



## Design and Construction of a Discretely Actuated Hyper-redundant Manipulator

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Motahari A.<sup>\*1</sup> PhD,  
Zohoor H.<sup>2</sup> PhD,  
Habibnejad Korayem M.<sup>3</sup> PhD

#### How to cite this article

Motahari A, Zohoor H, Habibnejad Korayem M. Design and Construction of a Discretely Actuated Hyper-redundant Manipulator. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(3):669-676.

### ABSTRACT

In this paper, the design and construction of a new binary pneumatic actuated hyper-redundant manipulator is presented. The discretely actuated hyper-redundant manipulators have advantages such as wide workspace, the ability of obstacle avoidance and simple control. Despite of these advantages, few prototypes have been made so far, which each of them has some defects. These defects are small movement range, fairly high cost, and accelerated and impulsive motion. To solve these problems, the 3-revolute prismatic spherical parallel mechanisms (3-RPS) are used as modules in this paper. So the cost is reduced due to the lower number of legs. Also, the motion range has been increased by replacing the spherical joints with universal joints. The movements of the manipulator have been effectively more uniform and softer by using flow control valves on cylinders. Finally, several tests are conducted to determine how the manipulator moves and the results are presented.

**Keywords** Robot design and construction; Hyper-redundant Manipulator; Discrete Actuator; Binary actuation

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Saveh Branch, Islamic Azad University, Saveh, Iran

<sup>2</sup>Mechanical Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

<sup>3</sup>Mechanical Engineering Department, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

#### \*Correspondence

Address: Khatamolanbia Campus, Saveh branch, Islamic Azad University, Nouralibeyk Road, Saveh, Iran  
Phone: +98 (86) 42433342  
Fax: +98 (86) 42433008  
a.motahari@iau-saveh.ac.ir

#### Article History

Received: February 20, 2019  
Accepted: July 9, 2019  
ePublished: March 01, 2020

### CITATION LINKS

[1] The kinematics of manipulators under computer control [2] A binary paradigm for robotic manipulators [3] A new inverse kinematic algorithm for discretely actuated hyper-redundant manipulators [4] Discrete kinematic synthesis of discretely actuated hyper-redundant manipulators [5] A new obstacle avoidance method for discretely actuated hyper-redundant manipulators [6] A new motion planning method for discretely actuated hyper-redundant manipulators [7] On the development of discretely-actuated hybrid-serial-parallel manipulators [8] A new inverse kinematics algorithm for binary manipulators with many actuators [9] Paradigms for service robotics [10] Lightweight hyper-redundant binary elements for planetary exploration robots [11] Design and implementation of a binary redundant manipulator with cascaded modules [12] Design, production and integration of a shape sensing robotic sleeve for a hyper-redundant, binary actuated robot

## طراحی و ساخت یک بازوی بسیار-افزونه با تحریک ناپیوسته

علیرضا مطهری\* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد ساوه، دانشگاه آزاد اسلامی، ساوه، ایران

حسن ظهور PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

محرّم حبیب‌نژاد کورایم PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

### چکیده

در این مقاله طراحی و ساخت یک بازوی ریاتیکی بسیار-افزونه (Hyper-Redundant Manipulator) با تحریک پنوماتیکی دوحالته جدید ارائه شده است. با وجود مزایایی چون فضای کاری وسیع، توانایی عبور از موانع و کنترل ساده، تاکنون نمونه‌های کمی از بازوهای بسیار-افزونه با تحریک ناپیوسته، آن هم در مقیاس آزمایشگاهی ساخته شده است که نقایصی در آنها دیده می‌شود. این نقایص شامل بازه حرکتی کوچک، قیمت تمام‌شده نسبتاً بالا و حرکت غیریکنواخت و توام با تکان و لرزش بازو است. برای رفع این مشکلات در بازوی ارائه‌شده در این مقاله از مکانیزم لولایی-کشویی-کروی سه‌گانه (3-RPS) به‌عنوان بسته (Module) استفاده شده است که به دلیل داشتن تعداد پایه‌های کم، قیمت تمام‌شده پایین‌تری دارد. همچنین با جایگزینی مفاصل کروی با مفاصل چهارشاخه، بازه حرکتی بالاتر رفته است و در نهایت با استفاده از مجراهای قابل تنظیم در ورودی هر سیلندر، به‌طور موثری از غیریکنواختی و تکان‌های بازو کاسته شده است. در نهایت برای بررسی نحوه حرکت بازو، آزمون‌هایی اجرا شده‌اند که نتایج آنها ارائه خواهد شد.

**کلیدواژه‌ها:** طراحی و ساخت ربات، بازوی بسیار-افزونه، عملگر ناپیوسته، تحریک دوحالته

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۴/۱۸

\*نویسنده مسئول: a.motahari@iau-saveh.ac.ir

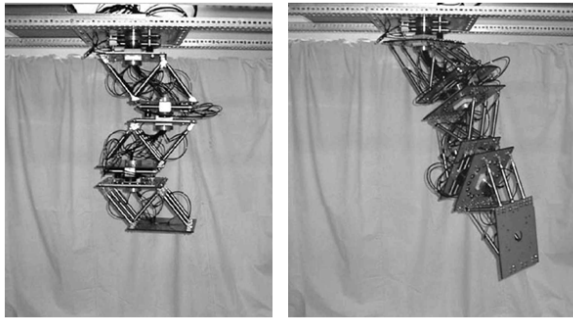
### ۱- مقدمه

ربات‌ها به‌طور معمول دارای عملگرهایی با دامنه تحریک پیوسته هستند. از این پس به این گونه ربات‌ها به اختصار ربات‌های پیوسته و به عملگرهای آنها، عملگرهای پیوسته گفته خواهد شد. آنچه از این ربات‌ها انتظار می‌رود، آن است که یک مسیر را با دقت بالایی طی کنند. این کار مستلزم استفاده از ادوات و برنامه‌های کنترل‌کننده پیچیده‌ای است که هزینه‌ها را افزایش می‌دهد. در برخی از کاربردها مثل برداشتن و گذاشتن اشیاء، مسیر حرکت به دقت بالایی نیاز ندارد، بلکه نقاط ابتدایی و انتهایی مسیر مهم هستند. برای این موارد، برخی<sup>[1, 2]</sup> پیشنهاد داده‌اند که به‌جای عملگرهای پیوسته، از عملگرهای ناپیوسته استفاده شود. عملگرهای ناپیوسته عملگرهایی هستند که بازه تحریک آنها به چند مقدار، محدود می‌شود. مثلاً یک عملگر کشویی دوحالته تنها دو حالت کاملاً کشیده و کاملاً جمع‌شده دارد. عملگرهای ناپیوسته برای کنترل به‌بازخورد احتیاج ندارند. به‌عنوان مثال در یک سیلندر بادی

