



Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko



robolab
laboratorij za robotiko

Tadej Beravs

Kalibracija pospeškometra in magnetometra z uporabo adaptivne metode

Doktorska disertacija

Mentor: prof. dr. Marko Munih

Ljubljana, maj 2014



Vsebina

- Uvod
- Cilji
- Vsebina disertacije
 - Merilni sistem
 - Adaptivna metoda kalibracije pospeškometra
 - Adaptivna metoda kalibracije magnetometra
 - Dvoosni kalibracijski manipulator
- Originalni prispevki disertacije



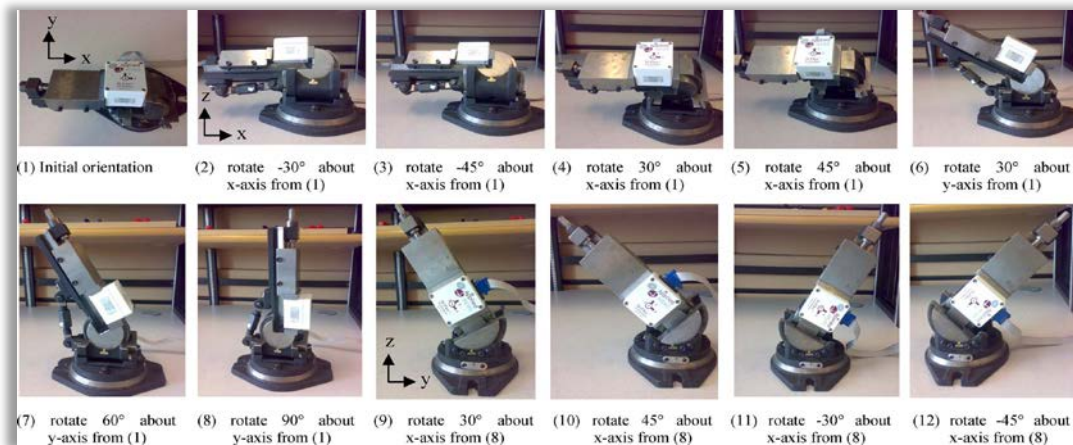
Uvod

- Določanje **orientacije ali pozicije tega telesa** v prostoru
 - optični senzorji
 - mehanski senzorji
 - inercialni senzorji
 - pospeškometer
 - magnetometer
 - žiroskop



Uvod

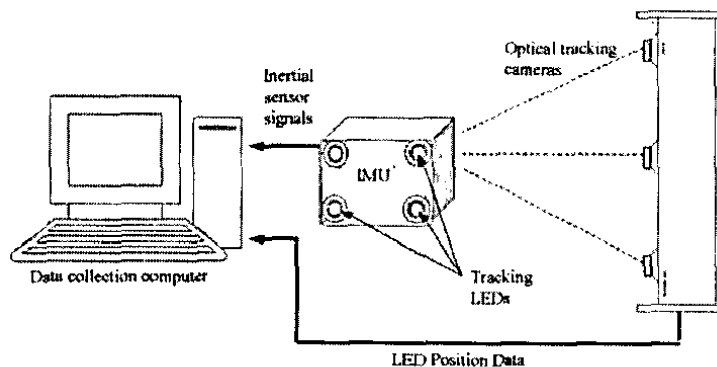
- MEMS tehnologije
 - manjše dimenzije
 - cenovna dostopnost
- Potrebna kalibracija senzorjev oz. merilnega sistema
 - Različni matematični in merilni pristopi



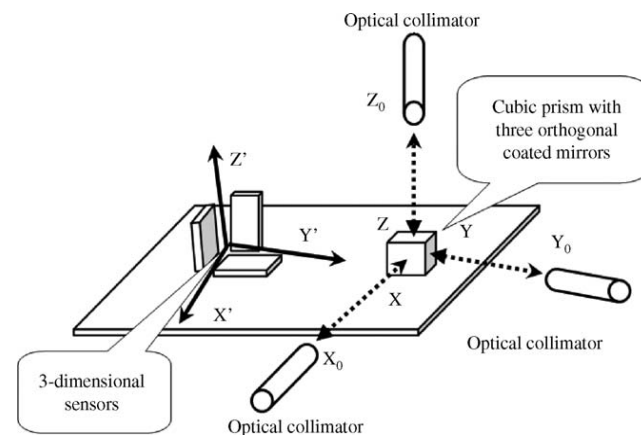
Won in
Golnaraghi,
University of
Waterloo

Uvod

- Kalibracija pospeškometra
 - z uporabo vibracijskih miz (kalibracija čez celotno merilno območje)
 - s postavljanjem pospeškometra v različne orientacije – referenca gravitacijsko polje



Kim in
Golnaraghi,
University of
Waterloo



Zhu in Zhou,
Tsinghua
University

Uvod

- Kalibracija pospeškometra
 - z višanjem števila različnih orientacij senzorja se zviša natančnost ocene senzorskih parametrov
 - uporaba manipulatorjev



Renk et al,
University of
Michigan

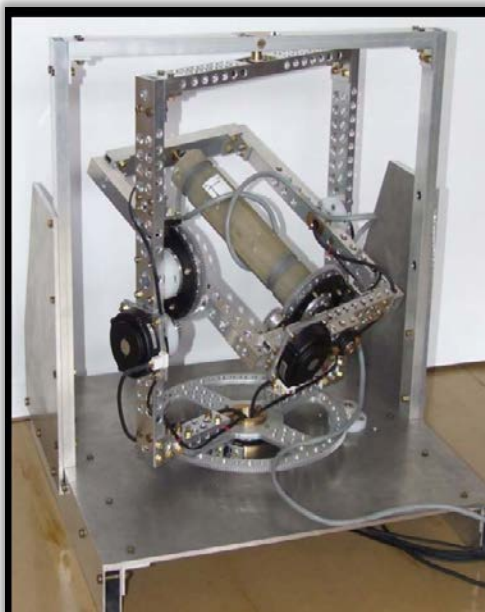


Kuga et al.,
INPE, Brazil

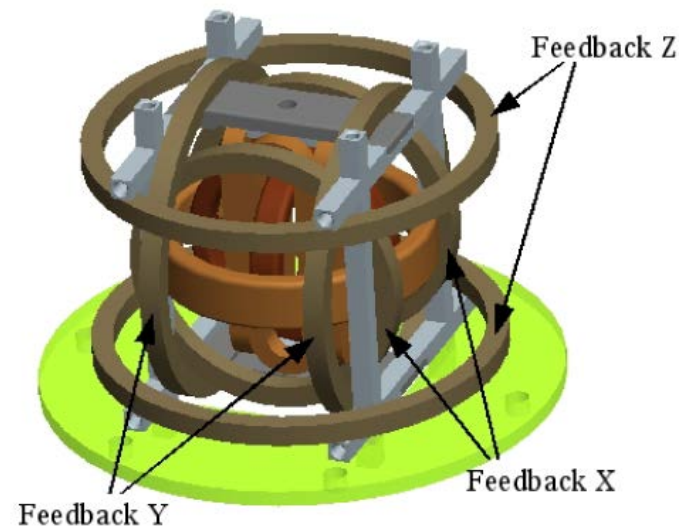
Uvod

- Kalibracija magnetometra
 - se uporablja podoben pristop kot pri kalibraciji pospeškometra
 - z uporabo namenskih manipulatorjev ali sistemov tuljav

Petrucha in
Kaspar,
University
in Prague



b)



Auster et al.,
Technischen
Universität
Braunschweig



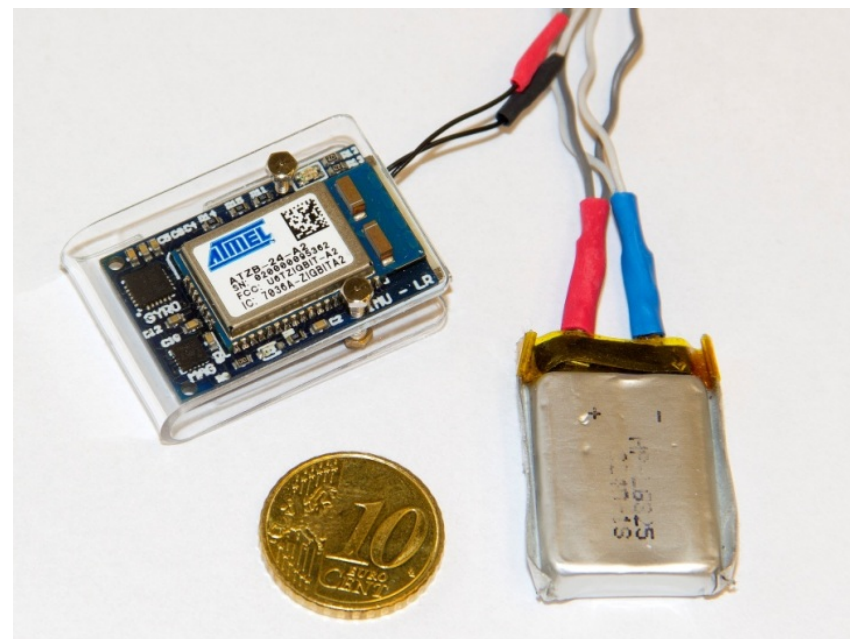
Cilji

- Izvedba brezžičnega merilnega sistema za določanje orientacije
 - komunikacijska enota s sinhroniziranim sprejemom večjega števila merilnih enot
 - brezžični protokol za pošiljanje senzornih podatkov
- Izvedba in evalvacija kalibracije pospeškometra s pomočjo šestosnega robota z uporabo adaptivne metode
 - primerjava z najpogosteje uporabljenimi metodami
- Izvedba in evalvacija kalibracije magnetometra s pomočjo 3D Helmholtz tuljave z uporabo adaptivne metode
- Načrtovanje in evalvacija dvoosnega kalibracijskega manipulatorja
 - združevanje obeh kalibracijskih metod



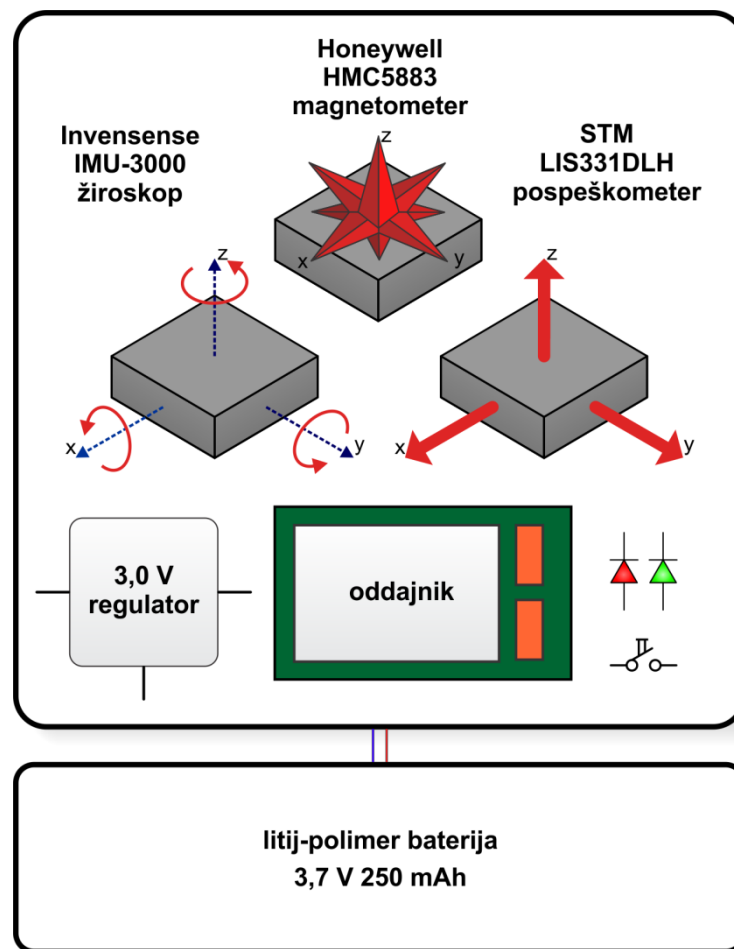
Merilni sistem

- Brezžična inercialna merilna enote (IME)
 - mere 30 mm x 20 mm
 - avtonomija 6 ur
 - obojestranska komunikacija
 - hranjenje kalibracijskih parametrov



