Vrtenje žiroskopske naprave z robotom

Andrej Gams, Jadran Lenarčič, Leon Žlajpah

Institut »Jožef Stefan«, Jamova 39, 1000 Ljubljana, Slovenija E-pošta: andrej.gams@ijs.si

Povzetek. V delu sta predstavljena vrtenje in pospeševanje ročne žiroskopske naprave Power[®]ball z robotom. Čeprav povprečen uporabnik z nekaj vaje nima težav s sinhroniziranim pospeševanjem vrtenja naprave, pa je za robota to zahtevna naloga. Izvedene meritve gibanja človeka med pospeševanjem naprave, so pokazale potreben pogoj za pospeševanje – sinhronizacijo gibanja z navorom, ki deluje na roko. Enak pristop je bil uporabljen tudi pri pospeševanju z robotom. Prikazane so tudi meritve eksperimentalnega pospeševanja rotorja naprave z robotom na različne načine. Hitrostno oz. mehko vodenje je doseglo najboljše do sedaj znane rezultate.

Ključne besede: žiroskopska naprava, posnemanje gibanja z robotom, periodične naloge

Spinning of a gyroscopic device with a robot

Extended abstract. This paper presents spinning-up the Power[®]ball – a hand held gyroscopic exerciser - with a robot imitating human performance. Even though it is a fairly easy task for a human, it is rather complex to perform it by a robot. We first measured the human motion. Then we transferred the movement of the wrist to the end-effector movement of the robot. Conditions for a successful spinning-up were identified. It turned out that synchronization of the exerted torque with the control velocity of the circular motion is needed. Different control approaches using feed-back information from the velocity counter and force/torque sensor were applied. On-line control of the motion with a PI controller successfully accelerated the rotor of the device but the PI controller was found to be inadequate as such control implied the highest acceleration at low rotor velocity, rendering the system unstable. Fuzzy control introduced better performance. Impressive rotor velocity of 840rad/s (8000rpm) and more was achieved using fuzzy and velocity control.

Key words: gyroscopic device, movement imitation with robot, periodic task

1 Uvod

Med najbolj zanimivimi sedmimi področji raziskav EU v prihodnjih letih je tudi robotika, ki posnema kognitivne procese in človekovo gibanje, kamor spada tudi periodično oz. ritmično gibanje. Obstajajo različni načini vodenja ritmičnih nalog [1, 2]. Vzorec gibanja je

Prejet 8. december, 2006 Odobren 10. april, 2007 lahko vnaprej definiran, pri čemer je naučen ali pa sestavljen iz gladkih funkcij [1]. Za dosego cilja se uporabi sprotni algoritem, ki spreminja parametre gibanja. Drugi pristop je sprotno generiranje trajektorij gibanja v odvisnosti od stanja naprave [1, 2].

Znana naloga s področja posnemanja človekovega gibanja je pospešitev rotorja žiroskopske naprave Power[®]ball. Konstrukcija naprave omogoča, da s primernim gibanjem rotor naprave pospešimo [3]. Naloga zahteva sinhronizacijo z napravo, ob tem pa se frekvenca gibanja spreminja v odvisnosti od načina vođenja.

Raziskovalni izziv je namesto klasičnega pristopa z matematičnim modeliranjem uporabiti pristop, ki se zgleduje po človeku. Povprečen uporabnik o dinamiki naprave Power[®]ball ne ve dosti, kljub temu pa jo večina uspešno zavrti do visokih vrtljajev. Slednje doseže z uporabo čutil in določenega predznanja. Dvojnost izziva je v tem, da poskušamo »človekov« pristop realizirati tudi eksperimentalno. Ker ima robot drugačno kinematiko in dinamiko, je posnemanje človekovega gibanja zahtevna naloga.

V naslednjih poglavjih so najprej podana osnovna dejstva o napravi (2. poglavje). V 3. poglavju je opisan matematični model naprave. Meritve gibanja človeka pri pospeševanju rotorja naprave opisuje 4. poglavje. Potem so v 5. poglavju podana merilna okolja in opis eksperimentalnega pospeševanja naprave. Sklepi so predstavljeni v 6. poglavju.

