

# **Regulacija krogle na plošči s pomočjo zaslona občutljivega na dotik**

**Jernej Kolbl**

**Mentor: izr.prof.dr. Rajko Svečko, somentor: dr. Sarjaš Andrej**  
**Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko,**  
**Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija**  
**jernej.kolbl@gmail.com, rajko.svecko@um.si, andrej.sarjas@um.si**

## ***Ball on the plate control system with touch panel***

This article is about ball on plate control system with touch panel. The control algorithm is implemented on a microcontroller, which guide two servomotors that are responsible for the tilt of the plate in two directions. On the plate we have a touch panel, which is used to measure the position of the ball that is guided in the specific plate location.

The article presents the mathematical modelling of the system, different controller design strategy and all additional necessary segments for real time operation. Finally, the results of the controller operation in real time are presented.

## ***Kratek pregled prispevka:***

Članek govori o regulaciji krogle na plošči s pomočjo zaslona občutljivega na dotik. Regulacija je implementirana na mikrokrmilniku, s katerim krmilimo dva servomotorja, ki skrbita za nagib plošče v dveh smereh. Na plošči imamo zaslon občutljiv na dotik, s pomočjo katerega odčitavamo položaj krogle, ki jo reguliramo v točno določeni točki.

V članku je predstavljen postopek modeliranja sistema, načrtovanja regulatorja in programiranja vseh potrebnih segmentov za delovanje na končnem fizičnem modelu. Predstavljeni so tudi rezultati opravljenih končnih testiranj in možne izboljšave.

## 1 Uvod

Na inštitutu za avtomatiko so se odločili, da bi bilo zanimivo izdelati in predstaviti več-variabilni, nelinearni regulacijski problem. Tak problem predstavlja regulacija krogle na plošči. Predstavljeno delo zajema področje matematičnega modeliranja in identifikacije sistemov, načrtovanja regulatorjev, programiranja mikrokrmilnikov in izdelave fizičnega modela za dan problem. Tako pridemo do našega cilja, ki predstavlja dvodimenzionalno pozicioniranje prosto se gibajoče krogle v dani referenčni točki na plošči.

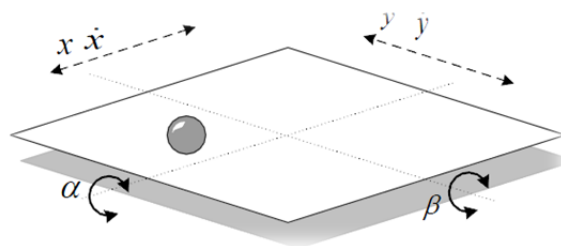
Končen model nam tako lahko služi za interaktivno in zanimivo predstavitev delovanja inštituta širši javnosti, kakor tudi predstavitev reševanja problema z mikrokrmilniki in drugimi sodobnimi napravami ter tehnologijo. Model lahko opazovalce popelje v svet elektrotehnike in jih motivira (predvsem sedanje in bodoče študente) za študij.

Za izdelavo je bilo potrebno dobro preučiti problem, načrtati in izdelati fizični model sistema ter ga matematično modelirati. Ko smo imeli matematični model sistema, smo morali načrtati primeren algoritem vodenja krogle na plošči. Fizični model vsebuje digitalne servomotorje, s katerimi je moč spreminjati horizontalni naklon vpete plošče v obeh pravokotnih oseh. Oba motorja sta vodena z mikrokrmilnikom, na katerem je implementiran regulator. Da regulator lahko deluje, moramo poznati položaj krogle, za kar smo uporabili uporovno folijo, občutljivo na dotik. V slednjem se ta projekt razlikuje od drugih že poznanih rešitev, ki za določanje položaja krogle uporabljajo kamero, ki je pritrjena nad nagibajočo se ploščo.

## 2 Predstavitev sistema

Naš problem regulacije krogle na plošči predstavlja multi-variabilni, nelinearni regulacijski problem. Za izvedbo potrebujemo vpeto ploščo, katere horizontalni naklon se lahko spreminja v obeh pravokotnih oseh.

Naklon plošče lahko spreminjamo s servomotorjema, ki sta vpeto pod rotirajočo se ploščo. Slednja sta vodena z mikrokrmilnikom, na katerem je implementiran regulator. Za odčitavanje položaja krogle na plošči pa smo uporabili folijo občutljivo na dotik.



