



## کنترل فازی انگشت مصنوعی یک ربات با استفاده از عملگرهای آلیاژ حافظه‌دار

محمد مهدی خیری خواه<sup>1\*</sup>، علیرضا خدایاری<sup>2</sup>، مریم تاتلاری<sup>3</sup>

- 1- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، قزوین  
 2- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد پردیس، پردیس  
 3- کارشناس ارشد، مهندسی مکاترونیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین، قزوین  
 \* قزوین، صندوق پستی 1498-523، kheirikhah@qiau.ac.ir

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
 دریافت: 02 بهمن 1394  
 پذیرش: 08 خرداد 1395  
 ارائه در سایت: 24 مرداد 1395  
 کلید واژگان:  
 انگشت مصنوعی  
 آلیاژ حافظه‌دار  
 شبیه‌سازی  
 ساخت نمونه  
 کنترل فازی

## چکیده

امروزه آلیاژهای حافظه‌دار به دلیل توان بالا، حجم کم و سازگاری با بدن انسان به‌صورت گسترده در ساخت عملگرها در اندام پروتزی و تجهیزات پزشکی استفاده می‌شوند. در این مقاله کنترل فازی یک نمونه واقعی انگشت مصنوعی با استفاده از خواص عملگرهای آلیاژ حافظه‌دار ارائه می‌شود. بدین منظور ابتدا مدل دینامیکی یک انگشت رباتیک سه درجه آزادی با مفاصل چرخشی که از سیم آلیاژ حافظه‌دار به‌عنوان زردپی به منظور جمع‌شدن هر بند انگشت و یک فنر پیچشی برای بازگرداندن هر بند به محل اولیه استفاده می‌کند، ارائه می‌شود. پس از شبیه‌سازی مدل دینامیکی انگشت در محیط سیمولینک نرم‌افزار متلب، با استفاده از نتایج شبیه‌سازی و انتخاب بهینه پارامترها و ویژگی‌های سیستم، نمونه واقعی انگشت به همراه مدارات کنترلی لازم ساخته شده و مورد آزمایش قرار می‌گیرد. در انتها به طراحی و پیاده‌سازی سیستم کنترل فازی برای انگشت پرداخته می‌شود. تنظیم گین‌های کنترلر به گونه‌ای صورت پذیرفته که ولتاژ ورودی به این عملگرها دارای حداقل میزان بیشینه پرش و خروجی سیستم دارای حداقل زمان رسیدن به پایداری باشند. نتایج حاصل از آزمایش‌های عملی، عملکرد مناسب کنترلر فازی طراحی شده در دستیابی به موقعیت هر یک از بندهای انگشت به‌عنوان خروجی، با خطای کم و دقت بالا را نشان می‌دهد، همچنین نتایج آزمایشات عملی، اعتبار، دقت بالا و صحت مدل شبیه‌سازی شده را تأیید می‌نماید.

## Fuzzy control of an artificial finger robot using shape memory alloy actuators

Mohammad Mahdi Kheirikhah<sup>1\*</sup>, Alireza Khodayari<sup>2</sup>, Maryam Tatlari<sup>3</sup>

- 1- Department of Mechanical Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran  
 2- Department of Mechanical Engineering, Pardis Branch, Islamic Azad University, Pardis, Tehran, Iran  
 3- Department of Mechatronic Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran  
 \* P.O.B. 1498-523, Qazvin, Iran, kheirikhah@qiau.ac.ir

## ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
 Received 22 January 2016  
 Accepted 28 May 2016  
 Available Online 14 August 2016

## Keywords:

Shape memory alloy  
 artificial finger  
 simulation  
 fuzzy controller  
 prototyped sample

## ABSTRACT

Shape Memory Alloy (SMA) wires are currently employed in robotics as actuators of prosthetic limbs and medical equipment due to advantages such as reducing the size in the application, high power-to-weight ratio and elimination of complex transmission systems. In this paper, a fuzzy control system has been designed and implemented for an artificial finger using the SMA actuators. This robotic finger has been designed and modeled with three revolute joints and three SMA wires as the tendon in order for adduction of each phalange of the finger and torsional springs were used to restore them to their original positions. The dynamic model of the finger has been simulated in MATLAB/Simulation. Based on the simulation results, optimal choices of parameters and system features have been obtained and a prototype of finger has been built and tested. Gains of the controllers are set so that the current applied to SMA wires has minimum overshoot and the output of the system has minimal time to achieve stability. The comparison between the simulation results and the actual measured data show that the simulated model is accurate.

## 1- مقدمه

سازگاری لازم را به‌عنوان سیستم‌های بیولوژیکی دارند، متمرکز شده‌اند. در زمینه ربات‌های جایگزین اعضای بدن مانند دست مصنوعی، پیشرفت‌های قابل توجه در طراحی مکانیزم انتقال تحریک و کنترل ربات حاصل شده است. آلیاژهای حافظه‌دار<sup>1</sup> از جمله محرک‌هایی هستند که در طراحی این ربات‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. آلیاژهای حافظه‌دار به دلیل قابلیت بالای سازگاری با اندام انسان و کاهش در سایز ربات مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

در دو دهه اخیر توجه و استفاده از ربات‌های توان‌بخشی و اعضای مصنوعی رباتیک رشد قابل توجهی داشته است. طراحی و ساخت این گونه ربات‌ها، شاخه ویژه‌ای از علم رباتیک است که هدف آن ساخت دستگاه‌های رباتیکی به‌عنوان یک راه برای کمک، جای‌گزینی و بالابردن توانایی کنترل در اندام انسان است. امروزه بیشتر محققان علاوه بر بهبود سیستم‌های مکانیکی در اندام‌های از کار افتاده، بر پیشرفت و توسعه سیستم‌هایی که توانایی و

<sup>1</sup> Shape Memory Alloys (SMA)

همکارانش [14] از کنترلرهای کلاسیک و فازی برای کنترل لینک با عملگر آلیاژ حافظه‌دار استفاده کردند. غریبلو [15] یک گیرنده دست مصنوعی با عملگر آلیاژ حافظه‌دار ساخت و با استفاده از روش فازی آنرا کنترل کرد. کنترل فازی [16] و کنترل مقاوم مدل‌غزشی غیرخطی [17] آلیاژهای حافظه‌دار به‌عنوان عملگر ربات‌های ساده یک درجه آزادی از دیگر مواردی است که در این زمینه بررسی شده است، همچنین کریمی [18] از کنترلرهای تناسبی-انتگرال‌گیر- مشتق‌گیر و مود لغزشی برای کنترل یک انگشت مصنوعی با عملگر آلیاژ حافظه‌دار استفاده کرد.