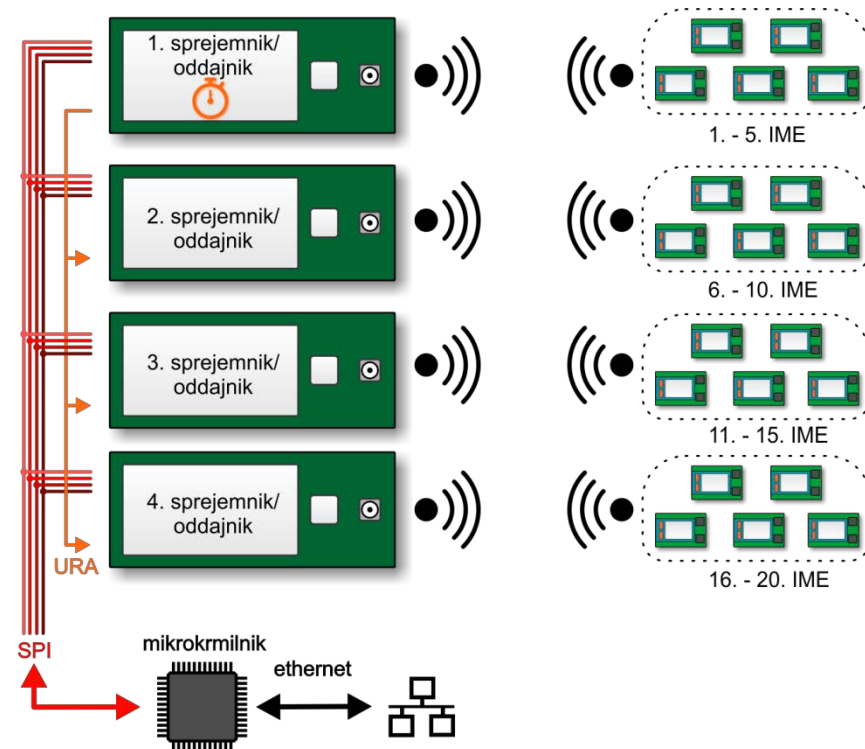
Merilni sistem

- Brezžična Inercialna merilna enote (IME)
 - sestavljena iz:
 - triosnega žiroskopa
 - triosnega pospeškometra
 - triosnega magnetometra
 - vzorčna frekvenca 100Hz
 - IEEE 802.15.4



Merilni sistem

- Komunikacijski del sestavljen iz štirih sprejemno/oddajnih delov
 - vsak sprejemno/oddajni del prenaša podatke iz **petih IME hkrati**
 - podatki se pošiljajo na osebni računalnik preko **omrežne povezave**



Kalibracija pospeškometra

- Za ocenitev parametra občutljivosti in odmika od ničle potrebujemo **najmanj šest** različnih orientacij senzorja (pri idealnih pogojih)
- Pri višjem številu parametrov se posledično potrebuje višje število orientacij
- Predlagana adaptivna metoda omogoča ocenitev parametrov z uporabo **minimalnega števila** različnih orientacij

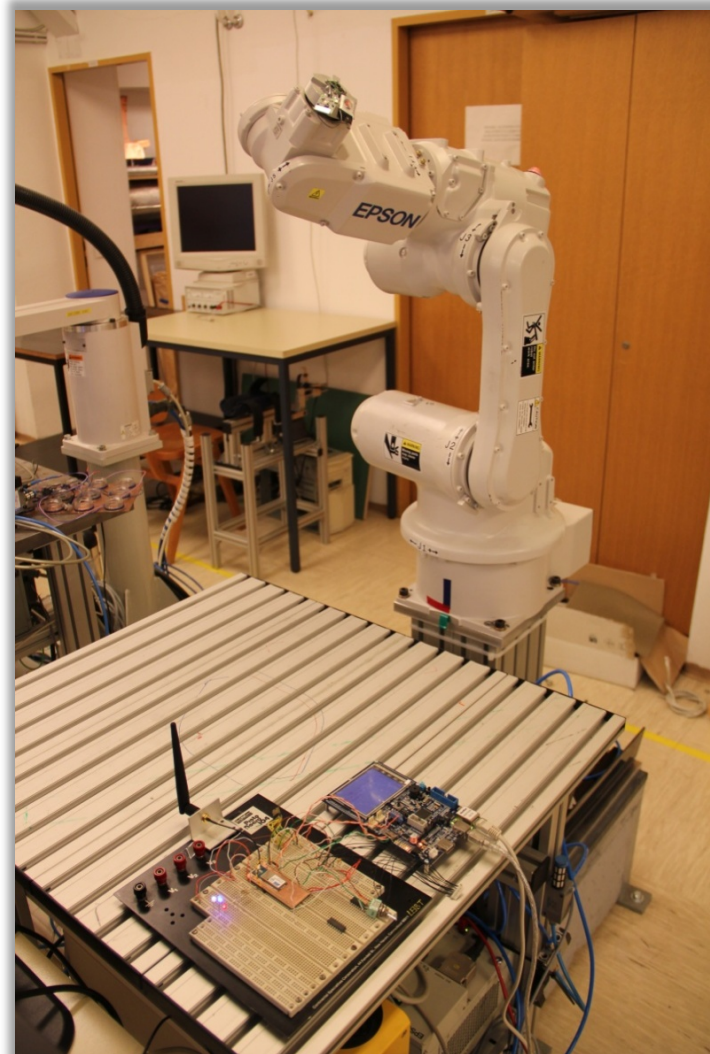


Kalibracija pospeškometra

- Ocena parametrov:
 - občutljivost s_x, s_y, s_z po osi x, y in z
 - odmik od ničle b_x, b_y, b_z po osi x, y in z
 - koti neporavnosti senzornih osi α, β, γ
 - kota neporavnosti vzbujačnega vektorja z bazo robota φ_x, φ_z
 - kota neporavnosti senzornega sistema z vrhom robota Φ_x, Φ_z

Metodologija

- IME postavljena na vrh robota
- z robotom lahko dosežemo vse orientacije za vzbujanje pospeškometra
- manj primeren za kalibracijo magnetometra



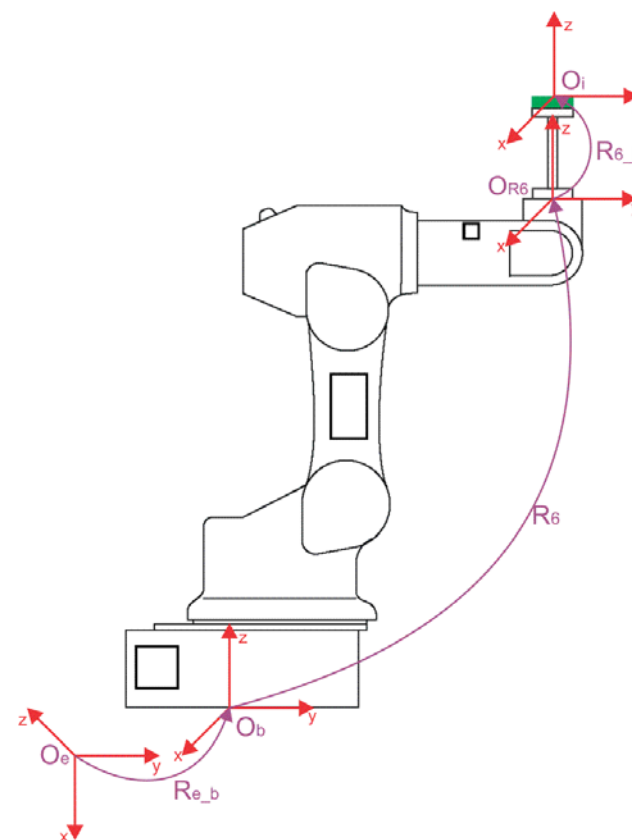
Matematični model

- Izhod senzorja pri upoštevanju parametrov občutljivosti, odmika od ničle ter neporavnosti senzornih osi

$$y = s \cdot T \cdot u + b + N$$

- Izhod z upoštevanjem transformacij vzbujačnega vektorja

$$y = s \cdot T \cdot R_{6_i}^{-1} \cdot R_6^{-1} \cdot R_{e_b}^{-1} \cdot m + b + N$$



Matematični model

- Senzorni parametri se sočasno ocenjujejo s pomočjo "Unscented" Kalmanovega filtra
 - izhod senzorja se primerja z matematičnim modelom

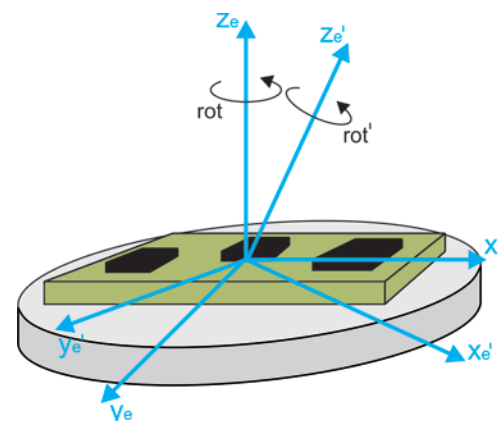
$$\begin{aligned}K_k &= P_{w_k} d_k P_{\tilde{d}_k}^{-1} \\ \hat{w}_k &= \hat{w}_{\bar{k}} + K_k (d_k - \hat{d}_{\bar{k}}) \\ P_{w_k} &= P_{\bar{w}_k} - K_k P_{\tilde{d}_k} K_k^T\end{aligned}$$

- S SVD dekompozicijo kovariančne podmatrike senzorskih parametrov določimo naslednjo orientacijo senzorja

$$SVD \left(P_{w_{par}} \right) = U \cdot \Sigma \cdot U^T$$

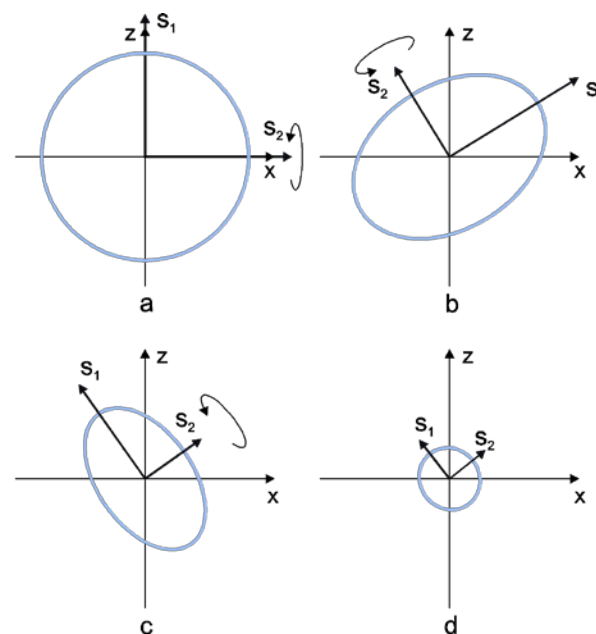
Določanje orientacije

- Vrednosti določene iz kovariančne matrike opisuje orientacijo, v kateri lahko dosežemo **največjo občutljivost senzornih parametrov**, ki ima največjo varianco
- Senzor **z robotom** premaknemo v izračunano orientacijo
- Dodamo **fiksno rotacijo** okrog izračunane osi



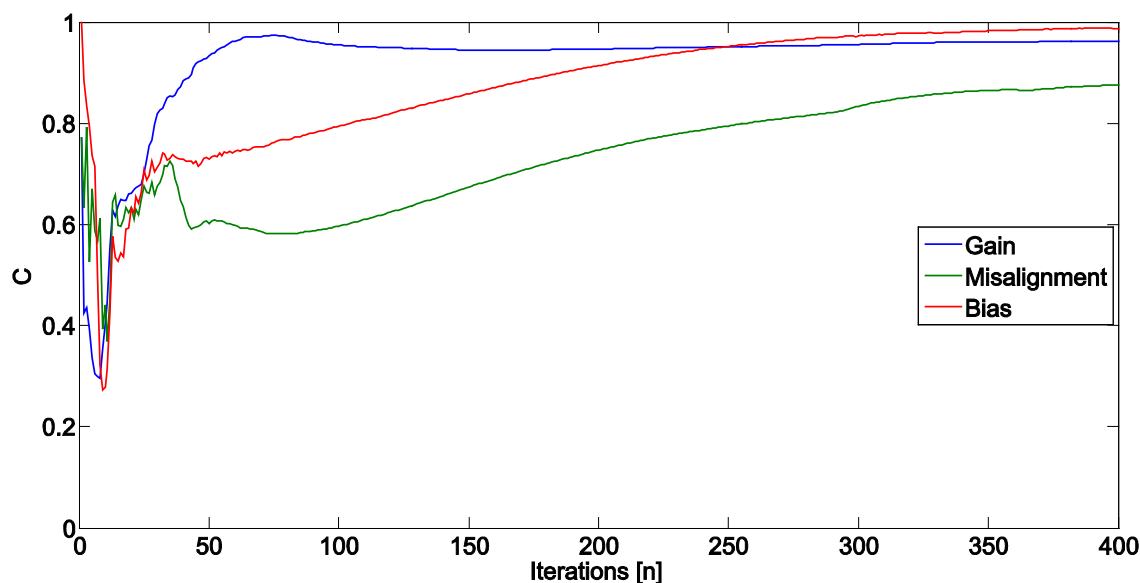
Določanje orientacije

- Postopek ponavljamo dokler se vrednosti varianc ne ustalijo
- Metoda omogoča kalibracijo senzorja z **minimalnim številom iteracij**
- Zajete podatke lahko uporabimo za oceno parametrov z drugimi matematičnimi metodami



Evalvacija adaptivne kalibracijske metode robo**lab** laboratorij za robotiko

- Z uporabo simulacije kalibracijske metode se primerja prednastavljene parametre z ocenjenimi vrednostmi in oceni napako
- S pomočjo kriterijske funkcije določimo najmanjše število iteracij

