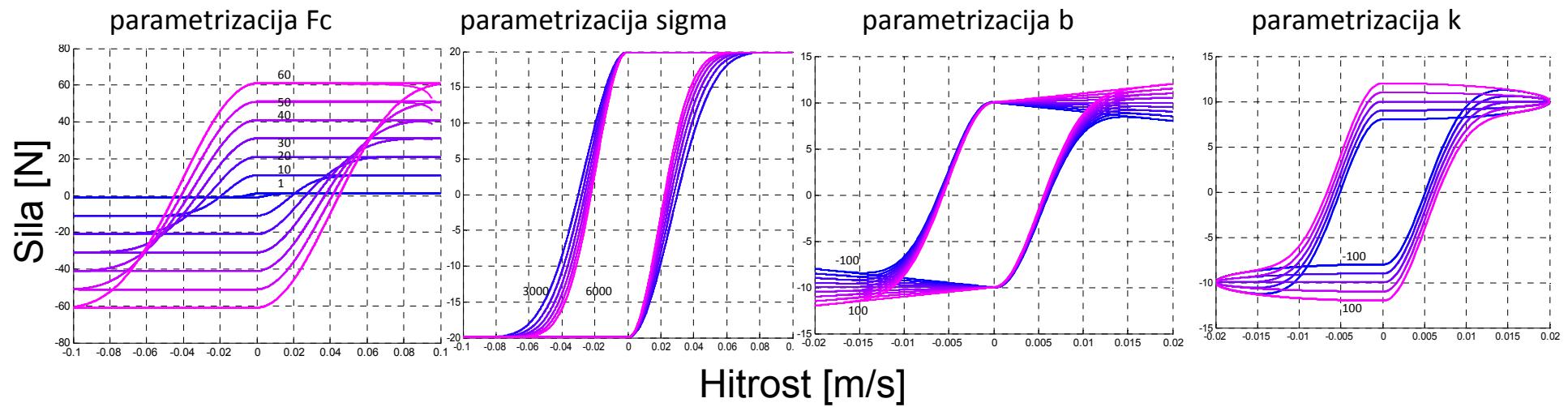
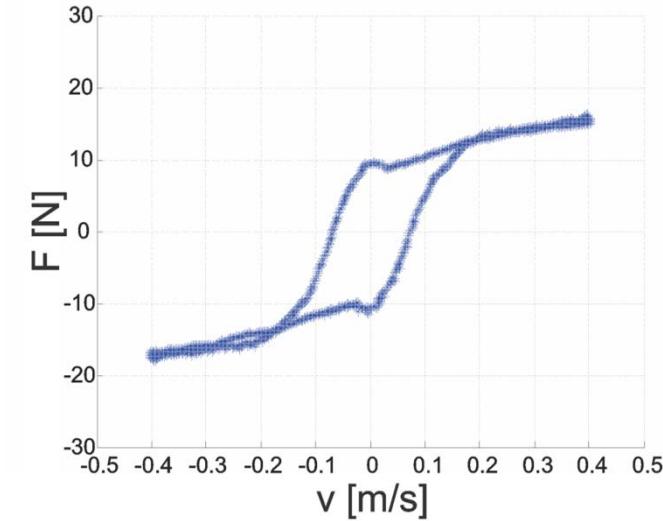
# Modeliranje trenja

- razširjeni Dahl model

$$\frac{dF_d}{dx} = \sigma(1 - \frac{F_d}{F_c} sgn(v))v,$$

$$F = F_d + bv + kx + F_{off},$$

4 parametri



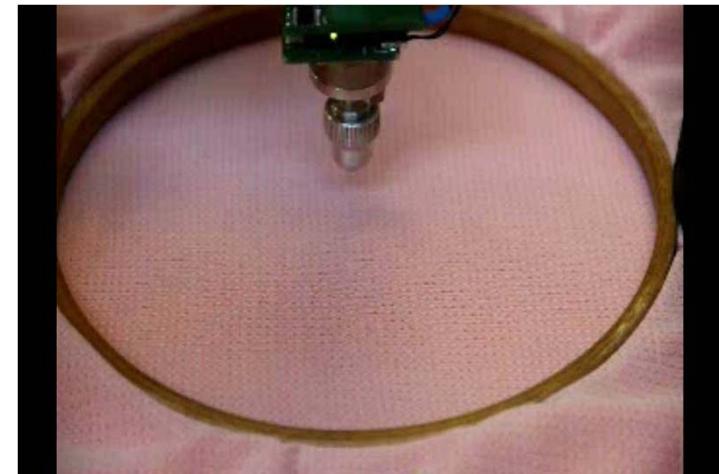
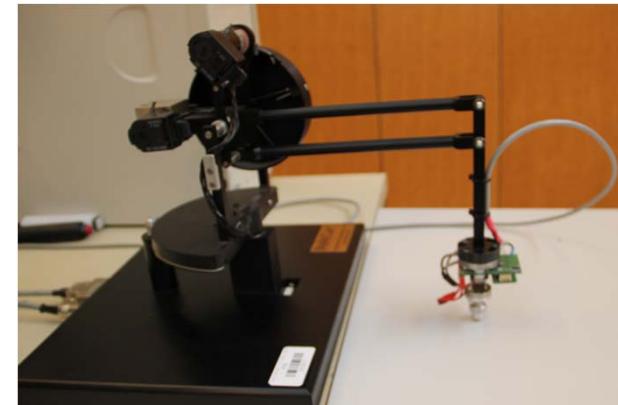


