



Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko



Modeliranje in ocenjevanje smučarskega skoka iz podatkov nosljivega merilnega sistema

Doktorska disertacije

Grega Logar

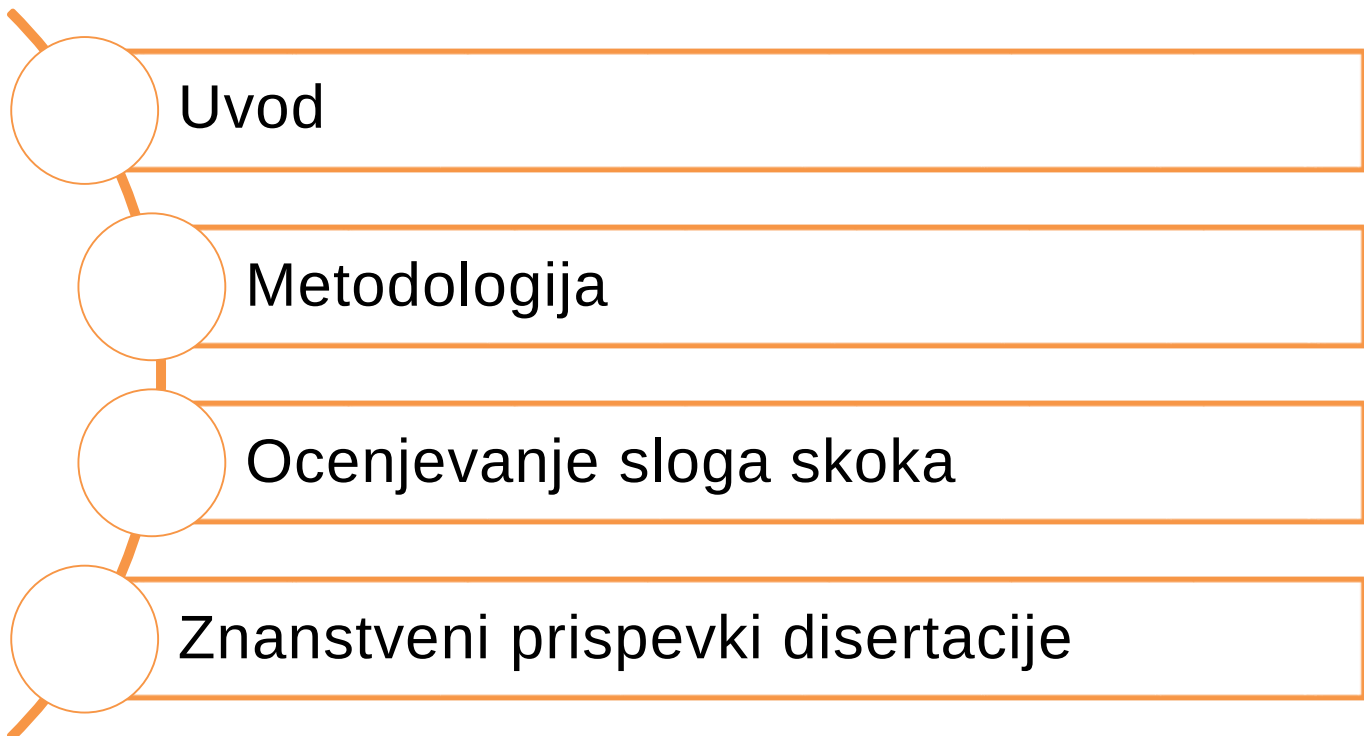
mentor: prof. dr. Marko Munih

Laboratorij za robotiko,
Fakulteta za elektrotehniko,
Univerza v Ljubljani

Ljubljana, november 2017



Vsebina



Uvod

Metodologija

Ocenjevanje sloga skoka

Znanstveni prispevki disertacije



Smučarski skoki

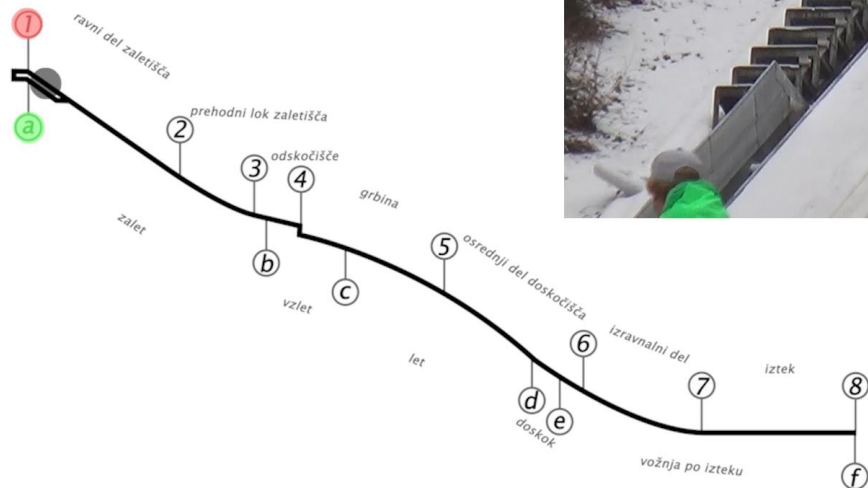
- Priljubljena športna disciplina
- Olimpijski šport
- Vadbe skozi celo leto na skakalnicah
- Poletno obdobje – treniranje
- Zimsko obdobje – tekmovanja





Tehnična razdelitev skoka

RAVNI DEL ZALETIŠČA



ZALET



Pripomočki za preučevanje skokov

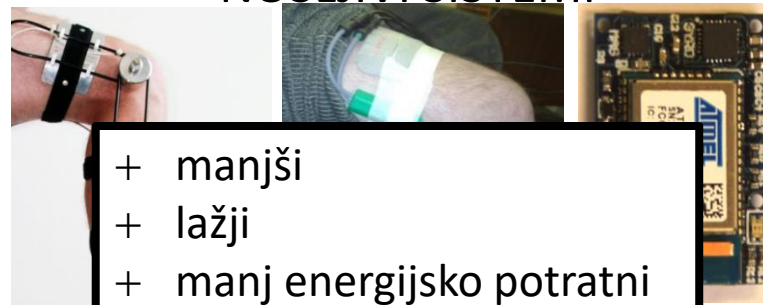
STACIONARNI SISTEMI



- + velika natančnost
- visoka cena
- omejeno merilno območje
- kompleksnost
- namensko merilno okolje
- visoko usposobljeno osebje



NOSLJIVI SISTEMI



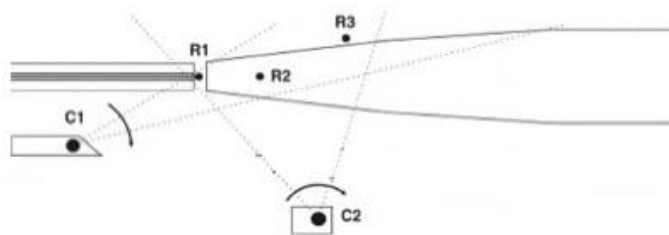
- + manjši
- + lažji
- + manj energijsko potratni
- + enostavna uporaba
- + neomejen merilni prostor
- manjša natančnost





Video sistemi

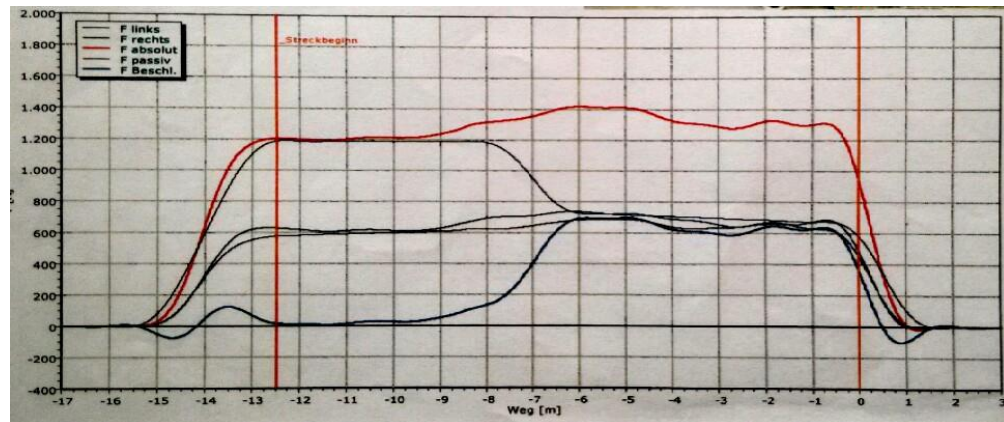
- Video kamera
 - Enostavna uporaba
 - Osnovna analiza skoka
- Večdimenzionalni sistemi
 - Avtomatska analiza v 3D
 - Časovno potratna





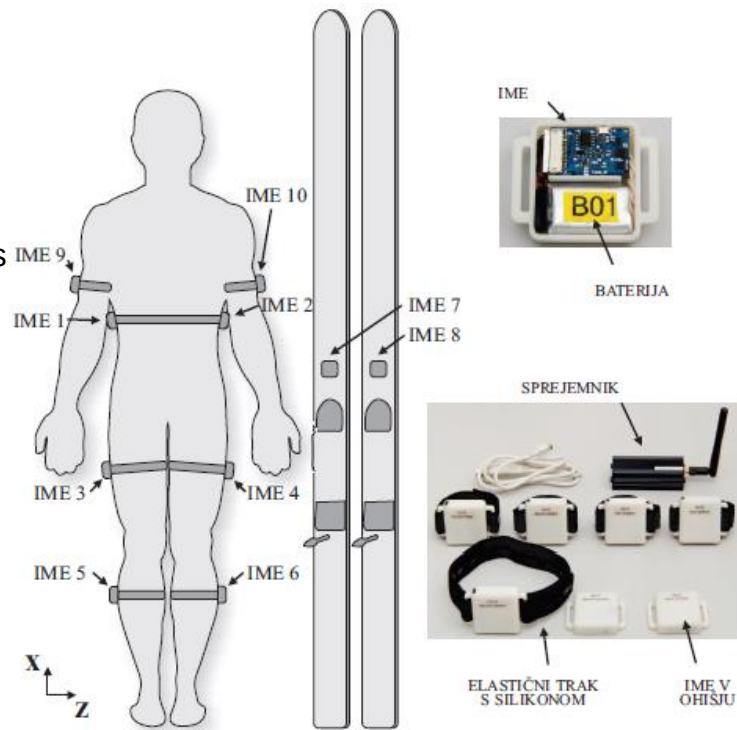
Pritiskovna plošča

- Omejeni na predel odskočišča
- Točnost odriva
- Obliko pulza odrivne sile
- Velikost odrivne sile



Obstoječa merilna oprema

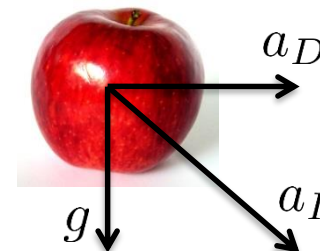
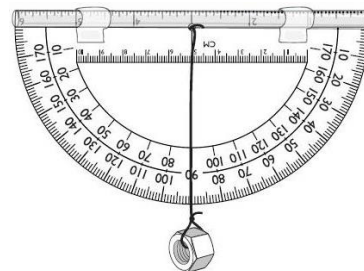
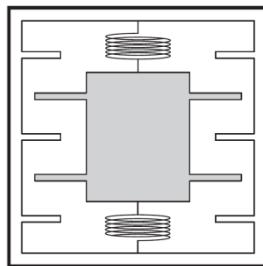
- 10 Inercialnih merilnih enot (IME)
 - 3D pospeškometer ($\pm 8 \text{ g}$, NPF: 400 Hz)
 - 3D žiroskop ($\pm 1000 \text{ }^\circ/\text{s}$, NPF: 256 Hz)
 - Shranjevanje podatkov na SD kartico s 400 Hz – 20 s
- Svetlobna zavesa (2x)
- Opto-elektronski sistem (Optotrak)
 - Napaka pozicije v 3D prostoru manjša od 0,1 mm
- Pritiskovna plošča (AMTI)
- Video kamera (50 Hz)



