

Neholonomsko robotsko breme

Peter Cafuta, Boris Curk

Univerza v Mariboru, FERI

E-pošta: peter.cafuta@uni-mb.si, boris.curk@uni-mb.si

Povzetek. V prispevku poročamo o zaključkih raziskovalnega dela, ki obravnava dinamiko neholonomskega žiroskopskega robotskega bremena. Predstavljeni so model in njegove lastnosti, ki omogočajo redukcijo aktivacije na samo eno prostostno stopnjo. Na podlagi kinematičnih in dinamičnih neholonomskih omejitev je predstavljen potreben navor vodenja. Opisani so poskusi kinematičnega vodenja spina v odprti in zaprti regulacijski zanki.

Ključne besede: robotizacija, neholonomsko breme, modeliranje, dinamična analiza, kinematično vodenje

Nonholonomic robotic load

Extended abstract: One degree of freedom actuation of the Powerball is discussed. When attached to the manipulator, the Powerball rotor represents a nonholonomic dynamic load. The Powerball housing acts as a griper in which the load's rotor spins up. The arrangements can be seen also as an underactuated mechanism in which dynamic coupling is considered for control.

First, the kinematics from Fig. 1 is discussed. The coordinate system, DOF of the Powerball, and the states of the rotor in the housing-griper are shown in Figs. 2 and 3. They are the reference point for modeling the rotor dynamics, friction coupling and rolling given in Equation 3. The model is written in form which allows for calculating the actuation torque components: the coupling part and part for spinning up (12). One precession period is shown in Fig. 4. The open-loop spinning up (Fig. 5) is documented with experiments-videos and the closed-loop control set-up is depicted in Fig. 6. The kinematic control experiment is depicted in Fig. 7 for acceleration, steady-state, and deceleration of the rotor spinning up.

Keywords: robotisation, nonholonomic load, modeling, dynamic analysis, kinematic control.

navora povzročča obremenitev zapestja, namenjen za trening zapestja, odvisen od hitrosti vrtenja. Konstrukcijska značilnost naprave omogoča spreminjanje obremenitve in s tem pospeševanje, zaviranje in ohranjanje spina rotorja [2]. Obremenitev je od hitrosti kvadratično odvisna in zaradi izgub pri vrtenju je jasno največja hitrost omejena.

Zapestni žiroskop je zbudil tudi pozornost robotikov, saj je po svojih dimenzijah primeren za eksperimentiranje v najrazličnejših robotskih scenarijih, opisanih v literaturi. Prispevek [3] poroča o robotizaciji žiroskopa po vzoru človeškega zapestja in uporabi popolnega nabora senzorjev. Izmerjena in uporabljena je rotacija zapestja, ki je podobna idealnemu opotekanju. Z robotom so dosegli zavidljivo rotacijsko hitrost rotorja 1200 rad/s, če upoštevamo absolutni rekord 1500 rad/s. V prispevkih [4,5,6,7] avtorji poročajo o izpeljavi matematičnih modelov, merjenju ustreznih parametrov, simulacijah in eksperimentiranju. Doseženo je bilo zadovoljivo ujemanje rezultatov s poskusi, če upoštevamo minimalno število razpoložljivih senzorjev.

V tem prispevku obravnavamo značilnosti modela žiroskopa, ki nam omogočajo, da je mogoče reducirati dvoprostostno opotekajoče vrtenje zapestja na samo eno prostostno stopnjo. Najprej bomo predstavili kinematiko problema in izpeljali dinamični model bremena z eno aktivirano prostostno stopnjo. Analiza potrebnega navora nam omogoči zasnovati različna kinematična vodenja. Dokumentirani so rezultati odprtozanknih kinematičnih vodenj in prikazano reguliranje spina za pospeševanje, ohranjanje in zaviranje.

