



## رویکردی جدید و آنلاین برای پرهیز از نقاط تکین در راهنمایی دستی ربات‌های صنعتی با استفاده از کنترل امیدانس متغیر

علی موسوی محمدی<sup>1</sup>، علیرضا اکبرزاده<sup>2\*</sup>

1- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

\* مشهد، صندوق پستی 9188877861، ali\_akbarzadeh@um.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 09 شهریور 1395

پذیرش: 18 مهر 1395

ارائه در سایت: 18 آبان 1395

کلید واژگان:

راهنمایی دستی

ربات‌های صنعتی

تولید مسیر

کنترل امیدانس

بیضیگون حرکت‌پذیری

### چکیده

در این مقاله فرآیند تولید مسیر برای ربات‌های صنعتی به روش راهنمایی دستی، با در نظر گرفتن دوری از نقاط تکین به صورت بلادرنگ بررسی می‌شود. ویژگی بارز این رویکرد دوری از تکینگی است که از طریق تغییر پارامترهای کنترل امیدانس در فاصله معین از نقاط تکین، هشدار لازم به کاربر داده خواهد شد. مجری نهایی ربات به یک سنسور نیرو مجهز شده که کاربر آن را در دست می‌گیرد و مسیر مورد نظرش را تولید می‌کند. این مسیر از طریق راهنمایی دستی مجری نهایی ربات برای فرآیندهایی نظیر جوش کاری و رنگ‌زنی تولید شده و به وسیله کنترلگر ربات ذخیره می‌گردد. هنگام تولید مسیر، احتمال وقوع تکینگی ربات بوسیله کاربر وجود دارد. بنابراین باید شناسایی فاصله و راستای تکینگی ربات حین تولید مسیر به صورت آنلاین انجام شود زیرا نزدیکی به نقاط تکین می‌تواند منجر به سرعت زیاد و ناگهانی مفاصل ربات شود. این موضوع با توجه به حضور فیزیکی کاربر در فضای کاری ربات، ایمن نخواهد بود. به منظور شناسایی تکینگی، از روش ساده بیضی‌گون حرکت‌پذیری استفاده شده است که به دلیل حجم محاسبات کم، امکان پیاده‌سازی آنلاین آن وجود دارد. به علاوه در رویکرد پیشنهادی جهت حفظ ایمنی، سرعت مجری نهایی در مقداری مشخص، اشباع خواهد شد. مزیت اصلی این رویکرد امکان پیاده‌سازی بلادرنگ و تضمین سلامت کاربر به دلیل دوری از تکینگی می‌باشد. آزمایش‌های عملی برای بررسی رویکرد پیشنهادی روی ربات اسکرا انجام شده است. بررسی نتایج پیاده‌سازی آزمایش‌ها نشانگر توانایی رویکرد پیشنهادی در برخورد با مسأله تکینگی در حین راهنمایی دستی توسط کاربر است.

## A new on-line singularity avoidance approach for manual guidance of industrial robots using variable impedance control

Ali Mousavi Mohammadi, Alireza Akbarzadeh\*

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

\* P.O.B. 9188877861, Mashhad, Iran, ali\_akbarzadeh@um.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 30 August 2016

Accepted 09 October 2016

Available Online 08 November 2016

### Keywords:

Manual Guidance

Industrial Robots

Path Generation

Impedance Control

Manipulability Ellipsoid

### ABSTRACT

This paper studies path generation using manual guidance procedure for industrial robots by considering real-time singularity avoidance. Main feature of the proposed approach is singularity avoidance by varying impedance control parameters in preset distance from singularity in order to warn operator. Robot end-effector is equipped with a force sensor which the operator grasps, thereby producing the desired path. The desired end-effector path is generated by operator's manual guidance for applications such as welding and spray painting and is recorded by robot controller. Robot singular configuration is possible during the manual guidance. So real-time detection of singularity position and orientation have to be considered during path generation because it can lead to unexpected high robot joint velocity. This problem is not safe due to physical human-robot interaction. Manipulability ellipsoid method is utilized for singularity identification. The method can be utilized on-line due to its simple and low calculation process. On the other hand, the end-effector velocity is saturated in a specific value in the approach considering safety issues. Two main advantages of the proposed approach are real-time application and high safety because of the singularity avoidance. Experiments are applied on a SCARA robot to study the effectiveness of the proposed approach. Experimental results show the ability of proposed approach in dealing with singularity problem during the manual guidance.

### 1- مقدمه

موقعیت نتیجه مناسب نخواهد داشت بلکه کنترل نیروی تماسی<sup>1</sup> بوجود آمده بین ربات و محیط پیرامون لازم است. فرآیندهایی مانند اسمبلی<sup>2</sup>، پولیش

ربات‌های صنعتی به منظور انجام دقیق و سریع برخی وظایف در صنعت به کار گرفته می‌شوند. برای انجام بسیاری از این وظایف، تنها به‌کارگیری کنترل

<sup>1</sup> Contact force

<sup>2</sup> Assembly

Please cite this article using:

A. Mousavi Mohammadi, A. Akbarzadeh, A new on-line singularity avoidance approach for manual guidance of industrial robots using variable impedance control, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 311-322, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Mousavi Mohammadi, A. Akbarzadeh, A new on-line singularity avoidance approach for manual guidance of industrial robots using variable impedance control, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 311-322, 2016 (in Persian)

بر اساس استانداردهای ایزو، مورد بررسی قرار نگرفته است. معمولاً مشکل تکنیکی و نحوه برخورد با آن در ربات‌های صنعتی به کمک سیستم ایمنی کنترلر ربات‌ها انجام می‌شود [9]. یعنی کنترلر ربات در صورت نزدیکی به نقطه تکین متوقف شده و هشدار لازم را به صورت دیداری یا شنیداری به کاربر می‌دهد تا ربات از موقعیت خطرناک دور شود. معمولاً مانند [8] قسمتی از فضای کاری ربات برای راهنمایی دستی انتخاب می‌شود که این موضوع منجر به از دست دادن بخش زیادی از فضای کاری ربات خواهد شد.

در این مقاله مشکل تکنیکی در حین راهنمایی دستی ربات مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد. شناسایی ربات و فاصله تا تکنیکی به کمک روش بیضیگون حرکت‌پذیری انجام خواهد شد [12]. با استفاده از این روش، کاربر در فضایی به دور از تکنیکی با ربات تعامل می‌کند و بدین صورت از حداکثر فضای کاری استفاده خواهد شد. به کمک روش بیضیگون حرکت‌پذیری در فاصله مشخص از تکنیکی، سفتی و میرایی کنترل امیدانس تغییر می‌کند. بدین صورت که سفتی و میرایی مجازی تولید شده و به سفتی و میرایی اولیه اضافه خواهد شد. بنابراین کاربر نمی‌تواند به آسانی گذشته به فرآیند ادامه دهد، بنابراین نزدیکی به تکنیکی به کاربر هشدار داده خواهد شد.