# Modeliranje trenja

- Modeliranje realnih materialov
- Robot Phantom, senzor sile
- Regulacija po poziciji, horizontalno
- Regulacija po sili, vertikalno
- Na vrhu vpeta kovinska kroglica

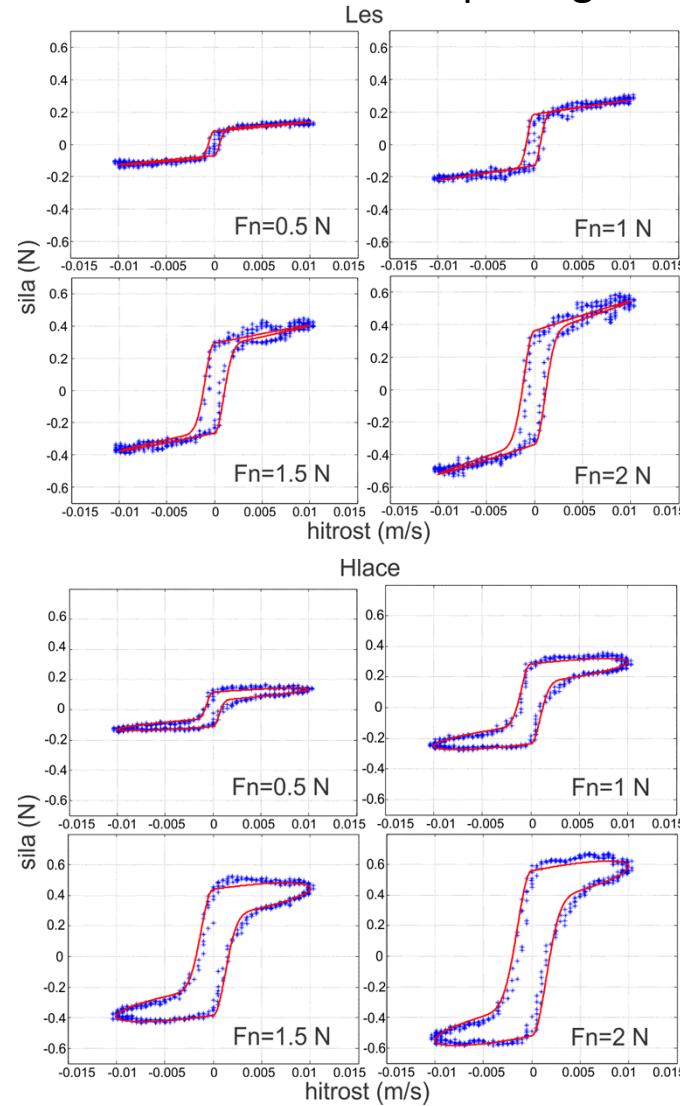


- les, smreka
- majica, poliester
- hlače, Lycra
- papir, 80 g/m<sup>2</sup>
- papir, 160 g/m<sup>2</sup>
- steklo



