

Načrtovanje, izdelava in vodenje sistema za regulacijo ravnovesja krogle na letvi z uporabo industrijske krmilne opreme

Nenad Muškinja, Matej Stojnšek

Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Koroška cesta 46, 2000 Maribor
E-pošta: nenad.muskinja@um.si

Povzetek. V tem prispevku sta predstavljena načrtovanje in izvedba sistema za regulacijo ravnovesja krogle na letvi z uporabo industrijske krmilne opreme Mitsubishi. Sistem je bil izveden mehansko in v simulacijah. Industrijski servomotor s servoočevalnikom zagotavlja naklon letve, za krmiljenje sistema se uporablja industrijski PLC, za uporabniški vmesnik pa zaslon HMI. Izpeljan je bil dinamični matematični model sistema regulacije ravnovesja krogle na letvi. Model je bil uporabljen v simulacijah za načrtovanje ustreznih krmilnih algoritmov, simulacije zasnovanih algoritmov pa so bile izvedene v okolju Matlab/Simulink. Ti algoritmi so bili nato implementirani v PLC, strojna oprema je bila konfigurirana, uporabniški vmesnik HMI na zaslonu pa ustvarjen. Izmerili smo učinkovitost krmiljenja na realnem sistemu in jo primerjali s simulacijami. Naprava, ki smo jo izdelali, omogoča nadzor položaja krogle vzdolž letve. Na voljo so različni algoritmi vodenja, parametre vodenja pa lahko spreminjamo prek vmesnika HMI. Razviti sistem se lahko uporablja kot alternativa komercialnim sistemom za učenje teorije vodenja ter hkrati spoznavanje industrijske strojne in programske opreme.

Ključne besede: programirljivi logični krmilnik (PLK), servomotor, regulacija, uporabniški vmesnik (HMI), krogla na letvi

Development, construction and control of a ball on a beam system using an industrial equipment

The paper presents the design and implementation of a ball-on-beam system using a Mitsubishi industrial equipment. The system is implemented both mechanically and in simulations. An industrial servo motor with a servo drive ensures the beam angle. An industrial PLC controls the system and an HMI display is used for the user interface. A dynamic mathematical model of the system is developed. It is used in simulations to design control algorithms. Simulations of the designed algorithms are performed in the Matlab/Simulink environment. They are implemented in PLC and hardware configured. An on-screen HMI user interface is created. The control performance is measured on a real system and is compared with simulation results. The system is used to control the ball position along the beam. Different control algorithms are available. The controller parameters can be changed by the HMI interface. The developed system can be used as an alternative to commercial systems to learn the control theory and the industrial hardware and software.

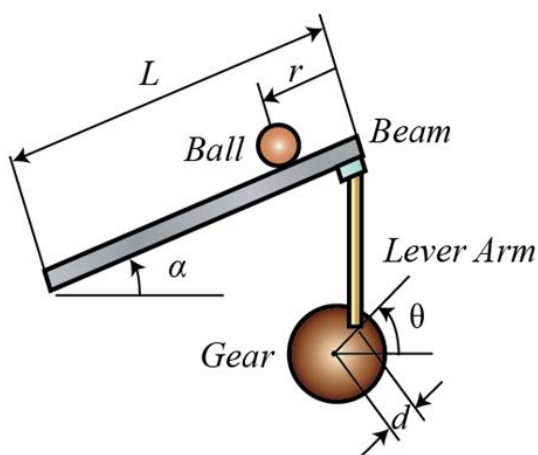
Keywords: programmable logic controller (PLC), servo motor, control, human machine interface (HMI), ball on beam system