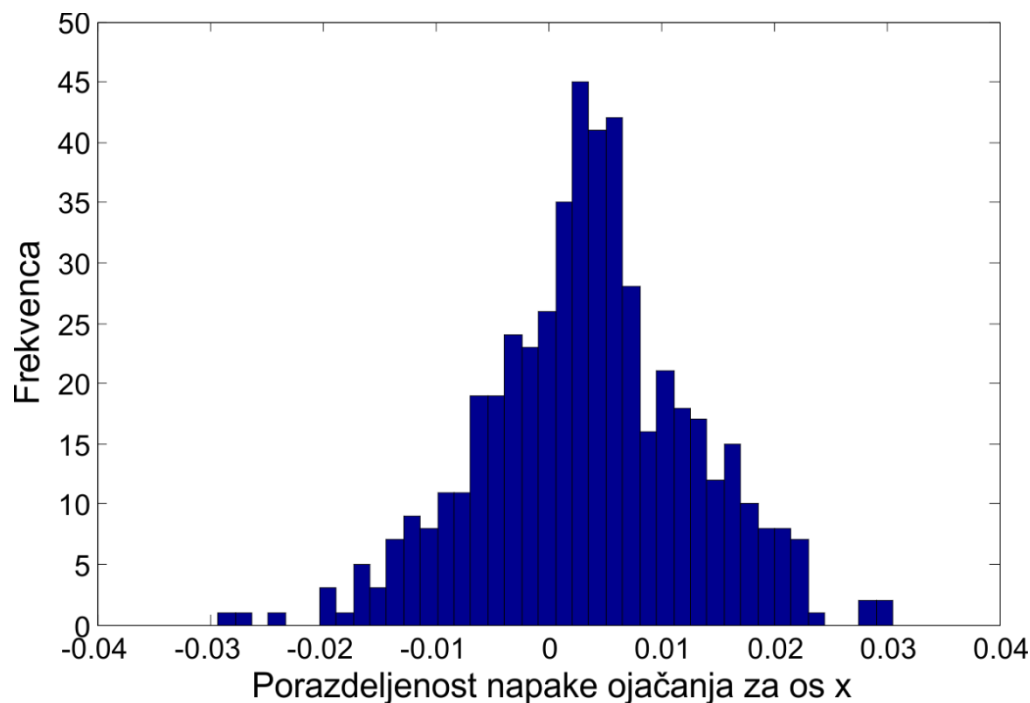


$$C_{par} = \frac{3 \cdot \sigma_3}{\sum_{i=1}^3 \sigma_i}$$



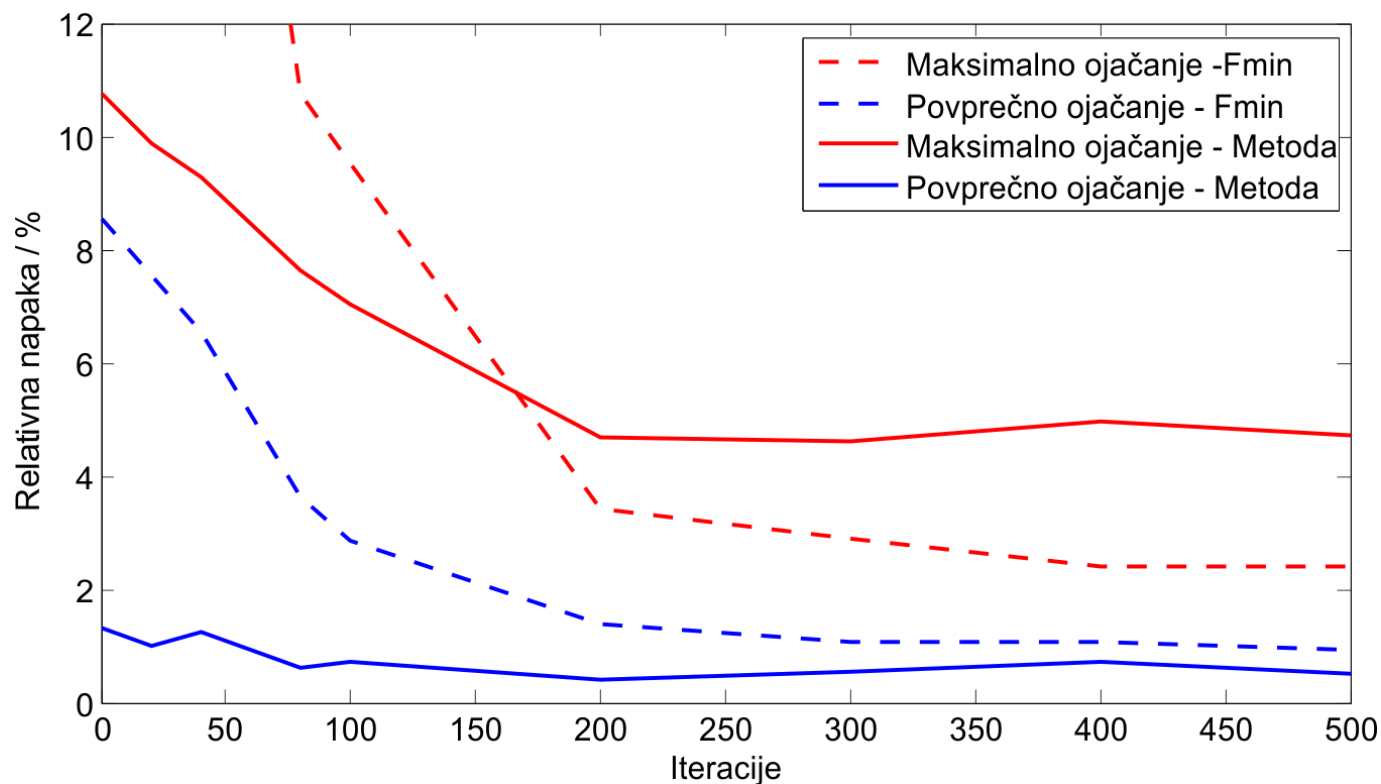
Evalvacija adaptivne kalibracijske metode robolab laboratorij za robotiko

- Z večjem številom simulacij in naključnim spreminjanjem prednastavljenih senzorskih parametrov (v ustreznem območju)
- Primer standardnega odklona parametra občutljivosti za OS X



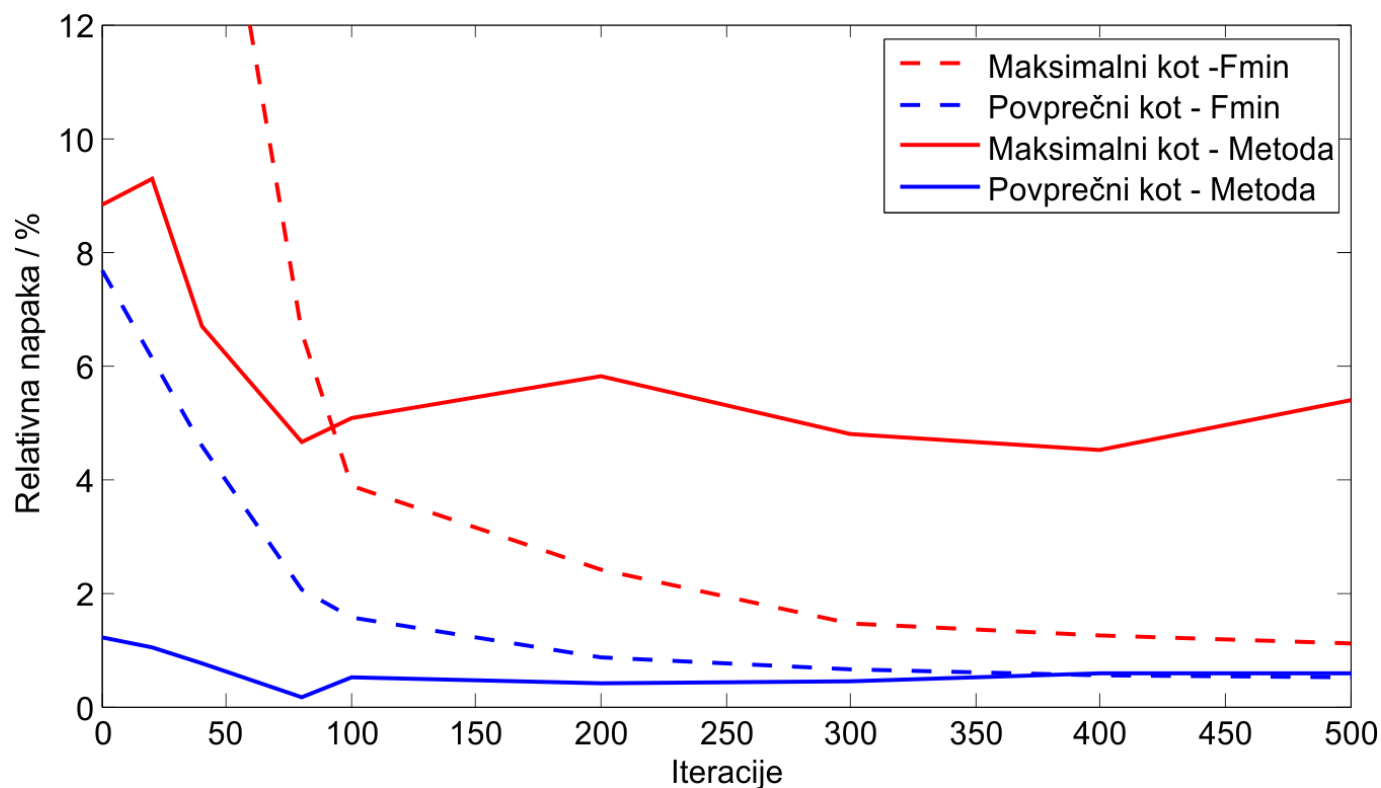
Primerjava metode

- Primerjava določanja parametrov občutljivosti z adaptivno metodo in metodo najmanjših kvadratov



Primerjava metode

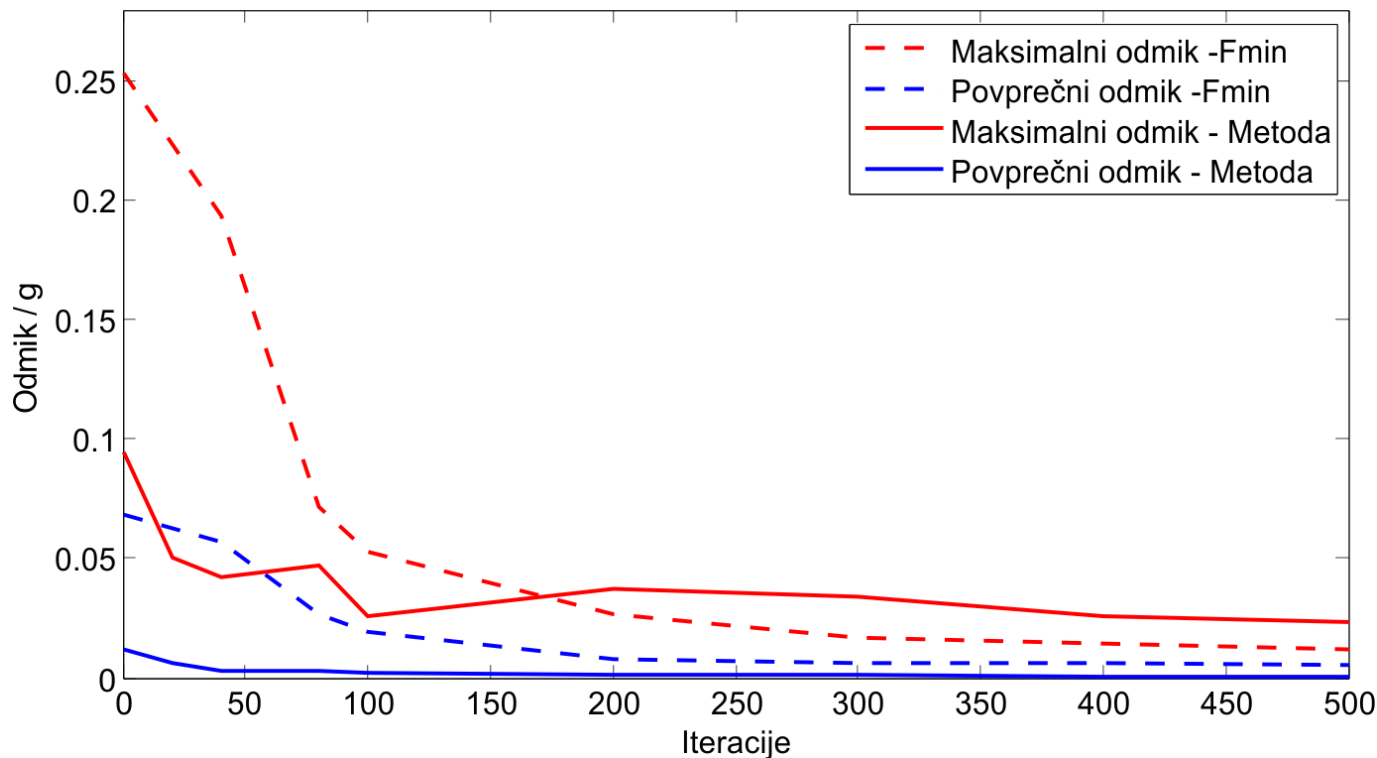
- Primerjava določanja parametrov kota nepravnanosti z adaptivno metodo in metodo najmanjših kvadratov