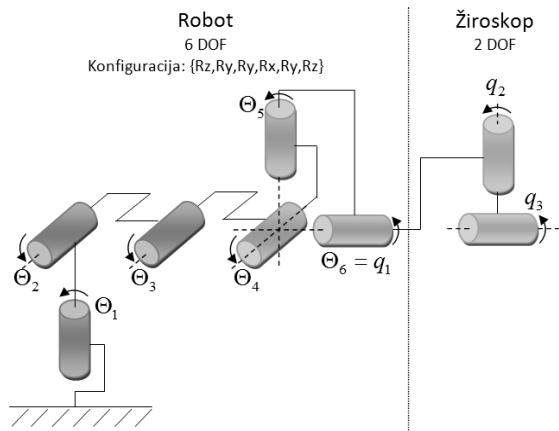
2 Kinematična shema

Scenarij robotiziranega žiroskopa prikazuje slika 1. Žiroskop je pritrjen na vrh robota kolinearno z zadnjo

1 Uvod

Poznamo več kategorij robotskih bremen: takšnih, ki nimajo stika z robotsko okolico, orodja, ki jo z okolico imajo [1], in takšna, ki okolico obsegajo. Zadnja skupina bo s primerom zapestnega žiroskopa obravnavana v tem prispevku.

Značilnost zapestnega žiroskopa znanega pod tržnim imenom Powerball je, da tedaj, ko ima njegov rotor zadosten spin, deluje naprava na rotirajoče zapestje z izdatnim reakcijskim navorom. Par rotacijske hitrosti in

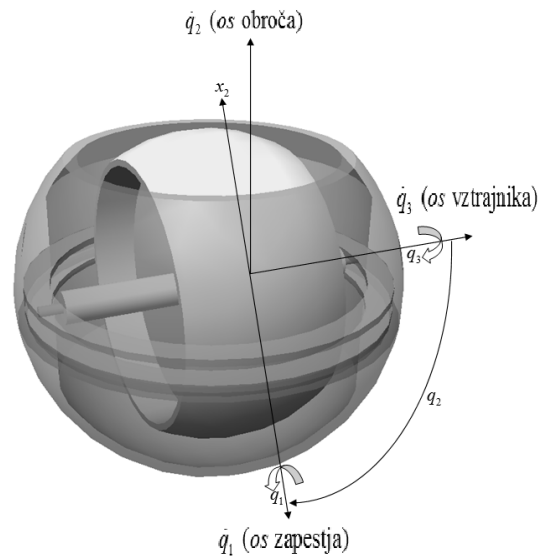


Slika 1. Šest sklepov manipulatorja in dva žiroskopa
Figure 1. Six robotic joints and two of the Powerball.

(šesto) osjo zapestja. Ponavadi bi manipulator vodili tako, da bi opletal okoli presečišča žiroskopskih osi [8]. Po kinematični shemi je tudi razvidno, da je mogoče zapestje zasukati tako, da dosežemo kolinearnost šeste osi z drugimi osmi manipulatorja. Tako je gibanje manipulatorja zelo poenostavljeno, povečati pa je tudi mogoče aktiviranje s preprosto kombinacijo sklepov. Podobno dosežemo, ko žiroskop pritrdimo le na priročnejši elektromotor.

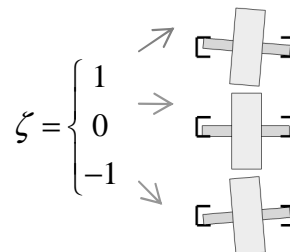
Lastnost žiroskopa bi bila, da tedaj ko njegovo ohišje čvrsto oprimemo, ohrani le prostost spina q_3 in precesije q_2 (slika 2). Zapestni žiroskop ima značilnost, da rotor ni le v stiku s sklepom precesije, temveč tudi s sklepom q_1 - ohišjem, po katerem lahko drsi ali se tudi kotali. Ker je sklep q_1 hkrati sklep manipulatorja npr Θ_6 , je tako omogočeno aktiviranje rotorja s kotaljenjem po vrtečem se ohišju.