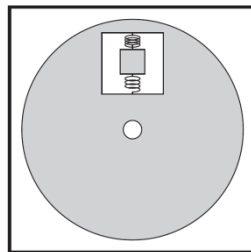


Inercialni merilniki

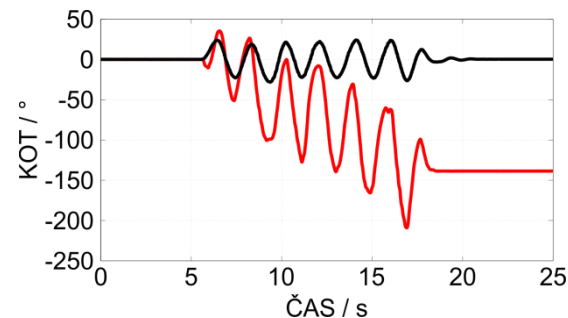
POSPEŠKOMETER



ŽIROSKOP

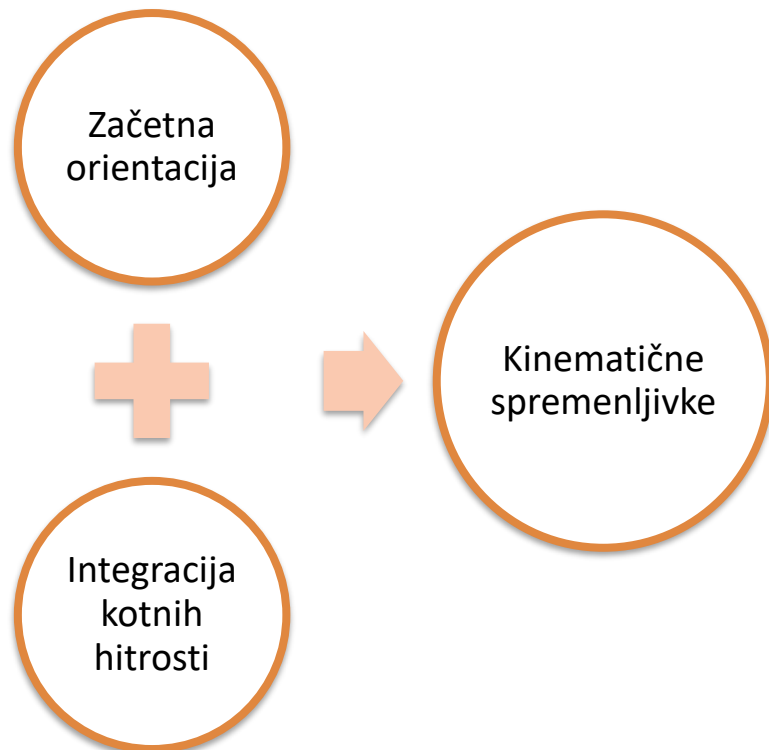


$$\theta = \int \omega dt$$



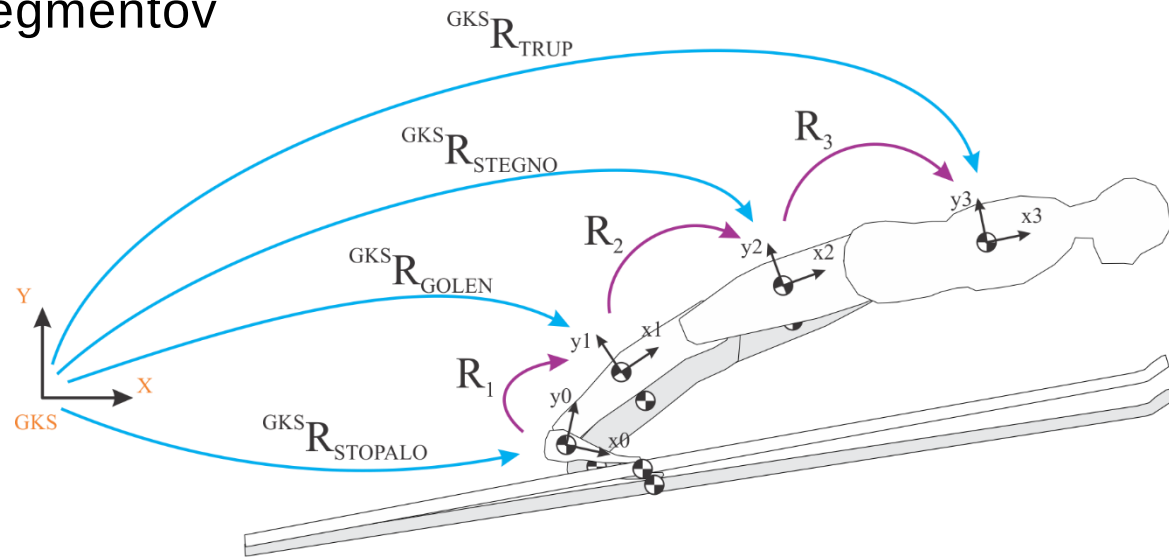
Izračun orientacij segmentov telesa

- Kalibracija
- Začetna orientacija
 - Pospeški v prvi fazi zaleta enaki
 - Smuči vzporedne z naklonom ravnega dela zaletišča
 - Orientacije segmentov glede na smuči
 - Vsem ceničnim zaletiščem enak naklon
zaletišč $\cos \varphi_{S \rightarrow ski} = \frac{\ddot{\mathbf{p}}_S \cdot \ddot{\mathbf{p}}_{ski}}{|\ddot{\mathbf{p}}_S| \cdot |\ddot{\mathbf{p}}_{ski}|}$
- Integracija kotnih hitrosti
 - Določimo lezenje signalov
 - Integracija rotacijskih hitrosti v enotski kvaternion
 - Pretvorba v Eulerjeve kote



Kinematični model

- Ocenjevanje orientacije segmentov
- Translacijski pospešek segmentov
- Kotna hitrost segmentov

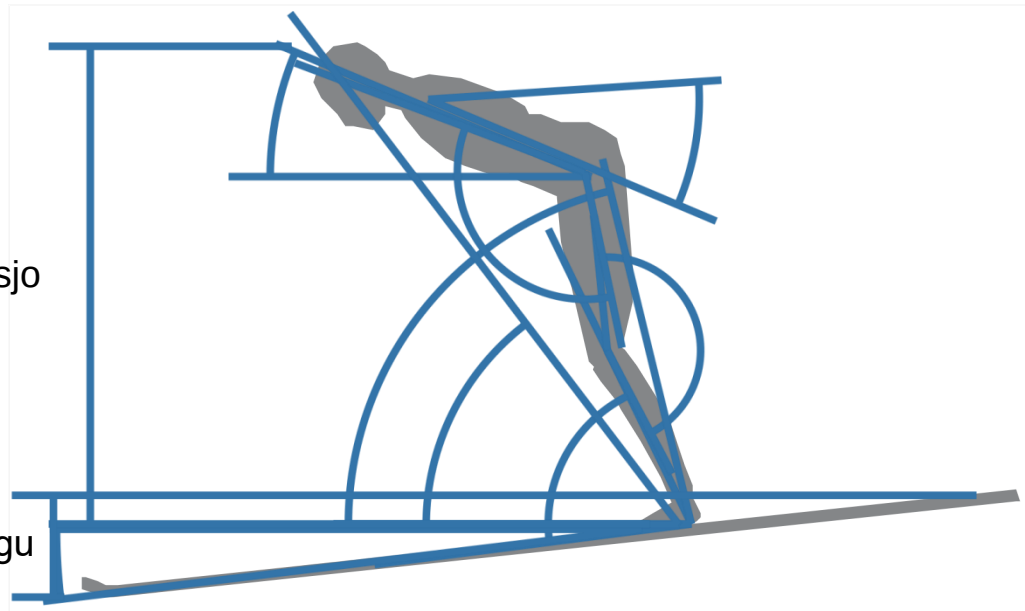




Značilne spremenljivke pri GIBALNI AKTIVNOSTI SKAKALCA

Kinematične spremenljivke:

- Kot med smučko in golenjo
- Kot v kolenu
- Kot med nogo in vodoravno osjo
- Kot med trupom in vodoravno osjo
- Kot med trupom in stegnom
- Kot med tetivo telesa in vodoravno osjo
- Kot med smučko in vodoravno osjo
- Aerodinamični indeks telesa
- Aerodinamični indeks smuči
- Kot med rokami in trupom
- Kot med smučmi pri „škarjastem“ slogu



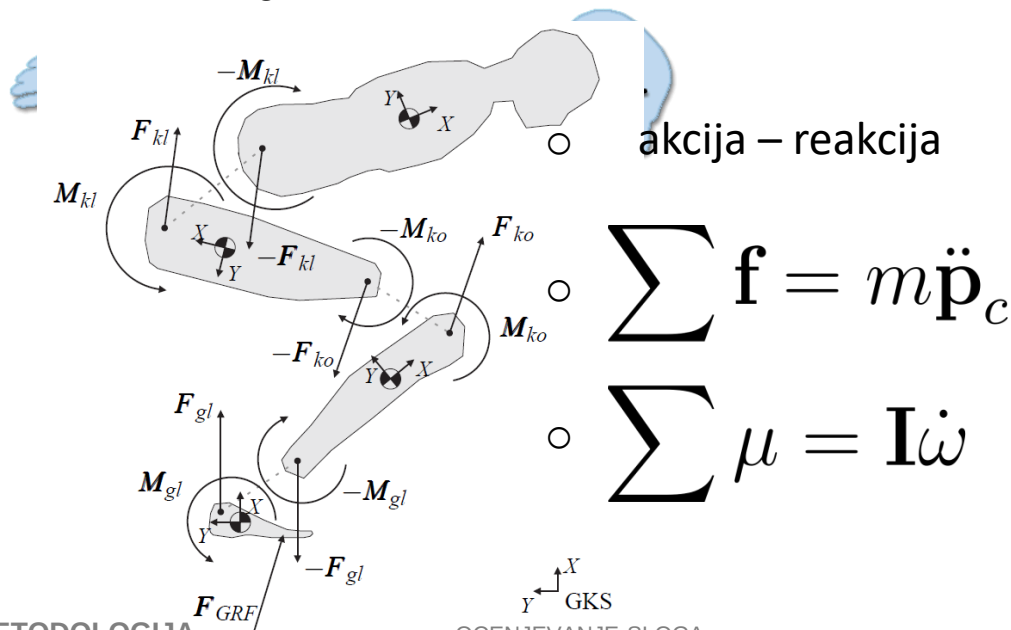


Kinematične spremenljivke



Dinamični model skakalca

- Skeletni model Newton-Eulerjeva dinamična analiza
 - Več segmentni sistem togih teles