با تحریک دوحالته، برای رسیدن به حالت کاملاً گشوده، تنها کافی است، مسیر باد به درستی تعیین شود و زمان کافی برای بازشدن کامل سیلندر به آن داده شود. در این صورت، سیلندر آنقدر باز می‌شود تا متوقف‌کننده‌ها جلوی حرکت پیستون را بگیرند. در حالت کاملاً بسته هم به همین صورت عمل می‌شود. عدم استفاده از بازخورد، کنترل بسیار ساده، قیمت پایین تجهیزات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری کنترل‌کننده، دقت بالا و تکرارپذیری، همه مزایایی هستند که در مورد عملگرهای ناپیوسته یکی پس از دیگری از این مفهوم نشأت خواهند گرفت.

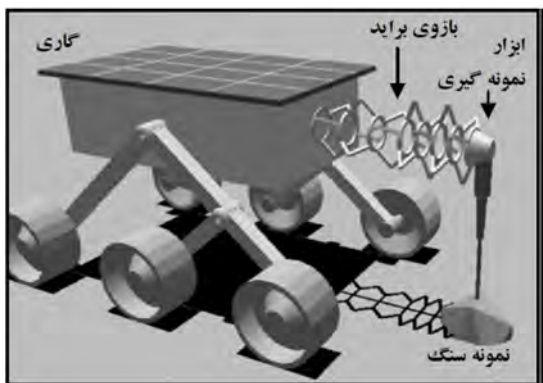
وقتی تمام عملگرهای یک ربات ناپیوسته باشند، از آن به‌عنوان ربات با تحریک ناپیوسته یا ربات ناپیوسته نام برده می‌شود. فضای کاری یک ربات ناپیوسته مجموعه‌ای متناهی از نقاط گسسته است، بنابراین نمی‌توان از یک ربات ناپیوسته انتظار داشت مسیری را با دقت بالا طی کند؛ بدین معنی که به ربات ناپیوسته می‌توان فرمان داد به یکی از نقاط متعلق به فضای کاری خود برود، اما اینکه از کدام مسیر طی طریق کند، قابل کنترل نیست. تنها می‌توان مسیر را نقطه به نقطه در فضای کاری ناپیوسته، تعقیب کرد. بنابراین برای آنکه تعقیب مسیر یا حتی دسترسی به نقاط با دقت بالاتری انجام‌پذیر باشد، باید تعداد نقاط فضای کاری بیشتر باشد. برای این کار لازم است تا تعداد حالات تحریک ناپیوسته عملگرها افزایش پیدا کند یا بهتر از آن، تعداد عملگرهای ناپیوسته افزایش داده شود. بنابراین معمولاً از عملگرهای ناپیوسته در بازوهای بسیار-افزونه استفاده می‌شود. منظور از اصطلاح بسیار-افزونه، بالابودن درجات آزادی مکانیزم است. معمولاً یک بازوی بسیار-افزونه از روی هم چیدن بسته‌هایی ایجاد می‌شود که خود یک مکانیزم موازی است. با این کار با حفظ مزایای یک ربات موازی یعنی توان حمل بار زیاد، این نوع بازوها می‌توانند فضای کاری وسیع و توانایی عبور از موانع داشته باشند. از این پس برای اختصار به بازوهای بسیار-افزونه که تمام عملگرهایشان ناپیوسته است<sup>[3-6]</sup>، بازوی ناپیوسته گفته می‌شود.

تاکنون تعداد کمی از انواع بازوهای ناپیوسته، آن هم در مقیاس آزمایشگاهی، ساخته شده‌اند. *ایبیرت یوفا*<sup>[7]</sup> یک بازوی ناپیوسته ساخت که شامل شش بسته استوارت-گاوف (Stewart-Gough Module) بود. هر بسته شامل شش سیلندر پنوماتیکی بود که به‌صورت دوحالته تحریک می‌شدند. محدوده حرکتی اندک بسته‌های گاوف باعث می‌شد تا فضای کاری در این بازو به شدت کاهش پیدا کند و این از معایب این بازو به حساب می‌آید. در آزمایش‌هایی که روی این ربات صورت گرفت، ثابت شد که ربات می‌تواند از هر پیکربندی به پیکربندی دیگر برود. البته رفتار ربات در انتقال از یک پیکربندی به پیکربندی دیگر آنچنان که کسی انتظار دارد، نرم و ملایم نبود. این امر بدان سبب بود که سیلندرهایی که تحت بار استاتیکی زیادی بودند با تاخیر در حد چند ثانیه شروع به حرکت می‌کردند. این تاخیر در برخی موارد به ثانیه می‌رسید. این بازو در شکل ۱ نمایش داده شده است.



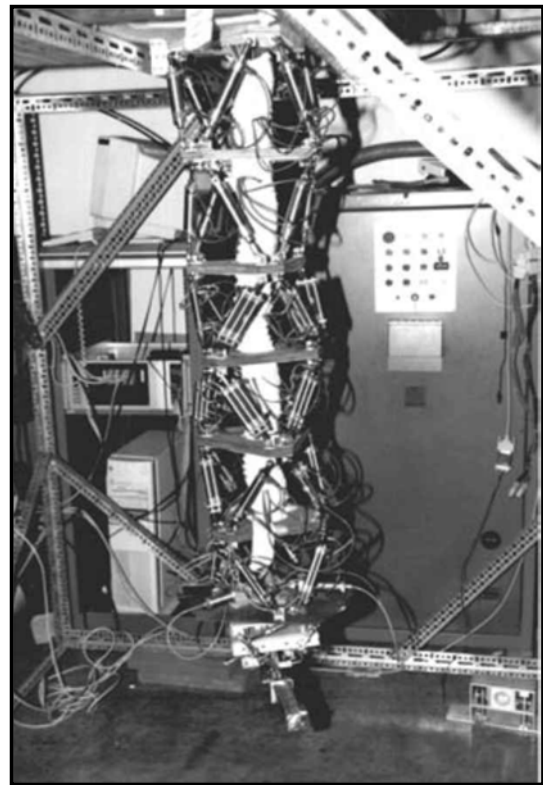
شکل ۲) بازوی سوتاکرن در دو پیکربندی متفاوت (این بازو شامل سه بسته وی جی تی است که با مفصل لولایی خاصی به هم متصل می‌شوند<sup>[8]</sup>)

