



## طراحی، ساخت و کنترل یک نوع مچ کروی جدید همه‌جهته

حمید آریس<sup>۱</sup>، حبیب احمدی<sup>۲\*</sup> و مسعود عبدالمحمدی<sup>۱</sup><sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، مکترونیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود<sup>۲</sup> هیئت علمی دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۱۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۴/۳۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۲۰

## چکیده

در این تحقیق مچ کروی جدیدی با محورهای تودرتو به کمک چرخ‌دنده‌های مخروطی ایجاد شده‌است که می‌تواند دوران نامحدود و بدون تکینگی را برای آن ایجاد کند. این مچ با توجه به ساختار و مکانیزم انتقال نیرو، قابلیت استفاده روی انواع ربات جهت کاربردهای با دقت بالا و حرکات پیوسته و بدون تکینگی را دارا است. با توجه به نقشه‌ها، ساخت مدل جهت قالبگیری و ریخته‌گری قطعات انجام شده و با عملیات ماشینکاری ابعاد قطعات به استاندارد نقشه می‌رسد و بعد از مونتاژ قطعات قسمت مکانیکی آن آماده شده است. سینماتیک مستقیم و معکوس زوایای دوران برای جهت‌گیری مچ به دست آمده و موقعیت مجری‌نهایی با توجه به سینماتیک ربات محاسبه شده - است. جهت شبیه‌سازی و رسم نمودارهای حاصل از تست تجربی، از نرم‌افزار متلب استفاده شده است. در انتها کنترل‌کننده PD است جهت کنترل زوایای سمت، غلت و فراز طراحی شده است و تغییرات لازم جهت بهبود کنترل مچ در کنترل‌کننده اعمال شده است. سپس کنترل‌کننده روی میکروکنترلرهای مبتنی بر AVR پیاده‌سازی شده است و نتایج شبیه‌سازی به صورت نظری و تجربی صحت سنجی شده است.

کلمات کلیدی: سینماتیک مستقیم؛ سینماتیک معکوس؛ طراحی مچ؛ ساخت مچ؛ مچ کروی.

## Design, Fabrication and Control of a New Type of The Omnidirectional Spherical Wrist

H. Aris<sup>1</sup>, H. Ahmadi<sup>2\*</sup>, M. Abdolmohammadi<sup>1</sup><sup>1</sup> Masters Student., Mechanical Engineering., Shahrood University of Technology., Shahrood, Iran<sup>2</sup> Assoc. Prof., Mechanical Engineering., Shahrood University of Technology., Shahrood, Iran

## Abstract

In this paper, a new type of spherical has been fabricated by involute axes in the form of conical gears that can create an unlimited revolution for wrist without singularity. This wrist has the special ability due to its structure and mechanism to use robots for high precision applications and continuous movements without singularity. According to the drawings, the manufacturing of the model for molding and casting of pieces is carried out and then by machining, the dimensions of the parts are achieved to the standard of drawing. After the assembly, the mechanical work pieces are prepared. The direct and inverse kinematics of the involute angles are obtained for the directions of the wrist. Also, according to the kinematics of the robot, the position of the end-effector is calculated. At first, Matlab software is used to simulate the wrist model and also the experimental test is done for validation. At the end, the PD controller is designed to control the yaw, roll and pitch angles and the changes necessary to improve the wrist control have been applied in the controller and AVR-based microcontrollers. Finally, simulation results are verified through theoretical and experimental test.

**Keywords:** Forward Kinematic; Inverse Kinematic; Wrist Molding; Wrist Fabrication; Spherical Wrist.

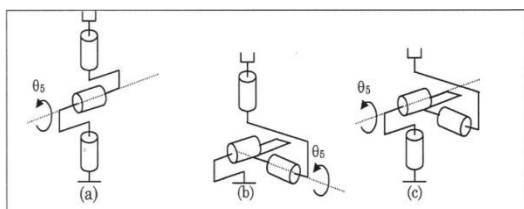
## ۱- مقدمه

مچ‌های استفاده شده در صنعت دارای ساختار سری و موازی می‌باشند، بطوری‌که در بعضی از بازوهای رباتیک، از مچ سری بصورت مجزا استفاده شده است که در انتها حرکت چرخشی لازم را در سه جهت ایجاد می‌کند. در این مقاله یک نوع مچ جدید ربات برای جهت‌دهی به مجری نهایی ربات ارائه شده است. این مچ با قابلیت جهت‌دهی همه‌جانبه می‌تواند مجری‌نهایی را در هر زاویه‌ای به شکل نامحدود حول محورها قرار دهد و میزان دوران نامحدود غلت‌آرا نیز به ابزار ربات دهد. مکانیزم عملکردی این مچ با استفاده از چرخ‌دنده‌های تودرتو است که قابلیت دوران نامحدود را به ابزار ربات می‌دهد که کاربردهای بسیاری در صنایع و پزشکی دارد. این قابلیت می‌تواند به ربات کمک کند تا مجری‌نهایی ربات توانایی باز و بسته کردن پیچ، گذاشت و برداشت قطعات در هر جهت بدون محدودیت و نقاط تکینگی، دوران پیوسته جهت ماشینکاری و ... را به ربات بدهد. این ساختار از چندین چرخ‌دنده و بلبرینگ با محورهای هم‌مرکز تشکیل شده است که قابلیت انتقال حرکت را از موتور به انتهای ابزار را به ربات می‌دهد. این مکانیزم ساختاری با قابلیت‌های بسیار زیادی مانند نامحدود بودن مقدار دوران در هر راستا، سرعت دوران نسبتاً بالا و گشتاور نسبتاً زیاد، بازدهی بسیار زیاد، ابعاد موتور نسبتاً کوچک، ابعاد نسبتاً کوچک دیگر اجزاء، قابلیت کنترل بسیار مناسب، دقت مناسب و سینماتیک و دینامیک ساده را همراه دارد. مچ طراحی و ساخته شده برای ربات دلتای 6 درجه آزادی، قابلیت استفاده برای انواع ربات‌ها را دارد.