1 UVOD

Sistem za regulacijo ravnovesja krogle na letvi (angl. ball on beam system, BBS) je vrsta krmilnega sistema, ki z uporabo krmilnih vhodov uravnava položaj krogle na letvi (slika 1) [1]. Ta sistem se pogosto uporablja kot učno orodje za prikaz načel teorije vodenja in uporabe povratnih informacij za stabilizacijo sistema. Sistem je sestavljen iz dolge letve, na katero se položi krogla. Letev je možno nagibati z uporabo motorja. Krogla se ob naklonu kotali po celotni dolžini letve, položaj krogle pa se meri s senzorjem. Letev je treba nagibati tako, da krogla ohranja določen položaj na letvi ali pa sledi želeni referenci. V ta namen se lahko uporabi različne regulatorje. Cilj nadzornega sistema je ohraniti kroglo v stabilnem položaju na letvi kljub zunanjim motnjam, zaradi katerih se lahko krogla premakne iz ravnovesja. Za doseg tega cilja krmilni sistem običajno vključuje senzorje, ki merijo položaj krogle na letvi in aktuatorje, ki lahko delujejo s silami na letev tako, da spremenijo naklon letve in s tem ohranijo ravnovesje krogle na letvi. Ti senzorji in aktuatorji so povezani z algoritmom za vodenje, ki obdeluje podatke senzorjev in ustvarja krmilne signale, ki se uporabljajo za krmiljenje aktuatorjev. Krmilni algoritem v BBS se lahko izvaja na različne načine, na primer s programirljivim logičnim

krmilnikom (PLK), mikrokrmilnikom ali osebnim računalnikom. Posebna zasnova krmilnega sistema je odvisna od zahtev aplikacije in potrebne ravni zmogljivosti. Nedavne raziskave in aplikacije sistemov s kroglo na letvi obravnavajo in primerjajo različne izvedbe sistemov vodenja ravnovesja ter so potrjene s simulacijskimi in eksperimentalnimi rezultati [2]–[6].

Cilj tega dela je bil razviti in izdelati sistem za regulacijo ravnovesja krogle na letvi z uporabo industrijske opreme ter implementacija algoritmov za stabilizacijo in vodenje položaja krogle po celotni dolžini letve. Za nagibanje letve je uporabljen servomotor s servoojačevalnikom. Sistem se nadzira z uporabo industrijskega uporabniškega vmesnika HMI (angl. Human-Machine Interface), celoten program vodenja pa se izvaja na Mitsubishijevem programirljivem logičnem krmilniku ali PLK. Za načrtovanje mehanskega dela je uporabljen tridimenzionalni (3D) model, izdelan v okolju Autodesk Fusion 360. Kompleksnejše mehanske komponente so 3D-natisnjene. Iz mehanskega dela BBS so izpeljane diferencialna enačba sistema in geometrijske povezave. V okoljih Matlab in Simulink je po izpeljanih enačbah izdelan simulacijski model sistema, ki omogoča testiranje različnih algoritmov vodenja. Z uporabo Mitsubishijeve opreme MELSOFT GXWorks3 je izdelan celoten program, ki meri vrednost senzorjev ter vodi servomotor. Načrtani algoritmi vodenja so implementirani znotraj tega programa. Za prikaz stanja delovanja in nadzor uporabnika je izdelan uporabniški vmesnik za HMI-ekran na dotik.



Slika 1: Ilustracija sistema za regulacijo ravnovesja krogle na letvi (BBS) [1].

2 OPIS UPORABLJENIH KOMPONENT

Za naš sistem smo uporabili komponente, ki se uporabljajo v industrijskih aplikacijah, ter linearni membranski potenciometer in komponente za samogradnjo.

2.1 Servomotor, servoojačevalnik, PLK in HMI

Naklon letve bil izveden prek gredi in ročice v povezavi s servomotorjem. Za servomotor je bil izbran motor HG-KN- 13J [7]. Slika 2 in tabela 1 prikazujeta servomotor in njegove tehnične značilnosti. Izbrani servomotor je mogoče krmiliti s servoojačevalnikom. Izbrali smo Mitsubishijev servoojačevalnik MR-JE-10C [8]. Ta omogoča različne načine krmiljenja motorja: hitrostni, položajni in tudi navorni način. Podpira analogni in pulznoširinsko modularni (PWM) vhod za želeno hitrost motorja prek priključka CN3. Podpira tudi možnost krmiljenja prek komunikacije CC_Link, ki poteka prek priključka Ethernet. Parametri ojačevalnika se lahko nastavijo s programskim paketom MR Configurator2. Z osebnim računalnikom ga je mogoče povezati prek vmesnika USB ali ethernet. Servoojačevalnik je prikazan na sliki 3. Za krmiljenje celotnega sistema smo izbrali krmilnik Mitsubishi MELSEC serije iQ-F, imenovan FX5UC-32MT/DSS-TS [9]. Krmilnik ima 16 vhodov in 16 izhodov. Omogoča komunikacijo prek ethernet ali vodila RS-485. Ima priključno točko za standardno kartico SD, na katero je mogoče zapisovati podatke med delovanjem. Videz krmilnika je prikazan na sliki 4.