سوجیان و همکاران<sup>[10]</sup> ریات برای (BRIDE; Binary Robotic Articulated Intelligent Device) را در آزمایشگاه رباتیک زمین و فضای دانشگاه ام‌آی تی ساختند. بازوی برای که در شکل ۳ نشان داده شده است، شامل پنج بسته بسیار سبک و کوچک از جنس پلی اتیلن بود و هر بسته یک مکانیزم موازی لولایی- لولایی- کروی سه گانه (3-RRS) بود. عملگرهای این بازو هم از نوع مرسوم نبودند، بلکه از جنس مواد حافظه دار اس‌ام‌ای (SMA; Shape Memory Alloy) ساخته شده بودند که به صورت دو حالته تحریک می‌شدند. برای تحریک، از جریان الکتریسته استفاده می‌شد. برای باقی ماندن عملگر در حالت کشیده احتیاج به جریان مداوم الکتریسته بود و این سبب اتلاف انرژی می‌شد. از عیوب عملگرهای اس‌ام‌ای، کندی آنها در پاسخ به تحریک الکتریکی، تغییر شکل کم آنها و نیروی کمی بود که می‌توانستند اعمال کنند.



شکل ۳) بازوی براید شامل پنج بسته از جنس سبک پلی اتیلن که روی یک کاوشگر فضایی نصب شده است<sup>[10]</sup>

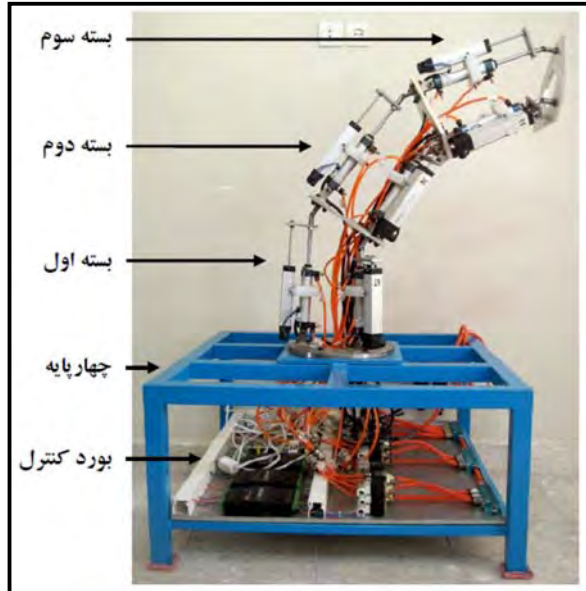
برخی از محققین در سال‌های اخیر سعی کردند از بازوهای بسیار- افزونه با تحریک دو حالته به جای لوله انعطاف پذیر اندوسکوپ استفاده کنند<sup>[11, 12]</sup>. این جایگزینی باعث می‌شد که حرکت لوله تصویربرداری در داخل نسوج بدن با درد و جراحت احتمالی کمتری انجام شود. زوراکفدراکیس و همکاران<sup>[11]</sup> یک بازوی هشت بسته‌ای دو حالته ساختند (شکل ۴- الف). آنها برای کاهش وزن و قطر بازو، از سیم‌هایی با جنس اس‌ام‌ای به جای عملگرهای کشویی معمولی استفاده کردند. این سیم‌ها با اعمال جریان الکتریکی داغ شده و تا



شکل ۱) بازوی ایبرت- یوفاف شامل شش بسته استوارت- گاوف با تحریک پنوماتیکی<sup>[7]</sup>

سوتاکرن<sup>[8, 9]</sup> با تکیه بر تجربیاتی که از ساخت بازوی ایبرت- یوفاف به دست آمده بود یک بازوی ناپیوسته جدید ساخت و سعی کرد تا نواقص آن را جبران کند. این بازو شامل سه بسته بود که هر کدام، یک بسته وی جی تی صفحه‌ای سه‌بیتی دو حالته بودند. اما برای آنکه بازو حرکتی فضایی داشته باشد، بین هر دو بسته مجاور و همچنین قبل از اولین بسته، یک مفصل چرخشی ناپیوسته با ۱۶ حالت پایدار قرار داد که قابلیت چرخش ۳۶۰ درجه‌ای هر بسته را نسبت به بسته قبلی ایجاد می‌کرد. سیستم قدرت در این بازو نیز پنوماتیکی بود. سیستم پنوماتیکی به واسطه وزن کم، قیمت پایین و قدرت بالای آن مورد استفاده قرار گرفت. هر بسته شامل ۹ عملگر بود که سه به سه با هم موازی بودند. هر سه عملگر پنوماتیکی موازی هم به‌عنوان یک بیت از بسته به حساب می‌آمد. عملگر میانی از هر سه عملگر موازی، از روغن پر می‌شد و به‌عنوان میراگر عمل می‌کرد؛ در حالی که دو تای دیگر، به‌وسیله فشار هوا و به‌صورت موازی تحریک می‌شدند. استفاده از میراگر باعث ایجاد حرکتی نرم‌تر در هنگام تغییر پیکربندی بازو می‌شد. بازوی وی جی تی از نظر محدوده مجاز برای تغییر زاویه صفحه متحرک، بسیار مناسب بود، چرا که در آن از مفاصل لولایی استفاده می‌شد. هرچه نسبت طول حداکثر به طول حداقل سیلندرها بیشتر می‌بود، مقدار این زاویه بیشتر می‌شد؛ بنابراین بیشترین نسبت ممکن برای انتخاب عملگرها مورد استفاده قرار گرفت که تقریباً برابر ۱/۵ بود. این بازو از سقف قاب به‌صورت وارونه نصب شد (شکل ۲). بازو به‌واسطه قطعات زیاد، قیمت تمام‌شده نسبتاً بالایی داشت.