Posamezni primeri povezanosti rotorja in ohišja so prikazani na sliki 3. Stanja so zajeta s spremenljivko ζ : 1 je pri desno precesijskem kotaljenju, 0 je za drsno precesiranje in je -1 pri levem precesijskem kotaljenju. Odvisno od položaja žiroskopa v prostoru deluje ustrezno tudi sila teže. Ko je os rotorja vodoravna $\zeta=0$, je za kotaljenje npr $\zeta=-1$ potreben po smeri x_2 dovolj velik desnosučni navor. Ta se vzpostavi, ko ustrezno zavrtimo ohišje in se nam pri tem rotor zaradi svojega spina primerno upre. Če je spin rotorja premajhen, kotaljenja ni mogoče doseči in naprava se ustavi. Opravka imamo z neholonomsko dinamično sklopljenostjo sistema, saj je za delovanje nujno potreben začetni spin oziroma rotorska vrtilna količina, ki šele omogoča smiselno rabo zapestnega žiroskopa.



Slika 2. Koordinatni sistem in sklepi žiroskopa
Figure 2. Coordinate system and Powerball joints.

Zato bomo za predstavitev neholonomskih lastnosti uporabili modele rotorske dinamike, sklopljenosti med sklepi in modele trenja za prisiljeno kotaljenje.



Slika 3. Stanja rotorja, indikator stanja ζ in razmerje premerov utora ohišja in rotorske osi $p=32$

Figure 3. Rotor states indicated with ζ and the ratio $p=32$ between the griper and rotor axle diameters.

3 Modeli rotorja, sklopljenosti in trenja

Pri izpeljavi modelov upoštevamo le dejstva, ki so potrebna za osvetlitev značilnosti obravnavanega robotskega bremena [5]. Tako niso upoštevane mase ohišja in sklepov, kakor tudi ne trenje v ležajih. Obravnavano bo le tisto trenje, ki je potrebno, da se pri reakciji rotorja na vrteče se ohišje rotor začne kotaliti po ohišju. Glede na mehaniko tega pojava imamo opravka poleg že omenjene neholonomske sklopljenosti žiroskopa opraviti še s kinematično neholonomsko sklopljenostjo po utoru ohišja za drsenje – kotaljenje osi rotorja (slika 3.)

Dinamični model prostega rotorja je postavljen v koordinatni sistem žiroskopskega obroča. Navorna enačba je zapisana v matrični obliki :

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & 0 & H_{13} \\ 0 & H_{22} & 0 \\ H_{13} & 0 & H_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

kjer so komponente matrike vstrajnostnih momentov:

$$H_{11} = Js^2q_2 + J_3c^2q_2,$$

$$H_{13} = J_3cq_2,$$

$$H_{22} = J,$$

$$H_{33} = J_3 \text{ in predstavlja vektor}$$

$$\begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2(J_3 - J)sq_2cq_2 \cdot \dot{q}_1\dot{q}_2 - J_3sq_2 \cdot \dot{q}_2\dot{q}_3 \\ (J_3 - J) \cdot sq_2cq_2 \cdot \dot{q}_1^2 + J_3 \cdot sq_2 \cdot \dot{q}_1\dot{q}_3 \\ -J_3sq_2 \cdot \dot{q}_1\dot{q}_2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

sklopljenosti med posameznimi prostostnimi stopnjami prostega žiroskopa. Skalar J_3 je glavni vztrajnostni moment okoli spinske osi in J prečni vztrajnostni moment rotorja.