در ادامه و در بخش دو، مفهوم کنترل امیدانس به صورت خلاصه معرفی و سپس نحوه به‌کارگیری آن برای راهنمایی دستی ربات‌های صنعتی توضیح داده می‌شود. در بخش سوم مقاله حاضر، تکنیکی، روش بیضیگون حرکت‌پذیری و رویکرد پیشنهادی برای دوری از نقاط تکین شرح داده می‌شود. در بخش چهارم، ربات فام اسکر<sup>6</sup> معرفی شده و فضای کاری آن بررسی گردیده است. بخش پنجم به پیاده‌سازی عملی آزمایش‌های عملی روی ربات فام اسکر<sup>6</sup> پرداخته و بخش ششم شامل جمع‌بندی آزمایش‌ها و نتیجه‌گیری می‌باشد.

## 2- کنترل امیدانس

روش کنترل امیدانس توسط هوگان در مبحث کنترل نیروی تماسی بوجود آمده بین ربات و محیط پیرامونش مطرح شد [13]. به کمک این روش می‌توان خصوصیات دینامیک مطلوب یک ربات که در تعامل فیزیکی با محیط است را بر اساس نظر طراح تنظیم نمود [14, 15]. امیدانس مکانیکی ربات، گسترش یافته مفهوم سفتی یک ربات است که به هنگام وجود نیروی تماسی مطرح می‌شود. امیدانس مکانیکی مطلوب برای مجری نهایی ربات توسط محرک‌ها و به کمک پس‌خورد موقعیت و نیرو بدست می‌آید [2]. منظور از امیدانس مکانیکی، سفتی، میرایی و جرم (یا اینرسی) می‌باشد که نشان‌دهنده رفتار ربات هنگام وجود نیروی تماسی خواهد بود. همان‌طور که بیان شد، امیدانس مکانیکی که از این پس به صورت خلاصه امیدانس نامیده می‌شود، بر اساس نظر طراح و از طرفی سعی و خطا تعیین می‌شود. معادله کلی حاکم بر کنترل امیدانس به شکل معادله (1) است [2].

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

در این معادله  $\ddot{X}_e$ ،  $\dot{X}_e$ ،  $X_e$ ،  $M_t$ ،  $B_t$  و  $K_t$  به ترتیب نشان‌دهنده بردارهای خطای موقعیت، خطای سرعت و خطای شتاب مجری نهایی، نیروی تماسی، ماتریس‌های اینرسی، میرایی و سفتی مطلوب می‌باشند. همچنین بردار خطا طبق رابطه (2) محاسبه می‌شود.

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

ماتریس‌های  $M_t$ ،  $B_t$  و  $K_t$ ، قطری و متقارن هستند که مقادیرشان بر اساس نظر طراح و نوع کار ربات تعیین می‌شود. به‌عنوان مثال برای ربات

زنی<sup>1</sup> و پلیسه برداری<sup>2</sup> از جمله این وظایف است [1]. کنترل امیدانس با تنظیم مفهوم امیدانس مکانیکی نسبت داده شده به ربات، به کنترل نیروی تماسی به‌وجود آمده بین ربات و محیط پیرامون -شامل انسان- می‌پردازد. کنترل امیدانس جهت پیاده‌سازی عملی به پس‌خورد موقعیت و نیرو نیاز دارد [2]. از طرف دیگر، تولید مسیر برای ربات‌های صنعتی، کاری مشکل و زمانگیر است. به‌خصوص زمانی که بحث تعامل ربات با محیط و کنترل نیروی تماسی نیز مطرح باشد. نخستین بار در [3-5] روشی برای تعامل ربات و انسان معرفی شد که امروزه اساس روش راهنمایی دستی ربات‌های صنعتی به کمک کنترل امیدانس است. این روش برای جوشکاری و پاشیدن رنگ توسط ربات، به ترتیب در [6] و [7] بررسی شده است. مارسلو و همکاران با به‌کارگیری کنترل امیدانس و نسبت دادن امیدانس مطلوب به ربات، رویکرد ارائه شده را توسعه داده و در زمینه تولید مسیر برای ربات‌های جوش کار پیاده‌سازی عملی نمودند [6]. در این روش کاربر پس از ورود به فضای کاری ربات و گرفتن نهایی -که مجهز به سنسور نیرو شده است- مسیر مطلوب را به ربات آموزش می‌دهد. این مسیر توسط کنترلر ذخیره می‌شود و سپس بدون حضور کاربر و در زمان مناسب فراخوانی گردیده تا فرآیند مورد نظر را انجام دهد. باسچتا و همکاران نیز با بکارگیری روش یاد شده، به تولید مسیر برای مجری نهایی ربات جهت پلیسه برداری<sup>3</sup> از رینگ چرخ یک خودرو پرداخته‌اند [8]. ایشان دینامیک ابزاری که کاربر هنگام کار با ربات احساس می‌کند محاسبه کرده و در معادلات ربات لحاظ نموده‌اند تا کاربر احساس واقعی‌تری از فرآیند داشته باشد. از طرفی به دلیل ایجاد شرایط ایمن برای کاربری که وارد فضای کاری ربات شده است، سرعت مجری نهایی هنگام رسیدن به مقدار مشخصی، به وسیله یک تابع اشباع می‌شود. همچنین بخشی از فضای کاری ربات به صورت مجازی جدا شده تا کاربر بدون خطر جانی با ربات تعامل کند. دو روش اخیر، بر اساس استاندارد ایزو 10218-1 ارائه شده‌اند [9]. در این استاندارد شرایط لازم برای حفظ امنیت جانی کاربر حین کار با ربات‌ها و سیستم‌های رباتیکی صنعتی ارائه شده است. کاهش زمان تولید مسیر مطلوب برای پلیسه‌برداری از رینگ چرخ یک خودرو از چند هفته به چند ساعت، نتیجه شاخص [8] است.

در سال‌های اخیر موضوع راهنمایی دستی ربات به دلیل مزایای فراوان این روش، بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. بررسی کامل استانداردهای ایزو مرتبط با راهنمایی دستی ربات‌ها و مروری بر تاریخچه این راهکار و روش‌های پیاده‌سازی آن در [10] انجام گرفته است. روش مبتنی بر شبیه‌سازی تعامل با ربات برای راهنمایی دستی توسط کاربر در [11] ارائه شده است. دلیل اصلی استفاده از شبیه‌سازی، وجود کنترلر موقعیت دقیق و البته غیر قابل دسترس برای طراح، در اکثر ربات‌های صنعتی است که استفاده از روش‌های کنترل نیرو را مشکل می‌نماید. در این روش، رفتار دینامیک کاربر توسط نرم‌افزار گرفته شده<sup>4</sup> و تعامل او با ربات در نرم‌افزار رخ می‌دهد.