آزادی مکانیزم کم شود، محدوده حرکتی آن افزوده شده است. همچنین استفاده از شیرهای کنترل جریان بر سر راه مجرای ورود و خروج باد به سیلندرها باعث شد تا حرکت بازو نرم تر و بدون ضربه و تغییر سرعت‌های شدیدی که در سیستم‌های پنوماتیکی معمول است، انجام شود.



شکل ۵) بازوی ساخته شده (شامل سه بسته در حالت کاملاً خمیده به یک سمت)

## ۲- نحوه طراحی و ساخت بازو

هدف، ساخت بازویی بود که از چیدن چند مکانیزم مشابه موازی روی هم ایجاد شود. بنابراین در ابتدا باید یک مکانیزم موازی مناسب انتخاب می‌شد. اولین محدودیت بر سر قیمت تمام شده بود، بنابراین بین مکانیزم‌های سه پا و شش پا، اولی انتخاب شد؛ با وجود اینکه مکانیزم‌های سه پا، پایداری استاتیکی کمتری نسبت به مکانیزم‌های شش پا داشتند. از بین مکانیزم‌های سه پایه، مکانیزم لولایی-کشویی-کروی سه‌گانه که از نظر هندسی به صورت متقارن بود، مناسب دیده شد. در این مکانیزم، حتی استفاده از مفصل کروی لازم نیست؛ چراکه صفحه متحرک حول محور عمود بر خودش نمی‌تواند چرخش داشته باشد، بنابراین به جای آن از مفصل چهارشاخه استفاده شد؛ چراکه مفاصل چهارشاخه موجود در بازار، محدوده تغییر زاویه بیشتری نسبت به مفاصل کروی دارند. اما عیبی به صورت بالقوه در مکانیزم انتخابی به چشم می‌خورد که آن وجود بارهای جانبی روی عملگرهای خطی است؛ چراکه سیلندرها قادر به تحمل بار جانبی زیادی نیستند و اصلاً برای این کار طراحی نشده‌اند، مگر آنکه از سیلندرها راهنمادار برای آن استفاده شود که مسلماً قیمت تمام شده را بالا خواهد برد. در مورد انتخاب عملگر، چندین گزینه وجود داشت: (۱) عملگرهای الکترومغناطیسی، (۲) عملگرهای اس‌ام‌ای، (۳) عملگرهای هیدرولیک، (۴) عملگرهای پنوماتیک.

عملگرهای الکترومغناطیسی نسبت نیرو به وزن پایینی دارند. عملگرهای اس‌ام‌ای نیروی بسیار کمی ایجاد می‌کنند و رایج

حدی جمع می‌شدند و بعد از قطع جریان، با خنک شدن دوباره به طول اولیه بر می‌گشتند. البته این فرآیند چند ثانیه طول می‌کشید که از عیوب این بازو به حساب می‌آید. هر بسته شامل سه سیم اس‌ام‌ای و یک فنر فولادی برای برگرداندن سیم‌ها به طول اولیه در حین خنک شدن بود. هر بسته طوری طراحی شده بود که به صورت یک مکانیزم لولایی-کشویی-کروی سه‌گانه کار می‌کرد.

تیپ و همکاران<sup>[12]</sup>، یک بازوی ۱۰ بسته‌ای ساختند که با نیروی الکترومغناطیس کار می‌کرد (شکل ۴-ب). هر بسته شامل یک درجه آزادی چرخشی دو حالته بود. البته قطر این بازو بیشتر از آن بود که بشود برای اندوسکوپی از آن استفاده کرد.



(ب)

(الف)

شکل ۴) الف) بازوی هشت بسته‌ای با تحریک اس‌ام‌ای دو حالته طراحی شده برای استفاده به جای لوله اندوسکوپی<sup>[11]</sup>، ب) بازوی ده بسته‌ای با تحریک الکترومغناطیسی دو حالته<sup>[12]</sup>

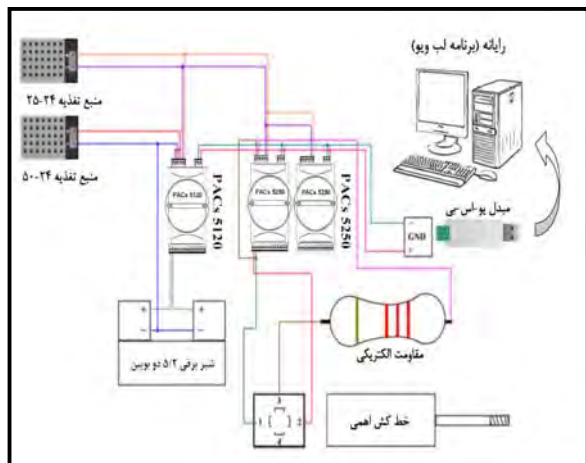
با وجود مزایایی که برای بازوهای ناپیوسته عنوان شد در عمل خیلی مورد توجه قرار نگرفته‌اند؛ بنابراین لازم دیده شد تا بازویی از این نوع، طراحی و ساخته شود تا آزمون‌های حرکتی روی آن انجام شود و به طور خاص در مورد نحوه تعقیب مسیر در این گونه ربات‌ها، تحقیقات عملی صورت پذیرد. این بازو شامل سه بسته مشابه لولایی-کشویی-کروی سه‌گانه طراحی و ساخته شد. پایه‌ها شامل یک سیلندر بادی با تحریک دو حالته هستند. بنابراین هر بسته، هشت پیکربندی مختلف دارد که با ترکیب این حالات برای سه بسته، تعداد پیکربندی‌های بازو برابر  $8^3 = 512$  می‌شود (شکل ۵). در طراحی این بازو نوآوری‌هایی صورت گرفت تا به واسطه آنها نواقص بازوهای قبلی رفع شود. در این بازو از مکانیزم لولایی-کشویی-کروی سه‌گانه با تحریک پنوماتیکی استفاده شده است که این ترکیب در بازوهای قبلی استفاده نشده بود. این مکانیزم علاوه بر محاسبات سینماتیکی ساده‌ای که دارد، به دلیل تعداد قطعات کمتر، قیمت کمتری نسبت به نمونه‌های دیگر دارد. در عین حال استفاده از سیستم پنوماتیکی قیمت تمام شده پایین و قدرت بالایی را به همراه دارد. نوآوری دیگر، استفاده از مفصل چهارشاخه به جای مفصل کروی در مکانیزم است. در این مورد خاص بدون آنکه درجه

محاسبه میزان کج شدن صفحه متحرک به واسطه تقارن‌ها و قیود حرکتی، به سادگی امکان‌پذیر خواهد بود. ارتفاع بازو در حالت کاملاً جمع شده، ۶۶۰ میلی‌متر و در حالت کاملاً کشیده ۹۰۰ میلی‌متر است. ارتفاع چهارپایه در شکل ۵، ۴۰۰ میلی‌متر و طول و عرض آن ۸۰۰ میلی‌متر است. حداکثر خم شدن هر بسته از بازو، ۳۲ درجه است که در مجموع برای کل بازو ۹۶ درجه خواهد بود. در شکل ۵، حالت کاملاً خمیده بازو قابل مشاهده است.