Pri zaprtem žiroskopu, ki je aktiviran le z eno prostostjo, sta navora T_2 in T_3 nič. Značilno sklopljenost naprave zajamemo z dodatnim vektorjem navora trenja T_t :

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = H \cdot \ddot{q} + h(q, \dot{q}) + \begin{bmatrix} T_{t1} \\ T_{t2} \\ T_{t3} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Vektor trenja (3) bo po prvi komponenti enak nič. Trenje v tem sklepu pripada aktivatorju in ga ne obravnavamo eksplicitno. Preostali dve komponenti vektorja trenja sta razstavljena na del disipacijskega in na del sklopitvenega trenja:

$$\begin{bmatrix} T_{1t} \\ T_{2t} \\ T_{3t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ T_{2d} + T_{2s} \\ T_{3d} + T_{3s} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Najprej izberemo model za disipacijsko trenje. Upoštevani sta viskozno trenje v obeh sklepih (konstanti viskoznega trenja k_v , k_{v3}) in suho trenje (konstanta suhega trenja k_{s3}) v odvisnosti od stanja rotorja ζ :

$$T_{2d} = k_v \cdot \dot{q}_2, \quad (5)$$

$$T_{3d} = \begin{cases} k_{v3}\dot{q}_3 + k_{s3} \cdot \text{sign}(\dot{q}_3); \zeta = 0, \\ 0; \zeta \neq 0 \end{cases}. \quad (6)$$

Navora sklopljenosti sta modelirana s trenjem v odvisnosti od nutacijskega navora T_N v smeri osi x_2 in relativne hitrosti drsenja v . Sklopljenosti omogočata pretakanje energije iz manipulatorja v rotor in nasprotno iz rotorja na manipulator.

$$T_{2s} = -f_t(v, T_N), \quad (7)$$

$$T_{3s} = -\zeta \cdot \frac{1}{p} \cdot f_t(v, T_N). \quad (8)$$

Funkcija f_t v (7,8) modelira suho trenje:

$$f_t(v, T_N) = k_s \text{sig}(v), \quad (9)$$

kjer je k_s konstanta suhega trenja med osjo rotorja in utovorom ohišja.

Funkcija trenja (9) je odvisna od relativne hitrosti drsenja površine osi vztrajnika po površini utora:

$$v = |\zeta| q_2 r_2 + \zeta q_3 r_3; \quad \zeta = \begin{cases} 1 & ; T_N > \mu \\ 0 & ; -\mu \leq T_N \leq \mu \\ -1 & ; T_N < -\mu \end{cases} \quad (10)$$

in je μ mejni nutacijski navor, pri katerem nastopi kotaljenje. Nutacijski navor je izražen z enačbo:

$$T_N = Js q_2 \cdot \ddot{q}_1 + (2J - J_3)cq_2 \cdot \dot{q}_1\dot{q}_2 - J_3 \cdot \dot{q}_2\dot{q}_3. \quad (11)$$

Neholonomske omejitve robotskega bremena, aktiviranega le z eno prostostno stopnjo, niso preprosto razpoznavne v modelu (3) in pripadajočih členih enačb (1 in 4). Vendar je za neholonomske sisteme značilno, da so rešitve vodenja periodične narave, ki ohranjajo konstante gibanja dotičnega sistema [9]. Pri žiroskopu je to vektor vrtilne količine rotorja, ki npr. reagira na kinematično vodenje, povzroči sklopljenost s trenjem in omogoči prenos energije do rotorja. Ko dosežemo popolno kotaljenje, sta zato rotor in ohišje v rotacijskem razmerju premerov osi in utora p . Neaktivirana sklepa žiroskopa postaneta sklopljena z manipulatorjem in s tem aktivirana.