در این مقاله، ابتدا مدلی دینامیکی برای یک انگشت مصنوعی سه درجه آزادی با استفاده از عملگرهای آلیاژ حافظه‌دار ارائه و در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی می‌شود. این انگشت رباتیک دارای سه بند (سه لینک) با مفاصل چرخشی است که هر بند با یک سیم آلیاژ حافظه‌دار به‌عنوان زردپی جمع شده و با یک فنر پیچشی به موقعیت اولیه باز می‌گردد، سپس نحوه ساخت انگشت و مدارات کنترلی مرتبط با آن ارائه می‌شود. در انتها به طراحی سیستم کنترلر فازی برای کنترل موقعیت انگشت ساخته‌شده پرداخته خواهد شد. گین‌های کنترلرها با هدف کاهش میزان حداکثر پرش در ولتاژ ورودی به عملگرها و کمترین زمان رسیدن به پایداری خروجی سیستم تنظیم می‌شوند.

## 2- مدل سازی انگشت مصنوعی

انگشت دست انسان از سه بخش ابتدایی، میانی و انتهایی با چهار درجه آزادی تشکیل شده است. مفاصل انگشت شامل یک مفصل چرخشی<sup>3</sup> با دو درجه آزادی دورانی برای حرکات جانبی و خمیدگی/کشش در بخش ابتدایی، یک مفصل چرخشی<sup>4</sup> با یک درجه آزادی دورانی برای خمیدگی/کشش در بخش میانی و یک مفصل چرخشی<sup>5</sup> با یک درجه آزادی دورانی برای خمیدگی/کشش در بخش انتهایی است. در این تحقیق انگشت مصنوعی با سه درجه آزادی در نظر گرفته شده و حرکت دورانی جانبی انگشت در بخش ابتدایی در نظر گرفته نشده است؛ بنابراین شماتیک مکانیزم حرکت انگشت انسان با سه درجه آزادی با استفاده از لینک‌ها و مفاصل در شکل 1 نشان داده شده است.

برای تحلیل سینماتیکی این ربات از روش دناویت- هارتنبرگ استفاده شده است. شماتیک مکانیزم ربات سه درجه آزادی مفروض به همراه پارامترها و دستگاه‌های مختصات مرتبط با روش دناویت- هارتنبرگ در شکل 2 نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است سیم‌های حافظه‌دار به‌عنوان عملگر پس از عبور از قرقره‌ها به لینک‌های ربات متصل شده‌اند. هنگامی که جریان الکتریکی به این سیم‌ها اعمال می‌شود، سیم‌ها گرم شده و پس از تغییر فاز طولشان کوتاه‌تر می‌شود. بدین ترتیب لینک‌های ربات آغاز به چرخش می‌کنند. پس از حذف جریان، سیم‌ها به تدریج خنک شده و به طول اولیه خود بازمی‌گردند. فنر پیچشی موجود در

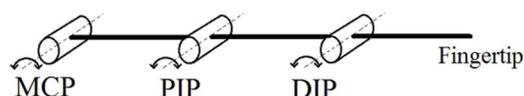


Fig. 1 schematic of the artificial finger mechanism with 3 DOF

شکل 1 شماتیک مکانیزم حرکت انگشت مصنوعی با سه درجه آزادی

آلیاژهای حافظه‌دار نوعی از مواد هوشمند هستند که اگر تحت فرآیند حرارتی مناسب قرار گیرند، قابلیت بازگشت به شکل از پیش تعیین شده را دارند. زمانی که این مواد سرد هستند و یا در زیر دمای تغییر شکل قرار دارند، مقاومت تسلیم پایینی داشته و به آسانی می‌توانند به هر حالتی تغییر شکل یابند. هنگامی که این مواد در دمایی بالاتر از دمای استحاله قرار گیرند، متحمل تغییری در ساختار کریستالی شده و به شکل اولیه خود باز می‌گردند [1]. به دلیل مزایایی چون کاهش اندازه در کاربردها، نسبت بالای توان به وزن، محو کردن سیستم‌های انتقالی پیچیده و تحریک ساکت، اغتشاش<sup>1</sup> کم و سازگاری با بدن انسان از این مواد به‌طور گسترده به‌عنوان عملگر در اندام پروتزی استفاده می‌شود [2].

در زمینه ساخت انگشت و دست مصنوعی با استفاده از آلیاژ حافظه‌دار کارهای مختلفی تاکنون انجام شده است. دی لارنتیس و ماورودیس [3] مدلی مکانیکی از یک دست رباتیکی با 4 انگشت و 14 درجه آزادی ارائه کردند. نمونه اولیه انگشت با به‌کارگیری آلومینیوم سبک و بر پایه استفاده از آلیاژ حافظه‌دار به‌عنوان ماهیچه مصنوعی ساخته شد، همچنین ایشان [4] مدل جدیدی از یک دست رباتیکی با 5 انگشت و 20 درجه آزادی که تحریک آن به وسیله ماهیچه‌های مصنوعی آلیاژ حافظه‌دار انجام می‌شد، ارائه کردند که استفاده از این عملگرها سبب کاهش وزن دست و زمان ساخت آن شد. هینو و همکارانش [5] یک ربات انگشت که در آن از آلیاژ حافظه‌دار به‌عنوان عملگر استفاده شده بود، ارائه کردند. در این ربات عملگر آلیاژ حافظه‌دار خصوصیات سیستم ماهیچه- استخوان انسان را به درستی تقلید می‌کرد. ایشان [6] یک دست رباتیکی با 5 انگشت 4 درجه آزادی و سایز یک سوم دست انسان ساختند. این دست توسط عملگرهای آلیاژ حافظه‌دار تحریک می‌شد و برای انجام وظایف کوچک در زمینه پزشکی و صنعتی ارائه شد. اشرفیون [7] یک بازوی صفحه‌ای سه درجه آزادی ارائه کرد که با دو سیم آلیاژ حافظه‌دار و یک سروموتور تحریک می‌شد. در این بازو برای ایجاد حرکت در لینک اول از سروموتور و برای ایجاد حرکت در لینک‌های دوم و سوم از عملگرهای آلیاژ حافظه‌دار استفاده شده بود. تراوچی [8] در یک دست رباتیکی با 16 درجه آزادی و 20 مفصل ارائه کرد که عملگرهای آن ترکیبی از موتور جریان مستقیم و آلیاژ حافظه‌دار بود. موتور حرکت اولین مفصل انگشت و سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار، حرکت مفاصل دوم و سوم را ایجاد می‌کردند. طرحی مکانیکی از یک دست مصنوعی که با آلیاژ حافظه‌دار تحریک می‌شد توسط مک گراوت و همکارانش [9] ارائه شد. باندو و همکاران [10] سیستم تحریک درایو زردپی را برای یک دست پروتزی 4 درجه آزادی استفاده کردند. این سیستم شامل کابل‌های زردپی و سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار یک سوبه برای ایجاد حرکت در این انگشت بود. آن‌ها برای ارزیابی کارایی انگشت در تقلید از حرکت مفصل طبیعی، از یک کنترل‌کننده فیدبک‌دار استفاده کردند. به تازگی خیری‌خواه و همکاران [11] دینامیک یک نمونه انگشت مصنوعی با آلیاژهای حافظه‌دار را بررسی کردند.