Antropometrični parametri

- Mase segmentov telesa *

$$m_3 = m_{glava} + m_{trup} + 2 \cdot (m_{nadlaht} + m_{podlaht} + m_{dlan})$$

$$m_2 = 2 \cdot m_{stegno}$$

$$m_1 = 2 \cdot m_{golen}$$

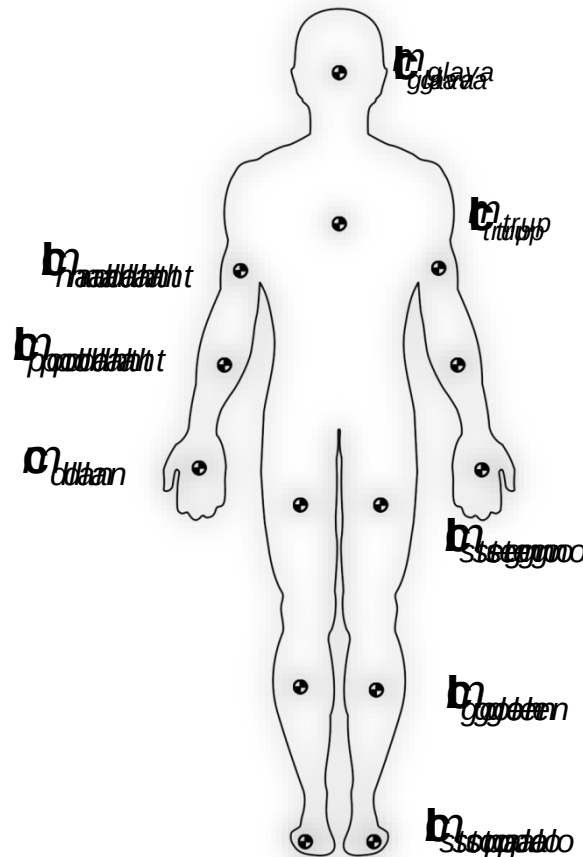
$$m_0 = 2 \cdot m_{stopalo}$$

- Pozicije težišč segmentov telesa *

$$C_i = \frac{\sum_{j=a}^b m_j \cdot C_j}{\sum_{j=a}^b m_j}$$

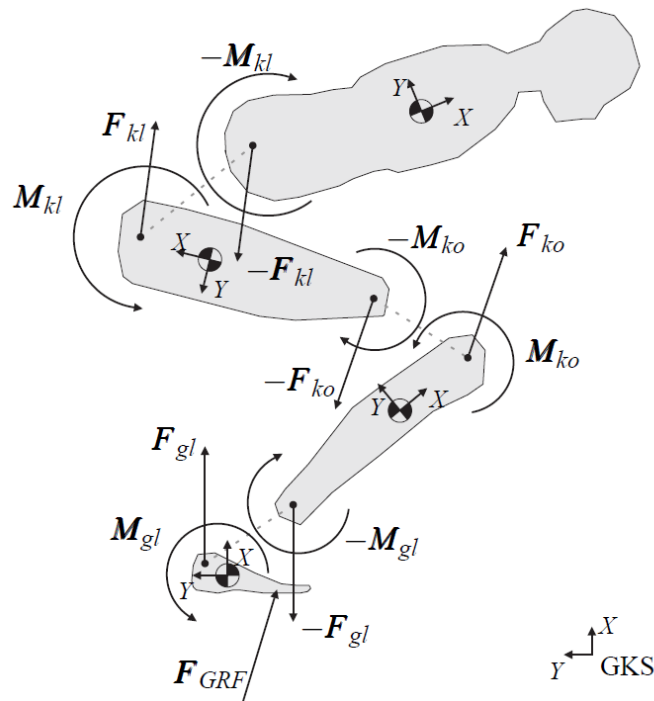
- Vztrajnostni parametri segmentov telesa *

$$I'_i = I_i + m_i \cdot P_{r_{ci}, r'_{ci}}^2$$





Zapis modela skakalca



$$\mathbf{F}_{GRF} - \mathbf{F}_{gl} = m_{ski} \ddot{\mathbf{p}}_{ski_M}$$

$$\mathbf{F}_{gl} - \mathbf{F}_{ko} = m_{go} \ddot{\mathbf{p}}_{go_M}$$

$$\mathbf{F}_{ko} - \mathbf{F}_{kl} = m_{st} \ddot{\mathbf{p}}_{st_M}$$

$$\mathbf{F}_{kl} = m_{hat} \ddot{\mathbf{p}}_{hat_M}$$

$$\mathbf{r}_{c_{ski},GRF} \times \mathbf{F}_{GRF} - \mathbf{M}_{gl} - \mathbf{r}_{c_{ski},gl} \times \mathbf{F}_{gl} = \mathbf{I}_{ski} \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ski}$$

$$\mathbf{M}_{gl} + \mathbf{r}_{c_{go},gl} \times \mathbf{F}_{gl} - \mathbf{M}_{ko} - \mathbf{r}_{c_{go},ko} \times \mathbf{F}_{ko} = \mathbf{I}_{go} \dot{\boldsymbol{\omega}}_{go}$$

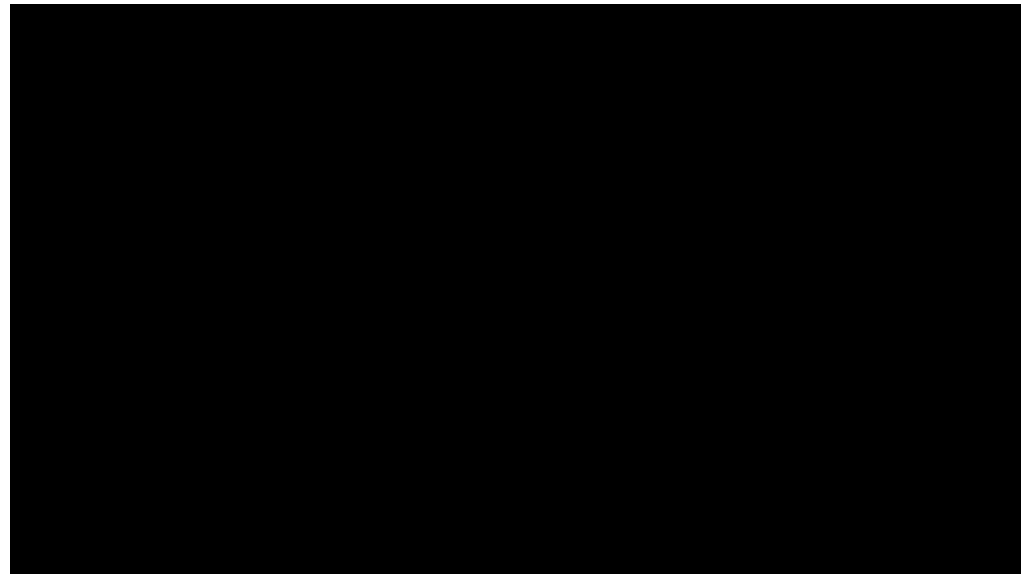
$$\mathbf{M}_{ko} + \mathbf{r}_{c_{st},ko} \times \mathbf{F}_{ko} - \mathbf{M}_{kl} - \mathbf{r}_{c_{st},kl} \times \mathbf{F}_{kl} = \mathbf{I}_{st} \dot{\boldsymbol{\omega}}_{st}$$

$$\mathbf{M}_{kl} + \mathbf{r}_{c_{hat},kl} \times \mathbf{F}_{kl} = \mathbf{I}_{hat} \dot{\boldsymbol{\omega}}_{hat}$$



Preizkus na pritiskovni plošči

- 4 skakalci
 - 19 ± 4 let
 - $1,78 \pm 0,06$ m
 - 60 ± 7 kg
- 8 IME in 18 markerjev
- 3 – 6 simulacijskih skokov (skupno 20)
- Vzorčna frekvenca
 - IME 400 Hz
 - Optotrak 100 Hz



Rekurzivni postopek izračuna sil in navorov v sklepih

- rekurzivna veriga od spodaj-navzgor

$$\mathbf{f}_1 = \mathbf{f}_{cop} - m_0 \ddot{\mathbf{p}}_{IMUC_0}$$

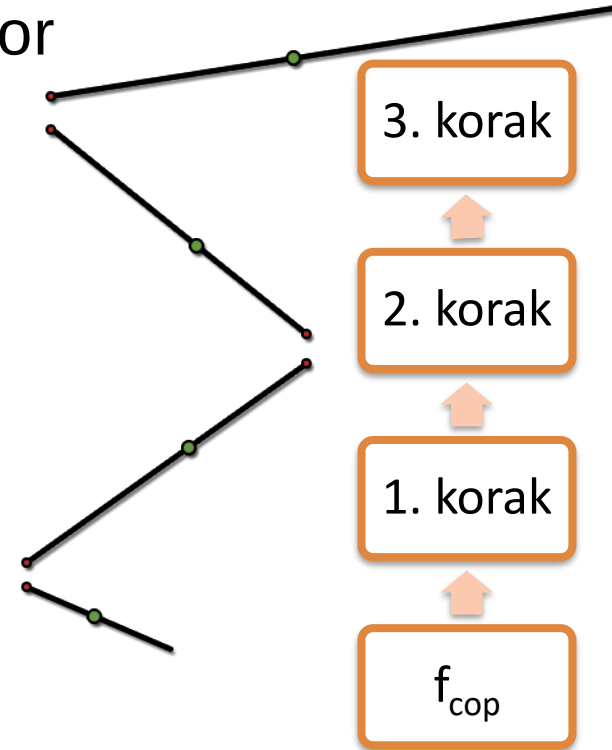
$$\mu_1 = \mathbf{f}_{cop} \times \mathbf{r}_{cop,c_0} - \mathbf{f}_1 \times \mathbf{r}_{1,c_0} - \mathbf{I}_0 \dot{\omega}_0$$

$$\mathbf{f}_2 = \mathbf{f}_1 - m_1 \ddot{\mathbf{p}}_{IMUC_1}$$

$$\mu_2 = \mu_1 + \mathbf{f}_1 \times \mathbf{r}_{1,c_1} - \mathbf{f}_2 \times \mathbf{r}_{2,c_1} - \mathbf{I}_1 \dot{\omega}_1$$

$$\mathbf{f}_3 = \mathbf{f}_2 - m_2 \ddot{\mathbf{p}}_{IMUC_2}$$

$$\mu_3 = \mu_2 + \mathbf{f}_2 \times \mathbf{r}_{2,c_2} - \mathbf{f}_3 \times \mathbf{r}_{3,c_2} - \mathbf{I}_2 \dot{\omega}_2$$





Rekurzivni postopek izračuna sil in navorov v sklepih

- rekurzivna veriga od zgoraj-navzdol

$$\mathbf{f}_3 = m_3 \ddot{\mathbf{p}}_{IMUC_3}$$

$$\mu_3 = \mathbf{I}_3 \dot{\omega}_3 - \mathbf{f}_3 \times \mathbf{r}_{3,c_3}$$

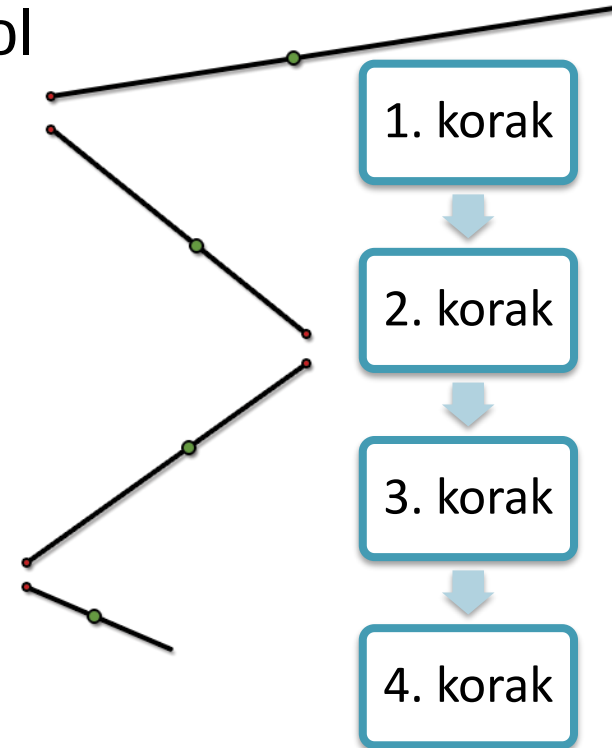
$$\mathbf{f}_2 = m_2 \ddot{\mathbf{p}}_{IMUC_2} + \mathbf{f}_3$$