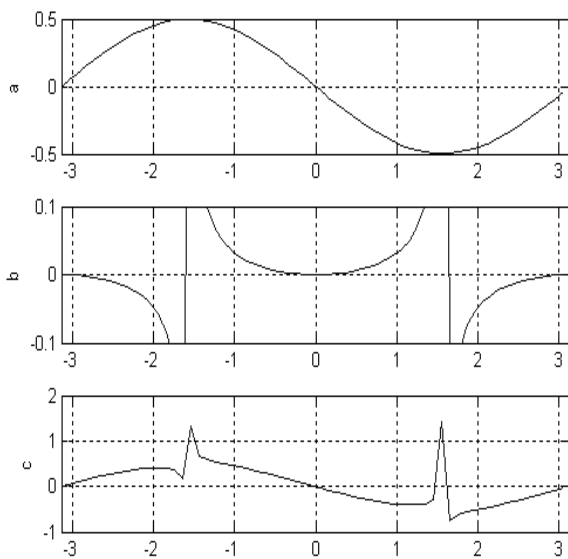
4 Vodenje zaprtega žiroskopa

Vodenje zaprtega žiroskopa lahko pri poznavanju modela zasnujemo na metodah izračunanih navorov ali pa se navori izračunavajo implicitno za kinematično vodenje. Gotovo se problem vodenja še občutno zaplete z izborom merilnih senzorjev, ki jih uporabimo pri zasnovi vodenja [3]. Pri svojem delu smo se ukvarjali s scenariji vodenja brez uporabe senzorjev [5, 6], primerom z estimiranim navorom [7] in uporabo senzorja za spin rotorja [10].

Kakor so pokazali poskusi vodenja zapestnega žiroskopa brez uporabe senzorjev, so poteki kinematičnega vodenja s q_1 za stalno hitrost kotaljenja rotorja harmonični, kar velja tudi za pripadajoči navor. Seveda to velja le za stanje, ki ohranja enega od načinov kotaljenja. Kadar rotor drsi ali pač menjava stanje, nastajajo še dodatni pojavi in spreminjanje strukture. Tekšnih primerov tukaj ne obravnavamo. Opisani so v [5], kjer jih je bilo mogoče zadovoljivo modelirati in simulacijsko analizirati. Pri spreminjanju hitrosti vrtenja rotorja, ko pospešek ni nič, pa navori niso več harmonske oblike, kar je prikazano v naslednjem odstavku.

4.1 Analiza navorov vodenja

Pri kotalnem stiku rotorja in ohišja je mogoče iz enačbe (3) z uporabo simulacijskih orodij izračunati potek navora, potrebnega za izbrano konstantno pospeševanje vrtenja rotorja. Potrebni navor sestavljata dve komponenti: komponenta navora za vzdrževanje kotaljenja in komponente za pospeševanje.



Slika 4. Pospeševanje za en način kotaljenja: a) navor za vzdrževanje kotaljenja, b) pospeševalna navorna komponenta in c) rezultirajoči navor T_1

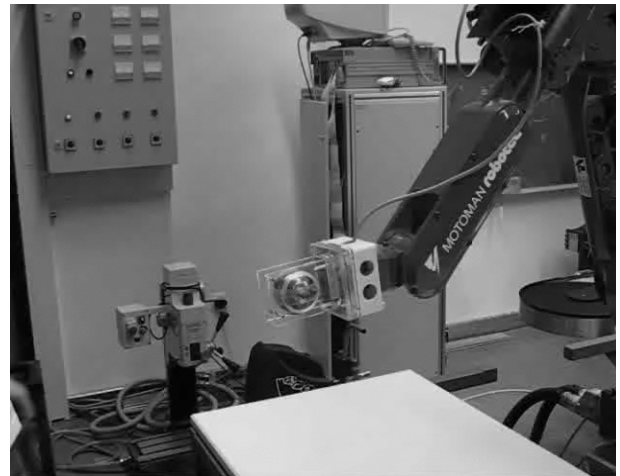
Figure 4. Accelerating in one rolling mode: a) torque for conditional rolling, b) torque component for acceleration, and c) resulting torque T_1 .

Potek celotnega navora je prikazan za eno nutacijsko periodo na sliki 4. V komponenti za pospeševanje je jasno izražena narava enoprostostnega aktiviranja žiroskopa. Za konstantno pospeševanje bi v singularnih

položajih osi x_2 potrebovali neskončno vrednost navora.