# Modeliranje trenja

## Različna sila na podlagu

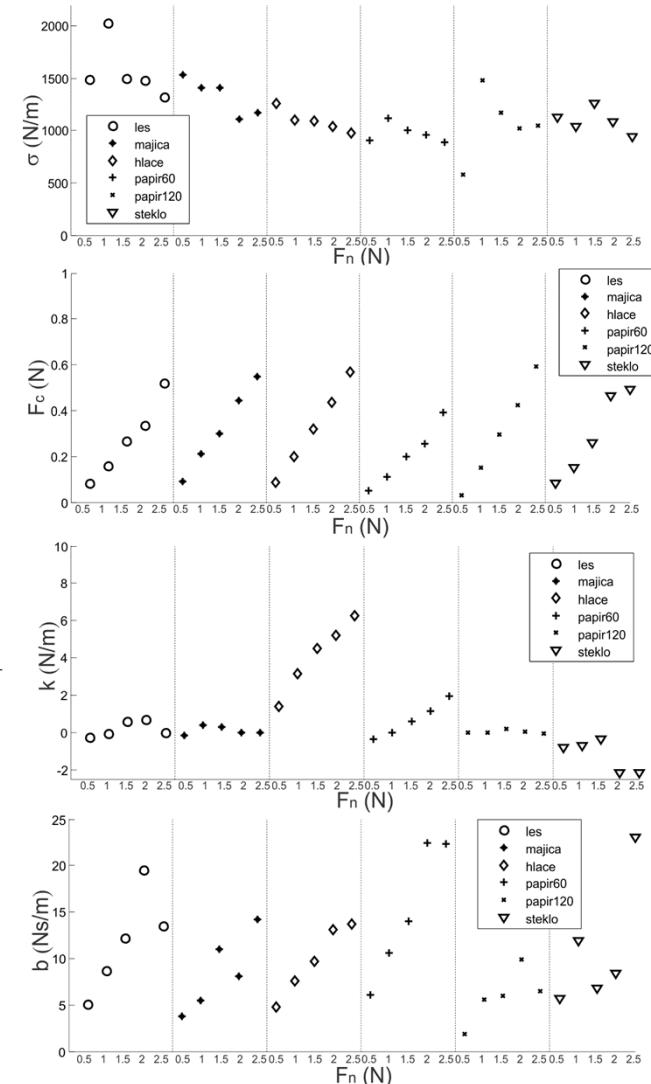


cenilka

$$FP = \frac{\sum_{i=0}^N (F(i) - F_m(i))^2}{A N}$$



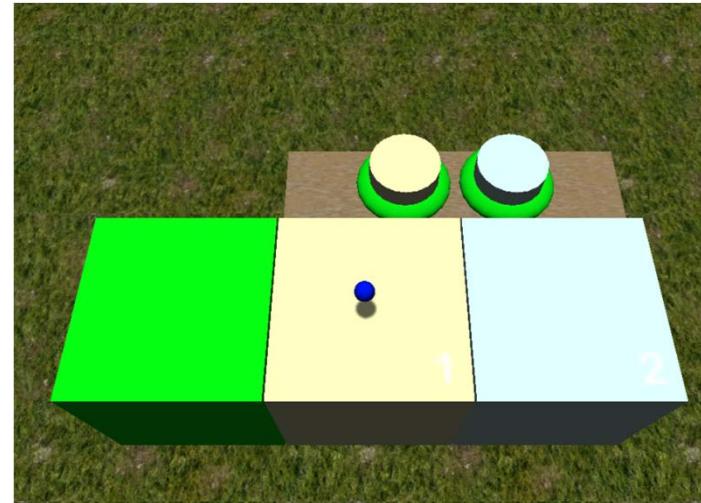
## Optimizirani parametri





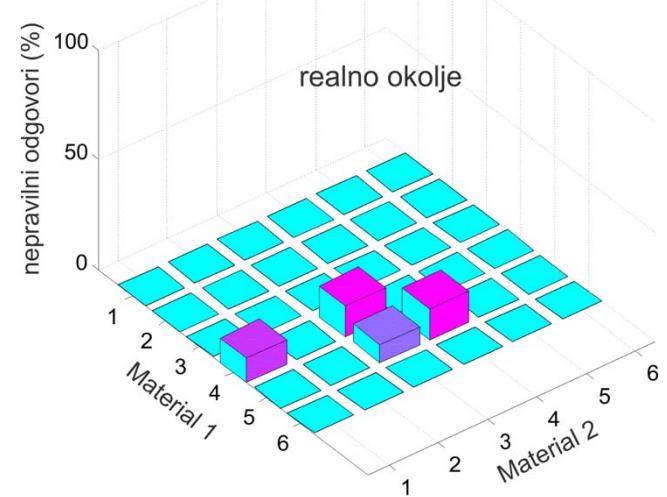
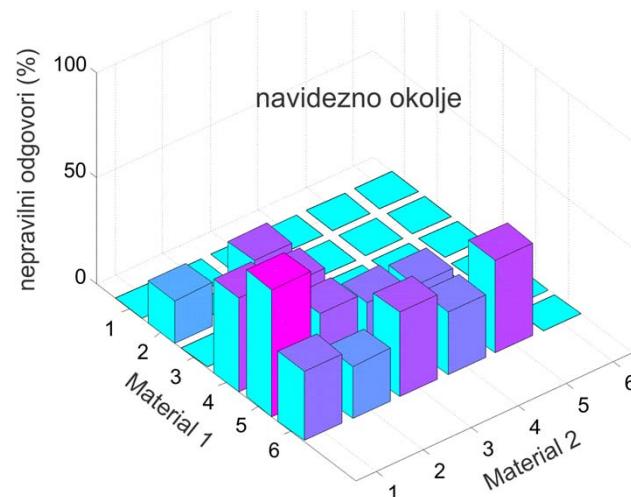
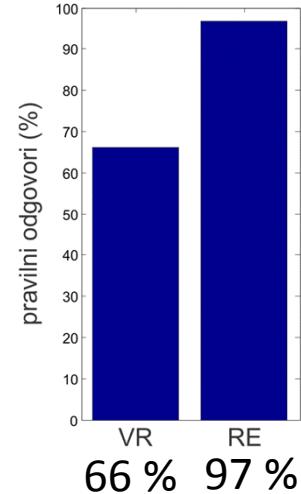
# Eksperimentalna evalvacija