Slika 1: Skica sistema.

Rešenih sistemov je zaradi zanimivosti ter obsežnosti znanja, ki ga potrebujemo za izvedbo, na svetovnem spletu veliko. Vendar so večinoma izvedeni s kamero, s pomočjo katere odčitavajo položaj krogle. Za tak primer rešitve se zahteva, da sta podloga in krogla različnih barv, saj drugače kamera ne more odčitati položaja krogle. Zraven tega pa še prihaja do napak pri odčitavanju, saj moramo pri kameri upoštevati naklon plošče ter odčitano vrednost krogle, da dobimo natančni položaj krogle. Pri našem sistemu se izognemo tema dvema težavama, saj se folija občutljiva na dotik premika skupaj z našo vpeto ploščo in tako dobimo točen položaj krogle na plošči. Prav tako ni pomembno, kakšne barve je naša krogla in naša plošča. Pojavi pa se nova omejitev, ki določa minimalno težo krogle. Krogla mora biti namreč dovolj težka, da lahko s folijo občutljivo na dotik zaznamo njen položaj.

## 3 Matematično modeliranje sistema

Na začetku smo morali naš sistem matematično modelirati, da smo lahko pričeli z načrtovanjem algoritma za vodenje. Za to obstaja veliko različnih postopkov in pristopov k modeliranju, kot so na primer linearizacija modelov, metode analogij in metoda ravnotežnih zakonov. Mi smo za modeliranje uporabili Lagrange-ove enačbe italijansko-francoskega matematika in astronoma Josepha Louisa Lagrangea. Leta

1788 je namreč predstavil koncept enačb za klasično mehaniko, ki nam omogočajo dobiti matematične modele mehanskih sistemov s pomočjo energijskih konceptov. Nov koncept enačb je bil potreben za raziskovanje mehanike v alternativnih koordinatnih sistemih, za kar Newtonova mehanika ni bila primerna. Lagrangeeve enačbe so zapisane v obliki posplošenih koordinat, ki jih lahko brez težav prevedemo v različne koordinatne sisteme. Ta postopek je pogosto uporabljen v robotiki, saj nam olajša modeliranje predvsem v primerih, kadar obstajajo omejitve gibanja. Prav tako lahko z izpeljavo te enačbe dokažemo, da neka relacija, dobljena z izkušnjami, zares drži. [7]

Lagrangeeva enačba se glasi [6]:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial L}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial \dot{x}} = \sum F \quad (1)$$

$L$  – Lagrangee

$x$  – položaj

$P$  – sile trenja, ki delujejo v nasprotni smeri gibanja

$F$  – zunanje sile, ki delujejo v smeri gibanja

Enačbo (1) pa lahko enostavno zapišemo tudi za navore:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}} - \frac{\partial L}{\partial \alpha} + \frac{\partial P}{\partial \dot{\alpha}} = \sum M \quad (2)$$

$L$  – Lagrangee

$\alpha$  – kot zasuka/nagiba

$P$  – momenti trenja, ki delujejo v nasprotni smeri gibanja

$M$  – zunanje navori, ki delujejo v smeri gibanja

Lagrangee pa izračunamo po enačbi:

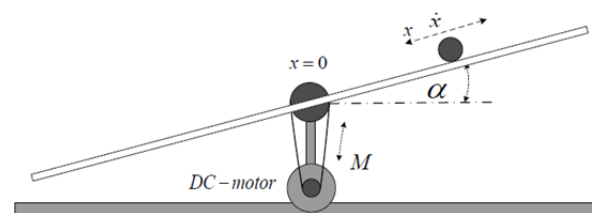
$$L = W_k - W_p \quad (3)$$

$W_k$  – kinetična energija

$W_p$  – potencialna in prožnostna energija

Modeliranja smo se lotili s pomočjo enačbe (1). Zadevo smo si poenostavili tako, da smo najprej računali sistem kroglice na plošči v eni dimenziji (v smeri  $x$ ), oziroma bolj znano kot sistem balansiranja kroglice na

vodilu (po angleško »ball and beam«). Slednji nam namreč predstavlja eno os v našem sistemu regulacije kroglice na plošči.



Slika 2: Primer balansiranja kroglice na vodilu.

