



تحلیل سینماتیک و طراحی مکترونیک یک ربات سه درجه آزادی موازی با کاربرد جراحی کرینیوتومی

محمدرضا دهقانی تفتی¹، مجید محمدی مقدم^{2*}، پوریا ترابی³

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* صندوق پستی 14115-111، m.moghaddam@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 24 مرداد 1396

پذیرش: 17 مهر 1396

ارائه در سایت: 27 آبان 1396

کلید واژگان:

جراحی رباتیک

معادلات سینماتیک

ارتباط با سخت افزار

کرینیوتومی

چکیده

استفاده از سیستم‌های رباتیک در جراحی به دلیل خصوصیات هم چون دقت بالا، خستگی ناپذیری و عدم اشتباه، روز به روز در حال افزایش است. به طور ویژه، این سیستم‌ها در اعمال جراحی بر روی بافت استخوانی به دلیل ثابت بودن و عدم تغییر شکل و امکان برنامه‌ریزی پیش از عمل مناسب هستند. با این وجود سیستم‌های رباتیک با توانایی برش و سوارکاری مجمله برای جراحی‌های مغز و اعصاب در مرحله تحقیقاتی به سر می‌برند. در این تحقیق با بررسی نیازمندی‌های جراحی‌های روی مجمله، انتظارات جراحان از یک سیستم رباتیک مد نظر قرار داده شد و بر اساس آن طراحی، تحلیل، ساخت و راه اندازی یک نمونه ربات جراحی بر روی مجمله با یک مکانیزم کروی و دارای مرکز آبی دوران بیرونی انجام گرفت. معادلات سینماتیک و ژاکوبین ربات به صورت تحلیلی استخراج و توسط شبیه‌سازی نرم‌افزاری صحت‌گذاری شدند. با انجام طراحی جزئی و تحلیل نیرویی، عملگرهای مناسب از موتورهای متناوب سروو برای این سیستم انتخاب گردیدند. یک ربات نمونه از سیستم طراحی شده از جنس آلومینیوم ساخته شد. در فرایند راه اندازی، عملکرد روش‌های مختلف ارتباط با سروو درایوها آزمایش شد و ترکیبی از آنها برای دستیابی به قابلیت اطمینان و سرعت بالا استفاده گردید. در نهایت پس از راه اندازی سیستم سخت‌افزاری، کتابخانه نرم‌افزاری برای ارتباط راحت با موتورها و کنترل آنها کدنویسی شد.

Kinematic analysis and mechatronic design of a 3-DOF parallel robot for craniotomy surgery

Mohammadreza Dehghani Tafti, Majid Mohammadi Moghaddam*, Pourya Torabi

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

* P.O.B. 14115-111 Tehran, Iran, m.moghaddam@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 15 August 2017
Accepted 09 October 2017
Available Online 18 November 2017

Keywords:
Robotic Surgery
Kinematic Analysis
Hardware in the Loop
Craniotomy

ABSTRACT

Recently, robotic systems are widely used in surgery, due to their characteristics such as having high precision, being tireless and making no mistakes. They are especially suitable for operation on hard tissue, as the bone is stationary and does not change shape and therefore preoperative planning of the system is much more straightforward. Nevertheless, proposed robotic systems for surgery on skull bone are still in the research stage. In this study, by considering the requirements of craniotomy surgery, a Remote Center of Motion spherical mechanism is used in design and prototyping of a surgical system. The kinematic equations and Jacobian of the mechanism are calculated analytically and later verified through software simulation. Detailed design and force analysis helped selection and use of appropriate AC servo motors for actuation. An aluminum prototype is fabricated out of CNC machined parts. Performance of different connection methods between PC and the robot were tested and a combination of them is proposed for higher reliability and speed. Finally, a software library is generated in LabVIEW environment to simplify the connection with servo motors and utilization and control of the robotic system.

1- مقدمه

نمونه‌برداری، خارج نمودن تومور، کاهش فشار مایع مغزی، ترمیم شکستگی مجمله و برش بافت عفونی نیاز به برش بخشی از مجمله بیمار خواهد بود. در حال حاضر این عمل بصورت دستی توسط جراح صورت می‌گیرد. در این نوع جراحی به دلیل نیاز به دسترسی به بافت حساس مغز زیر مجمله و نیاز به حرکات دقیق استفاده از سیستم‌های رباتیکی اجتناب‌ناپذیر است [2]. ساختار ثابت مجمله و تصویربرداری ساده ساختار استخوانی آن از طریق

در سه دهه اخیر تحقیقات گسترده‌ای بر روی ایجاد و گسترش سیستم‌های جراحی رباتیک صورت گرفته است. مهمترین چالش‌های مهندسی پیش روی جراحی رباتیک کاهش ابعاد، قابلیت حمل و نقل سیستم، ایجاد بازخورد نیرویی، هماهنگی با سیستم‌های تصویربرداری و مقابله با تأخیر هستند [1]. در جراحی مغز و اعصاب به دلایل مختلف شامل دسترسی به بافت مغزی،

Please cite this article using:

M. Dehghani Tafti, M. Mohammadi Moghaddam, P. Torabi, Kinematic analysis and mechatronic design of a 3-DOF parallel robot for craniotomy surgery, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 11, pp. 289-299, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

هر نقطه با پارامترهای شعاع و زوایای سمت⁷ و ارتفاع⁸ بیان می‌شود. برای تعیین شعاع نقاط برش لازم است شعاع کره تخمین زنده جمجمه محاسبه گردد. با توجه به ادبیات موجود از داده‌های ابعادی بدن انسان⁹ [11,10] محیط جمجمه یک انسان بالغ و کودک به ترتیب 57 و 34 سانتی‌متر است. همچنین فاصله پیشانی تا پشت سر برای انسان بالغ بین 18 و 22 و برای کودک بین 10 و 12 سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که ربات طراحی شده باید قادر به ایجاد مسیر برش روی جمجمه بیمار اعم از بالغ یا کودک باشد، لازم است درجه آزادی نفوذ ابزار قادر به تامین شعاع از 5 تا 11 سانتی‌متر را داشته باشد.

با توجه به تعاریف آناتومیک از محل سوراخ‌های فرزکاری جمجمه، مطابق شکل 1 بزرگترین تکه استخوان مورد هدف این سیستم جراحی رباتیک (مربوط به جراحی فرانتوتورینال¹⁰) را می‌توان داخل قطعی از کره محیط بر جمجمه جا داد. با توجه به تعاریف مختصات کروی این ناحیه بین دو زاویه 100 تا 150 می‌توان تعریف نمود. زاویه ارتفاع تا محل سوراخ برای 100 از 57 شروع و تا 130 ادامه خواهد داشت. همچنین در زاویه سمت 150، زاویه ارتفاع از 65 تا 120 خواهد بود.

از آنجا که لازم است ربات برای تمامی جراحی‌های ذکر شده طراحی شده باشد و نمی‌توان بهینه‌سازی را برای جراحی‌های متفاوت تغییر داد، تصمیم بر آن شد تا یک فضای کاری هدف انتخاب شود که قادر به پوشش دادن تمامی تکه استخوان‌ها از جمله فرانتوتورینال باشد و بهینه‌سازی برای آن فضا صورت گیرد. بدین منظور دو فضا پیشنهاد شد: یکی سطح ایجاد شده از برخورد یک مخروط با کره محیطی به جمجمه و دیگری یک هشتم از کره محیطی. خاصیت تقارن سطح ایجاد شده از انتخاب اول مزیت‌هایی از قبیل کاهش حجم محاسبات بهینه‌سازی، ثابت نمودن جهت‌گیری ربات نسبت به تخت و عدم نیاز به تعیین موقعیت پایه برای جراحی‌های متفاوت و کاهش ابعاد ربات را به دست می‌دهد. بنابراین برای انجام بهینه‌سازی از حالت اول استفاده گردید.

2-1- فضای کاری هدف

ابعاد تقریبی تکه بریده شده در جراحی فرانتوتورینال برای مرد بالغ 10 در 8.5 سانتی‌متر خواهد بود. پس از بررسی‌ها مشخص شد که کوچکترین مخروطی که قادر به پوشش تمامی جراحی‌ها باشد، دارای زاویه راس 40 درجه خواهد بود. این مخروط و سطح ایجاد شده از تقاطع آن با جمجمه در کنار بزرگترین تکه استخوان (مربوط به جراحی فرانتوتورینال) در شکل 2 نمایش داده شده است.

3- مکانیزم انتخابی

مکانیزم های سری و موازی متفاوتی مورد بررسی قرار گرفت. در مکانیزم های سری ضعف عدم وجود دقت کافی، به دلیل کمتر بودن سفتی مشهود بود. به این دلیل مکانیزم های موازی حتی با وجود عیب دست و پاگیر بودن مورد توجه قرار گرفت. علاوه بر این وجود قید شکل نزدیک به کروی جمجمه و نیاز به عمود بودن ابزار به سطح آن، به نظر استفاده از یک مکانیزم مرکز آبی دوران بیرونی بسیار مناسب می باشد.

در نهایت مکانیزمی دارای دو درجه آزادی، موازی و از نوع دارای مرکز

سی تی اسکن¹ یا فلوروسکوپی²، تجمع سیستم های ناوبری³ را با سیستم های رباتیکی بسیار راحت تر می نماید [3].