- 8 oseb
- Naloga v navideznem okolju
  - 15 ponovitev
  - Cilj naloge je ugotoviti katera površina je enaka referenčni površini
- Naloga v realnem okolju
  - 15 ponovitev
  - enaki materiali
  - preizkušanje s kovinsko kroglico
  - zakriti materiali



# Eksperimentalna evalvacija

- pravilni odgovori v navideznem okolju in v realnem okolju
- nepravilni odgovori za posamezne kombinacije materialov



Ločevanje materialov na podlagi lastnosti trenja v navideznem okolju je težje kot v realnem okolju

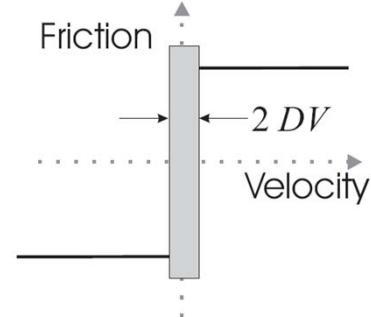
- omejitve samega sistema/robona, togost robota
- samo model trenja

# Modeliranje trenja in tekstur

- Opis površin z matematičnimi modeli

- Karnopp model trenja

- “stick-slip”, lepenje



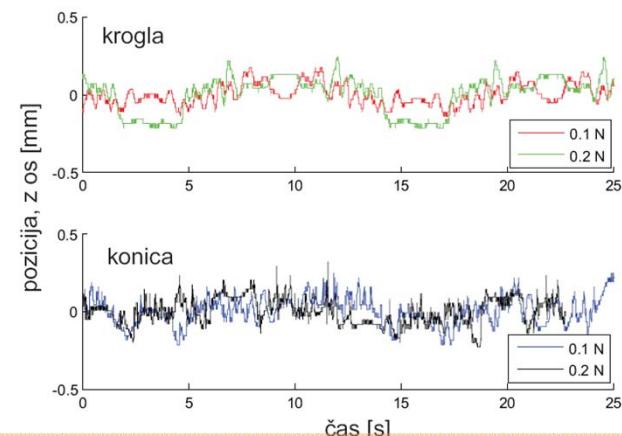
$$F(F_n) = \begin{cases} -F_{dy}(F_n) & v < -D_v \\ \max(-F_s(F_n), F_a) & -D_v < v < 0 \\ \min(F_s(F_n), F_a) & 0 < v < D_v \\ F_{dy}(F_n) & v > D_v \end{cases}$$

$$F_s(F_n) = a_1 + a_2 F_n + a_3 F_n^2$$

$$dF = F_s(F_n) - F_{dy}(F_n)$$

- Teksture

$$h(p_x, p_y) = h_a + A \sin\left(2\pi\left(\frac{p_x}{p_f}\right)\right) + A \sin\left(2\pi\left(\frac{p_y}{p_f}\right)\right)$$