میزان دوران هر محور مچ در این ساختار به یکدیگر وابسته‌اند؛ ولی به سادگی با تعریف اعمال سینماتیکی مستقیم روی مچ می‌توان دوران هر محور را نسبت به محورهای دیگر ناوابسته کرد. به این معنی که مجری‌نهایی روی مچ را در هر زاویه‌ای نسبت به هر زاویه دلخواه به شکل نامحدود می‌توان دوران داد. مکانیزم چرخ‌دنده‌ای به این مچ، قابلیت بسیار کاربردی در دوران نامحدود را داده است. از این ساختار با تغییر زوایای چرخ‌دنده‌ی مخروطی می‌توان ساختارها و اشکال جدیدی از مچ را ایجاد کرد که برای

کاربردهای مختلف استفاده می‌شود که نبود تکینگی در آن از اهمیت زیادی برخوردار است. نبود تکینگی در این مچ می‌تواند باعث استفاده گسترده آن در کاربردهایی نظیر صنایع دقیق پزشکی، جراحی و ماشینکاری و ... شود. ساختار این مکانیزم همچنین دقت بسیار زیادی را در کنترل زوایای مچ ایجاد می‌نماید.

مچ‌های ربات‌ها برای کاربردهای مختلف از تنوع بالایی برخوردار هستند و معمولاً مچ‌ها برای جهت‌دهی به ابزار مورد استفاده قرار می‌گیرند. مچ کروی سری، از جمله مچ‌هایی هستند که معمولاً ساختارهای شکل ۱ را دارند و با توجه به اینکه این ساختارها محدودیت در انجام حرکت دارند، دارای نقاط تکینگی می‌باشند که برای انجام برخی از عملیات قابل استفاده نمی‌باشند [۱].



شکل ۱- انواع مدل‌های مچ کروی سری موجود [۱]

گوپتا<sup>۳</sup> مچ کروی به کمک مکانیزم چهار میله‌ای ارائه کرده‌است که برای کاربردهای خاص مچ کروی، مورد استفاده قرار گرفته است. کنترل این مچ، به علت محدودیت حرکتی بسیار زیاد و به دلیل ساختار سینماتیک پیچیده، به سادگی میسر نبوده است [۲]. طرح مفهومی از مچ کروی برای کاربرد در لیزر و پلاسما به کمک موتور پله توسط لی و همکاران مطرح شده است که این طرح علاوه بر محدودیت‌های حرکتی زیاد، کاربرد بسیار محدود داشته است [۳]. طراحی یک نمونه مچ کروی، توسط تراپیا<sup>۴</sup> ارائه شده است که در این طرح، مجری‌نهایی واقع روی یک کره که توسط یک لینک به ربات هنرمند کوچک متصل شده است، به حرکت در می‌آید. مزیت این طرح جدید، انتقال پیدا نکردن موقعیت مجری‌نهایی بوده است، ولی به دلیل پیچیدگی زیاد در

<sup>3</sup> Gupta

<sup>4</sup> Lee

<sup>5</sup> Trabia

<sup>1</sup> Endeffector

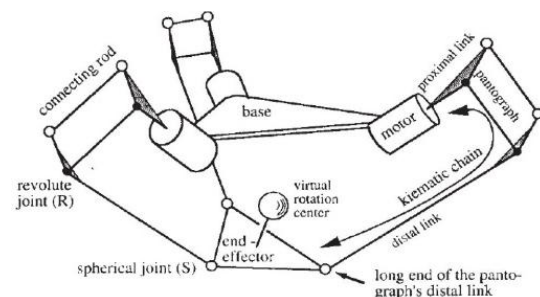
<sup>2</sup> Roll

برای جهت‌دهی به ابزار در اختیار قرار می‌دهند [۱۵-۱۸]. مچ سه مفصل کیمورا<sup>۶</sup> سیستم پیچیده متقاطع از چرخ‌دنده‌ها و شفت‌ها برای حرکت مفاصل می‌باشد [۱۵]. روشیم<sup>۷</sup> به منظور کاهش نقاط تکنیکی، به طراحی یک نمونه مچ ربات با استفاده از یک مکانیزم چرخ‌دنده‌ای پرداخته است [۱۶].

روش کنترل مچ‌ها نیز با توجه به ساختار آن‌ها و عملکرد استفاده شده در آن‌ها متفاوت است. سینماتیک مچ‌ها با توجه به ساختار و مکانیزم مچ متفاوت است و سینماتیک روی دینامیک مچ و دینامیک مچ روی نحوه کنترل مچ تاثیر دارد [۱۹، ۲۰]. کرمی<sup>۸</sup> و همکاران کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی یا همان PID را برای کنترل ربات استفاده کرده‌اند [۲۱]. همچنین عبداللهی خسروشاهی<sup>۹</sup> و بادامچی‌زاده‌بگ مکانیزم جدید برای بازوی رباتیک صفحه‌ای با استفاده از یک کنترل‌کننده مبتنی بر میکروکنترلر AVR که از طریق پورت سریال به یک رایانه متصل شده، عملکرد مطلوب سیستم حلقه بسته ربات را تضمین کرده‌اند [۲۲].

با بررسی کارهای مشابه قبلی مشخص می‌شود که طرح مچ ارائه شده در این تحقیق، با توجه به عدم نیاز آن به یک مکانیزم انتقال قدرت مجزا قابلیت استفاده به صورت یکپارچه و مستقل را ایجاد نموده و می‌توان آن را بصورت ترکیب با ربات‌های سری و موازی دیگر استفاده کرد. از دیگر مزایای این مچ، می‌توان به نامحدود بودن دوران محورهای آن بدون تکنیکی اشاره کرد. در این مقاله مچ کرووی با استفاده از چرخ‌دنده طراحی و ساخته و کنترل و ارائه شده است. ابتدا مکانیزمی برای چندجهته بودن و نامحدود بودن دوران مچ طراحی و سپس به کمک نرم افزار مربوطه، طراحی مچ انجام شده و تحلیل‌های دینامیکی نیز صورت گرفته است. سپس مراحل ساخت آن بیان و نحوه ساخت مکانیکی و الکترونیکی ارائه شده است. در انتها شبیه‌سازی‌ها و آزمایش تجربی صورت گرفته و پاسخ مچ به ورودی‌های مطلوب نمایش و بررسی شده است.