Primerjava metode

- Primerjava določanja parametrov odmika od ničle z adaptivno metodo in metodo najmanjših kvadratov





Ugotovitve

- Algoritem omogoča izračun orientacije senzorja, kjer so senzorne osi izpostavljene najvišji občutljivosti
 - hitrejša določanje senzornih parametrov
 - ni potrebne ročne izbire orientacij
- Višja natančnost ocenjevanja parametrov pri uporabi nižjega števila iteracij
 - pri višjem številu iteracij lahko z uporabo drugih metod dosežemo višjo natančnost
- Avtomatiziran pristop kalibracije

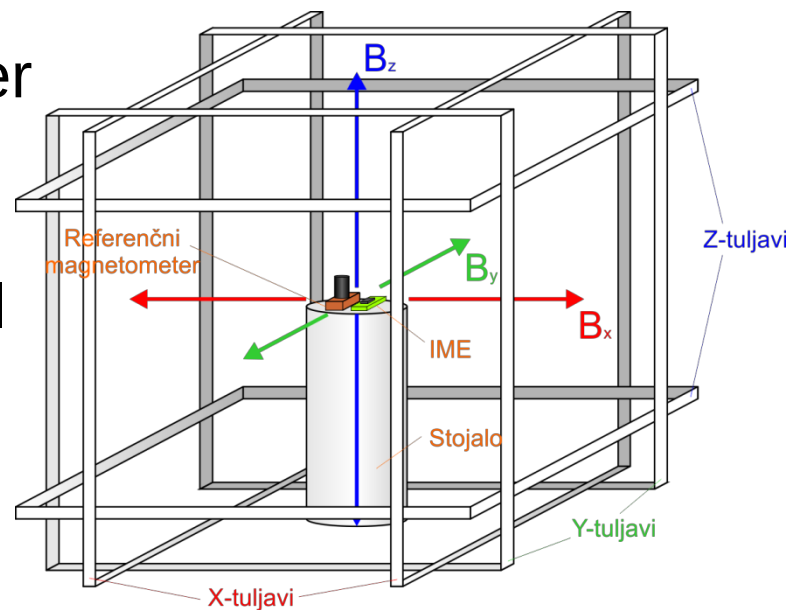


Kalibracija magnetometra

- Uporaba robota za kalibracijo magnetometra **ni primerna** zaradi popačenja magnetnega polja:
 - kovinski deli v vrhu robota
 - delovanja električnih motorjev
 - kovinske strukture v okolici robota (pri uporabi nemagnetnega podaljška)

Metodologija

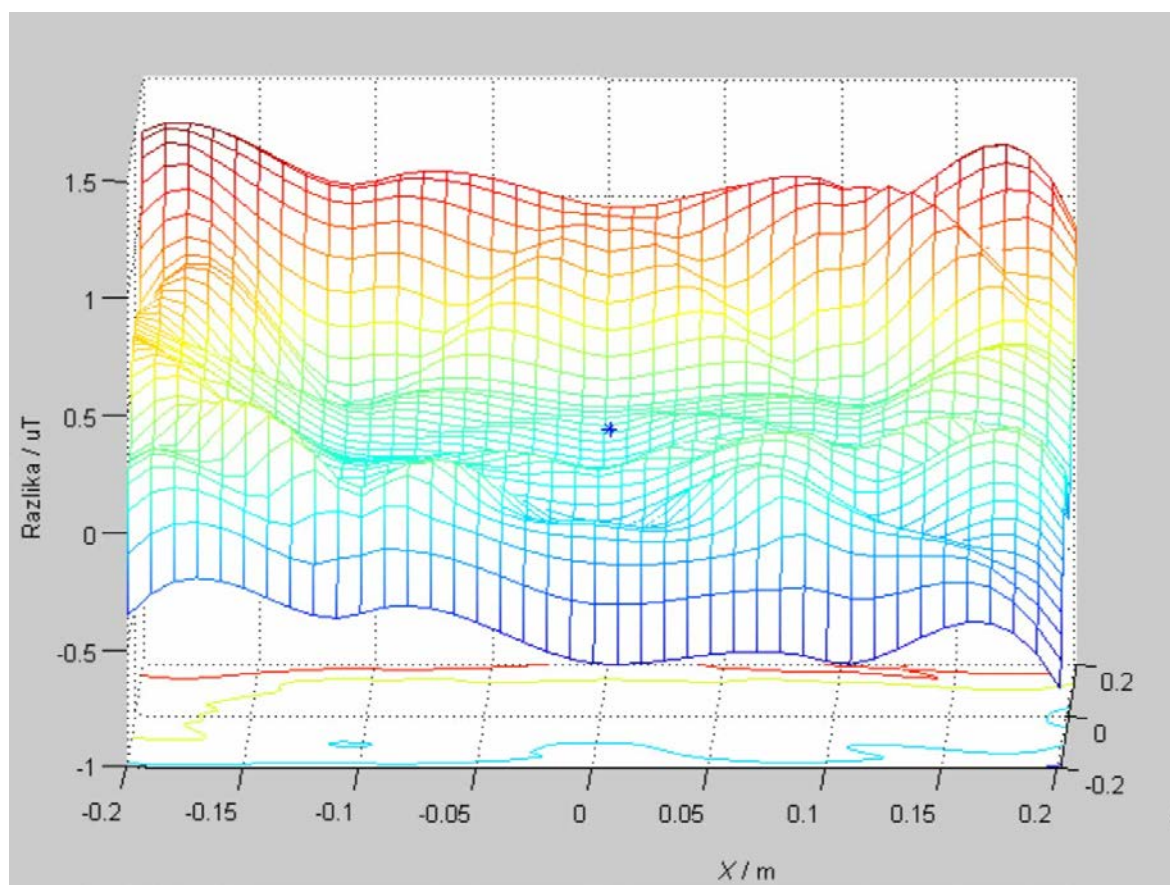
- Triosna Helmholtz tuljava
- Z **referenčnim magnetometrom** se kompenzira magnetno polje zemlje in nastavlja željeno smer magnetnega polja
- Modificiran matematični model magnetometra





Metodologija - homogenost tuljave

- V okolici 10 cm od središča manjša od 1 %





Metodologija

- Za oceno parametrov se uporablja enak algoritem kot pri kalibraciji pospeškometra
- Tokrat opazujemo **kovariančno matriko izhoda** magnetometra
- V smeri **največje variance** usmerimo magnetno polje
- Izvedemo **dodatno meritev** v nasprotni smeri magnetnega polja



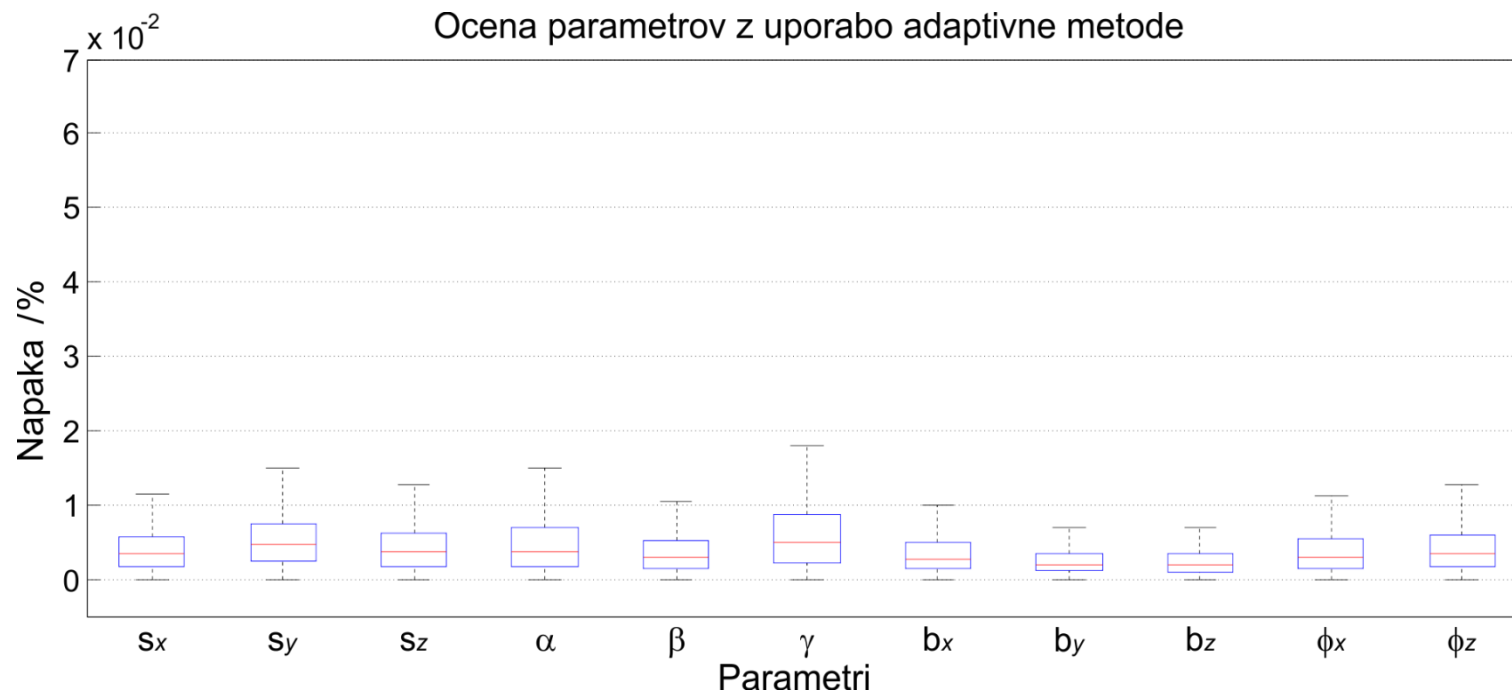
Evalvacija metode

- Z večjim številom simulacij, pri katerih naključno izbiramo senzorske parametre v omejenem območju
- Primerjamo dobljene rezultate med:
 - adaptivno kalibracijsko metodo
 - metodo z ročno nastavljenimi orientacijami
 - metodo z naključno izbranimi orientacijami



Evalvacija metode

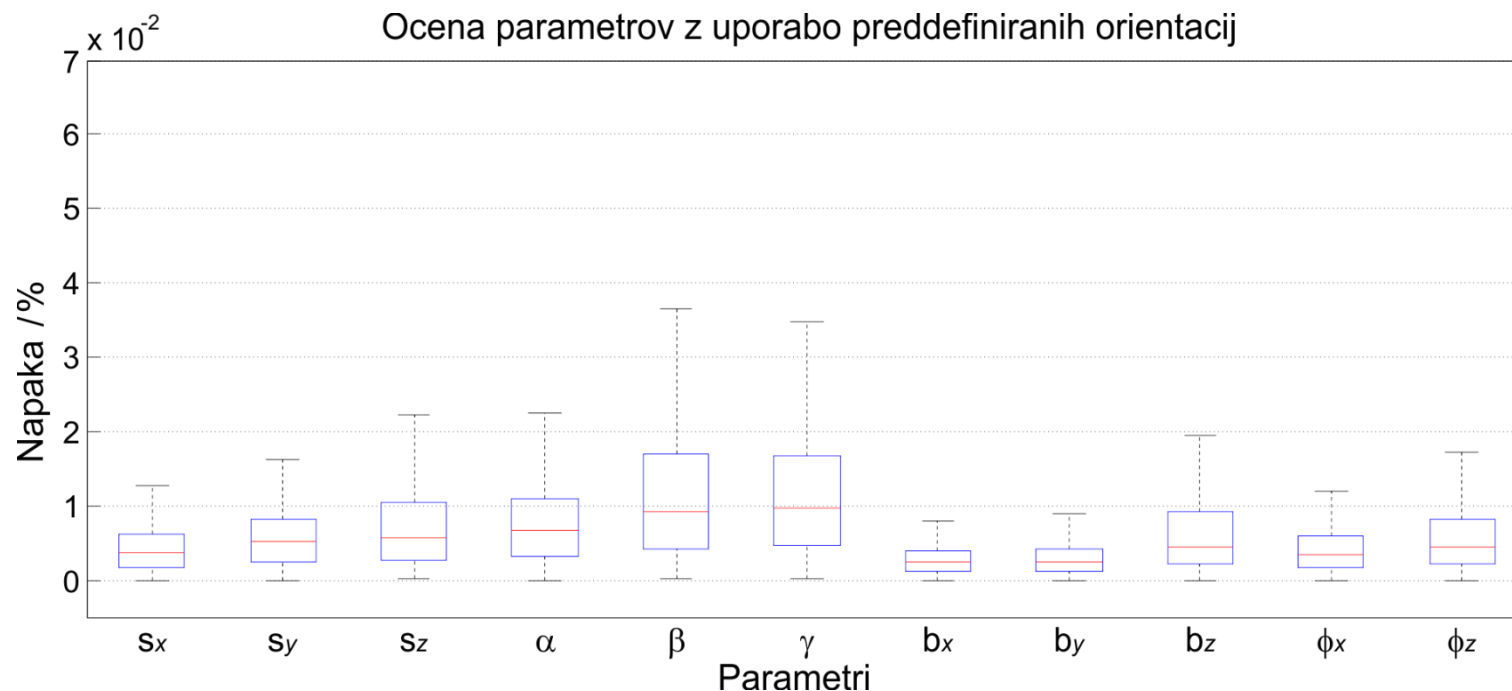
- Rezultati pridobljeni z uporabo adaptivne metode