Začeli smo z modeliranjem potencialne energije, kjer smo si pomagali s shemo razstavljenih sil na klancu in kotnimi funkcijami. [4] Z upoštevanjem kroglice kot telesa z maso, ki se giblje zaradi nagiba plošče, samo dobili kinetično energijo. Tukaj smo morali upoštevati vztrajnostni moment kroglice zaradi kotaljenja in nagibanja plošče (kroglica se giblje po navidezni krožnici).

Zaradi majhnih izgub samega kotaljenja kroglice in zmogljivih digitalnih servomotorjev, smo zanemarili izgube.

$$\left(m_k + \frac{J_k}{r_k^2}\right) \ddot{x} + m_k \cdot g \cdot \sin \alpha = M_x \quad (4)$$

$$(J_p + J_{kr}) \ddot{\alpha} + m_k \cdot g \cdot x \cdot \cos \alpha = M_y \quad (5)$$

$M_x$  – zunanji navor v  $x$  smeri

Po linearizaciji, kjer smo upoštevali da imamo relativno majhne kote, smo namesto (4) in (5) zapisali:

$$\left(m_k + \frac{J_k}{r_k^2}\right) \ddot{x} = -m_k \cdot g \cdot \alpha + M_x \quad (6)$$

$$(J_p + J_{kr}) \ddot{\alpha} = -m_k \cdot g \cdot x + M_y \quad (7)$$

$m_k$  – masa kroglice [kg]

$J_k$  – vztrajnostni moment kroglice [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ]

$J_p$  – vztrajnostni moment plošče [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ]

$J_{kr}$  – vztrajnostni moment kroglice z maso, ki kroži na razdalji  $x$  od izhodišča [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ]

$g$  – težnostni pospešek, za katerega predpostavimo, da je enak  $9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$

$x$  – položaj kroglice v smeri  $x$  [m]

$\alpha$  – naklon plošče v smeri  $x$  [ $^\circ$ ]

$r_k$  – polmer kroglice [m]

$M_x, M_y$  – vhodni navor [Nm]

Z upoštevanjem vztrajnostnih momentov, smo lahko povezali (6) in (7) ter dobili enačbi za smer x (analogno velja tudi za smer y):

$$\left(m_k + \frac{2m_k \cdot r_k^2}{5 \cdot r_k^2}\right) \dot{x} = -m_k \cdot g \cdot \alpha + M_x \quad (8)$$

$$\left(\frac{1}{3}m_p \cdot a^2 + m_k \cdot x^2\right) \ddot{\alpha} = -m_k \cdot g \cdot x + M_y \quad (9)$$

$m_p$  – masa plošče [kg]

$a$  – dolžina plošče v smeri x [m]

Zapisane enačbe zapišemo v prostoru stanj.

[13]

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bv \\ y &= Cx + Dv \end{aligned} \quad (10)$$

Sistemska matrika A:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \frac{-m_k g r_k^2}{r_k^2 m_k + J_k} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-m_k g}{J_{px} + J_k} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -m_k g & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-m_k g}{J_{px} + J_k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \frac{-m_k g r_k^2}{r_k^2 m_k + J_k} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-m_k g}{r_k^2 m_k + J_k} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-m_k g}{J_{py} + J_k} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Vhodna matrika B:

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Vhodna matrika C in D:

$$C = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

$$D = 0$$

Ker za implementacijo na mikrokontrolerju potrebujemo diskretni regulator, smo morali naš model pretvoriti v diskretno obliko. To smo storili z uporabo Z-transformacije, s katero preidemo v Z-prostor, kjer lahko časovno neodvisnim ter linearnim sistemom zamenjamo diferencialne enačbe z algebraičnimi enačbami. Za to potrebujemo čas tipanja, ki je v našem primeru 50 ms.

Prenosni funkciji multi-variabilnega sistema sta:

$$H_x(z) = \frac{0,001401 \cdot z + 0,001401}{z^2 - 2 \cdot z + 1}$$

$$H_y(z) = \frac{0,001401 \cdot z + 0,001401}{z^2 - 2 \cdot z + 1} \quad (11)$$

S temi enačbami smo se lahko lotili načrtovanje regulatorjev za obe smeri.

