

Sistem za stabilizaciju loptice na pokretnoj ploči

U ovom radu je opisan sistem za stabilizaciju loptice na pokretnoj ploči. Sistem se sastoji od bele ploče na mehaničkom zglobu sa dve ose rotacije povezane sa dva servo motora, kamere koja snima ploču duž vertikalne ose, crne ping-pong loptice, računara koji vrši obradu podataka i mikrokontrolera koji se ponaša kao drajver za motore. Projektovan je regulator koji na osnovu pozicije loptice, odnosno njenog odstupanja od željenog položaja, posredstvom motora i mehaničkog sklopa dovodi lopticu na željenu poziciju. Sistem je sposoban da autonomno dovede lopticu na prethodno zadatu poziciju na ploči kao i da je navodi po zadatoj putanji.

Uvod

Sistem loptice i ploče (eng. ball and plate system, slika 1) je nestabilan sistem. Kada se loptica kreće po ploči, ukoliko ne postoji kontrolni mehanizam, loptica će se otkotrljati sa ploče. Stoga je neophodno projektovati upravljački mehanizam koji će naginjati ploču tako da loptica dođe na predefinisani položaj.

Primena ovakvog sistema se može pronaći u robotskoj manipulaciji okruglim predmetima. Takođe, sistem loptice i ploče je klasičan primer sistema za automatsko upravljanje, stoga primenu nalazi i u edukaciji.

Različiti upravljački sistemi se mogu primeniti na ovakvom sistemu:

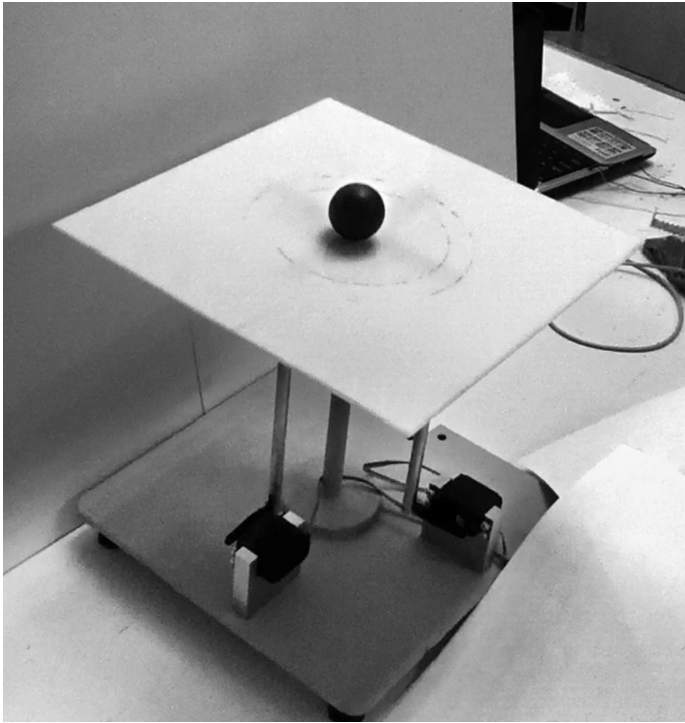
- zaustavljanje loptice na bilo kojem mestu u najkraćem mogućem roku
- pozicioniranje loptice na predefinisani položaj
- usmeravanje loptice da se kreće po unapred definisanoj putanji

Da bi sistem mogao reagovati u skladu sa položajem loptice neophodno je imati podatak o tome gde se loptica nalazi. Senzor koji obavlja ovaj zadatak treba da bude brz, precizan i jeftin. Tri tipa senzora su najčešće predlagana:

*Damjan Dakić (1993),
Beograd, Đuke Dinić
10, učenik 3. razreda
Računarske gimnazije
u Beogradu*

*MENTORI:
Darko Todorović,
Elektronski fakultet
Univerziteta u Nišu*

*Aleksandra Trivunac,
student
Elektrotehničkog
fakulteta Univerziteta
u Beogradu*



