

## KRMILNI ALGORITEM ZA NATANČNO KRMILJENJE POZICIJE DVEH ANTAGONISTIČNO VPETIH PNEVMATIČNIH MIŠIČ

Jernej PROTNER, mag. inž. str., dr. Miha PIPAN, prof. dr. Niko HERAKOVIČ  
Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani

### POVZETEK

*Zaradi visokega razmerja med maso in generirano silo ter fleksibilnosti sistema pnevmatičnih mišic, se je v zadnjem času povečala želja po njihovi uporabi. Glavna pomankljivost pnevmatičnih mišic je njihova nelinearna karakteristika, ki otežuje natančnost krmiljenja. Prispevek obravnava razvoj novega krmilnega algoritma za natančno krmiljenje pozicije dveh antagonistično vpetih pnevmatičnih mišic. Krmiljenje pozicije in tlaka smo izvedli s štirimi PID krmilniki (za vsak ventil posebej), krmiljenje ventilov pa je za antagonističen sistem izvedeno z že razvitim A-PID krmilnim algoritmom, laboratorija LASIM. S tem smo dosegli za 66,6% boljšo natančnost držanja pozicije glede na primerljive sisteme drugih raziskovalcev.*

### 1. UVOD

S pospešenim razvojem tako industrijskih kot tudi bio-mehanskih robotskih sistemov, se je v zadnjem času močno povečalo zanimanje za uporabo umetnih mišic kot novih načinov akcije. K temu je močno prispeval razvoj novih materialov, kot so npr. karbonske nanocevice, prevodni polimeri, kovine in polimeri s "spominom" itd. ter podrobne raziskave tistih lastnosti umetnih mišic, ki zagotavljajo prednosti pred klasičnimi aktuatorji [1].

V prispevku so obravnavane pnevmatične umetne mišice, ki imajo v primerjavi z ostalimi umetnimi mišicami največjo hitrost odziva in hitrost krčenja. Tako kot ostale umetne mišice jih odlikujejo tudi fleksibilnost ter visoko razmerje med maso in generirano silo [2]–[4]. Kljub naštetim prednostim pa je njihova uporaba v industriji dokaj redka, kar je posledica primanjkljaja ustreznih krmilnih algoritmov, ki bi omogočali natančno pozicioniranje in hitro odzivnost [5]. Velik problem pri krmiljenju predstavljajo tudi nelinearne karakteristike mišice, lekaže ventilov ter pojav histereze [6]–[8]. Zato krmiljenje sistema dveh antagonistično povezanih pnevmatičnih mišic običajno temelji na naprednih PID krmilnih algoritmih, ki pa so zaradi počasnega odziva pri hitrih spremembah in neprilagodljivosti na spremembe v sistemu nadgrajeni z nevroskimi

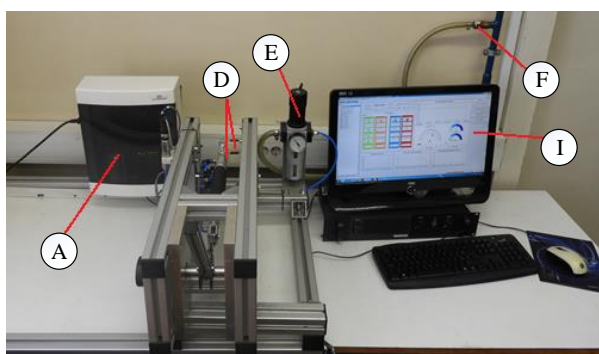
mrežami, mehko logiko, prediktivno kontrolo itd. [9]–[11]. Za krmiljenje tlaka se običajno uporabljajo proporcionalni in nekoliko redkeje servo ventili, uporaba hitrih preklopnih ventilov s PWM modulacijo pa je redkejša. V prispevku je predstavljen krmilni algoritem za natančno krmiljenje pozicije, ki predstavlja nadgradnjo obstoječega adaptivnega PID (A-PID) krmilnega algoritma razvitega v LASIM-u [12].