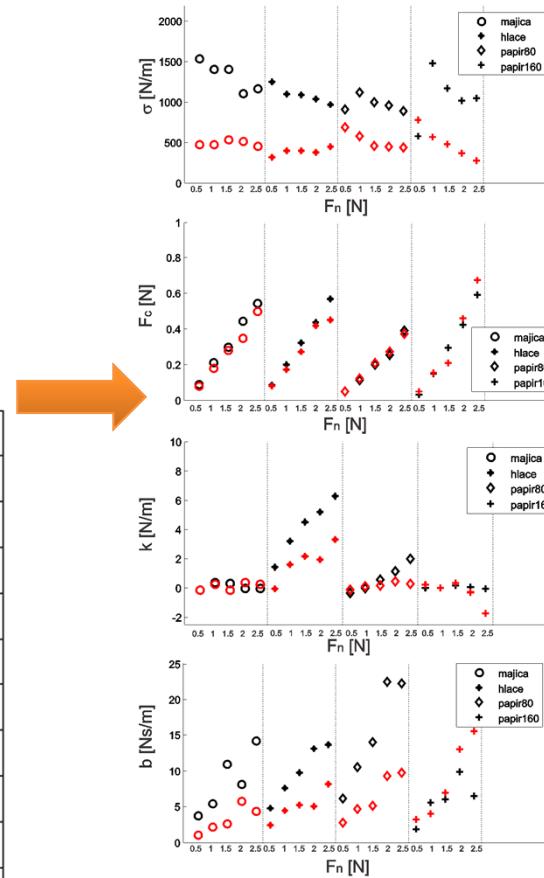


# Modeliranje trenja in tekstur

- Dodani vzorci



Material	N	Trenje	Lepenje	Teksture
Les	1			X
Hlače	2	X		
Majica	3	X	X	
Papir 80 g/m <sup>2</sup>	4	X	X	
Papir 160 g/m <sup>2</sup>	5	X		
Steklo	6			
Brusni papir P100	7		X	
Brusni papir P40	8			X
Pena	9	X		
Beton	10			X



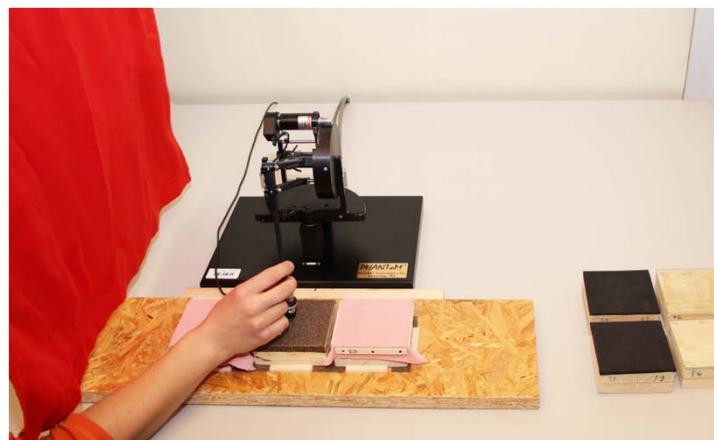
	<b>P40</b>	<b>Beton</b>		
		$F_n$ (N)	$S_q$ (μm)	$S_z$ (μm)
kroglica	0,1	68	316	132
	0,2	116	458	121
konica	0,1	86	401	109
	0,2	83	374	140
lit.	LP	154	1220	300
	MP	/	/	1400
		150	850	

	Les	Majica	Papir 80 g/m <sup>2</sup>	P100
$a_1$	-0,03	-0,12	-0,07	0,80
$a_2$	0,12	0,40	0,18	0,21
$a_3$	0,02	-0,06	0,04	0,43
$dF(N)$	0,05	0,1	0,1	0,7



# Eksperimentalna evalvacija

- 12 oseb
- Naloga v navideznem okolju
  - 28 ponovitev na robottu Phantom
  - 28 ponovitev na robottu HapticMaster
- Naloga v realnem okolju
  - 28 ponovitev
  - Merjenje z robottom Phantom