Slika 1. Sistem loptice i ploče opisan u radu

Figure 1. Ball and plate system described in the paper

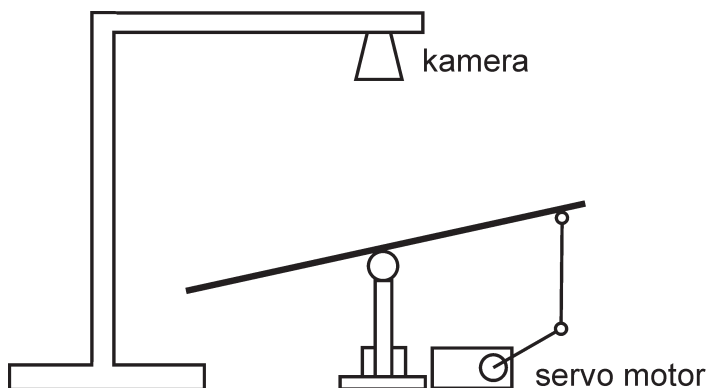
- mreža infracrvenih senzora (parova infracrvenih emitera i prijemnika smeštenih na suprotnim stranama ploče)
- ploča osetljiva na dodir (eng. touch pad)
- kamera

Dobre karakteristike mreže infracrvenih senzora su da je taj tip senzora brz i jeftin. Međutim, kako se na ograničenom prostoru može smestiti konačan broj senzora, rezolucija koju ovakav senzor može postići nije velika.

Ploča osetljiva na dodir je brz i precizan senzor, međutim problem sa njom se pojavljuje u slučaju kada loptica odskoči sa ploče. U tom slučaju gubi se podatak o položaju loptice.

Kamere mogu imati visoku rezoluciju (480×320 do 1280×1024), međutim njihova mana u odnosu na ostale senzore jeste frekvencija odabiranja (eng. Frame rate) koja se u proseku kreće oko 30 Hz što je znatno sporije od ostalih senzora. Brže kamere su obično znatno skuplje. Za ovaj rad, kao senzor, iskorišćena je kamera jer ima veliku rezoluciju i jer je moguće izdvojiti podatak o položaju loptice čak i kad ona odskoči sa ploče. Jedan frejm na svaku tridesetinu sekunde se smatra dovoljno brzim uzevši u obzir očekivanu brzinu kojom će se loptica kretati odnosno put koji loptica može preći za to vreme, kao i funkciju samog uređaja.

U ovom radu opisan je i projektovan upravljački mehanizam koji će naginjati ploču tako da loptica dođe na predefinisani položaj.



Slika 2.
Skica sistema

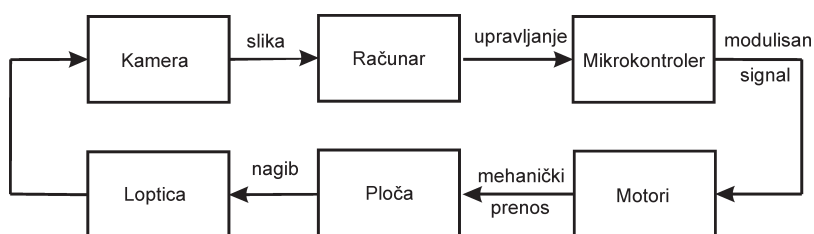
Figure 2 Sketch of the system.

Aparatura i metod

Aparatura

Aparatura (slika 2, slika 3) se sastoji od:

- bele, ravne ploče postavljene na mehanički zglob sa dve ose rotacije
- crne ping-pong loptice
- dva RC servo motora sa uglom slobode 90°
- kamere koja snima u rezoluciji 640×480 brzinom od 30 fps
- računara sa programom koji služi za obradu slike i u koji je implementiran PD regulator
- mikrokontrolera PIC24 koji je iskorišćen kao drajver za RC servo motore



Slika 3.
Blok šema sistema

Figure 3. Block diagram of the system

Obrada slike

Cilj programa za obradu slike (slika 4) jeste da sa slike koju dobija sa kamere izdvoji lopticu, odredi njen centar i na osnovu ugla pod kojim se nalazi ploča odredi poziciju loptice na ploči. Za ugao pod kojim se ploča trenutno nalazi se uzima ugao iz poslednje poslate instrukcije motorima.