Slika 2: Servomotor HG-KNJ [7].

Tabela 1: Tehnične značilnosti servomotorja.

Nazivna moč	100 W
Nazivni navor	0,32 Nm
Največji navor	0,95 Nm
Nazivna hitrost	3000 min ⁻¹
Največja hitrost	5000 min ⁻¹
Nazivni tok	0,8 A
Največji tok	2,4 A
Inkrementalni dajalnik	17-bit, 131072 pulzov na vrtljaj



Slika 3: Servoojačevalnik MR-JE [8].



Slika 4: PLC FX5UC-32MT/DSS-TS [9].

Tabela 2: Razširitveni moduli.

FX5-4DA-ADP	FX5; Analog Output Module; 4 channels
FX5-4AD-ADP	FX5; Analog Input Module; 4 channels

Tabela 2 prikazuje dve analogni razširitveni kartici, ki sta bili prav tako priključeni na PLC.

Za interakcijo s sistemom smo uporabili vmesnik GT2107-WTSD HMI [10] (slika 5). Vmesnik ima sedempalični barvni zaslon na dotik. Omogoča komunikacijo prek priključkov Ethernet, RS-232 in RS-422/485, z osebnim računalnikom pa ga je mogoče povezati tudi prek priključka USB. V programskem okolju GT Designer3 je mogoče ustvariti grafične elemente, ki omogočajo spremljanje delovanja sistema in spreminjanje globalnih spremenljivk v programu PLC.



Slika 5: HMI vmesnik [10].

2.2 Senzorji

Za merjenje položaja kroglice na letvi smo izbrali linearni membranski potenciometer SoftPot SEN-08681 [11]. Senzor ima merilno območje 500 mm in merilno upornost 12 k Ω . Sestavljen je iz spodnje uporabne plasti, zračne reže in zgornje prevodne membrane, ki se ob pritisku na lokaciji kroglice dotakne spodnje plasti. Deluje podobno kot običajni potenciometer, le da kroglica deluje kot drsnik. Napetost na zgornji membrani tako predstavlja položaj kroglice na letvi. Senzor je prikazan na sliki 6.



Slika 6: Membranski potenciometer SoftPot [11].

2.3 Mehanske komponente sistema za regulacijo ravnovesja kroglice na letvi

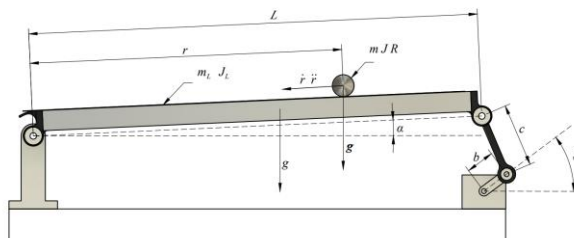
3D-model mehanskega sistema je bil izdelan v programu Autodesk Fusion 360. Osnovni element letve je aluminijasti U-profil. Na vsakem koncu profila smo zasnovali plastične nosilne podpore. Za zmanjšanje trenja v sistemu so bili v čepih uporabljeni ležaji. Zasnovali smo plastično roko za nagibanje letve. Njeno dolžino smo prilagodili tako, da je, ko je sistem v ravnovesnem položaju, tečaj ročice z nosilcem neposredno nad osjo servomotorja. Tako je bilo lažje izpeljati matematično povezavo med kotom nosilca in kotom servomotorja. Zasnovali smo tudi ogradjo, ki zagotavlja, da kroglica ostane na letvi in se premika le znotraj merilnega območja senzorja položaja. Na sliki 7 je prikazana risba mehanskega sistema letve.



Slika 7: 3D-model sistema za regulacijo ravnovesja kroglice na letvi.

