

Robotizirani jojo: strategija vodenja z uporabo nelinearnih dinamičnih sistemov

Tadej Petrič, Andrej Gams, Leon Žlajpah

Institut "Jožef Stefan", Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: tadej.petric@ijs.si

Povzetek. V prispevku je predstavljena uporaba nelinearnih dinamičnih sistemov za izvajanje ritmičnih nalog. Za nalogo je bila izbrana naprava jojo. To je naprava, sestavljena iz dveh diskov, povezanih s tanko osjo. Vodenje naprave jojo je nelinearna dinamična naloga in zahteva nenehno adaptacijo frekvence izvajanja. Za vodenje te naloge je bil uporabljen imitacijski sistem, ki je sestavljen iz dveh nivojev. Prvi nivo sestavljajo prilagodljivi frekvenčni oscilatorji, njegova naloga pa je prilagajanje frekvence vhodnega signala. Naloga drugega nivoja je generiranje trajektorije. Ta nivo sestavlja sklop diferencialnih enačb. Zmogljivost imitacijskega sistema, da se lahko prilagodi frekvenci vhodnega signala, nam omogoča uspešno igranje naprave jojo. V prispevku so predstavljeni uporaba nelinearnega dinamičnega sistema za vodenje dinamičnih ritmičnih nalog in rezultati vodenja realnega sistema.

Ključne besede: posnemanje gibanja z robotom, periodične naloge, jojo, adaptivni oscilatorji

Robotic yoyo: a control strategy based on nonlinear dynamic systems

Extended abstract.

The paper presents the use of a nonlinear dynamic system to perform a certain rhythmic task. The object of the task was a device named yoyo. It is a toy made of two discs connected with a short thin axle, dynamic in nature, highly non-linear and requiring on-line adaptation of the frequency at which it is performed. The nonlinear dynamic system used to perform this task was of two layers. The first layer was used to adapt to the frequency of the input and was based on adaptive-frequency oscillators. The second layer was used to provide the desired trajectory and is based on a set of differential equations. The ability of the imitation system to adapt to the frequency of the input signal allowed us to successfully play with the yoyo. Results for real-world experiments are presented, thus validating the use of the proposed nonlinear dynamic system for controlling dynamic rhythmic tasks.

Key words: movement imitation with robot, periodic task, yoyo, adaptive oscillators

jojo kot žiroskopska naprava Powerball sta nelinearna dinamična sistema, ki za uspešno izvedbo zahtevata sinhronizirano gibanje upravljalca in naprave. Njuno vodenje je za človeka povsem preprosto. Izvedba teh nalog z roboti pa je zahteven problem, ki zahteva uporabo naprednih algoritmov vodenja in kompleksnih senzorskih sistemov [1, 2]. Generiranje robotske trajektorije in njeno moduliranje je v robotiki zahteven problem, ki za splošen sistem še ni rešen. Eden od pristopov je generiranje trajektorije s posnemanjem oz. imitacijo [7].

Robotske trajektorije lahko posnemamo na različne načine [8]. Preprosteje je, da si zapomnimo časovno indeksirane vektorje [9]. Večkrat se uporabijo bolj kompaktni zapisi trajektorij, npr. z uporabo zlepkov [10] ali pa verjetnostnih zapisov v obliki skritih modelov Markova [11]. Eden od kompaktnjših zapisov je tudi uporaba dinamičnih primitivov imenovanih DMP [12], ki trajektorijo zapišejo z vektorjem uteži, rekonstruirajo pa jo z linearno kombinacijo jedrnih funkcij. Dodatna prednost DMPjev je tudi zapis trajektorije z diferencialno enačbo drugega reda, ki zagotavlja zvezno in odvedljivo trajektorijo.

Pri izvajanju periodičnih nalog je bistveno določiti osnovno frekvenco gibanja [6]. Da lahko izločijo osnovno frekvenco gibanja, morajo sistemi posnemanja gibanja najprej obdelati demonstracijski signal [8]. V članku opisujemo uporabo sistema za posnemanje gibanja, ki deluje na podlagi DMP, kjer je določanje osnovne