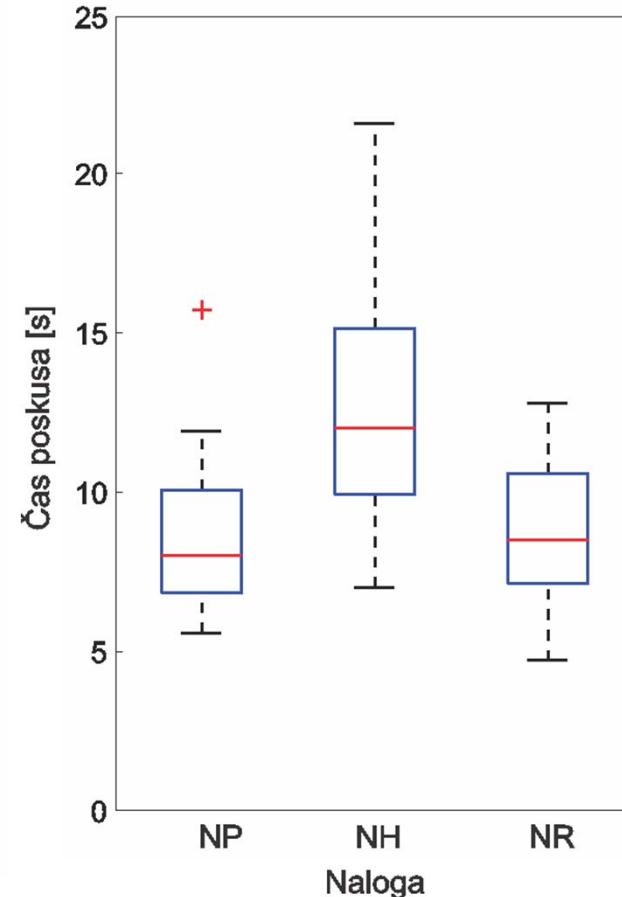
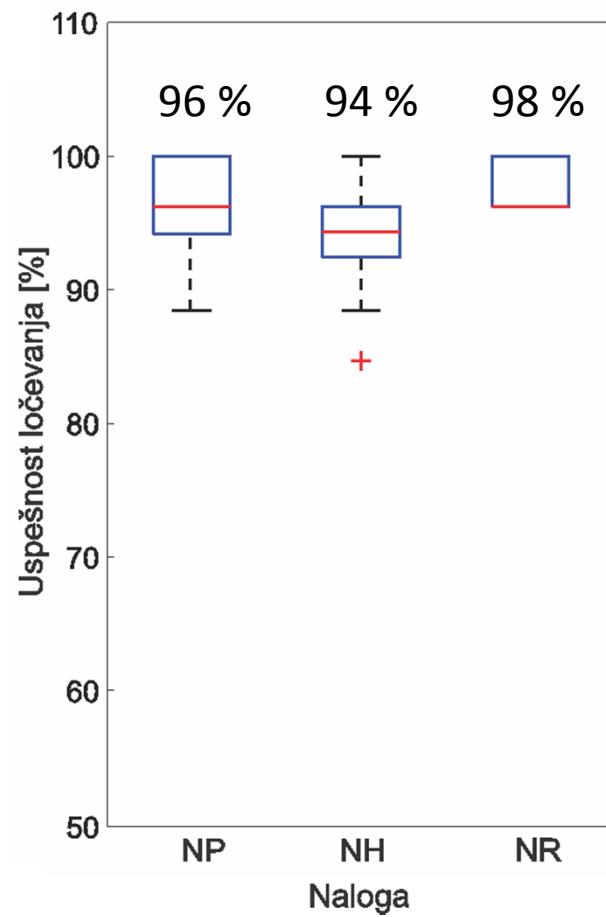


# Parametri za ocenjevanje

- Uspešnost ločevanja
- Čas poskusa
- Povprečna moč interakcije
- Vrsta gibanja (linearni ali krožni gib)
  - Skriti model Markova z uporabo mešanice Gaussovih verjetnostnih porazdelitev
  - Učna množica 10 krožnih in 10 linearnih gibov
  - Validacijska množica 20 krožnih in 20 linearnih gibov
    - en napačno prepoznan gib
- Število gibov