3 MATEMATIČNO MODELIRANJE

Matematični model je bil zasnovan na podlagi 3D-modela sistema, na katerem smo lahko enostavno izmerili vse potrebne dimenzije. Skica sistema je prikazana na sliki 8. Kot motorja ϑ se giblje med -90° in 90° , vodoravni položaj motorne roke je 0° . Gibanje kota α je fizično omejeno z dolžino motorne roke b in dolžino letve L . Kroglica je na razdalji od osi letve r . Ko motor poveča kot ϑ , se hkrati poveča tudi kot α , zaradi česar se kroglica zaradi gravitacijske sile kotali navzdol, njena potencialna energija pa se pretvori v kinetično energijo. V našem primeru lahko silo trenja zanemarimo.



Slika 8: Skica sistema za regulacijo ravnovesja.

Za izdelavo matematičnega modela smo uporabili Euler-Lagrangeovo metodo [12], [13]. Najprej smo določili kinetično energijo kroglice. Ta je sestavljena iz translacije kroglice in rotacije kroglice. J predstavlja vztrajnostni

moment krogle, ω pa kotno hitrost vrtenja krogle okoli lastne osi. Lagrangeva enačba je naslednja:

$$\mathcal{L} = K - U, \quad (1)$$

kjer je K kinetična energija in U potencialna energija BBS. Skupna kinetična energija je sestavljena iz kinetične energije krogle K_1 in kinetične energije letve K_2 .

Kinetična energija krogle K_1 je sestavljena iz translacijske in rotacijske kinetične energije:

$$K_1 = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}J\omega^2, \quad (2)$$

kjer je m masa krogle, v pa je hitrost središča krogle.

Predpostavimo, da se krogla samo kotali po površini, in ne drsi. Tako lahko kotno hitrost vrtenja kroglice zapišemo kot:

$$\dot{r} = R\omega, \quad (3)$$

kjer je R polmer krogle.

Z vstavljanjem enačbe 3 v enačbo 2 dobimo:

$$K_1 = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}J\left(\frac{\dot{r}}{R}\right)^2. \quad (4)$$

Za izračun translacijske kinetične energije moramo izračunati hitrost krogle v . Ta je, izražena v kartezičnih koordinatah, enaka:

$$v^2 = \dot{x}^2 + \dot{y}^2, \quad (5)$$

kjer je:

$$\begin{aligned} x &= r \cdot \cos(\alpha) \\ y &= r \cdot \sin(\alpha) \end{aligned} \quad (6)$$

Če vstavimo enačbo 6 v enačbo 5 in naprej vse v enačbo 4, dobimo končni izraz za kinetično energijo krogle:

$$K_1 = \frac{1}{2}\left(\frac{J}{R^2} + m\right)\dot{r}^2 + \frac{1}{2}mr^2\dot{\alpha}^2. \quad (7)$$

Kinetična energija letve je:

$$K_2 = \frac{1}{2}J_L\dot{\alpha}^2, \quad (8)$$

kjer J_L predstavlja vztrajnostni moment letve.

Potencialna energija krogle je:

$$U_1 = mg \sin(\alpha) r \quad (9)$$

ter potencialna energija letve je enaka:

$$U_2 = \frac{1}{2}Lm_Lg \sin(\alpha), \quad (10)$$

kjer je m_L masa letve in g je gravitacijski pospešek.

Po seštevanju vseh energij v sistemu

$$\begin{aligned} K &= K_1 + K_2 \\ U &= U_1 + U_2 \end{aligned} \quad (11)$$

in po rešitvi Lagrangeove enačbe \mathcal{L} dobimo končni matematični model sistema krogle na letvi:

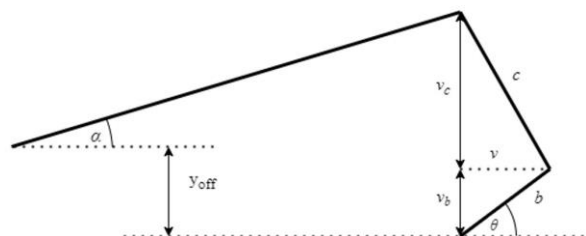
$$\left(m + \frac{J}{R^2}\right)\ddot{r} + mg \sin(\alpha) - mr\dot{\alpha}^2 = \tau, \quad (12)$$

kjer je τ navor, ki ga ustvari motor na koncu letve.