$$\mu_2 = \mathbf{I}_2 \dot{\omega}_2 - \mathbf{f}_2 \times \mathbf{r}_{2,c_2} + \mu_3 + \mathbf{f}_3 \times \mathbf{r}_{3,c_2}$$

$$\mathbf{f}_1 = m_1 \ddot{\mathbf{p}}_{IMUC_1} + \mathbf{f}_2$$

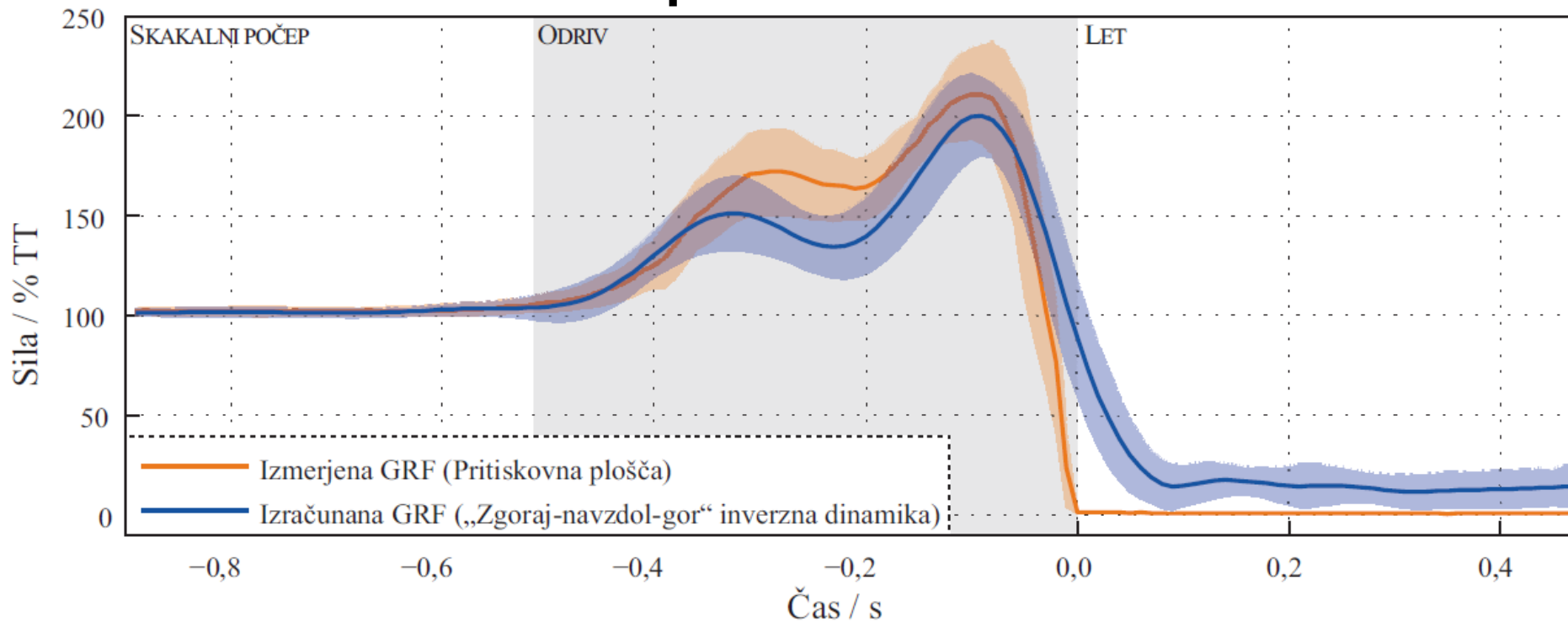
$$\mu_1 = \mathbf{I}_1 \dot{\omega}_1 - \mathbf{f}_1 \times \mathbf{r}_{1,c_1} + \mu_2 + \mathbf{f}_2 \times \mathbf{r}_{2,c_1}$$

$$\mathbf{f}_{cop} = m_0 \ddot{\mathbf{p}}_{IMUC_0} + \mathbf{f}_1$$



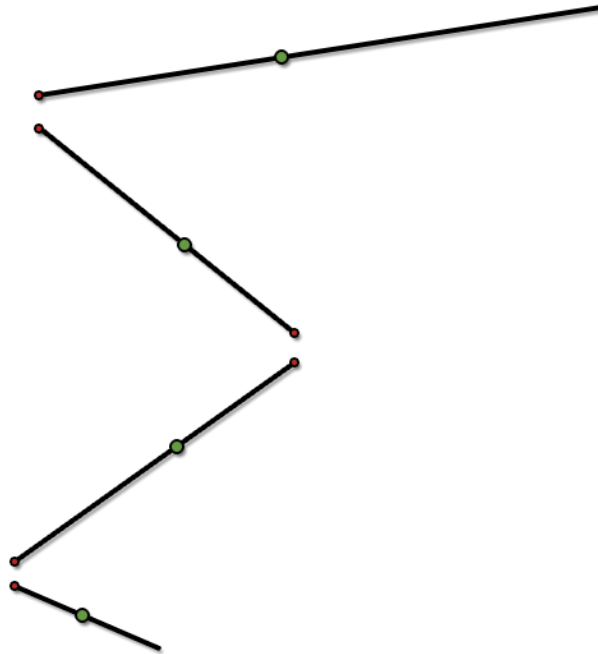


Sile in navori v sklepih skakalca

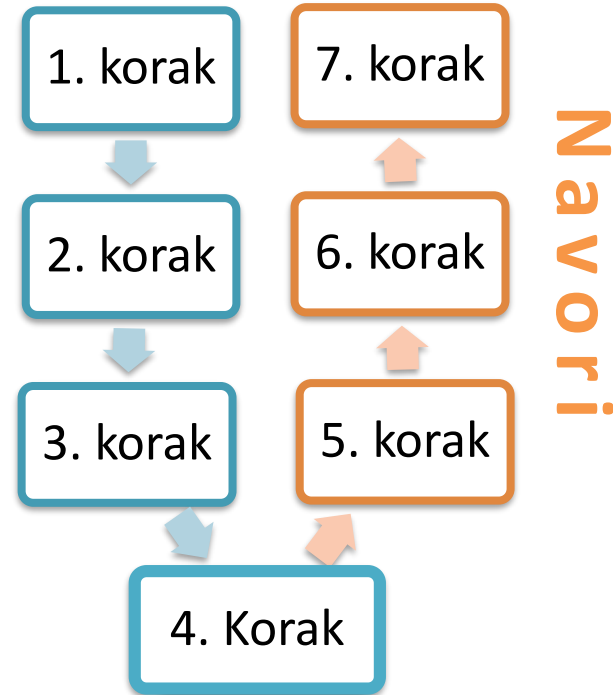




Rekurzivni postopek izračuna sil in navorov v sklepih

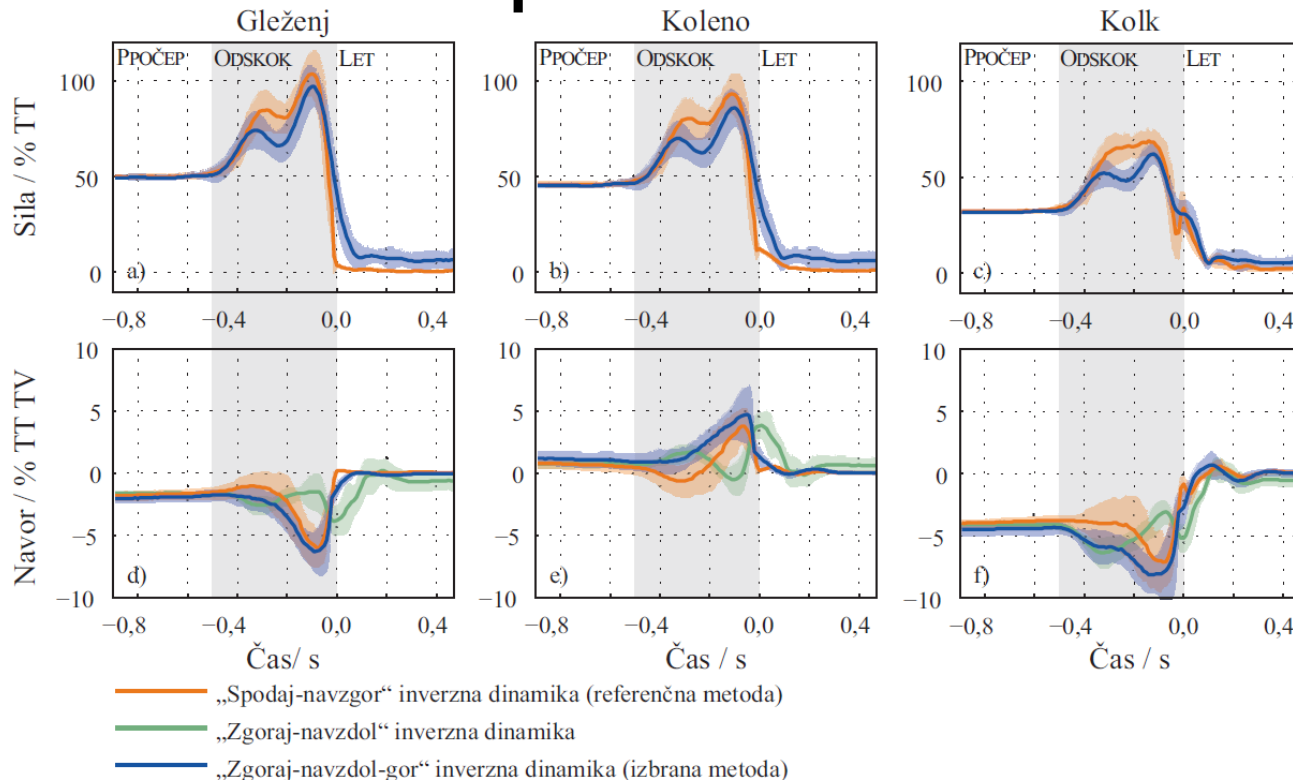


Sile





Sile in navori v sklepih skakalca



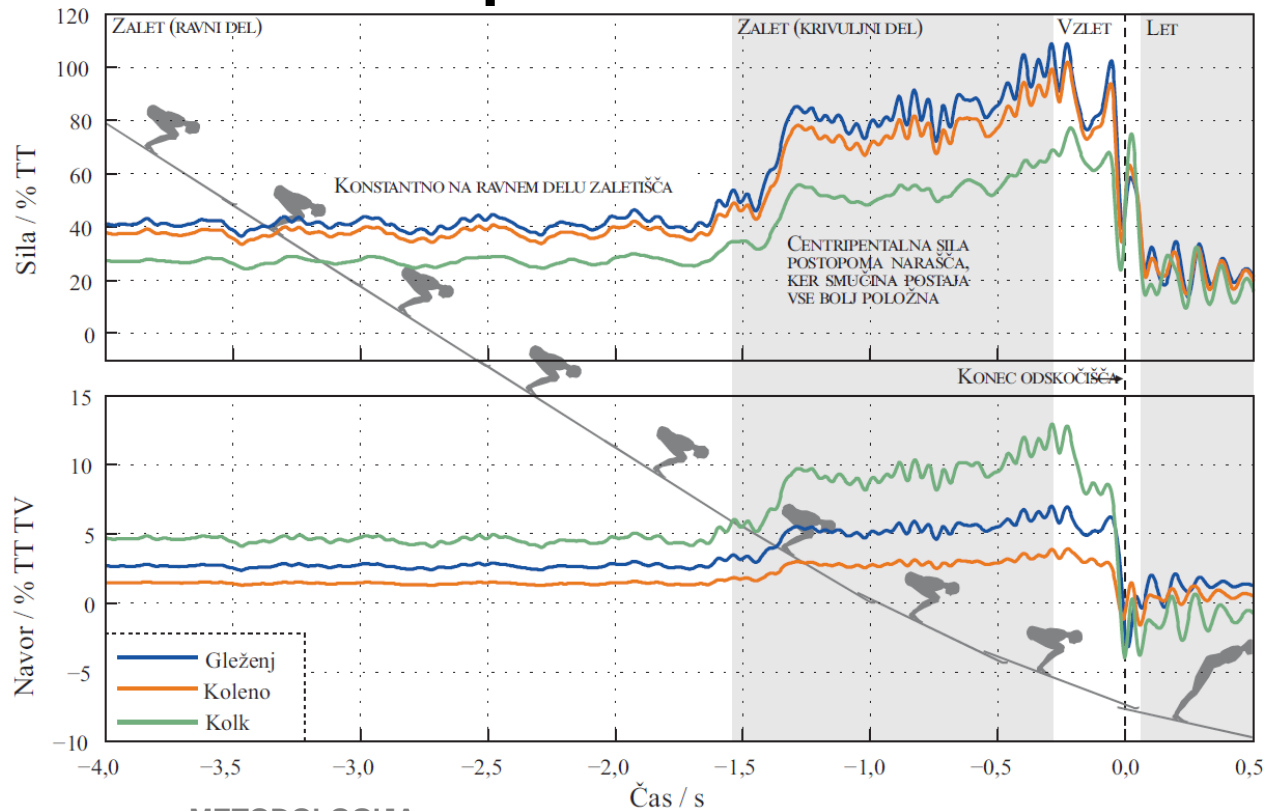
Preizkus na skakalnici (HS-109)