2 Žiroskopska naprava Power®ball

Power[®]ball je ročna žiroskopska igrača oz. vadbeni pripomoček, ki ima lastnost, da ob primernem vodenju pospeši rotor do visokih vrtljajev. Uporablja se lahko za zabavo, v terapevtske namene ali kot vadbena naprava za krepitev mišic, saj pri visokih vrtljajih rotorja na uporabnika deluje precejšen navor. Pod imenom Dynabee je bila naprava prvič patentirana že leta 1973 v ZDA [4]. Ker zahteva od človeka določene motorične sposobnosti in sinhronizacijo gibanja z delovanjem naprave, je primerna za preizkušanje posnemanja gibanja ljudi z roboti. Sestavljata jo rotor in sferično plastično ohišje s krožnim utorom, ki omejuje gibanje rotorja [3, 4, 5].

Utor, ki omejuje gibanje rotorja, je malce širši od same osi rotorja, tako da se lahko rotor malce nagne. Princip delovanja je prikazan na sliki 1. Ob nagnjenem rotorju se os nasloni na eni strani na zgornji del utora in na drugi strani na spodnji del, kar ob rotaciji okoli osi v_1 rotorju omogoča sekundarno rotacijo okoli osi v_2 . Če je os v opisanem kontaktu z utorom in se rotor vrti, se os po utoru ali kotali ali pa drsi.



Slika 1: Utor v ohišju je malce širši od osi rotorja Figure 1. Constraining groove is wider than the rotor axle.

Ob izpolnjenih pogojih za kotaljenje brez spodrsavanja in konstantni kotni hitrosti okoli osi v_2 je razmerje rotacijskih hitrosti podano z:

$$\omega_1 = K \omega_2, \qquad (1)$$

kjer sta ω_1 in ω_2 rotacijski hitrosti okoli osi v_1 in v_2 [3]. K je podan z razmerjem:

$$K = R_2 / R_1 , \qquad (2)$$

kjer je R_1 radij osi rotorja, R_2 pa razdalja od centra rotacije rotorja do točke kontakta osi z utorom. Analogno pojavom pri vrtenju vrtavk lahko rotacijo okoli osi v_1 imenujemo spin, rotacijo okoli osi v_2 precesija in nagib naprave nutacija [5].

Ob doseženem kotaljenju brez spodrsavanja je navor, ki deluje na rotor, posledica izgub (npr. zračni upor) in posledica kontakta z utorom, ki omejuje njegovo gibanje. Kotaljenje brez spodrsavanja lahko dosežemo le, če na ohišje naprave delujemo z navorom, ki je nasproten navoru rotorja na ohišje.

Podrobna razlaga kinematike in dinamike naprave je podana v [3, 4, 5].

3 Matematični model

Pri modeliranju naprave moramo ločiti tri stanja naprave [5], in sicer kotaljenje rotorja po ohišju brez spodrsavanja v eno ali drugo stran ter delovanje, ko je rotor prost, kar pomeni, da os rotorja ne pritiska na ohišje z zadostnim navorom, da bi se kotaljenje vzpostavilo. Pospeševanje oziroma vzdrževanje delovanja naprave je mogoče samo v načinu kotaljenja osi rotorja po utoru v ohišju, zato se omejimo na to stanje. Kot je navedeno v [4] in [5], je problematično definiranje vztrajnostnega tenzorja rotorja J, saj je le-ta odvisen od lege v prostoru. Preprosteje je dinamični model izpeljati glede na koordinatni sistem (KS) rotirajočega sistema. Po [3] izrazimo vrtilno količino Γ relativno glede na težišče rotorja kot

$$\Gamma = \mathbf{J}\boldsymbol{\omega}_{\mathbf{r}} = J_1\boldsymbol{\omega}_1\mathbf{e}_1 + J_2(\boldsymbol{\omega}_2\mathbf{e}_2 + \boldsymbol{\omega}_3\mathbf{e}_3), \qquad (3)$$

kjer je J_1 vztrajnosti moment rotorja okoli osi v_1 , J_2 vztrajnosti moment okoli preostalih dveh osi (simetrično telo), ω_i (*i*=1, 2, 3) kotna hitrost okoli osi e_i in e_i osi izbranega koordinatnega sistema (*i*=1, 2, 3). Ravnotežno stanje se vzpostavi, ko je

$$\dot{\mathbf{\Gamma}} = \mathbf{M}_{\mathbf{r}} \,, \tag{4}$$

kjer je M_r celoten navor, ki deluje na rotor. Nadaljnja izpeljava je podana v [5], rezultat pa podaja enačba