علاوه بر این کنترلر عملگرهای آلیاژ حافظه‌دار در ربات‌ها از جمله موضوعاتی است که مورد توجه و بررسی قرار گرفته است. سری کومار [12] یک کنترلر تناسبی-انتگرال‌گیر- مشتق‌گیر<sup>2</sup> برای یک عملگر آلیاژ حافظه‌دار پیشنهاد کرد که اثر شایانی در کاهش زمان پایداری و جهش در سیستم داشت. بیزدوکا و همکاران [13] از یک کنترلر کنترل ساختار یک بازوی کوچک رباتیکی با عملگر آلیاژ حافظه‌دار استفاده کردند. نیکوجرج و

<sup>3</sup> Metacarpophalangeal (MCP)

<sup>4</sup> proximal interphalangeal (PIP)

<sup>5</sup> distal interphalangeal (DIP)

<sup>1</sup> Noise

<sup>2</sup> PID

جدول 1 پارامترهای دناویت- هارتنبرگ

Table 1 The Denavit-Hartenberg parameters

لینک	$a_i$	$\alpha_i$	$\theta_i$	$d_i$
1	$a_1$	0	$\theta_1$	0
2	$a_2$	0	$\theta_2$	0
3	$a_3$	0	$\theta_3$	0

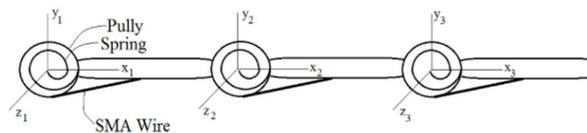


Fig. 2 Schematic of the robot mechanism with its corresponding Denavit-Hartenberg parameters

شکل 2 شماتیک مکانیزم ربات سه درجه آزادی به همراه پارامترها و دستگاه‌های مختصات مرتبط با روش دناویت- هارتنبرگ

مفاصل سبب خواهد شد تا لینک‌ها به موقعیت اولیه خود بازگردند. با مشخص کردن محورهای مختصات روی هر مفصل می‌توان پارامترهای دناویت هارتنبرگ را مطابق جدول 1 استخراج کرد.

با استفاده از ماتریس انتقال مطابق رابطه (1)، مختصات انتهایی ربات نسبت به مختصات مرجع به دست می‌آید.

$$T_0^3 = \begin{bmatrix} c_{123} & -s_{123} & 0 & a_3 c_{123} + a_2 c_{12} + a_1 c_1 \\ s_{123} & c_{123} & 0 & a_3 s_{123} + a_2 s_{12} + a_1 s_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

معادلات حرکت هر یک از لینک‌های ربات با استفاده از روش لاگرانژ

به صورت رابطه (2) قابل بیان است.

$$\tau_{ij} - \tau_{si} = \sum_{j=1}^n D_{ij}(q) \ddot{q}_i + \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n c_{kj}^i(q) \dot{q}_k \dot{q}_j + h_i(q) + b_i(\dot{q}), \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

که در رابطه بالا  $D_{ij}$  ماتریس جرمی،  $c_{kj}^i$  ترم اتلاف انرژی ویسکوز،  $h_i$  ترم مربوط به انرژی پتانسیل گرانشی و  $b_i$  نیرو اصطکاکی است. در این مدل سازی از اصطکاک موجود در مفاصل صرف نظر می‌شود. همچنین  $\tau_{si}$  گشتاور ایجاد شده توسط فنر پیچشی و  $\tau_{ij}$  گشتاور ایجاد شده توسط محرک سیم حافظه‌دار است که از روابط (3) و (4) قابل محاسبه است.

$$\tau_{si} = K_i \theta_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

$$\tau_{ij} = \sigma_i r_{pi} A_i, \quad A_i = \pi r_{wi}^2, \quad i = 1, 2, 3 \quad (4)$$

در روابط بالا  $K_i$  ضریب فنر پیچشی مفصل نام،  $r_{pi}$  شعاع قرقره سیم مفصل نام،  $\sigma_i$  تنش کششی سیم متصل به لینک نام،  $A_i$  مساحت سیم متصل به لینک نام و  $r_{wi}$  شعاع سیم متصل به لینک نام است. نرخ کرنش سیم حافظه‌دار متصل به لینک نام ( $\dot{\epsilon}_i$ ) از رابطه (7) قابل محاسبه است.

$$\dot{\epsilon}_i = -\frac{r_{pi} \dot{\theta}_i}{l_{wi}}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (5)$$

که در این رابطه  $\dot{\theta}_i$  سرعت دورانی لینک نام و  $l_{wi}$  طول اولیه سیم نام است. جدول 2 مشخصات فیزیکی ربات را نشان می‌دهد.

برای مدل سازی رفتار ترمودینامیکی سیم حافظه‌دار، معادله انتقال حرارت شامل مقدار گرمای تولید شده به دلیل جریان الکتریکی در سیم و مقدار حرارت تبادل شده با محیط اطراف به صورت رابطه (6) قابل بیان است [19].

$$m_{wi} c_p \frac{dT_i}{dt} = \frac{V_i^2}{R_i} - (h_0 + h_2 T_i^2) A_{li} (T_i - T_\infty), \quad i = 1, 2, 3 \quad (6)$$

که در آن  $m_{wi}$  جرم سیم نام،  $V_i$  ولتاژ اعمالی به سیم نام،  $c_p$  ظرفیت گرمایی ویژه آلیاژ حافظه‌دار،  $h_0$  و  $h_2$  ضرایب تبادل گرمایی با محیط،  $A_{li}$  مساحت مقطع سیم نام،  $R_i$  مقاومت سیم نام،  $T_i$  دما سیم نام و  $T_\infty$  دمای محیط است. مشخصات سیم حافظه‌دار و پارامترهای مدل تبادل گرمایی مورد استفاده در رابطه بالا در جدول 3 بیان شده است.

در این مدل سازی رابطه بین تنش- کرنش- دما در سیم حافظه‌دار با استفاده از مدل لینک به صورت رابطه (7) در نظر گرفته شده است [20].

$$\dot{\theta}_i = D \dot{\epsilon}_i + \theta_T \dot{T}_i + \Omega_i \dot{\xi}_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (7)$$

در این مدل  $\dot{\theta}_i$  نرخ تغییرات تنش،  $\dot{T}_i$  نرخ تغییرات دما،  $\dot{\epsilon}_i$  نرخ تغییرات کرنش و  $\dot{\xi}_i$  نرخ تغییرات فاز است، همچنین  $D$ ،  $\theta_T$  و  $\Omega_i$  به ترتیب مدول الاستیسیته، ضریب انبساط حرارتی و ضریب تغییر فاز<sup>1</sup> سیم حافظه‌دار هستند. کسر تغییر فاز از مارتنزیت به آستنیت در سیم‌های حافظه‌دار که وابسته به دماست با استفاده از رابطه (8) قابل محاسبه است [20]. در آن  $C_A$  ثابتی از ماده است که اثر تنش را بر دمای استحاله معکوس نشان می‌دهد.  $A_s$  دما در زمان آغاز فاز آستنیت و  $A_f$  دما در زمان خاتمه فاز آستنیت است. مقادیر پارامترهای استفاده شده در معادلات بالا در جدول 4 بیان شده است.