#### 4 Načrtovanje regulatorjev

#### 5 PID regulator

Digitalni PID regulator je najbolj znan regulator iz analogne regulacijske tehnike. Tako predstavlja PID regulator klasično orodje v industrijski avtomatizaciji, saj v industriji še vedno predstavljajo več kot 90 % delež vseh regulatorjev. Razvoj slednjih se je začel najprej v pnevmatiki, nato preko tranzistorske tehnike in dandanes jih najdemo implementirane na mikroprocesorjih. Razvoj je omogočil, da lahko kupimo PID regulatorje kot samostojne enote za regulacijo enega ali več delov sistema, s katerimi je mogoče rešiti mnogo regulacijskih nalog. Mogoče je tudi, da regulacijske zanke s PID regulatorjem kombiniramo z drugimi regulacijskimi strukturami. [3] [12]

Oblika idealnega regulatorja, ki ga lahko brez težav realiziramo v diskretni obliki je:

$$v(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_{t_0}^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt})$$

$$v(k) = K_p(e(k) + \frac{T_s}{T_i} \sum e(k) + \frac{T_d}{T_s} (\Delta e(k))) \quad (12)$$

$v(t)$  – izhod regulatorja

$K_p$  – ojačenje regulatorja

$e(t)$  – vhod regulatorja (regulacijsko odstopanje)

$T_i$  – integracijska časovna konstanta

$T_d$  – diferencialna časovna konstanta

$T_s$  – čas tipanja, v našem primeru 50 ms

PID regulator v Z-prostoru zapiše z enačbo:

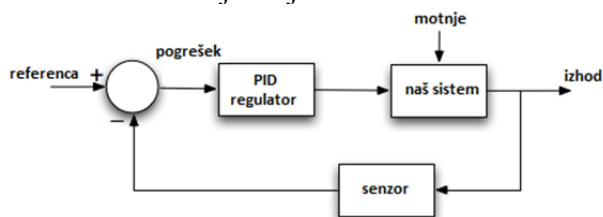
$$\frac{z^2 \left(1 + \frac{T_s}{T_i} + \frac{T_d}{T_s}\right) - z \left(1 + \frac{2 \cdot T_d}{T_s}\right) + \frac{T_d}{T_s}}{z(z-1)} \cdot K \quad (13)$$

$T_s$  – čas tipanja, v našem primeru 50 ms [s]

$T_d$  – diferenčni sunek, zvišuje dinamiko in zmanjšuje stabilnost [s]

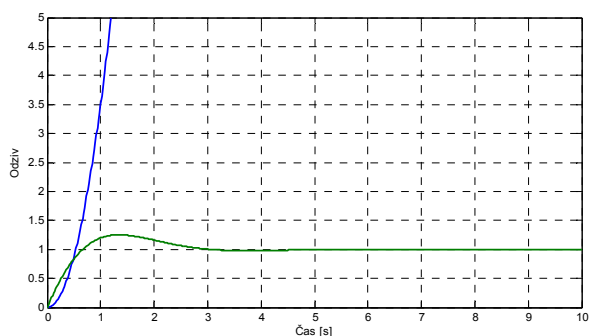
$T_i$  – čas integracije, zmanjšuje statično napako in povečuje stabilnost [s]

$K$  – linearno ojačenje



Slika 3: Osnovna shema implementacije PID regulatorja.

Parametre za PID regulator smo izračunali s pomočjo programskega orodja MATLAB in SIMULINK, kjer smo simulirali naš model in s pomočjo vgrajene funkcije »pidtool« določili parametre regulatorja.



Slika 4: Odziv sistema s PID regulatorjem (zelena) ter brez regulatorja (modra) na stopnično vzburjanje.

Pri implementaciji smo uporabili strukturo PID regulatorja, ki nam ga je ponudilo programsko orodje MATLAB (v Z-prostoru):

$$P + I \cdot T_s \cdot \frac{1}{z-1} + D \cdot \frac{N}{1 + N \cdot T_s \cdot \frac{1}{z-1}} \quad (14)$$

$P$  – koeficient ojačenja

$I$  – koeficient integracije

$T_s$  – čas tipanja

$D$  – diferencialni koeficient

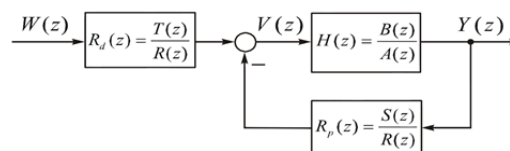
$N$  – koeficient filtra

Enačbo (12) smo pretvorili v diferenčno obliko in PID regulator implementirani na mikrokrmilnik.