برای فرمان دادن به شیرهای سلونئیدی از طریق رایانه، به دستگاه واسطی بین رایانه و شیرها احتیاج بود. برای این کار از یک پی‌ال‌سی تولیدات شرکت فرارو پایا با شناسه پاکز ۵۱۲۰ (PACS 5120) استفاده شد که دارای ۱۶ خروجی دیجیتال (۰ و ۱) بود. این دستگاه برای تامین برق مصرفی خود به دو منبع تغذیه مجزا، یکی برای مصرف رله‌ها و دیگری برای مصرفی خود دستگاه احتیاج داشت. ارتباط با رایانه از طریق کابل دیتا و یک مبدل یواس‌بی انجام می‌شد.

شیرهای برقی دو بوبین، احتیاج به دو جریان برق مستقل داشتند؛ بنابراین هر شیر برق دو بوبینه، دو کانال از ۱۶ کانال خروجی دستگاه پی‌ال‌سی را به خود اختصاص می‌داد. با توجه به اینکه تعداد شیرهای برقی ۹ عدد بود، ۱۸ (۹×۲) کانال احتیاج بود که بیش از ظرفیت دستگاه بود؛ بنابراین سه شیر برقی از نوع تک بوبین مورد استفاده قرار گرفت تا در مجموع به ۱۵ (۳×۵) کانال احتیاج باشد. نقشه مدار در شکل ۷ قابل مشاهده است. پی‌ال‌سی مورد استفاده، از طریق برنامه اف‌بی‌دی ادیتور (FBD Editor) برنامه‌ریزی شد و برای ارتباط رایانه با دستگاه پی‌ال‌سی از برنامه لب ویو (Lab VIEW) استفاده شد.

علاوه بر شیرهای برقی، خط‌کش‌های اهمی (Potentiometer) که برای اندازه‌گیری طول باز شدن سیلندرها به کار گرفته شدند، احتیاج به ارتباط با رایانه داشتند. برای این منظور از دو دستگاه پاکز ۵۲۵۰ تولید شرکت فرارو پایا استفاده شد که هر یک شامل ۸ ورودی آنالوگ بود.



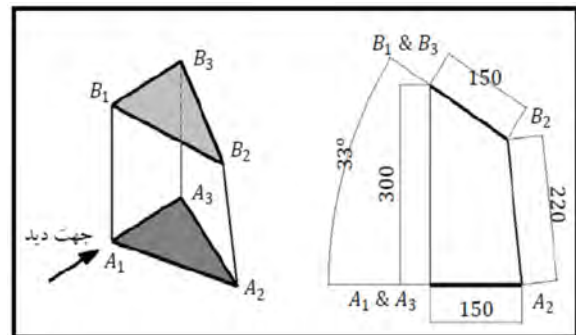
شکل ۷) نقشه سیم‌کشی و اتصالات برقی بازو

نیستند. عملگرهای هیدرولیک نیروی بسیار زیادی می‌توانند ایجاد کنند، اما قیمت تمام‌شده تجهیزات آنها بالا است و به دلیل نشت روغن هیدرولیک، تمیز نیستند. عملگرهای پنوماتیک قیمت پایینی دارند، سبک هستند، قدرت بالایی دارند و تجهیزات لازم برای آنها کم است. مشکل اصلی عملگرهای پنوماتیک آن است که به واسطه تراکم‌پذیری بالای هوا، ایجاد سرعت ثابت در حرکت عملگرها با وجود تغییر در بار روی آنها، تقریباً غیرممکن است. با وجود تمامی موارد گفته‌شده، تنها گزینه قابل قبول، استفاده از سیستم پنوماتیکی بود. در بین انواع موجود سیلندرها پنوماتیکی، سیلندرها قلمی از همه سبک‌تر و ارزان‌تر بودند که مورد استفاده قرار گرفتند.

سبکی، قابلیت ماشینکاری، استحکام و قیمت پایین، همگی از مواردی بودند که برای انتخاب جنس طبقات مد نظر قرار داشتند. جنس‌های چوبی، پلی‌اورتان، اپوکسی‌گلاس و آلومینیومی اولین انتخاب‌ها از بین تمام موارد بودند. جنس آلومینیومی نسبتاً سبک و ارزان بود. همچنین استحکام بسیار بالایی در مقایسه با بقیه موارد داشت، بنابراین جنس آلومینیوم برای صفحات انتخاب شدند.

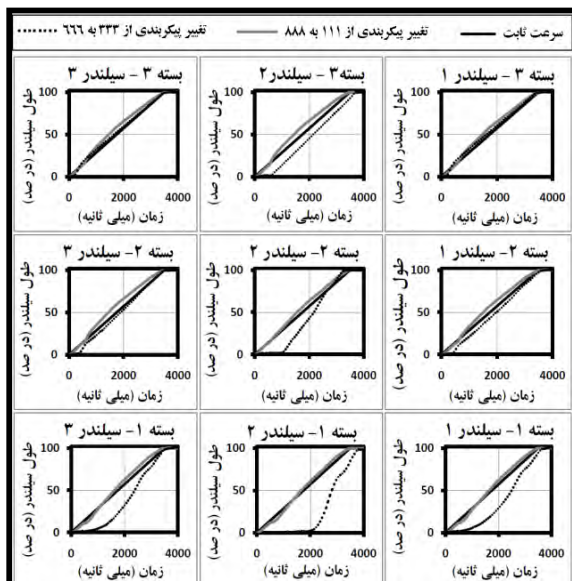
برای انتخاب اندازه بسته‌ها، ابتدا اندازه سیلندرها قلمی موجود در بازار مورد بررسی قرار گرفت. به منظور ملاحظات قیمت و سادگی در طراحی، تصمیم بر آن بود که تمام سیلندرها و تمام بسته‌ها به یک اندازه انتخاب شوند. در نهایت سیلندر قلمی دوکاره با پوسته آلومینیومی و قطر داخلی ۲۵ میلی‌متر و طول کورس ۸۰ میلی‌متر انتخاب شد. این سیلندر با کد ۲۵×۸۰ شناخته می‌شود، با توجه به قیمت و قدرت مناسب و وجود مفصل لولایی آن در بازار، برای استفاده مناسب ارزیابی شد.