$$\xi_i = \frac{1}{2} [\cos(a_A(T_h - A_s) + b_A \sigma_i) + 1] \quad (8)$$

$$a_A = \frac{\pi}{A_f - A_s}, \quad b_A = \frac{-\pi}{C_A}, \quad i = 1, 2, 3$$

جهت محاسبه معادلات فضای حالت، بردار حالت شامل زاویه مفاصل، سرعت زاویه‌ای مفاصل، دمای سیم‌ها، تنش کششی سیم‌ها و کسر تغییر فاز سیم‌ها به صورت رابطه (9) تعریف می‌شود.

$$x = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3 \quad \dot{\theta}_1 \quad \dot{\theta}_2 \quad \dot{\theta}_3 \quad T_1 \quad \dots \quad T_2 \quad T_3 \quad \sigma_1 \quad \sigma_2 \quad \sigma_3 \quad \xi_1 \quad \xi_2 \quad \xi_3] \quad (9)$$

با مشتق گیری از رابطه (8) نسبت به زمان و جای گذاری در رابطه (7) و همچنین استفاده از روابط (2) و (6) معادلات فضای حالت استخراج می‌شود. معادلات فضای حالت در پیوست (1) آورده شده است.

در نهایت معادلات حالت به دست آمده در محیط سیمولینک نرم افزار متلب مدل سازی می‌شود.

### 3- ساخت انگشت مصنوعی

در این تحقیق ربات طراحی شده در قسمت پیشین از جنس آلومینیوم ساخته شد. اجزا ربات شامل چهار قطعه که عبارت است از یک پایه جهت اتصال ربات به میز و سه لینک (سه بند انگشت)، به هر بند دو عدد سیم حافظه‌دار متصل می‌شود به طوری که سیم‌های حافظه‌دار از داخل سوراخ‌هایی که در بندها و موازی با طول آن طراحی شده عبور کرده و به بند مورد نظر متصل می‌شوند. دلیل استفاده از دو سیم برای هر بند به این دلیل است که نیروهای اعمالی به هر بند نسبت به محور مرکزی بند قرینه باشند. شکل 3 ربات ساخته شده را در دو وضعیت آزاد و خم شده نشان می‌دهد.

به غیر از لینک‌ها و پایه نگهداری انگشت، ربات یاد شده شامل

جدول 2 مشخصات فیزیکی لینک‌های ربات

لینک	شعاع پولی (m)	ثابت فنر (N/m)	جرم (kg)	طول (mm)
1	0.0075	2	0.011	44.8
2	0.0037	1.5	0.006	26.2
3	0.0027	2	0.004	17.7

<sup>1</sup> phase transformation contribution

جدول 3 پارامترهای مدل تبادل گرمایی

Table 3 The SMA wire and heat transfer model parameters

$r_{wi}$ (m)	$l_{wi}$ (m)	$m_{wi}$ (kg)	کرش اولیه	$C_p$ (J/kg°C)	$h_0$	$h_2$	$T_{\infty}$ (°C)	$R$ ( $\Omega$ )	سیم
$0.187 \times 10^{-3}$	0.385	$0.1539 \times 10^{-3}$	0	322	70	0.001	23	3.08	1
$0.187 \times 10^{-3}$	0.42	$0.1678 \times 10^{-3}$	0	322	70	0.001	23	3.36	2
$0.187 \times 10^{-3}$	0.441	$0.1762 \times 10^{-3}$	0	322	70	0.001	23	3.52	3

جدول 4 پارامترهای مدل روابط بنیادی و تغییر فاز در آلیاژ حافظه‌دار

Table 4 SMA wire constitutive and phase transformation parameters

$A_s$ (°C)	$A_f$ (°C)	$C_A$ (Pa/°C)	$\Theta_T$ (1/°C)	$\Omega$	$D$
75	110	$10.3 \times 10^6$	$0.055 \times 10^6$	$20.6 \times 10^8$	$75 \times 10^9$

بخش واسط بخش شامل یک برد مبدل سریال به پورت یواس بی با استفاده از آی - سی مکس 232 است. با استفاده از این مدار واسط اطلاعات به صورت سریال از سوی بخش کنترلی دریافت شده و از طریق پورت یواس بی به رایانه منتقل می‌شود.

بخش تغذیه از دو قسمت اصلی تشکیل شده است که برای ایجاد ولتاژهای 5 ولت برای مدارات کنترلی و 18 ولت برای مدار قدرت به کار می‌روند. این بخش به عنوان تنظیم کننده ولتاژ عمل می‌کند.

بخش راه انداز عملگر حافظه دار برای راه اندازی ربات انگشت و ارسال دستورات کنترلی به آن از سه مدار درایور به نام پل اچ استفاده شده تا بتوان سطح ولتاژ لازم را به سیم های حافظه دار اعمال کرد.

نمایشگر نیز وظیفه نمایش مقادیر خوانده شده توسط انکودرها و نیز پی دبلوی ام دریافتی از نرم افزار متلب جهت اعمال به سیم های حافظه دار را برعهده دارد.

به طور کلی برد راه انداز کنترلی وظیفه گردآوری و تبادل داده ها میان نرم افزار و سخت افزار را دارد. همان طور که گفته شد در این مدار راه انداز از یک میکروکنترلر برای انتقال داده های کنترل کننده زاویه های مورد نظر استفاده شده است. در این مدار راه انداز با برقراری ارتباط میکروکنترلر با متلب، داده های حاصل از برنامه کنترلی طراحی شده در سیمولینک وارد کنترلی می‌شود. سپس میکروکنترلر یک سیگنال کنترلی، مبتنی بر مقدار مرجع با پردازش این داده ها ایجاد می‌کند. زاویه هر یک از بندهای انگشت مصنوعی مقدار مطلوب در این سیستم کنترلی است. سیگنال کنترلی

قسمت های دیگری جهت کنترل و ارتباط با رایانه است. این اجزاء عبارتند از برد راه انداز کنترلی<sup>1</sup>، انکودرها<sup>2</sup> و برنامه نرم افزاری که در محیط سیمولینک نرم افزار متلب ایجاد شده است.

برد راه انداز کنترلی یکی از اجزاء ساخته شده در این تحقیق است. برد راه انداز کنترلی طراحی شده در این پروژه از پنج بخش تشکیل شده است. این بخش ها شامل موارد زیر است: بخش کنترلی، بخش واسط، بخش تغذیه، بخش راه انداز عملگر حافظه دار و نمایشگر. شکل 4 برد راه انداز کنترلی ساخته شده را نشان می‌دهد.