 $\ddot{\delta} + a\dot{\delta} + b\dot{\psi}^2 \cos \delta - (b\ddot{\psi} + c\dot{\psi})\sin \delta - d\dot{\psi}^2 \sin 2\delta = e\ddot{\psi} - a\dot{\psi}, (5)$ kjer je vpeljana nova spremenljivka

$$\delta(t) = \alpha(t) - \psi(t) \,. \tag{6}$$

 α je kot, ki ga os rotorja opiše po utoru v ohišju [5] (torej kot, za katerega se zakotali) ψ pa kot precesije, ki je lahko drugačen kot α . Drugi parametri so

$$a = \frac{K^2 \nu}{1 + K^2 \eta}, \quad b = \frac{K\eta \sin \theta}{1 + K^2 \eta}, \quad c = \frac{K\nu \sin \theta}{1 + K^2 \eta},$$

$$d = \frac{1}{2} \frac{(\eta - 1)\sin \theta}{1 + K^2 \eta}, \quad e = \frac{K^2 \nu + \cos \theta}{1 + K^2 \eta}$$
(7)

V tem primeru je K podan z enačbo (2), η je razmerje vztrajnostnih momentov J_1/J_2 , θ je kot, za katerega je nagnjeno ohišje glede na navpičnico (nutacija), v pa je podan z

$$v = \sigma / (J_2 \dot{\psi}) . \tag{8}$$

 σ je koeficient dušenja, ki nastopa ob rotaciji rotorja.

Vidimo lahko, da je model dokaj zahteven in da zahteva identifikacijo precejšnjega števila parametrov. Izpeljana je tudi enačba za navor, s katerim os rotorja pritiska na utor v ohišju in iz katere je razvidno, da navor raste s kvadratom hitrosti [3]. Iz izračunanega navora se ugotovi, ali sta izpolnjena pogoja za kotaljenje. Pogoja sta, da je navor v pravo smer in da je trenje zadostno. V [3] je tudi pokazano obnašanje naprave pri enakomernem pospeševanju in da se δ ustali pri $-\pi/2$.

4 Analiza človekovega gibanja

Premikanje roke med pospeševanjem rotorja smo pomerili s sistemom za zajemanje pozicije SMART Motion Capture. Sistem sestavlja šest kamer z infrardečimi stroboskopi, s katerimi osvetljuje pasivne odbojne markerje, njihovo lego pa lahko določi z natančnostjo manj kot mm. Markerje smo pritrdili na hrbtni stran dlani, na dnu naprave ter na podlakti in nadlakti. Pozicijo markerjev med gibanjem smo zajeli s frekvenco 60Hz, kalibracija sistema pa je zagotovila točnost merjenja s standardno deviacijo 0.98mm. Slika 2 prikazuje namestitev odbojnih markerjev.

Trije markerji na hrbtni strani roke enolično določajo ravnino, katere normalo označimo z n. S trdnim prijemom smo zagotovili, da je bila normala nnagnjena glede na smer osi v₂ pod konstantnim kotom. Med vodenjem naprave n opisuje plašč stožca, kar je bilo pričakovano iz analize njenih lastnosti. Vemo tudi, da je treba povečevati navor osi rotorja na utor v ohišju (nutacijski navor) [5]. S prijemom naprave, kot je prikazan na sliki 2, smo zagotovili, da z dvema stopnjama prostosti (PS) roke sledimo spreminjanju smeri nutacijskega navora. Osi dveh PS roke so na sliki 2 označene z ax_{PS,k} za uporabljeno PS komolca in ax_{PS,z} za PS zapestja. S tema PS človek lahko zagotovi pospeševanje rotorja naprave, os naprave pa se giba po stožcu v globalnem KS. Pri večjih hitrostih to zagotovi z vsemi PS roke, čeprav je večina gibanja še zmeraj dosežena z dvema PS.