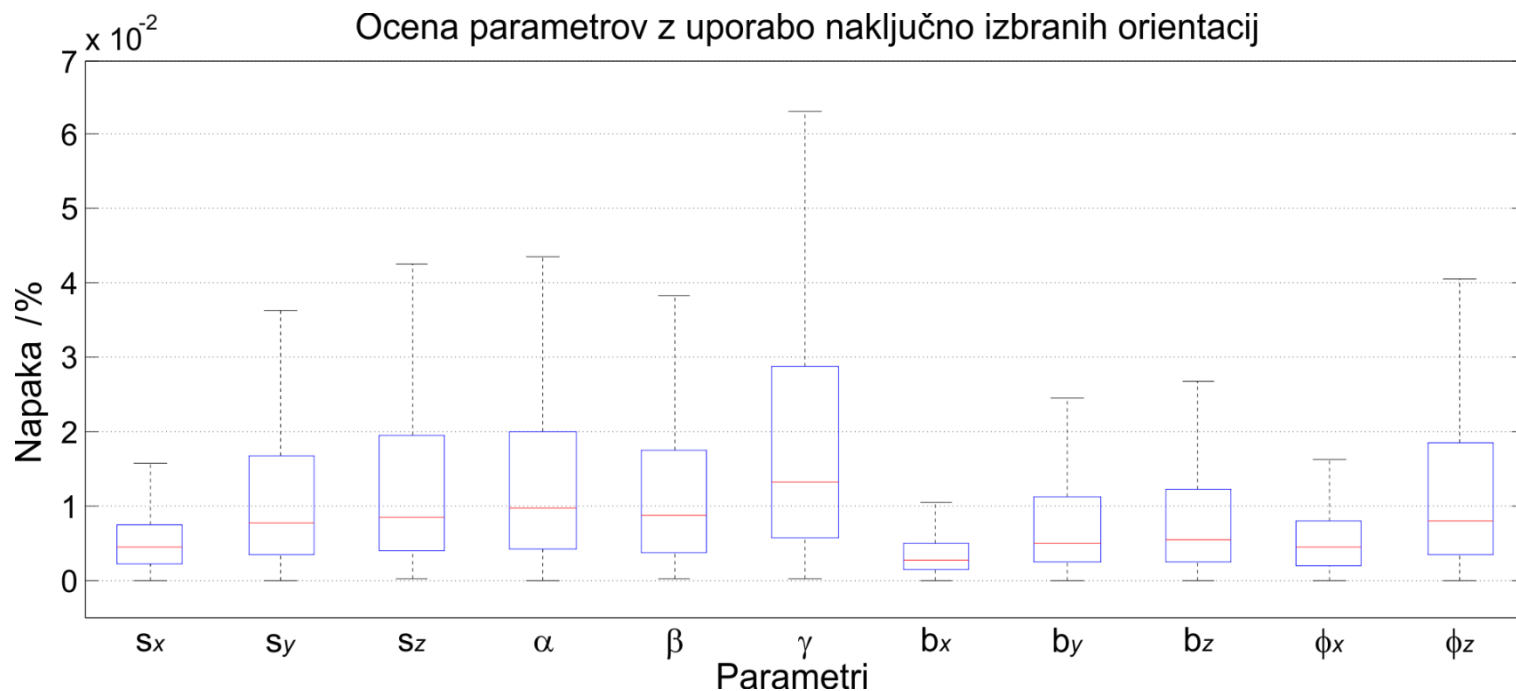
Evalvacija metode

- Rezultati pridobljeni z uporabo metode z ročno definiranimi orientacijami



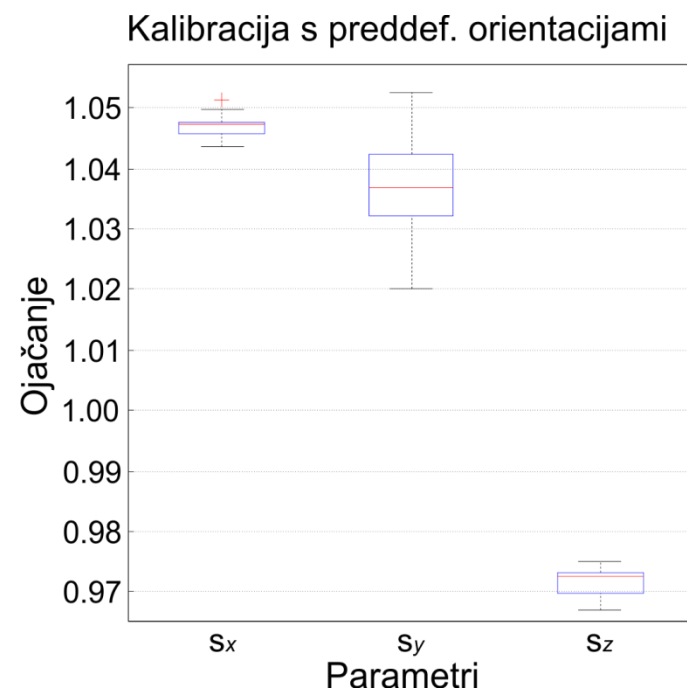
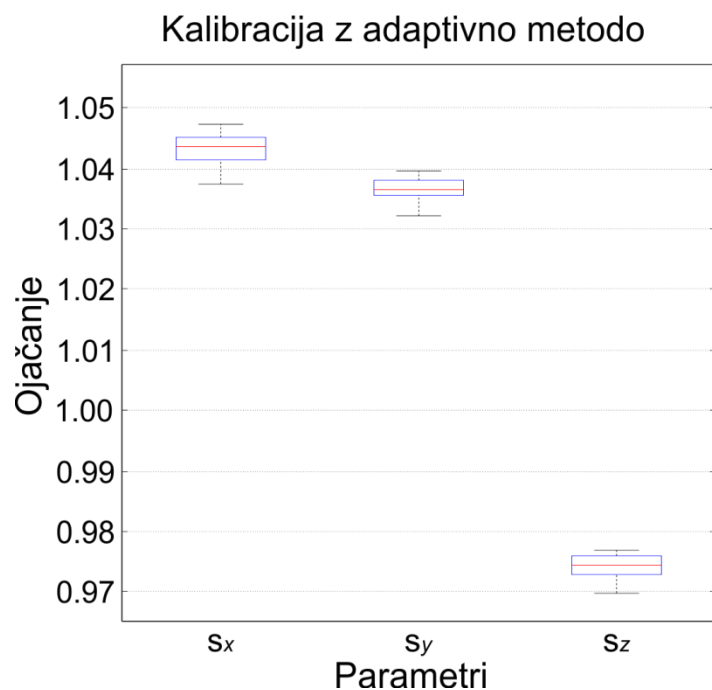
Evalvacija metode

- Rezultati pridobljeni z uporabo metode z naključno izbranimi orientacijami



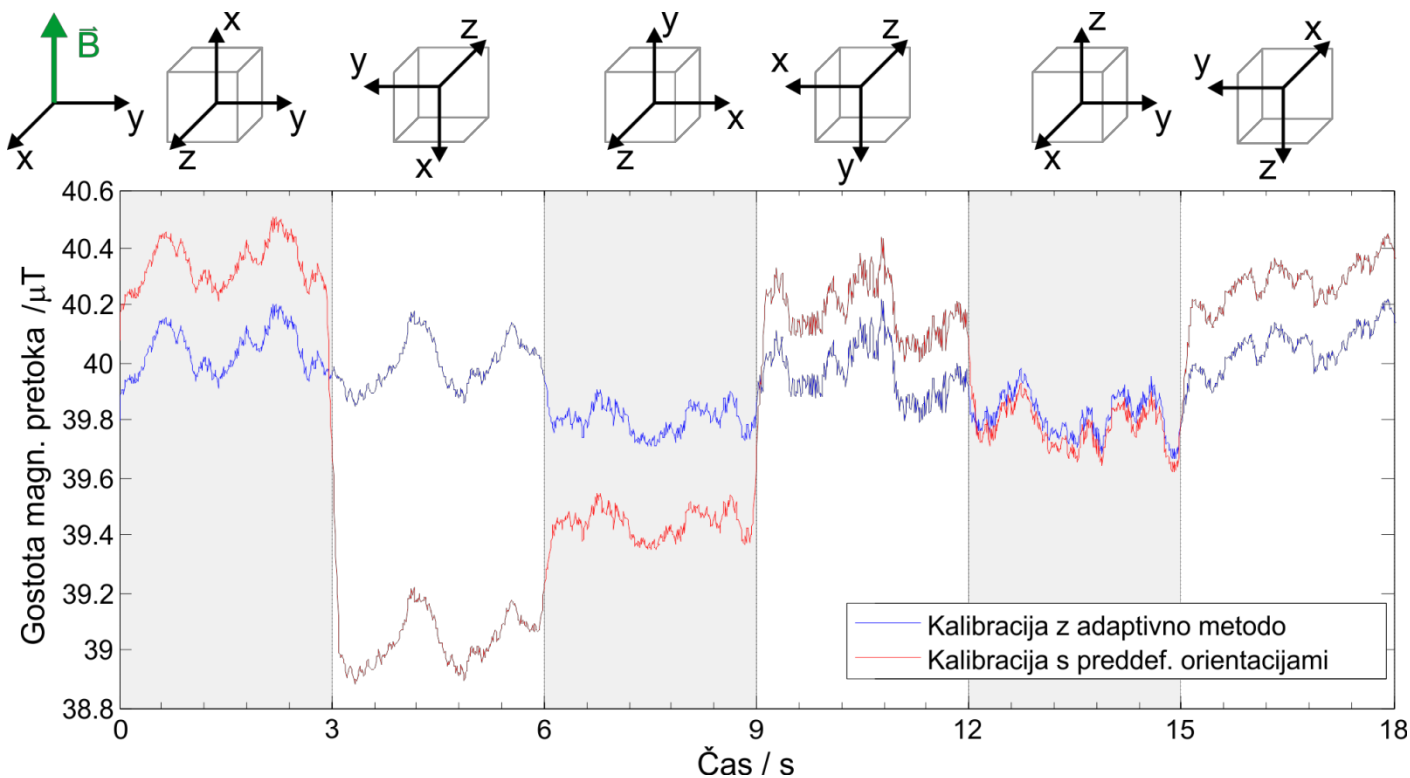
Rezultati meritev

- Primerjava med adaptivno metodo in metodo s predhodno določenimi orientacijami pri kalibraciji realnega magnetometra