## 6 Polinomska sinteza regulatorja

Poglavitni nalogi regulacijskih sistemov sta regulacija (stabilizacija, odpravlja vpliv motenj ter šuma sistema) in sledenje določenim referenčnim vrednostim na vhodu sistema. Katero funkcijo regulator opravlja bolje je odvisno predvsem od namena aplikacije, vendar pa si želimo, da bi regulator opravljal obe zahtevi čim bolje. Pri strukturah kot so P,PI,PID lahko obe zahtevi na enkrat dosegamo več ali manj z veliko mero kompromisa, saj z izboljšanjem regulacije očitno poslabšamo sledenje sistema. Vzrok temu je preprosta struktura prej omenjenih regulatorjev. Regulator s končnim nastavitvenim časom idealno izpolnjuje zahtevi po sledenju in regulaciji, vendar je v večini primerov zelo občutljiv na spremembe parametrov sistema in je zaradi tega manj robusten. Zelo dober kompromis med danima kriterijema lahko dosežemo s strukturo regulatorja z dvema prostostnima stopnjama in transparentnim pristopom načrtovanja. Slednje lahko izvedemo s polinomske sinteze regulatorja nam omogoča preprosto postavitve zaprto-zančnih polov in sočasno omogoča načrtovanje sledenje sistema različnim referenčnim vrednostim.

Polinomske regulator tvorita dve sistemski funkciji. To sta sistemski funkcija v direktni veji, kot predregulator  $R_d(z)$  in sistemski funkcija v povratni veji, kot stabilizirajoči regulator  $R_p(z)$ . [12]



Slika 5: Osnovna struktura regulatorja.

Za izračun regulatorja smo uporabili prenosno funkcijo (10), ki smo jo dobili pri modeliranju sistema. Pomagali smo si tako, da smo predregulator in regulator v direktni veji zapisali s pomočjo novih spremenljivk v

taki obliki, kot je razvidno na sliki 6. Na podlagi predstavljene strukture smo zapisali prenosno funkcijo zaprto-zančnega sistema:

$$H(z) = \frac{T(z) \cdot B(z)}{A(z) \cdot R(z) + S(z) \cdot B(z)} \quad (15)$$

Za izračun regulatorja smo si morali izbrati ustrezno število polov s primernimi vrednostmi, ki so ustrezale našim zahtevam. S poli smo zapisali polinom  $C(z)$  tako, da smo pole med sabo zmnožili. Stopnja polinoma je bila podana z enakostjo:

$$\deg(C(z)) = 2 \cdot \deg(A(z)) - 1 \quad (16)$$

$\deg(x)$  – stopnja polinoma  $x$

Na podlogi določenih zaprto-zančnih polov smo izračunali koeficiente  $R(z)$  in  $S(z)$  z polinomsko enačbo (16)- Diofantova enačba.

$$A(z) \cdot R(z) + B(z) \cdot S(z) = C(z) \quad (17)$$

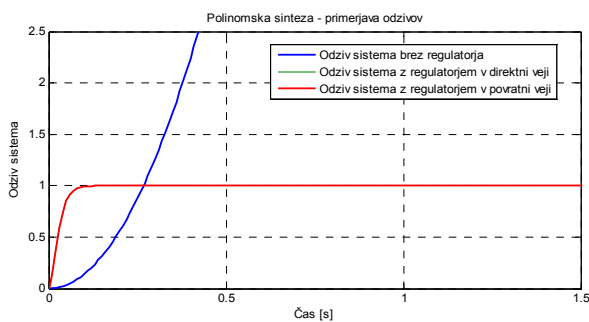
Ker za izračun končnega regulatorja potrebujemo tudi polinom  $T(z)$ , smo v ta namen zapisali enačbo, ki povezuje zeleno vhodno funkcijo z našim odzivom sistema.