1 Uvod

V zadnjih letih je v robotiki opaziti povečan razvoj algoritmov za izvajanje periodičnih oz. ritmičnih nalog [1, 2]. Med te naloge spadajo povsem vsakdanje naloge, kot je npr. hoja [3] ali rokovanje [4], ter naloge vodenja različnih naprav, kot sta npr. napravi jojo [1] in žiroskopska naprava imenovana Powerball [2, 5, 6]. Tako naprava

frekvence demonstracijskega signala vključeno v sam sistem. Tako sistem ne potrebuje nobene dodatne obdelave signala in omogoča sprotno prilagajanje frekvenci zunanega signala. Sistem deluje vzporedno v dveh nivojih. Prvi nivo določa frekvenco merjenega signala, drugi pa zagotavlja sledenje obliki trajektorije. Dvonivojski sistem posnemanja gibanja, ki smo ga uporabili za izvedbo periodične naloge vodenja naprave jojo, temelji na frekvenčno prilagodljivih oscilatorjih in nelinearnih dinamičnih sistemih [8] oz. DMPjih. V [8] so avtorji pokazali, da je sistem uporaben za določanje frekvence vhodnega signala, učenje oblike ene periode vhodnega signala in posnemanje naučenega signala s poljubno frekvenco in amplitudo. V tem prispevku bomo pokazali, da se lahko podobno strukturiran sistem uporabi za vodenje dinamičnih nelinearnih periodičnih nalog, kot je vodenje naprave jojo.

Robotsko vodenje naprave jojo je že bilo predmet več raziskav [1, 13, 14]. Razviti so bili namenski algoritmi vodenja s klasičnim pristopom na podlagi modeliranja sistemov. Naš raziskovalni izziv je namesto klasičnega pristopa z matematičnim modeliranjem uporabiti pristop, ki se zgleduje po človeku. Povprečni uporabniki te naprave o dinamiki ne vedo kaj dosti, kljub temu pa se večina kaj hitro nauči uporabljati napravo. Podobno velja tudi za predlagani imitacijski sistem, saj ta ne temelji na modelih vodene naprave, temveč je odvisen le od merljivega periodičnega signala. Takšna struktura vodenja bistveno poenostavi sinhronizacijo robota z zadano nalogo in omogoča preprosto doseganje človeku podobnih rezultatov pri izvajanju nalog, ki zahtevajo sinhronizacijo z vodeno napravo.

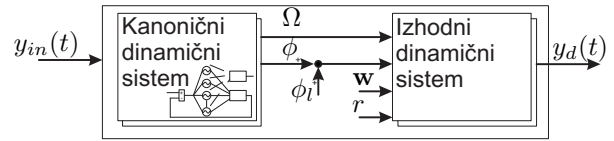
V naslednjih poglavjih je najprej podan opis predlaganega sistema vodenja (2. poglavje). V 3. poglavju je opisan eksperimentalni sistem in dokumentirani so rezultati vodenja. Sklepi so podani v 4. poglavju.

2 Imitacijski sistem

Imitacijski sistem je bil podrobno opisan za uporabo v cikličnih periodičnih nalogah v [8]. Avtorji so pokazali, da je sistem uporaben za določanje frekvence vhodnega signala, učenje oblike ene periode in posnemanje naučenega signala pri poljubni frekvenci in amplitudi. V tem prispevku je predstavljena uporaba imitacijskega sistema za določanje frekvence periodične naloge, sinhronizacije robota s specifično nalogo in modulacijo preddefinirane trajektorije. Predlagana struktura vodenja omogoča vodenje različnih periodičnih nalog, ki imajo vsaj eno merljivo periodično veličino.

Strukturo imitacijskega sistema sestavljata dva nivoja, kot to prikazuje slika 1. Prvi nivo predstavlja kanonični dinamični sistem (nabor diferencialnih enačb). Naloga na tem nivoju je izločiti osnovno frekvenco vhodnega signala, ki je katerakoli merljiva periodična veličina. Če se

imitacijski sistem uporabi za učenje trajektorije, kot v [8], je zelena trajektorija enaka vhodnemu signalu. Drugi nivo sistema je izhodni dinamični sistem, katerega izhod je zelena trajektorija robota. Diferencialne enačbe tega sistema so drugega reda, kar zagotavlja gladko in odvedljivo trajektorijo. Izhodni signal sestavimo z linearno kombinacijo utežnih in jedrnih funkcij ψ .