Slika 2: Namestitev markerjev in PS roke Figure 2. Placing of markers and DOF of the hand.

Med pospeševanjem smo naklon naprave in navore, ki so posledica rotacije rotorja, pomerili tudi z inklinometrom (naprava, ki meri orientacijo v prostoru) in s senzorjem sile. Uporabili smo Xsens MTi-28A53G35 inklinometer, ki zajema orientacijo s točnostjo pod 1° na vsako os. Za merjenje navorov smo uporabili JR3 senzor sil in navora. Rotacijsko hitrost rotorja smo merili s štetjem proženja reed releja, nameščenega v držalo. Rele je prožil trajni magnet, ki je nameščen v rotor. Sestavljen merilni sistem prikazuje slika 3. Pri sami meritvi je treba upoštevati, da senzor navorov meri tudi navore zaradi sile teže in vztrajnosti. Ker imamo senzor v roki, ne moremo opraviti kompenzacije gravitacije [6].

Ob pospeševanju naprave čutimo navor, ki ga moramo premagovati s premikanjem roke. Ob doseženem kotaljenju osi rotorja brez spodrsavanja ima uporabnik občutek, kot da je roka ves čas naslonjena na neko utež. To pokažejo tudi meritve. Slika 4 prikazuje merjeni navor v x in y smereh senzorja ter merjeni naklon roke in s tem ravnine naprave. Lepo sta vidni dve krivulji s fazo $\pi/2$ tako pri kotih kot pri navorih. Za kote je rezultat pričakovan, saj gre za krožni gib. Čeprav je mogoče tudi drugačno pospeševanje s stalnim spodrsavanjem, pa tak način ni pogost, saj gibanje roke dokaj hitro vsili frekvenco kroženja rotorja, ali pa se rotor ustavi. Posledično pri pospeševanju oziroma vzdrževanju hitrosti dosežemo kotaljenje osi rotorja po utoru v ohišju, kar pomeni, da sta gib roke in vrtenje rotorja sinhronizirana. To razloži tudi rezultat merjenja navorov.



Slika 3: Merjenje navorov in orientacije naprave Figure 3. Torque and orientation measurement.



Slika 4: Orientacija in navori med vodenjem naprave Figure 4. Orientation and torque during spinning-up with arm.

Pri izrisu kotov je opazno, da ne nihata povsem okoli ničle, kar je posledica vrtenja v ravnini, ki ni povsem vzporedna z ravnimi tlemi. Človek lahko z roko takšno ravnino ujame samo približno.

Iz navora v x in y smeri senzorja lahko določimo smer navora v ravnini. Če označimo smer navora glede na senzor sile v ravnini senzorja sile s: 226 Gams, Lenarčič, Žlajpah

$$\phi_{\tau} = \arctan(\tau_y / \tau_x) \tag{9}$$

in kot orientacije naprave v ravnini vzporedni s tlemi

 $\phi_{\varepsilon} = \arctan(d\varepsilon_6 / d\varepsilon_5), \qquad (10)$ potem lahko definiramo »fazo« ϕ med smerjo navora in

orientacijo z $\phi = \phi_r - \phi_s$, (11)

kjer so τ_x , navor v smeri osi x, τ_y navor v smeri osi y, ε_5 in ε_6 pa kota okoli obeh osi vrtenja naprave v globalnem KS. Slika 5 prikazuje potek hitrosti rotorja ω_1 ter faze ϕ kot sinhronizacije med roko in napravo. Vidno je, da sta navor in pozicija večino časa sinhronizirana, med 109 in 115 sekundo ter ob še nekaj krajših intervalih pa ϕ preskakuje med \pm 180, kar pomeni, da signala nista sinhronizirana. V tem času je tudi najbolj očitno zmanjševanje hitrosti rotorja. Meritve potrjujejo, da človek pri pospeševanju sinhronizira gibanje roke z napravo. V intervalu med 130 in 140 s je kljub precejšnjemu šumu opazno zmanjševanje ϕ , kar je posledica pospeševanja.