Ko smo dobili diferencialno enačbo sistema, smo jo uporabili za oblikovanje matematičnega modela. Model je bil izdelan v programskem paketu Simulink programa MATLAB, ki omogoča grafično načrtovanje sistema. Najprej smo s pomočjo fizikalnih konstant sistema (tabela 3) določili razmerja med koti iz skice sistema na sliki 9. Ugotovili smo, kako sta kot motorne roke ϑ in kot letve α odvisna drug od drugega. Predpostavimo, da se konec letve premika le navpično, pri čemer zanemarimo razdalje zaradi majhnih kotov. Vrednost y_{off} predstavlja navpično razdaljo med koncem nosilca in osjo motorja. V našem sistemu je 0,078 m.

Tabela 3: Fizične izmere in konstante BBS.

Gravitacijski pospešek	g	$9,81 \frac{m}{s^2}$
Dolžina letve	L	0,555m
Masa letve	m_L	0,2 kg
Vztrajnostni moment letve	J_L	0,037 kg m ²
Dolžina motorske roke	b	0,036 m
Dolžina držala letve	c	0,078 m
Polmer krogle	R	0,0135 m
Masa krogle	m	0,082 kg
Vztrajnostni moment krogle	J	5,96 kg m ²



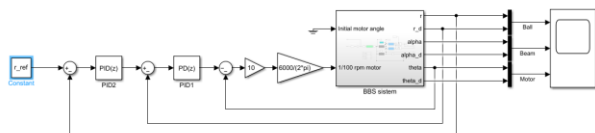
Slika 9: Odvisnosti kotov v BBS.

Po nekaj izpeljavah in poenostavitvah dobimo enačbo za izračun naklona letve α :

$$\alpha = a \sin\left(\frac{h}{L}\right) = a \sin\left(\frac{b \sin(\vartheta) - y_{off} + \sqrt{c^2 - b^2 \cos^2(\vartheta)}}{L}\right). \quad (13)$$

4 NAČRTOVANJE REGULACIJSKIH ALGORITMOV

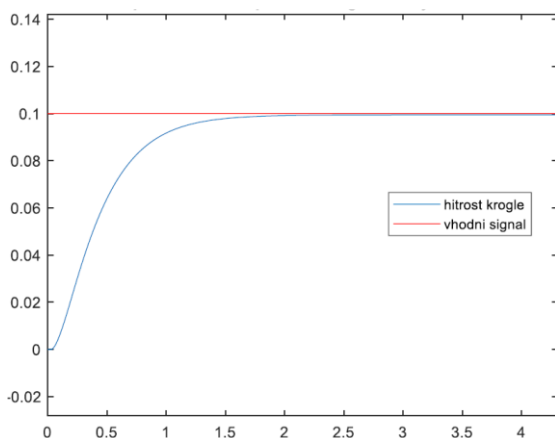
Za vodenje sistema za regulacijo ravnovesja smo uporabili kaskadni proporcionalno-integralno-diferencialni (PID) algoritem, kot je predlagan v [13]. PID je najpogosteje uporabljen algoritem za krmiljenje v industriji, saj je preprost za izvajanje, omogoča eksperimentalno določanje parametrov in ima dobre lastnosti vodenja. Uporabili smo kaskadno strukturo PID-PD, kot je prikazano na sliki 10. V nadaljevanju se za ta krmilnik uporablja ime kaskadni PID. Za določitev parametrov regulatorja smo uporabili postopek IMC-PID (Internal Model Control) [14]. Najprej je treba izmeriti odprtozračni stopnični odziv notranje hitrostne zanke, iz katerega nato določimo model procesa in izračunamo parametre notranjega PD-regulatorja hitrosti krogle, kot je prikazano v tabeli 4. Na sliki 11 je prikazan odziv zaprte zanke vodenja hitrosti krogle.



Slika 10: Kaskadna PID-PD-struktura vodenja BBS.

Tabela 4: Parametri hitrostnega PD-regulatorja.