اولین مرحله در جراحی های باز مغز و اعصاب، سوراخ کاری و یا برش بافت استخوانی جمجمه برای دسترسی جراح به بافت مغزی است. برش و تراش جمجمه کاری سخت و وقتگیر است. بست و همکاران با انجام تست هایی نشان دادند که سیستم رباتیکی جراحی می تواند این وظایف را با دقت و سرعت بیشتری نسبت به جراح انجام دهد [4]. یکی از حساسیت های موجود به دلیل امکان صدمه به پرده مننژ، لایه محافظ مغزی زیر سطح جمجمه، است [5]. با توجه به سختی بافت جمجمه، جراح در انجام این وظایف نیروهای زیادی را باید اعمال نماید. دقت بالا، در کنار نیروهای بالا، فشار زیادی به جراح اعمال می کند. خستگی جراح باعث کاهش دقت او در انجام مراحل بعدی خواهد شد. بنابراین طراحی سیستمی با هدف انجام دقیق برش جمجمه بسیار مورد استقبال جراحان قرار گرفته است.

چندین سیستم تحقیقاتی برای کمک به جراح در برش جمجمه معرفی شده اند. اولین ربات معرفی شده در این زمینه روباکا [6]، یک ربات 6 درجه آزادی سری است که برای دستیابی به دقت مورد نیاز بازوهای بزرگی برای ربات طراحی شده که فضای زیادی را در اتاق عمل اشغال می نماید. در سال 2003 ربات کرینو معرفی گردید که به دلیل استفاده از یک ساختار موازی دقت بالایی دارد [7]. در تحقیقی دیگر نیز از ساختار موازی هگزپاد به علاوه یک درجه آزادی خطی افزونه⁴ استفاده شده است [8]. اما هر دو سیستم مذکور محدودیتی حرکتی را بر روی راستای ابزار اعمال می کنند. از آنجا که تمایل جراحان به عمود نگه داشتن ابزار فرز بر سطح استخوان می باشد، این سیستم ها قادر به تامین این نیاز جراحان نخواهند بود.

هدف از تحقیق حاضر طراحی و ساخت سیستم جراحی رباتیک برای انجام عمل های کرینیوتومی⁵ و کرینیکتومی⁶ است که علاوه بر تامین دقت مورد نیاز، حجم کوچکی را اشغال نماید و فضای کاری مورد نیاز جراحان اعصاب را نیز تامین نماید. در اولین مرحله بر اساس مطالعات گسترده ای که در زمینه جراحی های کرینیوتومی و کرینیکتومی صورت گرفت ابعاد و نیازهای این جراحی ها شناسایی گردید و رباتی دارای 3 درجه آزادی فعال و 3 درجه غیر فعال طراحی و ساخته شد [9].

در این مقاله ابتدا معادلات سینماتیک حاکم بر مکانیزم انتخابی و صحنه گذاری آنها ارائه خواهد شد. در بخش بعد تحلیل دینامیکی استفاده شده برای انتخاب موتورها گزارش می شود. در نهایت مکانیزم ارتباط حلقه کنترلی با ربات و طریقه راه اندازی آن بیان می شود.

2- معرفی فضای کاری جراحی

اولین قدم در طراحی و بهینه سازی مکانیزم یک ربات، تعیین دقیق فضای کاری مورد نیاز در کاربرد مدنظر خواهد بود. در مورد جراحی مغز و اعصاب لازم است که ربات توانایی دسترسی به مسیر برش جمجمه و به اصطلاح محیط تکه استخوان را داشته باشد. برای استفاده از فضای کاری تعیین شده لازم است که ابعاد تکه استخوان به صورت کمی بیان شود. با توجه به اینکه سطح جمجمه را می توان بصورت تقریبی با یک کره تخمین زد، برای بیان کمی بزرگترین تکه استخوان از مختصات کروی استفاده شد. در فضای کروی

¹ CT Scan

² Fluoroscopy

³ Navigation

⁴ Redundant

⁵ Craniotomy

⁶ Craniectomy

⁷ Azimuth

⁸ Elevation

⁹ Anthropometric data

¹⁰ Fronto-Pterional

زنجیره سمت راست مکانیزم را نمایش می‌دهد. دستگاه مرجع در نقطه مرکز دوران مکانیزم قرار داده شده است. دستگاه مختصات مرجع با اندیس صفر و دستگاه ابزار با اندیس EE مشخص شده اند. در نام‌گذاری زوایا، اندیس 1 و 2 مشخصه بازوهای اول و دوم و اندیس L و R به ترتیب معرف سمت راست و چپ ربات خواهند بود. شکل 5 نامگذاری زوایای طراحی ربات را نمایش می‌دهد.

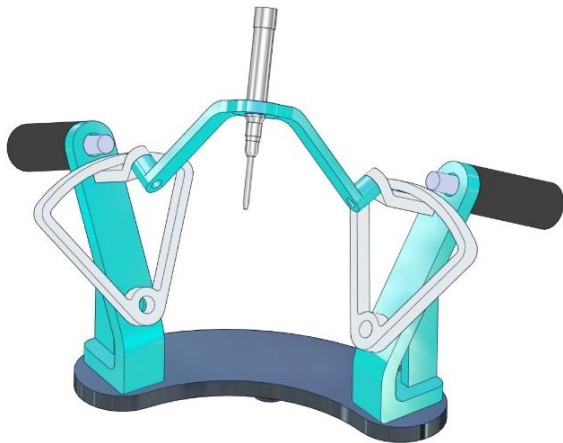


Fig. 3 Schematics of the mechanism

شکل 3 نمایش شماتیک مکانیزم انتخاب شده

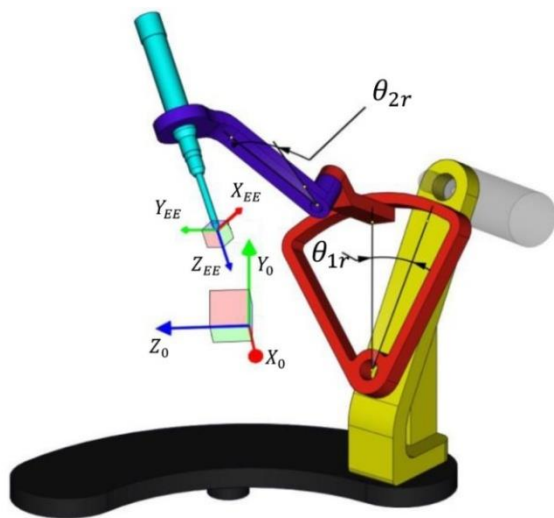


Fig. 4 The right hand serial chain of the 2-DoF spherical mechanism

شکل 4 نمایش زنجیره سینماتیک سمت راست ربات تا نوک ابزار

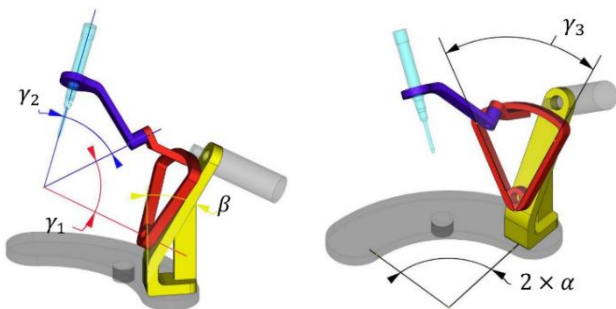


Fig. 5 Robot parameters

شکل 5 نمایش نامگذاری زوایای ربات



Fig. 1 Fronto-pterional bone flap inscribed in a spherical Lune

شکل 1 تکه استخوان فرانتوتورینال محدود شده در قطاعی از کره محیطی به حجمه

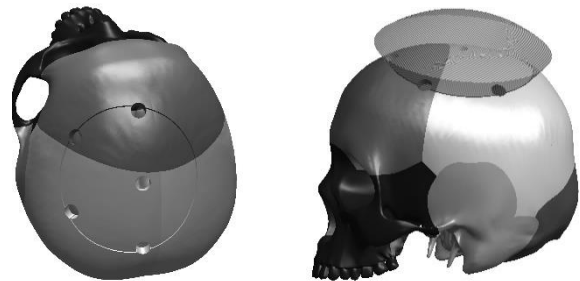


Fig. 2 The 40 degree cone covering the largest bone flap

شکل 2 مخروطی با زاویه راس 40 درجه که بزرگترین تکه استخوان را پوشش داده

آنی دوران بیرونی انتخاب گردید [12]. این انتخاب باعث می‌شود که بدون نیاز به فرایند کنترلی ابزار همواره رو به مرکز کره فرضی باقی بماند. در صورت تنظیم مرکز دوران مکانیزم بر روی مرکز کره محیطی به حجمه بیمار، ابزار جراحی همواره رو به مرکز حجمه اشاره دارد. با توجه به انحراف سطح حجمه از کره محیطی، ابزار در بعضی موارد تا حدود 20 درجه از راستای عمود بر سطح فاصله می‌گیرد. با مشورت از جراحان مغز و اعصاب بیمارستان فیروزگر تهران، این میزان انحراف برای این نوع جراحی قابل قبول است.