Slika 1. Predlagana dvonivojska struktura sistema vodenja. Vhod v sistem je merjena periodična veličina y_{in} , izhod je zelena trajektorija robota y_d . ϕ_l je fazni zamik med vhodnim in izhodnim signalom in r je parameter amplitude izhodnega signala

Figure 1. Proposed two-layered structure of the control system. The input y_{in} is a measured periodic quantity and the output is the desired trajectory y_d of the robot. ϕ_l is the phase lag between the input and the output signal and r is the amplitude parameter

Algoritem imitacijskega sistema je naslednji. Kanonični dinamični sistem izloči osnovno frekvenco Ω in fazo ϕ . Ti veličini sta povezani z izhodnim dinamičnim sistemom in določata frekvenco zelene trajektorije. Oblika trajektorije je podana z vnaprej naučenim vektorjem uteži w in jedrnimi funkcijami ψ . Trajektorija se sinhronizira s frekvenco Ω s sidranjem jedrnih funkcij ψ na fazo ϕ . Naslednji poglavji podrobno opisujeta posamezna nivoja imitacijskega sistema.

2.1 Kanonični dinamični sistem

Naloga kanoničnega sistema je izločiti osnovno frekvenco Ω , zagotoviti stabilno ciklično obnašanje sistema in s tem določiti fazo ϕ . Kanonični dinamični sistem sestavlja množica frekvenčno prilagodljivih faznih oscilatorjev [15, 16]. Oscilatorji so združeni v povratno zanko [8, 17], kot to prikazuje slika 2.

Matematična struktura M adaptivnih frekvenčnih oscilatorjev je podana z enačbami:

$$\dot{\phi}_i = \omega_i - K e(t) \sin \phi_i, \quad (1)$$

$$\dot{\omega}_i = -K e(t) \sin \phi_i, \quad (2)$$

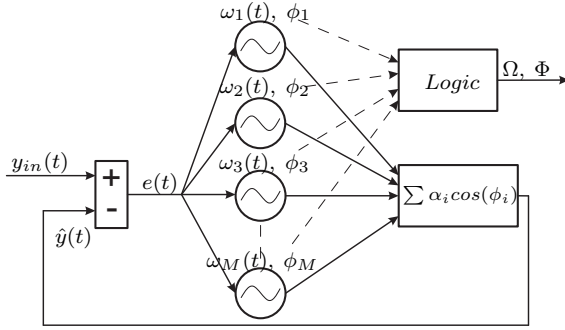
$$e(t) = y_{in}(t) - \hat{y}(t), \quad (3)$$

$$\hat{y}(t) = \sum_{i=1}^M \alpha_i \cos \phi_i, \quad (4)$$

$$\dot{\alpha}_i = \eta e(t) \cos \phi_i, \quad (5)$$

kjer je K konstanta medsebojne povezanosti, ϕ_i faza i -tega oscilatorja, $e(t)$ vhod v oscilatorje, y_{in} vhodni signal, M število oscilatorjev, α_i amplituda i -tega oscilatorja in η konstanta učenja.

Vsi oscilatorji imajo enak vhodni signal $e(t)$, kot to prikazuje slika 2. Zaradi negativne povratne zanke (3),



Slika 2. Povratnozačna struktura M nelinearnih frekvenčno prilagodljivih oscilatorjev
Figure 2. Feedback structure of M nonlinear adaptive frequency oscillators

se razlika med vhodnim signalom in vsoto posameznih faznih signalov približuje ničli. Takšna struktura se lahko prilagodi različnim frekvenčnim komponentam vhodnega signala. Število frekvenčnih komponent je odvisno od števila uporabljenih frekvenčnih oscilatorjev. Ker je za izvajanje periodičnega giba pomembna samo osnovna frekvenca, sledi strukturi logični blok, ki določi osnovno frekvenco. Izbira oscilatorja z osnovno frekvenco je pomembna, saj izbrani oscilator poganja drugi nivo imitacijskega sistema.

Kanonični dinamični sistem se lahko uporabi tudi kot samostojen imitacijski sistem [17]. Z dodanim izhodnim dinamičnim sistemom zagotovimo predvsem večjo robustnost sistema na različne perturbacije in možnost kompleksnih trajektorij z majhnim številom oscilatorjev.

2.2 Izhodni dinamični sistem

Izhodni dinamični sistem se uporablja za generiranje in moduliranje oblike izhodnega signala. Kot je prikazano na sliki 1, so vhodi v izhodni dinamični sistem: osnovna frekvenca Ω , faza ϕ , amplituda trajektorije r in vektor uteži w . Ta vektor skupaj z diferencialnimi enačbami in jedrnimi funkcijami ψ določa obliko izhodnega signala drugega reda.