معمولاً معادلات تعامل ربات با انسان به دلیل حضوری فیزیکی کاربر در فضای کاری، در فضای کارترین نوشته می‌شود. بنابراین به دلیل نیاز به معکوس ماتریس جاکوبین برای نگاشت بین فضای کارترین و مفصل، احتمال وقوع تکنیکی وجود دارد. بر اساس مطالعات انجام شده، تاکنون مشکل تکنیکی<sup>5</sup> ربات‌ها در حین تولید مسیر به‌وسیله راهنمایی دستی کاربر،

<sup>1</sup> Polishing

<sup>2</sup> Deburring

<sup>3</sup> Deburring

<sup>4</sup> Capture

<sup>5</sup> Singularity

<sup>6</sup> FUM SCARA

وجود سیگنال نیروی تماسی، حلقه بیرونی تأثیری در کنترل موقعیت ربات نخواهد داشت.

2-2- کنترل امپدانس برای راهنمایی دستی

همان‌طور که در بخش قبلی بیان شد، جهت استفاده از کنترل امپدانس برای راهنمایی دستی ربات‌ها باید از روش کنترل امپدانس براساس موقعیت استفاده نمود. علاوه بر این باید دو مورد زیر را رعایت نمود تا مسیر مورد نظر کاربر تولید شود:

- 1- مسیر مطلوب که قبل از حرکت ربات و به صورت آفلاین تولید شده، برای تمامی درجات آزادی، صفر در نظر گرفته شود (شکل 2).
  - 2- مقدار سفتی نیز باید در معادله امپدانس صفر فرض شود.
- بنابراین ماتریس سفتی و موقعیت مطلوب که به صورت آفلاین تولید شده است، طبق رابطه (3) خواهند بود.

$$\begin{aligned} \vec{\theta}_d &= \vec{0} \\ K_t &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

پس از اعمال دو مورد فوق، معادله (1) برای راستای  $x$  بدین صورت بازنویسی می‌شود:

$$\ddot{x} = \frac{1}{M_{t_x}} (F_{e_x} - B_{t_x} \dot{x}) \quad (4)$$

که به کمک این معادله و دو بار انتگرال‌گیری از آن، موقعیت معادل با نیروی تماسی وارد شده به ربات به دست خواهد آمد (شکل 3). واضح است در مقدار موقعیت به دست آمده، ماتریس جرم و میرایی دخالت مستقیم دارند.

سری دو درجه آزادی صفحه‌ای، با توجه به تعداد درجات آزادی، تمام بردارها و ماتریس‌های معادله (1) به ترتیب 2 مؤلفه و  $2 \times 2$  خواهند بود. بنابراین ربات مورد مطالعه مانند "شکل 1"، معادل با سیستم جرم، فنر و میراگر دو درجه آزادی خواهد بود. یعنی دو قسمت مشخص شده با خط-چین در "شکل 1" معادل یکدیگر هستند.

1-2- کنترل امپدانس بر اساس موقعیت

معمولاً کنترل امپدانس براساس یکی از روش‌های زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد: کنترل امپدانس براساس موقعیت یا کنترل امپدانس براساس نیرو. تفاوت این دو روش در جایگاه کنترل امپدانس در حلقه کنترلی است [11]. از طرفی به دلیل پیاده‌سازی کنترل امپدانس روی ربات‌های صنعتی، دسترسی به کنترلگر موقعیت ربات برای اعمال تغییرات دلخواه طراح، به سادگی میسر نخواهد بود. بنابراین باید از روشی استفاده نمود که بدون نیاز به اعمال تغییرات در کنترلگر موقعیت، توانایی تعامل با محیط را دارا باشد. این شیوه که کنترل امپدانس براساس موقعیت نام دارد برای پیاده‌سازی روی ربات‌های صنعتی مناسب است [16].

در روش کنترل امپدانس براساس موقعیت، حلقه کنترل نیرو به دور حلقه کنترل موقعیت بسته شده و در صورتی که نیرویی به سنسور وارد نشود، حلقه بیرونی (یعنی کنترل نیرو) تأثیری در کنترل موقعیت ربات نخواهد داشت [17]. به همین دلیل می‌توان از این روش برای ربات‌های صنعتی استفاده نمود، زیرا بدون هیچ تغییری در کنترلگر موقعیت ربات، امکان استفاده از آن وجود دارد [8]. در "شکل 2" مشاهده می‌شود که بدون

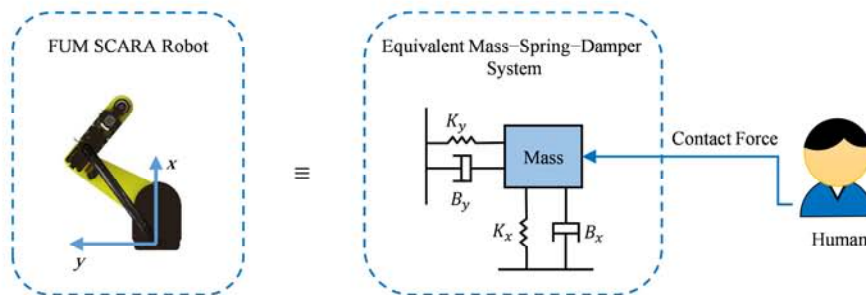


Fig. 1 Human robot interaction using impedance control concept

شکل 1 تعامل انسان با ربات به کمک مفهوم کنترل امپدانس

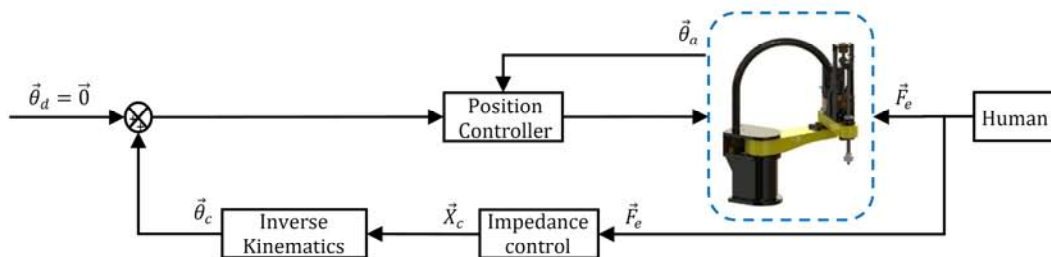


Fig. 2 Position based impedance control block-diagram

شکل 2 بلوک-دیاگرام کنترل امپدانس براساس موقعیت

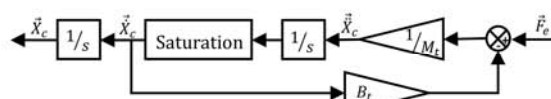


Fig. 3 Block-diagram solution of impedance control equation with saturation condition

شکل 3 بلوک-دیاگرام حل معادله کنترل امپدانس به همراه شرط اشباع

2- درونی: معمولاً زمانی که دو مفصل ربات در یک راستا قرار بگیرند (از مرز فضای کاری دور است).