با انتخاب سیلندرها، هندسه پایه‌های مکانیزم لولایی-کشویی-کروی سه‌گانه مشخص شد؛ بنابراین تنها مشخصه باقی‌مانده که در نحوه حرکت بسته‌ها تاثیرگذار بود، ابعاد مثلث متساوی‌الاضلاعی بود که پایه‌ها روی آن نصب می‌شدند. به عبارت دیگر باید مشخص می‌شد که سیلندرها در چه فاصله‌ای از هم باید نصب شوند. این نکته مد نظر قرار گرفت که بتوان بیشترین تغییر زاویه صفحه متحرک را ایجاد کرد. زاویه حداکثر صفحه رویی ۳۲ درجه و زاویه کج شدن صفحه رویی بر حسب احتیاط، کمتر از مقدار قابل تحمل برای مفاصل چهارشاخه در نظر گرفته شد (شکل ۶).



شکل ۶) طراحی هندسی اولیه برای تعیین فاصله پایه‌ها از یکدیگر

می‌یابد)، چراکه در تغییر پیکربندی از حالت خمیده از یک سمت به سمت دیگر در انتهای کورس با لنگر موافق ناشی از وزن خود بازو همراه خواهد شد.



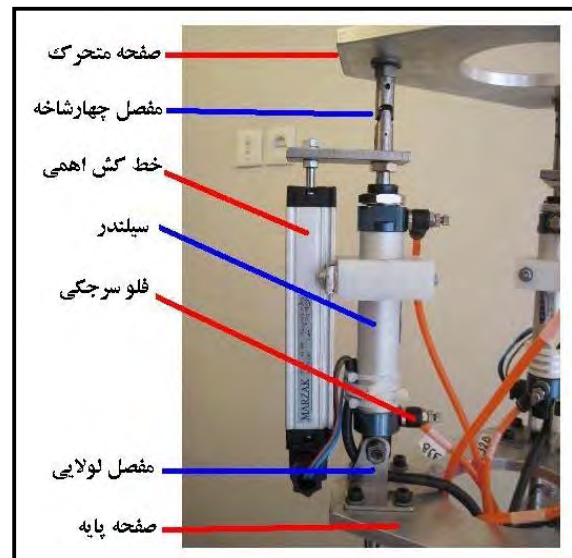
شکل ۹) نمودارهای مربوط به سرعت باز شدن هر یک از ۹ سیلندر بازو

آزمون دیگری که روی بازوی ساخته شده انجام شد، آزمون تعقیب مسیر بود. هدف از این آزمایش بررسی چگونگی حرکت و توانایی بازو برای تعقیب یک مسیر از پیش تعیین شده بود. همچنین باید مسیری که بازو با فرض سرعت ثابت طی می‌کند با آنچه در عمل طی می‌شود مورد مقایسه قرار می‌گرفت. برای این کار ابتدا یک مسیر برای بازو تعریف شد که قاب پایانی بازو می‌بایست آن را با کمترین انحراف طی می‌کرد. تعریف مسیر بدین صورت انجام گرفت که نقاط مبدأ و مقصد دو نقطه انتهایی بازو در دو پیکربندی مشخص از بازو بودند و مسیر بین این دو یک خط راست فرض شد؛ این مسیر با رنگ خاکستری در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. در این شکل به غیر از مسیر مطلوب که با رنگ خاکستری مشخص شده، دو منحنی دیگر به چشم می‌خورند. منحنی خط‌چین، با فرض ثابت و یکسان بودن سرعت باز شدن تمام سیلندرها ترسیم شده است. اما منحنی ممتد مشکی از آزمون عملی بازو و بر اساس اطلاعات خروجی از خط‌کش‌های اهمی ترسیم شده است. مقادیر در منحنی ممتد مشکی، متوسط مقادیر حاصل از پنج بار آزمون بازو است. لازم به توضیح است که داده‌های خط‌کش‌ها، طول هر سیلندر را مشخص می‌کنند و پس از آن با کمک سینماتیک مستقیم، مکان و جهت قاب پایانی بازو مشخص می‌شود.

قسمت‌های الف، ب و ج از شکل ۱۰، به ترتیب به دو، سه و پنج نقطه دقت مربوط می‌شوند. نقاط دقت به وسیله چند نقطه پررنگ در این شکل‌ها مشخص شده‌اند. این نقاط روی خط مسیر مطلوب و به فواصل مساوی در نظر گرفته شده‌اند. همان طور که دیده می‌شود، افزایش نقاط دقت، همیشه باعث بهبود در تعقیب مسیر نمی‌شود و این به دلیل ماهیت ناپیوستگی در تحریک بازو است.

### ۳- آزمایشات انجام شده روی بازو

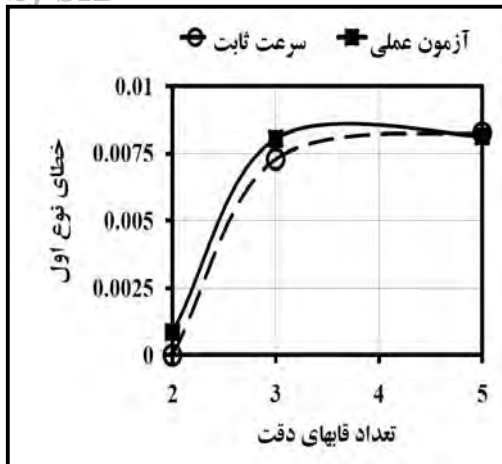
هدف اولیه از ساخت بازو، بررسی چگونگی حرکت یک بازو با عملگرهای گسسته بود. انتظار می‌رفت ربات بتواند حداقل در حالت بدون بار، حرکتی نرم، بدون تکان‌های شدید و نیز بدون تاخیر داشته باشد و لقی و لرزشی در آن دیده نشود. در نصب اولیه بازو این ایرادات وجود داشت، اما با تنظیم مجرای ورود و خروج باد (فلو سر جکی در شکل ۸) و نصب دستگاه روی یک چهارپایه سنگین (شکل ۵) این ایرادات تا حد زیادی مرتفع شد.