Enačbe (6-11) veljajo za eno prostostno stopnjo signala. Za več prostostnih stopenj se algoritem poveže vzporedno. Obnašanje dinamičnega sistema je naslednje: trajektorija y potuje proti sidrišču g , kar podaja enačba

$$\dot{z} = \Omega \left(\alpha_z (\beta_z (g - y) - z) + \frac{\sum_{i=1}^N \psi_i w_i r}{\sum_{i=1}^N \psi_i} \right), \quad (6)$$

$$\dot{y} = \Omega z. \quad (7)$$

V tem primeru je Ω frekvenca, dobljena iz kanoničnega dinamičnega sistema, α_z in β_z sta pozitivni konstanti,

ki zagotavljata, da sistem monotono konvergira k trajektoriji, ki oscilira okoli sidriščne točke g . N je število jedrnih funkcij. Parameter r določa amplitudo izhodnega signala. Nelinearen člen v enačbi (6) določa zeleno obliko trajektorije z množenjem jedrnih funkcij in vnaprej definirane vektorja uteži w ($w_i \in w$, $i = 1, \dots, N$). Jedrne funkcije ψ imajo Gaussovo obliko in so podane z enačbo

$$\psi_i = \exp(h(\cos(\phi - c_i) - 1)). \quad (8)$$

Njihovo širino določa h , porazdeljenost na eni periodi pa c_i . V našem primeru je c_i enakomerno porazdeljen med 0 in 2π v N korakih.

Predlagani dvonivojski imitacijski sistem se lahko uporabi ne samo za generiranje in moduliranje izhodnega signala, temveč tudi za učenje nove trajektorije. Ta prispevek se osredinja na generiranje in moduliranje izhodnega signala. Kot je bilo prikazano v [8], se lahko sistem uporabi tudi za učenje nove trajektorije, in sicer tako, da se v vsakem koraku spremeni vektor uteži w z metodo progresivne lokalne utežnostne regresije (ang. incremental locally weighted regression) [18]. S podanim ciljem $f_{targ}(t)$ in $r(t)$ je posodobitev w_i v rekurziji podana z

$$w_i^{t+1} = w_i^t + \Psi_i P_i^{t+1} r(t) e_r(t), \quad (9)$$

$$P_i^{t+1} = \frac{1}{\lambda} \left(P_i^t - \frac{P_i^{t2} r^{t2}}{\frac{\lambda}{\Psi_i} + P_i^t r^{t2}} \right), \quad (10)$$

$$e_r(t) = f_{targ}(t) - w_i^t r(t). \quad (11)$$

Začetno stanje rekurzije je $w_i = 0$ in $P_i = 1$, kjer je $i = 1, \dots, N$. S tem algoritmom smo določili utežnostni vektor za vnaprej definirano trajektorijo za vodenje naprave jojo. Rezultate učenja želene trajektorije prikazuje slika 4.

Dodatna prednost izhodnega dinamičnega sistema je gladko moduliranje izhodnega signala. To je pomembno, kadar imamo opravka s hitrimi dinamičnimi nalogami.

3 Vodenje naprave jojo

V tem poglavju je predstavljena uporaba imitacijskega sistema za robotsko vodenje naprave jojo. Na eksperimentalnem sistemu je predstavljena uporaba imitacijskega sistema z merjeno silo v povratni zanki in z relativnim položajem naprave jojo v povratni zanki. Uporabili smo različni napravi jojo. Njuni parametri so podani v tabeli 1.

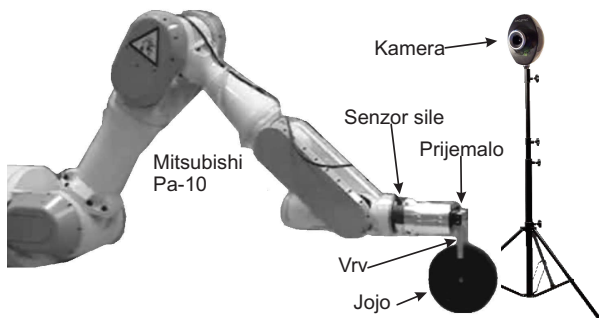
Opravljen so bile različne raziskave ter izpeljani različni algoritmi za vodenje naprave jojo [1, 13, 14]. Ti algoritmi se med seboj ločijo glede na merjeno veličino, ki je v povratni zanki. Na primer, veličina je lahko relativna višina naprave jojo, ki se lahko meri z uporabo računalniškega vida. Kot je opisano v [1], je pri