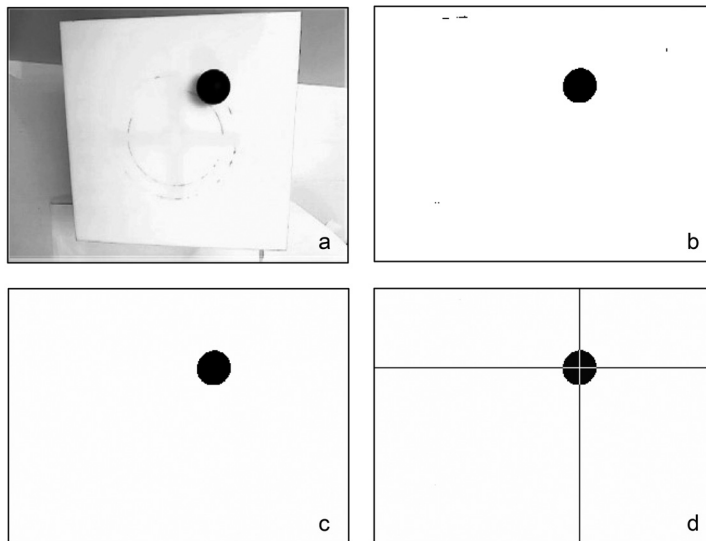
Slika dobijena sa kamere se prebacuje u jednokanalnu sliku sive nijanse (slika 5a). Nakon toga, slika se binarizuje (eng. threshold). To



Slika 4. Blok šema algoritma za obradu slike

Figure 4. Block diagram of the algorithm for image processing

podrazumeva da se svaki piksel čija je vrednost iznad vrednosti praga binarizacije definiše kao belo, a svaki piksel čija je vrednost ispod te vrednosti definiše kao crn (slika 5b). Ako je prag binarizacije niži jače senke će biti izbrisane sa slike, ali sa tim i svetliji delovi loptice (svetliji usled osvetljenja) i obrnuto. Stoga je neophodno u skladu sa tim definisati optimalni prag binarizacije. S obzirom na to da je ploča bela a loptica crna, u idealnom slučaju svi crni pikseli bi bili pikseli loptice, a svi beli pikseli pikseli ploče. Međutim, u realnim uslovima javljaju se senke i odsjaji. Zbog toga se na binarizovanoj slici može pojaviti više izdvojenih crnih objekata. Iz tog razloga, na binarizovanu sliku se izvršava Floodfill algoritam. Floodfill algoritam izdvaja najveću grupu povezanih crnih piksela na slici (slika 5c). To radi tako što nađe prvi crni piksel na slici i definiše ga kao član prvog objekta. Zatim proverava ima li taj piksel susednih crnih piksela i ako ima, definiše ih kao članove prvog objekta i ceo postupak ponavlja sa svakim. Kada više ne postoje članovi tog objekta koji imaju susednih crnih piksela program traži prvi crni piksel koji ne pripada ni jednom objektu i definiše ga kao član drugog objekta



Slika 5.

- a) Slika sa kamere nakon prebacivanja u sivu nijansu
- b) Slika posle binarizacije
- c) Slika posle floodfill algoritma
- d) Centar mase loptice (linije su naknadno dodate da pokažu pronađenu tačku)

Figure 5.

- a) The image from camera after converting to grayscale
- b) The image after binarization
- c) The image after the floodfill algorithm
- d) Center of mass of the ball (lines were added afterwards to indicate the point)

pa ponavlja ceo postupak. Nakon toga se vrši brojanje članova svakog objekta i određuje se najveći objekat. Ostali objekti se brišu sa slike. Koordinate centra mase tog objekta računaju se tako što se uzme prosečna vrednost X koordinata i prosečna vrednost Y koordinata svih tačaka tog objekta (slika 5d). S obzirom na to da kamera nije fiksirana za pokretnu ploču već za horizontalnu ravan, dobijene koordinate se odnose na koordinatni sistem takođe fiksiran za horizontalnu ravan. Kako su uglovi za koje je ploča rotirana poznati, iz koordinata tačke (X,Y) u koordinatnom sistemu fiksiranom za horizontalnu ravan određuju se koordinate te tačke u koordinatnom sistemu fiksiranom za ravan ploče. Kasnije u toku rada, koriste se samo ove koordinate.