- 6 skakalcev
 - 19 ± 4 let
 - $1,76 \pm 0,09$ m
 - 59 ± 8 kg
- 10 IME
- 2 svetlobni zavesi
- 2 – 4 skokov (skupno 18)
- Vzorčna frekvenca
 - IME 400 Hz
 - PP 1000 Hz



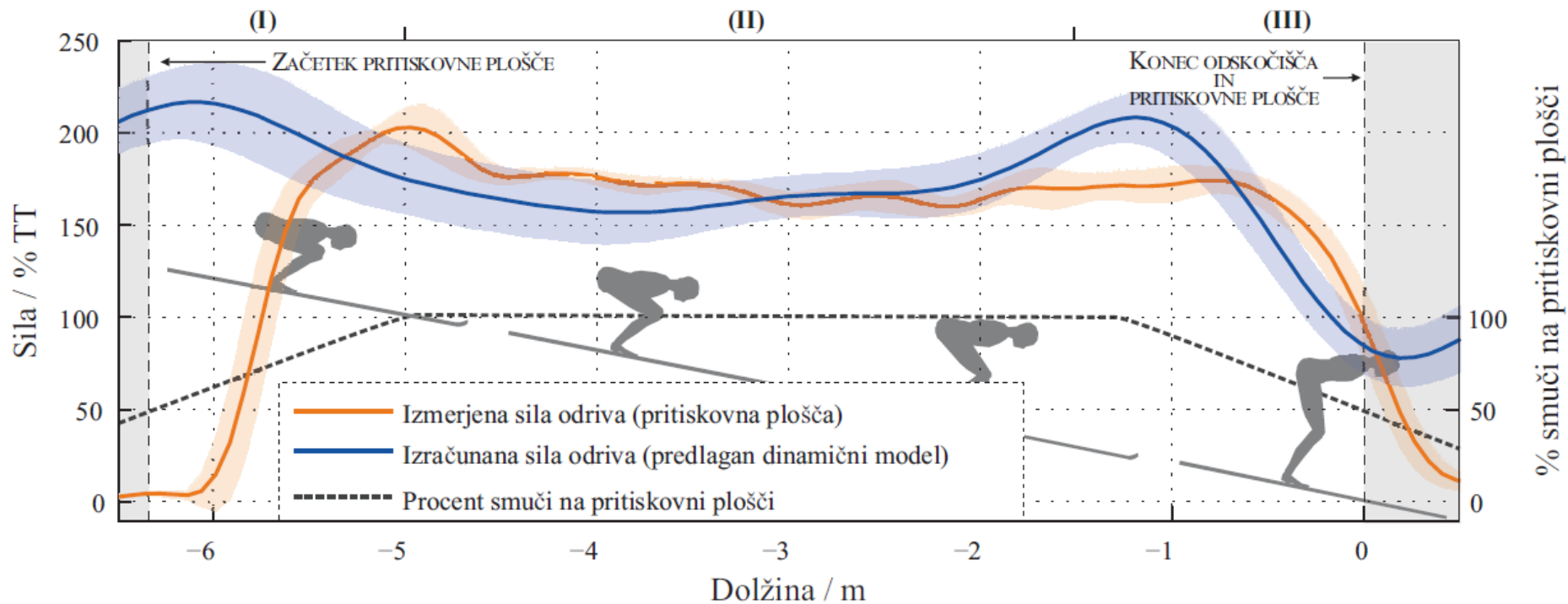


Sile in navori v sklepih skakalca





Sile in navori v sklepih skakalca





Ocenjevanje smučarskih skokov

- Skupna ocena sestavljena iz:
 - Dolžine skoka pretvorjena v točke (K točka 60 točk)
 - Ocene za slog (največ 60 točk)
- Sodniki oddajo odbitke točk za tri skupine
 - Let (največ 5 točk)
 - Doskok (največ 5 točk)
 - Vožnjo v iztek (največ 7 točk)



Meritve na skakalnici

- 7 skakalcev
 - 21 ± 4 let
 - $1,78 \pm 0,07$ m
 - 60 ± 5 kg
- 5 sodnikov
(2x FIS, 2x kFIS, 1x DS)
- 10 IME
- 2 svetlobni zavesi
- Video kamera
(sinhronizirana z IME)
- 3 – 8 skokov (skupno 50)
- Vzorčna frekvenca
 - IME 400 Hz
 - Kamera 50 Hz





Matematični model ocenjevanja skoka

$$MAT_f = \mathbf{P}_f \cdot \mathbf{w}_f$$

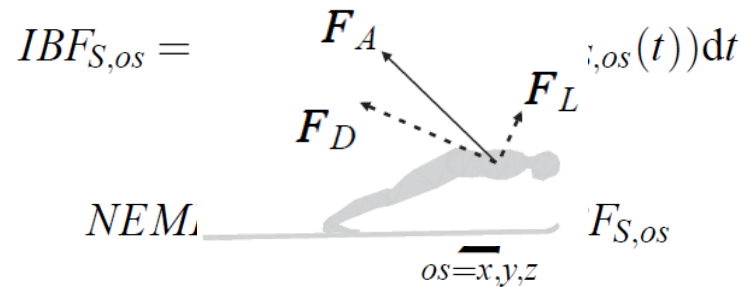


Parametri za izračun odbitka za fazo leta

OPIS NAPAK	ODBITKI TOČK
LET	(največ 5,0)
Slaba usklajenost gibanja telesa in smuči pri formiranju položaja za let	od 0,5 do 2,0
Negotovost, nemirnost (npr. nepotrebno gibanje rok, slab nadzor telesa, skrčena kolena, nepopolno iztegnjene noge)	od 0,5 do 1,5
Nesimetrična in/ali nemirna drža rok	od 0,5 do 1,0
Nesimetrična in/ali nemirna drža nog	od 0,5 do 1,0
Smuči niso v isti ravnini in/ali nemirno vodenje smuči	od 0,5 do 1,0

Parametri za izračun odbitka za fazo leta

- nesimetričnost rok,
- nesimetričnost stegen,
- nesimetričnost goleni,
- nesimetričnost smuči,
- nemirnost rok,
- nemirnost stegen,



$$INDS_S = \frac{RMSE(\varphi_{S,xl}, \varphi_{S,xd}) + INDM_S}{3} \quad \mathbf{F}_A(t) = m (\ddot{\mathbf{p}}(t) - \mathbf{g}_0) \quad VOST_{Sd}$$

- mediano kota v kolenu in
- mediano sile vzgona.



Parametri za izračun odbitka za fazo doskoka

OPIS NAPAK	ODBITKI TOČK
DOSKOK	(največ 5,0)
Brez poskusa razmika nog v telemark položaj v točki doskoka in brez telemark položaja skozi celotno pristajalno fazo skoka	min 2,0
Pomanjkljivosti pri pravilnem in harmoničnem prehodu iz faze leta v doskok	od 0,5 do 1,0
Prekratek izpadni korak in premalo skršene noge v točki doskoka	od 0,5 do 1,5
Pomanjkljivosti pri ublažitvi sile ob doskoku v pravilen telemark položaj (negotovost, trd doskok, preglobok doskok brez telemarka)	od 0,5 do 1,5
Negotovost in neuravnoteženi gibi rok za vzpostavitev ravnotežja	od 0,5 do 1,0
Pomanjkljivosti pri vodenju smuči in/ali nepopoln stik obeh smuči s podlago	od 0,5 do 1,0



Parametri za izračun odbitka za fazo doskoka

- kot v levem/desnem gležnju,
- kot v levem/desnem kolenu,
- kot v levem/desnem kolku,
- kot v levi/desni rami v anteriorno–posteriorni osi,
- kot v levi/desni rami v medialno–lateralni osi,
- razdalja razkoraka v anteriorno–posteriorni osi in
- razdalja razkoraka v medialno–lateralni osi.



Parametri za izračun odbitka za fazo vožnje v iztek

OPIS NAPAK	ODBITKI TOČK
VOŽNJA V IZTEK	(največ 7,0)
Manjše pomanjkljivosti pri vožnji v iztek, nevzravnan drža telesa pred začetkom zaviranja	od 0,5 do 1,5
Večje pomanjkljivosti pri vožnji v iztek vključno z nepotrebnim zavijanjem od direktne smeri proti črti padcev	od 2,0 do 2,5
Velike težave pri vožnji v iztek	3,0
Izguba ravnotežja in nadzora	od 4,0 do 5,0
Kratek dotik ene roke	1,0
Kratek dotik dveh rok	2,0
Padec pred črto ali na črti padca	7,0



Parametri za izračun odbitka za fazo vožnje v iztek

- povprečen naklon trupa,
- največja razlika v zasuku smuči v inferiorno–superiorni osi,
- največji nagib smuči in
- nemirnost rok.