ساخت و سینماتیک آن، کاربرد آن‌ها بیش‌تر به تلسکوپ‌ها و صفحات خورشیدی محدود می‌شود [۴]. گروگوری<sup>۱</sup> به طراحی مچی پرداخت که قابلیت‌ها و معایب مچ چهار میله‌ای گوپتا را داشت، اما این مچ دارای ساختار سری بود [۵]. مچ-های زیادی با مکانیزم موازی برای کنترل جهت ابزار ارائه شده‌اند که عمدتاً با هدف ثابت بودن موقعیت مجری نهایی این مکانیزم‌ها ارائه شده‌اند؛ اما مکانیزم‌های موازی، محدودیت بسیار زیادی در حرکت دارند و نقاط تکنیکی آن بسیار است؛ همچنین سینماتیک و کنترل پیچیده این مچ‌ها کاربرد آن‌ها را برای ربات‌هایی با دقت و کاربردهای حساس محدود می‌کند و این مچ‌ها برای کاربردهای خاص طراحی شده‌اند [۶-۱۲]. شکل ۲ یک نمونه مچ کرووی با مکانیزم موازی را نشان می‌دهد که توسط ویشر<sup>۲</sup> و کلاول<sup>۳</sup> ارائه شده است [۱۲].



شکل ۲- مچ کرووی با استفاده از مکانیزم موازی [12]

مچ‌هایی نیز با ساختارهای متفاوت برای ربات‌هایی با کاربرد خاص وجود دارد مانند مچ انتقال قدرت هومن<sup>۴</sup> به وسیله یک اتصال کرووی و فشار مایع توانسته است، حرکت مناسب را ایجاد کند [۱۳]؛ همچنین مچ چند جهته‌ی ولز<sup>۵</sup> با استفاده از فشار هیدرولیکی برای جهت‌دهی مجری نهایی ربات استفاده شده است [۱۴].

مچ‌های مذکور دارای نقاط تکنیکی در فضای کاری خود می‌باشند و جهت‌دهی آن‌ها به علت تداخل بین محورها کمتر از یک نیم‌کره را شامل می‌شود. نمونه‌ای از مچ‌ها هستند که با استفاده از مکانیزم چرخ‌دنده‌ای فضای کاری بیشتری را

<sup>6</sup> Kimura

<sup>7</sup> Rosheim

<sup>8</sup> Karami

<sup>9</sup> Abdollahi Khosroshahi

<sup>1</sup> Badamchizadeh

<sup>1</sup> Gregorio

<sup>2</sup> Vischer

<sup>3</sup> Clavel

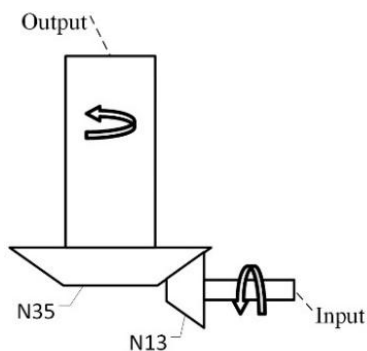
<sup>4</sup> Humen

<sup>5</sup> Wells

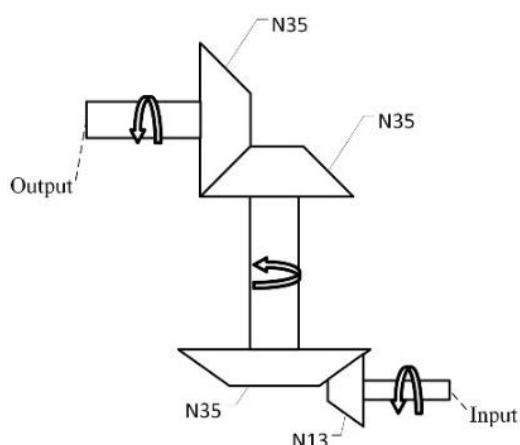
## ۲- طراحی و مدلسازی

### ۲-۱- مکانیزم میچ

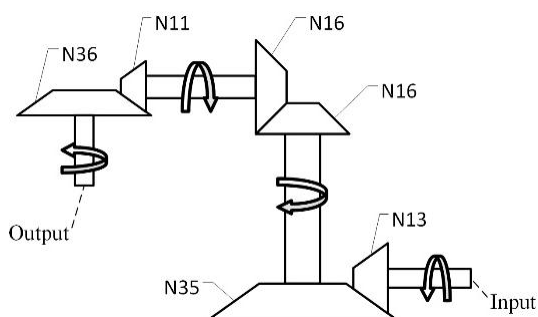
مکانیزم استفاده شده در این میچ مطابق با شکل ۳ به کمک چرخ‌دنده‌های مخروطی جهت انتقال حرکت و همچنین تغییر جهت حرکت استفاده شده است که محورهای حرکت میچ هر یک به صورت مجزا قابلیت حرکت دارند. تمامی محورهای دوران میچ هم‌محور هستند و به شکل شفت تودرتو طراحی شده‌اند. این میچ قابلیت جاسازی در مکعب مستطیل به ابعاد  $250 \times 250 \times 260$  میلی‌متر را دارد. شکل ۴ مکانیزم انتقال حرکت را در موتور ۱ برای دوران حول محور z نشان می‌دهد. گشتاور ورودی به کمک چرخ‌دنده‌های مخروطی افزایش می‌یابد؛ همچنین سرعت دوران محورها نیز کاهش می‌یابد. دوران حول محور y، در شکل ۵ نشان داده شده است. این دوران به وسیله دو جفت چرخ‌دنده مخروطی صورت می‌گیرد. دومین جفت چرخ‌دنده مخروطی، انتقال یک به یک دارد و تنها جهت دوران و محور دوران را تغییر می‌دهد. دوران حول محور انتهایی یا همان غلت<sup>۱</sup> نیز، در شکل ۶ مشاهده می‌شود. این دوران از انتقال به وسیله سه جفت چرخ‌دنده از موتور به محل اتصال ابزار انتقال می‌یابد.