$$Y(z) = \frac{B(z) \cdot T(z)}{C(z)} \cdot W(z) \quad (18)$$

Po računanju koeficientov smo prišli do končne oblike regulatorja:

$$R_d(z) = \frac{T(z)}{R(z)} = \frac{89,222 \cdot (z - 0,5)}{z + 0,15625} \quad (19)$$

$$R_p(z) = \frac{S(z)}{R(z)} = \frac{245,36 \cdot z - 200,749}{z + 0,15625} \quad (20)$$



Slika 6: Odziv sistema brez regulatorja (modra) in z regulatorjem (rdeča)

## 7 Izdelava fizičnega modela

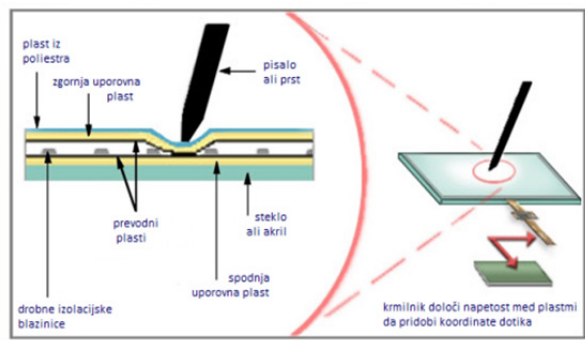
Za celoten sistem smo si morali zamisliti ogrodje, ki nam bo omogočalo horizontalno nagibanje vpete plošče v obeh pravokotnih smereh. Zahteve za ogrodje so se glasile:

- ogrodje mora biti dovolj lahko, da ga lahko nagibamo s servomotorjema,
- mora biti stabilno,
- mora imeti dober nosilec, na katerega bomo pritrdili naš panel s folijo, občutljivo na dotik,
- preprečiti mora, da bi krogla padla na tla.

Pri večini podobnih projektov se za določanje položaja krogle uporablja kamera, pri kateri pa moramo paziti, da imamo različni barvi podloge in krogle, da kamera slednjo lahko zazna. Pri foliji občutljivi na dotik pa smo omejeni le s težo, ki pa v današnjem času ne predstavlja več omejitev, saj so folije občutljive na dotik že dovolj natančne in občutljive.

Folija občutljiva na dotik se je pojavila konec šestdesetih let in so jo uporabljali predvsem v industrijskih obratih in javnih prostorih (informacijski terminali v muzejih, bankomati itd.). Izpodrinila je tipkovnico in miške tam, kjer je obstajala nevarnost vandalizma ali pa je bila kombinacija miške in tipkovnice prezapletena ali preokorna za upravljanja. Dandanes pa ta tehnologija doživlja množičen razvoj na račun vedno večje priljubljenosti elektronskih naprav. Uporablja se v pametnih telefonih, tabličnih računalnikih, GPS navigacijah in podobnih napravah. [15] Zaradi hitrega razvoja smo imeli na voljo različne folije občutljive na dotik. Izbirali smo med folijami, kjer se spreminja kapacitivnost, osvetlitev, prevajanje zvočnega valovanja in kjer se spreminja električna upornost. Odločili smo se za slednjo, saj je cenejša in kljub nekaterim slabšim lastnostim glede na kapacitivno folijo povsem zadošča našim zahtevam. Mi smo uporabili folijo, ki ustreza velikosti 19" (palčnih) zaslonov. Panel je zgrajen iz več plasti. Spodnja plast je iz stekla ali akrila in skrbi za trdnost panela. Nato si sledita

uporovna, dve prevodni in še ena uporovna plast. Med prevodnima plastema se nahajajo drobne izolacijske blazinice, ki služijo za ločitev teh dveh plasti. Po uporovni plasti še je nanesa plast poliestra, ki zaščiti našo folijo občutljivo na dotik. S pritiskom na zaslon, naredimo na mestu pritiska stik prevodne in uporovne folije. Z ustrezno izbranimi povezavami lahko tako odčitamo ustvarjeno upornost v obliki napetosti po Ohmovem zakonu. Tako lahko določimo koordinate dotika v obeh smereh.



Slika 7: Delovanje uporovne folije.