Tip	r_a [m]	l [m]	m [kg]
A	0.01	0.85	0.2564
B	0.01	0.7	0.2564

Tabela 1. Parametri naprav jojo, uporabljenih v eksperimentih
Table 1. yoyo parameters used in experiments

človeku informacija o višini ključna za uspešno igranje z napravo. V [13] so avtorji pokazali, da za uspešno robotsko vodenje naprave jojo zadostuje tudi samo merjenje sile na vrvici. V obeh primerih algoritma vodenja temeljita na natančnem poznavanju dinamičnega obnašanja naprave. V tem prispevku pa je namesto klasičnega modeliranja uporabljen pristop, ki posnema človeka. Vodenje ne temelji več na modelih vodene naprave, temveč je odvisno le od poljubnega periodično merljivega signala. Takšna struktura vodenja bistveno poenostavi sinhronizacijo robota z napravo. Sinhronizacija ne temelji več na poznavanju dinamike naprave jojo, temveč se vzpostavi s pomočjo frekvence in trenutne faze merjenega periodičnega signala. To prinese dodatno prednost, saj je vhodni signal lahko katerakoli merljiva periodična veličina vodene naprave.

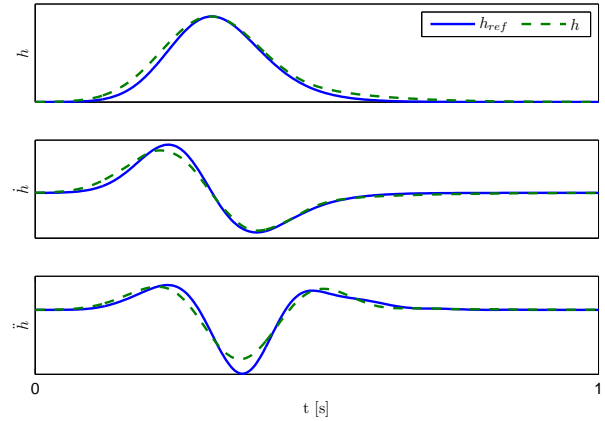
Za izvedbo eksperimenta je bil uporabljen robot Mitsubishi PA-10 s sedmimi prostostnimi stopnjami. Na vrh robota smo pritrčili senzor sil in navora JR3, nanj pa dvoprstno prijemalo. V poglavju 3.2 je prikazana dodatna uporaba kamere, s katero smo merili relativno višino naprave jojo. Eksperimentalno postavitev podaja slika 3. Implementacija imitacijskega sistema je izvedena v okolju MATLAB/SIMULINK s frekvenco 100 Hz.



Slika 3. Eksperimentalni sistem
Figure 3. Experimental setup

Za izvedbo kakršnekoli naloge z napravo jojo je treba najprej definirati obliko trajektorije v eni periodi. Uporabili smo vzorec, ki je opisan v [1]. Vzorec temelji na analizi gibanja naprave in omogoča vodenje naprave jojo. Obliko zelene pozicije h , hitrosti \dot{h} in pospeška \ddot{h} podaja slika 4.

Utežnostni vektor w za obliko trajektorije na sliki 4 smo določili s pomočjo algoritma, opisanega z enačbami (9) - (11). Naučeni signal je prikazan s črtno črto na

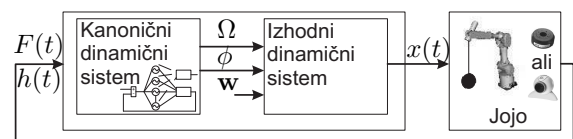


Slika 4. Vnaprej definirana oblika trajektorije vrha roke za igranje z napravo jojo
Figure 4. Pre-defined hand motion pattern for playing yoyo

sliki 4. Utežnostni vektor je osnova za kreiranje izhodnega signala iz imitacijskega sistema. Frekvenca in faza izhodnega dinamičnega sistema ter s tem tudi sinhronizacija robota z zadano nalogo je določena s kanoničnim dinamičnim sistemom. Gibanje robota smo omejili v eni smeri (gor-dol) s pomočjo inverznega kinematičnega modela. V nadaljevanju so predstavljeni rezultati vodenja z merjeno silo v povratni zanki (poglavje 3.1) in merjenim položajem v povratni zanki (poglavje 3.2).