Prenosna funkcija hitrostne zanke	K_p	T_D [sec]
$\frac{-0,48}{s} \cdot e^{-0,1 \cdot s}$	4,9	0,04



Slika 11: Zaprtozančni odziv vodenja hitrosti krogle BBS.

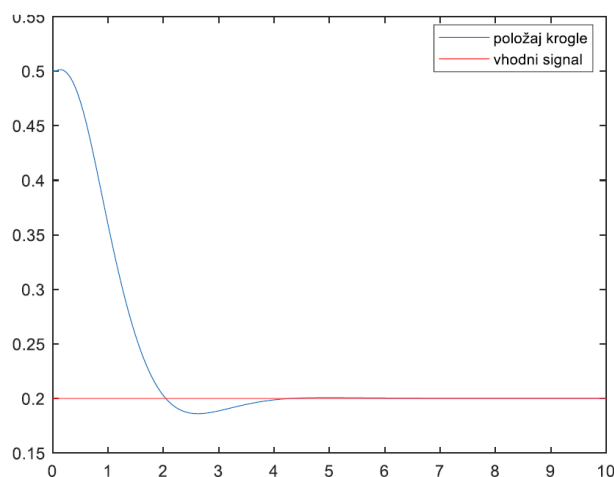
Po uspešni implementaciji notranjega PD-regulatorja hitrosti je bil sistemu dodan zunanji PID-regulator položaja. Vhod položajnega PID-regulatorja je razlika med želenim in dejanskim položajem krogle, izhod pa je želena hitrost krogle. Najprej moramo izmeriti odprtozračni stopnični odziv zunanje zanke pri zaprti notranji hitrostni zanki. Nato lahko izračunamo

parametre zunanjega PID-regulatorja položaja krogle, kot je prikazano v tabeli 5.

Tabela 5: Parametri položajnega regulatorja PID.

Prenosna funkcija položajne zanke	K_p	T_I [sec]	T_D [sec]
$\frac{1}{s} \cdot e^{-0,5 \cdot s}$	1,15	3,5	0,23

Slika 12 prikazuje odziv zaprtozančnega vodenja položaja krogle.



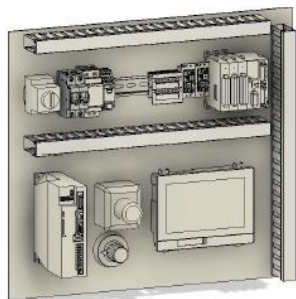
Slika 12: Zaprtozančni odziv vodenja položaja krogle BBS.

V tem razdelku so bili prikazani modeliranje sistema BBS, zasnova kaskadnega regulatorja PID ter rezultati simulacije krmiljenja položaja krogle na letvi. V naslednjem razdelku bomo predstavili izvajanje algoritmov v programski opremi PLK ter izvedene eksperimente v realnem času.

5 IMPLEMENTACIJA IN IZVEDBA EKSPERIMENTOV NA REALNEM SISTEMU

Za sestavljanje vseh elementov je bil uporabljen voziček iz aluminijastih profilov. Na zadnji strani vozička so višji profili, na katere smo namestili električne komponente. Večino električnih elementov smo namestili na tirnice DIN, večje elemente pa smo namestili neposredno na leseno montažno ploščo. Preden smo začeli sestavljati komponente, smo v okolju Fusion 360 izdelali okvirno postavitev komponent (slika 13). V okolju sPlan 7.0 smo ustvarili električno vezalno shemo. Do glavnega stikala smo pripeljali enofazno mrežno napajanje. To smo privedli na avtomatske varovalke in skozi rele na servoojačevalnik. Napajanje smo vezali tudi na 24 V usmernik, ki zagotavlja krmilno napetost. Dodali smo možnost vklopa servoojačevalnika s kontakti releja. Dodali smo tipko za izklop v sili, ki izklopi servoojačevalnik na normalno sklenjenem (NC) kontaktu in hkrati prek normalno odprtega (NO) kontakta do