### 2. OPIS SISTEMA

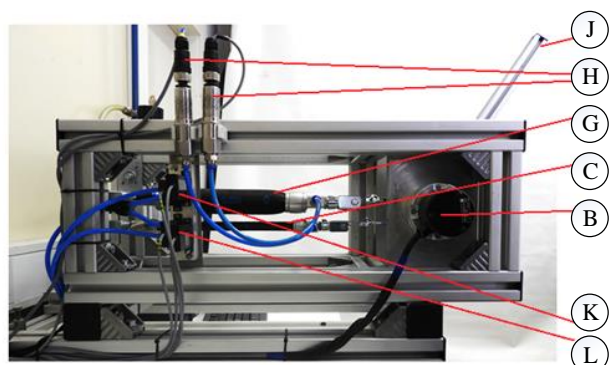
Preizkuševališče, ki smo ga razvili za testiranje odziva pnevmatičnih mišic je prikazano na Sliki 1 in Sliki 2, pri čemer oznaka A predstavlja krmilnik Beckhoff CX5010 z ustreznimi moduli, B predstavlja inkrementalni rotacijski enkoder, C predstavlja antagonistično mišico, z oznako D so predstavljeni senzorji sile, z E regulator tlaka, s F omrežje stisnjene zraka, z oznako G je predstavljena agonistična mišica, s H senzorji tlaka, z I krmilni računalnik, z J roka aktuatorja, z K ventili MHJ10-MF in z L ventili MHJ10-LF.

## KRMILNI ALGORITEM ZA NATANČNO KRMILJENJE POZICIJE DVEH ANTAGONISTIČNO VPETIH PNEVMATIČNIH MIŠIC

Jernej PROTNER, mag. inž. str., dr. Miha PIPAN, prof. dr. Niko HERAKOVIČ  
Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani



Slika 1: Preizkuševališče



Slika 2: Sestavni deli preizkuševališča

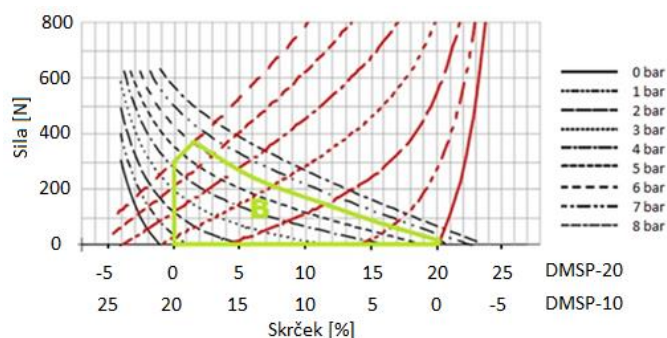
Preizkuševališče je sestavljeno iz dveh antagonistično povezanih Festo pnevmatičnih mišic, pri čemer tip DMSP-20-200N RM-RM služi kot agonist, tip DMSP-10-200N RM-RM pa kot antagonist. Za krmiljenje tlaka v mišici DMSP-20 je uporabljen par Festo hitro-preklopnih ventilov MHJ10-S-2.5-MF, v mišici DMSP-10 pa par Festo hitro-preklopnih ventilov MHJ10-S-2.5-LF. Merjenje tlaka je izvedeno z dvema senzorjema Festo SDET-22T-D10-G14-U-M12. Merjenje sile pa z dvema senzorjema Elane ELC-L116. Preizkuševališče je postavljeno tako, da sta pnevmatični mišici vpeti na zasučni boben preko jeklene vrvi. Spodrsavanje vrvi na bobnu je preprečeno z dvojnimi ovitjem jeklenice in dodatnim varnostnim vijakom. Na boben je pritrjena roka pnevmatičnega aktuatorja, ki določa njegovo delovanje. Za meritev pozicije je uporabljen inkrementalni rotacijski enkoder Heidenhain Rod 426E.004 1080. Vhodni/izhodni signal so procesirani z industrijskim krmilnikom Beckhoff CX 5010 z ustreznimi moduli, ki so prikazani v Preglednici 1.

### Preglednica 1: Specifikacije modulov krmilnika

	Opis	Specifikacije
CX5010 [17]	Krmilnik	1,1 GHz Intel Atom Z510 procesor
EL5101 [18]	Modul za enkoder	5 V DC, 0,5 A, 32 bit, 1 MHz
2x EL2502 [19]	2-kanalni PWM izhod	24 V DC, 1 A, 16 bit
EL3104 [20]	4-kanalni analogni vhod	-10...10 V, 16 bit
2x EL3351 [21]	1-kanalni vhod za sensor sile	-20...20 mV, 5 V DC, max. 20 mA, 16/32 bit

### 3. DELOVNO OBMOČJE

Maksimalni zasučni kot pnevmatičnega aktuatorja je  $140^\circ$ . Začetna oz. nična pozicija pnevmatičnega aktuatorja je v najnižji legi roke, pri kotu  $\theta_0 = 0^\circ$ . Določena je ročno v spodnji legi roke pnevmatičnega aktuatorja t.j. ko je tlak v mišici DMSP-10 6 bar, tlak v mišici DMSP20 pa 0 bar. Potreben skrček mišice za doseganje kota  $\theta = 140^\circ$ , je 20 % kar določa delovno območje pnevmatičnega aktuatorja. Le-to je določeno s prekritjem grafov generirane sile, mišice DMSP10 ter DMSP20 v odvisnosti od skrčka pri določenem tlaku (Slika 3). Tlačne krivulje mišice DMSP20 so zrcaljene preko y osi.

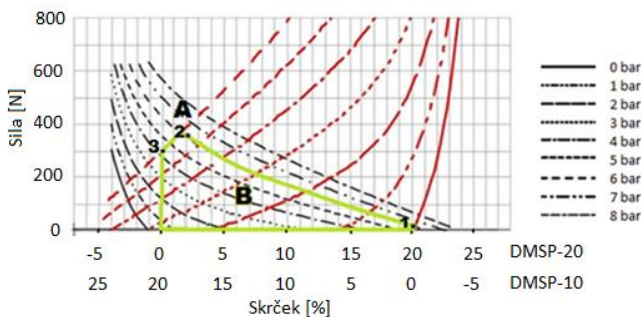


Slika 3: Delovno območje pnevmatičnega aktuatorja (B) [13]: tlačne krivulje mišice DMSP10 (črna barva) in DMSP20 (rdeča barva).

Ker je maksimalni delovni tlak ventila MHJ10 – MF  $P_{MF} = 6$  bar, smo delovno območje zmanjšali na območje B. Mišici tako omogočata 20 % skrček in generirata maksimalno silo  $\sim 400$  N pri tlaku  $P_{DMSP10} = 6$  bar in  $P_{DMSP20} = 6$  bar.

#### 4. NAČIN KRMILJENJA

Najprej ohranjamo konstanten tlak v mišici DMSP10  $P_{DMSP10} = 6$  bar in referenčni poziciji sledimo s povečevanjem tlaka v mišici DMSP20 (krivulja med točkama 1. in 2.). Ko presežemo točko (A) v kateri sta tlaka v mišicah enaka 6 bar, ohranjamo konstanten tlak  $P_{DMSP20} = 6$  bar v mišici DMSP20 in referenčni poziciji sledimo z zmanjševanjem tlaka v mišici DMSP10 (krivulja med točka 2. in 3.). Točka A je določena programsko s povečevanjem tlaka v obeh mišicah do  $6 \pm 0.25$  bar, kjer je vrednost zasučnega kota shranjena kot  $\theta_A$ . Potek je predstavljen na Sliki 4.



Slika 4: Potek krmiljenja pnevmatičnega aktuatorja

#### 5. KRMILNI ALGORITEM

Krmilni algoritem je sestavljen iz štirih ločenih PID krmilnih algoritmov (po en za vsak ventil). Takšna konfiguracija omogoča ločeno kontrolo vhodnih in izhodnih ventilov obeh mišic in tako poveča natančnost določanja pozicije. Poleg tega vsebuje kontrolni algoritem za ventile in modifikacijo PID algoritma, ki sta na podlagi A-PID krmilnega algoritma prilagojena za antagonističen sistem. Za določitev parametrov PID algoritma je bila uporabljena Ziegler-Nicholasova metoda, prilagojena za diskretne sisteme [14].

Kot je dokazano v [12], se hitro-preklopni ventili začnejo odpirati šele ko PWM signal doseže najmanjšo potrebno širino pulza, kar pomeni da je nekaj časa sistem v stanju, ko je napaka prisotna vendar se nanjo ne odzove. Krmilni algoritem za ventile tako omogoča hitrejšo odzivnost ventilov in posledično manjšo napako pozicije (ki je izračunana kot razlika med

referenčno in dejansko pozicijo). Zaradi nelinearnih lastnosti mišic in posledičnih sprememb togosti in dušenja v mišici, naš algoritem optimira PID parameter glede na referenčno pozicijo (zaradi različnih tlakov v mišici v različnih pozicijah, se notranja sktruktura mišice različno deformira in posledično spreminja njeno togost). Blokovna shema razvitega algoritma je prikazana na Sliki 5, kjer je  $\theta_A$  zasučni kot v točki A,  $\theta_{ref}$  je referenčni zasučni kot,  $\theta$  je dejanski izmerjeni zasučni kot,  $e_p$  je pogrešek tlaka (izračunan kot razlika med referenčnim tlakom 6 bar in dejanskim tlakom v antagonistični mišici),  $e_{poz}$  je pogrešek pozicije (izračunana kot  $\theta_{ref} - \theta$ ) DMSP10 je antagonistično vpeta mišica, DMSP20 je agonistično vpeta mišica, PID-1/2-10/20 je PID algoritem vhodnega/izhodnega ventila antagonistično/agonistično vpete mišice, Kontrolni algoritem 1/2-10/20 je kontrolni algoritem vhodnega/izhodnega ventila antagonistično/agonistično vpete mišice in EL2502 1/2-1/2 je prvi/drugi modul ter prvi/drugi kanal modula EL2502.

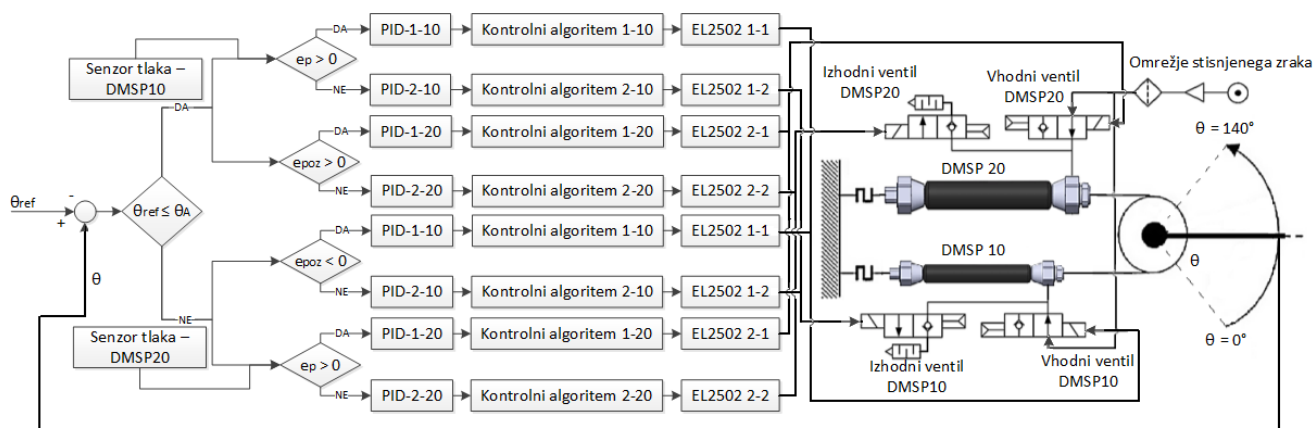
#### 6. REZULTATI IN DISKUSIJA

Analizo krmilnega algoritma smo izvedli s štirimi skočnimi funkcijami različnih amplitud, ki si sledijo ena za drugo. Zaradi večje preglednosti je odziv sistema predstavljen za vsako skočno funkcijo posebej. Pri testiranju na vsako od štirih amplitud smo najprej določili PID parametre nato pa, zaradi nelinearnosti sistema, programsko prilagodili vrednosti PWM signalov (odprtost ventilov) za posamezne referenčne pozicije, glede na odstopek pozicije.

Na Sliki 6 je prikazan odziv sistema z A-PID krmilnim algoritmom na skočno funkcijo z amplitudo  $20^\circ$ . Iz rezultatov je razvidno, da je odstopek negativen kar je posledica lekaže vhodnega ventila, ki jo sistem poskuša kompenzirati z odpiranjem izhodnega ventila. Sistem ne more povsem izničiti vpliva lekaže ventilov, saj je PWM signal izhodnega in vhodnega ventila programsko zmanjšan.

# KRMILNI ALGORITEM ZA NATANČNO KRMILJENJE POZICIJE DVEH ANTAGONISTIČNO VPETIH PNEVMATIČNIH MIŠIC

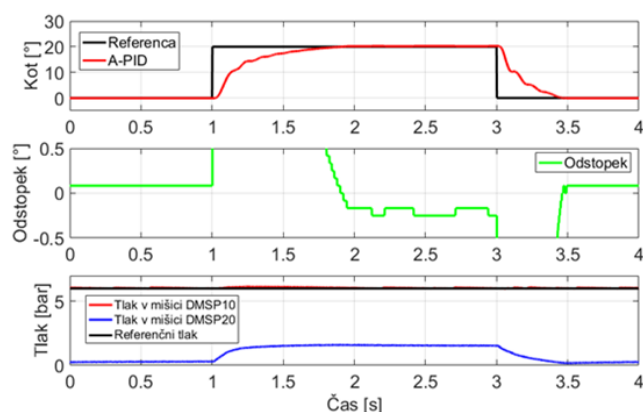
Jernej PROTNER, mag. inž. str., dr. Miha PIPAN, prof. dr. Niko HERAKOVIČ  
 Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani



**Slika 5:** Blokovna shema krmilnega algoritma

Razlog za to omejitev je nelinearnost sistema oz. nestabilnosti sistema brez prilagoditve PWM signala in pojava oscilacije. Drug razlog za negativen odstopke in posledično popraviljanje pozicije so zaostale napetosti v mišici, le-ta se namreč pri napihovanju (krčenju) deformira, kar pomeni, da se mišica zaradi deformacije notranjih sten gumijastega plašča skrči tudi zatem, ko se dovodni ventil zapre. Če smo PID parametre povečali z namenom doseganja večje natančnosti je sistem postal nestabilen.

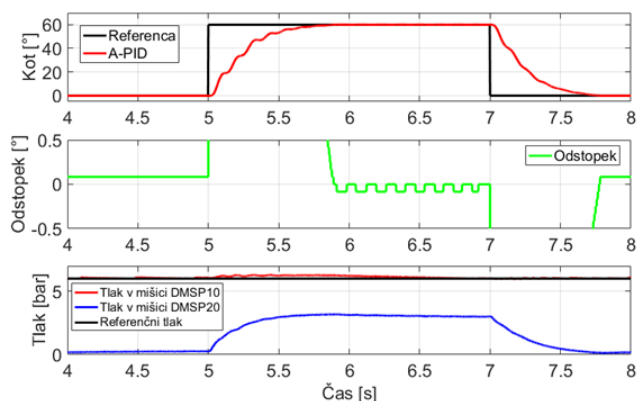
Ker smo krmilni algoritem zasnovali tako, da ima vsak ventil svoj PID krmilni algoritem, smo lahko optimirali PID parametre izhodnega ventila za doseganje hitrejšega izhodnega odziva, ter manjšega odstopka pozicije od reference  $0^\circ$ .



**Slika 6:** Odziv na skočno funkcijo z amplitudo  $20^\circ$

Na Sliki 7 je prikazan odziv sistema z A-PID krmilnim algoritmom na skočno funkcijo z amplitudo  $60^\circ$ . Iz rezultatov je razvidno, da ker vhodni in izhodni ventil delujeta pri približno

enaki tlačni razliki, je hitrost njunega odziva skoraj enaka. Zato je odstopke pozicije manjši kot pri odzivu na referenco  $20^\circ$  (Slika 6). Razvidno je, da je prisotna lekaža vhodnega ventila, ki jo sistem stalno kompenzira z vklopjanjem izhodnega ventila. Poleg tega na zmanjševanje odstopka pozicije vpliva tudi ločljivost enkoderja (okoli  $0,07^\circ$ ). Ker sistem ne zazna napake manjše od te vrednosti, se sistem odzove šele, ko je napaka večja in vklopi izhodni ventil mišice DMSP20.

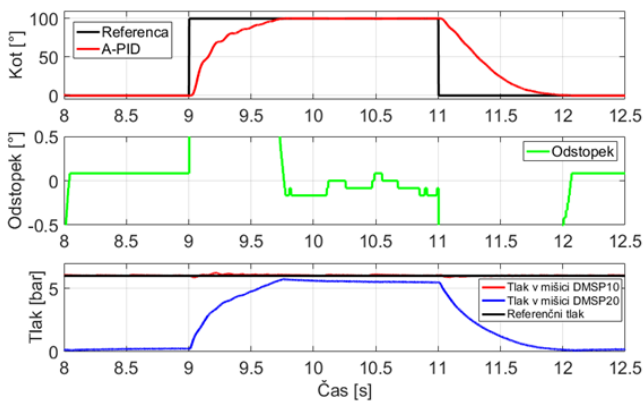


**Slika 7:** Odziv sistema na skočno funkcijo z amplitudo  $60^\circ$ .

Na Sliki 8 je prikazan odziv sistema z A-PID krmilnim algoritmom na skočno funkcijo z amplitudo  $100^\circ$ . Iz rezultatov je razvidno, da je začetni odstopke pozicije delno posledica lekaže vhodnega ventila, zaostalih napetosti v mišici ter previsoke vrednosti proporcionalnega člena (pri manjši vrednosti se občutno zmanjša hitrost odziva sistema). Sistem pozicijo popravlja z vklopjanjem izhodnega ventila, ki pa deluje pri



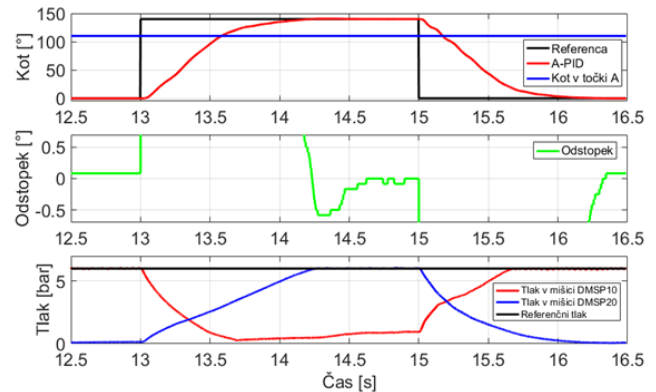
višji tlačni razliki kot vhodni ventil, kar pomeni, da je njegov odziv počasnejši. Iz grafa tlaka v odvisnosti od časa je razvidno, da tlak na začetku naraste do točke, ko sistem doseže referenčno pozicijo, nato pa počasi pada. Ko sistem doseže referenčno pozicijo, se vhodni ventil mišice DMSP20 izklopi, vendar ker je mišica deformabilna se še naprej krči (pojavi se deformacija notranjega plašča in notranje napetosti). Zaradi nastanka notranjih, zaostalih napetosti ter trenja med ojačitvenimi vlakni in gumo plašča se pri vklopu izhodnega ventila mišice DMSP20, mišica ne raztegne sorazmerno s padcem tlaka (zaradi napetosti v notranjem plašču se razteguje počasneje), kar sistem rešuje z zmanjševanjem tlaka v mišici (zmanjšuje odprtost izhodnega ventila).



**Slika 8:** Odziv sistema na skočno funkcijo z amplitudo 100°.

Na Sliki 9 je prikazan odziv sistema z A-PID krmilnim algoritmom na skočno funkcijo z amplitudo 140°. Iz rezultatov je razvidno, ker tlak v mišici DMSP10, pri dvigu čez točko A, pade skoraj na 0 bar (kar je posledica večje vrednosti proporcionalnega člena, za doseganje občutno krajšega časa odziva sistema), mišica DMSP20 kratek čas ni omejena s silo, ki jo ustvarja manjša mišica, kar posledično, poleg lekaže vhodnih ventilov ter deformacije notranjosti mišice, pomeni precej večji odstopke v trenutku, ko sistem doseže referenčno pozicijo. Ker tlak v mišici DMSP20 v območju nad točko A počasi narašča do 6 bar in ker mišica DMSP20 v tem stanju generira večjo silo kot mišica DMSP10, leto poleg lekaže izhodnega ventila mišice

DMSP10 vpliva na povečevanje odstopka. To sistem pokuši kompenzirati z vklopom vhodnega ventila mišice DMSP10.