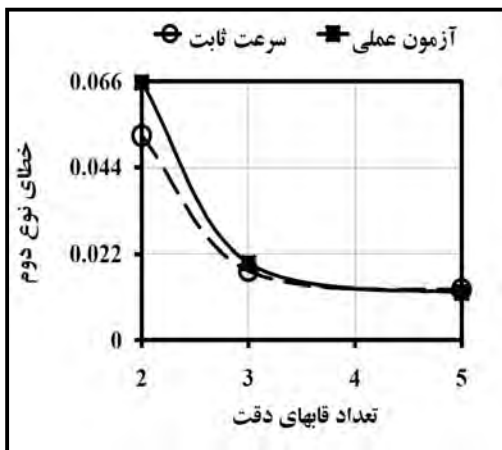
شکل ۸) نمایش یک پایه از یک بسته از بازو

نحوه تنظیم فلو سر جکی‌ها باعث تغییر در سرعت باز یا بسته شدن سیلندر می‌شود و این مورد در مسیری که بازو بین دو پیکربندی خود طی می‌کند، اثر می‌گذارد. حالت آرمانی آن است که تمامی سیلندرها با سرعت ثابت باز و بسته شوند. همچنین شروع حرکت سیلندرها بلافاصله بعد از اعمال فرمان توسط شیر برقی‌ها صورت پذیرد. اما به واسطه ویژگی تراکم‌پذیری هوا در عمل چنین نمی‌شود و فقط با تنظیم فلو سر جکی‌ها می‌توان وضعیت را تا حدودی بهبود بخشید. در شکل ۹ سرعت باز شدن هر یک از نه سیلندر بازو، در دو حرکت متفاوت بازو نمایش داده شده و می‌توان آنها را با حالت آرمانی سرعت ثابت که با خط مشکی نمایش داده شده، مقایسه نمود. منحنی خاکستری رنگ مربوط به تغییر پیکربندی از حالت کاملاً جمع شده (پیکربندی ۱۱۱) به حالت کاملاً کشیده (پیکربندی ۸۸۸) است و منحنی که به صورت نقطه‌چین نمایش داده شده، مربوط به تغییر پیکربندی از حالت خمیده کامل از سمتی به سمت مقابل آن است (پیکربندی‌های ۳۳۳ و ۶۶۶).

با دقت در منحنی‌های نقطه‌چین در شکل ۹ مشخص می‌شود که در اکثر موارد، تاخیر حرکت وجود دارد. این مورد در بسته ۱ نسبت به سایر بسته‌ها بیشتر است. همچنین در سیلندر ۲ از سایر سیلندرها (۱ و ۳) بیشتر است. علت تاخیر آن است که فشار داخل سیلندر و شیلنگ‌ها باید به مقدار لازم برای مقابله با بار روی سیلندر برسد، اما پس از آن حرکت تند می‌شود (شیب نمودار به شدت افزایش



(الف)

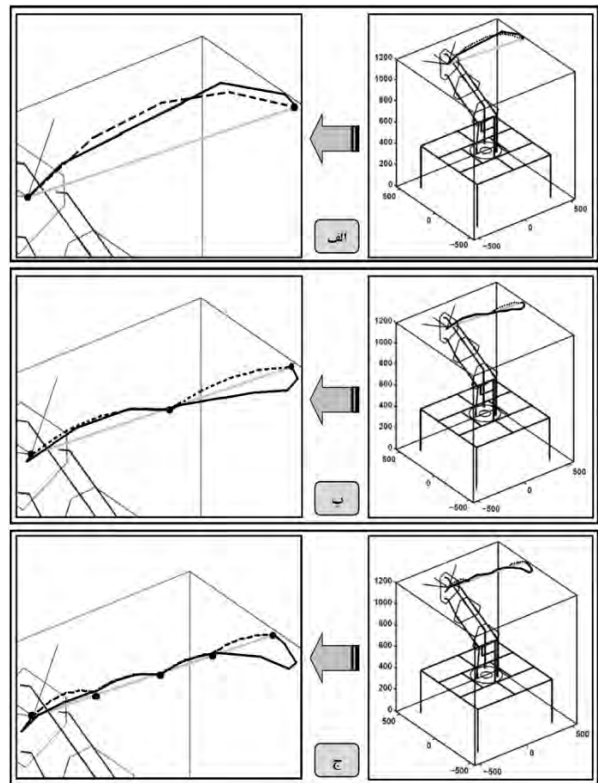


(ب)

شکل ۱۱) خطای نوع اول (الف) و خطای نوع دوم (ب) مربوط به شکل ۱۰

#### ۴- جمع‌بندی

در این مقاله، طراحی و ساخت یک بازوی بسیار- افزونه با تحریک ناپیوسته تشریح شد. این بازو شامل سه بسته مشابه لولایی- کشویی- کروی سه‌گانه بود که با سیستم پنوماتیکی حرکت می‌کرد. در طراحی این بازو سعی شد تا نواقص بازوهای قبلی از این نوع، رفع شود. این اهداف شامل قیمت پایین، محدوده حرکتی بیشتر و حرکت یکنواخت و بدون تاخیر بودند. استفاده از مکانیزم سه‌پایه که قطعات کمی داشت و سیستم پنوماتیک قیمت تمام‌شده را پایین آورد. جایگزینی مفصل‌های کروی با مفصل‌های چهارشاخه بدون آنکه درجه آزادی را کم کند، دامنه حرکتی را افزایش داد. در نهایت استفاده از شیرهای کنترل جریان بر سر راه ورودی و خروجی هوا در سیلندرها باعث شد از ضربه و تکان‌های حرکتی که در سیستم‌های پنوماتیکی معمول است، کاسته شود و حرکت یکنواخت‌تری حاصل آید. البته به‌عنوان یک نکته در طراحی سیلندر باید توجه داشت که اگر سیلندرها قطورتر باشند، یعنی نیروی بیشتری داشته باشند، می‌توان با بسته‌ترکردن مجراها یکنواختی بیشتری در حرکت ایجاد کرد؛ در حالی که در سیلندرها فعلی این کار باعث بند آمدن حرکت سیلندر یا تاخیر حرکتی زیاد می‌شود. همچنین دو آزمایش روی بازو انجام گرفت که اولی مربوط به نحوه باز شدن سیلندرها و بازو و مقایسه آن با حالت آرمانی سرعت ثابت بود و دومی مربوط به نحوه