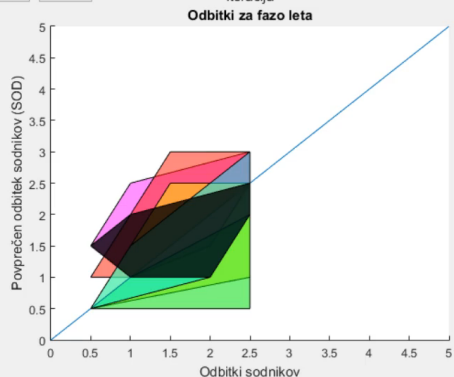
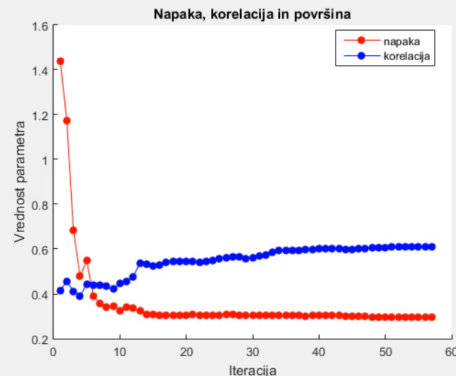
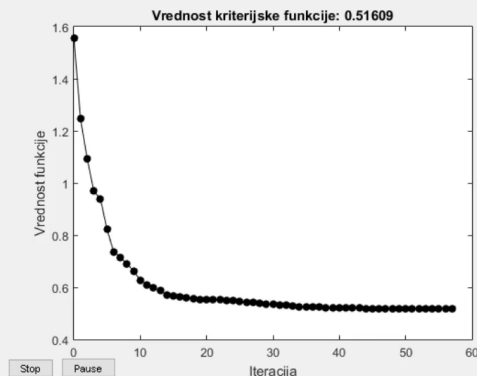


Matematični model ocenjevanja skoka

$$\bar{e}_f = Z_f = \frac{\bar{e}_f + (1 - r_f)}{2} \frac{D_{n,f}}{2}$$



Ocenjevanje leta



Korak: 75 | Floscina: 3.75, R: 0.52, p-value: 0.00017, time: 5.53, Rmean: 0.34, avgererror: 0.89
Korak: 76 | Floscina: 1.50, R: 0.49, p-value: 0.00044, time: 5.00, Rmean: 0.40, avgererror: 0.30
Korak: 77 | Floscina: 1.38, R: 0.39, p-value: 0.00669, time: 3.11, Rmean: 0.29, avgererror: 0.32
Korak: 78 | Floscina: 2.50, R: 0.56, p-value: 0.00003, time: 6.82, Rmean: 0.40, avgererror: 0.30
Korak: 79 | Floscina: 2.00, R: 0.40, p-value: 0.00466, time: 4.57, Rmean: 0.27, avgererror: 0.33
Korak: 80 | Floscina: 3.50, R: 0.23, p-value: 0.11385, time: 5.09, Rmean: 0.12, avgererror: 0.38
Korak: 81 | Floscina: 2.00, R: 0.52, p-value: 0.00016, time: 10.71, Rmean: 0.39, avgererror: 0.31
Korak: 82 | Floscina: 1.38, R: 0.53, p-value: 0.00011, time: 4.97, Rmean: 0.36, avgererror: 0.30
Korak: 83 | Floscina: 1.38, R: 0.58, p-value: 0.00002, time: 3.90, Rmean: 0.38, avgererror: 0.29
Korak: 84 | Floscina: 2.00, R: 0.63, p-value: 0.00000, time: 7.21, Rmean: 0.46, avgererror: 0.27
Korak: 85 | Floscina: 2.13, R: 0.19, p-value: 0.19816, time: 5.88, Rmean: 0.09, avgererror: 0.36
Korak: 86 | Floscina: 1.50, R: 0.53, p-value: 0.00009, time: 4.91, Rmean: 0.35, avgererror: 0.30
Korak: 87 | Floscina: 1.00, R: 0.42, p-value: 0.00279, time: 2.07, Rmean: 0.30, avgererror: 1.51
Korak: 88 | Floscina: 1.50, R: 0.53, p-value: 0.00012, time: 4.31, Rmean: 0.37, avgererror: 0.33
Korak: 89 | Floscina: 1.75, R: 0.48, p-value: 0.00052, time: 10.38, Rmean: 0.31, avgererror: 0.31
Korak: 90 | Floscina: 1.63, R: 0.60, p-value: 0.00001, time: 3.80, Rmean: 0.40, avgererror: 0.29
Korak: 91 | Floscina: 2.75, R: 0.23, p-value: 0.10966, time: 10.89, Rmean: 0.19, avgererror: 0.35
Korak: 92 | Floscina: 2.00, R: 0.68, p-value: 0.00000, time: 9.47, Rmean: 0.51, avgererror: 0.26
Korak: 93 | Floscina: 1.75, R: 0.39, p-value: 0.00654, time: 3.56, Rmean: 0.31, avgererror: 0.31
Korak: 94 | Floscina: 3.13, R: 0.52, p-value: 0.00014, time: 4.20, Rmean: 0.38, avgererror: 0.48
Korak: 95 | Floscina: 2.00, R: 0.56, p-value: 0.00003, time: 6.46, Rmean: 0.42, avgererror: 0.31
Korak: 96 | Floscina: 2.00, R: 0.60, p-value: 0.00001, time: 6.64, Rmean: 0.43, avgererror: 0.29
Korak: 97 | Floscina: 2.25, R: 0.43, p-value: 0.00235, time: 8.99, Rmean: 0.31, avgererror: 0.30
Korak: 98 | Floscina: 1.88, R: 0.63, p-value: 0.00000, time: 7.24, Rmean: 0.47, avgererror: 0.24



Korelacije sodnikov

	FIS1	FIS2	kFIS1	kFIS2
LET				
FIS2	0,03			
kFIS1	0,28 [▽]	0,31 [▽]		
kFIS2	0,46**	0,42*	0,57***	
DS	0,55***	0,16	0,24	0,57***
DOSKOK				
FIS2	0,62***			
kFIS1	0,49**	0,63***		
kFIS2	0,54***	0,57***	0,43*	
DS	0,53***	0,62***	0,58***	0,54***
KONČNA OCENA				
FIS2	0,31 [▽]			
kFIS1	0,33 [▽]	0,33 [▽]		
kFIS2	0,48**	0,52**	0,29 [▽]	
DS	0,56***	0,47**	0,20	0,69***



Korelacije sodniške ocene z matematičnim modelom

SODNIKI	r_{SOD}	r_{MAT}	POVP. $\pm$ SD	MIN.	MAKS.
LET					
FIS1	0,46**	0,48**	$0,81 \pm 0,36$	0,5	2,0
FIS2	0,62***	0,55***	$1,64 \pm 0,58$	0,5	2,5
kFIS1	0,54***	0,45*	$2,24 \pm 0,41$	1,0	3,0
kFIS2	0,82***	0,59***	$2,12 \pm 0,59$	1,0	3,0
DS	0,76***	0,44*	$1,49 \pm 0,50$	0,5	3,0
SOD	1	0,66***	$1,70 \pm 0,47$	0,5	2,5
MAT20	0,55**	1	$1,55 \pm 0,28$	1,0	2,0
MAT80	0,73***	1	$1,78 \pm 0,38$	1,0	2,5
DOSKOK					
FIS1	0,74***	0,41*	$2,57 \pm 0,30$	2,0	3,5
FIS2	0,81***	0,48**	$2,49 \pm 0,57$	1,5	3,5
kFIS1	0,78***	0,47**	$2,51 \pm 0,41$	2,0	3,5
kFIS2	0,70***	0,35 ^V	$2,65 \pm 0,37$	2,0	3,5
DS	0,71***	0,49**	$2,27 \pm 0,35$	2,0	3,0
SOD	1	0,55***	$2,48 \pm 0,35$	2,0	3,5
MAT20	0,56**	1	$2,50 \pm 0,48$	1,5	3,0
MAT80	0,52***	1	$2,32 \pm 0,38$	2,0	3,0
KONČNA OCENA					
FIS1	0,53***	0,48**	$16,59 \pm 0,49$	15,5	17,5
FIS2	0,76***	0,50**	$15,87 \pm 0,72$	14,0	17,0
kFIS1	0,43*	0,29 ^V	$15,19 \pm 0,58$	13,5	16,0
kFIS2	0,81***	0,48**	$14,85 \pm 0,84$	12,5	16,5
DS	0,76***	0,46*	$16,24 \pm 0,57$	15,0	17,0
SOD	1	0,52**	$15,80 \pm 0,48$	14,5	17,0
MAT20	0,49*	1	$15,95 \pm 0,44$	15,5	17,0
MAT80	0,62***	1	$15,91 \pm 0,60$	14,5	16,5



Tabela parametrov

PARAMETER	OPIS	Povp. $\pm$ SD	$r^2_{dolzina}$	r^2_{ocena}	$r^2_{rezultat}$
FAZA ODRIVA — OD					
Trajanje odzivne faze	Čas med začetkom odziva in koncem iztegnitve v kolenu, ki sovpada z začetkom in koncem OD	(563 $\pm$ 202) ms	0,07 (-)	0,11 [∇]	0,05 (-)
Trajanje odziva	Čas med začetkom odziva in trenutkom največjega vertikalnega pospeška smuči	(411 $\pm$ 162) ms	0,17* (-)	0,12 [∇]	0,05 (-)
Kotna hitrost goleni	Povprečna sagitalna kotna hitrost goleni med OD	(-150 $\pm$ 48) °/s	0,15* (-)	0,21**	0,07 (-)
Kotna hitrost stegna	Povprečna sagitalna kotna hitrost stegna med OD	(49 $\pm$ 23) °/s	0,06 (-)	0,00	0,01
Kotna hitrost trupa	Povprečna sagitalna kotna hitrost trupa med OD	(45 $\pm$ 65) °/s	0,06	0,11 [∇] (-)	0,05
Začetni kot gležnja	Kot gležnja ob začetku OD	(38,0 $\pm$ 7,7) °	0,40***	0,26**	0,33***
Začetni kot kolena	Kot kolena ob začetku OD	(78,2 $\pm$ 9,3) °	0,15*	0,03	0,13*
Začetni kot kolka	Kot kolka ob začetku OD	(50,0 $\pm$ 12,7) °	0,25** (-)	0,17* (-)	0,25** (-)
Začetni kot trupa	Kot trupa glede na horizont v XY ravnini ob začetku OD	(-0,9 $\pm$ 11,8) °	0,09 (-)	0,04 (-)	0,12 [∇] (-)
Začetni kot rok	Kot rok glede na horizont v XY ravnini ob začetku OD	(-9,1 $\pm$ 9,9) °	0,11 [∇] (-)	0,01 (-)	0,13* (-)
Začetni kot napada	Kot tetive telesa glede na horizont v XY ravnini ob začetku OD	(32,3 $\pm$ 7,6) °	0,05 (-)	0,06 (-)	0,13* (-)
Začetni kot nog	Kot tetive nog glede na horizont v XY ravnini ob začetku OD	(81,8 $\pm$ 5,5) °	0,30**	0,02	0,12*
Začetni kot smuči	Naklon smuči glede na horizont v XY ravnini ob začetku OD	(-10,4 $\pm$ 2,4) °	0,07	0,11 [∇] (-)	0,08
Začetni indeks skakalca	Razdalja med gležnjem in vrhom glave v X osi XY ravnine ob začetku OD	(0,56 $\pm$ 0,17) m	0,06 (-)	0,07 (-)	0,12* (-)
Začetni indeks smuči	Razdalja med spodnjim in zgornjim delom smuči v X osi XY ravnine ob začetku OD	(-0,43 $\pm$ 0,01) m	0,07	0,11 [∇] (-)	0,08
Končni kot gležnja	Kot gležnja ob koncu OD	(47,4 $\pm$ 15,3) °	0,02	0,30**	0,09
Končni kot kolena	Kot kolena ob koncu OD	(172,2 $\pm$ 14,3) °	0,33***	0,04 (-)	0,17*
Končni kot kolka	Kot kolka ob koncu OD	(147,0 $\pm$ 24,3) °	0,07	0,28** (-)	0,01 (-)
Končni kot trupa	Kot trupa glede na horizont v XY ravnini ob koncu OD	(25,8 $\pm$ 19,7) °	0,03	0,15* (-)	0,00 (-)
Končni kot rok	Kot rok glede na horizont v XY ravnini ob koncu OD	(-13,6 $\pm$ 19,5) °	0,00	0,09 (-)	0,03 (-)
Končni kot napada	Kot tetive telesa glede na horizont v XY ravnini ob koncu OD	(39,6 $\pm$ 9,7) °	0,04	0,15*	0,08
Končni kot nog	Kot tetive nog glede na horizont v XY ravnini ob koncu OD	(51,3 $\pm$ 9,5) °	0,03	0,41***	0,12 [∇]
Končni kot smuči	Naklon smuči glede na horizont v XY ravnini ob koncu OD	(5,8 $\pm$ 8,2) °	0,17*	0,02	0,15*
Končni indeks skakalca	Razdalja med gležnjem in vrhom glave v X osi XY ravnine ob koncu OD	(1,04 $\pm$ 0,30) m	0,08	0,05	0,08
Končni indeks smuči	Razdalja med spodnjim in zgornjim delom smuči v X osi XY ravnine ob koncu OD	(0,24 $\pm$ 0,40) m	0,17*	0,02	0,15*
Vert. pospešek smuči	Največji vertikalni pospešek smuči med OD	(63,8 $\pm$ 14,6) m/s	0,37***	0,45***	0,49***
Sila odziva	Povprečna skupna reakcijska sila tal med OD — sila odziva	(1086 $\pm$ 269) N	0,24**	0,05	0,15*
Sila kolka	Povprečna sila v kolku med OD	(783 $\pm$ 118) N	0,09	0,13* (-)	0,06
Sila kolena	Povprečna sila v kolenu med OD	(509 $\pm$ 122) N	0,15*	0,03	0,15*
Sila gležnja	Povprečna sila v gležnju med OD	(540 $\pm$ 136) N	0,13*	0,05	0,14*
Navor kolka	Povprečen navor v kolku med OD	(2177 $\pm$ 866) Nm	0,09	0,02 (-)	0,05
Navor kolena	Povprečen navor v kolenu med OD	(469 $\pm$ 166) Nm	0,13 [∇]	0,04	0,11 [∇]
Navor gležnja	Povprečen navor v gležnju med OD	(784 $\pm$ 278) Nm	0,05	0,05	0,05



