



بهینه‌سازی ابعاد و طراحی مسیر یک ربات جراح

آنیثا اسلامی خطبه سرا¹، بهنام میری پورفرد^{2*}

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکاترونیک، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر
2- استادیار، مهندسی رباتیک، دانشگاه صنعتی همدان، همدان
* همدان، صندوق پستی 65155-579، bmf@hut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 17 بهمن 1393
پذیرش: 14 اسفند 1393
ارائه در سایت: 15 فروردین 1394
کلید واژگان:
جراحی رباتیک
مهارت بازوی رباتیکی
طراحی مسیر
بهینه سازی

چکیده

در این مقاله، هدف ارائه روندی است که بتوان با استفاده از آن معیار مهارت را در طراحی بهینه ابعاد و مسیر یک ربات جراح لاپاراسکوپی به کار بست. این معیار وابسته به پیکربندی بازوی رباتیک است و برای محاسبه آن در هر نقطه از فضای کاری، نیاز به حل معادلات سینماتیک مستقیم و وارون و همچنین استخراج ماتریس ژاکوبین است. در مقاله حاضر، با استفاده از روش مونت کارلو، مهارت ربات در کل فضای کاری محاسبه شده است. برای یافتن طول بهینه رابطهای ربات به منظور بیشینه شدن مهارت در جراحی، یک مسأله بهینه‌سازی غیرخطی و مقید فرمول بندی شده و با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل شده است. سپس، با داشتن ابعاد بهینه ربات که منجر به بیشینه شدن مهارت آن در فضای کاری می‌شود، مسأله طراحی بهینه مسیر در فضای دکارتی حل شده است. در این حالت، مهارت ربات و خطای ردیابی مسیر بعنوان توابع هزینه بهینه سازی در نظر گرفته شده است. رویکرد ذکر شده بر روی یک بازوی ربات جراح با چهار درجه آزادی پیاده‌سازی شده و نتایج شبیه سازی که نشان دهنده کارآمدی روش است، نشان داده شده است.

Optimization of dimension and optimal path planning of a Surgical Robot

Anita Eslami Khotbesara¹, Behnam Miripour Fard^{2*}

1- Department of Robotics Engineering, Islamic Azad University, Ahar, Iran.
2- Department of Robotics Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran.
* P.O.B. 579 - 65155, Hamedan, Iran, bmf@hut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 06 February 2015
Accepted 03 March 2015
Available Online 04 April 2015

Keywords:
Robotic Surgery
Manipulability Index
Path Planning
Optimization

ABSTRACT

The main purpose of this paper is to use the concept of manipulability index for finding the optimal link lengths of a surgical robot and then to plan an optimal path for it. This index depends on the configuration of the robot. In each configuration, the manipulability of the robot is calculated thorough the Forward and Inverse Kinematic and Jacobain. In the present paper, a nonlinear constrained optimization problem is formulated based on this index to find the optimum link lengths. The optimization problem is solved using Genetics Algorithm for entire work space of the robot. The manipulability index is calculated all over the workspace using the Monte-Carlo method. Afterward, using this set of optimal link lengths, the optimal path planning is presented in the Cartesian work space. This optimization is done by considering the manipulability criteria while the tracking error is minimized minimized during the performance of an operation. The suggested procedure is implemented on a four degree of freedom robot manipulator. Several simulation scenarios are presented to demonstrate the capability of the procedure. The simulation results show the efficiency of the method.

1- مقدمه

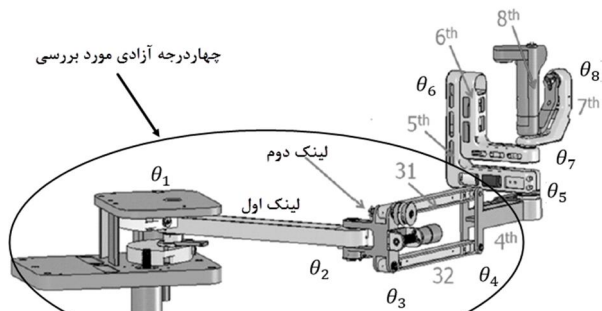
در سال 1997 فراز و پاینده [1] به مطالعه و طراحی بهینه برای ایستادن و تعیین موقعیت ربات پرداختند. در سال 2003 روشی برای بهینه سازی مسیر برای ربات جراح کمتر تهاجمی ارائه شد که نقش مهمی برای از بین بردن محدودیت‌ها در بسیاری از تخصص‌ها با افزایش دقت و مهارت داشت [2]. در سال 2006 محققان یک الگوی حرکتی مناسب برای بهبود مهارت ربات‌های دستیار جراح ارائه نمودند [3]. ویژگی اصلی این الگو، تقلید از حرکت‌های انسان برای هدایت دقیق دوربین لاپاروسکوپی به مکان مورد جراحی بیمار می‌باشد. در همان سال در مرجع [4] یک الگوی بهینه سازی مکانیزم برای ربات جراح حداقل تهاجمی در دانشگاه واشنگتن ارائه شد. محدودیت‌های محوری در سیستم‌های دارای چند سنسور اینرسی باعث

امروزه کاربرد رباتیک در پزشکی به شدت رو به افزایش است. ربات‌ها برای نمونه برداری و تزریق استفاده می‌شوند، برای جراحی از راه دور به کار می‌روند و در جراحی لاپاروسکوپی بعنوان جراح و دستیار جراح استفاده می‌شوند. برای انجام این نوع جراحی نیاز به رباتی است که در طول عمل جراحی به خوبی و با مهارت کافی کار کند و نیز بتواند عملیات برش را به خوبی و با بیشترین مهارت انجام دهد. انجام عملیات برش نیازمند به یک طراحی مسیر برای عملگر نهایی است. معمولاً در طراحی مسیر یک معیار بهینگی بایستی برآورده شود. این معیار در پژوهش‌های گوناگون با دیدگاه‌های متفاوت بررسی شده است.

Please cite this article using:

A. Eslami Khotbesara, B. Miripour Fard, Optimization of dimension and optimal path planning of a Surgical Robot, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 5, pp. 302-308, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:



شکل 1- نمایی از ربات مورد بررسی [9]

آورد.

2-2- مفهوم مهارت ربات و نحوه محاسبه آن

2-2-1- قابل اداره بودن

این مفهوم برای نخستین بار در [11] مطرح شد و مؤلفان همان مرجع به این موضوع پرداخته و آن را گسترش دادند. منظور از قابل اداره بودن توانایی ایجاد تغییر در عملگر نهایی ربات - از نظر مکان یا جهت - بدون تغییر مقادیر مفاصل و در حقیقت در یک پیکربندی ثابت است. این توانایی از دیدگاه دینامیکی یا سینماتیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بیضی‌گون زیر را در فضای متغیرهای مفصلی بصورت رابطه (1) در نظر بگیرید:

$$\sqrt{\dot{q}_1^2(t) + \dot{q}_2^2(t) + \dots + \dot{q}_n^2(t)} \leq 1 \quad (1)$$

محدود در نظر گرفتن سرعت‌ها (توجه داریم که وقتی درون بیضی‌گون هستیم تمامی سرعت‌ها باید کمتر از واحد باشد) بدین خاطر است که معیاری برای مقایسه فراهم شود. با توجه به این مفهوم سرعت حرکت عملگر نهایی در این بیضی‌گون در جهتی بیشینه است که در راستای قطر بزرگ بیضی‌گون باشد. برای کمتی کردن این راستا از مفهوم مقدار ویژه و بردار ویژه استفاده می‌شود. می‌دانیم که فضای مفاصل و فضای کارترین که همان فضای کاری است با ماتریس ژاکوبین به هم مرتبط می‌شوند. قطر بزرگ بیضی‌گون در حقیقت با مقدار ویژه λ رابطه دارد و می‌دانیم که دترمینان یک ماتریس حاصلضرب مقادیر ویژه آن است. بدین ترتیب در حالت سینماتیکی یعنی وقتی با مفهوم نیرو، شتاب یا سرعت سر و کار نداریم معیار مهارت در [11] بصورت روابط (2) و (3) تعریف شده است:

بدون افزونگی:

$$\omega = |\det(J)| \quad (2)$$

با افزونگی:

$$\omega = \sqrt{\det(J^T J)} \quad (3)$$

هر چه مؤلفه‌های ماتریس ژاکوبین یک ربات بزرگتر باشد، تغییرات اندک سرعت‌های مفصلی هم تأثیر زیادی بر روی سرعت مجری نهایی خواهد داشت [11]. برای این که این معیار ماتریسی عددی (اسکالر) شود از دترمینان آن استفاده می‌گردد. چون دترمینان تنها برای ماتریس مربعی تعریف شده است. این بدان معناست که تعداد درجات آزادی ربات 6 نیست. برای دسترسی کامل به فضای سه بعدی نیاز به 6 درجه آزادی است. چون اصولاً یک بازویی که در فضای سه بعدی کار می‌کند باید به آن فضا کاملاً دسترسی داشته باشد، برای سادگی عبور از موانع درجات را بیش از 6 قرار می‌دهند. این حالت افزونگی نامیده می‌شود. در حالت افزونگی چون ماتریس ژاکوبین مربعی

پیدایش ایده‌ای برای بهینه سازی کنترل کروی بر روی بازو شده است. در سال 2009 روشی در طراحی و ساخت یک ابزار جراحی انعطاف پذیر رباتیک جهت افزایش سهولت دستیابی جراح به محل جراحی در روش لاپاروسکوپی ارائه داده شد [5]. در سال 2011 یک مطالعه آزمایشی به منظور نشان دادن تأثیر شبیه سازی طراحی ربات جراح، با استفاده از بازوی ربات ارائه شد [6]. در سال 2012 محققان به بررسی و تحلیل بهینه سازی مسیر حرکت و الگوریتم‌های راهنمایی برای آموزش جراحی با حداقل تهاجم در دانشگاه آریزونا پرداختند [7] که موضوعش به طور خاص تحقق پیاده سازی ناوبری مسیر مطلوب برای وسایل جراحی در آزمایشات به روش لاپاروسکوپی بود. در سال 2013 در مرجع [8] تأثیر حرکت اپراتور بر سینماتیک ربات دستیار جراح در دانشگاه استنفورد مورد بررسی قرار گرفت. اگر چه ربات دستیار جراح هنوز با پتانسیل کامل مورد استفاده قرار نگرفته است و دلیل آن بهینه سازی آموزش جراحان برای استفاده از این سیستم‌ها می‌باشد.

مطالعه پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که با وجود نیاز وسیع صنعت پزشکی به توسعه ربات‌های ماهر برای اعمال جراحی، هنوز هم این زمینه به بلوغ نرسیده است و نیازمند توجه بیشتر پژوهشگران می‌باشد. در این مقاله، ابتدا طول لینک‌های ربات را به گونه‌ای بدست می‌آوریم که مهارت ربات هنگام کار در فضای کاری، به طور میانگین بیشترین میزان را داشته باشد. بدین منظور، مهارت میانگین را به صورت یک تابع هدف در نظر گرفته و سعی در بیشینه نمودن آن خواهیم نمود. در قسمت طراحی مسیر، حرکت ربات به گونه‌ای طراحی می‌شود که یک مسیر مطلوب را در فضای سه بعدی با بیشترین مهارت طی نماید. بالا بودن مهارت باعث می‌شود که قابلیت مانور و استفاده از ابزار در ربات بالا باشد و بنابراین بتواند با چالاک عمل مورد نظر را انجام نماید. ضمناً انحراف مسیر طی شده از مسیر مطلوب بعنوان تابع هدف دوم در نظر گرفته می‌شود.

2- شرح مسأله

2-1- ربات مورد بررسی

ربات مورد بررسی یک ربات جراح با 8 درجه آزادی است. این ربات در مراجع [9، 10] معرفی و مطالعه شده‌است. چهار درجه آزادی آخر ربات مربوط به میچ و ابزار متصل به آن بوده و در پژوهش حاضر مورد بررسی قرار نمی‌گیرد. همچنین طراح نیز نمی‌تواند دخل و تصرف چندانی در آن داشته باشد، چراکه آن قسمت با توجه به اهداف جراحی و قابلیت‌های مورد انتظار در آن زمینه طراحی می‌شود. در حقیقت پایه ربات در نظر گرفته شده است و هدف آن است که این پایه به صورت بهینه طراحی شود. ربات مورد بررسی در شکل 1 نشان داده شده است. رابط اول و دوم ربات به صورت سریال و درجات آزادی مربوط به آن‌ها دورانی می‌باشند (θ_1, θ_2) . رابط سوم بصورت حلقه‌ای می‌باشد که اجزای آن با برچسب 31 و 32 در شکل 1 نشان داده شده است. درجه آزادی مربوط به رابط سوم از نوع دورانی می‌باشد (θ_3) . رابط چهارم از نوع سریالی است و درجه آزادی آن دورانی می‌باشد (θ_4) . در این ربات، مفاصل 3 و 4 به نحوی طراحی شده‌اند که خلاف همدیگر حرکت می‌کنند: یعنی $\theta_4 = -\theta_3$. بنابراین با توجه به شکل 1 متغیرهای مفصلی عبارتند از: $[\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4]$.

برای معرفی مهارت بعنوان ابزار مفیدی برای طراحی مسیر و ابعاد ربات، لازم است که سینماتیک مستقیم و معکوس ربات و نیز ژاکوبین را به دست

نیست به جای ماتریس ژاکوبین، ماتریس JJ^T را در نظر می‌گیرند.

2-2-2- چالاکي¹

چالاکي در [11] بصورت رابطه (4) تعريف شده است:

$$\kappa = \|J\| \|J^{-1}\| \tag{4}$$

با توجه به مقادير هنكل مي‌توان معيار زير (رابطه (5)) را بصورت جايگزين به كار برد:

$$\kappa = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \tag{5}$$

در رابطه (5)، $\sigma_{\min}, \sigma_{\max}$ به ترتيب مقادير ويژه بشيشينه و كمينه هنكل ماتريس J است. بنا بر اين اين معيار هميشه كمتر از يك است. هرچه اين معيار به يك نزديك تر باشد بدان معناست كه ماتريس ژاكوبين بطور يكتواخت تري در فضا مؤلفه دارد.

2-2-3- ناحيه بيضي گون

با توجه به [11] مي‌توان بيضي گون نيرو را نيز بصورت رابطه (6) تعريف كرد. يعني فضايي كه در آن نيروي وارده از جانب عملگر نهايي (F) در تمام جهات كمتر از يك است.

$$F^T J^T J F \leq 1 \tag{6}$$

مجدداً، با توجه به مقادير ويژه هنكل رابطه (7) بصورت جايگزين تعريف مي‌شود:

$$K_e = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \tag{7}$$

در مورد نيرو به ترتيب مقادير ويژه بشيشينه و كمينه هنكل ماتريس JJ^T است. مفهوم اين كميت با توجه به اينكه اين معيار در بيشترين حالت برابر 1 است، آن است كه عملگر نهايي ربات بتواند در تمام جهات به طور يكسان نيرو وارد كند.

تابع مهارت كلي تركيبی خطی از توابع مهارت تعريف شده در بالا است و از آن جا كه همه معيارهاي مهارت به نحوی تابعی از ژاكوبين ربات است، با داشتن ژاكوبين، تابع مهارت قابل محاسبه خواهد بود.

2-3-3- معيارها در محدوده كاري

توابع مهارت تعريف شده در بالا، همه، معيار مورد نظر را در يكي از نقاط كاري ربات حساب مي‌كنند. با توجه به آن كه تمامی معيارهاي مطرح به ماتريس‌هايي ربط دارد كه تابعی از پيكربندی ربات هستند، بنا بر اين اين معيارها در پيكربندی‌هاي مختلف متفاوت خواهد بود. برای این كه بطور ميانگين تمام نقاط در نظر گرفته شوند بايستي روی تمام محدوده كاري ربات اين معيارها در نظر گرفته شوند. اين مهم با استفاده از انتگرال گيري ميسر مي‌شود. بعنوان مثال برای اداره پذيری روابط (8) و (9) را خواهيم داشت:

$$V = \int_V dv \tag{8}$$

اداره پذيری سینماتيکی مجموع:

$$KM = \int_V \omega dv \tag{9}$$

بايد توجه داشت كه انتگرال‌هاي معادلات (8) و (9) بر روی كل حجم فضای كاري (V) محاسبه می‌شوند و dV المان حجمی از فضای كاري ربات است. برای بیضي گون نیرویی رابطه (10) را خواهيم داشت:

$$FE = \frac{\int_V \kappa_e dv}{\int_V dv} \tag{10}$$

برای ديگر كميت‌ها نيز همين روند وجود دارد. اما در نظر گرفتن همه نقاط محدوده كاري كاري مشكل است و انتگرال گيري روی تمام نقاط ممكن نيست. بنا بر اين از روش مونت كارلو استفاده مي‌شود.

2-4- روش مونت كارلو

مونت كارلو يك راه حل ساده عددي است برای حل مسائلي كه روابط اشياء با اشياء يا محيطشان را مدل مي‌كند، بر اساس روابط ساده شئي- شئي يا شئي- محيطی [12]. روش مونت كارلو اساساً رويكرد ساده‌اي دارد؛ قابل درك ساختن يك سيستم ماكروسكوپی از طريق شبیه‌سازی اندركنش‌هاي ميكروسكوپی‌اش [12]. مهم‌ترين مرحله اجرائی این روش توليد اعداد تصادفی است. توليد اعداد تصادفی دو شرط لازم دارند: ارقام مختلف برای آمدن، احتمال يكسان داشته باشند، و كاملاً از هم مستقل باشند.

بعنوان مثالی برای كار كرد روش مونت كارلو در محاسبه انتگرال مي‌توان به اندازه گيري عدد π با استفاده از پرتاب دارت به سمت يك دايره به قطر 1 درون يك مربع به طول 1 اشاره كرد كه در حقيقت انتگرال سطحی را حساب مي‌كند. شكل 2 را در نظر بگيريد. احتمال اينكه يك نقطه تصادفی‌اي كه داخل مربع واحد قرار دارد، داخل دايره هم قرار گيرد، برابر با مساحت دايره است. بنا بر اين مي‌توان تعدادی نقطه تصادفی داخل مربع ايجاد كرد و تعداد آن‌هايي كه داخل دايره قرار گرفته‌اند را محاسبه نمود. مساحت دايره برابر نسبت اين تعداد به تعداد كل نقاط مي‌باشد. برای كسب اطلاعات بيشتر راجع به روش مونت كارلو و كاربردهای آن، خواننده مي‌تواند به مرجع [12] مراجعه نمايد.

در اين مقاله كاربرد اين روش بدین صورت است كه به صورت تصادفی تعدادی نقطه در يك نيمكره شامل فضای كاري ربات پخش مي‌كنيم. سپس برای تك تك اين نقاط مشخص مي‌كنيم كه با توجه به سينماتيک معكوس آیا اين نقاط در فضای كاري ربات هستند يا خير. بدین ترتيب حجم فضای كاري به صورت $V = \frac{2}{3} \pi R^3 \frac{n_{in}}{n}$ خواهد بود كه n تعداد كل نقاط در نظر گرفته شده و n_{in} نقاط داخل فضای كاري است. بنا بر اين معيارهاي مهارت بصورت روابط (11) و (12) حساب مي‌شوند:

$$KM = \frac{2}{3} \pi R^3 \frac{n_{in}}{n} \sum_i \omega_i \tag{11}$$

یا:

$$K_e = \frac{2}{3} \pi R^3 \frac{n_{in}}{n} \sum_i \kappa_{ei} \tag{12}$$

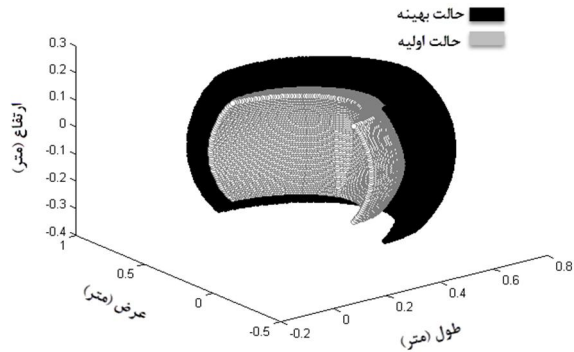
معيارها بصورت عددي قابل محاسبه خواهند بود. حال، سوال آن است كه فضای شامل فضای كاري ربات را چگونه بياييم؟ بدین منظور مانند روند ارائه شده در مقاله [9] نيمكره‌اي محدود به سطح زمين (سطح صفر) و شعاع $R = L_1 + L_2 + L_3$ را در نظر مي‌گيريم. واضح است اين فضا تمام فضای كاري ربات را شامل مي‌شود.

برای این كه تمامی معيارهاي بالا تا حدودی ارضا شوند بايد تركيبی از آن‌ها را در نظر بگيريم. اين تركيب مثلاً مي‌تواند تركيب خطی‌اي از آن‌ها (مجموع مضرب‌هاي از آن‌ها) باشد. از آن جا كه يكي ديگر از معيارهاي عملكرد ربات، حجم فضای كاري قابل دسترسي مي‌باشد، در تركيب معيارها، اين پارامتر نيز دخيل مي‌شود.

ضمناً يك نوع نرمال‌سازی نيز بايد روی معيارها انجام شود تا بدون واحد شده و قابل جمع باشند. بدین منظور يك حالت بيشنه و يك حالت كمينه

جدول 2 مقادیر تابع مهارت در حالت‌های مختلف

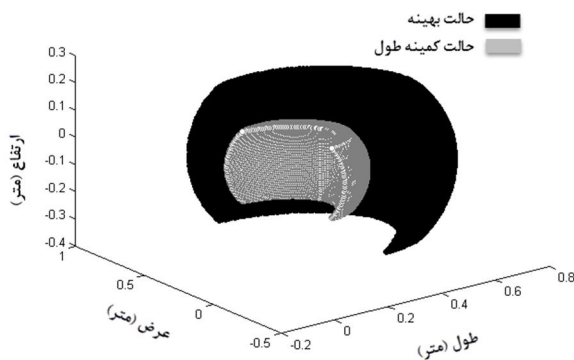
تابع مهارت	طول لینک‌ها
5976	حالت اولیه
19953	بیشینه طول
3196	کمینه طول
31741	بهینه



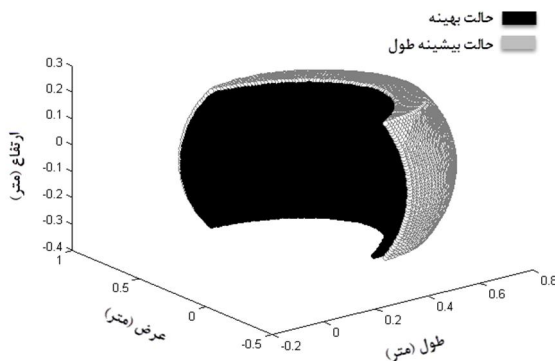
شکل 3 مقایسه فضای کاری در حالت اولیه و بهینه

می‌گیرد قیاس بین فضای کاری حالت بهینه و حالت کمینه طول‌ها در شکل 4 انجام شده است که به وضوح برتری استفاده از طول‌های بهینه را نشان می‌دهد.

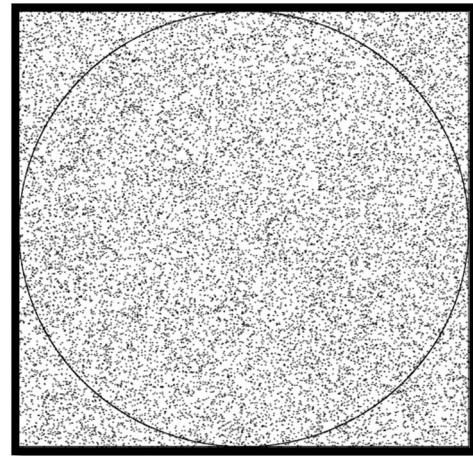
مقایسه بین فضای کاری حالت بیشینه طول‌ها و حالت بهینه در شکل 5 انجام شده است.



شکل 4 مقایسه فضای کاری در حالت کمینه طول و بهینه



شکل 5 مقایسه فضای کاری در حالت بیشینه طول و بهینه



شکل 2 کاربردی از روش مونت کارلو

برای هر معیار در نظر می‌گیریم. برای مثال برای معیار نوعی Λ رابطه (13) را تعریف می‌کنیم:

$$\hat{\Lambda} = \frac{\Lambda - \Lambda_{\min}}{\Lambda_{\max}} \quad (13)$$

که $\Lambda_{\max}, \Lambda_{\min}$ مهارت مورد نظر به ترتیب متناظر با طول کمینه و بیشینه هستند.

3- بهینه‌سازی طول لینک‌های ربات

در این قسمت با توجه به مطالب گفته شده، از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود تا معیار مهارت ترکیبی در محدوده کاری را بیشینه نماییم. برای شبیه‌سازی و ایجاد زمینه مقایسه نتایج، مقادیر جدول 1 را برای پارامترهای طول لینک‌ها در نظر گرفته‌ایم.

لازم به ذکر است که در بهینه‌سازی قیود حداقل و حداکثر طول نیز در نظر گرفته شده‌اند. شبیه‌سازی انجام شده است و مقدار نهایی تابع مهارت برابر با $1741/3 \times 10^4$ بدست می‌آید و طول‌های بهینه نیز بصورت رابطه (14) خواهد بود:

$$\begin{aligned} L_{1,best} &= 0.2675 \\ L_{2,best} &= 0.0977 \\ L_{3,best} &= 0.3463 \end{aligned} \quad (14)$$

برای مقایسه حالت‌های حدی (کمینه و بیشینه طول لینک‌ها) و نیز حالت اولیه در نظر گرفته شده (که در حقیقت تقریباً برابر میانگین حالت‌های حدی است) را در نظر می‌گیریم. برای این حالت‌ها مقدار تابع مهارت در جدول 2 آمده است. مشاهده می‌شود که طبق انتظار تابع مهارت در نقطه پیشنهاد شده بالاترین مقدار را دارد. بعنوان یک معیار تصویری، فضای کاری را در حالت اولیه و حالت بهینه در شکل 3 مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که این فضا برای حالت بهینه گستره بیشتری را در بر

جدول 1 مقادیر در نظر گرفته شده برای طول لینک‌های ربات

پارامتر	طول
مقدار اولیه برای L_1	20 سانتیمتر
مقدار اولیه برای L_2	7 سانتیمتر
مقدار اولیه برای L_3	25 سانتیمتر
محدوده مجاز برای L_1	15 تا 30 سانتیمتر
محدوده مجاز برای L_2	5 تا 10 سانتیمتر
محدوده مجاز برای L_3	18 تا 36 سانتیمتر

کنند. اما می‌دانیم که یک خم درجه 3 دارای 4 ضریب است و بنابراین پس از برآورده کردن قیود، همه ضرایب محاسبه می‌شوند و دیگر پارامتری برای بهینه‌سازی نمی‌ماند. برای حل این مشکل فائق از روشی مرسوم در طراحی مسیر یعنی در نظر گرفتن نقطه میانی استفاده می‌شود. یعنی خم را به صورت دو تکه‌ای در نظر می‌گیرند. بدین ترتیب 8 پارامتر وجود خواهد داشت. اما توجه داریم که به تعداد قیود نیز افزوده می‌شود. چراکه در نقطه انصال، نباید خم در سطح مکان یا سرعت ناپیوستگی داشته باشد. یعنی سرعت و مکان ربات قبل و بعد از انصال باید باهم برابر باشند. با اضافه شدن این دو قید، در مجموع دو پارامتر آزاد داریم که با آن‌ها بهینه‌سازی را انجام خواهیم داد.

3-4- پارامتریزه کردن خم و به دست آوردن قیود پارامتری

پارامتری کردن مسیر بدین صورت است که مسیر را به صورت ترکیبی از دو تابع درجه 3 از زمان بصورت رابطه (15) در نظر می‌گیریم:

$$\begin{cases} q_i(t) = a_i t^3 + b_i t^2 + c_i t + d_i, 0 \leq t < \frac{T_f}{2} \\ q_i(t) = e_i t^3 + f_i t^2 + g_i t + h_i, \frac{T_f}{2} \leq t < T_f \end{cases} \quad (15)$$

قیود فیزیکی به زبان پارامترها بصورت روابط (16) تا (21) توصیف می‌شوند:

قید 1: مکان ابتدایی:

$$q_i(0) = q_{i,0} \Rightarrow d_i = q_{i,0} \quad (16)$$

قید دوم: سرعت ابتدایی:

$$\dot{q}_i(0) = \dot{q}_{i,0} \Rightarrow c_i = 0 \quad (17)$$

قید سوم: مکان نهایی:

$$q_i(T_f) = q_{i,f} \Rightarrow e_i T_f^3 + f_i T_f^2 + g_i T_f + h_i = q_{i,f} \quad (18)$$

قید چهارم: سرعت نهایی:

$$\dot{q}_i(T_f) = 0 \Rightarrow 3e_i T_f^2 + 2f_i T_f + g_i = 0 \quad (19)$$

قید پنجم: پیوستگی مکان:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \frac{T_f}{2}^-} q_i(t) &= \lim_{t \rightarrow \frac{T_f}{2}^+} q_i(t) \\ \Rightarrow a_i \left(\frac{T_f}{2}\right)^3 + b_i \left(\frac{T_f}{2}\right)^2 + c_i \frac{T_f}{2} + d_i &= e_i \left(\frac{T_f}{2}\right)^3 + f_i \left(\frac{T_f}{2}\right)^2 + g_i \frac{T_f}{2} + h_i \end{aligned} \quad (20)$$

قید ششم: پیوستگی سرعت:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \frac{T_f}{2}^-} \dot{q}_i(t) &= \lim_{t \rightarrow \frac{T_f}{2}^+} \dot{q}_i(t) \\ \Rightarrow 3a_i \left(\frac{T_f}{2}\right)^2 + 2b_i \left(\frac{T_f}{2}\right) + c_i &= 3e_i \left(\frac{T_f}{2}\right)^2 + 2f_i \left(\frac{T_f}{2}\right) + g_i \end{aligned} \quad (21)$$

مشاهده می‌شود که مقادیر d_i, c_i به طور مستقیم قابل محاسبه هستند و بقیه قیود منجر به معادلاتی می‌شود که نسبت به پارامترها خطی بوده و بنابراین پارامترها به سادگی با حل یک تساوی خطی ماتریسی قابل حصول هستند. یعنی با توجه به مشخص بودن d_i, c_i ، اگر a_i, b_i مشخص باشند، همه پارامترها به دست می‌آیند. پس a_i, b_i متغیرهای بهینه‌سازی می‌باشند و قیود بر اساس آن‌ها حساب می‌شوند.

4-4- تابع هزینه

قسمت نخست تابع هزینه انتگرال قرینه تابع مهارت روی مسیر طی شده

مقایسه نتایج با مقادیر بهینه مرجع [9]، که در شکل های 4 و 5 انجام شد، نشان دهنده انطباق نتایج برهم است و بنابراین نتیجه می‌شود که روند بصورت صحیح اجرا شده‌است، اما توجه داریم که:

1. حجم فضای کاری در حالت بهینه نسبت به حالت اولیه بیشتر است و این افزایش فضای کاری برای ربات جراح بسیار مفید است.
2. حجم کاری ربات در حالت بهینه از حالت کمینه طول بسیار بیشتر است و بنابراین از این نظر نیز این حالت بسیار بهتر است.
3. حجم کاری حالت بهینه با حالت بیشینه طول تقریباً برابر است، اما در جدول بالا دیدیم که تابع مهارت (که معیار مناسب بودن کلی ربات است) در حالت کلی بسیار بهتر شده است.

در مجموع کارآمدی روش مطرح شده هم از نظر افزایش تابع مهارت نسبت به حالت‌های دیگر و هم از لحاظ افزایش فضای کاری به چشم می‌خورد و این مناسب بودن الگوریتم‌ها و رویکرد در نظر گرفته شده را می‌رساند.

4- رویکرد طراحی مسیر بهینه

هدف نهایی این مقاله طراحی مسیر بهینه با رویکرد بیشینه نمودن تابع مهارت و کمینه کردن خطا می‌باشد که در این قسمت به بررسی آن می‌پردازیم.

4-1- تعریف مسئله

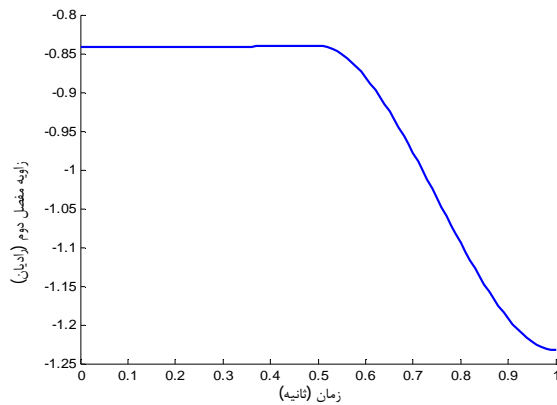
هدف از طراحی مسیر در این قسمت آن است که عملگر نهایی ربات روی مسیر مستقیم بین دو نقطه مشخص حرکت کند. چنین حرکتی برای انجام عملیات بُرش در ربات جراح بسیار کارآمد است.

نقطه ابتدایی R_0 را و نقطه انتهایی را R_f می‌نامیم. برای طراحی در مسیر دکارتی باید نقاط ابتدایی و انتهایی را به فضای متغیرهای مفاصل منتقل کنیم. برای این کار از سینماتیک معکوس استفاده می‌نماییم. یعنی بردارهای Q_0 متناظر با R_0 و Q_f متناظر با R_f را در فضای متغیرهای مفاصل محاسبه می‌کنیم. نهایتاً باید در فضای متغیرهای مفاصل یک تابع زمانی برای q به نحوی طراحی شود که قیود سرعت و مکان را رعایت نموده و از نقطه ابتدا به نقطه انتها برسد. ابتدا این مسیر را پارامتریزه می‌کنیم، یعنی بهینه‌سازی تابعی را به یک بهینه‌سازی پارامتری کاهش می‌دهیم. بعد از آن با توجه به قیود فیزیکی مسئله روابط بین پارامترها را به دست می‌آوریم. حال بر اساس این پارامترها یک تابع هزینه (که متناظر با مهارت ربات و خطای انحراف از مسیر مستقیم است) تشکیل می‌دهیم و آن را بهینه می‌کنیم.

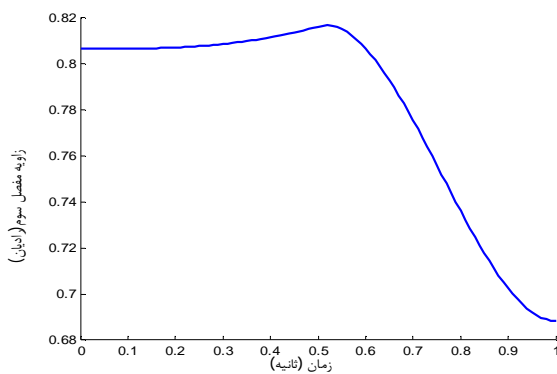
4-2- قیود فیزیکی مسئله

- در ابتدای حرکت ربات در نقطه آغازین است، یعنی $q_i(0) = q_{i,0}$.
- در ابتدای حرکت ربات ساکن فرض می‌شود، یعنی $\dot{q}_i(0) = 0$.
- در انتهای مسیر ربات در نقطه مشخص شده نهایی است، یعنی $q_i(T_f) = q_{i,f}$.
- سرعت نهایی ربات صفر است، یعنی ربات در نقطه نهایی کاملاً می‌ایستد. پس $\dot{q}_i(T_f) = 0$.

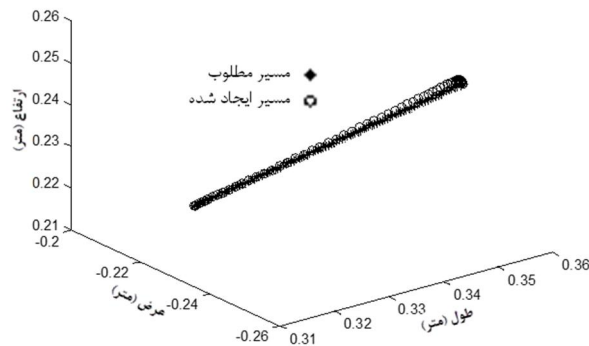
برای برآورده کردن این 4 قید مستقل، حداقل نیاز به 4 پارامتر داریم. یک روش مرسوم برای طراحی چنین توابع و مسیرهایی استفاده از توابع درجه 3 است. چراکه توابع درجه 3 نه زیاد پیچیده‌اند که باعث ایجاد مسیر پر پیچ و خم و نامطلوب شوند و نه آنقدر ساده که نتوانند قیود را برآورده



شکل 7 مسیر q_2



شکل 8 مسیر q_3



شکل 9 مقایسه مسیر مطلوب و مسیر ایجاد شده

نزدیک بودن مسیر طی شده به مسیر مطلوب) به صورت مناسبی انجام شده است.

5- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله روندی ارائه شد که بتوان با استفاده از آن، معیاری برای مهارت یک ربات جراح ارائه داد. سپس بر اساس این معیار به طراحی ربات و یافتن طول بهینه برای رابط‌های آن پرداخته شد. در نهایت با ترکیب معیار مهارت با خطای ردیابی مسیر، به طراحی مسیر بهینه برای ربات جراح پرداخته شد. نتایج شبیه‌سازی کارآمد بودن روش را مشخص نمود و نشان داد که رویکرد به نتایج مناسبی منجر می‌شود. از روند ارائه شده در این مقاله، در زمینه بهینه‌سازی ابعاد می‌توان در طراحی ربات‌های مختلف استفاده نمود و نیز

توسط ربات است. در حقیقت در هر لحظه ربات در وضعیت قرارگیری $Q(t) = [q_1(t) \ q_2(t) \ \dots \ q_n(t)]$ قرار دارد که در این نقطه مهارت ربات یک مقدار مشخص است. برای محاسبه مهارت در تمام طول مسیر بایستی رابطه (22) روی تمام نقاط انتگرال گرفته شود:

$$K = \int_{q_0}^{q_f} k(Q) dQ \quad (22)$$

یک جمله متناظر با خطا به تابع هزینه اضافه می‌شود. این جمله به این خاطر در نظر گرفته می‌شود که انحراف مسیر طراحی شده از مسیر مطلوب (خط راست) کمینه باشد. به زبان ریاضی می‌توان این جمله را بصورت رابطه (23) نوشت:

$$E = \int_{R_0}^{R_f} \|r_g - r_a\| ds \quad (23)$$

که r_g مسیر طراحی شده و r_a مسیر مطلوب و E معرف خطای طراحی می‌باشد. انتگرال روی تمام طول مسیر، از نقطه شروع تا نقطه پایان گرفته شده‌است، یعنی ds المان طول مسیر می‌باشد. تابع هزینه کلی ترکیبی از خطا و مهارت است. چون می‌خواهیم خطا کمینه شود، آن را بصورت رابطه (24) و با علامت مثبت در تابع هزینه وارد می‌کنیم:

$$J = E - M \quad (24)$$

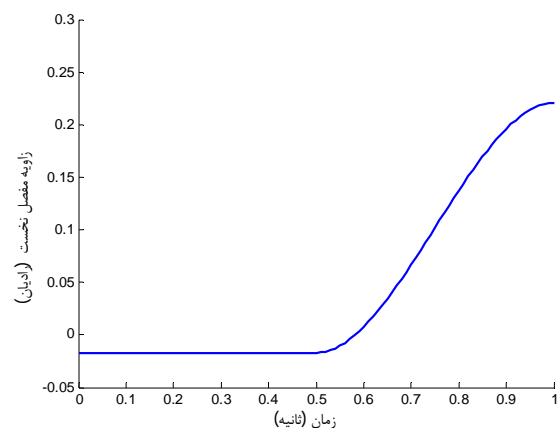
که در آن J تابع هزینه کلی، M مهارت در طول مسیر و E خطا روی مسیر می‌باشد. بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک انجام می‌شود. در ادامه نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌گردد.

4-5- نتایج شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی، عمل مورد نظر را برش یک خط کوتاه در نظر گرفته شده است و نقاط ابتدا و انتها به صورت $R_0 = [0.35 \ -0.25 \ 0.25]^T$ و $R_f = [0.32 \ -0.22 \ 0.22]^T$ لحاظ شده است.:

$$\begin{aligned} Q_0 &= [-0.0177 \ -0.84130.8066]^T \\ Q_f &= [0.2207 \ -1.23250.6884]^T \end{aligned} \quad (25)$$

پس از اجرای بهینه‌سازی متغیرهای مفصلی مطابق شکل‌های 6 تا 8 به دست می‌آیند. لازم به ذکر است که با توجه به مدل ربات مورد بررسی، مفصل چهارم بصورت قرینه مفصل سوم حرکت می‌کند، یعنی $q_4 = -q_3$. برای بررسی انطباق مسیر بهینه ایجاد شده در فضای دکارتی، آن را با مسیر مطلوب مقایسه می‌نماییم. بدین منظور این دو مسیر در شکل 9 رسم شده‌اند. مشاهده می‌شود که ردیابی مسیر قابل قبول است. در حقیقت مصالحه لازم بین بالا بودن مهارت ربات در حین برش و کم بودن خطا (یعنی



شکل 6 مسیر q_1

می‌توان ربات‌های مختلف را از این دیدگاه با هم مقایسه کرد. در طراحی مسیر نیز بعنوان مثال می‌توان تابع مهارت را تعمیم داده و با توجه به کاربردهای مختلف، مثلاً جوشکاری یا رنگ‌زنی، این مفهوم را تغییر داد. یا علاوه بر طراحی مسیر به صورت بهینه، می‌توان مفهوم و ایده تابع مهارت را در موارد دیگر نیز بکار برد. از جمله این موارد کنترل ربات است، به نحوی که در طول حرکت ربات، انتگرال تابع مهارت روی مسیر بهینه شود. قیود دیگر مانند اجتناب از موانع و تداخل نیز می‌توانند در نظر گرفته شوند.

6- مراجع

- new minimally invasive surgical robotic system." *Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2006. BioRob 2006. The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on*, 2006.
- [5] S. Mosafer, S. Najarian, et al. "Design motorized hand held flexible instrument for Minimally Invasive Surgery (MIS)." *Industrial Electronics & Applications, 2009. ISIEA 2009. IEEE Symposium on*, IEEE, 2009.
- [6] K. Kawamura, H. Seno, et al. "Pilot study on effectiveness of simulation for surgical robot design using manipulability." *Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC, 2011, Annual International Conference of the IEEE*, IEEE, 2011.
- [7] J. Nikodem, G. Hwang, et al. "Technical Realization of the Optimal Motion Planning Method for Minimally Invasive Surgery." *Engineering of Computer Based Systems (ECBS), 2012 IEEE 19th International Conference and Workshops on*, IEEE, 2012.
- [8] I. Nisky, S. Patil, et al. "Kinematic analysis of motor performance in robot-assisted surgery: a preliminary study." *Medicine Meets Virtual Reality*, pp. 302-308, 2013.
- [9] S. G. Kang, H. Iqbal, et al. "Multi-criteria optimization of the 4 links of an 8 DOF haptic master device for a surgical robot." *Control, Automation and Systems (ICCAS), 2012 12th International Conference on*, IEEE, 2012.
- [10] S. U. Lee, H. Shin, et al. "Design of a New Haptic Device using a Parallel Mechanism with a Gimbal Mechanism." *Parameters*, 160(120H): 120D, 2005.
- [11] C. A. Klein and B.E. Blaho, "Dexterity Measures for the Design and Control of kinematically Redundant Manipulators", *The Int. J. of Robotics Research*, 6(2), pp. 72-83, 1987.
- [12] R. Y. Rubinstein and D. P. Kroese. *Simulation and the Monte Carlo method*. Vol. 707. John Wiley & Sons, 2011.
- [1] A. Faraz, S. Payandeh, et al.. "Issues and design concepts in endoscopic extenders." *Analysis, Design and Evaluation of Man-Machine Systems*, pp. 89-94, 1995.
- [2] L. Adhami and E. Coste-Manière. "Optimal planning for minimally invasive surgical robots." *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 19(5): pp. 854-863, 2003.
- [3] V. Muñoz, I. Garcia-Morales, et al. "Control movement scheme based on manipulability concept for a surgical robotic assistant". *Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on, IEEE*, 2006.
- [4] M. J. Lum, D. Trimble, et al. "Multidisciplinary approach for developing a