شکل ۱۰) شبیه‌سازی آزمون طراحی حرکت بازو با ۲ (الف)، ۳ (ب) و ۵ (ج) قاب دقت

شکل‌های ۱۱- الف و ب، به‌ترتیب خطای نوع اول و خطای نوع دوم مربوط به آزمایشاتی هستند که در شکل ۱۰ نمایش داده شدند. منحنی ممتد در این دو شکل مربوط به فرض سرعت ثابت و منحنی خط‌چین مربوط به آزمایشات عملی روی بازو است. در خطای نوع اول، تنها خطا در نقاط دقت در نظر گرفته می‌شود و انحراف در مسیر بین نقاط دقت نادیده گرفته می‌شود. منظور از خطا در اینجا فاصله بی‌بعد شده قاب انتهایی بازو از قاب دقت متناظر است. در خطای نوع دوم، علاوه بر نزدیک شدن به قاب‌های دقت، انحراف از مسیر بین هر دو قاب دقت متوالی نیز مورد توجه قرار می‌گیرد.

همان‌طور که دیده می‌شود، در هر دو شکل اختلاف دو منحنی از یکدیگر کم است؛ بدین معنی که فرض سرعت ثابت خطای کمی ایجاد می‌کند. همچنین با افزایش تعداد قاب‌های دقت، خطای نوع اول افزایش می‌یابد، در حالی که خطای نوع دوم کاهش پیدا می‌کند. این مطلب دور از انتظار نبوده است، چراکه با افزایش نقاط دقت، مسیر حرکت بازو به مسیر مطلوب بیشتر مقید می‌شود. این مورد به این علت است که الگوریتم حل مساله، تنها قاب‌های دقت را می‌شناسد نه مسیر مطلوب؛ بنابراین همین مطلب، خطای نوع دوم کاهش می‌یابد. از طرفی قاب‌های دقت اول و آخر، قاب‌های واقعی هستند؛ یعنی از سینماتیک مستقیم روی یک پیکربندی از بازو به‌دست آمده‌اند و بازو می‌تواند بدون خطا و به‌طور دقیق به آنها برسد، اما باقی نقاط دقت که بین آنها قرار می‌گیرند این‌گونه نیستند؛ بنابراین خطای نوع اول با افزایش نقاط دقت افزوده شده است.

hyper-redundant manipulators. Latin American Applied Research. 2013;43(2):161-168.

4- Motahari A, Zohoor H, Habibnejad Korayem M. Discrete kinematic synthesis of discretely actuated hyper-redundant manipulators. Robotica. 2013;31(7):1073-1084.

5- Motahari A, Zohoor H, Habibnejad Korayem M. A new obstacle avoidance method for discretely actuated hyper-redundant manipulators. Scientia Iranica. 2012;19(4):1081-1091.

6- Motahari A, Zohoor H, Habibnejad Korayem M. A new motion planning method for discretely actuated hyper-redundant manipulators. Robotica. 2017;35(1):101-118.

7- Ebert-Uphoff IR. On the development of discretely-actuated hybrid-serial-parallel manipulators [Dissertation]. Baltimore: Johns Hopkins University; 1997.

8- Suthakorn J, Chirikjian GS. A new inverse kinematics algorithm for binary manipulators with many actuators. Advanced Robotics. 2001;15(2):225-244.

9- Suthakorn J. Paradigms for service robotics [Dissertation]. Baltimore: Johns Hopkins University; 2003.

10- Sujan VA, Lichter MD, Dubowsky S. Lightweight hyper-redundant binary elements for planetary exploration robots. 2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. 2001 July 8-12, Como, Italy. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2001.

11- Tzorakoleftherakis E, Mavrommati A, Tzes A. Design and implementation of a binary redundant manipulator with cascaded modules. Journal of Mechanisms and Robotics. 2016;8(1):011002.

12- Tappe S, Boyraz P, Korz H, Ortmaier T. Design, production and integration of a shape sensing robotic sleeve for a hyper-redundant, binary actuated robot. 2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2018 July 9-12, Auckland, New Zealand. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2018.

تعقیب یک مسیر مستقیم توسط انتهای بازو و مقایسه آن با حالت سرعت ثابت بود. در آزمون اول دیده شد که در سیلندرهایی که بار بیشتری را حمل می‌کنند، انحراف از حالت سرعت ثابت و تاخیر حرکتی شدیدتر است. بنابراین پیشنهاد می‌شود سیلندرهایی بسته‌هایی که به پایه نزدیکترند، قوی‌تر انتخاب شوند. در آزمون دوم مشخص شد که با افزایش نقاط دقت می‌توان انحراف از مسیر را کاهش داد. همچنین انحراف مسیر طی شده واقعی از حالت سرعت ثابت در اغلب موارد کم بود. علاوه بر این دو آزمون، تغییر پیکربندی‌های مختلفی روی بازو انجام شد و مشاهدات نشان داد که بازو می‌تواند تغییر پیکربندی‌های مختلف را در حالت بدون بار با موفقیت به صورت تقریباً یکنواخت و با تکان‌های کم و تاخیرهای کوچک طی کند.

**تشکر و قدردانی:** موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

**تأییدیه اخلاقی:** موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

**تعارض منافع:** موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

**سهم نویسندگان:** موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

**منابع مالی:** موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

## منابع

1- Pieper DL. The kinematics of manipulators under computer control [Dissertation]. Stanford: Stanford University; 1968.

2- Chirikjian GS. A binary paradigm for robotic manipulators. The International Conference on Robotics and Automation, 1994 May 8-13, San Diego, USA. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 1994. pp. 3063-3070.

3- Motahari A, Zohoor H, Habibnejad Korayem M. A new inverse kinematic algorithm for discretely actuated