Rezultati meritev

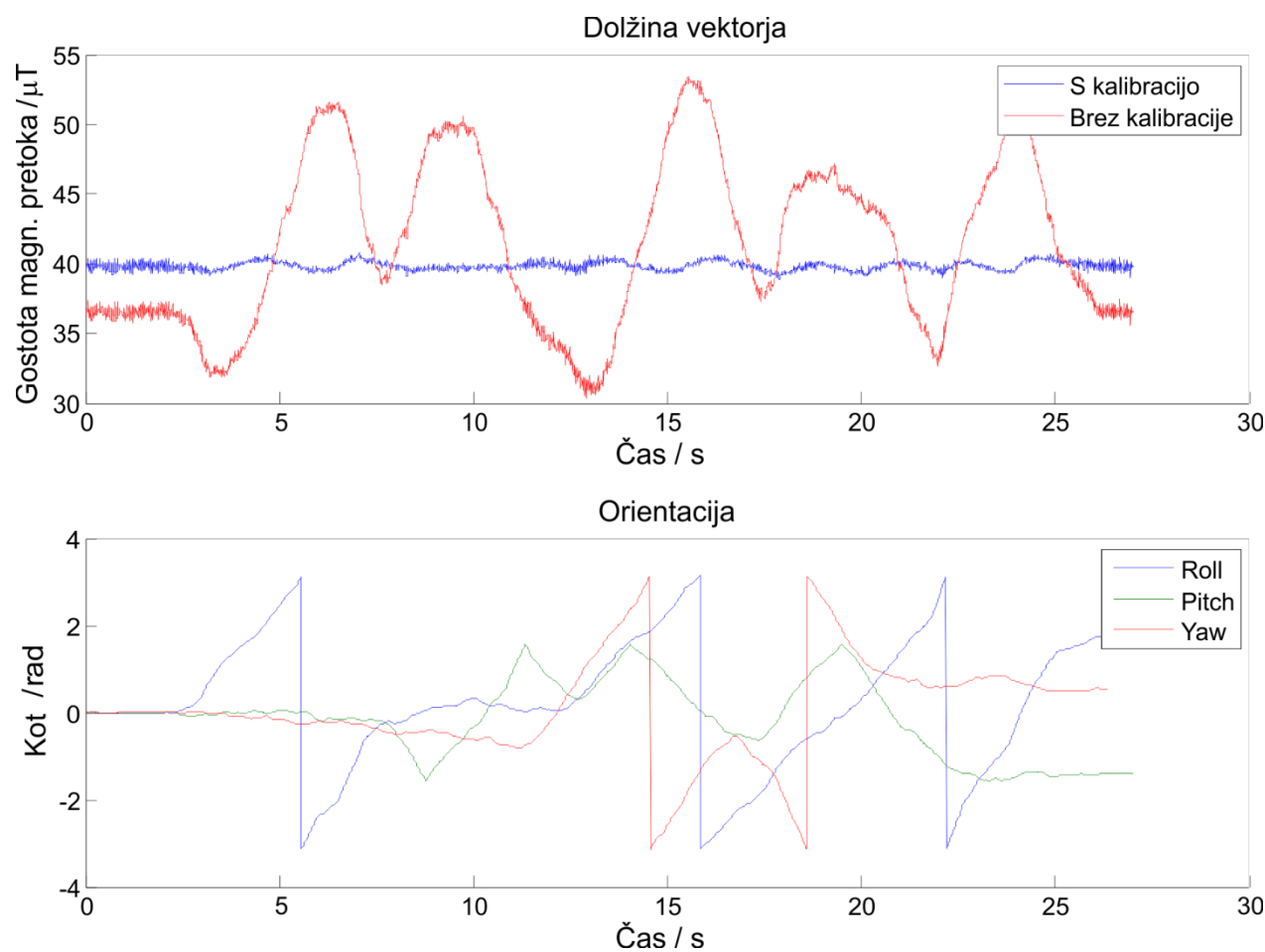
- Primerjava med adaptivno metodo in metodo s predhodno določenimi orientacijami pri kalibraciji realnega magnetometra





Rezultati meritev

- Primerjava nekalibriranim in kalibriranim magnetometrom





Ugotovitve

- Modificiran matematični algoritem omogoča še hitrejšo oceno parametrov
 - dovolj le **15 različnih orientacij**
- Kalibracijski sistem zagotavlja ustrezne pogoje med kalibracijo
 - 3D Helmholtz tuljava **omogoča kompenziranje** magnetnih motenj
 - omogoča kompenziranje magnetnega polja Zemlje
- Natančnejši rezultati z uporabo adaptivne metode
- Velika razpršenost nekalibriranih senzorskih parametrov zaradi dodanih elementov v okolici magnetometra

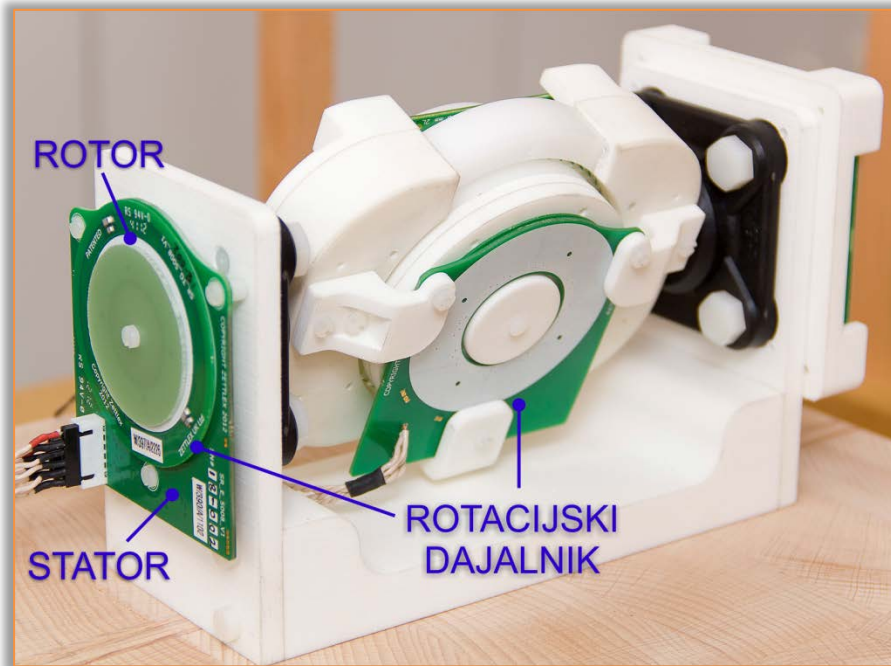
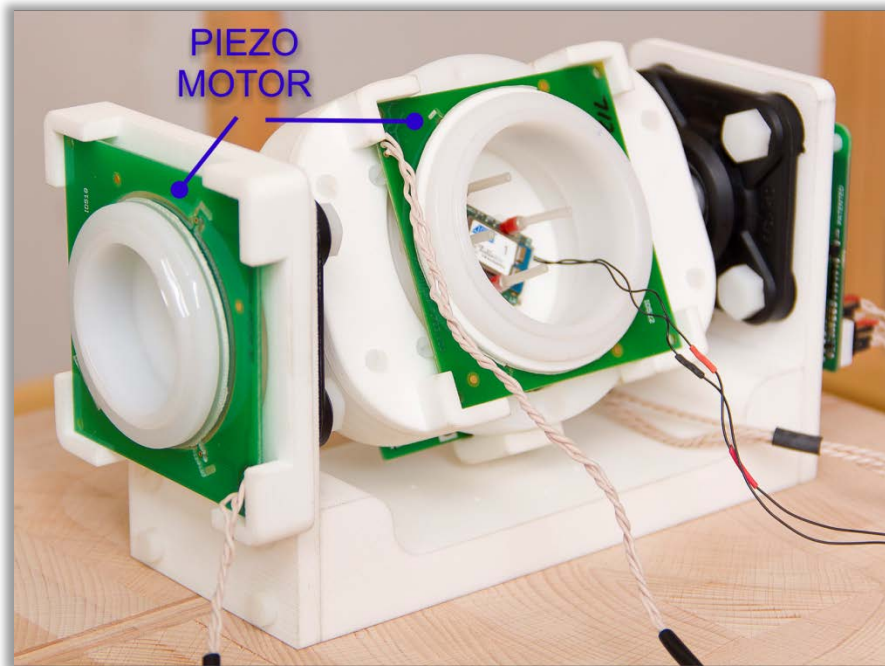


Dvoosni kalibracijski manipulator

- Zahteve:
 - uporaba **nemagnetnih** materialov oz. pogonov
 - brez uporabe **mehanskih prenosov**
 - **samozaporni** pogon
 - ločljivost pozicioniranja $< 0.02^\circ$

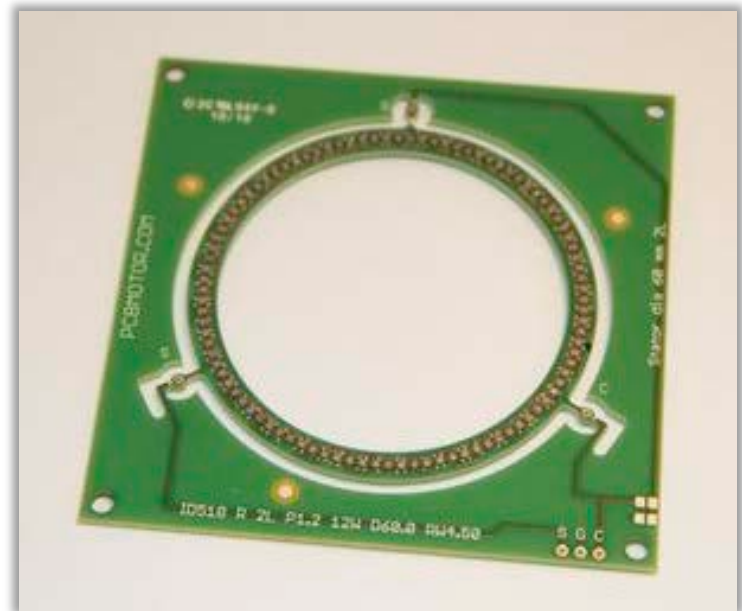
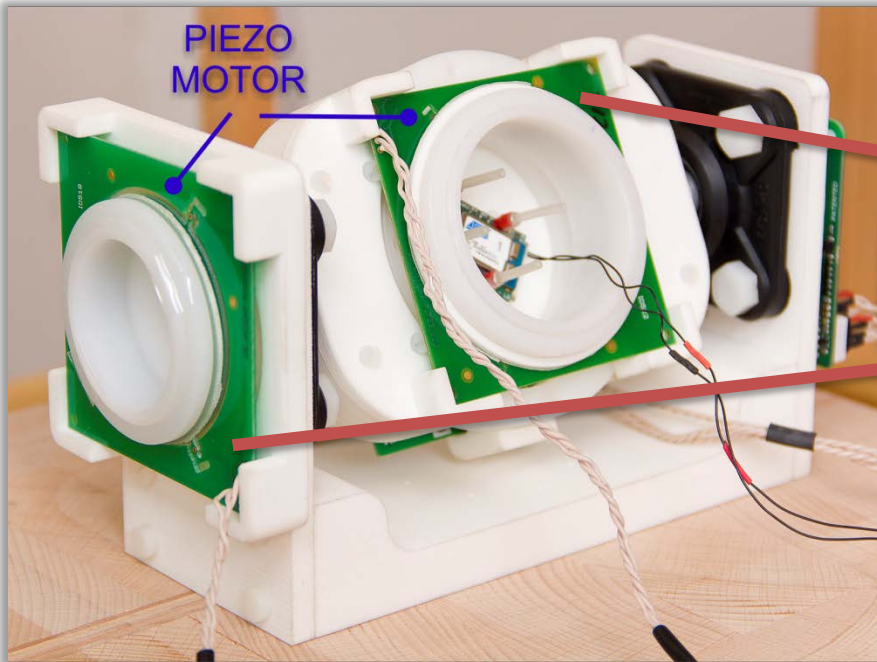
Dvoosni kalibracijski manipulator