براساس رابطه (5) و به کمک معکوس ماتریس جاکوبین، سرعت مجری نهایی به سرعت مفاصل ربات تبدیل می‌شود. در حقیقت به کمک این رابطه می‌توان سرعت مطلوب در فضای مفاصل را براساس سرعت مطلوب در فضای کارترین به دست آورد.

$$\vec{\theta} = J^{-1}\vec{X} \quad (5)$$

خطر اصلی که در هنگام وقوع تکینگی روی می‌دهد، بی‌نهایت شدن سرعت‌های مفاصل است. این موضوع در عمل منجر به صدمه دیدن موتورها به دلیل سرعت‌های بسیار زیاد خواهد شد. این مشکل در طراحی مسیر در نظر گرفته شده و تلاش می‌شود تا به روش‌های گوناگون از آن دوری شود.

نقاط تکین ربات مورد بحث در این پژوهش، به کمک معکوس ماتریس جاکوبین به دست می‌آیند. این ماتریس برای ربات سری دو درجه آزادی صفحه‌ای بدین صورت بدست می‌آید [19]:

$$J = \begin{bmatrix} -l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) - l_1 \sin(\theta_1) & -l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_1 \cos(\theta_1) & l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (6)$$

که معکوس آن بدین صورت محاسبه می‌شود:

$$J^{-1} = \frac{1}{\det(J)} \begin{bmatrix} l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & -l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) - l_1 \cos(\theta_1) \\ l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) - l_1 \sin(\theta_1) \end{bmatrix} \quad (7)$$

دترمینان<sup>2</sup> ماتریس جاکوبین نیز عبارت است از:

$$\det(J) = l_1 l_2 \sin(\theta_2) \quad (8)$$

که با توجه به مقدار دترمینان می‌توان گفت در صورتی که  $\theta_2$  صفر شود، معکوس ماتریس جاکوبین وجود ندارد. نقاطی که دارای این ویژگی هستند، با خط-نقطه قرمز رنگ در "شکل 4" نشان داده شده‌اند. ربات در پنج حالت تکین از جمله (0 و 0.7) نشان داده شده است که در این نقاط، لینک‌های ربات به صورت کشیده و در یک راستا می‌باشند. همچنین نقاط تکین مورد بحث، در مرز فضای کاری قرار گرفته‌اند، یعنی از نوع تکینگی مرزی می‌باشند.

### 3-2- روش بیضیگون حرکت پذیری

این روش برای بررسی حرکت‌پذیری و پیدا کردن بهترین وضعیت ربات توسط یوشیکاوا مطرح شد [12]. اساس این روش بر مبنای محاسباتی است که روی ماتریس جاکوبین انجام می‌شود. به کمک این روش می‌توان مقدار فاصله و همچنین جهت تکین شدن ربات را قبل از رسیدن به تکینگی به دست آورد. بنابراین با استفاده از این روش، قابلیت هشدار دادن به کاربر قبل از وقوع تکینگی وجود خواهد داشت. در حقیقت، این بیضی‌گون نشان دهنده توانایی حرکت ربات در جهت شعاع بزرگتر بیضی‌گون است [20,12]. در [12,2] نحوه محاسبه و رسم این بیضی‌گون به تفصیل برای تعدادی ربات از جمله یک ربات سری دو درجه آزادی صفحه‌ای بیان شده است. در ادامه به صورت خلاصه، روش به دست آوردن بردار شعاع‌های بیضی‌گون توضیح داده شده است. با داشتن بردار شعاع، رسم بیضی‌گون به آسانی انجام می‌شود.

- گام اول: محاسبه ماتریس جاکوبین

$$J(\vec{\theta}) \quad (9)$$

- گام دوم: محاسبه ماتریس زیر

$$J^* = J(\vec{\theta}) \times J^t(\vec{\theta}) \quad (10)$$

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

به دلیل استفاده از محیط سیمولینک<sup>1</sup> برای کنترل بلادرنگ ربات، بهتر است از روش بلوک-دیگرام برای نوشتن معادله امپدانس استفاده شود، زیرا امکان تغییر ضرایب امپدانس در حین فرآیند به آسانی وجود دارد. از طرفی به عنوان نمونه پیش از این در [18] از این شیوه نمایش برای کنترل امپدانس استفاده شده است. "شکل 3" معادله جدید کنترل امپدانس یعنی (4) را به صورت بلوک-دیگرام بیان می‌کند. طبق "شکل 3" بلوکی در نظر گرفته شده که سرعت تولید شده برای مجری نهایی ربات را در یک مقدار مشخص اشباع می‌کند. حد اشباع برای آن 0.25 متر بر ثانیه می‌باشد که براساس استاندارد ایزو 12018-1 تعیین شده است. تعریف این مقدار در استاندارد ایزو به دلیل حضور فیزیکی کاربر در فضای کاری در نظر گرفته شده تا مجری نهایی با سرعت زیاد حرکت نکند. انتظار می‌رود با به کارگیری این روش، سرعت مجری نهایی از 0.25 متر بر ثانیه بیشتر نشود. در بخش آزمایش‌ها قسمتی برای صحت‌سنجی این روش ارائه شده است.

می‌توان مزایای تولید مسیر برای ربات‌های صنعتی به روش راهنمایی دستی به کمک کنترل امپدانس، که پیش از این توسط محققان بدست آمده را به صورت موردی و به شکل زیر بیان نمود [11,8,6]:

- 1- تولید سریع مسیر مطلوب
- 2- نمایش بلادرنگ مسیر مطلوب
- 3- استفاده از تجربه کاربر حرفه‌ای
- 4- عدم نیاز به کاربر مسلط به دانش رباتیک
- 5- عدم نیاز به واسط کاربری
- 6- پیاده‌سازی آسان

در صورتی که بتوان قبل از وقوع تکینگی به کاربر هشدار داد و از تکین شدن ربات جلوگیری نمود، می‌توان مورد مهم دیگری به مزایای فوق افزود. این مورد تحت عنوان رویکرد پیشنهادی در این پژوهش و در بخش بعدی مورد بررسی و مطالعه قرار خواهد گرفت. در مقابل این مزایا تنها می‌توان به یک عیب اشاره نمود و آن قیمت زیاد سنسور نیرو است.

### 3- رویکرد پیشنهادی برای دوری از نقاط تکین

با توجه به حضور کاربر در فضای کاری ربات و تعامل فیزیکی او با ربات، حفظ سلامتی و جان انسان از اهمیت بسیاری برخوردار است. تکینگی ربات‌ها از جمله مشکلاتی است که طراحان مسیر سعی می‌کنند از آن دوری کنند، زیرا معمولاً منجر به سرعت‌های زیاد و غیر منتظره مفاصل ربات می‌شود. برای اعلام هشدار به کاربری که در فضای کاری ربات قرار دارد و مجری نهایی را به سمت نقاط تکین می‌برد، نیاز به آگاهی از اطلاعات زیر می‌باشد:

- 1- موقعیت مجری نهایی نسبت به موقعیت نقاط تکین
  - 2- راستای مجری نهایی نسبت به راستای نقاط تکین
- بنابراین باید به دنبال روشی بود تا علاوه بر تعیین مقدار فاصله از نقاط تکین، راستای این نقاط را به دست دهد.