Funkcija prenosa sistema

Motori. Servo motori se kontrolišu impulsno-širinski modulisanim signalom. Relacija između zasićenosti (eng. duty cycle) modulisanog signala i ugla pod kojim se motor trenutno nalazi definisana je funkcijom prenosa $\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K}{s(1 + \tau s)}$ (Zahra 2010). K i θ su konstante motora i one,

za motore iskorišćene u ovom radu, iznose $K = 18$ i $\theta = 0.028$. Zamenom ovih vrednosti u formulu dobija se funkcija prenosa motora koja glasi:

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{643}{s(36 + s)}.$$

Odnos uglova. Na osnovu karakteristika mehaničkog sklopa određen je odnos ugla motora u odnosu na horizontalu i ugla ploče u odnosu na horizontalu i on iznosi 3 : 1. Odnosno, ako se motor okrene za 3° ploča će se okrenuti za 1°.

Dinamika lopte. Jednačina koja povezuje položaj lopte x , moment inercije lopte I , poluprečnik lopte r , masu lopte m , udaljenost lopte od centra ploče d i ugao ploče u odnosu na horizontalu α glasi:

$$\ddot{x}\left(\frac{I}{r^2} + m\right) + mg \sin \alpha - md\dot{\alpha}^2 = 0$$

gde $\ddot{x}\frac{I}{r^2}$ predstavlja silu koja nastaje usled momenta inercije loptice, $\dot{x}m$

silu trenja, $mg \sin \alpha$ komponentu gravitacione sile paralelne sa pločom i $md\dot{\alpha}^2$ centrifugalnu silu koja nastaje usled rotacije ploče. Linearizacijom ove jednačine dobija se linearna aproksimacija sistema. Aproksimacija $\sin \alpha = \alpha$ se može iskoristiti jer ugao α ni u jednom trenutku neće napustiti opseg od $\pm 15^\circ$. Linearizovana jednačina glasi:

$$\ddot{x}\left(\frac{I}{r^2} + m\right) = -mg\alpha.$$

Laplasovom transformacijom ove jednačine i njenim uproščavanjem dobija se funkcija prenosa ugla između horizontale i ploče i položaja loptice:

$$\frac{x(s)}{\alpha(s)} = -\frac{3g}{5} \cdot \frac{1}{s^2}.$$

Funkcija prenosa sistema. Funkcija prenosa sistema $H(s)$ dobija se proizvodom prethodno pronađenih funkcija prenosa:

$$H(s) = \frac{\theta(s) \cdot \alpha(s) \cdot x(s)}{V(s) \cdot \theta(s) \cdot \alpha(s)} = \frac{x(s)}{v(s)}.$$

Zamenom vrednosti dobija se funkcija prenosa sistema:

$$H(s) = \frac{1262}{s^4 + 36s^3 + 643s^2}.$$

Regulator

Kada program odredi trenutni položaj loptice računa se greška odnosno odstupanje loptice od željenog položaja. Cilj regulatora je da u zavisnosti od dobijene greške odredi upravljanje motora tako da grešku što brže i preciznije odstrani. Za potrebe ovog projekta iskorišćen je PD regulator (Ogata 2002).

PD regulator ima proporcionalno i diferencijalno dejstvo, odnosno za određivanje upravljanja uzima u obzir trenutnu grešku i diferencijal greške. Proporcionalno dejstvo je jednako koeficijentu proporcionalnog dejstva K_p pomnoženim sa trenutnom greškom. Diferencijalno dejstvo je jednako koeficijentu diferencijalnog dejstva K_d pomnoženim sa razlikom trenutne i prethodne greške. Konačno upravljanje je jednako sumi proporcionalnog i diferencijalnog dejstva. Postoje mnoge tehnike za određivanje koeficijenata K_p i K_d . One mogu podrazumevati modelovanje procesa i podešavanje koeficijenata na modelu (na primer simulacijom) ili ručno podešavanje empirijskom metodom.