- Sestava dvoosnega kalibracijskega manipulatorja



Dvoosni kalibracijski manipulator

- Piezo motor podjetja PCBMotor

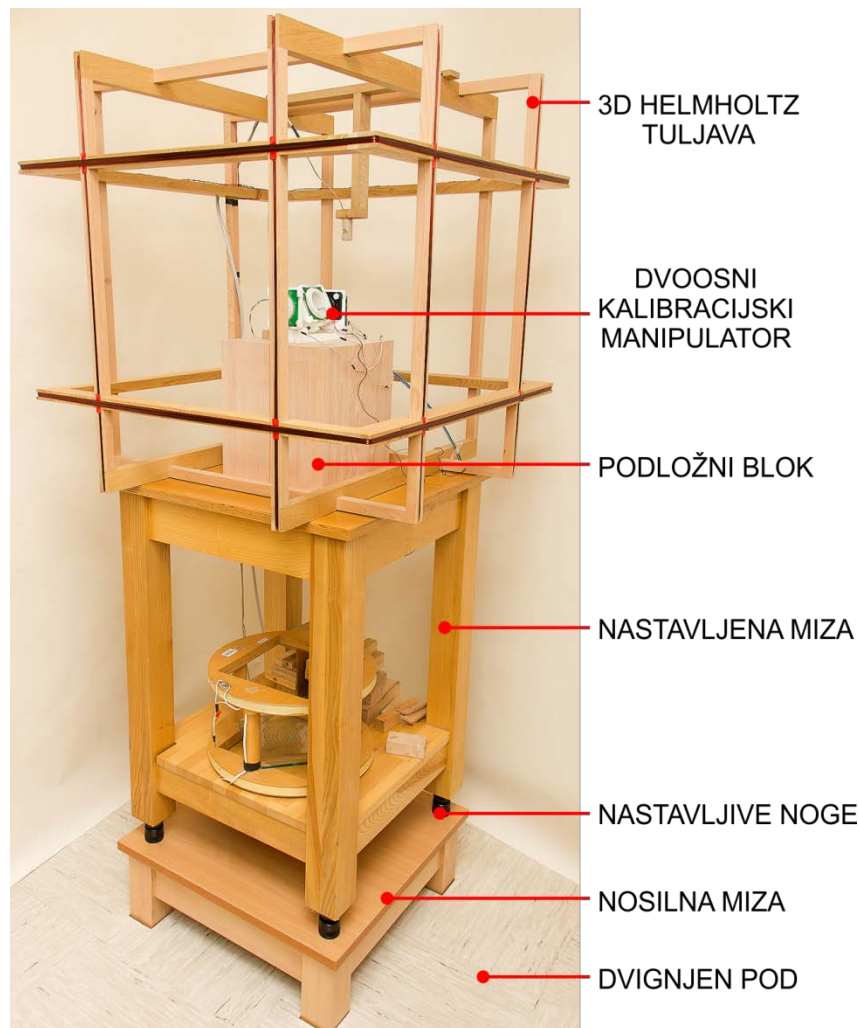


Dvoosni kalibracijski manipulator

- Postavitev kalibracijskega sistema

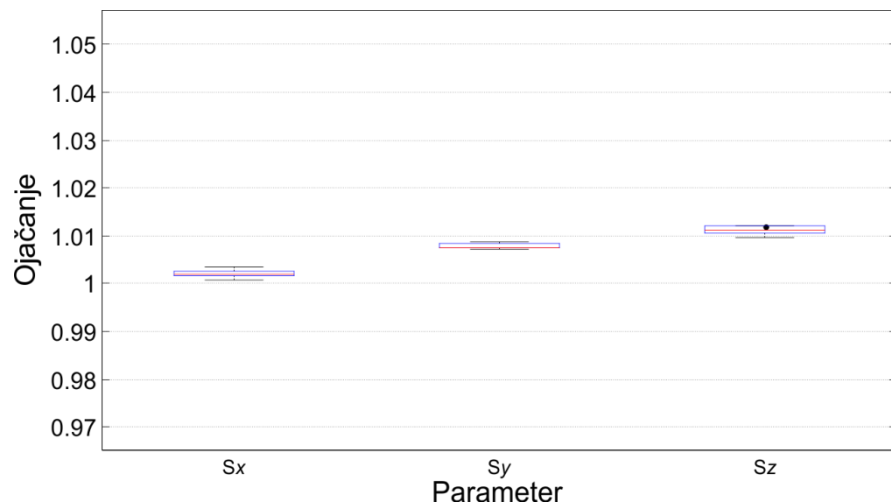


vodna tehtnica z ločljivostjo
 $0,0005^\circ$ na razdelek

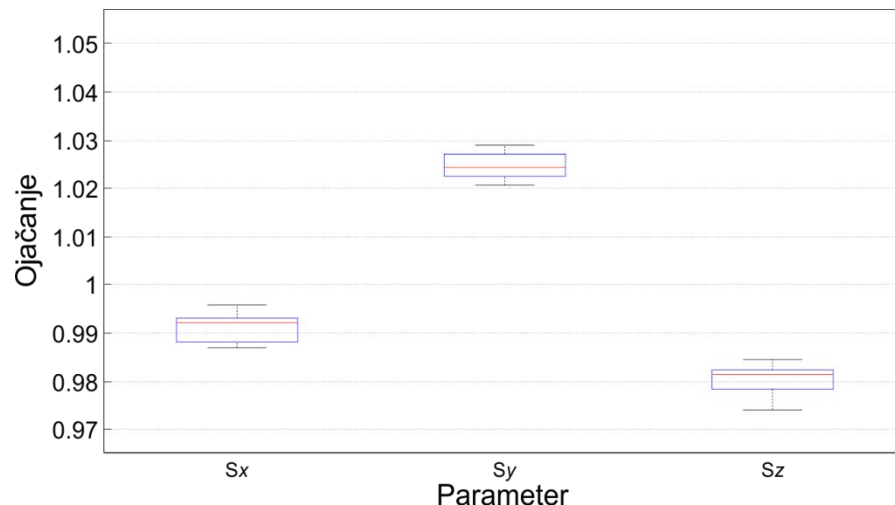


Evalvacija manipulatorja

- Z uporabo adaptivne kalibracijske metode
 - smer magnetnega polja poravnana z gravitacijskim poljem