3.1 Vodenje pri sinhronizaciji z merjeno silo

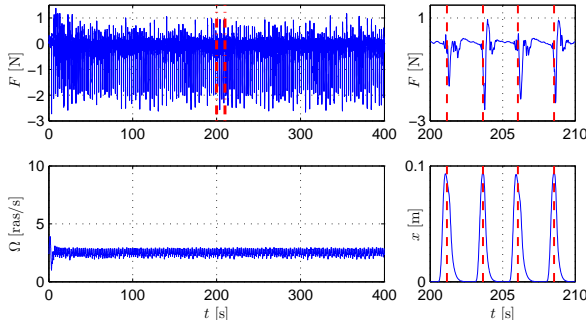
Shema vodenja ob sinhronizaciji z merjeno silo je predstavljena na sliki 5. Kot je razvidno, imitacijski sistem generira in modulira želeno trajektorijo vrha robota, na katerem je pritrjena naprava jojo. Sila F , ki se meri s senzorjem sil in navorov JR3 na vrhu robota, zaključuje povratno zanko vodenja.



Slika 5. Predlagana dvonivojska struktura za vodenje naprave jojo s silo ali relativnim položajem v povratni zanki
Figure 5. Proposed two-layered structure of the control system for playing with yoyo, using force feedback or relative height of the jojo as a feedback

Rezultati frekvenčne adaptacije so predstavljeni na sliki 6. Na zgornjem levem diagramu je predstavljena merjena sila v časovnem okviru od 0 do 400 s. Ker je oblika in frekvenca pulzov čez celotni časovni okvir enaka, sklepamo, da je naprava jojo dosegla stabilno delovanje.

Podrobnejši vpogled v obliko merjene sile F podaja zgornji desni graf, kjer je časovni okvir od 200 do 210 s. S primerjavo desnih grafov opazimo, da je imitacij-



Slika 6. Vodenje naprave jojo s silo F v povratni zanki (zgornja grafa). Trajektorija robota v smeri x (spodnji desni graf) in frekvenca Ω (spodnji levi graf). Jojo tipa A
Figure 6. Playing yoyo by measuring only the force F (top plots). Robot trajectory x (bottom left plot) and the extracted frequency Ω (bottom right plot). Yoyo: type A

skemu sistemu uspelo sinhronizirati gibanje robota x z merjeno silo F , ki v tem primeru pomeni merljivo periodično veličino vodene naprave. Na spodnjem levem grafu je ponazorjena frekvenca Ω , kjer opazimo nihanje okoli določene srednje vrednosti. Vzrok za nihanje okoli srednje vrednosti je v obliki vhodnega signala (sile F), katerega smo zaradi boljše konvergence imitacijskega sistema in povečanja razmerja med šumom in koristim signalom preoblikovali tako, da smo mu povečali njegovo površino.

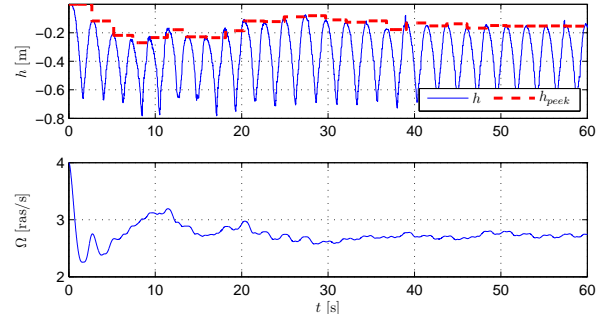
3.2 Vodenje pri sinhronizaciji z merjenim relativnim položajem

V tem podpoglavju je predstavljena implementacija imitacijskega sistema za vodenje naprave jojo z merjenim položajem v povratni zanki. Relativni položaj naprave glede na vrh robota se lahko uspešno določi s pomočjo merilnega videosistema. V prispevku [1] avtor pravi, da človek za igranje z napravo jojo potrebuje vizualno informacijo o trenutnem položaju naprave.

Prav tako kot v poglavju 3.1 je tudi v tem poglavju uporabljen enak princip vodenja, kar ponazarja shema na sliki 5. V tem primeru je vhodni signal v imitacijski sistem relativni položaj naprave jojo.