#### 3-1- تکینگی

تکین شدن ربات از طریق عدم وجود معکوس ماتریس جاکوبین تعریف می‌شود. چنین حالتی، تکینگی ربات یا به صورت خلاصه تکینگی نامیده می‌شود [19]. از دید فضای کارترین، ربات در حالت تکینگی یک درجه آزادی از دست می‌دهد. تکینگی در دو حالت رخ می‌دهد [19]:

- 1- مرزی: زمانی که مجری نهایی ربات در مرز فضای کاری قرار دارد.

<sup>2</sup> determinant

<sup>1</sup> Simulink

تغییرات مقدار سفتی و میرایی یکسان و تابع اندازه شعاع کوچک بیضی‌گون حرکت‌پذیری است. بدین منظور تابعی به صورت "شکل 7" تعریف شده است. این تابع یعنی (16)، به صورت یک پله نرم و پیوسته می‌باشد. در صورت بزرگتر بودن مقدار شعاع از 0.1 خروجی آن صفر و در صورت کوچکتر بودن از 0.1، مقدار آن به 250 افزایش خواهد یافت.

$$K_v = f(r) = \frac{250 \times \arctan(10^4 \times (0.1 - |r|))}{\pi} + 125 \quad (16)$$

ساختار کلی رویکرد پیشنهاد شده، در "شکل 8" نشان داده شده است.

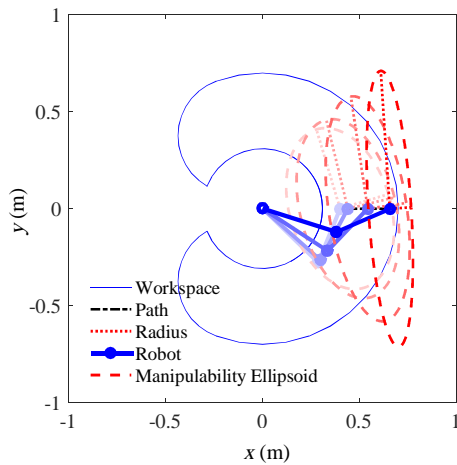


Fig. 5 The manipulability ellipsoid variation during a path

شکل 5 تغییرات بیضی‌گون حرکت‌پذیری در طی یک مسیر

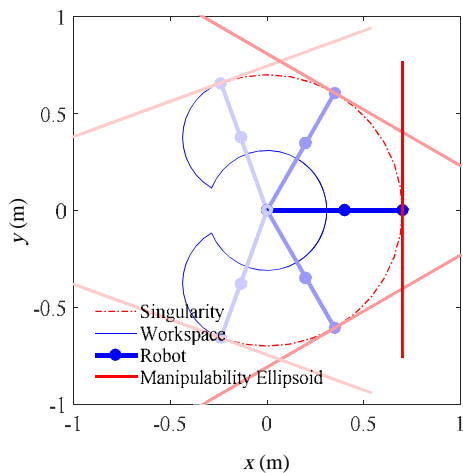


Fig. 6 Manipulability ellipsoid in singular points

شکل 6 بیضی‌گون حرکت‌پذیری در نقاط تکین

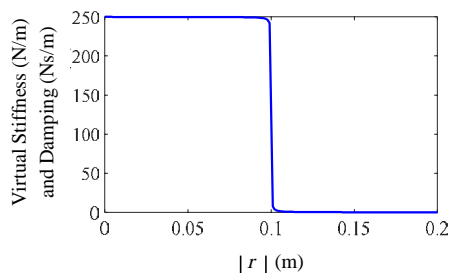


Fig. 7 Virtual stiffness and damping function according to magnitude of radius

شکل 7 تابع سفتی و میرایی مجازی برحسب مقدار اندازه شعاع

$$\lambda_1, \vec{v}_1 \text{ و } \lambda_2, \vec{v}_2 \quad (11)$$

- گام چهارم: محاسبه مقدار شعاع

$$r_1 = \sqrt{\lambda_1} \text{ و } r_2 = \sqrt{\lambda_2} \quad (12)$$

- گام پنجم: محاسبه بردار شعاع

$$\vec{r}_1 = r_1 \times \vec{v}_1 \text{ و } \vec{r}_2 = r_2 \times \vec{v}_2 \quad (13)$$

طبق "شکل 5" بیضی‌گون حرکت‌پذیری با استفاده از روابط (9) تا (13)، برای یک ربات سری دو درجه آزادی صفحه‌ای رسم شده است. مشاهده می‌شود در هنگام نزدیک شدن به تکینگی یعنی (0.7, 0)، یک شعاع به سمت صفر میل می‌کند. روابط (10) و (12) برای صحت‌سنجی رفتار بیضی‌گون حرکت‌پذیری در نقطه تکین، یعنی (0 و 0.7) به صورت زیر به دست می‌آید (برای بررسی دقیق‌تر ماتریس  $J^*$  و شعاع‌های بیضی‌گون حرکت‌پذیری ربات مورد نظر، به پیوست مراجعه شود):

$$J^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 29 \\ 0 & 50 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$r_1 = 0 \text{ m} \quad (15)$$

$$r_2 = 0.7616 \text{ m}$$

همان‌طور که در "شکل 6" مشاهده می‌شود، بیضی‌گون حرکت‌پذیری در نقاط تکین تبدیل به یک خط شده است.

### 3-3- سفتی و میرایی مجازی

اولین گام در روش پیشنهادی، تشخیص مقدار و راستای تکینگی به کمک روش بیضی‌گون حرکت‌پذیری است. پس از شناسایی موقعیت و راستای تکینگی که در بخش قبل توضیح داده شد، باید رویکردی پیشنهاد نمود تا بتوان به کمک آن هشدار لازم را به کاربر داد. فرض کنید کاربر وارد فضای کاری ربات شده و با گرفتن مجری نهایی در حال تولید مسیر است. با استفاده از رویکرد پیشنهادی، هشدار لازم به کاربر قبل از رسیدن به تکینگی از طریق افزایش سفتی و میرایی ربات داده می‌شود. در این مقاله، در صورت کمتر شدن مقدار شعاع از حد مجاز (یعنی 0.1 متر)، مقادیر سفتی و میرایی مجازی ( $B_v$  و  $K_v$ ) به مقادیر سفتی و میرایی اولیه ( $B_t$  و  $K_t$ ) موجود در معادله کنترل امپدانس اضافه خواهند شد. پس از تغییر مقادیر سفتی و میرایی، کاربر نمی‌تواند به آسانی حالت قبل به تولید مسیر مورد نظرش بپردازد و تولید مسیر را متوقف می‌کند.