4.2 Eksperimentalno vodenje

Eksperimentalne razmere dokumentirata slika 5 za primer krmiljenja in slika 6 za primer kinematično vodene reguliranja.



Slika 5. Zapestni žiroskop, prijemalo in manipulator Motoman-Robotec

Figure 5. Powerball, gripper and Motoman-Robotec manipulator.

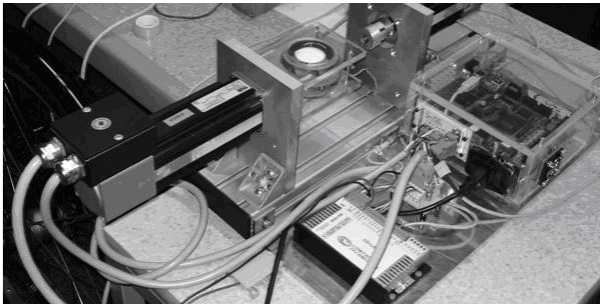
Model naprave primeren za kinematično vodenje opisujeta enačbi, ki sta dobljeni z invertiranjem modela (3):

$$\begin{aligned} \ddot{q}_2 &= \frac{1}{J} (T_{2s} - h_2(q, \dot{q}) - T_{2d}) \\ \ddot{q}_3 &= \frac{1}{J_3} (T_{3s} - h_3(q, \dot{q}) - J_3 \cos(q_2) \ddot{q}_1 - T_{3d}) \end{aligned} \quad (12)$$

Kjer je kinematična veriga \ddot{q}_1 , \dot{q}_1 in q_1 vhod v dinamični sistem, T_{2s} in T_{3s} sta navora, ki sklapljata utor ohišja naprave z osjo rotorja in prenašata energijo za aktiviranje spina. Navora T_{2d} in T_{3d} sta posledica trenja in pripomoreta le k disipaciji dovedene energije.

Lasnosti robotskega krmilnika NX100 so omogočale za manipulatorjem preizkušati le krmiljenje žiroskopa. Pri začetnem spinu 250 rad/s je mogoče postopoma pospeševati rotor do največje vrednosti približno 900 rad/s. Opravljeni so bili poskusi z opletanjem, enojno aktivacijo in usklajeno kolinearno aktivacijo [11].

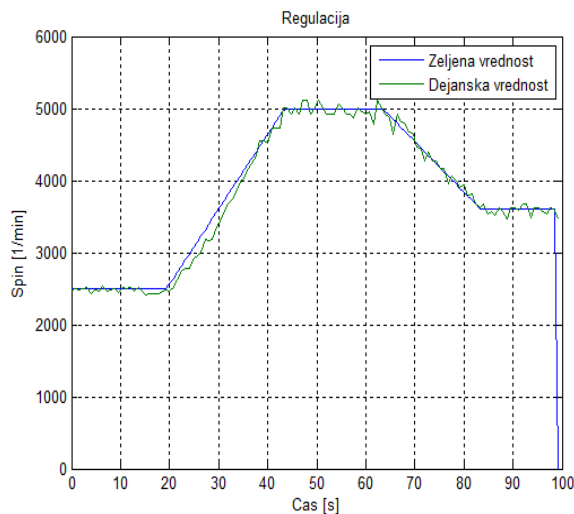
Za poskus kinematično vodene regulacije spina smo uporabili servopogon MiniAX in razpoložljivi DSP2



Slika 6. Zapestni žiroskop, ki je neposredno pritrjen na gred servomotorja

Figure 6. Directly coupled servo-drive and the Powerball.

FERI Maribor (slika 6). Algoritem vodenja je zasnovan na enačbah (12), uporabi signala spina in na dejstvu, da je mogoče servopogon voditi hitrostno [10]. Potrebni navor aktiviranja žiroskopa se vzpostavi implicitno z regulatorjem toka električnega servomotorja. Rezultat vodenja za pospeševanje, konstantno kotaljenje in kotalno zaviranje je prikazan na sliki 7. Od začetnega spina se spin pospeši na dvakratno vrednost. Tam se spin zadrži in nato zmanjšuje v naslednje stacionarno stanje. Opomniti velja, da je bila pri tem poskusu vodenja ζ ves čas $+1$ ali -1 , torej v enem od mogočih kotaljenj.