pospeškometer

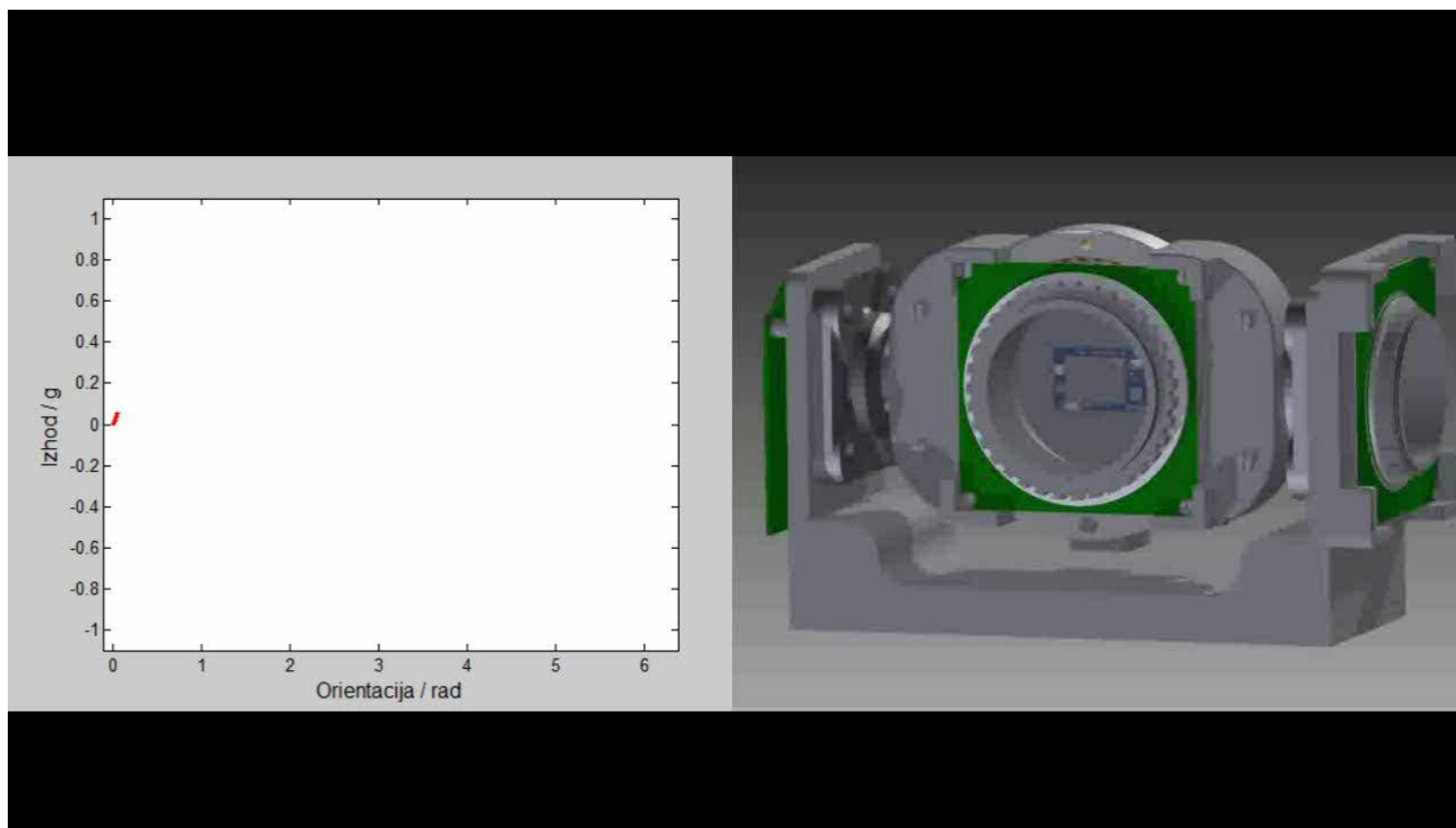


magnetometer



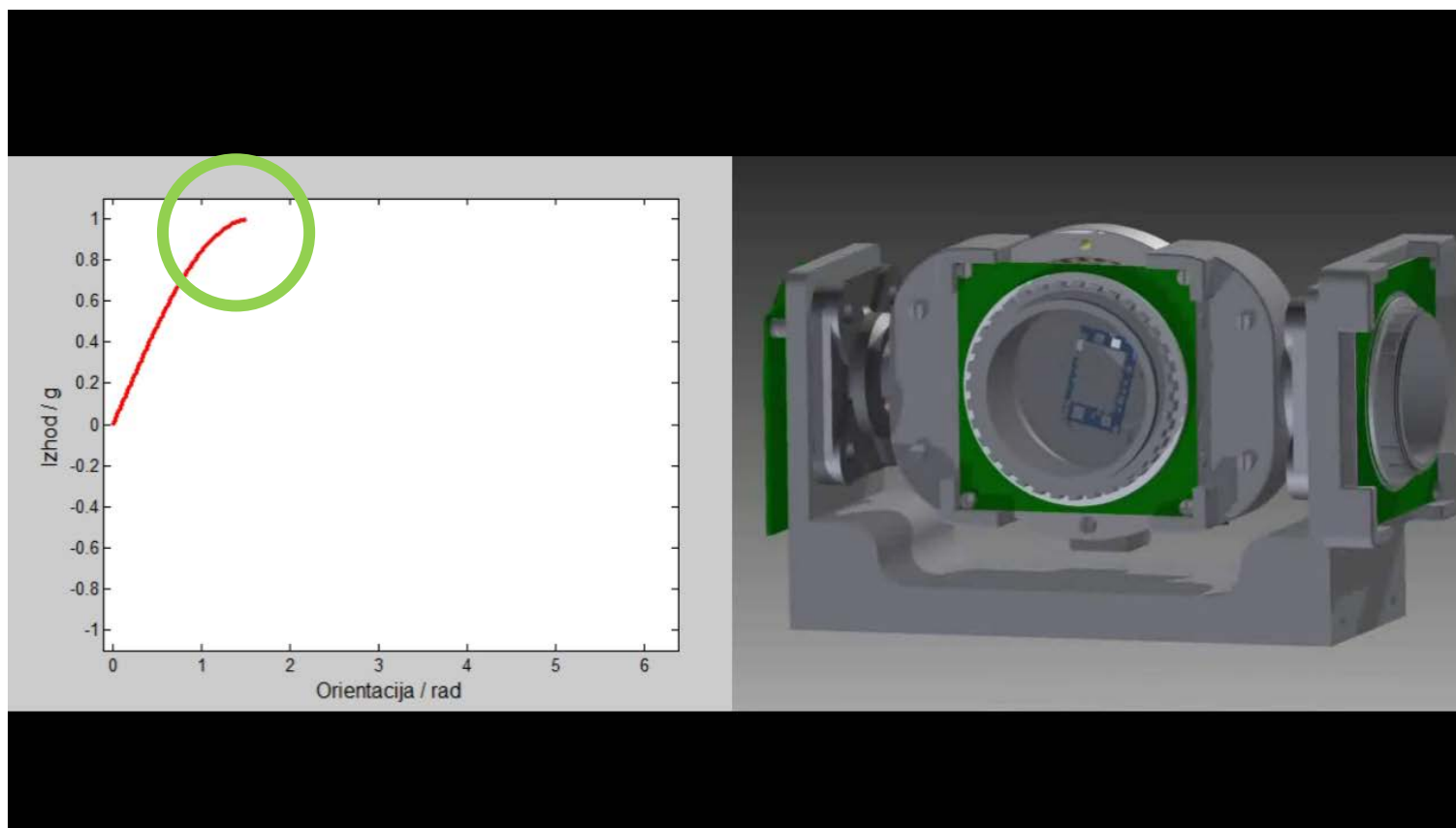
Evalvacija manipulatorja

- Določanje maksimuma z rotacijo okrog prve osi



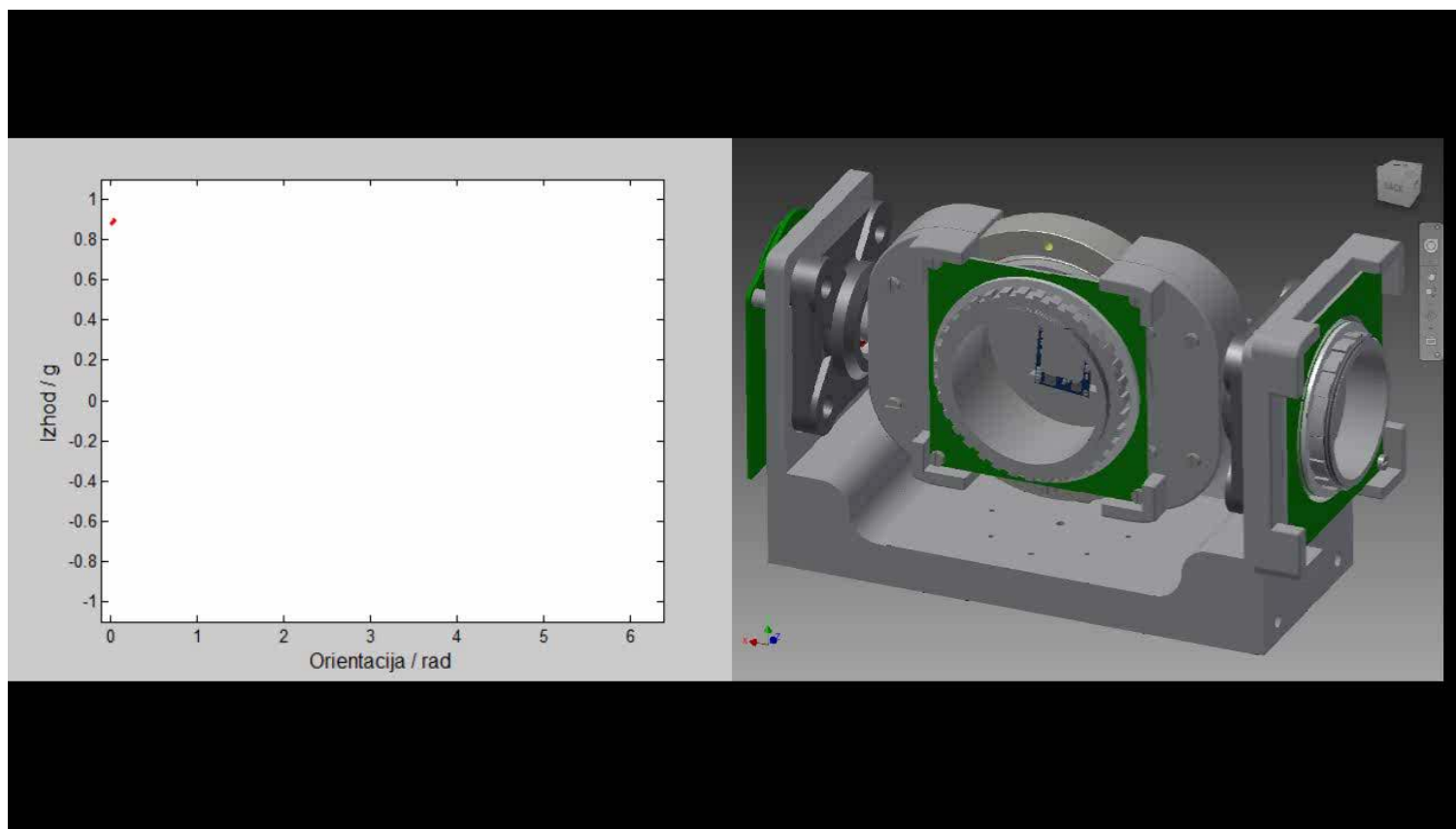
Evalvacija manipulatorja

- Določanje maksimuma z rotacijo okrog prve osi



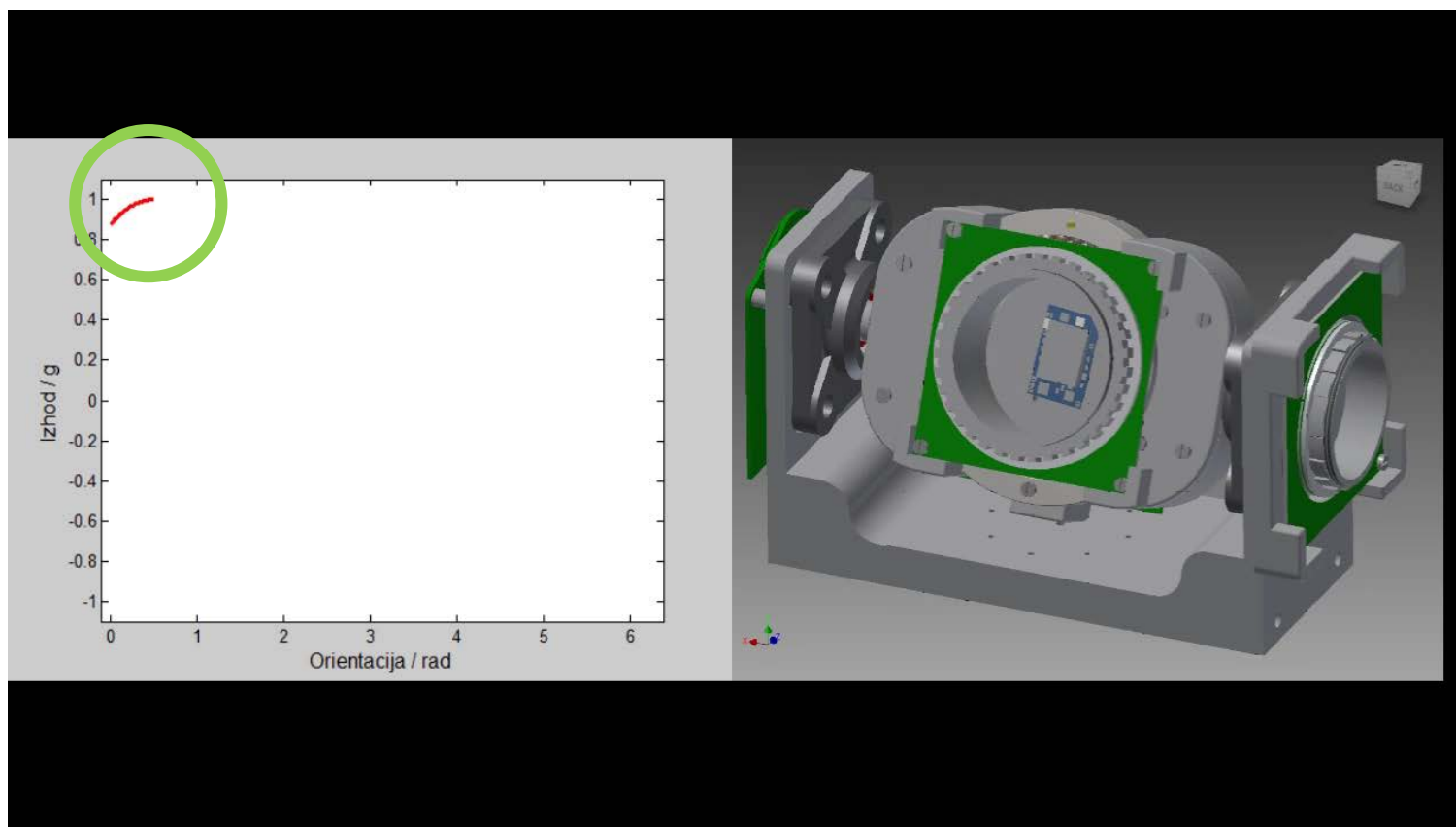
Evalvacija manipulatorja

- Določanje maksimuma z rotacijo okrog druge osi



Evalvacija manipulatorja

- Določanje maksimuma z rotacijo okrog druge osi



Evalvacija manipulatorja

- Rezultati pridobljeni z merjenjem oz. določanjem maksimuma

pospeškometer								
	s	σ_s	$b [g]$	σ_b	$\theta [^\circ]$	σ_θ	$\vartheta [^\circ]$	σ_ϑ
os x	0,9978	0,0004	0,0019	0,0002	0,1948	0,0105	-0,1184	0,0113
os y	1,0080	0,0003	0,0010	0,0004	-0,1829	0,0083	-0,0613	0,0102
os z	1,0100	0,0003	0,0296	0,0008	0,4502	0,0121	-0,4656	0,0131
magnetometer								
	s	σ_b	$b [\mu T]$	σ_b	$\theta [^\circ]$	σ_θ	$\vartheta [^\circ]$	σ_ϑ
os x	0,9908	0,0004	1,0048	0,0007	0,2655	0,0458	0,1463	0,0379
os y	1,0230	0,0004	-7,4480	0,0010	0,2952	0,0712	-0,8505	0,0592
os z	0,9765	0,0004	1,9812	0,0010	-0,5214	0,0832	-0,0450	0,0627



Ugotovitve

- S Helmholtz tuljavo ustvarimo **konstantno polje** v isti smeri, kompenziramo zunanje motnje
 - stabilnejše magnetno polje
- Umerjen sistem pripomore k **višji točnosti** določanja senzorskih parametrov
 - znana negotovost poravnave manipulatorja
- Možno merjenje senzorskih parametrov z določanjem maksimuma
 - natančen vendar dolgotrajen postopek



Originalni prispevki disertacije

- Metoda kalibracije triosnega pospeškometra z adaptivnim pristopom s pomočjo šestosnega robota
- Primerjava z najpogostejše uporabljeno metod vsote najmanjših kvadratov z adaptivno kalibracijsko metodo pri kalibraciji pospeškometra s pomočjo šestosnega robota
- Kalibracija triosnega magnetometra v triosni Helmholtz tuljavi s predlagano adaptivno metodo
- Združitev obeh metod in kalibracija pospeškometra in magnetometra hkrati z uporabo namenskega dvoosnega manipulatorja in triosne Helmholtz tuljave



Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko



robolab
laboratorij za robotiko

Hvala za pozornost!



Validacija z merilno kocko

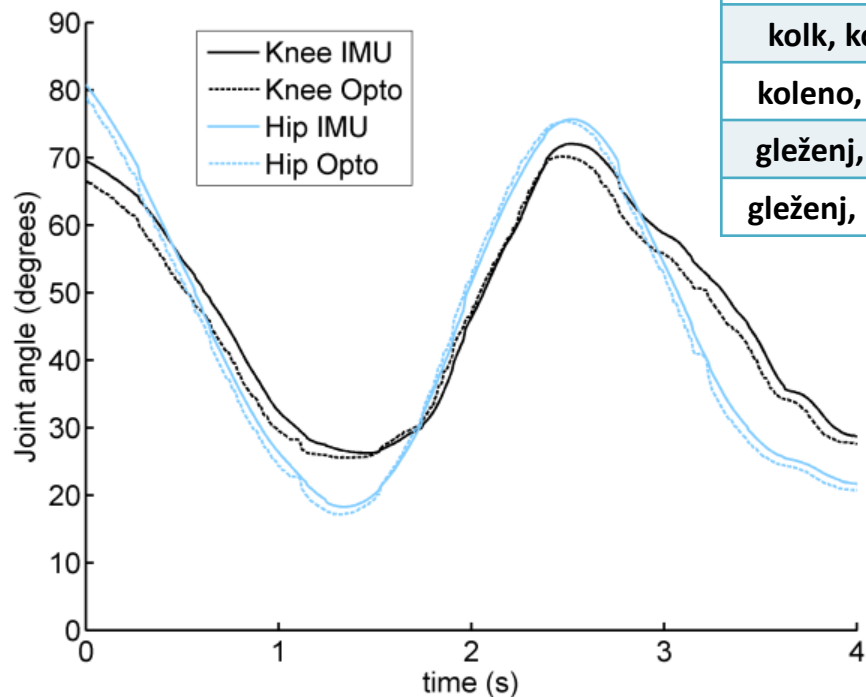
- Šest poskusov pri različnih hitrostih od $8^\circ/\text{s}$ do $50^\circ/\text{s}$
- Referenčno merjenje s sistemom Optotrak Certus
- Unscented Kalman filter



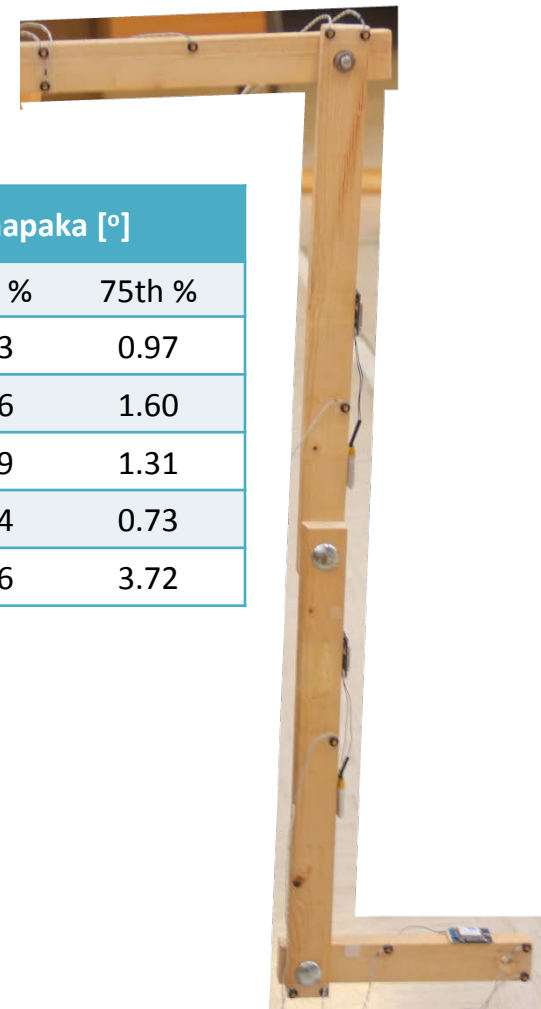
hitrost	Absolutna napaka [$^\circ$]		
	mediana	25th %	75th %
nizka	0.74	0.29	1.52
zmerna	0.80	0.19	1.86
visoka	1.10	0.38	2.28



Validacija z imitacijo noge



kot v sklepu	absolutna napaka [°]		
	mediana	25th %	75th %
kolk, sagitalni	0.38	0.03	0.97
kolk, koronalni	0.43	0.06	1.60
koleni, sagitalni	0.53	0.09	1.31
gleženj, sagitalni	0.38	0.14	0.73
gleženj, koronalni	1.11	0.16	3.72





Validacija z človeško nogo

kot v sklepu	absolutna napaka [°]		
	mediana	25th %	75th %
kolk, sagitalni	2.29	1.13	4.01
kolk, koronalni	2.86	0.99	6.65
koleno, sagitalni	1.75	0.88	3.09
gleženj, sagitalni	4.04	1.68	7.64
gleženj, koronalni	5.00	1.99	8.43