Slika 5: Hitrost rotorja ω_1 in faza ϕ Figure 5. Rotor velocity ω_1 and phase ϕ .

Meritve nekompenziranega navora, ki deluje na uporabnika, so pokazale, da je pri $\omega_1 \approx 840$ rad/s amplituda navora v smereh osi x in osi y senzorja približno 1.7Nm, okoli osi z pa približno 0.3Nm. Navor hitro spreminja smer, kar skupaj pomeni precejšno obremenitev roke.

5 Pospeševanje rotorja z robotom

Naloga je brez dvoma zahtevna, saj avtorjem ni znana objava, v kateri bi robotska roka eksperimentalno dosegla večjo rotacijsko hitrost rotorja kot človek. Trenutni rekord človeka je nad 15000rpm (1570rad/s) s plastično izvedbo Power[®]balla, kakršno smo uporabljali tudi mi. Povprečen uporabnik z nekaj vaje dosega rezultate okoli 1000rad/s. Večina objav se je ukvarjala z matematičnim modeliranjem naprave [3, 5] in razlago delovanja, ne pa tudi s fizično izvedbo. Eksperimentalno pospeševanje je omenjeno v [5], vendar je tudi tam težišče prispevka na modelu. Pri posnemanju gibanja z robotom moramo upoštevati, da lahko človek gibanje izvaja na različne načine, bistveno pa je, da zagotovi gibanje normale na ravnino naprave po plašču stožca. Pomembno je torej gibanje vrha roke. S tem prenesemo na robota gibanje normale na napravo po stožcu v globalnem KS. Kot rezultat izvedbe z robotsko roko pa je že zaradi razlik v kinematiki med človekom in robotom očitno, da bo gibanje notranjih koordinat pri robotu drugačno kot pri človeku.

Za izvedbo aplikacije je bil uporabljen robot Mitsubishi PA-10 s sedmimi prostostnimi stopnjami, od katerih pa smo uporabili samo dve: peto in šesto. Na vrh robota smo pritrdili JR3 senzor sil in navora, na katerega smo namestili držalo s Power[®]ballom. Eksperimentalno postavitev prikazuje slika 6.



Slika 6: Eksperimentalna namestitev na robota Figure 6. Experimental setup.

Hitrostno vodenje robota je bilo realizirano s frekvenco 100Hz v okolju MATLAB/SIMULINK.

5.1 Predprogramirano vodenje robota

Pri prenosu gibanja na robota smo morali zagotoviti spreminjanje orientacije naprave okoli dveh osi globalnega KS, kar lahko izvedemo z dvema PS robota. Obema smo sinusno spreminjali hitrost. S faznim zamikom $\pi/2$ med krmilnima signaloma smo zagotovili krožen gib, kakršnega izvaja tudi človek. Izvedli smo dva poskusa: kroženje s konstantno frekvenco in kroženje z enakomerno pospešeno frekvenco. Začetno hitrost rotorja smo vsakič zagotovili s potegom vrvice, navite okoli rotorja, kar stori tudi človek. Brez tega Power[®]balla ni mogoče pognati.

Ob kroženju vrha robota s konstantno frekvenco v=1Hz se hitrost vrtenja rotorja ustali na približno 190 rad/s. Slika 7 prikazuje izmerjene navore v smereh osi x in y senzorja med vrtenjem vrha robota z v=1Hz.

Ta slika glede na sliko 4 kaže podobnost robotskega gibanja s človekovim. Po pričakovanjih sta na obeh slikah vidni krivulji s fazo $\pi/2$. Podobno kot v enačbah (9-11) vpeljemo spremenljivko ϕ , s tem da namesto orientacije v enačbo (10) vstavim hitrosti pete in šeste PS robota dq_5 in dq_6 . Spreminjanje ϕ med predprogramiranim pospeševanjem robota z empirično določenim pospeškom 0.03Hz/s prikazuje slika 8. Vidno je, da se na začetku ϕ med pospeševanjem skorajda ne spreminja, torej sta smeri navora in hitrosti sinhronizirani. Pri hitrosti nad 450rad/s pa navor in hitrost nista več sinhronizirana in kljub čedalje hitrejšemu premikanju robota pride do zaviranja rotorja.



Slika 7: Merjeni navor pri v = 1Hz Figure 7. Measured torque at v = 1Hz.



Slika 8: ω_1 in ϕ med odptozančnim pospeševanjem Figure 8. ω_1 and ϕ during open loop acceleration.

5.2 Regulacija s PI regulatorjem

Meritve so pokazale, da se ϕ pri različnih konstantnih hitrostih rotorja ustali na nižjih vrednostih za višje hitrosti. To ugotovitev smo uporabili kot strategijo vodenja. S primerno počasnim pospeševanjem lahko z zmanjševanjem ϕ povečujemo hitrost. Za referenco smo določili empirično izbrano vrednost ϕ . Ko regulator manjša ϕ , hkrati povečuje frekvenco v, kar povečuje rotacijsko hitrost rotorja ω_1 , če so navori in hitrosti sinhronronizirani. Uporabili smo PI regulator, ki je določen z

$$\nu = \nu_0 + k_p e_{\phi} + \int k_i e_{\phi} dt , \qquad (12)$$

kjer je e_{ϕ} določen z razliko med želeno in merjeno vrednostjo ϕ

$$e_{\phi} = \phi_d - \phi_m \,. \tag{13}$$

v je frekvenca krožnega giba, k_p in k_i pa sta ojačenji proporcionalnega in integralnega dela. Vrednosti parametrov so bile določene empirično, in sicer za k_p 0.0002 ter za k_i 0.00025. Rezultate prikazuje slika 9. S PI regulatorjem smo dosegli hitrosti do 800rad/s. Slabost tega regulatorja je, da je pri majhni hitrosti rotorja pospešek največji.

5.3 Regulacija z mehkim regulatorjem

Da bi izboljšali regulacijo, smo izvedli vodenje z mehkim regulatorjem, kjer smo spreminjali parametre regulatorja v odvisnosti od rotacijske hitrosti rotorja in ϕ . S tem smo dosegli hitrejše pospeševanje pri večjih hitrostih in nižji fazi.



Slika 9: ω_1 in ϕ med pospeševanjem s PI regulacijo Figure 9. ω_1 and ϕ during PI-controlled acceleration.



Slika 10: Spreminjanje k_p glede na ϕ in ω_1 Figure 10. k_p as function of ϕ and ω_1 .

Regulator podajajo naslednje enačbe

$$k_{p} = k_{p}^{'} + k_{p\omega} \arctan(w_{1} - w_{c}),$$

$$k_{i} = k_{i}^{'} + k_{i\omega} \arctan(w_{1} - w_{c}),$$
(14)

 k'_{n} in k'_{i} pa izračunamo po

$$k'_{p} = \sum_{j=1}^{3} \mu_{j}(\phi) k_{p,j}, \qquad k'_{i} = \sum_{j=1}^{3} \mu_{j}(\phi) k_{i,j}, \qquad (15)$$

 μ so trikotne pripadnostne funkcije, $k_{p\omega}$ in $k_{i\omega}$ priredijo vpliv ω_1 na primerno vrednost in ω_c =420rad/s je konstanta. Odvisnost parametra k_p od dosežene faze ϕ in hitrosti rotorja ω_1 prikazuje slika 10. Prikaz k_i je vzporeden prikazani površini za k_p .

S spreminjanjem parametrov dosežemo, da je pospeševanje pri večjih hitrostih hitrejše. Dosegli smo hitrosti do 840rad/s. Rezultate prikazuje slika 11.

228 Gams, Lenarčič, Žlajpah

Opazno je znatno povečanje pospeška pri hitrosti 420 rad/s, kot je to določil regulator, za katerega smo uporabili tri trikotne pripadnostne funkcije in odvisnost od hitrosti. Vrednosti za k_p in k_i so bile določene empirično, in sicer za k_p 0.0004, 0.0002 in 0.00016, za k_i pa 0.0005, 0.00025 ter 0.0002.