# Eksperimentalna evalvacija

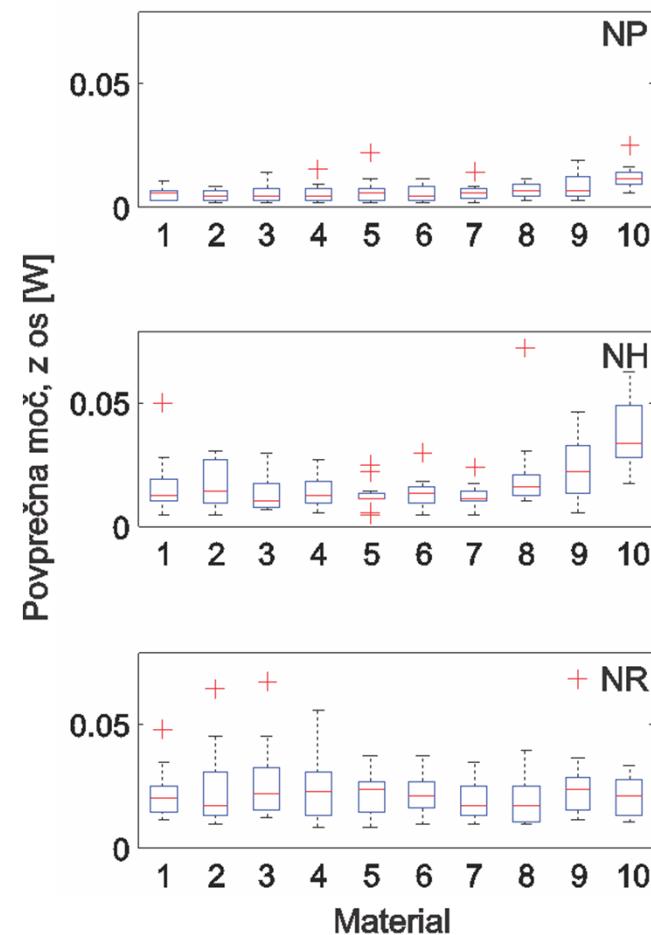
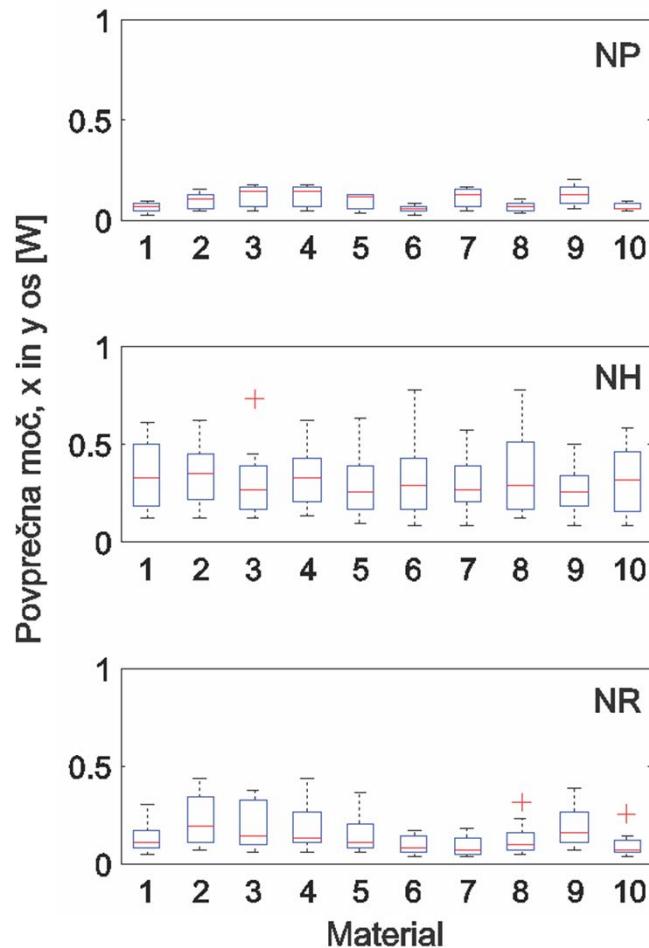
- Uspešnost ločevanja in časi poskusov