هسته این بخش شامل یک میکروکنترلر ای تی مگا 32 است. وظیفه میکروکنترلر به ترتیب شامل موارد زیر است:

- دریافت سیگنال حاوی اطلاعات تغییرات زاویه هر لینک توسط انکودر از طریق کانال های ورودی
- آنالیز داده های انکودر و ارسال اطلاعات از طریق پورت یواس بی به نرم افزار متلب
- دریافت سیگنال کنترلی ارسال شده از سوی نرم افزار متلب
- ارسال دستورات کنترلی به درایور سیم های حافظه دار در ربات
- نمایش اطلاعات دریافتی و ارسالی بر نمایشگر

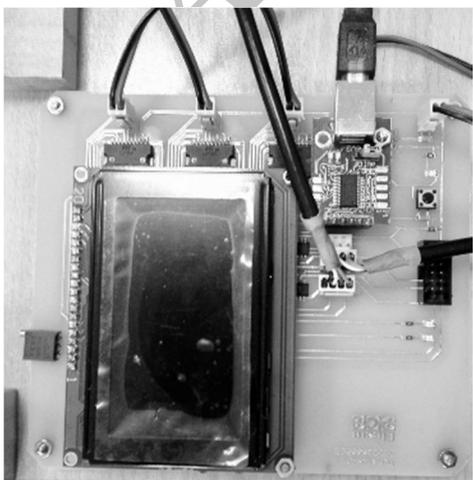


Fig. 4 The driver board

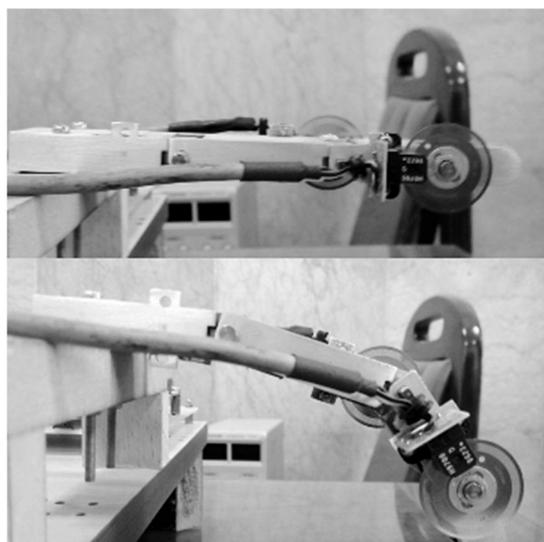


Fig. 3 The prototyped robot, a) original status, b) rotated status

شکل 3 ربات ساخته شده، الف) حالت آزاد، ب) حالت خم شده

شکل 4 برد راه انداز کنترلی

<sup>1</sup> Driver board  
<sup>2</sup> Encoder

پی‌دلیو ام نیز به بخش راه‌انداز سیم حافظه‌دار داده می‌شود. این بخش متشکل از چند ترانزیستور است که در مد سویچ بوده و در آرایش یک پل اچ قرار دارند. در نتیجه سیگنال پی‌دلیو ام ورودی، به ولتاژ متناسب تبدیل شده و به عملگر حافظه‌دار اعمال می‌شود. یک مدار واسط نیز بر داده‌های انکودر پیش‌پردازش انجام داده و آن‌ها را برای استفاده توسط میکروکنترلر آماده می‌سازد. میکروکنترلر با دریافت داده‌های انکودرها، آن‌ها را بی‌درنگ به رایانه ارسال می‌کند. تنظیمات ارتباط سریال ایجاد شده با رایانه نیز از طریق پورت سریال آ.راس 232 انجام می‌شود. در نهایت به کمک یک برنامه واسط که در محیط متلب نوشته شده است، کنترلر طراحی شده در محیط سیمولینک روی هر یک از بندهای انگشت مصنوعی واقعی پیاده‌سازی می‌شود.

#### 4- طراحی سیستم کنترلی

در این بخش به طراحی کنترلر فازی برای نمونه شبیه‌سازی شده و پیاده‌سازی آن بر نمونه واقعی انگشت مصنوعی پرداخته می‌شود. داده‌های حاصل از انکودرها در این طرح کنترلی پس از تبدیل شدن به داده‌های دیجیتال با فرمت مناسب برای میکروکنترلر توسط ارتباط پورت سریال به رایانه فرستاده می‌شوند. در این قسمت کنترلر طراحی شده وارد عمل شده و پردازش لازم را روی داده‌ها انجام می‌دهد؛ سپس این داده‌ها دوباره وارد میکروکنترلر می‌شوند و توسط سیگنال‌های پی‌دلیو ام، ولتاژ لازم را به سیم‌های حافظه‌دار اعمال می‌کند و بندهای انگشت به پروسه چرخش ادامه داده و این چرخه ادامه می‌یابد.

یکی از مهم‌ترین قسمت‌های طراحی سیستم‌های کنترل تعیین مناسب پارامترهای کنترلر است. تنظیم سیستم و رسیدن به بهترین رفتار تعریفی است که همه عوامل مثبت مورد نظر مانند افزایش پایداری و کاهش خطای حالت ماندگار سیستم در آن نهفته است.

کنترل مسیریابی عملگرهای حافظه‌دار در بسیاری از کاربردها ضروری است؛ ولی استفاده از کنترلرهای حلقه‌باز به دلیل دینامیک پیچیده این

عملگرها برای کنترل مسیریابی عملگرها کافی نیست. از این‌رو روش‌های کنترلی متفاوتی برای کنترل این عملگرها در ربات‌ها ارائه شده است. استفاده از روش‌های کنترلی کلاسیک و کنترل مدرن که بر پایه مدل است به دلیل دینامیک پیچیده این سیستم کمتر صورت می‌پذیرد. از آن‌جا که کنترل‌های خطی از روی یک مدل خطی شده از سیستم طراحی می‌شوند، تنها در ناحیه خاصی در اطراف نقاط تعادل مجاز به استفاده است؛ بنابراین در این تحقیق با استفاده از روش کنترل فازی حلقه بسته که در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده است به کنترل ربات پرداخته خواهد شد. شماتیک سیستم کنترلی مورد استفاده در این تحقیق در شکل 5 نشان داده شده است.

ورودی به کنترلر فازی در هر لینک خطا و مشتق خطای زاویه مفصل و خروجی کنترلر، میزان ولتاژ ورودی به سیم حافظه‌دار برای رسیدن به زاویه مطلوب است. توابع عضویت تعریف شده در دامنه متغیرهای ورودی به ترتیب برای خطا ( $E$ ) و مشتق خطای ( $dE$ ) زاویه مفصل به صورت  $(N, P1, P2, P3)$  و  $E:(P4, P5, P6, P7, P8, P9)$  و  $dE:(N, Z, P)$  برای متغیر خروجی ( $V$ ) به صورت  $E:(V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7, V8, V9)$  است. شکل‌های 6 و 7 به ترتیب توابع عضویت فازی نرمال تعریف شده برای متغیر خطا و مشتق آن و شکل 8 توابع عضویت فازی نرمال تعریف شده برای متغیر خروجی را نمایش می‌دهد.

برای بیان مجموعه قوانین باید توجه داشت که خطای منفی به معنای این است که مقدار موقعیت به بالاتر از موقعیت مورد نظر ما رسیده است؛ بنابراین ولتاژ اعمالی برای کاهش دمای سیم باید کاهش یابد و خطای مثبت به معنای این است که مقدار موقعیت کمتر از موقعیت مورد نظر است. ولتاژ اعمالی برای افزایش دمای سیم باید افزایش یابد. با این تعریف قوانین کنترلی تنظیم شده در این تحقیق مطابق جدول 5 است.