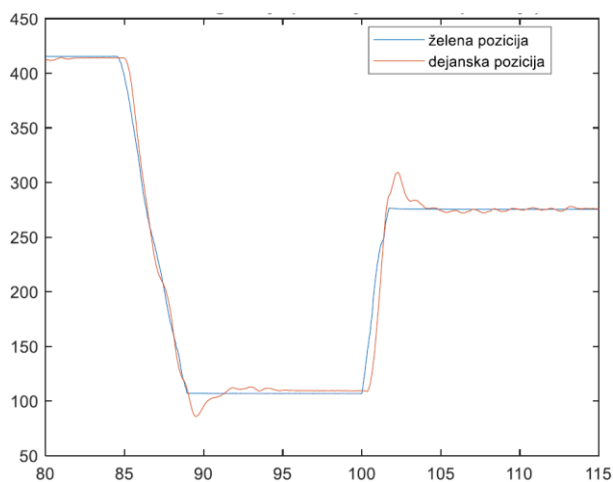
krmilnika dovede signal o sprožitvi. Namestili smo potenciometer v 3D-tiskanem ohišju. Ta potenciometer smo uporabili za vnos referenčne vrednosti, bodisi položaja krogle bodisi kota motorja. Ker uporabljene analogne kartice delujejo pri nižji napetosti, in ne pri 24 V, smo sistemu dodali dva DC-DC-pretvornika napetosti navzdol (LM2596S), enega za potenciometer, drugega pa za senzor na letvi.



Slika 13: 3D-model postavitve električnih komponent BBS.

5.1 Implementacija algoritmov

Pri implementaciji kaskadne strukture regulatorja PID v PLK so bile uporabljene iste vrednosti parametrov regulatorjev PID za vodenje položaja in hitrosti (tabela 4 in tabela 5). Na sliki 14 je prikazan odziv vodenja položaja krogle BBS v realnem času.



Slika 14: Zaprtzančni odziv vodenja položaja krogle realnega BBS.

6 ZAKLJUČEK

Sistem za regulacijo ravnovesja krogle na letvi je bil zasnovan tako, da smo lahko uporabili industrijsko krmilno opremo, ki smo jo prejeli od podjetij INEA RBT, d. o. o. in Mitsubishi Automation.

Slika 15 prikazuje realni sistem za regulacijo ravnovesja krogle na letvi. Sistem uspešno stabilizira položaj krogle na letvi z uporabo implementiranega algoritma. Uporabniški vmesnik smo oblikovali tako, da

omogoča enostavno upravljanje in hkrati spreminjanje krmilnih parametrov.

Želeni položaj krogle na letvi je mogoče določiti z uporabo potenciometra, navideznega drsnika in spreminjajoče se reference, ki se spreminja v obliki signala PWM. Sistem je nameščen na aluminijastem vozičku, ki omogoča enostaven prevoz. Deluje v lastnem lokalnem omrežju, zato ni potreben zunanji omrežni usmerjevalnik.

Med izdelavo sistema so se pojavile nekatere težave, ki smo jih odpravili z alternativnimi rešitvami. Še zmeraj pa se pojavlja nelinearnost zaradi statičnega trenja krogle ob površino letve. To je na žalost značilnost realnega sistema, ki je ni mogoče v celoti odpraviti. Tako se ne glede na izbiro regulatorja pojavlja statični pogrešek položaja krogle.

Možne izboljšave na sistemu so lahko izbira optičnega senzorja za merjenje položaja krogle. To bi še dodatno zmanjšalo trenje med kroglo in letvijo. Dodatne izboljšave so možne tudi pri izbiri regulacijskega algoritma vodenja. Poleg že izvedenega kaskadnega PID-regulatorja smo preizkusili še izvedbo z regulatorjem stanja.

Izdelani sistem za regulacijo ravnovesja krogle na letvi se je izkazal kot zelo robusten in primeren za izvedbo, testiranje in primerjavo različnih pristopov k vodenju nelinearnih sistemov vodenja v realnem času.

Razviti sistem se lahko uporablja kot alternativa komercialnih sistemov za učenje teorije vodenja in hkrati spoznavanje industrijske strojne in programske opreme.



Slika 15: Realni sistem za regulacijo ravnovesja krogle na letvi.