**Slika 9:** Odziv sistema na skočno funkcijo z amplitudo 140°.

Dobljene rezultate smo primerjali z rezultati dveh drugih primerljivih sistemov (Preglednica 2). Problem, na katerega smo naleteli pri primerjavi rezultatov je v tem, da večina raziskovalcev krmilnih algoritmov ne testira za referenčne funkcije z amplitudami višjimi od 40° ter da so amplitude referenčnih funkcij pogosto naključno generirane. Iz primerjalne tabele je razvidno, da ima naš sistem v primerjavi z krmilnikom na podlagi mehke logike (SOFC) za 33,3 % počasnejši odzivni čas, vendar je naša napaka pozicije za 38,4 % manjša. Za 39,1 % je manjša tudi napaka pozicije pri zasučnem kotu 140°. V primerjavi s krmilnikom na podlagi LVQ nevronske mreže, ima naš sistem pri amplitudi referenčne funkcije 60°, za 27 % krajši odzivni čas, ter za 89,7 % manjšo napako pozicije.

**Preglednica 2: Primerjava rezultatov**

Krmiljenje	Mišice	Referenčna funkcija	Rezultati
Krmilnik podlagi mehke logike (SOFC) [15]	Par Festo MAS-10-260N-AA-MC-O-ER	Skočna od 0° do 18°	$t_{dv} = 0,6 \text{ s}$ $t_{um} = 0,6 \text{ s}$ $e = \pm 0,32^\circ$ $\theta_p = 0^\circ$
Inteligentni krmilnik na podlagi LVQ nevronske mreže [16]	Par Festo MAS-10-N-220-AA-MCFK	Linearna funkcija 45°	$t_{dv} = 3,3 \text{ s}$ $t_{um} = 4,3 \text{ s}$ $e = \pm 0,39^\circ$ $\theta_p = 2,5^\circ$
Naš algoritem	Festo DMSP-10-200N RM-RM in Festo DMSP-20-200N RM-RM	Skočna od 0° do 20°	$t_{dv} = 0,90 \text{ s}$ $t_{um} = 0,90 \text{ s}$ $e = -0,195^\circ \pm 0,002^\circ$ $\theta_p = 0^\circ$
		Skočna od 0° do 60°	$t_{dv} = 0,89 \text{ s}$ $t_{um} = 0,89 \text{ s}$ $e = -0,038^\circ \pm 0,002^\circ$ $\theta_p = 0^\circ$
		Skočna od 0° do 100°	$t_{dv} = 0,76 \text{ s}$ $t_{um} = 0,76 \text{ s}$ $e = -0,085^\circ \pm 0,003^\circ$ $\theta_p = 0^\circ$
		Skočna od 0° do 140°	$t_{dv} = 1,23 \text{ s}$ $t_{um} = 1,23 \text{ s}$ $e = -0,184^\circ \pm 0,011^\circ$ $\theta_p = 0^\circ$

## 7. ZAKLJUČEK

V prispevku je predstavljen razvoj krmilnega algoritma za natančno krmiljenje pozicije dveh antagonistično vpetih pnevmatičnih mišic, ki je nadgradnja predhodno razvitega A-PID krmilnega algoritma. Iz eksperimentalno dobljenih rezultatov je razvidno, da ima naš algoritem v primerjavi z dvema primerljivima sistemoma za 66,6 % večjo natančnost pozicije glede na delovno območje pnevmatične mišice.

## Literatura

[1] I. W. Hunter, S. Lafontaine: *A Comparison of Muscle with Artificial Actuators*. Solid-State Sensor Actuator Workshop. 5th Technical Digest, IEEE (1992) str. 178 – 185.  
 [2] M. Zupan, M. F. Ashby, N. A. Fleck: *Actuator Classification and Selection – The Development of a*