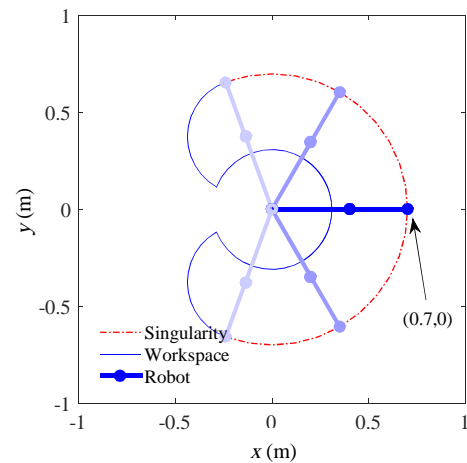


Fig. 4 Singularities of two degrees of freedom serial planar robot located in boundary of its workspace

شکل 4 نقاط تکین ربات سری دو درجه آزادی صفحه‌ای که در مرز فضای کاری آن قرار دارد

بوده و سه درجه آزادی دورانی و یک درجه آزادی انتقالی دارد. مجری نهایی این نوع ربات می‌تواند در تمام فضای کاری در هر جهتی قرار بگیرد. در این مقاله از مفصل اول و دوم این ربات به عنوان بستری برای آزمایش استفاده خواهد شد (ربات سری دو درجه آزادی صفحه‌ای). فضای کاری این ربات به تفکیک مفصل در جدول 1 بیان شده است. جزئیات بیشتر در مورد نحوه طراحی مفصل، فضای کاری، تکرارپذیری، مقایسه با دیگر ربات‌های هم تراز و ویژگی‌های شاخص ربات فام اسکرا در [23-25] بیان گردیده است.

برای تعامل ربات با انسان به روش بیان شده در این مقاله، باید از یک سیستم کنترلی بدون وقفه در انتقال داده بهره برد. برای کنترل ربات فام اسکرا از نرم‌افزار متلب و محیط سیمولینک استفاده شده است. با به‌کارگیری محیط آر تی دبلو تی می‌توان به‌صورت بلادرنگ ربات را کنترل نمود، یعنی موقعیت موتورها را به‌دست آورد سپس فرمان مناسب را ارسال کرد و داده‌های سنسور نیرو را نیز خواند.

در "شکل 12" نحوه ارتباط ربات با کنترلگر موقعیت نشان داده شده است. همان‌طور که در "شکل 12" مشاهده می‌شود، برای کنترل موقعیت ربات از کنترلگر درایور موتورهای ربات استفاده شده است [26]. بنابراین قابلیت اعمال تغییرات در کنترلگر موقعیت در ربات فام اسکرا مانند دیگر ربات‌های صنعتی بسیار محدود است. سیگنال کنترلی براساس خطای موقعیت و سرعت محاسبه شده و توسط درایور برای موتور فرستاده می‌شود.

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	$\infty$

همان‌طور که بیان شد، پس از تعیین بیضی‌گون حرکت‌پذیری، مقدار شعاع به‌عنوان معیاری برای فاصله از نقاط تکین در نظر گرفته خواهد شد. در [20] و [21] مشابه این معیار پیشنهاد شده است. معیار ارائه شده در [20]، پس از ساده‌سازی برای ربات سری دو درجه آزادی صفحه‌ای، به شعاع کوچک بیضی‌گون حرکت‌پذیری تبدیل خواهد شد و معیار بیان شده در [21]، همان شعاع کوچک می‌باشد.

نحوه تصویر سفتی و میرایی مجازی یا به صورت کلی، امپدانس مجازی، در راستای محورهای مختصات مانند یک بردار نخواهد بود زیرا جابجایی جرم در راستای حرکت فنر و میراگر نیست. این موضوع برای فنر (ساده‌ترین حالت امپدانس یعنی سفتی) در "شکل 9" نشان داده شده است. در این حالت سفتی معادل برای یک فنر طبق رابطه (17) خواهد بود [22].

$$k_{eq} = k \cos^2 \alpha \quad (17)$$

به کمک رابطه (17)، به سادگی می‌توان سفتی و همچنین میرایی ایجاد شده در راستای شعاع کوچک بیضی‌گون را بر محورهای اصلی مختصات تصویر نمود. بلوک-دیگرام کنترل ربات پس از اضافه شدن رویکرد پیشنهادی به صورت "شکل 10" خواهد شد.

بلوک سینماتیک معکوس برای تبدیل فضای کارترین به فضای مفصل به‌کار گرفته شده است و موقعیت تولید شده توسط بلوک امپدانس را به موقعیت زاویه‌ای تبدیل می‌کند. انکودر موتورهای ربات موقعیت زاویه‌ای واقعی ( $\vec{\theta}_a$ ) را اندازه‌گیری کرده تا کنترلگر موقعیت بتواند با مقایسه مقدار واقعی و مقدار ورودی ( $\vec{\theta}_c + \vec{\theta}_d$ )، فرمان مناسب را ارسال کند.

#### 4- ربات فام اسکرا

این ربات یک اسکرای سایز متوسط بوده که توسط تیمی از دانشجویان مکانیک، کنترل و کامپیوتر در آزمایشگاه رباتیک دانشگاه فردوسی مشهد طراحی، ساخته و کنترل گردیده است (شکل 11). ربات اسکرا از نوع سری

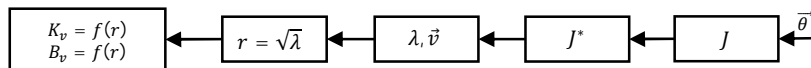


Fig. 8 Stiffness and damping generation method



Fig. 9 Equivalent of a spring non-aligned with mass displacement

شکل 8 روش تولید سفتی و میرایی مجازی

شکل 9 فنر معادل با یک فنر غیر هم راستا با جابجایی جرم

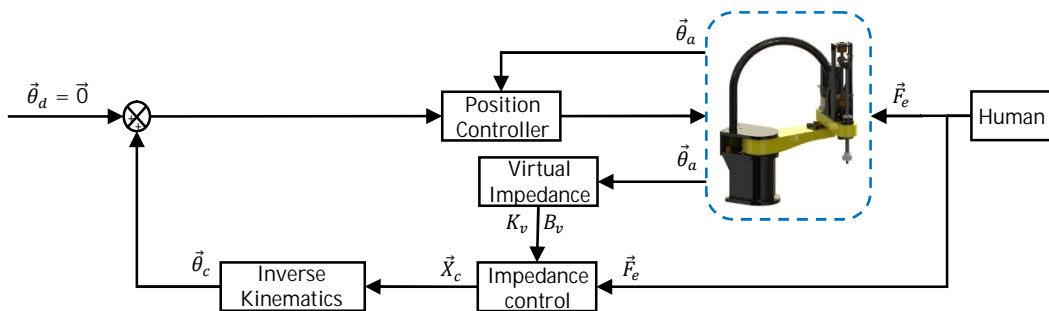


Fig. 10 Impedance control block-diagram with virtual stiffness and damping generation method

شکل 10 بلوک-دیگرام کنترل امپدانس در حضور روش تولید سفتی و میرایی مجازی

مشاهده می‌کنید. وظیفه تقویت‌کننده، فیلتر کردن نویزها و تقویت سیگنال اصلی است [27].