Kot je prikazano na spodnjem grafu na sliki 7, se frekvenca Ω hitro prilagodi frekvenci gibanja naprave jojo. S tem dosežemo stabilno obnašanje naprave. Potek gibanja naprave jojo je prikazan na zgornjem grafu na sliki 7, kjer je s črtkano črto ponazorjena največja višina, ki jo naprava doseže v eni periodi. Opazimo, da se kljub temu, da je amplituda giba konstantna, maksimalna višina naprave jojo spreminja. To je posledica nihanja same naprave jojo, ki lahko na trenutke povzroči povečanje trenja med vrvmjo in njenima diskoma, kar posledično zmanjša doseženo največjo višino naprave.

Frekvenca naprave jojo je odvisna od njenih parametrov in od največje višine, ki jo doseže v eni pe-



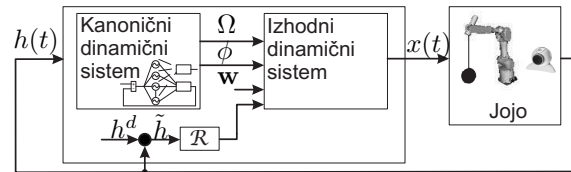
Slika 7. Vodenje naprave jojo z merjenjem relativne višine h (zgornji graf). Jojo tipa B
Figure 7. Playing yoyo by measuring the relative height h (the top plot). Yoyo: type B

riodi. Na to višino lahko vplivamo z velikostjo amplitude giba. Amplitudna modulacija je z uporabo imitacijskega sistema preprosta in se doseže s spremembo parametra r (glej enačbo (6) in sliko 1).

Z uvedbo reguliranja parametra r dosežemo regulacijo maksimalne višine naprave jojo v eni periodi. Vhod v regulator je razlika med referenčno in največjo vrednostjo položaja naprave v eni periodi. Uporabili smo PI regulator

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt, \quad (12)$$

s parametroma $k_p = 2$ in $k_i = 0.4$. Parametra smo določili empirično.

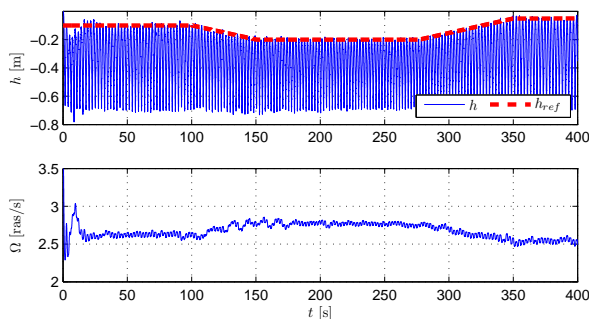


Slika 8. Predlagana dvonivojska struktura za reguliranje največje višine, ki jo naprava jojo doseže v eni periodi
Figure 8. Proposed two-layered structure of the control system for regulating the peak height of the yoyo

Rezultati regulacije največje višine, ki jo naprava jojo doseže v eni periodi, so podani na sliki 9. Izkaže se, da potem ko se imitacijski sistem sinhronizira z napravo, kar ponazarja frekvenca Ω (spodnji graf), ta dobro sledi referenčni vrednosti. Doseženo vodenje naprave je stabilno. Določena odstopanja, ki so opažena v merjeni relativni višini, so bodisi posledica napake merilnega sistema bodisi posledica že opisanega nihanja naprave jojo.

4 Sklep

Najpomembnejši prispevek tega dela je uvedba imitacijskega sistema v vodenje dinamičnih ritmičnih nalog, ki so nelinearne in hkrati zahtevajo sinhronizacijo gibanja



Slika 9. Vodenje naprave jojo z reguliranjem relativne višine h (zgornji graf). Jojo tipa B
Figure 9. Regulating the peak height of the yoyo by measuring the relative height h (the top plot). Yoyo: type B

robotu z vodeno napravo. Zaradi preproste uporabe in robustnosti, ki jih prinaša predlagani imitacijski sistem, je ta primeren za vodenje takšnih nalog. Pomembno je le, da je vhod v imitacijski sistem ena periodično merljivih veličin sistema. Na primeru naprave jojo so prikazani eksperimentalni rezultati uporabe imitacijskega sistema. Izkaže se, da kljub temu, da je naloga dinamična, nelinearna in periodična, imitacijskemu sistemu uspe pravilno in dovolj hitro razbrati frekvenco in sinhronizirati gibanje robotu z gibanjem naprave.