*Database*. Advanced Engineering Materials **4**:12 (2002) str. 933 – 939.  
 [3] T.-J. Yeh, M.-J. Wu, T.-J. Lu, F.-K. Wu, C.-R. Huang: *Control of McKibben Pneumatic Muscles for a Power-Assist, Lower-Limb Orthosis*. Mechatronics **20** (2010) str. 686 – 697.  
 [4] L. Stubbs: *The Development of Artificial Muscles Using Textile Structures: doktorska disertacija*. Manchester, 2011 Sowa, J. F.: *Conceptual Structures*, Addison-Wesley, 1984, str. 1 – 26  
 [5] M. Tavakoli, L. Marques, A. T. de Almeida: *A Comparison Study on Pneumatic Muscles and Electrical Motors*. V: Z. Wang (ur.): *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Bangkok, Tajska, 2009, str. 1590 – 1594.  
 [6] J. Xianzhi, X. Caihua, S. Ronglei, X. Youlun: *Fuzzy Hybrid Force-Position Control for the Robotic Arm of an Upper Limb Rehabilitation Robot Powered by Pneumatic Muscles*. V S. Walcheski (ur.): *2010 International Conference on E-Product, E-Service and E-Entertainment*. Henan, Kitajska, 2010, str. 1 – 4.  
 [7] K. Balasubramanian, K. S. Rattan: *Trajectory Tracking Control of Pneumatic Muscle System Using Fuzzy Logic*. V: D. Fliev (ur.): *2005 Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society*. Detroit, ZDA, 2005, str. 472 – 477.  
 [8] J. Zhao, J. Zhong, J. Fan: *Position Control of a Pneumatic Muscle Actuator Using RBF Neural Network Tuned PID Controller*. Mathematical Problems in Engineering **2015** (2015) str. 1 – 16.  
 [9] D. Büchler, H. Ott, J. Peters: *A Lightweight Robotic Arm with Pneumatic Muscles for Robot Learning*. V: A. Okamura (ur.): *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Stockholm, Švedska, 2016, str. 4086 – 4092.  
 [10] M. K. Chang, P. L. Yen, T. H. Yuan: *Angle Control of a one – Dimension Pneumatic Muscle Arm using Self-Organizing Fuzzy Control*. V B.-F. Wu (ur.): *2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. Taipei, Taiwan, 2006, str. 3834 – 3838.  
 [11] C. Song, S. Xie, Z. Zhou, Y. Hu: *Modeling of Pneumatic Artificial Muscle Using a Hybrid Artificial Neural Network Approach*. Mechatronics **31** (2015) str. 124 – 131.  
 [12] M. Pipan: *Karakterizacija in krmilni algoritem pnevmatičnih mišic: doktorska disertacija*. Ljubljana, 2016.  
 [13] Festo: *Fluidic Muscle DMSP/MAS*. Dostopno na: [https://www.festo.com/cat/sl\\_si/data/doc\\_engb/PDF/EN/DMSP-MAS\\_EN.PDF](https://www.festo.com/cat/sl_si/data/doc_engb/PDF/EN/DMSP-MAS_EN.PDF), ogled 25.4.2017.  
 [14] V. V. Patki, D. N. Sonwane, D. D. Ingole, V. V. Naik: *Design and Implementation of Discrete Augmented Ziegler-Nichols PID Controller*.  
 [15] M. K. Chang, P. L. Yen, T. H. Yuan: *Angle Control of a one – Dimension Pneumatic Muscle Arm using Self-Organizing Fuzzy Control*. V B.-F. Wu (ur.): 2006

- IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. Taipei, Taiwan, 2006, str. 3834 – 3838.
- [16] K. K. Ahn, H. T. C. Nguyen: *Intelligent Switching Control of a Pneumatic Muscle Robot Arm Using Learning Vector Quantization Neural Network*. *Mechatronics* **17** (2007) str. 255 – 262.
- [17] Beckhoff: *CX5010 | Embedded PC with Intel® Atom™ processor*. Beckhoff, 2017.
- [18] Beckhoff: *Documentation for EL5101-00xx Incremental Encoder Interface*. Dostopno na: <https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/el5101/index.html&id>, ogled 23.4.2017.
- [19] Beckhoff: *Documentation for EL2502 2 channel pulse width output terminal, 24VDC*. Dostopno na: <https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/el5101/index.html&id>, ogled 23.4.2017.
- [20] Beckhoff: *EL3104 | 4-channel analog input terminal - 10...+10 V*. Dostopno na: <https://www.beckhoff.com/english.asp?ethercat/el3104.htm>, ogled 14.5.2017.
- [21] Beckhoff: *EL3351 | 1-channel resistor bridge terminal (strain gauge)*. Dostopno na: <https://www.beckhoff.com/english.asp?ethercat/el3351.htm>, ogled 14.5.2017.