### 5- پیاده‌سازی عملی روی ربات فام اسکرا

در این بخش رویکرد پیشنهادی روی دو درجه آزادی اول ربات فام اسکرا پیاده‌سازی عملی خواهد شد. برای ارزیابی عملکرد این رویکرد، سه آزمایش بررسی شده است. در آزمایش اول شرط اشباع بررسی خواهد شد. در آزمایش‌های دوم و سوم، ابتدا ربات مانند "شکل 13" به موقعیت از پیش تعیین شده می‌رود (شکل 13- (b))، سپس کاربر مجری نهایی ربات را در دست گرفته و به راهنمایی ربات می‌پردازد. زمانی که مجری نهایی نزدیک نقاط تکین شد (شکل 13- (d)) و مقدار شعاع بیضی‌گون حرکت‌پذیری از حد مجاز کمتر شد، رویکرد پیشنهادی منجر به افزایش سفتی و میرایی ربات خواهد شد و کاربر از ادامه مسیر خودداری خواهد کرد.

### 5-1- آزمایش اول

جهت ارزیابی روش ارائه شده برای اشباع سرعت مجری نهایی در حین راهنمایی دستی ربات، آزمایشی طراحی و پیاده‌سازی شده است. مجری نهایی ربات از موقعیت اولیه‌ای که برای آن در نظر گرفته شده است یعنی (0.4 و 0.5)، توسط کاربر و با اعمال نیرو توسط او به سنسور نیرو، حرکت کرده و به موقعیت جدید خواهد رفت. در "شکل 14" موقعیت مجری نهایی و همچنین لینک‌های ربات در سه گام از حرکت نشان داده شده است. مقدار نیروی اعمال شده به سنسور نیرو زیاد و در زمان کمی بوده و در نتیجه سرعت تولید شده به وسیله معادله امپدانس زیاد خواهد بود. بنابراین انتظار



Fig. 11 The FUM SCARA robot designed and built at the Ferdowsi university of Mashhad, FUM Robotics Lab

شکل 11 ربات فام اسکرا، طراحی و ساخته شده در آزمایشگاه رباتیک دانشگاه فردوسی مشهد

موقعیت هر مفصل به درایور و سپس رایانه فرستاده خواهد شد. برد واسط وظیفه تبادل اطلاعات بین رایانه از یک سمت و سنسور نیرو و انکودر موتورها را از سوی دیگر بر عهده دارد. این برد به وسیله کابل شبکه به رایانه متصل می‌شود.

به علاوه در "شکل 12" نحوه ارتباط سنسور نیرو با رایانه نشان داده شده است. به دلیل عدم دسترسی به سنسور نیروی شش محوره، از یک سنسور نیروی فشاری استفاده شده است. این سنسور توانایی اندازه‌گیری نیروی تماسی در یک جهت را دارد. بنابراین آزمایش‌ها باید به گونه‌ای طراحی شوند که نیروی تماسی از طرف انسان فقط در یک راستا (مثلاً راستای مثبت محور x) اعمال شود. یعنی امکان تغییر مسیر برای کاربر حین تولید مسیر وجود ندارد و فقط می‌تواند با احساس هشدار از سمت رویکرد پیشنهادی، تولید مسیر را متوقف کند. سنسور نیرو و تقویت‌کننده آن را در "شکل 12"

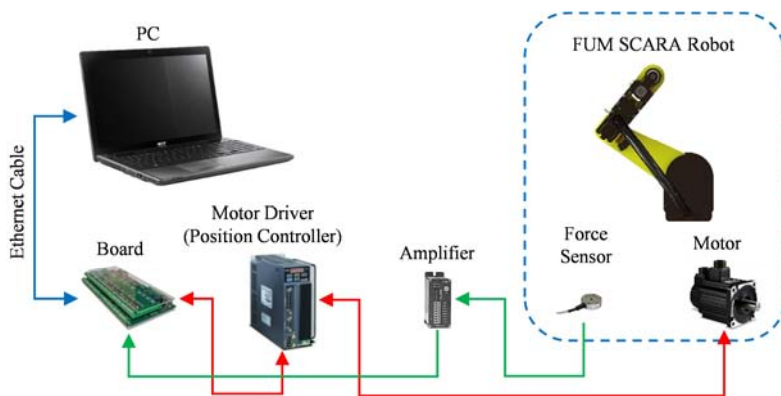


Fig. 12 Hardware configuration of the FUM SCARA robot

شکل 12 ساختار سخت‌افزاری ربات فام اسکرا

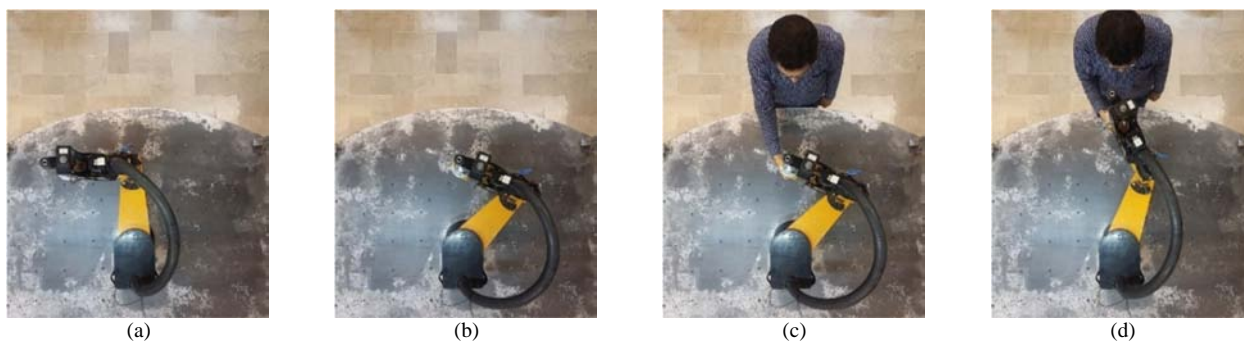


Fig. 13 Four views of the robot during the experiments – (a) to (b) by position controller and (c) to (d) by manual guidance

شکل 13 چهار نما از حرکت ربات در آزمایش‌های انجام شده – (a) تا (b) بوسیله کنترلر موقعیت و (c) تا (d) به وسیله راهنمایی دستی