شکل ۴- انتقال حرکت فراز

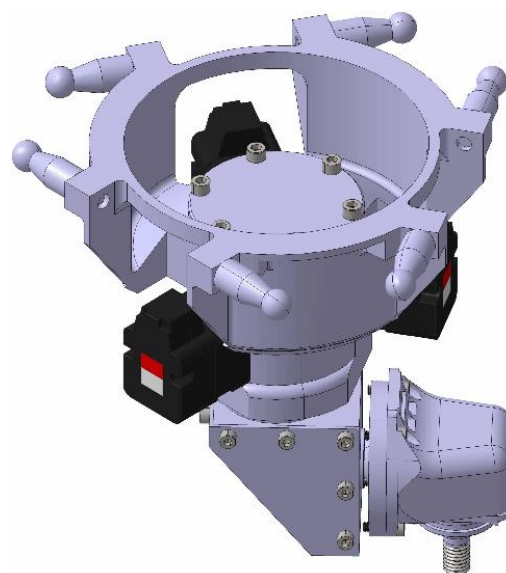


شکل ۵- انتقال حرکت سمت



شکل ۶- انتقال حرکت غلت

محورهای دوران در هر سه دوران در محل اتصال موتور (ورودی‌ها) با یکدیگر هم‌محور می‌شوند. این هم‌محور شدن محورها، باعث دوران نامحدود هر محور می‌شود؛ چون محدودیت فیزیکی محورها روی یکدیگر برداشته می‌شود؛ اما این هم‌محور شدن، باعث وابسته شدن حرکت محور دوم به



شکل ۳- طراحی در نرم افزار کتیا<sup>۲</sup> و مکانیزم میچ

<sup>۱</sup> Roll  
<sup>۲</sup> CATIA

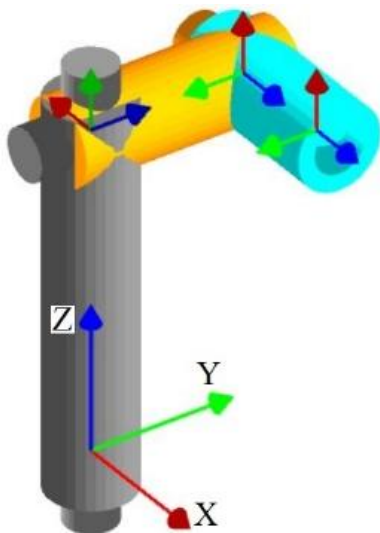
$$\begin{aligned} \theta_1 &= \frac{\theta_{m1}}{r_1} \\ \theta_2 &= \frac{\theta_{m2} - \frac{r_2 \theta_{m1}}{r_1}}{r_2} \\ \theta_3 &= \frac{\theta_{m3} + r_4 \left( \frac{\theta_{m1}}{r_1} + \frac{\theta_{m2} - \frac{r_2 \theta_{m1}}{r_1}}{r_2} \right)}{r_3 r_4} \end{aligned} \quad (2)$$

موقعیت مجری نهایی را می‌توان با توجه به شکل ۷ نسبت به زوایای قرارگیری  $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$  بدست آورد:

$$\begin{aligned} x &= x_0 \sin \theta_1 + y_0 \cos \theta_2 \cos \theta_1 \\ y &= x_0 \cos \theta_1 - y_0 \cos \theta_2 \sin \theta_1 \\ z &= z_0 + y_0 \sin \theta_2 \end{aligned} \quad (3)$$

که در آن  $x, y, z$  به ترتیب راستای اول، دوم و سوم محور مختصات و  $x_0, y_0, z_0$  به ترتیب طول اولیه در راستای محور  $x, y$  و  $z$  می‌باشد.

سینماتیک معکوس نیز از حل همزمان سه معادله رابطه (۳) به دست می‌آید؛ ولی چون در این تحقیق، برای مچ نیاز به کنترل موقعیت نیست و تنها زوایای سمت و غلت و فراز کنترل می‌شود، موقعیت نهایی بر حسب همین زوایا از رابطه (۳) بدست می‌آید و نیازی به پیدا کردن سینماتیک معکوس موقعیت مچ نیست.



شکل ۷- محوره‌های مختصات مچ

### ۲-۳- فضای کاری مچ

این مچ فضای کاری کره‌ای ماندنی را پوشش می‌دهد که موقعیت مجری نهایی را پوشش می‌دهد. فضای کاری برای

محور اول و محور سوم به محور دوم و محور اول می‌شود و تنها محور اول است که مستقلاً می‌تواند حرکت انجام دهد. این وابستگی به دلیل وجود چرخ‌دنده‌های مخروطی ایجاد می‌شود. حرکت محور اول، باعث دوران حول محور  $z$  می‌شود. با توجه به اینکه دوران حول محور  $z$ ، باعث چرخیدن کلی سیستم حول محور  $z$  می‌شود. محور اول و محور دوم، در محل اتصال چرخ‌دنده‌های مخروطی با نسبت یک به یک، شروع به چرخش حول محور  $y$  نیز می‌کنند این دوران‌ها در واقع وابستگی بین محورهای دوران را ایجاد می‌کند.

### ۲-۲- سینماتیک

سینماتیک مچ شامل دو بخش است؛ بخش دوران شامل سمت، غلت و فراز و حوزه موقعیت شامل  $(x, y, z)$  است. کنترل زوایای دوران ابزار، هدف اصلی مطالعه است که در پی آن موقعیت نقطه نهایی نیز تعیین می‌شود. این موقعیت که توسط مچ ایجاد می‌شود، باعث جابه‌جایی در نقطه نهایی ربات و مچ می‌شود که با کم کردن موقعیت مچ از موقعیت ربات (سه درجه آزادی اول)، موقعیت نهایی مچ ربات به موقعیت مورد نظر می‌رسد.

در رابطه (۱) زوایای دوران موتورها نسبت به زوایا سمت و غلت و فراز با توجه به نسبت چرخ‌دنده‌ها و رابطه بین دوران محورها و شکل ۳، ۴ و ۵ بدست می‌آید:

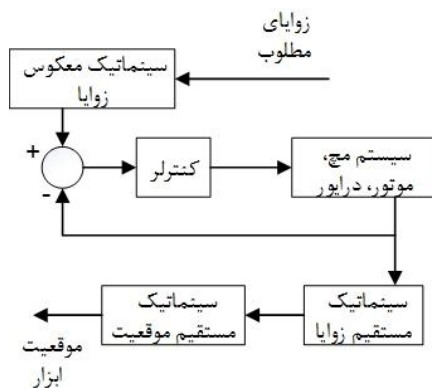
$$\begin{aligned} \theta_{m1} &= r_1(\theta_1) \\ \theta_{m2} &= r_2(\theta_2 + \theta_1) \\ \theta_{m3} &= r_3 r_4 \left( \theta_3 - \frac{1}{r_3}(\theta_1 + \theta_2) \right) \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  به ترتیب، زوایای فراز، سمت و غلت می‌باشند؛ همچنین آن  $\theta_{m1}, \theta_{m2}, \theta_{m3}$  به ترتیب مقدار دوران موتورهای اول، دوم و سوم می‌باشند. نسبت تبدیل چرخ‌دنده‌ها با  $r_i = (i = 1.2.3.4)$  نشان داده شده است.