برای بهینه‌سازی کنترلر فازی، کد برنامه برای بررسی رفتار سیستم به ورودی‌های مختلف و به‌دست آوردن خروجی بهینه و کاهش خطا در سیستم نوشته شده است، سپس این کد برای هر لینک به‌صورت رابطه خطی تقریب

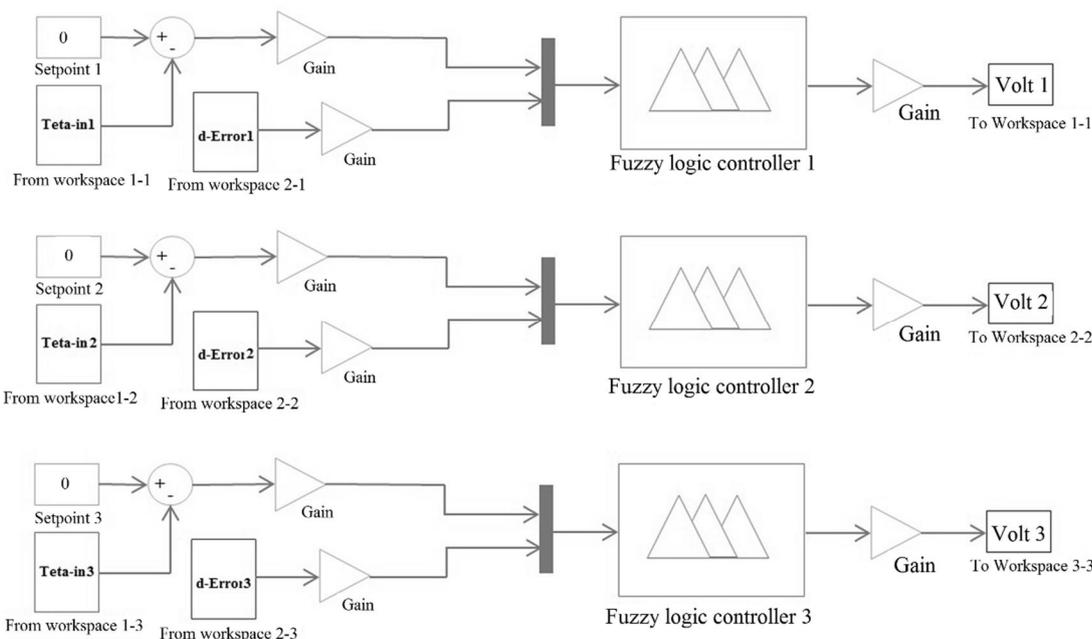


Fig. 5 The fuzzy controller

شکل 5 شماتیک سیستم کنترل فازی

شده است. واضح است که بیشینه سرعت کاهش دما در سیم با کمترین ولتاژ و بیشترین سرعت افزایش دما در سیم با اعمال بالاترین ولتاژ به دست می‌آید.

### 5- بحث و بررسی نتایج

جهت بررسی نحوه عملکرد کنترلر طراحی شده در این بخش پاسخ مدل شبیه‌سازی شده و همچنین نمونه واقعی انگشت به کنترلر فازی مجهز شده‌اند، به ورودی مطلوب بررسی می‌شود. در این تحقیق ورودی‌های مطلوب که زاویه دوران هر لینک است، به سیستم اعمال شده و خروجی سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد. در هر لینک نتایج حاصل از سیستم کنترلی طراحی شده روی ربات شبیه‌سازی شده و نمونه واقعی بررسی و مقایسه شده است.

شکل 9 پاسخ مدل شبیه‌سازی شده و همچنین نمونه واقعی انگشت به ورودی مطلوب 20 درجه به لینک اول را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل 9 مشاهده می‌شود علاوه بر آن شکل‌های 10 و 11 پاسخ مدل شبیه‌سازی شده و همچنین نمونه واقعی انگشت به ترتیب به ورودی مطلوب 18 درجه برای لینک دوم و 17 درجه برای لینک سوم را نشان می‌دهند.

همان‌طور که در شکل‌های 9-11 دیده می‌شود خروجی سیستم که زاویه چرخش لینک‌های انگشت است، بلافاصله پس از اعمال ولتاژ شروع به حرکت کرده و این بدین معناست که پیاده‌سازی انجام شده در این تحقیق فاقد تأخیر است. مدت زمان کم رسیدن به زاویه مورد نظر و یکنواختی سیگنال خروجی از عملکرد موفق کنترلر فازی در تنظیم زاویه لینک اول انگشت حکایت دارد. نتایج آزمایشات عملی انجام شده در مقایسه با شبیه‌سازی، نشان می‌دهد که رفتار نمونه واقعی کاملاً مطابق با رفتار مدل شبیه‌سازی شده در سیمولینک است و صحت، اعتبار و دقت بالای مدل دینامیکی شبیه‌سازی شده را تأیید می‌کند.

علاوه بر این همان‌طور که دیده می‌شود پاسخ مدل شبیه‌سازی شده حول مقدار مطلوب دارای نوسان است، ولی این نوسان در پاسخ مدل واقعی انگشت مشاهده نمی‌شود. وجود نوسان در پاسخ کنترلرهای فازی امری طبیعی است، ولی در انگشت واقعی به دلیل اصطکاک بین قطعات این نوسان مستهلک شده و رخ نمی‌دهد.

### 6- نتیجه‌گیری

در این مقاله سیستم کنترل فازی برای یک انگشت مصنوعی سه درجه آزادی

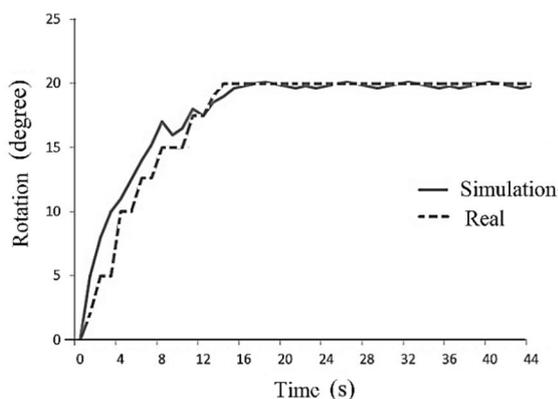


Fig. 9 The rotation angle of the Link 1

شکل 9 زاویه چرخش لینک اول

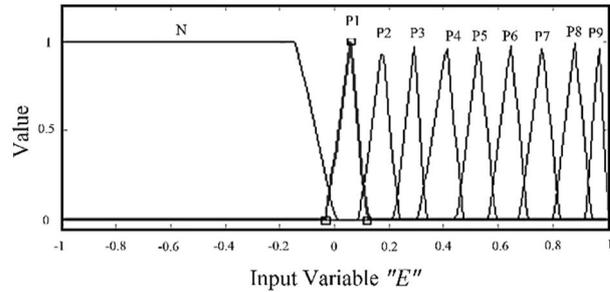


Fig. 6 Membership functions for the error (E)