Kako su motori postavljeni tako da ploču okreću oko dve međusobno normalne ose, kretanje jednog motora utiče na kretanje loptice samo po jednoj osi. Stoga su iskorišćena dva PD regulatora sa jednakim koeficijentima koji nezavisno kontrolišu kretanje loptice po dve normalne ose.

Za opisivanje različitih trajektorija ravnotežni položaj se u vremenu pomera po zadatoj trajektoriji.

Zigler-Nikolsova metoda. Zigler-Nikolsova metoda (Ziegler i Nichols 1942) je heuristička metoda za podešavanje koeficijenata PD (odnosno u opštem slučaju PID) regulatora. Podrazumeva podešavanje K_d koeficijenta na 0, a potom nameštanje K_p koeficijenta tako da sistem osciluje konstantnom amplitudom. U realnim uslovima je vrlo teško, često skoro neizvodljivo, dovesti sistem do stanja oscilacije sa konstantnom amplitudom

koristeći samo proporcionalno dejstvo. Zbog toga se to obavlja u simulaciji. Za potrebe ovog rada napisana je simulacija u MATLAB programu. Na osnovu pronađenog K_p koeficijenta K_u i perioda oscilovanja T_u , PD kontroler je podešen na sledeći način: $K_p = 0.60 \cdot K_u$ i $K_d = K_p \cdot T_u / 8$. Simulacija nije identična realnom sistemu jer su u modelu idealizovana trenja, zanemaren otpor vazduha, idealizovana mehanika itd. Zbog toga, koeficijenti su naknadno empirijski korigovani u okolini teorijski nađenih.

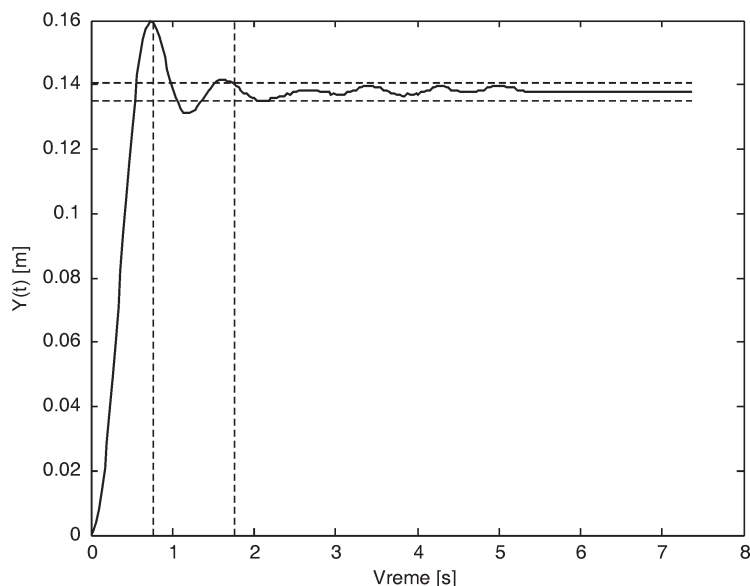
Rezultati i diskusija

Odskočni odziv sistema (slika 6) predstavlja krivu $y(t)$ koja opisuje ponašanje sistema kome je upravljanje do trenutka 0 jednako 0, a od trenutka 0 jednako y_c . Sa te krive izdvojene su dve bitne karakteristike: preskok i vreme smirenja. Preskok predstavlja odnos maksimalne vrednosti y_m i finalne (ciljane) vrednosti y_c . Preskok se određuje formulom

(web 1): $v = \frac{y_m - y_c}{y_c}$. Preskok ovog sistema je $(16 \pm 1)\%$.