در رابطه (۲) سینماتیک مستقیم زوایا از روابط سینماتیک معکوس و یا از روی روابط بین محورها و چرخ‌دنده‌ها و شکل‌های ۴، ۵ و ۶ محاسبه شده است.

<sup>1</sup> Yaw  
<sup>2</sup> Pitch

با توجه به شکل ۷ و در نظر گرفتن زوایای مطلوب سمت، غلت و فراز، مقدار دوران موتورها بدست می‌آید. حال با کنترل زوایای دوران موتورها، می‌توان زوایای سمت و غلت و فراز را به وسیله کنترل موقعیت موتورها کنترل کرد.



شکل ۱۰- دیاگرام بلوکی فرآیند کنترل مچ

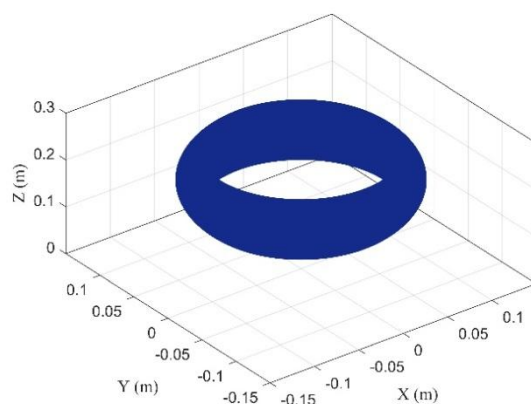
با استفاده از کنترلر PD به کنترل موقعیت زوایای موتور پرداخته شده است که با اعمال محدودیت شتاب‌گیری و سرعت، عملکرد این کنترلر بهبود یافته و موقعیت مچ کنترل می‌شود. موقعیت موتورها به صورت لحظه‌ای توسط انکودر خوانده می‌شود و مقدار خطای موقعیت موتور را تشکیل می‌دهد که به وسیله کنترلر PD، این موقعیت کنترل می‌شود؛ همچنین از موقعیت زاویه‌ای لحظه‌ای موتور استفاده می‌شود تا به کمک سینماتیک معکوس زوایا و سپس سینماتیک مستقیم موقعیت، موقعیت لحظه‌ای مجری نهایی بدست آید تا در ربات بتوان از آن جهت کنترل دقیق موقعیت استفاده نمود. کنترلر به نحوی طراحی شده است که حرکات مچ را به سه بخش شتاب ثابت با افزایش سرعت، سرعت ثابت و شتاب ثابت با کاهش سرعت می‌توان تقسیم کرد.

### ۳- ساخت مچ

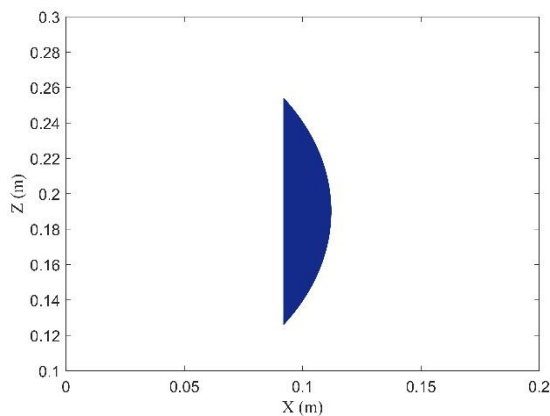
جهت ساخت مچ در ابتدا قطعات اصلی و داخلی و تمام اجزای آن با نرم‌افزار CAD<sup>۱</sup> کتیا طراحی شده که نسبت تعداد دندانه‌ها به ترتیب  $r_1 = \frac{13}{35}$ ,  $r_2 = \frac{13}{35}$ ,  $r_3 = \frac{13}{35}$

<sup>۱</sup> Computer Aided Design

دوران در هر زاویه به صورت نامحدود است که این مچ می‌تواند بدون تکیه‌گی در جهت‌دهی عمل کند؛ اما فضای کاری موقعیت مچ محدود به شکلی کره‌ای مانند است که در شکل ۸، تمامی فضای کاری مچ و در شکل ۹، سطح مقطعی که مچ حول زاویه فراز دوران می‌کند، نشان داده شده است. از اندازه‌های داده شده در طراحی و ساخت مچ برای تحلیل فضای کاری ربات و دیگر تحلیل‌ها استفاده شده است که در آن  $x_0 = 64$  و  $y_0 = 92$  و  $z_0 = 190$  بر حسب میلی‌متر است.



شکل ۸- فضای کاری مچ



شکل ۹- سطح مقطع فضای کاری مچ

### ۴-۲- کنترل مچ

کنترل موقعیت موتورها که در نهایت به کنترل زوایای مچ سمت و غلت و فراز می‌شود، از نمودار بلوکی شکل ۱۰ تبعیت می‌کند.



نرم افزار تحلیل دینامیکی ادمز موتورهای آن انتخاب شده- است. در شکل ۱۱ تحلیل دینامیکی مچ جهت انتخاب مناسب گشتاور موتور به وسیله نرم افزار ادمز نشان داده شده- است.