شکل 6 توابع عضویت فازی نرمال برای متغیر خطا

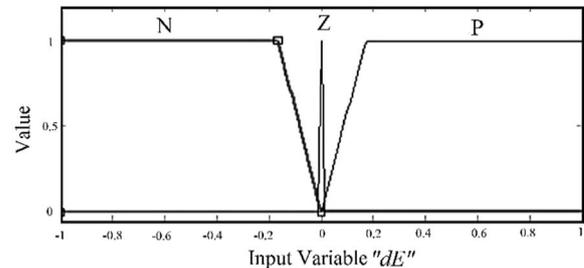


Fig. 7 Membership functions for the derivative error (dE)

شکل 7 توابع عضویت فازی نرمال برای متغیر مشتق خطا

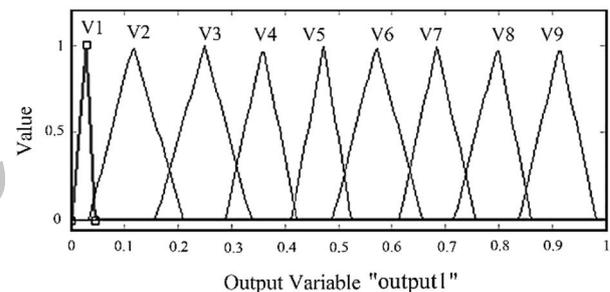


Fig. 8 Membership functions for the output variable (V)

شکل 8 توابع عضویت فازی نرمال برای متغیر خروجی

جدول 5 قوانین کنترلی فازی

Table 5 Rules base for the fuzzy controller

$dE(t)$	$E(t)$									
	N	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
N	V1	V1	V1	V1	V2	V2	V2	V3	V3	V3
Z	V1	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
P	V3	V3	V3	V4	V4	V4	V5	V5	V5	V6

زده شده است تا از آن‌ها در گین خطا و مشتق خطا استفاده شود. پیش از ورودی خطا به کنترلر فازی در لینک اول، دوم و سوم از یک گین  $G_{ei}(t)$  که به صورت معادله (10) به دست می‌آید، استفاده شده است.

$$G_{ei}(t) = \frac{1}{\text{Setpoint } i}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (10)$$

همچنین پیش از ورودی مشتق خطا به کنترلر فازی در لینک اول، دوم و سوم از یک گین  $G_{dei}(t)$  که به صورت معادله (11) به دست می‌آید، استفاده شده است.

$$G_{dei}(t) = \frac{1}{\text{Setpoint } i}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (11)$$

علاوه بر آن پس از خروجی کنترلر فازی در لینک‌ها از گین‌های دیگری استفاده می‌شود که مقادیر آن به منظور بهینه‌سازی پاسخ سیستم تعیین

$$x_5 = \dot{x}_2 \quad (13)$$

$$x_6 = \dot{x}_3 \quad (14)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{1}{D_{11} + D_{12} + D_{13}} \{ \tau_1 - K_1 x_1 - x_4 [C_{11}^1 x_4 + (C_{12}^1 + C_{21}^1) x_5 + (C_{13}^1 + C_{31}^1) x_6] - x_5 [C_{22}^1 x_5 + (C_{23}^1 + C_{32}^1) x_6] - x_6 C_{33}^1 + h_1 \} \quad (15)$$

$$\dot{x}_5 = \frac{1}{D_{21} + D_{22} + D_{23}} \{ \tau_2 - K_2 x_2 - x_4 [C_{11}^2 x_4 + (C_{12}^2 + C_{21}^2) x_5 + (C_{13}^2 + C_{31}^2) x_6] - x_5 [C_{22}^2 x_5 + (C_{23}^2 + C_{32}^2) x_6] - x_6 C_{33}^2 + h_2 \} \quad (16)$$

$$\dot{x}_6 = \frac{1}{D_{31} + D_{32} + D_{33}} \{ \tau_3 - K_3 x_3 - x_4 [C_{11}^3 x_4 + (C_{12}^3 + C_{21}^3) x_5 + (C_{13}^3 + C_{31}^3) x_6] - x_5 [C_{22}^3 x_5 + (C_{23}^3 + C_{32}^3) x_6] - x_6 C_{33}^3 + h_3 \} \quad (17)$$

$$\dot{x}_7 = \frac{1}{m_{w1} C_p} [R_1 I_1^2 - h A_{l1} (x_7 - T_\infty)] \quad (18)$$

$$\dot{x}_8 = \frac{1}{m_{w2} C_p} [R_2 I_2^2 - h A_{l2} (x_8 - T_\infty)] \quad (19)$$

$$\dot{x}_9 = \frac{1}{m_{w3} C_p} [R_3 I_3^2 - h A_{l3} (x_9 - T_\infty)] \quad (20)$$

$$\dot{x}_{10} = \frac{-D r_{p1}}{L_{w1}} x_4 + \Theta_T \dot{x}_7 + \Omega_1 \dot{x}_{13} \quad (21)$$

$$\dot{x}_{11} = \frac{-D r_{p2}}{L_{w2}} x_5 + \Theta_T \dot{x}_8 + \Omega_1 \dot{x}_{14} \quad (22)$$

$$\dot{x}_{12} = \frac{-D r_{p3}}{L_{w3}} x_6 + \Theta_T \dot{x}_9 + \Omega_1 \dot{x}_{15} \quad (23)$$

$$\dot{x}_{13} = \frac{-1}{2} \{ a_A \dot{x}_7 \sin[a_A (x_7 - A_s) + b_A x_{10}] + b_A \dot{x}_{10} \sin[a_A (x_7 - A_s) + b_A x_{10}] \} \quad (24)$$

$$\dot{x}_{14} = \frac{-1}{2} \{ a_A \dot{x}_8 \sin[a_A (x_8 - A_s) + b_A x_{11}] + b_A \dot{x}_{11} \sin[a_A (x_8 - A_s) + b_A x_{11}] \} \quad (25)$$

$$\dot{x}_{15} = \frac{-1}{2} \{ a_A \dot{x}_9 \sin[a_A (x_9 - A_s) + b_A x_{12}] + b_A \dot{x}_{12} \sin[a_A (x_9 - A_s) + b_A x_{12}] \} \quad (26)$$

### 9- مراجع

- [1] J. Wakjira, *The VT1 Shape Memory Alloy Heat Engine Design*, PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, USA, 2001.
- [2] J. P. Kyberd, C. Light, P. H. Chappell, J. M. Nightingale, D. Whatley, M. Evans, *The design of Anthropomorphic prosthetic hands: A study of the southampton hand*, *Robotica*, Vol. 19, No. 3, pp. 593-600, 2001.
- [3] K. J. DeLaurentis, C. Mavroidis, *Development of a shape memory alloy actuated robotic hand*, Rutgers, *Proceeding of the ACTUATOR Conference*, Germany, pp. 19-21, 2000.
- [4] K. J. DeLaurentis, C. Mavroidis, *Mechanical design of a shape memory alloy actuated prosthetic hand*, *Technology and Health Care*, Vol. 91, No. 1, pp. 106-110, 2002.
- [5] T. Hino, T. Maeno, *Development of a miniature robot finger with a variable stiffness mechanism using shape memory alloy*, *Proceedings of The International Symposium on Robotics and Automation*, México, August, pp. 214-218, 2004.
- [6] T. Maeno, T. Hino, *Miniature five-fingered robot hand driven by shape memory alloy actuator*, *Proceedings of the 12th IASTED International Conference, Robotics and Applications*, Hawaii, USA, August, pp. 174-179, 2006.
- [7] H. Ashrafioun, M. Eshraghi, M. H. Elahinia, *Position control of a three link shape memory alloy actuated robot*, *Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 17, No. 2, pp. 381-392, 2006.
- [8] M. Terauchi, K. Zenba, A. Shimada, M. Fujita, *Controller design on the fingerspelling robot hand using shape memory alloy*, *SICE-ICASE*