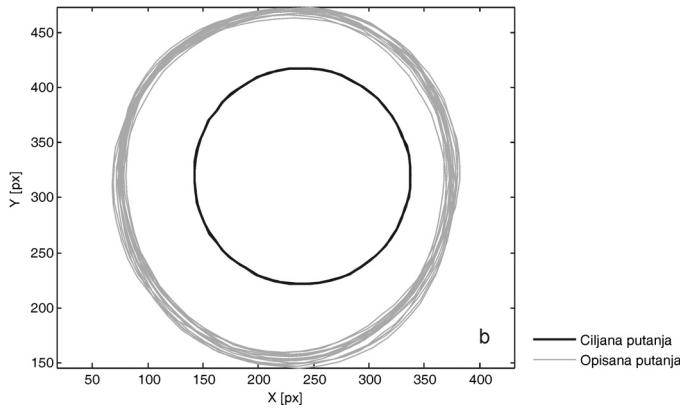
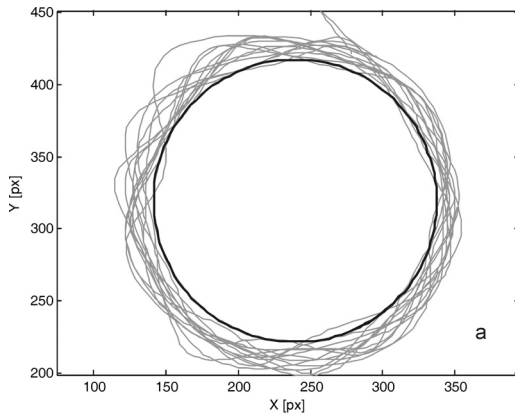
Vreme smirenja predstavlja vreme neophodno da $y(t)$ dospe u stabilno stanje. Sistem se smatra stabilnim ako $y(t)$ ne napušta opseg $\pm 2\% y_c$. Vreme smirenja je (2.0 ± 0.5) s. Koeficijenti iskorišćenog PD regulatora su $K_p = 2100$ i $K_d = 23448$.

Horizontalne linije na grafiku (slika 6) predstavljaju opseg $\pm 0.02 y_c$. Prva vertikalna linija predstavlja trenutak u kome je $y(t)$ u maksimumu, a druga predstavlja trenutak smirenja sistema.



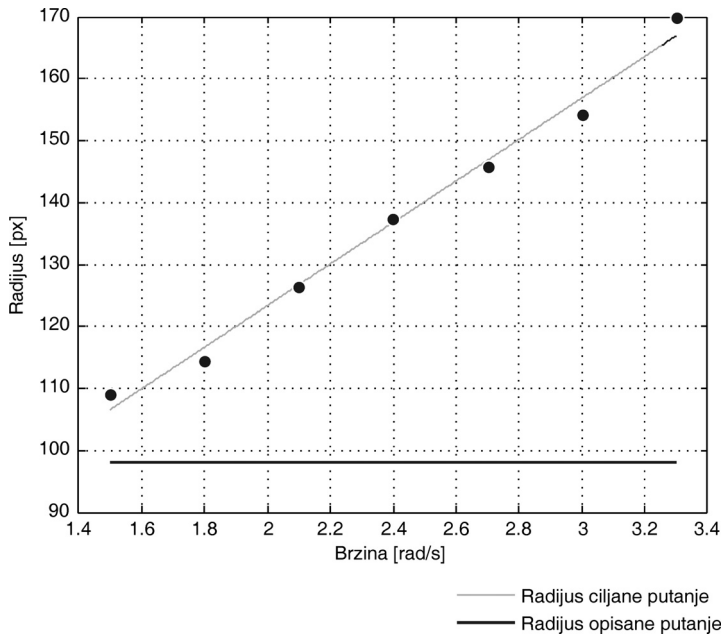
Slika 6.
Odskočni odziv sistema

Figure 6.
Step response of the system



Slika 7.
Opisani krug pri
brzini od 1.5 rad/s (a)
i 3 rad/s (b)

Figure 7.
Circular trajectory at
speeds of 1.5 rad/s
(a) and 3 rad/s (b)



Slika 8.
Zavisnost razlike
poluprečnika opisane i
zadate kružne putanje
od ugaone brzine
kretanja

Figure 8.
Dependency of the
difference between the
described and given
trajectory radius in
accordance to the
angular velocity

Pri opisivanju kružne putanje na lopticu deluje centrifugalna sila zbog koje loptica teži da se udalji od centra rotacije. Ovakvo kretanje realizovano je jednostavnom promenom pozicije ravnotežnog položaja po kružnici bez vođenja računa o dodatnim problemima koje donosi kružno kretanje. Zbog toga, što se loptica brže kreće to je poluprečnik putanje kretanja veći od poluprečnika zadate putanje (slike 7 i 8, tabela 1).