مکانیزم انتخاب شده از نوع کروی می‌باشد، بدین مفهوم که محورهای دوران بازوها همگی به مرکز یک کره اشاره دارند. در محاسبه درجات آزادی چنین مکانیزم‌هایی از فرمول گرابلر (رابطه 1) استفاده می‌گردد:

$$3 \times (N - 1 - j) + \sum_{i=1}^j f_i \quad (1)$$

که N تعداد بازوها، j تعداد مفاصل و f_i تعداد درجات آزادی تامین شده توسط مفصل است. در مکانیزم حاضر با احتساب بازوی ثابت، 5 بازو و 5 مفصل دورانی وجود دارد که هرکدام از مفاصل یک درجه دوران به مکانیزم می‌دهند. بنابراین مکانیزم کروی دو درجه آزادی طبق رابطه (2) خواهد داشت:

$$DoF = 3 \times (5 - 1 - 5) + 5 \times 1 = 2 \quad (2)$$

در نهایت، یک درجه آزادی خطی برای نفوذ ابزار طراحی شد (شکل 3).

3-1- معادلات سینماتیک

شکل 4 دستگاه‌های مختصات مرجع و ابزار و همچنین زوایای عملگری

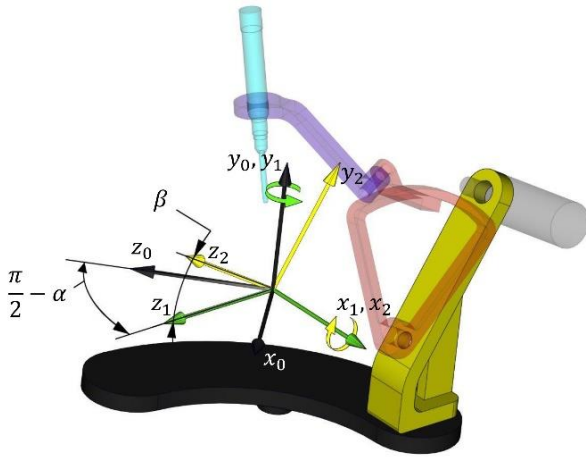


Fig. 6 Rotation from base to first link

شکل 6 نمایش دوران از دستگاه مرجع به حالت اولیه بازوی شماره 1

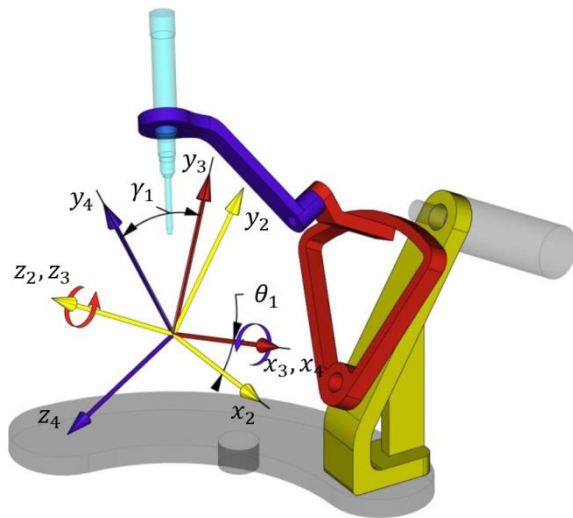


Fig. 7 Rotation from initial position of link 1 to link 2

شکل 7 نمایش دوران از دستگاه 2 (حالت اولیه بازوی اول) به دستگاه شماره 4 (حالت اولیه بازوی دوم)

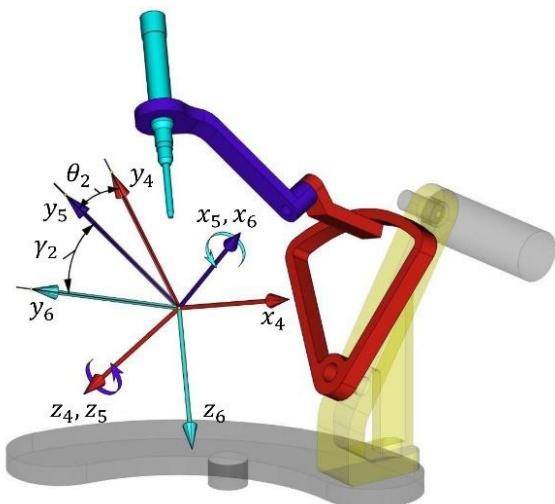


Fig. 8 Rotation from link 2 to orientation of end-effector

شکل 8 نمایش دوران از دستگاه 4 (حالت اولیه بازوی دوم) به دستگاه شماره 6 (دستگاه هم راستای ابزار)

معمولاً در تحلیل مکانیزم‌های دارای مرکز آنی دوران برای راحتی دستگاه‌های مختصات را بر روی نقطه مرکز قرار می‌دهند. با این روش ماتریس تبدیل محاسبه شده برای تعیین موقعیت نوک ابزار نسبت به دستگاه مرجع از مجموعه‌ای از دوران‌های پیاپی قابل محاسبه خواهد بود. برای تحلیل مکانیزم حاضر نیز از این روش استفاده شده است. تنها جهت اعمال درجه آزادی نفوذ ابزار، در مرحله آخر پس از تعیین راستای ابزار از یک حرکت خطی استفاده شده است. برای محاسبه ماتریس دوران مذکور 7 دستگاه مختصات بر روی بازوهای ربات نصب گردید تا تمامی دوران‌های موجود را مدنظر قرار دهد.

در نوشتن معادلات از نمادگذاری معرفی شده در [13] استفاده شده است. در این روش اندیس بالا و جلوی نام در هر پارامتر نماینده دستگاه مرجع است. بنابراین v_2^1 بیان بردار v_2 در دستگاه 1 است. در مورد ماتریس‌های دوران دستگاه مبدا در بالا و دستگاه مقصد در پایین بیان می‌شود. به عنوان مثال R_2^1 دوران از دستگاه 1 به دستگاه 2 را بیان می‌نماید. همچنین نماد ساده $Rot_x(\beta)$ برای بیان دوران حول محورهای اصلی به اندازه دلخواه استفاده می‌شود.

با توجه به شکل 6 می‌توان ماتریس تبدیل دوران از دستگاه 0 به 2 را با رابطه (3) محاسبه نمود.

$$\begin{aligned} Rr_2^0 &= Rot_{y_0}(\pi/2 - \alpha) Rot_{x_1}(-\beta) \\ Rl_2^0 &= Rot_{y_0}(\pi/2 + \alpha) Rot_{x_1}(-\beta) \end{aligned} \quad (3)$$

به همین ترتیب، با توجه به شکل‌های 7 و 8 می‌توان به ترتیب ماتریس‌های دوران از دستگاه 2 به 4 و از دستگاه 4 به 6 را با روابط (4,5) محاسبه نمود.

$$\begin{aligned} Rr_4^2 &= Rot_{z_2}(\theta_{1r}) Rot_{x_3}(\gamma_1) \\ Rl_4^2 &= Rot_{z_2}(\theta_{1l}) Rot_{x_3}(\gamma_1) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} Rr_6^4 &= Rot_{z_4}(\theta_{2r}) Rot_{x_5}(\gamma_2) \\ Rl_6^4 &= Rot_{z_4}(\theta_{2l}) Rot_{x_5}(\gamma_2) \end{aligned} \quad (5)$$

3-1-1- سینماتیک معکوس

در حل مسئله سینماتیک معکوس هدف محاسبه زوایای عملگرها با داشتن موقعیت نوک ابزار است. بردار یک‌ه هم‌راستا با محور z - دستگاه ابزار Z_6^0 (ستون سوم ماتریس دوران Rr_6^0) را می‌توان از رابطه (6) محاسبه نمود:

$$Z_6^0 = \frac{-P_{EE}}{\|P_{EE}\|} \quad (6)$$

در رابطه (6) بردار موقعیت نوک ابزار است. علامت منفی برای در نظر گرفتن راستای ابزار اضافه شده است. بیان همین بردار در دستگاه شماره 2 (Z_6^2) تنها تابعی از دو پارامتر مجهول θ_{1r} و θ_{2r} است و با ضرب معادله (4) در معادله (5) و استخراج ستون سوم پاسخ طبق رابطه (7) بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} Z_6^2 &= (Rr_4^2 \times Rr_6^4) \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} (S\gamma_1 C\gamma_2 + C\gamma_1 S\gamma_2 C\theta_{2r})S\theta_{1r} + (S\gamma_2 S\theta_{2r})C\theta_{1r} \\ (S\gamma_2 S\theta_{2r})S\theta_{1r} - (S\gamma_1 C\gamma_2 + C\gamma_1 S\gamma_2 C\theta_{2r})C\theta_{1r} \\ C\gamma_1 C\gamma_2 - S\gamma_1 S\gamma_2 C\theta_{2r} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

از طرفی Z_6^2 را می‌توان با ماتریس دوران مناسب از رابطه (6) بدست آورد:

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} SaC\beta & CaC\beta & S\beta \\ -C\alpha & Sa & 0 \\ -SaS\beta & -CaS\beta & C\beta \end{bmatrix} \times \frac{-P_{EE}}{\text{norm}(P_{EE})} \quad (8)$$

با مساوی قرار دادن دو رابطه (7) و (8) سه معادله به دست می‌آید که با حل آنها دو مجهول زوایای مفصلی طبق رابطه (9) محاسبه می‌گردند:

$$\begin{aligned} \theta_{1r} &= \text{atan}(f \times z_1 + g \times z_2, g \times z_1 - f \times z_2) \\ \theta_{2r} &= \text{atan}(\pm \sqrt{1 - (C\theta_{2r})^2}, C\theta_{2r}) \end{aligned} \quad (9)$$

که در آنها $C\theta_{2r}$ ، f و g به صورت رابطه (10) محاسبه می‌شوند:

$$\begin{aligned} C\theta_{2r} &= \frac{C\gamma_1 C\gamma_2 - z_3}{S\gamma_1 S\gamma_2} \\ f &= S\gamma_1 C\gamma_2 + C\gamma_1 S\gamma_2 C\theta_{2r} \\ g &= S\gamma_2 S\theta_{2r} \end{aligned} \quad (10)$$

3-1-2- سینماتیک مستقیم

نیاز به حل مسئله سینماتیک مستقیم در دو حالت ممکن است وجود داشته باشد. یکی در حالتی که تخمین نسبتاً خوبی از وضعیت فعلی مکانیزم مشخص است (زمانی که در حال کنترل ربات هستیم و در لحظه قبل سینماتیک مستقیم حل شده است) و دیگری زمانی که هیچگونه شناختی از وضعیت ربات در دست نیست (در لحظه راهاندازی ربات). در حالت دوم تنها رویکرد موجود تعیین تمامی جواب‌های ممکن برای دسته معادلات است. اگرچه که حتی پس از تعیین جواب‌ها، الگوریتم شناخته شده‌ای برای دسته‌بندی جواب وجود ندارد.