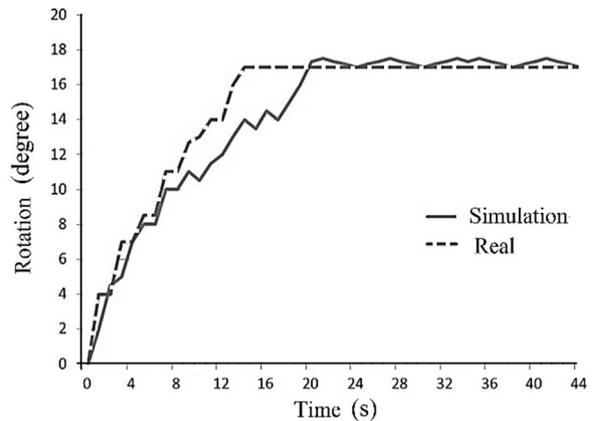


Fig. 10 The rotation angle of the Link 2

شکل 10 زاویه چرخش لینک دوم

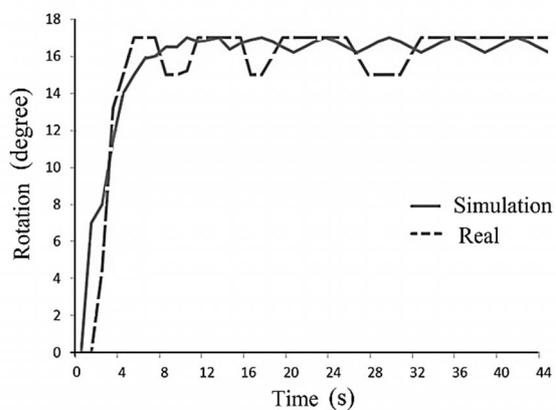


Fig. 11 The rotation angle of the Link 3

شکل 11 زاویه چرخش لینک سوم

با استفاده از عملگرهای آلیاژ حافظه‌دار طراحی و پیاده‌سازی شد. علاوه بر ساخت نمونه واقعی انگشت به همراه مدارات کنترلی لازم مدل دینامیکی آن در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شد و سپس عملکرد سیستم کنترلی طراحی شده بر نمونه واقعی و نمونه شبیه‌سازی شده مورد بررسی قرار گرفت. تنظیم گین‌های کنترلر به گونه‌ای صورت پذیرفت که ولتاژ ورودی به این عملگرها دارای کمترین میزان بیشینه پرش و خروجی سیستم دارای کمینه زمان رسیدن به پایداری باشند. نتایج حاصل از آزمایش‌های عملی نشان داد که عملکرد کنترلر فازی طراحی شده در دستیابی به موقعیت هر یک از بندهای انگشت به‌عنوان خروجی با خطای کم و دقت بالا مطلوب و مناسب است، همچنین نتایج آزمایشات عملی، اعتبار، دقت بالا و صحت مدل شبیه‌سازی شده را تأیید کرد.

### 7- تقدیر و تشکر

این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی «طراحی و ساخت ربات انگشت مصنوعی با محرک‌های SMA» است. این طرح توسط دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین حمایت مالی شده است.

### 8- پیوست

#### 1-8 معادلات فضای حالت

$$x_4 = \dot{x}_1 \quad (12)$$

- Transactions on Systems and Control*, Vol. 3, No. 2, pp. 113-124, 2008.
- [15] H. Gharibloo, *Applicatio of Ni-Ti alloy in actuation of artificial hands*, MSc Thesis, Department of Mechanical Engineering, Sharif University, Tehran, 2011. (in Persian فارسی)
- [16] M. Khesali-Baboli, *Modeling and fuzzy control of SMA actuators*, MSc Thesis, Department of Mechanical Engineering, Nooshirvani University, Babol, 2011. (in Persian فارسی)
- [17] N. Talebi-Motlagh, *Design and implementation of controler for a one DOF system with SMA actuator based on nonlinear methods*, MSc Thesis, Department of Electric Engineering, Tabriz University, Tabriz, 2009. (in Persian فارسی)
- [18] H. Karimi, *Modeling and design of control system for a hand with SMA actuator*, MSc Thesis, Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, 2011. (in Persian فارسی)
- [19] M. Elahania, H. Ashrafoun, Nonlinear control of a shape memory alloy actuated manipulator, *Transaction ASME Journal of Vibration and Acoustic*, Vol. 124, No. 3, pp. 566-575, 2002.
- [20] C. Liang, C. A. Rogers, Design of shape memory alloy actuators for robotics, *Proceedings of the 4th ASME International Symposium on Robotics and Manufacturing*, Santa-Fe, USA, November, Vol. 4, pp. 75-80, 1992.
- International Joint Conference*, Busan, South Korea October, pp. 18-21, 2006.
- [9] K. T. O'Toole, M. M. McGrath, Mechanical design and theoretical analysis of a four fingered prosthetic hand incorporating embedded sma bundle actuators, *Proceedings Of World Academy Of Science Engineering And Technology*, Vol. 25, November, pp. 142-149, 2007.
- [10] V. Bundhoo, E. Haslam, B. Birch, E. J. Park, A shape memory alloy based tendon-driven actuation system for biomimetic artificial fingers, part I: design and evaluation, *Robotica*, Vol. 27, No. 2, pp. 131-146, 2009.
- [11] M. M. Kheirikhah, A. R. Khodayari, M. Tatlari, Design and construction an artificial finger based on SMA Actuators, *Indian Journal of science and technology*, Vol. 6, No. 6, pp. 3841-3848, 2013.
- [12] M. Sreekumar, M. Singaperumal, T. Nagarajan, M. Zoppi, R. Molfino, Recent advances in nonlinear control technologies for shape memory alloy actuators, *Journal of Zhejiang University Science*, Vol. 8, No. 3, pp. 818-829, 2007.
- [13] N. Bizdoaca, H. Hamdan, D. Selisteanu, Fuzzy logic controller for a shape memory alloy tentacle robotic structure, *Proceedings of the IEEE Conference on Information and Communication Technologies: from Theory to Application*, Damascus, Syria, April, pp. 1688-1693, 2006.
- [14] B. Nicu-George, P. Anca, B. Elvira, Conventional control and fuzzy control algorithms for shape memory alloy based tendons robotic structure, *Wseas*

Archive of SID