Dodatno je bilo na primeru jojo pokazano, da je sistem neodvisen od vhodne merilne veličine, dokler je ta ena merljivih periodičnih veličin. V obeh predstavljenih primerih, merjenje sile ali merjenje relativnega položaja, je sistemu uspelo hitro razbrati pravilno frekvenco in vzpostaviti stabilno delovanje naprave. Po do zdaj objavljenih podatkih je ta sistem edini, ki je brez bistvenih sprememb algoritma vodenja sposoben voditi napravo jojo, ne glede na izbrani merjeni signal. Z uvedbo regulacijske zanke za parameter r , ki omogoča amplitudno modulacijo trajektorije, smo dosegli tudi regulacijo največje višine, ki jo naprava jojo doseže v eni periodi na realnem sistemu.

5 Literatura

- [1] L. Žlajpah, Robotic yo-yo: modeling and control strategies, *Robotica*, Vol 24(2), pp. 211–220, 2005.
- [2] P. Cafuta in B. Curk, Neholonomsko robotsko breme, *Elektrotehniški vestnik*, Vol. 76(3), pp. 103–107, 2009.
- [3] A.J. Ijspeert, Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: a review, *Neural Networks*, Vol. 21(4), 2008.
- [4] T. Kasuga in M. Hashimoto, Human-robot handshaking using neural oscillators, *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Spain (Barcelona), April, Vol. 4, pp. 3802–3807, 2005.
- [5] A. Gams, J. Lenarčič in L. Žlajpah, Vrtenje žiroskopske naprave z robotom, *Elektrotehniški vestnik*, Vol. 74(4), pp. 223–228, 2007.
- [6] T. Petrič, A. Gams in L. Žlajpah, Modeling and control strategy for robotic powerball, *Proc. Int. Conf. Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, RAAD*, Romania (Brasov), May 25–27, 2009.
- [7] S. Schaal, Is imitation learning the route to humanoid robots?, *Trends in cognitive sciences*, Vol 3(6), pp. 233–248, 1999.
- [8] A. Gams, A. J. Ijspeert, S. Schaal in J. Lenarčič, On-line learning and modulation of periodic movements with nonlinear dynamical systems, *Autonomous Robots*, Vol. 27(1), pp. 3–23, 2009.
- [9] S. Kawamura in N. Fukao, Interpolation for input torque patterns obtained through learning control, *Proc. Int. Conf. Automation, robotics and computer vision (ICARCV'94)*, 1994.
- [10] A. Ude, C. G. Atkeson, in M. Riley, Planning of joint trajectories for humanoid robots using B-spline wavelets, *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, California (San Francisco), April, pp. 2223–2228, 2000.
- [11] S. Calinon in A. Billard, Recognition and reproduction of gestures using a probabilistic framework combining PCA, ICA and HMM, *Proc. Int. Conf. Machine Learning (ICML)*, Germany (Bonn), August, pp. 105–112, 2005.
- [12] S. Schaal, J. Peters, J. Nakanishi, in A. Ijspeert, Learning movement primitives, *International Symposium on Robotics Research (ISRR2003)*, Springer Tracts in Advanced Robotics, Ciena, Italy: Springer, 2004.
- [13] H. Jin, Q. Ye, in M. Zacksenhouse, Return maps, parameterization, and cycle-wise planning of yo-yo playing, *IEEE Trans. Robotics*, In press, 2009.
- [14] A. Gams, T. Petrič in L. Žlajpah, Controlling yo-yo and gyroscopic device with nonlinear dynamic systems, *Proc. Int. Conf. Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, RAAD*, Romania (Brasov), May 25–27, 2009.
- [15] J. Buchli in A. Ijspeert, A simple, adaptive locomotion toy-system, *Proc. Int. Conf. Simulation of Adaptive Behavior (SAB'04)*, MIT Press, pp. 153–162, 2004.
- [16] L. Righetti, J. Buchl in A. Ijspeert, Dynamic hebbian learning in adaptive frequency oscillators, *Physica*, Vol. D 216(2) pp. 269–281, 2006.
- [17] L. Righetti in A. Ijspeert, Programmable central pattern generators: an application to biped locomotion control, *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1585–1590, 2006.
- [18] S. Shall in C. G. Atkeson, Constructive incremental learning from only local information, *Neural Computation*, Vol. 10(8), pp. 2047–2084, 1998.

Tadej Petrič je diplomiral leta 2008 na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru. Zaposlen je kot mladi raziskovalec na Institutu "Jožef Stefan".

Andrej Gams je diplomiral leta 2003 in doktoriral leta 2009 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlen je kot raziskovalec na Institutu "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 Institutu "Jožef Stefan".