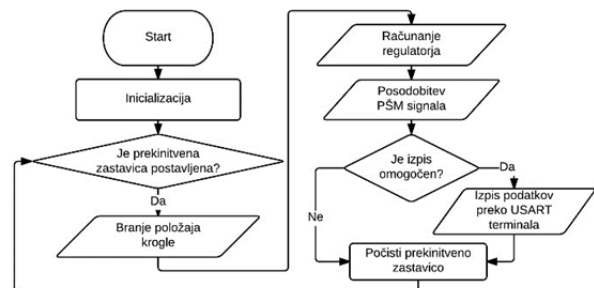
Za nagibanje naše plošče smo uporabili dva digitalna servomotorja SAVOX SC-0251 MG. Taki servomotorji se množično uporabljajo predvsem v modelarstvu za krmiljenje. Zaradi tega so cenovno ugodni, odlikuje pa jih še majhna teža in odlični navori.

Servomotor ima tri priključke. Za delovanje potrebuje napajalno napetost med 4,8 V in 6 V. Za vodenje motorja, priključimo na njega PŠM signal, s katerim reguliramo kot zasuka servomotorja. Motor je narejen tako, da se lahko obrne le za 180° in nam omogoča, da s točno določenim PŠM signalom, dosežemo željen kot odklona. Če povečamo čas logične enice, se poveča tudi odklon servomotorja. [1]

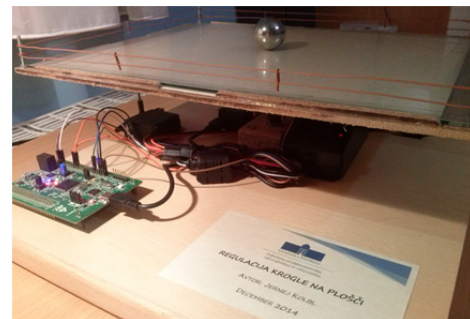
Vse skupaj smo s pomočjo programskega okolja MikroC PRO for ARM verzije 4.2.0 ustrezno implementirali na razvojno ploščo STM32 F4, ki temelji na visoko zmogljivem procesorju ARM Cortex-M4. Poganjamo ga lahko s 168 MHz, plošča pa nam nudi 1 MB

Flash pomnilnika, 192 KB RAM in 100 poljubno nastavljenih pinov.

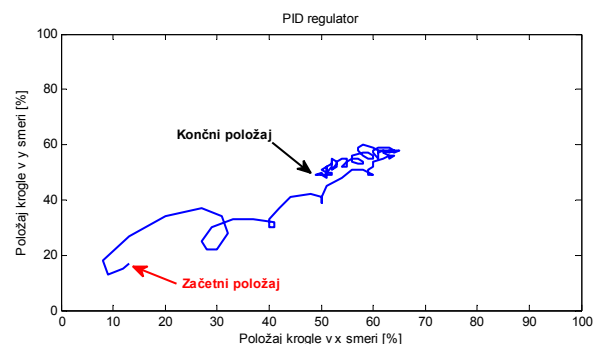
Tako smo prišli do končne oblike ogrodja in končnega programa.



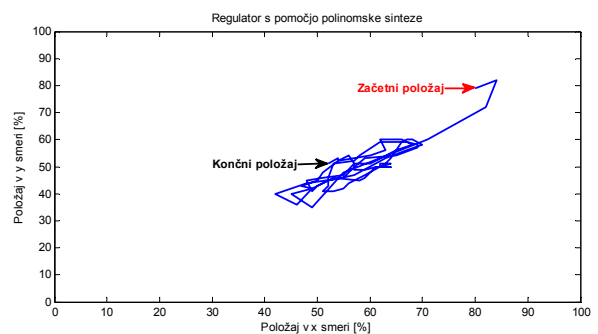
Slika 8: Delovanje programa.



Slika 9: Končni izdelek.



Slika 10: Rezultati fizičnega modela s PID regulatorjem.



Slika 11: Rezultati fizičnega modela z regulatorjem, dobljenim s pomočjo polinomske sinteze

## 8 Rezultati

Uspešno smo izdelali fizični model našega sistema ter se tako seznanili z vsemi sestavnimi deli. Tako smo spoznali delovanje in uporabo uporovne folije občutljive na dotik, delovanje in vodenje digitalnih servomotorjev, programiranje mikro-krmilnikov v programskem jeziku C++ ter implementiranje regulatorjev na mikro-krmilnik.

Po testiranju PID regulatorja na fizičnem modelu našega sistema smo ugotovili, da je deloval zelo dobro. Implementirali pa smo še regulator, ki smo ga dobili s pomočjo polinomske sinteze. Oba regulatorja sta zadoščala našim zahtevam. Tako smo dosegli naš cilj, regulirati kroglo v točno določeni točki na foliji občutljivi na dotik.