Slika 7. Kinematično vodena regulacija spina

Figure 7. Spin kinematic control experiment.

5 Sklep

V prispevku poročamo o robotiziranju zapestnega žiroskopa. Glede na razpoložljivo opremo nam je bilo omogočeno pospeševati rotor naprave z robotom z dvema ortogonalnima, dvema kolinearnima in eno samo prostostno stopnjo. Zadnji način je bil uporabljen tudi za aktiviranje žiroskopa s kinematično vodeno regulacijo in uporabo senzorja spina.

V svoje nadaljnje delo obravnave neholonomskega bremena smo vključili tudi primer z eno aktivno in drugo ortogonalno pasivno stopnjo [7]. Takšen scenarij verjetno najbolje ponazarja razmere, ki nastopijo pri pospeševanju in absolutnih rekordih. Seveda v primeru z ljudmi, ki v zadnji fazi pred doseženim rekordom uporabijo poleg zapestja še kar celo svoje telo.

Zahvala gre našemu sodelavcu Marijanu Španerju, ki je pripravil potrebno eksperimentalno opremo in diplomantu Tadeju Petriču za dobro opravljene njemu zaupane naloge.

6 Literatura

- [1] M. W. Spong, Underactuated Mechanical Systems, Control Problems in Robotics and Automation, LNCIS, vol. 230, Springer Verlag, London, 1998.
- [2] D.W.Gulick, O.M. Reilly: On the Dynamics of the Dynabee, ASME J.of App. echanics, V.67, 321-325, 2000.
- [3] A. Gams, J. Lenarčič in L. Žlajpah, "Vrtenje žiroskopske naprave z robotom", Elektrotehniški vestnik, 74(4), 223-228, 2007.
- [4] B. Curk, "Robotiziran Powerball", Preecedings ERK 2006, Portorož, Slovenija, pp. 167-170, 2006.
- [5] B. Curk, P. Cafuta, "Wrist exerciser-exercising for modeling and simulation", Preecedings EUROSIM 07, Ljubljana, Vol. 2, 2007.
- [6] T. Petrič, B. Curk, "Robotiziran Powerball: estimacija parametrov trenja", Preecedings ERK 2008 -B, Portorož, Slovenija, 203-206, 2008.
- [7] P. Cafuta, B. Curk, "Control of nonholonomic robotic load", 10th International workshop on advanced motion control, Proceedings AMC'08, , vol. 2, Trento, Italy, 631-636, 2008.
- [8] G. Schweitzer: Antrieb eines Spielkreis, Festschrift TU Munchen, 1982.
- [9] Escobar G., Ortega R., Reyhanoglu M.: Regulation and tracking of the nonholonomic double integrator: field-oriented approach, Automatica, Vol.34, No.1, 125-131, 1998.
- [10] Petrič T.: Robotsko vodenje dinamičnega bremena, Diplomsko delo, FERi, UM, Maribor, 2008.
- [11] Internetna stran:
www.ro.feri.uni-mb.si/lab_kin_sim/DSCI0023.AVI

Peter Cafuta je diplomiral leta 1974 in magistriral 1976 na FE Ljubljana. Po raziskovalnem delu na TU Graz Avstrija je doktoriral na FERi Maribor 1987. Zaposlen je na FERi Maribor in se ukvarja z robotiko, modeliranjem in simulacijo

Boris Curk je diplomiral leta 1986 magistriral 1989 in doktoriral na FERi Maribor 1995. Zaposlen je na FERi Maribor in se ukvarja z robotiko, modeliranjem in simulacijo, vodenjem nelinearnih sistemov in računalniško podprtimi tehnologijami.