Tabela parametrov

PARAMETER	OPIS	POVP. $\pm$ SD	$r^2_{dolzina}$	r^2_{ocena}	$r^2_{rezultat}$
FAZA VZPOSTAVITVE OPTIMALNEGA POLOŽAJA ZA LET — OP					
Trajanje OP faze	Čas med koncem iztegnitve v kolenu pri odskoku in koncem gibanja smuči v V-slog, ki sovpada z začetkom in koncem časa ko skakalec vzpostavi optimalni položaj za let	(673 $\pm$ 128) ms	0,10 [▽]	0,27**	0,18*
Kotna hitrost nagiba smuči	Povprečna kotna hitrost nagiba smuči navznoter med levo in desno smučko v celotni OP	(44,1 $\pm$ 13,9) °/s	0,00	0,40*** (-)	0,06 (-)
Kotna hitrost V-sloga smuči	Povprečna kotna hitrost gibanja smuči V-sloga med celotno OP	(17,6 $\pm$ 17,7) °/s	0,09 (-)	0,35*** (-)	0,12* (-)
Kotna hitrost trupa	Povprečna sagitalna kotna hitrost trupa med celotno OP	(-11,1 $\pm$ 14,4) °/s	0,16* (-)	0,17*	0,10 [▽] (-)
Kot naklona smuči	Največji naklon smuči glede na horizont v XY ravnini v OP	(16,0 $\pm$ 5,3) °	0,15* (-)	0,13*	0,04
FAZA STABILNEGA LETA — SL					
Kot naklona smuči	Mediana naklona smuči glede na horizont v XY ravnini v SL	(1,0 $\pm$ 4,7) °	0,18* (-)	0,44*** (-)	0,01 (-)
Kotna hitrost nagiba smuči	Mediana nagiba smuči navznoter med levo in desno smučko med SL	(18,5 $\pm$ 7,0) °/s	0,04	0,28** (-)	0,12 [▽] (-)
Kotna hitrost V-sloga smuči	Mediana kota V-sloga smuči med SL	(55,6 $\pm$ 9,4) °/s	0,15* (-)	0,38*** (-)	0,09 (-)
Kot gležnja	Mediana kota gležnja med SL	(24,0 $\pm$ 12,6) °	0,13*	0,29**	0,15*
Kot kolena	Mediana kota kolena med SL	(171,3 $\pm$ 15,8) °	0,23**	0,04 (-)	0,18*
Kot kolka	Mediana kota kolka med SL	(178,4 $\pm$ 9,8) °	0,00 (-)	0,39*** (-)	0,10 [▽] (-)
Kot trupa	Mediana kota trupa glede na horizont v XY ravnini med SL	(11,3 $\pm$ 7,7) °	0,23** (-)	0,19* (-)	0,30** (-)
Kot napada	Mediana kota tetive telesa glede na horizont v XY ravnini med SL	(15,4 $\pm$ 5,6) °	0,24** (-)	0,09	0,25** (-)
Kot rok	Mediana kota rok glede na horizont v XY ravnini med SL	(-18,5 $\pm$ 10,3) °	0,10 [▽]	0,04 (-)	0,01
Kot nog	Mediana kota tetive nog glede na horizont v XY ravnini med SL	(19,0 $\pm$ 6,9) °	0,06 (-)	0,28**	0,05 (-)
Indeks skakalca	Razdalja med gležnjem in vrhom glave v X osi XY ravnine med SL	(0,45 $\pm$ 0,16) m	0,24** (-)	0,05	0,27** (-)
Indeks smuči	Razdalja med spodnjim in zgornjim delom smuči v X osi XY ravnine med SL	(0,04 $\pm$ 0,20) m	0,12* (-)	0,45*** (-)	0,01 (-)
Sila vzgona	Mediana sile vzgona med SL	(289 $\pm$ 37) N	0,31***	0,10 [▽] (-)	0,27**
Sila upora	Mediana sile zračnega upora med SL	(200 $\pm$ 40) N	0,24**	0,24** (-)	0,13*
Porast sile vzgona	Razlika med 95 in 5 percentilom sile vzgona med SL	(123 $\pm$ 53) N	0,47***	0,07	0,36***
Porast sile upora	Razlika med 95 in 5 percentilom sile zračnega upora med SL	(98 $\pm$ 72) N	0,12* (-)	0,22* (-)	0,14* (-)



Tabela parametrov

PARAMETER	POVP. $\pm$ SD	$r^2_{\text{dolžina}}$	r^2_{ocena}	r^2_{rezultat}
OČENJEVALNA FAZA LETA				
Nesimetričnost rok	(17,76 $\pm$ 10,88) $^{\circ}$	0,18* (-)	0,29** (-)	0,21** (-)
Nesimetričnost stegen	(14,32 $\pm$ 6,30) $^{\circ}$	0,29**	0,29** (-)	0,17*
Nesimetričnost goleni	(29,22 $\pm$ 5,72) $^{\circ}$	0,06	0,11 $^{\nabla}$ (-)	0,08 $^{\nabla}$ (-)
Nesimetričnost smuči	(30,36 $\pm$ 6,30) $^{\circ}$	0,10 $^{\nabla}$	0,53*** (-)	0,09 $^{\nabla}$ (-)
Nemirnost rok	(7,44 $\pm$ 2,86) $^{\circ}$	0,10 $^{\nabla}$	0,21*	0,20**
Nemirnost stegen	(4,58 $\pm$ 1,71) $^{\circ}$	0,13 $^{\nabla}$	0,06	0,16*
Nemirnost goleni	(4,58 $\pm$ 1,71) $^{\circ}$	0,20*	0,01 (-)	0,19**
Nemirnost smuči	(8,02 $\pm$ 3,43) $^{\circ}$	0,32**	0,05 (-)	0,27**
Mediana sile vzgona	(353 $\pm$ 45) N	0,12 $^{\nabla}$ (-)	0,22* (-)	0,18* (-)
OČENJEVALNA FAZA DOSKOKA				
Kot v levem gležnju	(58,5 $\pm$ 12,3) $^{\circ}$	0,40***	0,44***	0,38***
Kot v desnem gležnju	(57,4 $\pm$ 11,1) $^{\circ}$	0,42***	0,39***	0,44***
Kot v levem kolenu	(129,4 $\pm$ 16,8) $^{\circ}$	0,12 $^{\nabla}$	0,19 $^{\nabla}$	0,13 $^{\nabla}$
Kot v desnem kolenu	(119,5 $\pm$ 24,0) $^{\circ}$	0,14 $^{\nabla}$	0,14 $^{\nabla}$	0,20 $^{\nabla}$
Kot v levem kolku	(117,8 $\pm$ 21,1) $^{\circ}$	0,23* (-)	0,13 $^{\nabla}$	0,15 $^{\nabla}$ (-)
Kot v desnem kolku	(111,5 $\pm$ 22,8) $^{\circ}$	0,21 $^{\nabla}$ (-)	0,07 $^{\nabla}$	0,13 $^{\nabla}$ (-)
Kot v levi rami v anteriorno–posteriorni osi	(26,5 $\pm$ 17,4) $^{\circ}$	0,19 $^{\nabla}$ (-)	0,23*	0,00
Kot v desni rami v anteriorno–posteriorni osi	(28,7 $\pm$ 17,7) $^{\circ}$	0,18 $^{\nabla}$	0,30**	0,24*
Kot v levi rami v medialno–lateralni osi	(37,7 $\pm$ 20,5) $^{\circ}$	0,22 $^{\nabla}$	0,31**	0,32**
Kot v desni rami v medialno–lateralni osi	(1,0 $\pm$ 18,4) $^{\circ}$	0,06	0,09 $^{\nabla}$ (-)	0,01
Razdalja razkoraka v anteriorno–posteriorni osi	(0,074 $\pm$ 0,043) m	0,15 $^{\nabla}$	0,05 (-)	0,02
Razdalja razkoraka v medialno–lateralni osi	(0,055 $\pm$ 0,047) m	0,08 $^{\nabla}$ (-)	0,26* (-)	0,13 $^{\nabla}$ (-)
OČENJEVALNA FAZA VOŽNJE V IZTEK				
Povprečen naklon trupa	(58,4 $\pm$ 12,4) $^{\circ}$	0,27*	0,44***	0,31**
Največji zasuk smuči v inferiorno–superiorni osi	(57,4 $\pm$ 11,2) $^{\circ}$	0,42***	0,23*	0,44***
Največji nagib smuči	(22,4 $\pm$ 9,7) $^{\circ}$	0,12 $^{\nabla}$	0,19 $^{\nabla}$	0,13 $^{\nabla}$
Nemirnost rok	(2,09 $\pm$ 0,42) rad	0,14 $^{\nabla}$	0,14 $^{\nabla}$	0,20*



Izvirni prispevki disertacije

- Izračun kinematičnih spremenljivk skoka s kinematičnim modelom iz podatkov nosljivega merilnega sistema v trodimenzionalnem prostoru.
- Verificiran inverzni dinamični model skakalca z namenom izračuna sil in navorov, ki delujejo v sklepih in na podlago.
- Prepoznavanje značilnih kinematičnih in dinamičnih parametrov skoka smučarskega skakalca.



Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko



Hvala za vašo pozornost!