## 9 Zaključek

Z izvedbo naše regulacije smo bili zadovoljni, čeprav bi jo lahko izboljšali v več pogledih. Delovanje bi lahko izboljšali najprej z boljšim matematičnim modelom našega sistema. Pri uporovni foliji smo morali paziti na prehitro preklapljanje pinov za izbiro osi branja položaja krogle, saj smo prišli do nelinearnih vrednosti položaja, ki jih nismo mogli uporabiti pri naši regulaciji. Tako smo prišli do različnih zakasnitev (vse skupaj 0,7 ms) pri branju naših analognih vrednosti, ki nam hkrati omejujejo pogostost prekinitev v programu. Regulacijo bi prav tako lahko bolje izvedli z dodatnimi senzori nagiba plošče ter servomotorji, katerim bi lahko spreminjali njihovo hitrost obračanja. S takimi nadgradnjami bi lahko implementirali regulator v prostoru stanj, s katerim bi dosegli zelo dobro regulacijo krogle v točno določeni točki in sledenje krogle določeni trajektoriji.

Pri projektu smo se srečevali z več težavami in na koncu prišli do ugotovitve, da je najbolj pomembno dobiti natančen matematični model našega sistema, saj lahko z njim lažje načrtamo dober regulator.

## 10 Literatura

- [1] DC MOTOR / SC-0251MG. (7. avgust 2014). Pridobljeno iz spletno mesto podjetja SAVOX: [http://www.savotech.com.tw/\\_english/00\\_servo/02\\_detail.php?SID=24](http://www.savotech.com.tw/_english/00_servo/02_detail.php?SID=24)
- [2] Dolinar, D. (2009). Dinamika linearnih sistemov in regulacije. Maribor: Založniška dejavnost FERi.
- [3] Garbrecht, W. F. (1991). Digitale Regelungstechnik - Eine Einführung in die praktische Anwendung. Berlin: vde-verlag gmbh.
- [4] Isermann, R. (1987). Identifikacija dinamičnih sistemov: 1. del. Ljubljana: Fakulteta za elektrotehniko v Ljubljani.
- [5] Jajčičin, Š. (6. avgust 2014). Center of modern Control Techniques and Industrial Informatics. Pridobljeno iz Ball & Plate Kyb: <http://kyb.fei.tuke.sk/laben/modely/gnk.php>
- [6] Karba, R. (1999). Modeliranje procesov. Ljubljana: Založba FE in FRI.
- [7] Lagrangian. (6. avgust 2014). Pridobljeno iz Wikipedia: The Free Encyclopedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/Lagrangian>
- [8] mikroC PRO for ARM. (11. avgust 2014). Pridobljeno iz spletno mesto podjetja MikroElektronika: <http://www.mikroe.com/mikroc/arm/>
- [9] Sarjaš, A., Chowdhury, A., & Svečko, R. (2007). Nelinearni sistemi vodenja: Zbirka vaj. Maribor: Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Maribor.
- [10] STM32F4DISCOVERY. (11. avgust 2014). Pridobljeno iz spletno mesto podjetja ST: <http://www.st.com/web/catalog/tools/FM116/SC959/SS1532/PF252419>
- [11] STMICROELECTRONICS - STM32F4DISCOVERY. (11.8.2014. avgust 2014). Pridobljeno iz spletno mesto podjetja Farnell: <http://si.farnell.com/stmicroelectronics/stm32f4discovery/stm32f407-usb-otg-discovery-kit/dp/2009276>
- [12] Svečko, R. (2003). Diskretni regulacijski sistemi. Maribor: Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Maribor.
- [13] Svečko, R. (2005). Teorija sistemov. Maribor: Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Maribor.
- [14] ToTeam. (7. avgust 2014). Pridobljeno iz spletno mesto družbe ToTeam: <http://toteam.co.il/document/64,0,6.aspx>
- [15] Zaslon na dotik. (7. avgust 2014). Pridobljeno iz Wikipedija, prosta enciklopedija: [https://sl.wikipedia.org/wiki/Zaslon\\_na\\_dotik](https://sl.wikipedia.org/wiki/Zaslon_na_dotik)