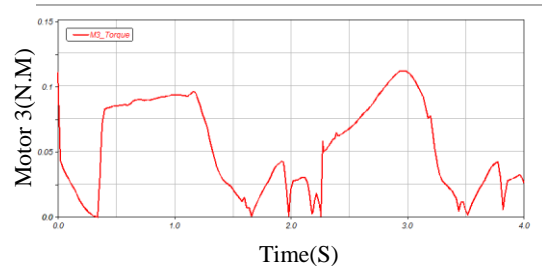
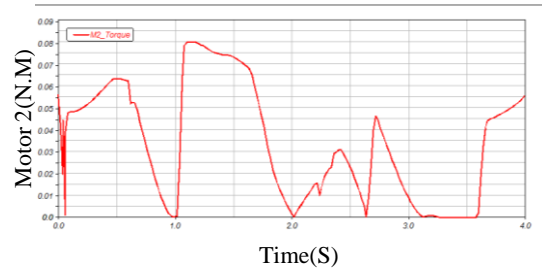
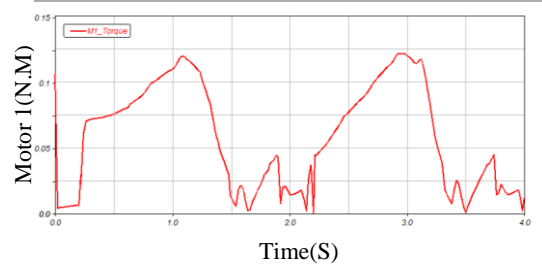
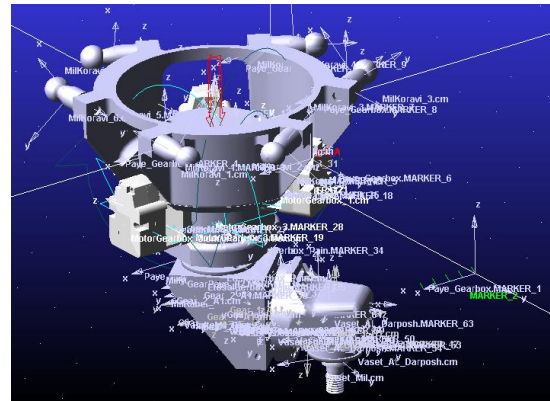
پس از نهایی شدن نقشه، قسمت بدنه و شاسی آن از جنس آلومینیوم آلیاژی ساخته می شود. با توجه به شکل خاصی که در طراحی آن است، نیاز به مدلسازی جهت ریخته گری آن ها می باشد. شکل ۱۲ با توجه به نقشه هر قطعه و انقباض آن نسبت به جنس مورد نظر، مدل ریخته گری آماده شده و قطعه در قالب ماسه CO2 ذوب ریزی می شود.



شکل ۱۲- مدل فومی ساخته شده

برای رسیدن به نقشه نهایی، فرآیند ماشینکاری برای ساینده نهایی قطعات ریخته گری و سایر قطعات استفاده شده است. شکل ۱۳ مراحل ماشینکاری مچ را نشان می دهد. هر قطعه با توجه به شکل خاصی که دارد، با ماشین ابزارهای مخصوص خود آماده می شود.

چرخ دنده های مورد استفاده در گیربکس، از نوع مخروطی مارپیچ است که مزایای استفاده از این نوع چرخ دنده ها، کاهش ارتعاش، سر و صدا، افزایش نیرو و تغییر محور انتقال حرکت می باشد. جنس آن ها از فولاد آلیاژی بوده که بعد از ماشینکاری، عملیات حرارتی می شود که این عمل باعث



شکل ۱۱- تحلیل در نرم افزار ادمز جهت انتخاب مناسب گشتاور موتور

و  $T_4 = \frac{11}{36}$  است. پس از بررسی های انجام شده و رفع عیب در طراحی جهت ساخت مچ، مدل داخل نرم افزار کتیا نهایی شده است. شکل ۳ طراحی به کمک نرم افزار کتیا را نشان می دهد. جهت انتخاب مناسب موتور با تحلیل انجام شده در

<sup>1</sup> Adams



شکل ۱۳- عملیات ماشینکاری پس از ریخته‌گری



شکل ۱۴- مچ نهایی ساخته شده

حرکت و توقف شتاب ثابت به محورهای ورودی اعمال می‌شود تا علاوه بر جلوگیری اعمال شتاب بیش از حد به موتورها به وسیله کنترلر، حرکات ربات را نیز برای رسیدن به زاویه مطلوب هدایت نماید. شکل ۱۵-الف شبیه‌سازی کنترل برای زاویه فراز جهت رسیدن به دوران  $2\pi$  را نشان می‌دهد؛ همچنین شکل ۱۵-ب تمایل زاویه سمت به مقدار  $\pi$  را نشان می‌دهد. در این دو شکل شتاب‌گیری این دو زاویه و همچنین بیشینه سرعت دوران آن‌ها با هم برابر است.

بالا رفتن سختی چرخ‌دنده و استحکام آن در اصطکاک می‌شود.

ساخت محورهای انتقالی جهت انتقال دوران با محورهای تودرتو انجام شده است که به صورت شفت و بوش داخل هم قرار گرفته‌اند. یاتاقان بندی محورها با چرخ‌دنده سوار شده روی آن‌ها، با بلبرینگ‌های متعددی انجام شده است. شکل ۱۴ مدل نهایی مچ پس از ساخت آن را نشان می‌دهد. تحلیل سینماتیک و کنترل نیز، به وسیله نرم‌افزار متلب<sup>۱</sup> انجام شده است.

پیاده‌سازی کنترل مچ به کمک پردازنده‌های AVR و مازول Arduino انجام می‌شود. موتورهای استفاده شده برای راه اندازی مچ، از نوع موتورهای پله‌ای بوده که به همراه انکودر روی شفت موتور موقعیت موتور کنترل می‌شود. برای راه اندازی موتورهای پله‌ای، از درایور DVR8825 استفاده شده است که این درایور با تأمین ولتاژ جریان مورد نیاز موتور، باعث راه اندازی مچ می‌شود. انکودر استفاده شده در مچ، از نوع دو کاناله است که با استفاده از هر دو کانال جهت حرکت موتورها و همچنین موقعیت موتورها با دقت بالا به دست می‌آید که این دقت با استفاده از چرخ‌دنده‌های مخروطی کاهنده سرعت در انتهای عمل ربات افزایش چشمگیری می‌یابد؛ اما لقی آدر چرخ‌دنده باعث کاهش دقت در کنترل زوایای موتور شده است که با توجه به کیفیت و دقت ساخت چرخ‌دنده‌ها، تعیین می‌شود که می‌توان تا حدی آنرا توسط کنترل‌کننده بهبود داد.