Tabela 1. Zavisnost poluprečnika opisane kružne putanje od ugaone brzine kretanja

Ugaona brzina [rad/s]	Poluprečnik putanje [px]
1.5	109 ± 7
1.8	114 ± 9
2.1	126 ± 12
2.4	137 ± 6
2.7	145 ± 10
3.0	154 ± 16
3.3	169 ± 22

Zaključak

Realizovani sistem za stabilizaciju loptice u ravni sposoban je da lopticu sprovede po željenoj putanji i da je dovede na željeni položaj u prihvatljivom vremenu uz grešku koju je moguće ukloniti kako softverskim tako i hardverskim poboljšanjima.

Jedan od načina da se poveća brzina sistema jeste korišćenje brže kamere. Softver obrađuje jednu sliku sa kamere za vreme kraće od 1/30 s pa korišćenje bržeg softvera bez korišćenja brže kamere neće ubrzati sistem. Ukoliko se na kadru kamere nalaze tamni objekat veći od loptice ili neka dovoljno tamna i dovoljno velika senka, program će prepoznati taj objekat kao lopticu i neće reagovati u skladu sa kretanjem loptice. Neka od mogućih rešenja ovog problema jesu ispitivanje oblika pronađenog objekta, analiza trenutnog frejma u odnosu na prethodne i implementacija adaptivnog algoritma za određivanje praga binarizacije. Kako je ploču trenutno moguće postaviti pod najvećim nagibom od $\pm 15^\circ$, može se desiti da se loptica kreće dovoljno brzo da sistem ne može da je zaustavi. Ovaj problem se može otkloniti promenom mehaničkog prenosa i/ili korišćenjem servo motora koji ima veću slobodu kretanja. Međutim, u tom slučaju se mora voditi računa o prethodno urađenoj aproksimaciji $\sin \alpha = \alpha$. Ukoliko loptica odskoči sa ploče, softver nema informaciju o tome da loptica više nije na ploči, pa ne reaguje na ispravan način zbog pogrešne informacije. Ovaj problem je moguće rešiti analizom veličine

loptice na slici ili uvođenjem nove kamere koja bi stajala sa strane. S obzirom na to da mehanika nije potpuno simetrična i da se pri navođenju loptice na ivicu ploče ne sme pojaviti preskok, sistem bi se mogao dodatno unaprediti implementacijom adaptivnog PD regulatora čiji bi koeficijenti zavisili od trenutnog položaja loptice na ploči.

Literatura

- Ogata K. 2002. *Modern Control Engineering*. Prentice Hall
- Zahra S. 2010. Ball on Plate Position Control. Final project, MCAST Institute of Electrical & Electronic Engineering, Malta
- Ziegler J. G., Nichols N. B. 1942. Optimum settings for automatic controllers. *Transactions of the ASME*, **64**: 759.
- web1. automatika.etf.bg.ac.rs/files/predmeti/os3sa1/materijali/sau1_predavanje_4.pdf

Damjan Dakić

Ball and Plate System

This paper describes a system for ball stabilization on a tiltable plate. The system consists of a white plate placed on a mechanical joint with two axes of rotation connected to two servo motors, a camera which records the plate along vertical axis, a black ping-pong ball, a computer which processes the data and a microcontroller which acts as a motor driver. A regulator has been designed which in relation to the position of the ball, by means of motors and a mechanical set leads the ball to a desired position. The system is capable of autonomously leading the ball to a previously given position on the plate as well as leading the ball through a given trajectory.