NP – Phantom robot  
NH - HapticMaster robot  
NR – realna naloga

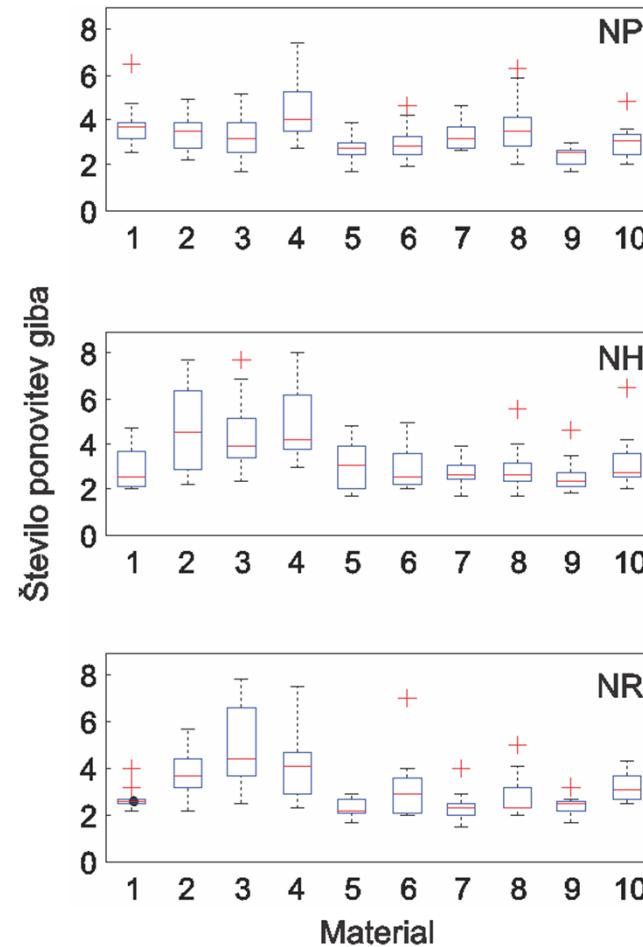
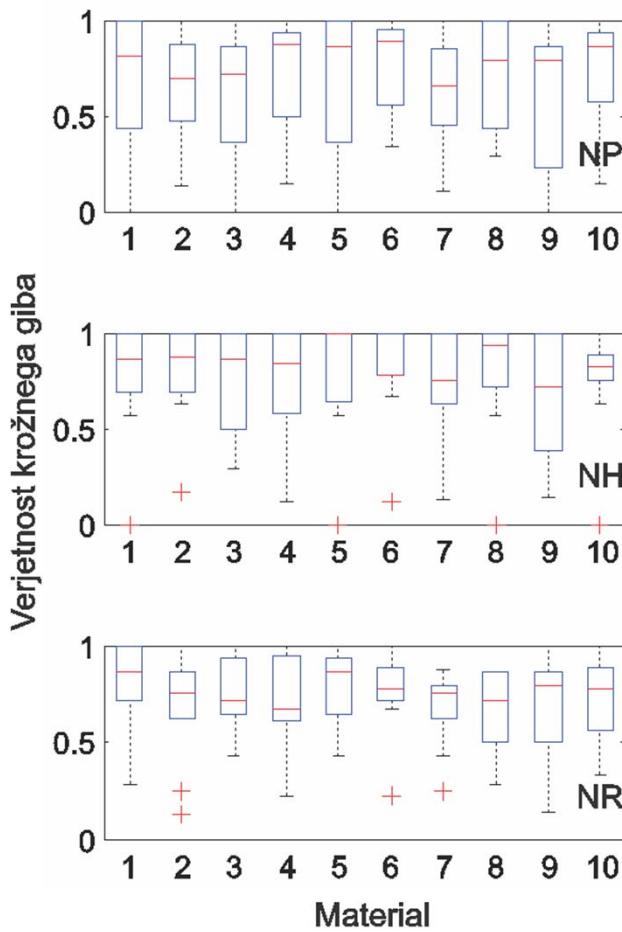
# Eksperimentalna evalvacija

- Povprečna moč interakcije



# Eksperimentalna evalvacija

- Vrsta in število gibov





## Ugotovitve

- Parameter uspešnosti ločevanja je pokazal podobno uspešnost pri navideznih nalogah in realni nalogi
- V nalogi na HapticMaster robotu so potrebovali več časa kot na robotu Phantom in v realni nalogi
- Osebe so opravile največ dela v horizontalni ravnini v nalogi na HapticMaster robotu in najmanj v nalogi na Phantom robotu



## Ugotovitve

- Povprečna moč interakcije v normalni smeri na površino je zelo majhna, kadar osebe uporabljajo Phantom robota
- Phantom robot primernejši za prikazovanje površin v tangencialni smeri
- Robot HapticMaster je boljša izbira pri prikazovanju večjih sil, predvsem v normalni smeri dotika s površinami
- Polovica oseb je izbrala Phantom robota, druga polovica pa HapticMaster robota.



## Zaključek

- Parametri evalvacije so pokazali razlike, ko so bile vključene različne haptične pomoči
- Vse tri haptične pomoči primerne za uporabo v robotskeih rehabilitacijskih sistemih
- Modeli trenja in tekstur lahko opišejo izmerjene vrednosti sile različnih materialov
- Podobno uspešnost ločevanja površin pri navideznih nalogah in realni nalogi
- Evalvacija površin na bolnikih po možganskih poškodbah



# Originalni prispevki disertacije

- Celovita predstavitev trenutnega stanja na področju haptičnih pomoči in površin
- Analiza vpliva pomoči v haptičnem okolju na uspešnost merjenca in trajektorije gibanja
- Analiza in ovrednotenje parametrov za ocenjevanje uspešnosti vadbe in gibanja
- Metoda za modeliranje trenja pri dotiku z okolico ter implementacija na haptičnem robotu
- Analiza ločevanja haptičnih površin na podlagi parametrov za ocenjevanje uspešnosti in gibanja



Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za elektrotehniko



**robolab**  
laboratorij za robotiko

# Hvala za pozornost!