#### ۴- کنترل از طریق شبیه‌سازی و پیاده‌سازی

##### تجربی

شبیه‌سازی کنترل مچ به وسیله نرم افزار متلب با طراحی کنترلر PD جهت کنترل زوایای مچ انجام شده است. با توجه به کاهش گشتاور موتورهای پله‌ای و در نتیجه افزایش سرعت این موتورها، تغییراتی روی کنترلر این مچ داده شده است. در این راستا واحد محدود کننده سرعت، جهت کنترل مناسب‌تر به مجموعه اضافه شده است؛ همچنین فرآیند شتاب‌گیری کنترل شده مچ نیز انجام شده که هنگام شتاب‌گیری جهت

<sup>۱</sup> MATLAB

<sup>۲</sup> Back latch



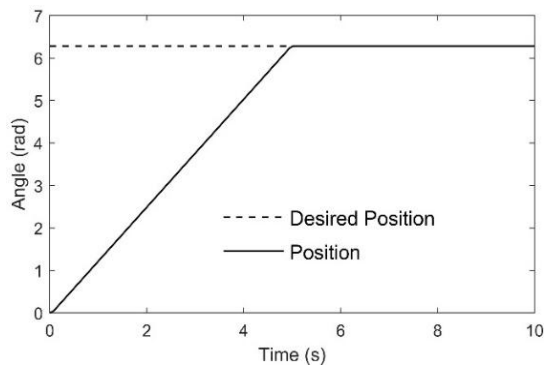
پیاده‌سازی تجربی کنترل روی مچ و بررسی دقت و صحت کنترل به دو روش انجام شده است؛ روش اول نحوه رسیدن زوایای سمت، غلت و فراز به مقدار دلخواه با استفاده از انکودر افزایشی روی موتورها است که با استفاده از سینماتیک مستقیم نشان می‌دهد که زوایا چگونه به مقدار مطلوب نزدیک می‌شوند. شکل ۱۶-الف نحوه رسیدن زاویه فراز به مقدار  $2\pi$  را نشان می‌دهد و شکل ۱۶-ب و ۱۶-ج به ترتیب، نحوه رسیدن زوایای سمت و غلت به مقدار مطلوب نشان می‌دهند. مقدار خطای مشاهده شده در این زوایا صفر است؛ اما با توجه به تفکیک‌پذیری انکودر می‌توان دقت عملکرد مچ را برای زوایای سمت و فراز بهتر از  $0.334^\circ$  درجه یا  $0.003$  رادیان و برای زاویه‌ی غلت بهتر از  $0.102^\circ$  درجه یا  $0.0009$  رادیان در نظر گرفت. علت بهتر بودن دقت در اندازه‌گیری زاویه غلت، وجود نسبت چرخ‌دنده‌های  $r_4$  است که باعث افزایش دقت در این نوع اندازه‌گیری می‌شود.

اما به دلیل اینکه حسگر موقعیت روی موتورهای مچ نصب شده‌اند، لقی موجود در بین چرخ‌دنده‌ها توسط حسگر دیده نمی‌شود و برای اندازه‌گیری واقعی خطای مچ از روش دوم که اندازه‌گیری مستقیم به کمک صفحه مدرج شکل ۱۷ استفاده شد.

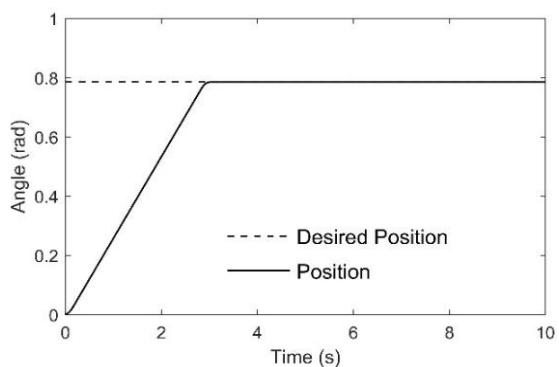
با توجه به دقت و کیفیت قطعات و چرخ‌دنده‌های استفاده شده در ساخت این مچ و لقی کم چرخ‌دنده‌ها خطای محاسبه شده از روش اندازه‌گیری مستقیم برای زاویه فراز  $30^\circ$  دقیقه و  $0.5^\circ$  درجه، برای زاویه سمت  $40^\circ$  دقیقه و  $0.66^\circ$  برحسب درجه و برای زاویه غلت  $20^\circ$  دقیقه و  $0.33^\circ$  برحسب درجه اندازه‌گیری شد.

### ۵- نتیجه گیری

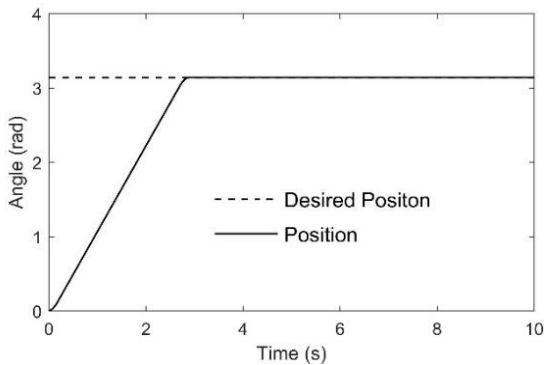
در این مقاله طراحی، ساخت و کنترل یک مچ کروی جدید ارائه شده که بدون تکینگی و محدودیت در دوران درجات آزادی عمل می‌نماید. برای کنترل، از کنترل‌کننده PD جهت کنترل زوایای سمت و غلت و فراز استفاده گردیده و تغییرات لازم جهت بهبود کنترل مچ در کنترل‌کننده اعمال شد و نتایج به صورت شبیه‌سازی و پیاده‌سازی عملی، مورد صحت سنجی قرار گرفت. با توجه به تست‌های عملی انجام شده خطای محاسبه شده از روش اندازه‌گیری مستقیم برای



(الف)



(ب)



(ج)

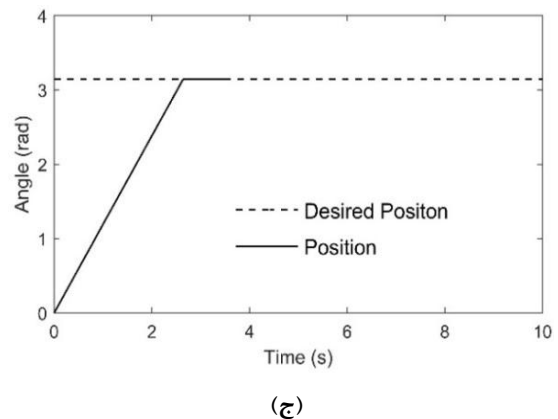
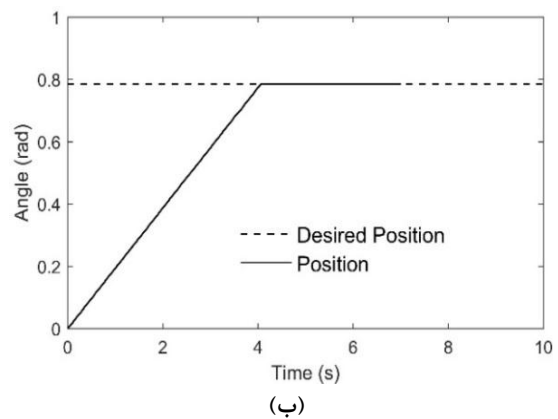
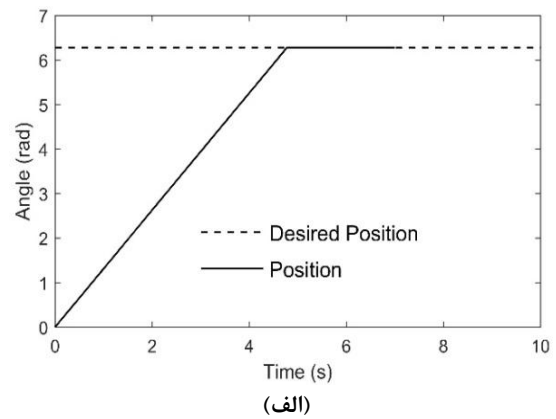
شکل ۱۵- موقعیت زوایا (الف) فراز برای رسیدن به زاویه  $2\pi$ ، (ب) سمت برای رسیدن به زاویه  $\pi$  و (ج) غلت برای رسیدن به زاویه  $\pi/4$