روش‌های متفاوتی برای حل مسئله سینماتیک مستقیم ارائه شده است [14]. به دلیل نیاز به حل زمان واقعی در زمان پیاده سازی الگوریتم کنترل، از روش حذف استفاده می‌کنیم. برای دستیابی به حل عددی دستگاه معادلات غیرخطی از تابع برازش منحنی حداقل مربعات استفاده شده است.

از قاعده حلقه بسته برای ربات‌های موازی می‌دانیم که با حل سینماتیک هر زنجیره ربات (راست یا چپ) راستای ابزار یکی خواهد بود. بنابراین می‌توان رابطه (11) را نوشت:

$$Rr_2^0 \times Rr_6^2 \times \hat{e}_3 = Rl_2^0 \times Rl_6^2 \times \hat{e}_3 \quad (11)$$

از رابطه (11) سه معادله به دست می‌آید. از این سه معادله اگر بتوان θ_{2r} و θ_{2l} را بر حسب θ_{1l} و θ_{1r} محاسبه نمود می‌توان با حرکت از یکی از مسیرها ماتریس انتقال زمین به ابزار را با متغیرهای اصلی θ_{1l} و θ_{1r} بدست آورد. معادلات غیر خطی حاصل در یک تابع متلب وارد شده و با حل دستگاه معادلات در هر بازه زمانی با داشتن θ_{1l} و θ_{1r} به عنوان ورودی موقعیت، راستای دستگاه ابزار تعیین می‌شود. در کدنویسی و حل معادلات غیر خطی، عدم پیشنهاد بازه مناسب به الگوریتم موجب بروز خطا خواهد شد. بازه مناسب با توجه به هندسه مسئله محاسبه و در تابع لحاظ گردید. ضمناً کاربرد سینماتیک مستقیم در کنترل ربات خواهد بود و الگوریتم کنترل نیز در هر لحظه موقعیت قبلی ربات را در اختیار دارد، بنابراین می‌توان بازه مناسب را در اطراف نقطه قبلی تعریف نمود. با توجه به اینکه سرعت حرکت بازوها مشخص و قابل پیش‌بینی است و حلقه کنترلی بصورت تکرارشونده اجرا می‌گردد، این راه‌حل قابل قبول است.

3-1-3- صحنه‌گذاری بر معادلات سینماتیک مستقیم و معکوس

برای اطمینان از حل صحیح سینماتیک مستقیم و معکوس ربات از مدل سه بعدی ایجاد شده در نرم‌افزار سالیدورکز¹ استفاده شد. بدین صورت که ربات در چندین موقعیت مختلف قرار گرفت و زوایای عملگری θ_{1l} و θ_{1r} و همچنین مختصات کارترین نوک ابزار نسبت به دستگاه جهانی قرائت شد. تطابق داده‌های قرائت شده با خروجی معادله سینماتیک معکوس و الگوریتم سینماتیک مستقیم با تفاوتی در مرتبه صدم میلی‌متر صحت آنها را تایید می‌نماید.

3-2- رسم فضای کاری ربات

فضای کاری ربات‌های دارای مرکز آبی دوران بخشی از یک کره است که مرکز آن همان مرکز دوران مکانیزم خواهد بود. برای رسم فضای کاری از تابع سینماتیک معکوس مکانیزم استفاده شد. بدین صورت که، برای استخراج فضای کاری ابتدا کل سطح کره را با نقاطی پوشش می‌دهیم. سپس تمامی نقاط را به عنوان ورودی کد سینماتیک مستقیم وارد می‌کنیم. در صورت

وجود جواب نتیجه می‌گیریم که ربات قادر به رسیدن به آن نقطه از کره خواهد بود. تمامی نقاط دارای پاسخ در پایان حلقه رسم می‌شوند، که مجموعه آنها نمایانگر فضای کاری ربات است [15].

رابطه (9) نشان می‌دهد که برای دسترسی به یک نقطه از فضای کاری زاویه بازوی دوم می‌تواند مثبت و یا منفی باشد. در نظر گرفتن سمت راست و چپ ربات منجر به ایجاد چهار چیدمان می‌شود که در کدنویسی و استفاده از معادلات با اندیس m نامگذاری می‌شوند (شکل 9). پس از بررسی فضای کاری مشخص شد که دو حالت از اندیس‌ها ($m = 2$ و $m = 3$) فضای کاری متقارن و دو حالت دیگر ($m = 1$ و $m = 4$) فضای نامتقارن ولی عکس هم به دست می‌دهند (شکل 10).

3-3- مدل سازی در محیط سیمولینک²

برای مدل سازی حرکت و دینامیک مکانیزم معرفی شده و بررسی تأثیر اعمال نیرو و گشتاور و پیاده سازی الگوریتم‌های کنترلی لازم است که مکانیزم معرفی شده شبیه سازی دینامیکی شود. برای این منظور از محیط نرم‌افزاری سیمولینک متلب³ استفاده خواهد شد. در مرحله اولیه تمامی اجزای طراحی شده در محیط سالیدورکز به محیط سیمولینک منتقل شد و ارتباط اجزا تعیین شد. نکته مهم در مدل سازی مؤثر در این محیط تعیین دقیق محورهای مختصات مناسب و تعریف صحیح درجات آزادی است. شکل 11 مدل آماده شده در محیط سیمولینک را نمایش می‌دهند.

4-3- محاسبه ژاکوبین

به دلیل ساختار موازی ربات محاسبه ژاکوبین از روش‌های معمولی امکان پذیر نمی‌باشد. با توجه به اینکه سرعت زاویه‌ای دستگاه متصل به انتهای بازوی دوم راست و چپ تنها در راستای ابزار با هم تفاوت دارند. بنابراین از دو رابطه (12) می‌توان برای محاسبه ژاکوبین سرعت‌های زاویه‌ای (ω) طبق رابطه (12) استفاده نمود.

$$\begin{aligned} (\omega r_6^0 - \omega l_6^0) \cdot \hat{x}_{ee} &= 0 \\ (\omega r_6^0 - \omega l_6^0) \cdot \hat{y}_{ee} &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

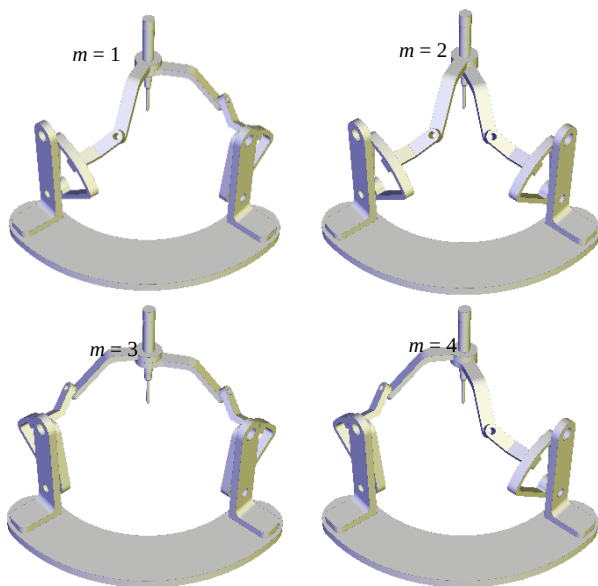


Fig. 9 Four possible configurations of the robot

شکل 9 چهار چیدمان ممکن ربات

² Simulink
³ MATLAB

¹ Solidworks

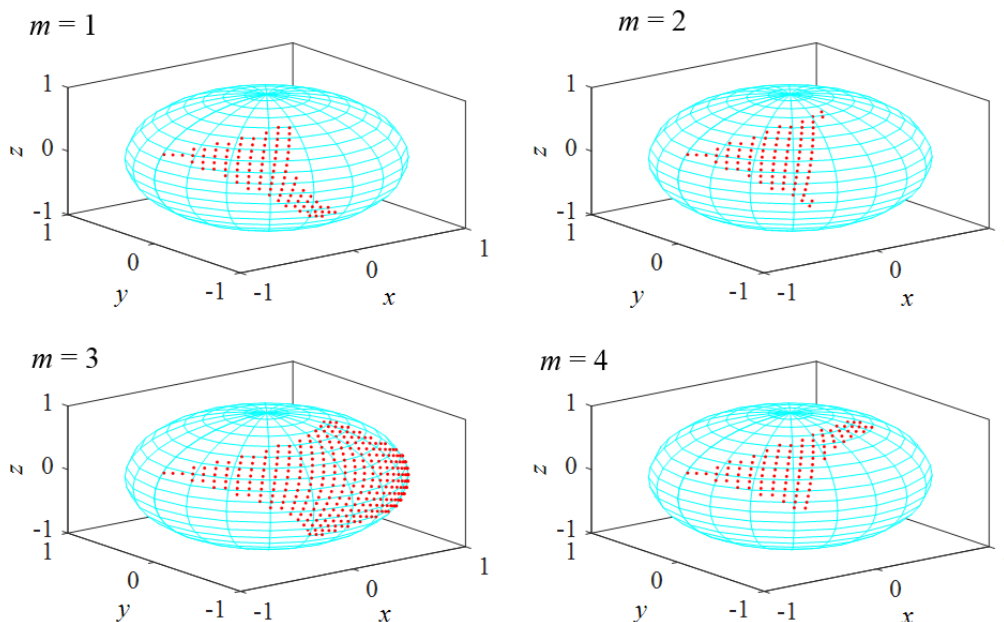


Fig. 10 Different workspaces resulted from different configurations

شکل 10 چهار فضای کاری متفاوت برای ابعاد یکسان بازوها، ولی با جهت‌گیری‌های متفاوت

که در آن روابط (17) برقرار است:

$$\begin{aligned} A_1 &= (\hat{Z}_{r2}, \hat{x}_{ee}), & B_1 &= (\hat{Z}_{r4}, \hat{x}_{ee}) \\ C_1 &= (\hat{Z}_{l2}, \hat{x}_{ee}), & D_1 &= (\hat{Z}_{l4}, \hat{x}_{ee}) \\ A_2 &= (\hat{Z}_{r2}, \hat{y}_{ee}), & B_2 &= (\hat{Z}_{r4}, \hat{y}_{ee}) \\ C_2 &= (\hat{Z}_{l2}, \hat{y}_{ee}), & D_2 &= (\hat{Z}_{l4}, \hat{y}_{ee}) \end{aligned} \quad (17)$$

حال با داشتن $\dot{\theta}_{2l}$ و $\dot{\theta}_{2r}$ بر حسب $\dot{\theta}_{1l}$ می‌توان سرعت زاویه‌ای را بر حسب دو زاویه عملگری با رابطه (18) محاسبه نمود:

$$\begin{aligned} \omega_{ee}^0 &= \omega_{l1}^0 = \hat{Z}_{l2}\dot{\theta}_{1l} + \hat{Z}_{l4}\dot{\theta}_{2l} = \hat{Z}_{l2}\dot{\theta}_{1l} \\ &+ \hat{Z}_{l4} \left(\frac{(A_2B_1 - A_1B_2)\dot{\theta}_{1r} + (C_2B_1 - C_1B_2)\dot{\theta}_{1l}}{B_2D_1 - B_1D_2} \right) \\ &= \left(\hat{Z}_{l4} \frac{A_2B_1 - A_1B_2}{B_2D_1 - B_1D_2} \right) \dot{\theta}_{1r} + \left(\hat{Z}_{l2} + \hat{Z}_{l4} \frac{C_2B_1 - C_1B_2}{B_2D_1 - B_1D_2} \right) \dot{\theta}_{1l} \end{aligned} \quad (18)$$

از آنجا که حرکت خطی ابزار در سرعت زاویه‌ای دستگاه ابزار تأثیری ندارد، می‌توان ژاکوبین سرعت زاویه‌ای را بصورت یک ماتریس 2×2 در نظر گرفت که سرعت‌های عملگری را به دو مولفه اول سرعت زاویه‌ای تصویر می‌نماید.

$$J_{\omega} = \begin{bmatrix} \frac{A_2B_1 - A_1B_2}{B_2D_1 - B_1D_2} \hat{Z}_{l4}(1) & \hat{Z}_{l2}(1) + \frac{C_2B_1 - C_1B_2}{B_2D_1 - B_1D_2} \hat{Z}_{l4}(1) \\ \frac{A_2B_1 - A_1B_2}{B_2D_1 - B_1D_2} \hat{Z}_{l4}(2) & \hat{Z}_{l2}(2) + \frac{C_2B_1 - C_1B_2}{B_2D_1 - B_1D_2} \hat{Z}_{l4}(2) \end{bmatrix} \quad (19)$$

در استخراج ژاکوبین مربوط به سرعت‌های خطی (J_v)، پارامتر d مربوط به حرکت خطی نیز مؤثر خواهد بود. رابطه بین $\dot{\theta}_{2l}$ و $\dot{\theta}_{2r}$ بر حسب $\dot{\theta}_{1l}$ و $\dot{\theta}_{1r}$ از قسمت قبل طبق رابطه (20) محاسبه شد.

$$V_{ee}^0 = \begin{bmatrix} ((S\gamma_1 C\gamma_2 C\theta_{2l} + C\gamma_1 S\gamma_2) \times d)\dot{\theta}_{1l} + (dS\gamma_2)\dot{\theta}_{2l} \\ (-d \times S\gamma_1 S\theta_{2l})\dot{\theta}_{1l} \\ d \end{bmatrix} \quad (20)$$

3-4-1- صحنه‌گذاری بر ژاکوبین

برای اطمینان از صحت محاسبه ماتریس ژاکوبین، از مدل ایجاد شده در سیمولینک استفاده شد. در این روش مدل دقیقی از مکانیزم ربات در سیمولینک ایجاد شد. در مفاصل عملگری ربات، از بلوک حسگر مفصلی استفاده شد. با اعمال یک حرکت سینوسی به هر دو زاویه عملگری می‌توان ربات را به حرکت واداشت. با استفاده از بلوک‌های حسگر جسمی بر روی ابزار می‌توان به راحتی سرعت‌های زاویه‌ای و خطی ابزار را قرائت نمود. از

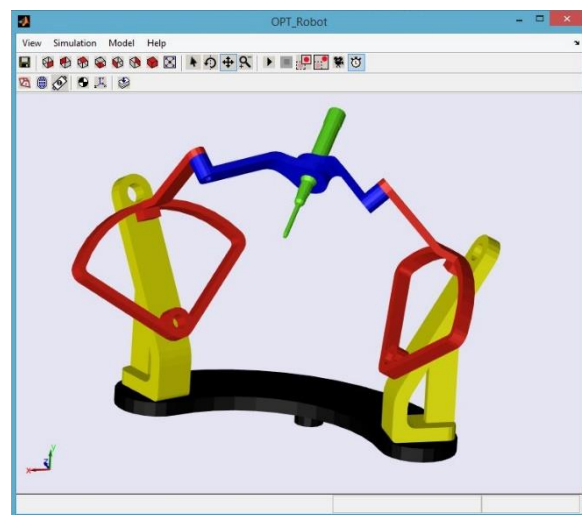


Fig. 11 Motion simulation of end-effector in Simulink environment

شکل 11 مدل سه بعدی برای نمایش حرکت ابزار در محیط سیمولینک

با مشخص بودن R_6^0 ، بردارهای $\hat{x}_{ee}$ و $\hat{y}_{ee}$ از دستگاه ابزار را می‌توان از رابطه (13) محاسبه نمود:

$$R_6^0 = [\hat{x}_{ee} \quad \hat{y}_{ee} \quad \hat{z}_{ee}] \quad (13)$$

با انتقال دوران‌های ربات به دستگاه مبدا ω_{l1}^0 و ω_{r4}^0 را می‌توان با روابط (14, 15) محاسبه نمود:

$$\omega_{r6}^0 = R_{r2}^0 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \dot{\theta}_{1r} + R_{r4}^0 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \dot{\theta}_{2r} \quad (14)$$

$$\omega_{l6}^0 = R_{l2}^0 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \dot{\theta}_{1l} + R_{l4}^0 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \dot{\theta}_{2l} \quad (15)$$

با توجه به روابط فوق می‌توان روابط (16) را نوشت:

$$\begin{cases} \dot{\theta}_{2r} = \frac{(A_2D_1 - A_1D_2)\dot{\theta}_{1r} + (C_2D_1 - C_1D_2)\dot{\theta}_{1l}}{B_1D_2 - B_2D_1} \\ \dot{\theta}_{2l} = \frac{(A_2B_1 - A_1B_2)\dot{\theta}_{1r} + (C_2B_1 - C_1B_2)\dot{\theta}_{1l}}{B_2D_1 - B_1D_2} \end{cases} \quad (16)$$

جزئی هر ربات است. جدول 1 حداکثر گشتاور مورد نیاز، نسبت تبدیل، حداقل گشتاور مورد انتظار از موتور و گشتاور نامی عملکرد انتخاب شده را نمایش می‌دهد. این مقادیر بر اساس تحلیل شبه استاتیکی نیرویی ربات استخراج شده است.

شکل 14 نمونه ساخته شده از مکانیزم سه درجه آزادی فعال را نمایش می‌دهد. بازوها و قطعات از جنس آلومینیوم بوده و برای به دست آوردن دقت لازم در تولید مرکز آنی دوران، بازوها توسط دستگاه CNC چهار محوره تراشیده شده‌اند. سپس قطعات آلومینیومی با انداز سخت، سختی‌کاری سطحی شدند. در قسمت‌های دوار، از شفت‌های استیل و بلبرینگ‌های استاندارد استفاده شده است. دو موتور 400 وات مکانیزم موازی را توسط مکانیزم کابل و پولی به حرکت در می‌آورند. درجه خطی توسط یک ریل و گاری استاندارد ایجاد شده و توسط موتور کوچک به حرکت واداشته می‌شود.

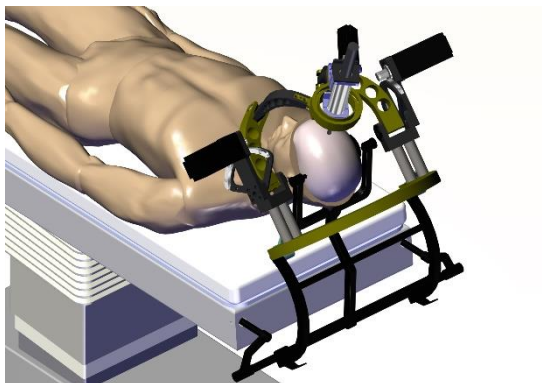
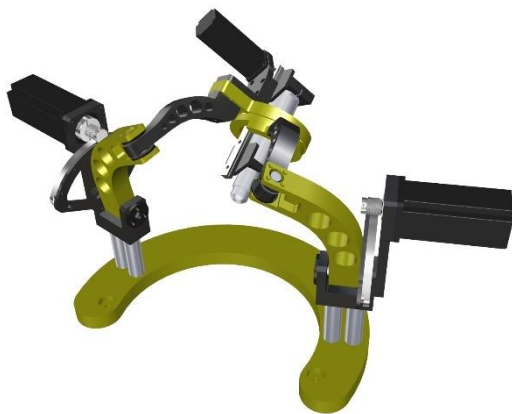
5- راه اندازی

موتورهای انتخاب شده، از نوع سروو متناوب هستند و با استفاده از درایو تامین شده می‌توان در مدهای کاری متنوعی (کنترل موقعیت، کنترل سرعت، کنترل گشتاور) از موتور استفاده نمود. همچنین انکودر داخلی موتور با دقت

جدول 1 گشتاورهای مورد نیاز و انتخاب عملگرها

Table 1 Torque requirements and actuator selection

پارامتر	θ_1 (زاویه عملگری)	r (درجه نفوذ)
حداکثر گشتاور نیروی مورد نیاز	5.26 Nm	22.56 N
نسبت تبدیل	18.8:200	14.8:2000
حداقل گشتاور مورد انتظار در شفت موتور	0.494 Nm	0.167 Nm
موتور انتخاب شده	موتور 400W دلتا (1.27 Nm)	موتور 100W دلتا (0.32 Nm)



طرفی می‌توان با اعمال همین ورودی سینوسی به ماتریس ژاکوبین محاسبه شده، سرعت دورانی و خطی نوک ابزار را محاسبه نمود. مقایسه دو خروجی سرعت می‌تواند صحت ماتریس ژاکوبین را تایید نماید. برای نمونه سرعت زاویه‌ای و خطی نوک ابزار در راستای محور x به ترتیب در شکل‌های 12 و 13 نمایش داده شده است که صحت ماتریس ژاکوبین محاسبه شده را نشان می‌دهد.

3-5- تحلیل تکینگی مکانیزم

برای یافتن نقاط تکینگی از ماتریس ژاکوبین استفاده شد. در نقاط تکینگی مکانیزم دترمینان ماتریس ژاکوبین صفر خواهد شد. محاسبات نشان می‌دهد که زمانی که بازوی دوم یک زنجیره (راست یا چپ) با بازوی اول هم‌راستا شود ($\theta_2 = 0$ یا $\theta_2 = \pm 180$) ربات در وضعیت تکین قرار می‌گیرد. تکینگی دیگر زمانی رخ می‌دهد که بازوی دوم راست و بازوی دوم چپ هم‌راستا گردند. ساختار مکانیکی بازوها و برخورد بازوی اول و دوم، وقوع زاویه $\theta_2 = \pm 180$ برای بازوی دوم را عملاً غیرممکن می‌سازد. تغییر علامت زاویه بازوی دوم (عبور از $\theta_2 = 0$) باعث ورود ربات به یک چیدمان دیگر می‌باشد. خروج از یک چیدمان و ورود به چیدمان دیگر مستلزم عبور از یک نقطه تکینگی است که قابل قبول نمی‌باشد. بنابراین همان‌طور که در بخش فضای کاری مطرح گردید، ربات برای استفاده در تنها یک چیدمان ($m = 3$) بهینه‌سازی و ساخته شده است.

4- طراحی جزئی

انتخاب عملکرد بر اساس حداکثر گشتاور مورد نیاز از مهمترین مراحل طراحی

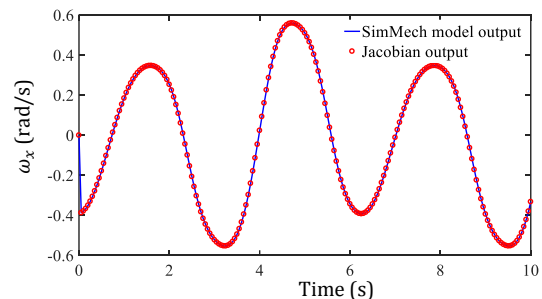


Fig. 12 Angular velocity comparison of Simulink and Jacobian matrix

شکل 12 مقایسه سرعت‌های زاویه‌ای قرائت شده از مدل سیمولینک و محاسبه شده از ماتریس ژاکوبین

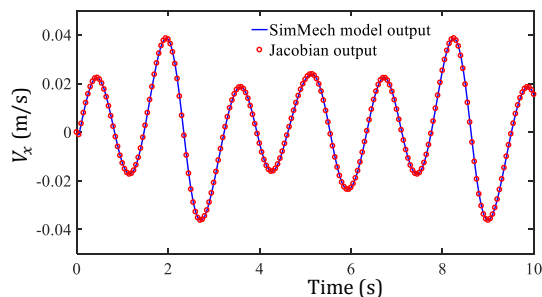


Fig. 13 Linear velocity comparison of Simulink and Jacobian matrix

شکل 13 مقایسه سرعت‌های خطی نوک ابزار قرائت شده از مدل سیمولینک و محاسبه شده از ماتریس ژاکوبین

پس از بررسی روش‌های ارتباطی ممکن، در سیستم حاضر بصورت مشترک از روش اول و سوم استفاده شد. بدین صورت که دستورها و داده‌های اصلی کنترلی که در فرکانس حلقه کنترلی و پایداری آن نقش تعیین کننده دارند، از طریق کارت داده مناسب انتقال یافته و فرامین دیجیتال مربوط به تعیین وضعیت و مودهای کاری ربات برای اطمینان از ارسال آنها توسط ارتباط سریال منتقل می‌گردند. (شکل 15)

سرودرایو انتخاب شده همچنین امکان استفاده از مودهای کنترلی مختلف (کنترل موقعیت، سرعت، گشتاور و همچنین ترکیب آنها) را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. استفاده از این مودهای کنترلی به دلیل زمان نمونه برداری بالای آنها در داخل درایو و همچنین مجهز بودن آنها به ابزارهای مختلفی همچون فیلتر منحنی S، هموارساز فرمان ورودی، فیلتر پایین‌گذر، فیلتر تعلیق نوسانات کم فرکانس و فیلتر تعلیق تشدید کیفیت مطلوبی را ایجاد می‌نماید. در عین حال کاربر امکان تنظیم تمامی ضرایب کنترلی و همچنین پارامترهای سرودرایو را در اختیار دارد.

از آنجا که یکی از مهمترین پارامترهای برش و سوراخکاری استخوان سرعت پیش‌روی ابزار است، مود کاری در نظر گرفته شده مود ترکیبی موقعیت-سرعت است. در این حالت با ایجاد یک مسیر حرکت در فضای مفاصل، ربات در مود موقعیت به نقطه دلخواه هدایت می‌شود. سپس مود کنترلی به کنترل سرعت تغییر یافته و ابزار با سرعت دلخواه پیش‌روی را انجام می‌دهد.

5-2- ایجاد رابط کاربری

ماشین‌های وضعیت یا حلقه‌های مدیریت پیام علاوه بر اینکه ابزارهای قدرتمندی برای پیاده‌سازی الگوریتم‌های تصمیم‌گیری هستند، فرمی کاربردی برای ساختاردهی به نرم‌افزار نیز می‌باشند [16]. هرچه حجم نرم‌افزار افزایش یابد و تعداد ابزارهای استفاده شده بیشتر شود، نیاز به استفاده از ماشین‌های وضعیت بیشتر حس خواهد شد. طراحی صحیح یک ماشین وضعیت مؤثر، نیازمند تهیه نمودار وضعیت مناسب است. شکل 16 نمودار وضعیت‌های مورد نیاز برای کاربرد حاضر را نمایش می‌دهد.

ماشین وضعیت یکی از ساختارهای پایه‌ای در لب و یو است که برنامه‌نویسان برای کاربردهای پیچیده الگوریتم‌های تصمیم‌گیری که در قالب فلوچارت بیان شده‌اند، استفاده می‌کنند. در این حالت برنامه برای هر وضعیت یک یا چند دستور را اجرا می‌نماید. این الگوریتم در جاهایی که وضعیت‌های تفکیک‌پذیر وجود داشته باشند قابل استفاده خواهد بود. هر وضعیت می‌تواند منجر به یک یا چند وضعیت دیگر شود، یا ممکن است پروسه را پایان دهد. یک ماشین وضعیت با توجه به ورودی کاربر یا محاسبات درون یک وضعیت تصمیم می‌گیرد که در مرحله بعد به چه وضعیتی برود.