Slika 11: ω_1 in ϕ med regulacijo z mehkim regulatorjem Figure 11. ω_1 and ϕ during fuzzy controlled acceleration.

Na prikazu ϕ so opazne konice, ki lahko nastanejo zaradi prepočasnega pospeševanja. Rotor prehiti gibanje robota in ϕ preskoči, kar je med poskusom tudi slišno.

5.4 Hitrostna regulacija



Slika 12: Rezultati hitrostne regulacije Figure 12. Results of velocity control.

Slika 12 prikazuje rezultate zaprtozančnega vodenja, kjer je bila vhodna hitrost empirično določena z $v = (1/1870)\omega_1$. S tem je razmerje hitrosti ω_1/ω_2 malce nad razmerjem radijev, podanim z enačbo (1), in rotor nenehno »lovi« premikanje ohišja. Vidi se, da v tem primeru konice ne nastanejo. Vendar ta primer ni najboljši, ker je zelo težko ponovljiv. Ob rahlem znižanju ω_1 se zniža tudi frekvenca vodenja, kar zopet zniža ω_1 . Na sliki 12 je vidna tudi motnja, ki nastopi po ustalitvi hitrosti. Je posledica okolja Windows, ki ne zagotavlja realnega časa.

6 Sklepi

V članku smo opisali posnemanje človekovega vodenja naprave Power[®]ball ter ga eksperimentalno realizirali z robotom. Naprava se giblje, kot da bi jo premikal človek, pospeševanje pa ni povsem podobno človekovemu, saj človek visoke hitrosti dosega precej hitreje, čeprav na podoben način.

Pokazali smo, da mora biti začetno pospeševanje majhno, pozneje pa lahko pospešek povečamo, kar potrjuje izkušnje, da je napravo težko pospešiti pri majhnih hitrostih.

Iz eksperimentov z različnimi načini vodenja z robotom se zdi najboljša kombinacija mehke in hitrostne regulacije. Z vnaprej definiranim gibanjem in sprotno regulacijo parametrov smo uspešno pospešili rotor naprave do hitrosti čez 840rad/s, s čimer smo dosegli hitrosti začetnika. Predvsem zaradi omejitev pri doseganju hitrih gibov z robotom nismo dosegli še večjih hitrosti. Kljub temu niso znani podobni ali boljši eksperimentalni rezultati, še zlasti ne pri posnemanju človekovega pristopa.

7 Literatura

- L. Žlajpah, Robotic yo-yo: modelling and control strategies, *Robotica*, 24(2), 211-220, 2006
- [2] S. Schaal, D. Sternad, C.G. Atkeson, One-handed Juggling: A Dynamical Approach to a Rhytmic Movement Task, *Journal of Motor Behaviour*, 28(2), 165-183, 1996
- [3] D. W. Gulick, O. M., O'Reilly, On the Dynamics of the Dynabee, J. of Applied Mechanics, 67(6), 321-325, 2000
- [4] A. L. Mishler, "Gyroscopic Device," U. S. Patent 3726146, 1973
- [5] B. Curk, Robotiziran Powerball®, B. Zajc, A. Trost, *Zbornik ERK 2006 Zvezek B*, 167-170 Portorož, Slovenija, 2006
- [6] D. Omrčen, B. Nemec, Measuring knee movement using an industrial robot – gravity compensation for the automatic gripper, *Strojniški vestnik*, **48**(2), 87-98, 2002

Andrej Gams je diplomiral leta 2003 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlen je kot mladi raziskovalec na Inštitutu »Jožef Stefan«.

Leon Žlajpah je diplomiral leta 1982, magistriral leta 1985 in doktoriral leta 1989 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Je raziskovalec in vodja odseka za Avtomatiko, biokibernetiko in robotiko na Inštitutu »Jožef Stefan«.

Jadran Lenarčič je diplomiral leta 1979, magistriral leta 1981 in doktoriral leta 1986 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Je raziskovalec na Inštitutu »Jožef Stefan« in profesor na Univerzi v Ljubljani. Od leta 2005 je direktor Inštituta »Jožef Stefan«.