کنترل زاویه غلت با توجه به اینکه نسبت چرخ‌دنده‌های  $r_4$  در انتقال حرکت به آن اضافه می‌شود، شتاب حرکت و بیشینه سرعت متناسب با نسبت  $r_4$  کاهش می‌یابد. شکل ۱۵-ج رسیدن مقدار دوران غلت به  $\pi/4$  را نشان می‌دهد.



شکل ۱۷- اندازه‌گیری دقت موج به کمک صفحه مدرج

زاوای سمت، غلت و فراز کمتر از  $0.5$  درجه است. برای کارهای آتی پیشنهاد می‌شود که مدل‌سازی لقی جهت کنترل بهتر و انجام آزمایشات بیشتر و ادغام آن با ربات‌های دیگر صورت پذیرد.



شکل ۱۶- پیاده‌سازی تجربی کنترل زوایا (الف) زاویه فراز برای رسیدن به  $2\pi$ ، (ب) زاویه سمت برای رسیدن به  $\pi$  و (ج) زاویه غلت برای رسیدن به  $\pi/4$

#### ۵- نمادها

نسبت تبدیل چرخندها	$r$
راستای اول محور مختصات	$x$
طول اولیه در راستای محور $x$	$x_0$
راستای دوم محور مختصات	$y$

[9] Fang Y, Tsai L (2004) Structure synthesis of a class of 3-DOF rotational parallel manipulators. IEEE Trans Rob Autom 20(1): 117-121.

[10] Kong X, Gosselin CM (2004) Type synthesis of 3-DOF spherical parallel manipulators based on screw theory. J Mech Des, Trans ASME 126(1): 101-108.

[11] Chablat D, Wenger PH (2005) Design of a spherical wrist with parallel architecture: Application to vertebrae of an eel robot. IEEE International Conference on Robotics and Automation.

[12] Vischer P, Clavel R (2016) Argos: A novel 3-DoF parallel wrist mechanism. Int J Robotics Res 19(1): 5-11.

[13] Humen J (1974) Floating chamber machine, US Patent. No. 3973469.

[14] Wells WM (1976) Multi-directional positioner, US. Patent. No. 4045958.

[15] Kimura K, Sato S (1984) Wrist mechanism for industrial robot, US. Patent. No. 4574655.

[16] Rosheim ME (1986) Compact robot wrist acuator, US. Patent. No. 4686866.

[17] Stackhouse TH (1976) Manipulator, US. Patent. No. 4068536.

[18] Fletcher JC, Administrator KL (1976) Wrist joint assembly, US. Patent. No. 4068763.

[19] Asada H, Granito JAC (1985) Kinematic and static characterization of wrist joints and their optimal design. Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation 2: 244-250.

[20] Campa R, Camarillo K, Arias L (2006) Kinematic modeling and control of robot manipulators via unit quaternions: Application to a spherical wrist. IEEE Conference on Decision & Control.

[21] Karami M, Tavakolpour Saleh A, Norouzi A (2017) Modeling, development, and evaluation of a micro-robot equipped with vibratory actuator. Modares Mechanical Engineering 17(8): 413-422.

[22] Abdollahi Khosroshahi H, Badamchizadeh M (2018) Design and Implementation of a new mechanism for the planar robotic arm. Modares Mechanical Engineering 18(5): 341-351.

طول اولیه در راستای محور $y$	$y_0$
راستای سوم محور مختصات	$z$
طول اولیه در راستای محور $z$	$z_0$
دوران حول زاویه فراز	$\theta_1$
دوران حول زاویه سمت	$\theta_2$
دوران حول زاویه غلت	$\theta_3$
مقدار دوران موتور اول	$\theta_{m1}$
مقدار دوران موتور دوم	$\theta_{m2}$
مقدار دوران موتور سوم	$\theta_{m3}$

### ۶- مراجع

[1] Duchemin G, Dombre E, Pierrot F (2000) SCALPP: A 6-DOF robot with a non-spherical wrist for surgical applications. Advances in Robot Kinematics PP: 165-174.

[2] Gupta KC (1986) Rotatability considerations for spherical four-bar linkages with applications to robot wrist design. ASME J Mech Transm Autom Des 108(3): 387-391.

[3] Lee KM, Vachtsevanos G, Kwan CH (1988) Development of a spherical stepper wrist motor. J Intell Rob Syst Theor Appl 1(3): 225-242.

[4] Trabia M, Davidson JK (1989) Design conditions for the orientation and attitude of a robot tool carried by a 3-R spherical wrist. ASME J Mech Transm Autom Des 111(2): 176-187.

[5] Gregorio RD (2000) Kinematics of a new spherical parallel manipulator with three equal legs: The 3-URC wrist. J Rob Syst 18(5): 213-219.

[6] Gregorio RD, Castelli VP (1998) A Translational 3-DOF Parallel Manipulator. Advances in Robot Kinematics PP: 49-58.

[7] Wang J, Liu X (2003) Analysis of a novel cylindrical 3-DoF parallel robot. Rob Autom Syst 42(1): 31-46.

[8] Carricato M, Castelli VP (2004) A novel fully decoupled two-degrees-of-freedom parallel wrist. Int J Robotics Res 23(6): 661-667.