LITERATURA

- [1] "Control Tutorials for MATLAB and Simulink - Ball & Beam: System Modeling." <https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=BallBeam§ion=SystemModeling> (accessed Dec. 21, 2022).
- [2] I. M. Mehedi, U. M. Al-Saggaf, R. Mansouri, and M. Bettayeb, "Two degrees of freedom fractional controller design: Application to the ball and beam system," *Measurement*, vol. 135, pp. 13–22, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.measurement.2018.11.021.
- [3] S. Zaare and M. R. Soltanpour, "The position control of the ball and beam system using state-disturbance observe-based adaptive fuzzy sliding mode control in presence of matched and mismatched uncertainties," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 150, p. 107243, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.ymssp.2020.107243.
- [4] Z.-H. Pang, G. Zheng, and C.-X. Luo, "Augmented state estimation and LQR control for a ball and beam system," in *2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Beijing, China, Jun. 2011, pp. 1328–1332. doi: 10.1109/ICIEA.2011.5975793.
- [5] W. Yu, "Nonlinear PD Regulation for Ball and Beam System," *Int. J. Electr. Eng. Educ.*, vol. 46, no. 1, pp. 59–73, Jan. 2009, doi: 10.7227/IJEEE.46.1.5.
- [6] S. Krafes, Z. Chalh, and A. Saka, "A Review on the Control of Second Order Underactuated Mechanical Systems," *Complexity*, vol. 2018, pp. 1–17, Dec. 2018, doi: 10.1155/2018/9573514.
- [7] "HG-KN13J - Mitsubishi Electric Factory Automation." https://si.mitsubishielectric.com/fa/products/drv/servo/mr_je/rotary-servo-motor/hg-kn13j.html (accessed Dec. 21, 2022).
- [8] "MR-JE-10C - Mitsubishi Electric Factory Automation." https://si.mitsubishielectric.com/fa/products/drv/servo/mr_je/servo-amplifier/mr-je-10c.html (accessed Dec. 21, 2022).
- [9] "FX5UC-32MT/DSS-TS - Mitsubishi Electric Factory Automation." <https://si.mitsubishielectric.com/fa/products/cnt/plc/plcf/cpumodule/fx5uc-32mt-dss-ts.html> (accessed Dec. 21, 2022).
- [10] "GT2107-WTSD | Human Machine Interface | HMI | Catalogue | Mitsubishi Electric Europe e-shop." https://mitsubishi-electric-eshop.mee.com/mee/FA_IA/en/EUR/Catalogue/HMI/Human-Machine-Interface/GT2107-WTSD/p/000000000000311489 (accessed Dec. 21, 2022).
- [11] "SoftPot Membrane Potentiometer – 500 mm – SEN-08681 - SparkFun Electronics." <https://www.sparkfun.com/products/8681> (accessed Dec. 21, 2022).
- [12] M. Keshmiri, A. F. Jahromi, A. Mohebbi, M. H. Amoozgar, and W.-F. Xie, "Modeling and Control of Ball and Beam System using Model Based and Non-Model Based Control Approaches," *Int. J. Smart Sens. Intell. Syst.*, vol. 5, no. 1, pp. 14–35, Jan. 2012, doi: 10.21307/ijssis-2017-468.
- [13] P. V. M. Maalini, G. Prabhakar, and S. Selvaperumal, "Modelling and control of ball and beam system using PID controller," in *2016 International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT)*, Ramanathapuram, India, May 2016, pp. 322–326. doi: 10.1109/ICACCCT.2016.7831655.
- [14] B. W. Bequette, *Process control: modeling, design, and simulation*. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall PTR, 2003.

Nenad Muškinja je leta 1988 diplomiral, leta 1992 magistriral in leta 1997 doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru. Zaposlen je kot visokošolski učitelj na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru. Poleg izvajanja predavanj in vaj je njegovo raziskovalno delo osredotočeno na področje adaptivnih sistemov vodenja, mehkih (fuzzy) sistemov vodenja, nelinearnih sistemov vodenja, inteligentnih sistemov vodenja, identifikacije ter odkrivanja in diagnosticiranja napak v sistemih vodenja.

Matej Stojnšek je leta 2022 magistriral na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru.