



رویکردی جدید و بلادرنگ برای پرهیز از نقاط تکین در راهنمایی دستی ربات‌های صنعتی

علی موسوی محمدی¹، علیرضا اکبرزاده^{2*}

1- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، قطب علمی رایانش نرم و پردازش هوشمند اطلاعات، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

2- استاد، قطب علمی رایانش نرم و پردازش هوشمند اطلاعات، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

* مشهد، صندوق پستی 9188877861، ali_akbarzadeh@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 04 تیر 1395

پذیرش: 06 شهریور 1395

ارائه در سایت: 04 مهر 1395

کلید واژگان:

راهنمایی دستی

ربات‌های صنعتی

تولید مسیر

کنترل امپدانس

بیضیگون حرکت‌پذیری

چکیده

این مقاله به بررسی فرآیند راهنمایی دستی و آنلاین ربات‌ها به روش کنترل امپدانس و با دوری از نقاط تکین می‌پردازد. در این روش کاربر به فضای کاری ربات رفته و مجری نهایی که مجهز به سنسور نیرو است را در دست می‌گیرد. کاربر با راهنمایی ربات، مسیر مطلوب برای فرآیندهایی مانند جوشکاری و رنگ‌زنی را به صورت آنلاین تولید می‌کند. به دلیل وجود احتمال تکینگی و با توجه به تعامل فیزیکی انسان و ربات باید شناسایی فاصله و راستای تکینگی در حین تولید مسیر به صورت بلادرنگ انجام شود زیرا نزدیکی به تکینگی می‌تواند باعث سرعت زیاد و غیر منتظره مفاصل ربات شود. بدین منظور از روشی ساده به نام بیضیگون حرکت‌پذیری استفاده می‌شود. با ترکیب دو روش کنترل امپدانس و بیضیگون حرکت‌پذیری، رویکردی ساده و جدید برای راهنمایی دستی ربات‌ها پیشنهاد شده است که به کمک آن می‌توان پیش از وقوع تکینگی به کاربر هشدار داد. بر اساس این رویکرد در فاصله مشخص از نقاط تکین، اثر نیرو در خلاف راستای تکینگی به دست انسان وارد می‌گردد. مزیت اصلی این رویکرد امکان پیاده‌سازی بلادرنگ و تضمین سلامت کاربر به دلیل دوری از تکینگی می‌باشد. آزمایش‌های عملی روی یک ربات اسکرای بلادرنگ انجام شده است. در آزمایش اول، تولید مسیر به محض بوجود آمدن نیروی مخالف متوقف شده اما در آزمایش دوم کاربر به ادامه مسیر خود اصرار ورزیده است. بررسی نتایج آزمایش‌ها، نشانگر توانایی مؤثر رویکرد پیشنهادی در برخورد با مسأله تکینگی در حین تولید مسیر توسط کاربر برای ربات‌های صنعتی است.

A novel real-time singularity avoidance approach for manual guidance of industrial robots

Ali Mousavi Mohammadi, Alireza Akbarzadeh*

Center of Excellence on Soft Computing and Intelligent Information Processing, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

* P.O.B. 9188877861, Mashhad, Iran, ali_akbarzadeh@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 24 June 2016

Accepted 27 August 2016

Available Online 25 September 2016

Keywords:

Manual Guidance

Industrial Robots

Trajectory Generation

Impedance Control

Manipulability Ellipsoid

ABSTRACT

In this paper, online manual guidance of industrial robots using impedance control with singularity avoidance is studied. In this method, operator enters the robot workspace, physically holds the end-effector equipped with force sensor and manually guides the robot. In doing so, the operator generates the desired trajectory for applications like welding or painting. Robot singular configuration is possible during the process which makes it unsafe due to unexpected high velocity robot joints and the physical human-robot interaction. Therefore, real-time identification of singularity position and orientation must be evaluated during trajectory generation. The use of manipulability ellipsoid is suggested as a simple method for the singularity identification. By combining the manipulability ellipsoid and impedance control, a simple and new approach is proposed to warn operator before reaching singularity. Based on the proposed approach, effect of opposite force is exerted on the human hand in the predefined distance to singularity. Real-time implementation is the main advantage of the proposed approach because it keeps robot away from reaching singularity. Real-time experiments are performed using a SCARA robot. In the first experiment, the operator stops the trajectory generation process when an opposite force is produced. In the second experiment, the operator insists on entering the singular points. Experimental results show the effectiveness of the proposed approach in dealing with singularity problem during the trajectory generation by an operator for industrial robots.

1- مقدمه

بلکه کنترل نیروی تماسی¹ بوجود آمده بین ربات و محیط پیرامون لازم است. فرآیندهایی مانند اسمبلی¹، پولیش زنی² و پلیسه برداری³ از جمله این

برای انجام بخش زیادی از وظایف ربات‌ها نه تنها بکارگیری کنترل موقعیت

¹ Contact force

روش تجزیه مقدار تکین⁶ به عنوان راه حل آن یاد کرده‌اند. در مقاله حاضر مشکل تکینگی در حین راهنمایی دستی مورد بررسی قرار گرفته است تا ایمنی کاربر در حین فرآیند تضمین شود. بدین منظور از روشی ساده کمک گرفته شده تا علاوه بر تعیین معیاری برای مقدار فاصله از نقاط تکین، راستای تکینگی نیز مشخص شود. این روش، بیضیگون حرکت‌پذیری نام دارد [11]. هو و همکارش برای دوری از نقاط تکین جهت تولید مسیر آفلاین، به صورت ترکیبی از روش بیضیگون حرکت‌پذیری و عدد شرط استفاده نموده‌اند [12]. بنابراین برای راهنمایی دستی ربات بوسیله کنترل امپدانس و با استفاده از روش بیضیگون حرکت‌پذیری، مجری نهایی دور از نقاط تکین قرار گرفته و کاربر در فضای ایمن با ربات تعامل خواهد داشت و بدین صورت می‌توان از حداکثر فضای کاری ربات استفاده نمود. این روش ساده، بار محاسباتی کمی برای پردازشگر دارد که این موضوع به دلیل بلادرنگ بودن روش یاد شده و کنترل بدون وقفه ربات از اهمیت زیادی برخوردار است. در ادامه و در بخش دوم مزایای روش راهنمایی دستی ربات‌های صنعتی بررسی شده و همچنین به معرفی و مطالعه جایگاه کنترل موقعیت و امپدانس در روش ارائه شده پرداخته می‌شود. بخش سوم روش بیضیگون حرکت‌پذیری برای دوری از تکینگی را تعریف می‌کند. در بخش چهارم، رویکرد جدید پیشنهاد شده برای هشدار به کاربر جهت پرهیز از تکینگی معرفی شده و در بخش پنجم روی یک ربات اسکرا⁷ پیاده‌سازی عملی خواهد شد. در نهایت بخش ششم به نتیجه‌گیری خواهد پرداخت.

2- تولید مسیر به کمک کنترل امپدانس برای ربات‌های صنعتی

آموزش یا راهنمایی ربات برای تولید مسیر به کمک کنترل امپدانس، راهنمایی دستی ربات⁸ یا نمایش ربات برنامه‌ریزی شده⁹ نام دارد. تولید مسیر به کمک کنترل امپدانس برای ربات‌های صنعتی به دلایل زیر بسیار پرکاربرد و با اهمیت است [6, 8]:

- 1- تولید سریع مسیر مطلوب و صرفه‌جویی در زمان
- 2- نمایش بلادرنگ مسیر تولید شده
- 3- استفاده از دانش و تجربه کاربر حرفه‌ای
- 4- عدم نیاز به کاربر متخصص در زمینه علم رباتیک
- 5- عدم نیاز به واسط کاربری پیچیده

در مقابل این مزایا تنها می‌توان به یک عیب اشاره نمود، معمولاً سنسور نیرو دارای قیمت زیادی است [10]. در بخش‌های بعدی به ترتیب کنترل موقعیت و امپدانس به صورت کامل توضیح داده می‌شوند.

2-1- کنترل موقعیت

معمولاً در سیستم‌های رباتیکی صنعتی، یک کنترلگر تجاری‌سازی شده موقعیت به همراه ربات وجود دارد. در این مقاله، از کنترلگر موجود در درایور موتورهای ربات استفاده خواهد شد [13]. در بخش یک از "شکل 1" موقعیت رایانه شخصی، برد واسط، درایور، تقویت‌کننده¹⁰، موتور، سنسور نیرو و ربات را مشاهده می‌کنید. فرمان‌ها و پس‌خوردها به کمک نرم‌افزار متلب¹¹ و به کمک محیط آر تی دلبیو تی¹² به صورت بلادرنگ در سیمولینک¹³ و از طریق

وظایف است [1]. کنترل امپدانس با بکارگیری و تنظیم امپدانس مکانیکی نسبت داده شده به مجری نهایی ربات، به کنترل نیروی تماسی می‌پردازد. این روش نیازمند پس‌خورد موقعیت و نیرو است [2]. تاکنون کاربردهای بسیاری برای کنترل امپدانس در زمینه‌های گوناگون ارائه شده است. الجراح و همکارش با بکارگیری کنترل امپدانس در [3-5] چند روش برای حمل بار به صورت مشترک بین انسان و ربات، ارائه کرده‌اند. تولید مسیر مناسب و مورد نظر کاربر حرفه‌ای برای جوشکاری و پاشیدن رنگ توسط ربات، یکی دیگر از کاربردهای کنترل امپدانس است که به ترتیب در [6] و [7] بررسی شده است. مارسلو و همکاران با بکارگیری این روش کنترلی و نسبت دادن اینرسی، میرایی و سفتی مطلوب به ربات، روشی جدید در زمینه تولید مسیر برای ربات‌های جوشکار ارائه نموده‌اند [6]. مسیر تولید شده برای فرآیند جوشکاری ذخیره شده، سپس در زمان لازم و بدون حضور کاربر در فضای کاری ربات بازیابی خواهد شد. تولید مسیر مناسب به روش‌های قدیمی، برای مجری نهایی ربات‌های جوشکار بسیار زمان‌گیر و ناکارآمد می‌باشد و این درحالی است که در روش یاد شده، کاربر وارد فضای کاری ربات شده و با گرفتن مجری نهایی -که مجهز به سنسور نیرو شده است- مسیر مناسب را در مدت زمان کوتاهی به ربات آموزش می‌دهد. در این فرآیند کاربر در نقش یک راهنما عمل می‌کند. باسچتا و همکاران با بکارگیری کنترل امپدانس برای راهنمایی دستی، به ایمن‌تر کردن نحوه تعامل فیزیکی انسان و ربات و همچنین واقعی‌تر کردن احساس کاربر از این تعامل، پرداخته‌اند [8]. ایشان با ارائه فرمول‌بندی دقیق، دینامیک ابزاری که کاربر هنگام کار با ربات احساس می‌کند، بدست آورده‌اند. در [8] از نظر ایجاد شرایط ایمن‌تر برای کاربری که جهت آموزش وارد فضای کاری ربات شده، دو روش ارائه گردیده است: الف) برای سرعت مجری نهایی محدوده ایمنی در نظر گرفته شده است و سرعت هنگام رسیدن به مقدار مشخصی، اشباع می‌شود. ب) بخشی از فضای کاری ربات بوسیله دیوارهای مجازی جدا شده که کار در آن برای کاربر ایمن است. این دو روش بر اساس استاندارد ایزو⁴ 10218-1 ارائه شده‌اند [9]. در این استاندارد شرایط لازم برای حفظ امنیت کاربر حین کار با ربات‌های صنعتی و سیستم‌های رباتیکی صنعتی ارائه شده است.

با توجه به حضور انسان در روش راهنمایی دستی ربات‌ها، حفظ ایمنی کامل کاربر ضروری است. مشکل تکینگی⁵ یکی از موارد مهمی است که باید در فرآیند راهنمایی دستی به صورت آنلاین بررسی شود. نحوه برخورد با این مشکل به کمک سیستم ایمنی کنترلگر ربات‌ها انجام می‌شود [9]. یعنی کنترلگر یک ربات صنعتی در صورت نزدیکی به نقطه تکین باید به این صورت عمل کند: الف) توقف کامل ربات همراه با هشدار دیداری یا شنیداری به کاربر ب) این هشدار تا زمان رسیدن مجری نهایی به منطقه ایمن ادامه دارد ج) در صورتی که تکینگی قابلیت کنترل دارد، بدون هشدار به کاربر مسیر ادامه می‌یابد. بنابراین بر اساس استاندارد ایزو 10218-1، ساده‌ترین روش برای برخورد با مسأله تکینگی، توقف حرکت ربات است. ماسا و همکاران ضمن بررسی کامل استانداردهای ایزوی مرتبط با راهنمایی دستی ربات‌ها، مروری بر تاریخچه این روش تولید مسیر، چالش‌های آن و همچنین روش‌های مختلف راهنمایی دستی ربات داشته‌اند [10]. همچنین ایشان ضمن اشاره به مشکل تکینگی هنگام تولید مسیر در راهنمایی دستی، از

⁶ Singular Value Decomposition (SVD)

⁷ SCARA

⁸ Manual guidance of the robot

⁹ Walk-through programmed robot

¹⁰ Amplifier

¹¹ MATLAB

¹² RTWT (Real-Time Windows Target)

¹³ Simulink

¹ Assembly

² Polishing

³ Deburring

⁴ ISO

⁵ Singularity

از این روش برای ربات‌های صنعتی استفاده نمود، زیرا بدون هیچ تغییری در کنترل موقعیت ربات، امکان استفاده از آن وجود دارد [8].

تولید مسیر به کمک کنترل امپدانس بر دو فرض اساسی استوار است:

1- مسیر مطلوب صفر در نظر گرفته می‌شود تا کنترل موقعیت ربات فقط مسیر تولید شده بوسیله کنترل امپدانس را ردیابی کند. بنابراین خروجی معادله کنترل امپدانس، ورودی کنترل موقعیت ربات خواهد بود.

2- باید مقدار سفتی در معادله (1) صفر در نظر گرفته شود، در این صورت پاسخ سیستم مرتبه دوم مانند یک سیستم جرم و میراگر خواهد بود. یعنی جرم در حضور نیروی تماسی، به موقعیت جدید رفته و تمایلی به بازگشت به موقعیت اولیه ندارد. به عبارت دیگر این سیستم به دلیل داشتن جرم و میراگر، در مقابل تغییرات شتاب و سرعت مقاومت می‌کند اما در مقابل تغییرات موقعیت، مقاومتی نخواهد داشت.

معادله کنترل امپدانس، یک معادله دیفرانسیل خطی مرتبه دوم است که پس از حذف سفتی و مسیر مطلوب برای راهنمایی دستی به صورت معادله (3) در جهت محور x بیان خواهد شد. این معادله، در [6] و [8] به ترتیب به صورت معادله (4) و (5) بیان شده است:

$$F_e = M_t \ddot{x} + B_t \dot{x} \quad (3)$$

$$x_i = \left(\frac{M_t}{dt^2} + \frac{B_t}{dt} \right)^{-1} \left(F_e + M_t \frac{2x_{i-1} - x_{i-2}}{dt^2} + B_t \frac{x_{i-1}}{dt} \right) \quad (4)$$

$$Z_t^{-1} = \frac{1}{M_t s^2 + B_t s} \quad (5)$$

که معادله (4)، به صورت زمان گسسته³ ارائه شده و در آن x_i ، x_{i-1} و x_{i-2} به ترتیب زمان نمونه‌برداری داده، موقعیت مجری نهایی در گام کنونی، در گام قبلی و در دو گام قبلی هستند. نیروی وارد شده به ربات از سوی کاربر (یعنی F_e) بوسیله سنسور نیرو اندازه‌گیری شده و از طریق معادله زمان گسسته (4)، با توجه به ضرایب امپدانس یعنی M_t و B_t به موقعیت تبدیل می‌شود. اما کنترل امپدانس در معادله (5) مانند یک فیلتر در فضای لاپلاس⁴ بیان شده که با در نظر گرفتن ضرایب امپدانس، نیروی اعمال شده را به موقعیت تبدیل می‌کند. با بکارگیری هر کدام از معادلات فوق، می‌توان مقدار موقعیت تولید شده به دلیل وجود نیروی تماسی را بدست آورد. مقادیر مناسب برای ماتریس‌های اینرسی و میرایی در هر درجه آزادی، توسط طراح تعیین می‌شوند [17,18].

به دلیل استفاده از محیط سیمولینک، می‌توان از روش بلوک-دیگرام برای نوشتن معادله امپدانس استفاده نمود. به عنوان نمونه پیش از این در [19] از این شیوه نمایش برای کنترل امپدانس استفاده شده است. به کمک این شیوه اعمال برخی شرایط مانند شرط اشباع برای سرعت نسبت به [8]، ساده‌تر انجام می‌شود. برای نوشتن معادله (3) در قالب بلوک-دیگرام، باید معادله را به این صورت مرتب نمود:

$$\ddot{x} = \frac{1}{M_t} (F_e - B_t \dot{x}) \quad (6)$$

محاسبه موقعیت، نتیجه مورد انتظار از معادله فوق است بنابراین باید از این معادله دو بار انتگرال‌گیری نمود. اکنون می‌توان معادله (6) را با اضافه کردن دو انتگرال طبق "شکل 2" و در قالب بلوک-دیگرام ارائه کرد. همانطور

برد واسط تبادل می‌شوند. طبق بخش یک از "شکل 1" موتورهای ربات سیگنال کنترل را از طریق درایور دریافت می‌کنند. کنترلر موجود در درایور موتور براساس خطای موقعیت زاویه‌ای که از طریق برد واسط فرستاده می‌شود، مقدار گشتاور لازم برای حرکت ربات را محاسبه می‌کند. همچنین سیگنال سنسور نیرو بعد از عبور از تقویت‌کننده به برد واسط فرستاده می‌شود. در واقع برد واسط برای تبادل اطلاعات بین محیط پیرامون با رایانه شخصی طراحی شده است. این برد از طریق یک کابل اینترنت¹ به رایانه شخصی متصل شده و نرخ تبادل اطلاعات آن یک میلی ثانیه می‌باشد.

با توجه به حضور کاربر در فضای کاری و تعامل او با ربات، باید معادلات کنترل ربات در فضای کارترین² نوشته شود [2]. در صورتی که فقط امکان کنترل در فضای مفصل برای کنترلر ربات وجود داشته باشد، نیاز به حل سینماتیک معکوس است تا بتوان با کنترلر ربات تعامل داشت.

2-2- کنترل امپدانس

معرفی و کاربرد کنترل امپدانس در زمینه رباتیک توسط هوگان ارائه شد [14]. رویکرد اصلی این روش، نسبت دادن اینرسی (یا جرم، که بستگی به انتقالی یا دورانی بودن درجه آزادی مورد بحث دارد)، میرایی و سفتی مطلوب به مجری نهایی ربات است [15]. در این حالت کاربر به جای تعامل با ربات واقعی، با یک سیستم مرتبه دوم متشکل از جرم، فنر و میراگر مواجه خواهد بود. معادله کلی حاکم بر کنترل امپدانس به این صورت است [2]:

$$M_t \ddot{X}_e + B_t \dot{X}_e + K_t X_e = \vec{F}_e \quad (1)$$

این معادله برداری در فضای کارترین تعریف شده و نشان‌دهنده تعدادی معادله به اندازه درجات آزادی ربات است. \vec{X}_e ، $\dot{\vec{X}}_e$ ، $\ddot{\vec{X}}_e$ ، \vec{F}_e ، M_t ، B_t و K_t به ترتیب نشان‌دهنده بردارهای خطای موقعیت مجری نهایی، خطای سرعت، خطای شتاب، نیروی تماسی (یا واقعی، وارد شده به ربات)، ماتریس‌های اینرسی مطلوب، میرایی مطلوب و سفتی مطلوب می‌باشند. همچنین بردار خطا طبق معادله (2)، نشان دهنده اختلاف بین حالت مطلوب و واقعی است.

$$\vec{X}_e = \vec{X} - \vec{X}_d \quad (2)$$

ماتریس‌های M_t ، B_t و K_t قطری، متقارن و همچنین معین نامنفی هستند. به عنوان مثال برای ربات سری دو درجه آزادی صفحه‌ای، با توجه به تعداد درجات آزادی، تمام بردارها 2 مؤلفه و تمام ماتریس‌ها 2×2 خواهند بود. با قطری انتخاب کردن این ماتریس‌ها، امپدانس مطلوب تبدیل به دو امپدانس مستقل شده که هر کدام در راستای یکی از محورهای مختصات در فضای کارترین قرار دارند. بنابراین ربات مانند بخش دو از "شکل 1"، معادل با سیستم جرم، فنر و میراگر در درجه آزادی خواهد بود. یعنی دو قسمت مشخص شده با خط-چین در "شکل 1"، معادل یکدیگر خواهند بود. با در نظر گرفتن این شکل، مقدار امپدانس نسبت داده شده به ربات که بر اساس نظر کاربر و طراح تعیین می‌شود، از نوع ربات مستقل خواهد بود.

با توجه به کنترل موقعیت بیان شده در بخش قبل، فقط روش خاصی از کنترل امپدانس بر روی ربات‌های صنعتی قابل پیاده‌سازی است زیرا امکان دسترسی به کنترل موقعیت ربات و اعمال تغییرات دلخواه طراح، به سادگی میسر نخواهد بود. این شیوه، کنترل امپدانس براساس موقعیت نام دارد. در روش کنترل امپدانس براساس موقعیت، حلقه کنترل نیرو به دور کنترل موقعیت بسته شده و در صورتی که نیرویی به سنسور وارد نشود، حلقه بیرونی تأثیری در کنترل موقعیت ربات نخواهد داشت [16]. بنابراین می‌توان

³ Discrete time

⁴ Laplace

¹ Ethernet

² Cartesian

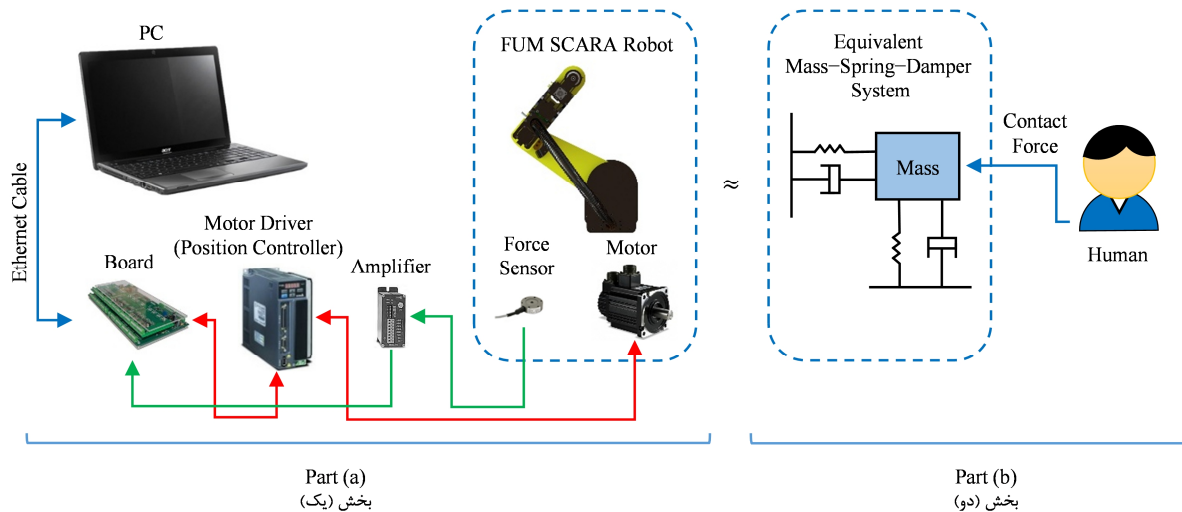


Fig. 1 Part (a) Robot components communication, Part (b) Operator and his interaction with robot equivalent system

شکل 1 بخش (یک) نحوه ارتباط اجزاء ربات، بخش (دو) کاربر و تعامل او با سیستم معادل ربات

سری صفحه‌ای برای انجام آزمایش‌ها به کار گرفته می‌شوند. طول لینک اول و دوم ربات فام اسکرا به ترتیب عبارتند از 0.4 و 0.3 متر.

که پیش از این بیان شده و در "شکل 2" نیز مشاهده می‌شود، می‌توان به سادگی شرط اشباع برای سرعت را به معادله امپدانس اضافه نمود.

3-2- روش بیضیگون حرکت پذیری

این روش با ارائه معیاری برای حرکت‌پذیری به بررسی توانایی حرکت مجری نهایی ربات از نظر موقعیت و دوران می‌پردازد. پس از رسم بیضیگون به کمک روش یاده شده، می‌توان جهت بهتر برای حرکت ربات را یافت. در حقیقت این روش نشان دهنده توانایی حرکت ربات در جهت شعاع بزرگتر بیضیگون است [11]. بسته به تعداد درجات آزادی ربات، به ابعاد بیضیگون اضافه خواهد شد. به‌عنوان مثال برای ربات سری دو درجه آزادی صفحه‌ای، یک بیضی بدست خواهد آمد. با افزایش تعداد درجات آزادی انتقالی ربات به سه، بیضی به صورت سه بعدی یعنی بیضیگون تبدیل خواهد شد. به علاوه در

3- بیضیگون حرکت پذیری

در این بخش ابتدا ربات مورد نظر برای آزمایش‌های عملی معرفی شده و سپس موقعیت نقاط تکین در فضای کاری آن بررسی می‌شود. همچنین در ادامه، روش بیضیگون حرکت‌پذیری و طریقه رسم آن توضیح داده می‌شود.

3-1- فضای کاری و نقاط تکین ربات فام اسکرا¹

فام اسکرا یک ربات اسکرای در اندازه متوسط با چهار درجه آزادی است که دو درجه آزادی اول آن، برای آزمایش‌های استفاده خواهند شد. این ربات توسط تیمی از دانشجویان مکانیک، کنترل و کامپیوتر در آزمایشگاه رباتیک دانشگاه فردوسی مشهد طراحی، ساخته و کنترل گردیده است. ربات فام اسکرا در "شکل 3" نشان داده شده است. سینماتیک، طراحی مفاصل، فضای کاری، تکرارپذیری و ویژگی‌های شاخص این ربات صنعتی در [20-22] بیان گردیده است.

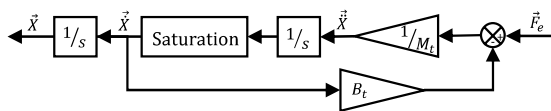


Fig. 2 The block-diagram solution of impedance control equation with saturation condition

شکل 2 بلوک-دیگرام حل معادله کنترل امپدانس به همراه شرط اشباع



Fig. 3 The FUM SCARA robot designed and built at the Ferdowsi University of Mashhad, FUM Robotics Lab

شکل 3 ربات فام اسکرا، طراحی و ساخته شده در آزمایشگاه رباتیک دانشگاه فردوسی مشهد

فضای کاری و نقاط تکین برای دو درجه آزادی اول ربات فام اسکرا در "شکل 4" نشان داده شده است. در این شکل، فضای کاری ربات با خط آبی نمایش داده شده است. همچنین خط-چین قرمزی که در مرز فضای کاری قرار دارد، موقعیت نقاط تکین این ربات را نشان می‌دهد. معمولاً تکین شدن ربات از طریق عدم وجود معکوس ماتریس جاکوبین² تعریف می‌شود. چنین حالتی، تکینگی ربات یا به صورت خلاصه تکینگی نامیده می‌شود [23]. از دید فضای کارترین، ربات در حالت تکینگی یک درجه آزادی از دست می‌دهد. معمولاً تکینگی به دو گروه تقسیم می‌شود [23]:

- 1- مرزی³: در مرز فضای کاری رخ می‌دهد.
 - 2- درونی⁴: از مرز فضای کاری دور است و معمولاً هنگامی رخ می‌دهد که دو مفصل ربات در یک راستا قرار بگیرند.
- در جدول 1، بازه کاری هر مفصل از ربات فام اسکرا بیان شده است. همان‌طور که توضیح داده شد، دو درجه آزادی اول این ربات به عنوان ربات

¹ FUM SCARA

² Jacobian

³ Workspace-boundary singularities

⁴ Workspace-interior singularities

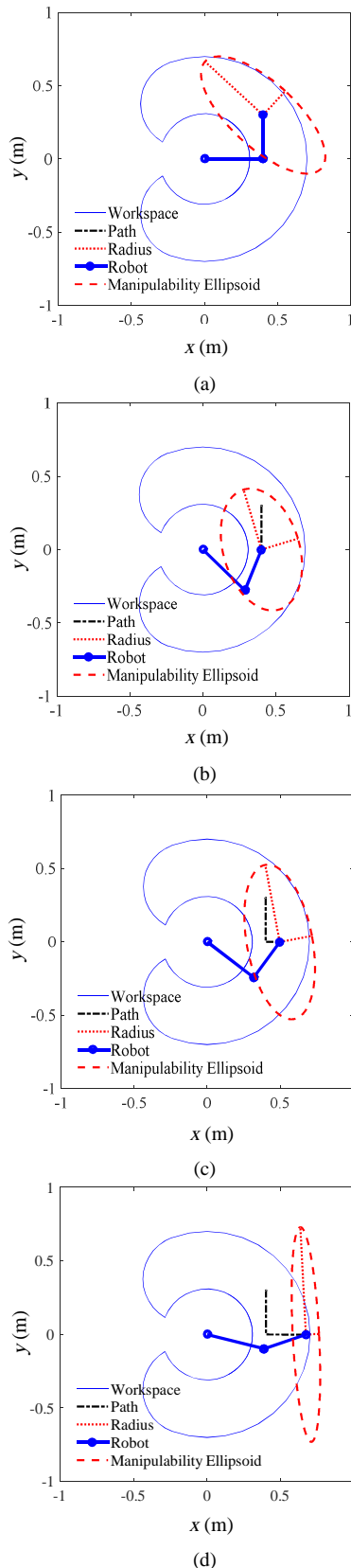


Fig. 5 The manipulability ellipsoid variation in four steps of the robot movement

شکل 5 تغییرات بیضیگون حرکت پذیری در چهار گام از حرکت ربات

در "شکل 6" تغییرات شعاع‌های بیضیگون حرکت پذیری برای ربات سری دو درجه آزادی مطابق با چهار گام نشان داده شده در شکل 5، رسم

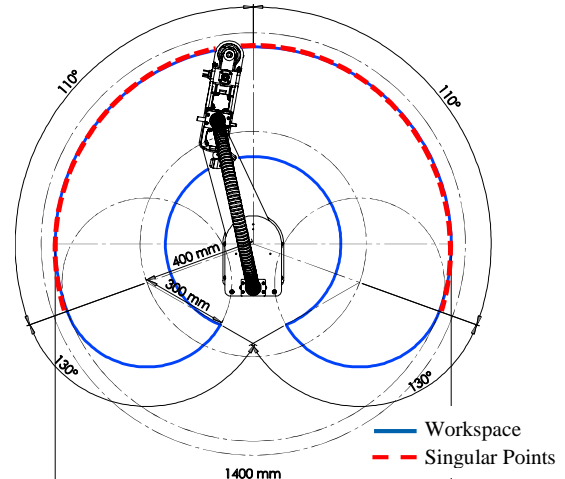


Fig. 4 The workspace and singular points of the FUM SCARA robot

شکل 4 فضای کاری و نقاط تکین در ربات فام اسکرا

صورت اضافه شدن درجات آزادی دورانی، می‌توان دو بیضیگون مستقل برای حرکت پذیری انتقالی و دورانی مجری نهایی در نظر گرفت [24]. بنابراین بدون تأثیر در کلیت مطلب، نتایج بدست آمده در این مقاله قابل تعمیم به ربات‌های دیگر، با درجات آزادی گوناگون خواهد بود.

در "شکل 5"، چهار گام از مسیر دلخواه یک ربات سری دو درجه آزادی صفحه‌ای نشان داده شده است. همان‌طور که در "شکل 5-d" مشاهده می‌کنید هنگام نزدیک شدن به موقعیت (0,7,0) متر، یک شعاع بیضیگون به سمت بی‌نهایت و شعاع دیگر به سمت صفر میل می‌کند، زیرا جهت حرکت به سمت تکینگی مرزی ربات است. به صورت خلاصه می‌توان گفت ربات در جهت شعاع بزرگتر بیضیگون نسبت به جهت شعاع کوچک‌تر حرکت پذیری بهتری خواهد داشت. به عبارت دیگر حرکت پذیری مجری نهایی ربات در جهت نزدیک شدن به نقاط تکین کم خواهد شد.

در ادامه طبق معادلات (7) تا (11) روش به‌دست آوردن مقدار و جهت شعاع‌های بیضیگون حرکت پذیری به صورت گام به گام بیان می‌شود (بدون تأثیر در کلیت مطلب، ماتریس جاکوبین 2x2 فرض می‌شود):

- گام اول: محاسبه ماتریس جاکوبین

$$J(\vec{\theta}) \tag{7}$$

- گام دوم: محاسبه ماتریس زیر

$$J^* = J(\vec{\theta}) \times J^t(\vec{\theta}) \tag{8}$$

- گام سوم: محاسبه مقادیر ویژه و جهت ویژه ماتریس J^*

$$\lambda_1, \vec{v}_1 \text{ و } \lambda_2, \vec{v}_2 \tag{9}$$

- گام چهارم: محاسبه مقدار شعاع

$$r_1 = \sqrt{\lambda_1} \text{ و } r_2 = \sqrt{\lambda_2} \tag{10}$$

- گام پنجم: محاسبه بردار شعاع

$$\vec{r}_1 = r_1 \times \vec{v}_1 \text{ و } \vec{r}_2 = r_2 \times \vec{v}_2 \tag{11}$$

جدول 1 فضای کاری ربات فام اسکرا

شماره مفصل	فضای کاری
مفصل یک	$\pm 110^\circ$
مفصل دو	$\pm 130^\circ$
مفصل سه	190 mm
مفصل چهار	∞

شده است.

آزمایش‌های عملی در بخش بعدی با آن انجام می‌شود. با استفاده از ساختار کلی این رویکرد، می‌توان از روش‌های پیچیده‌تری استفاده نمود. به عنوان مثال مقدار نیروی مجازی، نحوه تولید آن و همچنین شرط بوجود آمدن آن می‌تواند به صورت‌های گوناگونی انجام شود.

بلوک-دیاگرام کنترل ربات با اضافه شدن روش بیضیگون حرکت‌پذیری و تولید نیروی مجازی، به صورت "شکل 9" خواهد شد. طبق توضیحات بیان شده، به دلیل عدم توانایی کنترل موتورها در فضای کارترین نیاز به حل

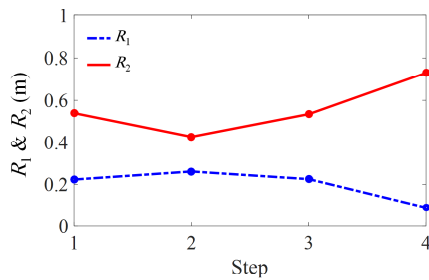


Fig. 6 The manipulability ellipsoid radii variation in four steps of robot movement

شکل 6 تغییرات شعاع‌های بیضیگون حرکت‌پذیری در چهار گام از حرکت ربات

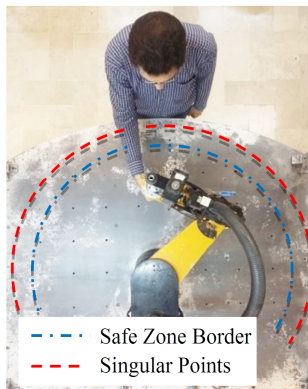


Fig. 7 The operator is forcing the sensor which is installed in the robot end-effector

شکل 7 کاربر در حال اعمال نیرو به سنسور نصب شده روی مجری نهایی ربات

4- تولید نیروی مجازی برای هشدار به کاربر

در این بخش باید از اطلاعات روش بیضیگون حرکت‌پذیری شامل مقدار فاصله از نقاط تکین و همچنین راستای تکنیکی استفاده نمود و فرمان مناسبی به ربات داد. این فرمان باید کاربر را از خطر نزدیک شدن به نقطه تکین آگاه کند. به عنوان مثال در "شکل 7" کاربر وارد فضای کاری ربات شده و در حال اعمال نیرو به سنسور نصب شده در محل مجری نهایی ربات است. خط-چین قرمز و خط-نقطه آبی به ترتیب نشان‌دهنده انتهای فضای کاری و موقعیت ایمن برای کار با ربات می‌باشند. خط-نقطه آبی یک حریم مجازی است که کاربر با عبور از آن به سمت نقاط تکین رفته و نیروی مجازی در جهت جلوگیری از حرکت به سمت تکنیکی تولید خواهد شد. رویکرد نشان داده شده در "شکل 8" نحوه بکارگیری روش بیضیگون حرکت‌پذیری برای دوری از نقاط تکین را نشان می‌دهد. با تعیین یک مقدار دلخواه به عنوان حد مجاز برای شعاع و کاهش شعاع از مقدار تعیین شده، نیروی مجازی به‌وجود آمده و طبق رابطه (12) و "شکل 9" به مقدار اندازه‌گیری شده توسط سنسور نیرو اضافه خواهد شد.

$$\vec{F}_t = \vec{F}_v + \vec{F}_e \quad (12)$$

بنابراین شرط اعمال نیروی مجازی، کمتر شدن شعاع بیضیگون حرکت‌پذیری از حد مجاز است. مقدار حد مجاز به صورت دلخواه و بر اساس تجربه و نظر طراح تعیین می‌شود. در صورت کمتر شدن مقدار شعاع از حد تعیین شده، مقدار 250 نیوتون در جهت جلوگیری از وقوع تکنیکی، به نیروی سنسور اضافه خواهد شد. این عمل بدین معنی است که کاربر اثر نیرویی برابر با 250 نیوتون، که از طریق معادله امپدانس به موقعیت تبدیل می‌شود را در جهت مخالف با حرکت دستش احساس خواهد نمود. اضافه شدن نیروی مجازی طبق رابطه (13) خواهد بود:

$$F_v = f(r) = \frac{250 \arctan(10000(0.1 - |\vec{r}|))}{\pi} + 125 \quad (13)$$

که طبق "شکل 10" و براساس رابطه فوق، نیروی مجازی یک پله نرم و پیوسته بوده که برای مقادیر بزرگتر از 0.1، صفر و برای مقادیر کوچکتر از 0.1، 250 خواهد بود.

بنابراین در این بخش یک رویکرد ساده پیشنهاد شده است که

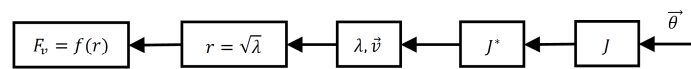


Fig. 8 Virtual force generation method

شکل 8 روش تولید نیروی مجازی

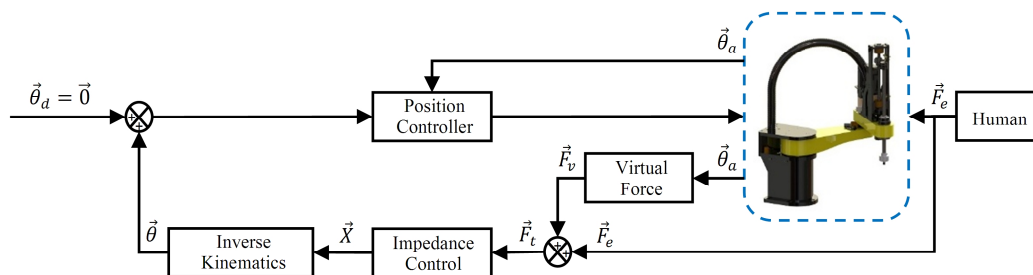


Fig. 9 Impedance control block-diagram with actual and virtual forces

شکل 9 بلوک-دیاگرام کنترل امپدانس در حضور نیروهای واقعی و مجازی

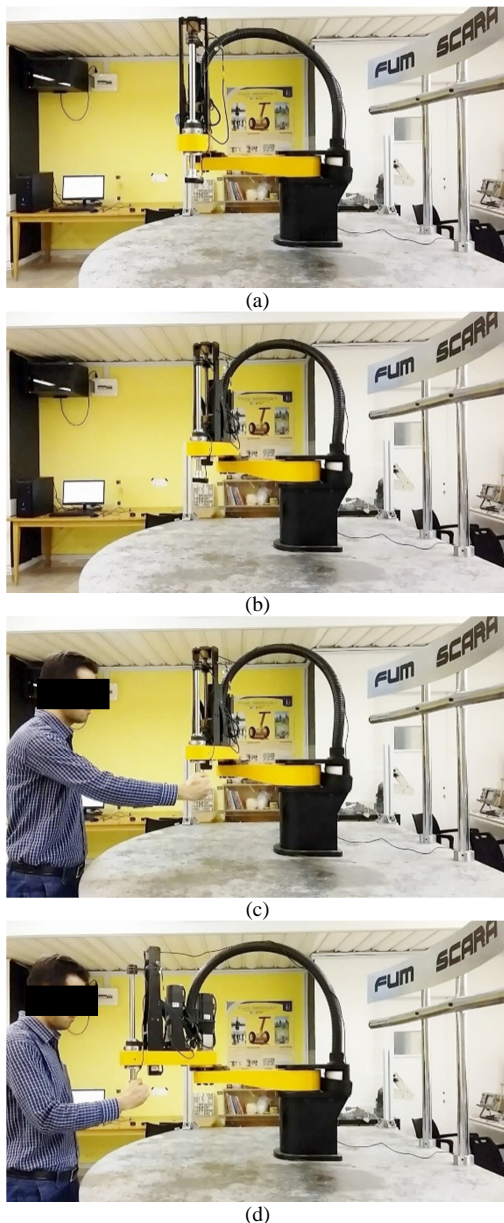


Fig. 11 Four steps of the experiment (a) Robot in the initial condition at (0.4,0.3) m (b) The end of the trajectory following process by robot position controller at (0.4,0) m (c) The start of the trajectory generation process by operator at (0.4,0) m (d) The end of the trajectory generation process near (0.7,0) m because operator feels robot resistance

شکل 11 چهار گام از آزمایش (a) ربات در موقعیت اولیه در (0.4,0.3) متر (b) پایان فرآیند ردیابی مسیر توسط کنترلگر موقعیت ربات در (0.4,0) متر (c) شروع فرآیند تولید مسیر توسط کاربر در (0.4,0) متر (d) اتمام فرآیند تولید مسیر در نزدیکی (0.7,0) متر زیرا کاربر احساس می‌کند ربات با ادامه مسیر مخالفت می‌کند

سنسور نیروی کششی - فشاری دو محوره است. اگر چه طراحی آزمایش‌ها به نحوی انجام شده است تا با استفاده از امکانات موجود بتوان رفتار رویکرد پیشنهادی را بررسی نمود. با استفاده از سنسور نیروی فشاری می‌توان در یک جهت محورهای مختصات به ربات نیرو وارد نمود (در این جا مثبت محور x) و کاربر امکان تغییر مسیر یا بازگرداندن مجری نهایی را ندارد. بنابراین آزمایش‌های طراحی شده فقط در یک جهت امکان پیاده‌سازی خواهند داشت و کاربر در صورت احساس مخالفت ربات با ادامه حرکت، فقط می‌تواند حرکت را متوقف کند. سنسور نیروی فشاری مورد استفاده ساخت شرکت

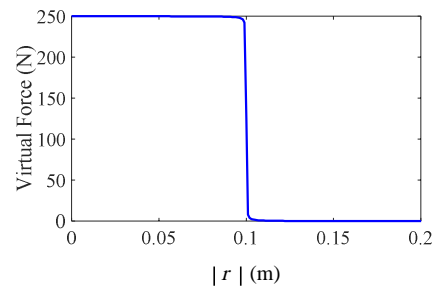


Fig. 10 Virtual force function according to magnitude of radius

شکل 10 تابع نیروی مجازی بر حسب مقدار اندازه شعاع

سینماتیک معکوس وجود دارد. جایگاه بلوک سینماتیک معکوس در "شکل 9" نشان داده شده است. بدین صورت خروجی کنترل امیدانس که در فضای کارترین می‌باشد به فضای مفصل برده شده و به کنترلگر ربات فرستاده می‌شود. همچنین طبق فرض اول بیان شده در بخش 2-2 برای تولید مسیر به کمک کنترل امیدانس باید موقعیت مطلوب (یعنی $\vec{\theta}_a$) در هنگام راهنمایی دستی ربات، صفر در نظر گرفته شود. بنابراین مسیر تولید شده توسط کنترل امیدانس پس از عبور از بلوک سینماتیک معکوس به کنترلگر موقعیت داده می‌شود. کنترلگر موقعیت ربات پس از مقایسه مسیر تولید شده توسط کاربر با موقعیت واقعی مفاصل ربات (یعنی $\vec{\theta}_a$), فرمان مناسب را به موتورهای ربات می‌فرستد.

5- پیاده‌سازی عملی رویکرد پیشنهادی روی ربات فام اسکرا

در این بخش رویکرد پیشنهادی برای جلوگیری از تکین شدن ربات در حین تولید مسیر، به صورت عملی روی دو درجه آزادی اول ربات فام اسکرا پیاده‌سازی خواهد شد. پس از اطمینان در مورد کنترلگر موقعیت دو مفصل اول این ربات، می‌توان به کمک کنترل امیدانس نیروی محاسبه شده در سنسور را به موقعیت تبدیل کرده و بدین صورت مسیر مناسب را تولید نمود. بنابراین مجری نهایی ربات در جهت اعمال نیرو با امیدانس مشخص حرکت خواهد کرد. در صورت نزدیک شدن مجری نهایی به موقعیت تکین، جهت حرکت به سمت تکینگی به کمک بیضیگون حرکت‌پذیری شناسایی شده و نیروی مجازی و مخالف جهت حرکت تولید خواهد شد. اثر این نیرو به کمک معادله امیدانس به موقعیت تبدیل می‌گردد که این موضوع سبب می‌شود کاربر احساس کند ربات با ادامه مسیر مخالفت می‌کند. بدین صورت هشدار لازم به کاربر داده شده و از تکین شدن ربات جلوگیری می‌شود. مسیر تولید شده در فرآیند راهنمایی دستی ذخیره شده، سپس در زمان مناسب و بدون حضور کاربر در فضای کاری ربات مورد استفاده قرار خواهد گرفت. چهار نما از آزمایش انجام شده در "شکل 11" نشان داده شده است. دو آزمایش جهت بررسی و عملکرد رویکرد پیشنهادی ارائه می‌شود. طبق "شکل 11- (a)" در این دو آزمایش ابتدا مجری نهایی در موقعیت (0.4,0.3) متر قرار دارد. سپس مجری نهایی توسط کنترلگر موقعیت به (0.4,0) متر خواهد رفت که در "شکل 11- (b)" مشاهده می‌شود. اکنون مؤلفه y مجری نهایی صفر شده است. حال کاربر مانند "شکل 11- (c)" وارد فضای کاری ربات شده و با اعمال نیرو به سنسور، باعث حرکت ربات در جهت مثبت محور x خواهد شد. این حرکت تا زمانی که کاربر به سنسور، نیرو وارد کند ادامه خواهد یافت. همچنین تولید مسیر تا نزدیکی نقطه تکین یعنی (0.7,0) متر ادامه خواهد داشت. در حقیقت علت انجام آزمایش‌ها به این شیوه، عدم دسترسی به یک

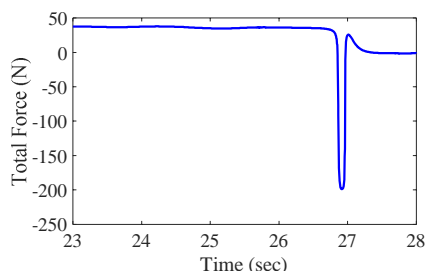


Fig. 13 Force formed by actual and virtual forces (1st experiment)
 شکل 13 نیروی تشکیل شده از نیروی واقعی و مجازی (آزمایش اول)

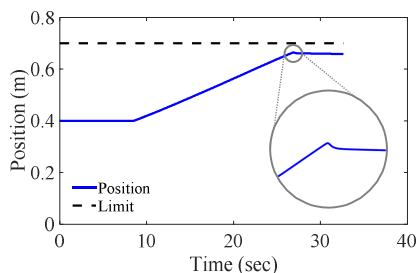


Fig. 14 End-effector position in the x direction (1st experiment)
 شکل 14 موقعیت مجری نهایی در راستای محور x (آزمایش اول)

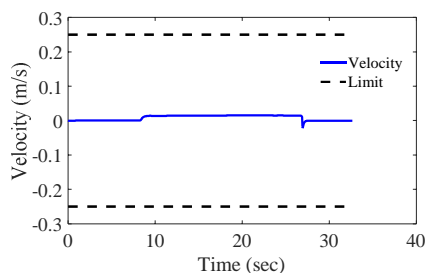


Fig. 15 End-effector velocity in the x direction (1st experiment)
 شکل 15 سرعت مجری نهایی در راستای محور x (آزمایش اول)

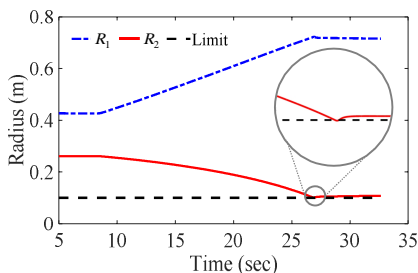


Fig. 16 First and second radius of manipulability ellipsoid (1st experiment)
 شکل 16 شعاع اول و دوم بیضیگون حرکت پذیری (آزمایش اول)

2-5- آزمایش دوم

مانند آزمایش قبل، ربات بوسیله کنترلگر موقعیت در محل مناسب قرار می‌گیرد. در ادامه کاربر مجری نهایی ربات را گرفته و مسیر مناسب را با اعمال نیرو به سنسور در جهت مثبت محور x تولید می‌کند. زمانی که فاصله موقعیت مجری نهایی تا نقاط تکین باعث تولید نیروی مجازی شد و اثر تولید این نیرو منجر به مخالفت ربات با ادامه مسیر گشت، کاربر برخلاف آزمایش اول بر ادامه مسیر خود اصرار می‌ورزد. در حقیقت بوسیله این آزمایش قابلیت رویکرد پیشنهادی در برخورد با نیروی مداومی که از سوی کاربر به مجری

داسل¹ بوده و ظرفیت آن 100 کیلوگرم فورس² می‌باشد. سنسور نیرو و تقویت‌کننده آن را در "شکل 1" بخش یک مشاهده می‌کنید. وظیفه تقویت‌کننده، فیلتر کردن نویزها و تقویت سیگنال اصلی است [25]. تفاوت اصلی دو آزمایش طراحی شده در نحوه اعمال نیروی کاربر به سنسور می‌باشد. در آزمایش اول، کاربر با احساس اولین مخالفت ربات با ادامه حرکت، از تولید مسیر خودداری می‌کند. اما در آزمایش دوم کاربر با وجود احساس مخالفت ربات با ادامه حرکت، بر تولید مسیر خود اصرار می‌ورزد. رویکرد پیشنهادی به ویژه در مورد آزمایش دوم باید توانایی جلوگیری از تکین شدن ربات را دارا باشد.

1-5- آزمایش اول

ابتدا کنترلگر، مجری نهایی ربات را در راستای محور x قرار داده است. سپس نیروی خارجی به سنسور اعمال شده تا مجری نهایی در جهت مثبت محور x حرکت کند. مقدار نیروی واقعی و مجازی و همچنین موقعیت تولید شده توسط بلوک امپدانس برای مجری نهایی ربات، در "شکل 12" تا "شکل 14" نشان داده شده‌اند. طبق "شکل 13" و معادله (12) نیروهای واقعی و مجازی با هم جمع شده و به صورت یک نیرو، به بلوک کنترل امپدانس داده خواهند شد. البته در این شکل به دلیل نمایش بهتر، از لحظه 23 تا 28 ثانیه بزرگنمایی شده است. تمامی تغییرات موقعیت نشان داده شده در "شکل 14" ناشی از نیروی تماسی است زیرا همان‌طور که بیان شد، کنترلگر موقعیت ربات فقط در ابتدای حرکت و در راستای محور y دخالت داشته است. در "شکل 15"، سرعت مجری نهایی ربات در راستای محور x نشان داده شده است. مقدار اشباع براساس استاندارد ایزو 10218-1، 0.25 متر بر ثانیه تعیین شده است [9]. در این آزمایش به علت تنظیم ضرایب امپدانس روی مقادیر زیاد، حرکت ربات کند بوده و سرعت آن به مقدار اشباع نمی‌رسد. از این رو مسیر تولید شده بدون اعمال شرط اشباع به کنترلگر ربات داده خواهد شد.

در "شکل 16"، مقدار شعاع‌های بیضیگون حرکت‌پذیری برای این آزمایش قابل مشاهده است. این شکل از لحظه 5 ثانیه تا انتهای حرکت رسم شده تا تغییرات آن به دلیل اعمال نیروی کاربر، واضح‌تر دیده شود. مشاهده می‌شود تقریباً در لحظه 27 ثانیه، مقدار شعاع از حد مجاز کمتر شده است. براساس رویکرد به کار گرفته شده، در این لحظه مجری نهایی در حال نزدیک شدن به تکنیکی است بنابراین نیروی مجازی در جهت مناسب بوجود آمده و از تکین شدن ربات جلوگیری می‌کند. پیش از این نیز اشاره شد که در این آزمایش کاربر به محض احساس مخالفت ربات با ادامه حرکت، تولید مسیر را متوقف می‌کند.

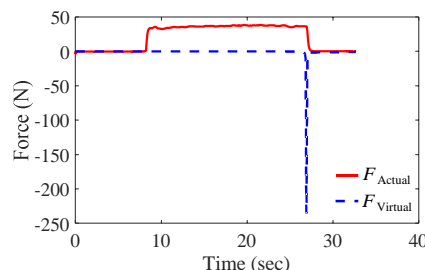


Fig. 12 Actual and virtual forces (1st experiment)
 شکل 12 نیروی واقعی و مجازی (آزمایش اول)

¹ DACELL
² kgf

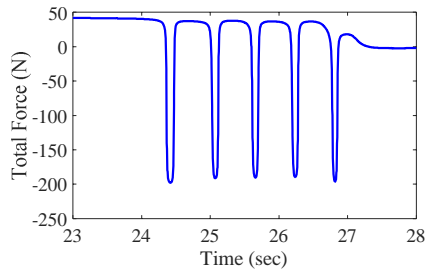


Fig. 18 Force formed by actual and virtual forces (2nd experiment)
 شکل 18 نیروی تشکیل شده از نیروی واقعی و مجازی (آزمایش دوم)

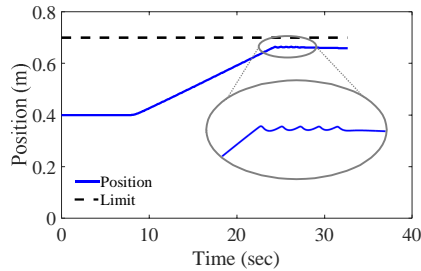


Fig. 19 End-effector position in the x direction (2nd experiment)
 شکل 19 موقعیت مجری نهایی در راستای محور x (آزمایش دوم)

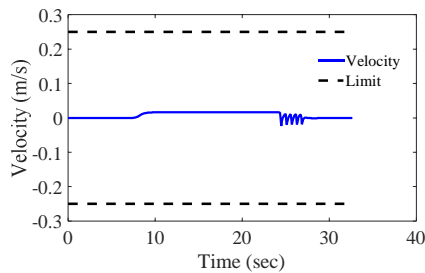


Fig. 20 End-effector velocity in the x direction (2nd experiment)
 شکل 20 سرعت مجری نهایی در راستای محور x در (آزمایش دوم)

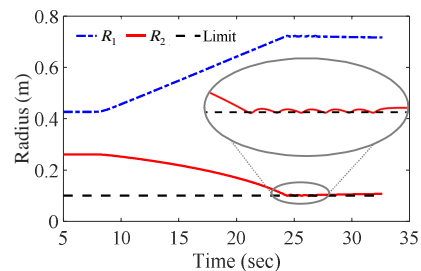


Fig. 21 First and second radius of manipulability ellipsoid (2nd experiment)
 شکل 21 شعاع اول و دوم بیضیگون حرکت پذیری در (آزمایش دوم)

6- نتیجه گیری

در این مقاله به پیاده‌سازی عملی راهنمایی دستی ربات‌ها به روش کنترل امپدانس و برای تولید مسیر پرداخته شد. مسیر موردنظر با راهنمایی دستی ربات توسط کاربر حرفه‌ای و از طریق اعمال نیرو به سنسور نصب شده در مجری نهایی ربات تولید شد. این نیرو بوسیله کنترل امپدانس به موقعیت در فضای کارترین تبدیل شده است.

دوری از نقاط تکین به عنوان ویژگی اصلی روش ارائه شده برای اجتناب از خطرات جانی برای کاربری که وارد فضای کاری ربات شده است به صورت بلادرنگ از طریق روش بیضیگون حرکت‌پذیری مورد بررسی و پیاده‌سازی

نهایی و به سوی تکینگی اعمال خواهد شد، سنجیده می‌شود. نتایج این آزمایش در "شکل 17" تا "شکل 21" نشان داده شده است.

طبق "شکل 21" با اولین کاهش مقدار شعاع از حد مجاز، نیروی مجازی طبق "شکل 17" بوجود آمده و با تولید مسیر در این جهت مخالفت می‌کند. به دلیل اصرار کاربر به ادامه تولید مسیر در جهت نزدیک شدن به حالت تکین، مقدار شعاع چندین بار از حد مجاز عبور کرده است. بنابراین نیروی مجازی نیز به دلیل کاهش شعاع از حد مجاز به دفعات تولید شده است. طبق "شکل 19" کاربر چندین مرتبه مخالفت ربات با ادامه تولید مسیر را احساس نموده تا در نهایت از ادامه فرآیند صرف نظر کرده است.

5-3- مقایسه آزمایش اول و دوم

برای درک بهتر تفاوت دو آزمایش انجام شده، موقعیت مجری نهایی ربات در فضای کاری مورد بررسی قرار می‌گیرد. طبق توضیحات بیان شده، موقعیت در ابتدای حرکت و در راستای منفی محور y به وسیله کنترلگر موقعیت از (0.4, 0.3) متر به (0.4, 0) متر تغییر می‌کند تا به حالتی برسد که مؤلفه y موقعیت مجری نهایی صفر شود. این مسیر، موقعیت مطلوب ربات بوده که در "شکل 22" و "شکل 23" با خط-نقطه مشکی مشخص است. این مسیر به صورت آفلاین و پیش از شروع فرآیند راهنمایی دستی تولید شده است. در ادامه و تا انتهای حرکت مجری نهایی در راستای مثبت محور x، نیروی وارد شده به سنسور نیرو از طرف کاربر به کمک کنترل امپدانس به موقعیت تبدیل می‌شود. این مسیر، موقعیت واقعی ربات بوده که از (0.4, 0) متر تا انتهای حرکت به وسیله کاربر و در جهت مثبت محور x تولید شده است. در "شکل 22" و "شکل 23" موقعیت واقعی مجری نهایی با خط قرمز نشان داده شده است. از نمای دور موقعیت واقعی مجری نهایی در "شکل 22" و "شکل 23" شبیه یکدیگر است. اما بررسی دقیق‌تر موقعیت واقعی مجری نهایی به صورت بزرگنمایی شده نیز صورت گرفته است. قسمت بزرگنمایی شده در "شکل 22" نشان دهنده جلوگیری رویکرد پیشنهادی از حرکت مجری نهایی در راستای مثبت محور x به هنگام نزدیک شدن به حالت تکین است. این موضوع در "شکل 23" چندین بار رخ داده است زیرا کاربر به ادامه مسیر خود اصرار می‌ورزد.

براساس "شکل 22" و "شکل 23" می‌توان نتیجه گرفت اعمال رویکرد پیشنهاد شده برای پرهیز از نقاط تکین مانند مفهوم دیوار مجازی در [8] عمل می‌کند. با این تفاوت اساسی که دیوار مجازی به وجود آمده در این پژوهش با شناسایی نقاط تکین و جهت نزدیک شدن مجری نهایی به آن‌ها، در فاصله از پیش تعریف شده نسبت به این نقاط بوجود می‌آید که این موضوع باعث افزایش فضای کاری ایمن برای کاربر می‌گردد. در صورتی که مجری نهایی از فاصله تعیین شده عبور کند، کاربر هشدار لازم را از طریق مخالفت ربات با ادامه تولید مسیر متوجه خواهد شد.

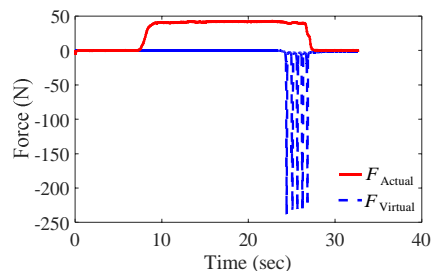


Fig. 17 Actual and virtual forces (2nd experiment)
 شکل 17 نیروی واقعی و مجازی (آزمایش دوم)

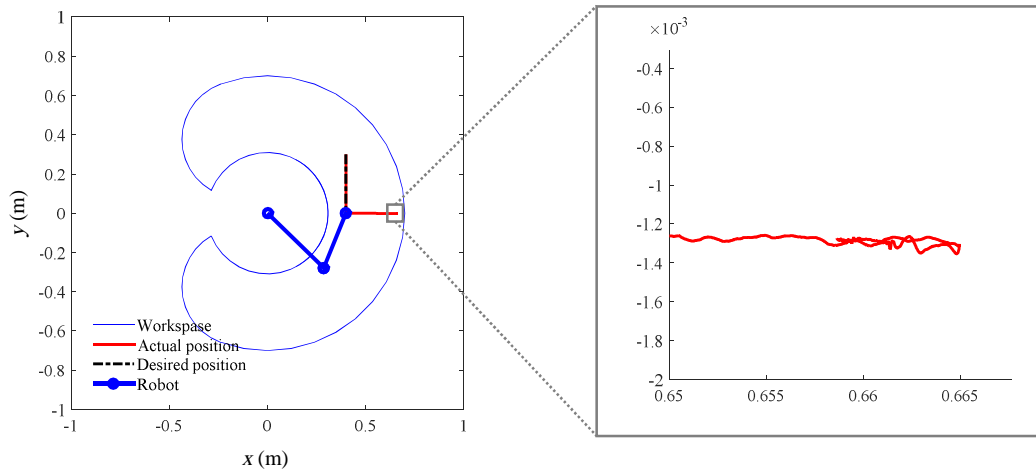


Fig. 22 End-effector position in the workspace of the FUM SCARA robot and the magnified view of the trajectory while virtual force is produced (1st experiment)

شکل 22 موقعیت مجری نهایی در فضای کاری ربات فام اسکرا و نمای بزرگنمایی شده آن در انتهای مسیر و هنگام بوجود آمدن نیروی مجازی (آزمایش اول)

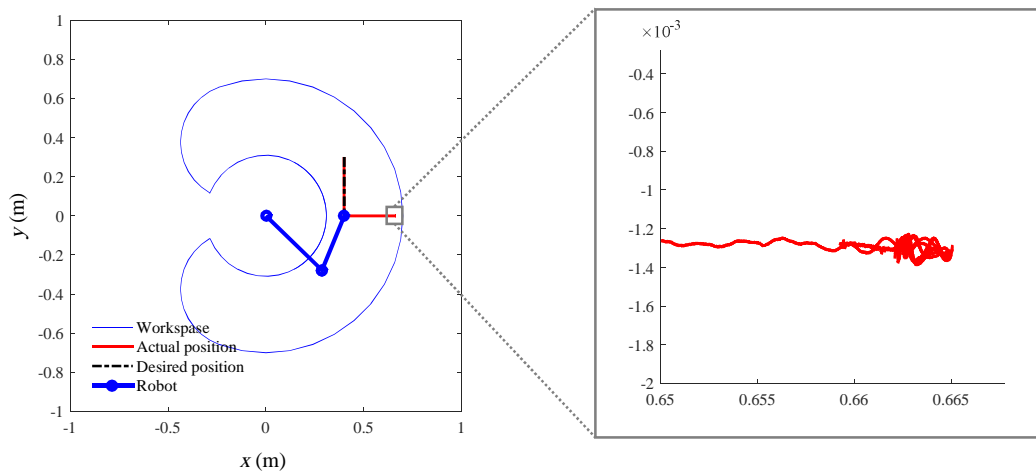


Fig. 23 End-effector position in the workspace of the FUM SCARA robot and the magnified view of the trajectory while virtual force is produced (2nd experiment)

شکل 23 موقعیت مجری نهایی در فضای کاری ربات فام اسکرا و نمای بزرگنمایی شده آن در انتهای مسیر و هنگام بوجود آمدن نیروی مجازی (آزمایش دوم)

آزمایش دوم به تولید مسیر ادامه داده است. قابلیت رویکرد پیشنهادی در برخورد با اصرار کاربر به ادامه حرکت به سوی نقاط تکین رضایت بخش بود، بنابراین در هر دو مورد کاربر هشدار لازم را دریافت کرده و از ادامه فرآیند صرف نظر کرده است.

7- مراجع

- [1] M. Vukobratovic, D. Surdilovic, Y. Ekalo, D. Katic, *Dynamics and Robust Control of Robot-Environment Interaction*, Vol. 2, pp. 1-2, Singapore: World Scientific, 2009.
- [2] T. Yoshikawa, *Foundations of Robotics: Analysis and Control*, pp. 127-154, United States of America: MIT Press, 1990.
- [3] O. M. Al-Jarrah, Y. F. Zheng, Arm-manipulator coordination for load sharing using compliant control, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 1000-1005, 1996.
- [4] O. M. Al-Jarrah, Y. F. Zheng, Arm-manipulator coordination for load sharing using variable compliance control, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 895-900, Albuquerque, New Mexico, 1997.
- [5] O. M. Al-Jarrah, Y. F. Zheng, Arm-manipulator coordination for load sharing using reflexive motion control, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 2326-2331, Albuquerque, New Mexico, 1997.

عملی قرار گرفت. در صورت کمتر شدن فاصله به نقاط تکین از حد مجاز و با بکارگیری یک رویکرد پیشنهادی ساده، نیروی مجازی در جهت مخالف با تکینگی تولید شد. سپس این نیرو به کمک معادله امپدانس به موقعیت تبدیل شد. کاربر چنین احساس می‌کند که ربات با ادامه تولید مسیر مخالفت می‌کند. از این رو از ادامه فرآیند دست کشیده و آن را متوقف می‌کند. در صورت رضایت کاربر حرفه‌ای از مسیر تولید شده به روش راهنمایی دستی، این مسیر ذخیره شده و پس از خروج انسان از فضای کاری، فراخوانی شده و فرآیند مورد نظر انجام خواهد گرفت.

در آزمایش‌های انجام شده و با توجه به فشاری بودن سنسور نیرو، در صورت بوجود آمدن نیروی مجازی، امکان تغییر مسیر برای ربات وجود ندارد و فقط می‌توان حرکت ربات را متوقف نمود. نتایج آزمایشگاهی به خوبی نشان‌دهنده تولید مسیر مطلوب توسط کاربر بوده و همچنین صحت کارکرد رویکرد پیشنهادی در نحوه برخورد با مسأله تکینگی نشان داده شده است. دو آزمایش برای سنجش این رویکرد طراحی و انجام گردید. کاربر در آزمایش اول، به محض احساس مخالفت ربات، تولید مسیر را متوقف کرده ولی در

- Automation, Vol. 4, pp. 741-750, 1987.
- [17] N. H. Arbab, F. Najafi, Impedance control of a pneumatic actuator with solenoid on/off valves, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 12-20, 2014 (in Persian فارسی).
- [18] V. Khoshdel, A. Akbarzadeh, Robust impedance control for rehabilitation robot, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 8, pp. 429-437, 2015 (in Persian فارسی).
- [19] A. Lopes, F. Almeida, A force-impedance controlled industrial robot using an active robotic auxiliary device, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 24, No. 3, pp. 299-309, 2008.
- [20] M. Shariatee, A. Akbarzadeh, A. Mousavi, S. Alimardani, Design of an economical SCARA robot for industrial applications, *The Second International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM)*, pp. 534-539, Tehran, 2014.
- [21] A. Mousavi, A. Akbarzadeh, M. Shariatee, S. Alimardani, Design and construction of a linear-rotary joint for robotics applications, *The Third International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM)*, pp. 229-233, Tehran, 2015.
- [22] A. Mousavi, A. Akbarzadeh, M. Shariatee, S. Alimardani, Repeatability analysis of a SCARA robot with planetary gearbox, *The Third International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM)*, pp. 640-644, Tehran, 2015.
- [23] J. J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, Third Edition, pp. 151-152, United States of America: Pearson Prentice Hall Upper Saddle River, 2005.
- [24] T. Yoshikawa, Translational and rotational manipulability of robotic manipulators, *Proceedings of the International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON)*, Vol. 2, pp. 1170-1175, Kobe, 1991.
- [25] *Dacell, Compression & Tension - CMM2*, Accessed on 12 Nov 2015; <http://www.dacell.com/en/loadcell/show/view/cno/10/page/2/id/743>.
- [6] M. H. Ang Jr, W. Lin, S.-Y. Lim, A walk-through programmed robot for welding in shipyards, *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 26, No. 5, pp. 377-388, 1999.
- [7] G. Ferretti, G. Magnani, P. Rocco, Assigning virtual tool dynamics to an industrial robot through an admittance controller, *International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, pp. 1-6, Munich, 2009.
- [8] L. Bascetta, G. Ferretti, G. Magnani, P. Rocco, Walk-through programming for robotic manipulators based on admittance control, *Robotica*, Vol. 31, No. 07, pp. 1143-1153, 2013.
- [9] ISO, 10218-1: 2011 - Robots and Robotic Devices - Safety Requirements for Industrial Robots - Part 1: Robot Systems and Integration, International Organization for Standardization, 2011.
- [10] D. Massa, M. Callegari, C. Cristalli, Manual guidance for industrial robot programming, *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 42, No. 5, pp. 457-465, 2015.
- [11] T. Yoshikawa, Manipulability of robotic mechanisms, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 4, No. 2, pp. 3-9, 1985.
- [12] L. Huo, L. Baron, The joint-limits and singularity avoidance in robotic welding, *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 35, No. 5, pp. 456-464, 2008.
- [13] *Delta, Delta Electronics - INC*, Accessed on 20 Dec 2015; <http://www.deltaww.com/Products/CategoryListT1.aspx?CID=060201&PID=225&hl=en-US&Name=ASDA-B2%20Series>.
- [14] N. Hogan, Impedance control - An approach to manipulation. Part I - Theory, Part II - Implementation, Part III - Applications, *ASME Transactions Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 107, pp. 1-24, 1985.
- [15] M. M. Ataei, H. Salarieh, A. Alasty, Adaptive impedance control of exoskeleton robot, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 7, pp. 111-126, 2013 (in Persian فارسی).
- [16] H. Kazerooni, Robust, non-linear impedance control for robot manipulators, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and*