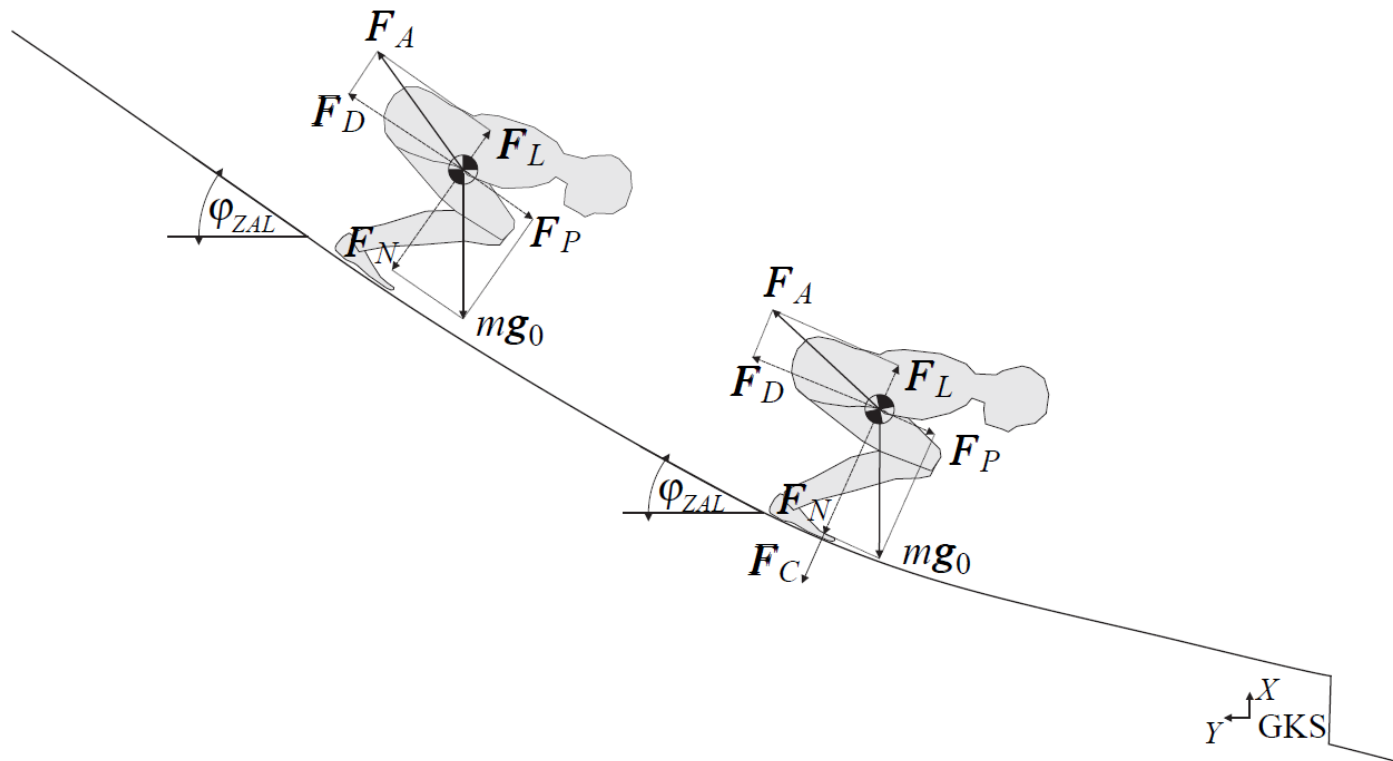


Merilni sistem za posredovanje povratne informacije trenerju

- Pridobivanje podatkov iz enot
 - 3 min za posnetek skoka (20 s - ~300kB)
 - Omejeni na razdaljo 10 m od sprejemnika
- Analiza podatkov predstavljena v obliki
 - Grafov (oblike signalov)
 - Tabel (vrednosti določenih konstant)
 - Animacije (grafična animacija skoka)
 - Primerjava skokov

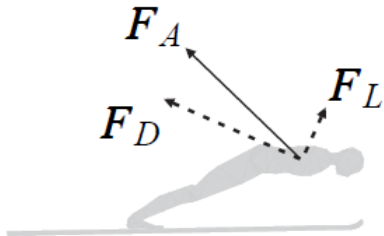


Sile na zaletišču





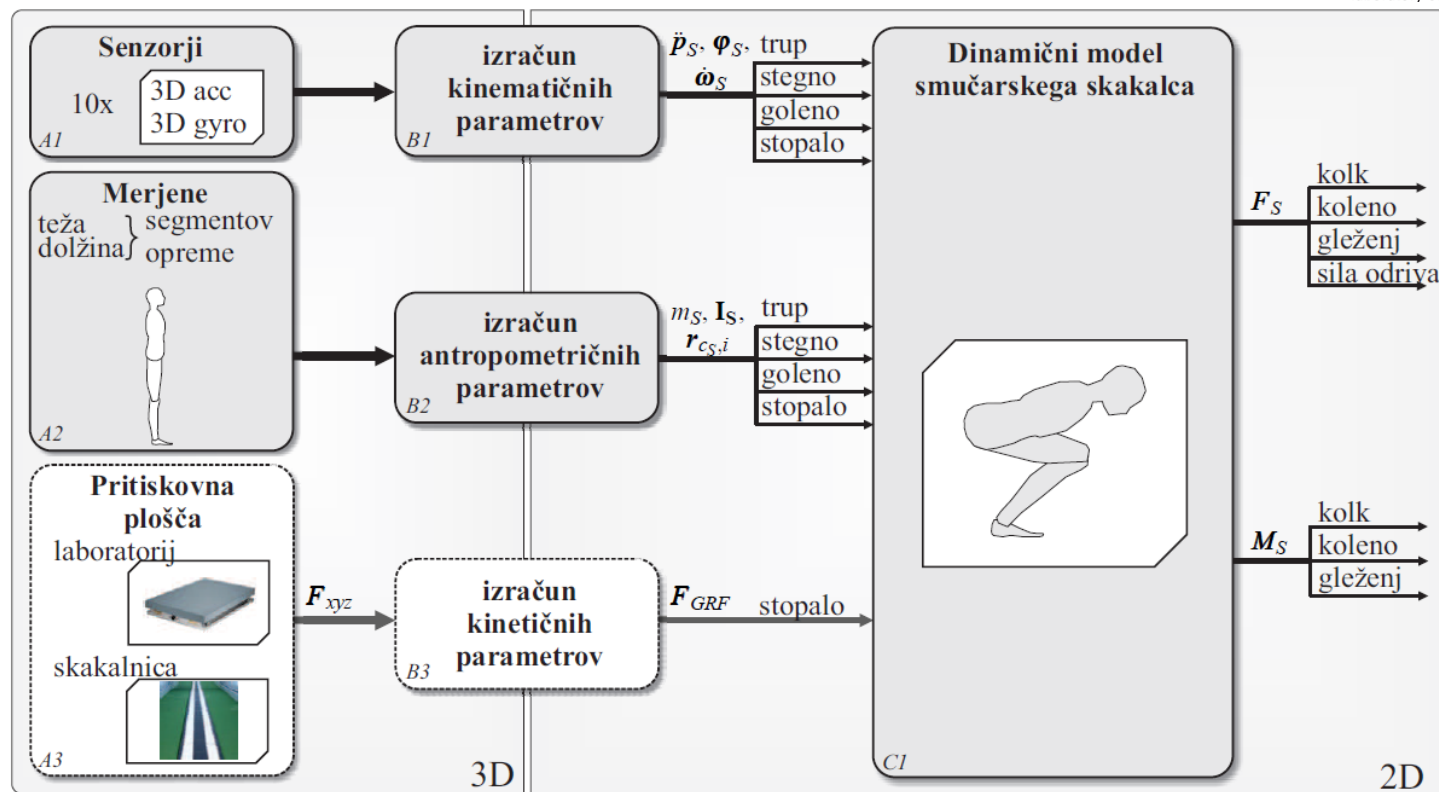
Aerodinamična sila v letu



$$\mathbf{F}_A(t) = m (\ddot{\mathbf{p}}(t) - \mathbf{g}_0)$$

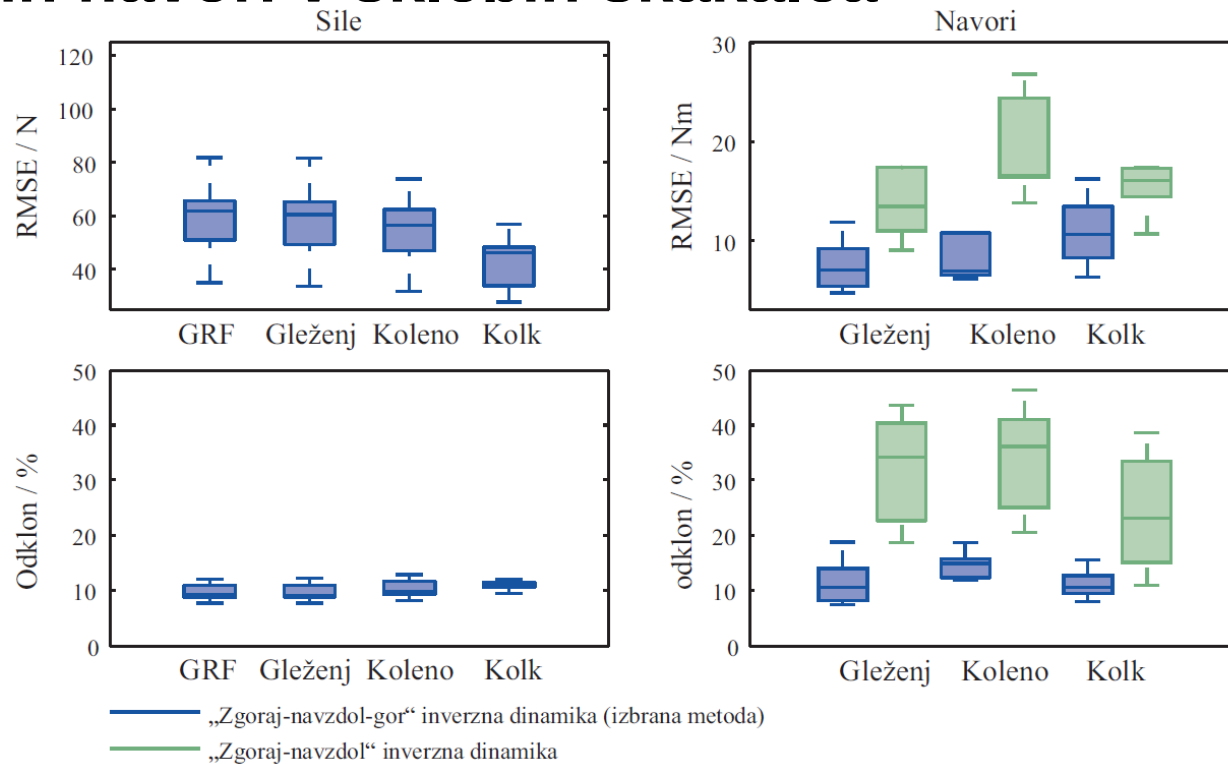
$$F_D = \frac{1}{2} A \rho_{\text{zrak}} C_D v^2$$

$$F_L = \frac{1}{2} S \rho_{\text{zrak}} C_L v^2$$





Sile in navori v sklepih skakalca

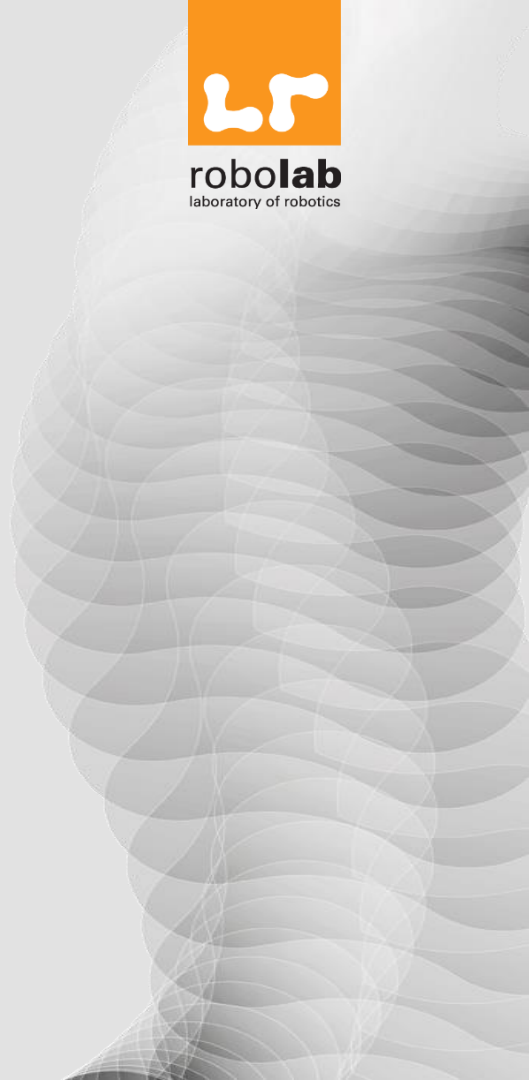




Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko



robolab****
laboratory of robotics





Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko



robolab****
laboratory of robotics