Fig. 14 Final detail design and prototype of the 3-DoF mechanism

شکل 14 طراحی جزئی و نمونه ساخته شده از مکانیزم سه درجه آزادی فعال

1280000 پالس بردور موقعیت شفت را گزارش می‌کند. برای استفاده از موتورها و پیاده‌سازی الگوریتم‌های کنترلی دلخواه لازم است که یک رابط کاربری برای این سیستم طراحی شود که قابلیت‌های سرودرایو را در اختیار کاربر قرار دهد. با توجه به توانایی‌های بالا در ایجاد ارتباط با انواع سخت‌افزار و همچنین پیاده‌سازی توابع کنترلی با سرعت کافی از نرم‌افزار لب و یو¹ بدین منظور استفاده شده است.

5-1- ارتباط با سرودرایو

ایجاد ارتباط با سرودرایو و ارسال فرامین کنترلی و دریافت داده انکودر از چندین روش ممکن خواهد بود. سرودرایو استفاده شده امکان ارتباط از طریق پروتکل‌های سریال (RS232/RS485)، سیگنال آنالوگ و دیجیتال و همچنین پروتکل کن اوپن² را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. جدول 2 مزایا و معایب هر روش ارتباطی را بیان می‌نماید. سرعت‌های بیان شده برای ایجاد لوپ کنترل موقعیت بصورت خارجی (خواندن انکودر در رایانه و ارسال دستور موقعیت به درایو) برای تنها یک موتور بررسی شده و در صورت استفاده از سخت‌افزار مناسب برای هر سه موتور قابل دسترس است. لازم به ذکر است در جدول 2 مقادیر تجربی سرعت‌ها گزارش شده‌اند و مقادیر تئوری بالاتر خواهند بود. به عنوان مثال سرودرایوهای ASDA-A2 در ارتباط سریال RS-232 حداکثر از سرعت 115200 بیت بر ثانیه پشتیبانی می‌کنند. طولانی‌ترین دستور ارسالی در این ارتباط مربوط به نوشتن 4 بایت داده در حافظه‌های سرودرایو (فرستادن ست پوینت جدید) و خواندن موقعیت انکودر خواهد بود که طول آن با احتساب پاسخ برگشتی از درایو 80 بیت خواهد بود. بنابراین فرکانس تئوری مسیر سریال، 1440 هرتز خواهد بود.

جدول 2 مقایسه روش‌های ممکن برای ارتباط با سرودرایو

Table 2 Comparison of possible connection methods with servos

نوع ارتباط	سرعت (kHz)	تأخیر (μs)	مزایا	معایب
ارتباط سریال (RS232)	0.074	1000	امکان بررسی صحت داده و صحت ارتباط	سرعت پایین - احتمال قطعی
ارتباط آنالوگ (USB DAQ)	0.25	100	استقلال سیگنال‌ها از یکدیگر - راحتی نصب	وجود نویز روی سیگنال
ارتباط آنالوگ (PCI DAQ)	1	0.2	استقلال سیگنال‌ها از یکدیگر - سرعت بالا	وجود نویز روی سیگنال
ارتباط CANOpen	1000	1	مطمئن - ارسال هم‌زمان حجم وسیعی از داده	پر هزینه - راه‌اندازی پیچیده

¹LabVIEW

²CANOpen

کاربرد رایج دیگر ماشین‌های وضعیت کدنویسی رابط‌های کاربری است. در رابط کاربری، اعمال کاربر الگوریتم را به وضعیت‌های مختلف می‌برد. پس از آن، این وضعیت می‌تواند منجر به وضعیت دیگر شود و یا اینکه رابط کاربری منتظر دستور بعدی کاربر باقی بماند. در این نوع کدنویسی، ماشین وضعیت دائما رفتار کاربر را زیر نظر دارد تا در صورت لزوم عکس‌العمل مناسب را انجام دهد. الگوی دیگری که برای طراحی رابط کاربری استفاده می‌شود، حلقه مدیریت پیام¹ است، که نسخه پیشرفته‌تری از ماشین وضعیت است و انعطاف‌پذیری بالاتری را در ازای پیچیدگی بیشتر در اختیار می‌گذارد. حلقه مدیریت پیام ترتیبی یک روش برنامه‌نویسی در لب ویو² است که دستورات و اطلاعات را از چندین مبدا (تولیدکننده) مانند ورودی‌های کاربر و یا از حلقه‌های موازی ارسال می‌کند و آنها را در یک روند ماشین وضعیت (مقصد/مصرف کننده) به همان ترتیبی که به رشته فرامین اضافه شده‌اند اجرا می‌کند. شکل 17 یک کد ساده لب ویو را نمایش می‌دهد که از این الگوریتم استفاده نموده است.

موارد 2 و 4 در شکل 17 تولید کننده‌هایی هستند که دستورات و داده‌ها را به رشته ترتیبی اضافه می‌کنند. یک قانون مهم این است که به ازای هر رشته تنها یک مصرف کننده باید وجود داشته باشد. در حالیکه تولید کننده‌ها می‌توانند متعدد باشند. این قانون تضمین می‌کند که هر دستوری که به رشته اضافه شد حتما اجرا شود.

رشته ترتیبی³ مانند لوله‌ای است که در آن بسته‌هایی که خود شامل یک فرمان (وضعیت) و یک داده‌اند، به ترتیب به آن وارد می‌شوند. این بسته‌ها توسط تولید کننده‌ها در مسیر قرار گرفته و در مصرف کننده از آن خارج می‌شوند. در حلقه اجرای فرامین (تنها مصرف کننده) بسته‌های داخل رشته ترتیبی، به نوبت فراخوانی شده و بنا به وضعیت ثبت شده در بسته، دستورات آن وضعیت اجرا می‌شوند.

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله مراحل طراحی سیستم جراحی رباتیک برای جراحی‌های کریونیومی و کریونیکومی و همچنین صحه‌گذاری بر روابط استخراج شده و

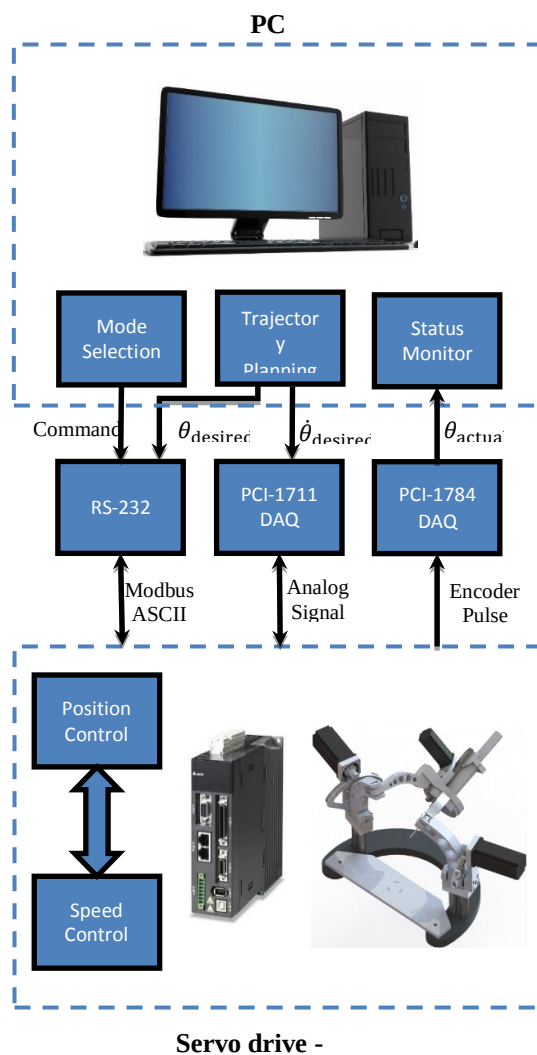


Fig. 15 Motion simulation of end-effector in Simulink environment
شکل 15 مدل سه بعدی برای نمایش حرکت ابزار در محیط سیمولینک

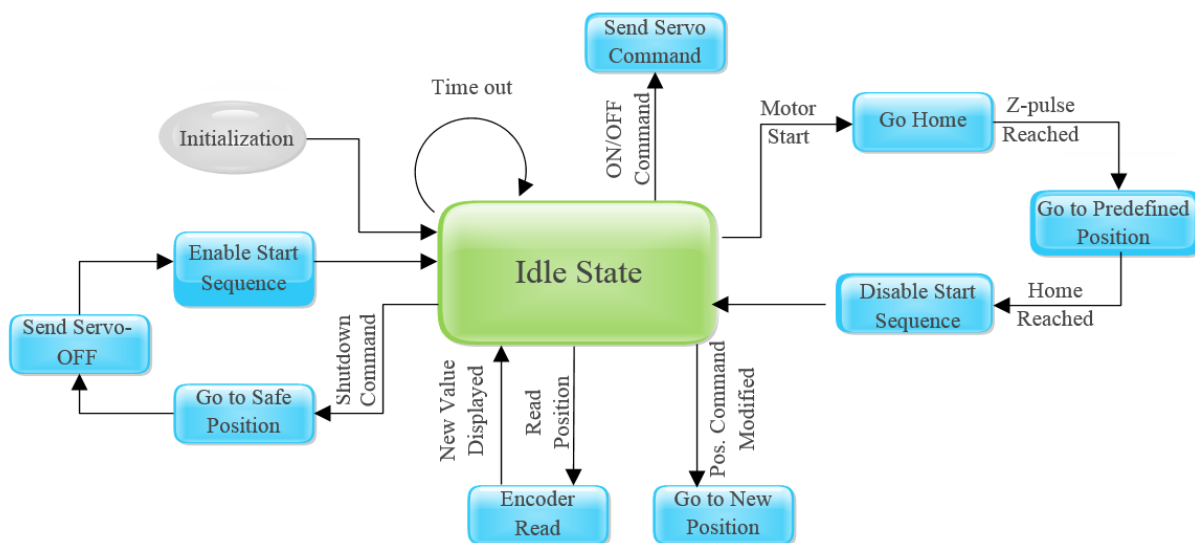


Fig. 16 State diagram used for development of QMH

شکل 16 نمودار وضعیت تهیه شده برای ایجاد حلقه مدیریت سخت‌افزار

¹ Message Handling Loop

² LabVIEW

³ Queued reference

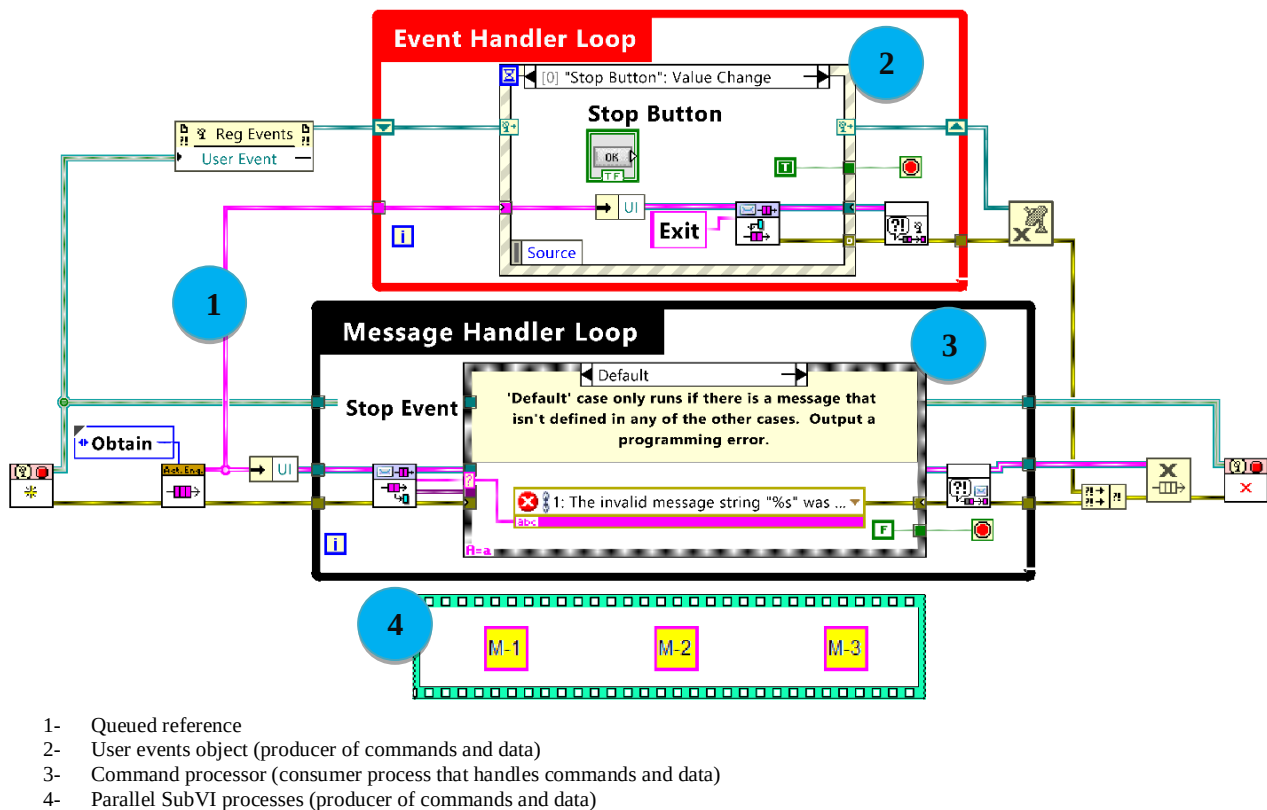


Fig. 17 Schematics of QMH in LabVIEW

شکل 17 ساختار کلی حلقه مدیریت پیام در نرم افزار

- [3] G. Fichtinger, P. Kazanzides, A. M. Okamura, G. D. Hager, L. L. Whitcomb, R. H. Taylor, Surgical and interventional robotics: Part II: Surgical CAD-CAM systems, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 15, No. 3, pp. 94-102, Sep. 2008.
- [4] M. Engelhardt, P. Bast, W. Lauer, V. Rohde, K. Schmieder, K. Rademacher, Manual vs. robotic milling parameters for development of a new robotic system in cranial surgery, *International Congress Series*, Vol. 1268, pp. 533-538, 2004.
- [5] P. Bast, A. Popovic, T. Wu, S. Heger, M. Engelhardt, W. Lauer, K. Rademacher, K. Schmieder, Robot- and computer-assisted craniotomy: resection planning, implant modelling and robot safety, *International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, Vol. 2, No. 2, pp. 168-178, 2006.
- [6] D. Engel, J. Raczowsky, H. Wörm, A safe robot system for craniofacial surgery, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 2020-2024, 2001.
- [7] A. Popovic, M. Engelhardt, T. Wu, F. Portheine, K. Schmieder, K. Rademacher, CRANIO - computer-assisted planning for navigated and robot-assisted surgery on the skull, *International Congress Series*, Vol. 1256, pp. 1269-1275, 2003.
- [8] S. Bai, M. Y. Teo, W. S. Ng, C. Sim, Workspace analysis of a parallel manipulator with one redundant DOF for skull-base surgery, *Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 3, pp. 1694-1699, 2001.
- [9] M. Dehghani, M. Moghaddam, Analysis and optimization of a parallel RCM mechanism of a surgical robot for craniotomy surgery, *Industrial Robot: An International Journal*, under publication, 2017.
- [10] Size of a Human Skull, Tech-FAQ, Accessed on 8 January 2015; <http://www.dimensionsinfo.com/size-of-a-human-skull>.
- [11] A. F. Roche, D. Mukherjee, S. M. Guo, W. M. Moore, Head circumference reference data: birth to 18 years, *Pediatrics*, Vol. 79, No. 5, pp. 706-712, 1987.
- [12] J. B. Bevitt, D. F. Moore, J. Q. Norwood, L. B. Rosenberg, M. D. Levin, Method and apparatus for providing an interface mechanism for a computer simulation, *US Patent No. 7249951*, 2007.

در نهایت ساخت و راه اندازی سیستم گزارش شده است. استفاده از مکانیزم کروی باعث می شود که ابزار همواره به مرکز آنی دوران اشاره نماید. با قرار دادن مرکز آنی دوران بر روی مرکز دایره محیطی حجمه، می توان بدون تلاش کنترلی ابزار را همواره عمود بر سطح حجمه نگه داشت، که از اصلی ترین نیازهای این جراحی است. به دلیل انحراف حجمه از یک کره کامل، در بعضی از نقاط ممکن است ابزار تا 20 درجه از راستای عمود فاصله بگیرد، که این مقدار مورد قبول جراحان قرار گرفت.

در مرحله بعد روابط سینماتیک حاکم ارائه و نحوه صحه گذاری بر آنها ارائه شده است. از این روابط برای بهینه سازی پارامترهای ربات استفاده شده است. پس از ساخت نمونه جهت پیاده سازی الگوریتم های کنترلی رابط کاربری مناسبی در نرم افزار لب ویو طراحی شد که تمامی امکانات ارائه شده توسط سروودرایو دلتا را در اختیار کاربر قرار می دهد. در ارتباط با سروودرایو از پروتکل مودباس و ارتباط سریال و همچنین کارت داده مناسب استفاده شده که فرکانس کاری مؤثر هزار هرتز را در اختیار کاربر می گذارد. در کدنویسی رابط کاربری و کتابخانه نرم افزاری نیز از روش حلقه مدیریت پیام ترتیبی استفاده شده که از هرگونه تداخل یا خطا در اجرای دستورات جلوگیری می نماید. در ادامه از کتابخانه و رابط کاربری تهیه شده جهت انجام تست های استاندارد و الگوریتم های کنترلی استفاده خواهد شد.

7- مراجع

- [1] T. S. Lendvay, B. Hannaford, R. M. Satava, Future of robotic surgery, *Cancer Journal*, Vol. 19, No. 2, pp. 109-119, 2013.
- [2] R. A. Beasley, Medical robots: current systems and research directions, *Journal of Robotics*, Vol. 2012, pp. 1-14, 2012.

- kinematic analysis of a kind of 3-DOF translational parallel manipulator, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 7, pp. 327–334, 2016. (in Persian)
- [16] A. Lukindo, LabVIEW queued state machine architecture, LabVIEW and Visual Object-Oriented Programming Blog Community, 2007.
- [13] M. W. Spong, S. Hutchinson, M. Vidyasagar, *Robot Modeling and Control*, Vol. 3, pp. 70-73, New York: Wiley, 2006.
- [14] B. Siciliano, O. Khatib, *Springer Handbook of Robotics. Sensors* Peterborough NH, Springer, pp. 342-348, 2008.
- [15] M. Mazare, M. Taghizadeh, M. R. Najafi, Design, manufacturing and