می‌دهد. با توجه به زیاد بودن نیروی وارد شده از طرف کاربر، مجری نهایی به سمت محدوده غیر مجاز حرکت می‌کند، اما به وسیله رویکرد پیشنهادی، امپدانس ربات زیاد می‌شود. کاربر به افزایش امپدانس توجهی ندارد و

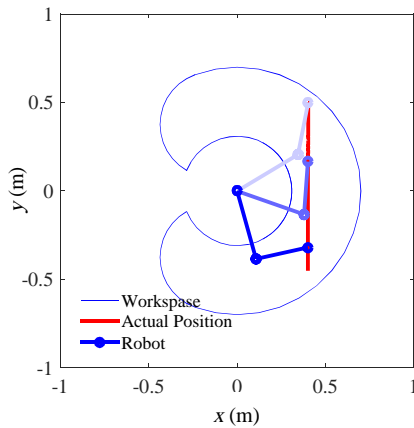


Fig. 14 Position of the end-effector in the robot workspace

شکل 14 موقعیت مجری نهایی در فضای کاری ربات

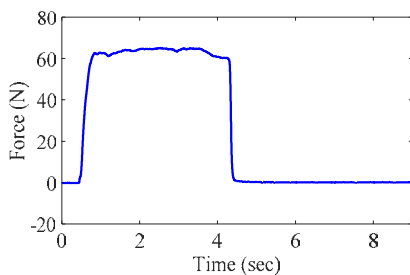


Fig. 15 Force exerted to the force sensor by operator

شکل 15 نیروی اعمال شده به سنسور نیرو توسط کاربر

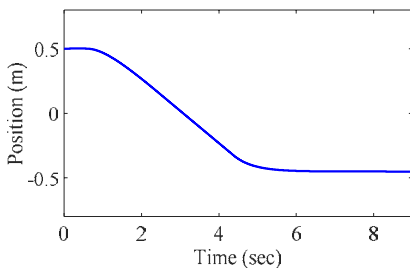


Fig. 16 The end-effector position generated by impedance block-diagram

شکل 16 موقعیت مجری نهایی تولید شده به وسیله بلوک-دیگرام امپدانس

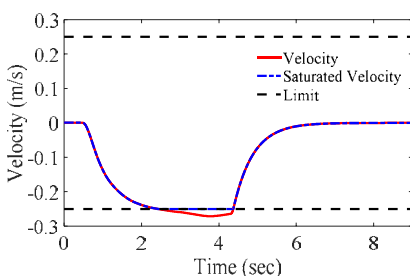


Fig. 17 End-effector saturated velocity generated by impedance block-diagram

شکل 17 سرعت اشباع شده مجری نهایی، تولید شده به وسیله بلوک-دیگرام امپدانس

می‌رود سرعت در مقدار 0.25 متر بر ثانیه اشباع شود. نیروی وارد شده به سنسور نیرو و همچنین موقعیت و سرعت مجری نهایی در راستای محور  $y$  به ترتیب در "شکل 15" تا "شکل 17" نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در "شکل 17" مشاهده می‌شود دو حد اشباع مثبت و منفی برای حرکت مجری نهایی ربات در نظر گرفته شده است.

طبق این شکل، سرعت تقریباً در لحظات 2 تا 4.5 ثانیه اشباع شده است. خط قرمز رنگ، سرعت قبل از بلوک اشباع و خط-نقطه آبی رنگ، سرعت بعد از بلوک اشباع را نشان می‌دهد. نکته دیگری که می‌تواند علاوه بر اشباع سرعت در این آزمایش مورد مطالعه قرار بگیرد، تغییرات شعاع‌های بیضی‌گون حرکت‌پذیری است که در این حرکت، هیچکدام از حد مجاز تعریف شده کاهش پیدا نکرده است (شکل 18).

### 2-5-2- آزمایش دوم

در این آزمایش موقعیت مجری نهایی توسط کنترلگر موقعیت از (0.3 و 0.4) به (0 و 0.4) تغییر خواهد کرد (شکل 13-(a) تا (b)). این تغییر موقعیت به دلیل وجود سنسور نیروی فشاری است که تنها در یک جهت نیرو را اندازه‌گیری می‌کند تا ربات در موقعیت مناسب قرار بگیرد. با قرار گرفتن ربات در موقعیت (0 و 0.4) یعنی "شکل 13-(c)" و با اعمال نیرو در جهت مثبت محور  $x$  می‌توان ربات را به سمت تکینگی یعنی (0 و 0.7) هدایت کرده (شکل 13-(d)) و عملکرد رویکرد پیشنهادی را بررسی نمود. در این آزمایش کاربر به محض احساس تغییر در امپدانس ربات از ادامه حرکت دست خواهد کشید. در صورت وجود سنسور نیروی چند محوره، کاربر می‌توانست راستای مسیر خود را عوض کند اما در این آزمایش، کاربر فقط می‌تواند تولید مسیر را متوقف کند.

"شکل 19" تا "شکل 23" نتایج آزمایش دوم را ارائه می‌دهند. "شکل 19" تا "شکل 21" به ترتیب مقدار نیروی تماسی وارد شده به ربات، مقدار موقعیت و سرعت تولید شده توسط کنترل امپدانس را نشان می‌دهند. توجه شود که برای سرعت مجری نهایی ربات براساس استاندارد ایزو مقدار 0.25 متر بر ثانیه به عنوان حد مجاز تعریف شده است و در صورت رسیدن به این مقدار سرعت اشباع خواهد شد، که البته این مقدار به دلیل کندی حرکت ربات، تأثیری در مسیر تولید شده نداشته است [9].

طبق "شکل 23" مقدار یکی از شعاع‌های بیضی‌گون حرکت‌پذیری که با خط قرمز نشان داده شده است، تقریباً در ثانیه 27 از حد مجاز عبور می‌کند (برای دید بهتر، این شکل از زمان وارد شدن نیروی تماسی رسم شده است). در ثانیه 27، سفتی و میرایی ربات طبق "شکل 22" افزایش یافته و زمانی که دوباره مقدار شعاع بیضی‌گون حرکت‌پذیری در محدوده مجاز قرار گرفت، به حالت اولیه بر می‌گردند. در واقع در لحظه 27 ثانیه، کاربر متوجه تغییر امپدانس ربات شده و سریعاً از ادامه حرکت دست کشیده است.

همان‌طور که پیش از این بیان شد، مقدار تغییرات سفتی و میرایی در رویکرد پیشنهادی یکسان است (شکل 22). افزایش میرایی به دلیل حفظ پایداری ربات است زیرا ممکن است افزایش ناگهانی سفتی منجر به نوسان‌های ناخواسته مجری نهایی ربات شود.

### 3-5-3- آزمایش سوم

فرض کنید بر خلاف آزمایش دوم کاربر در حین تولید مسیر توجهی به تغییر امپدانس ربات نکند و همچنان به اعمال نیرو به مجری نهایی اصرار بورزد. نیرویی که به ربات وارد خواهد شد مجری نهایی را به سمت تکینگی سوق



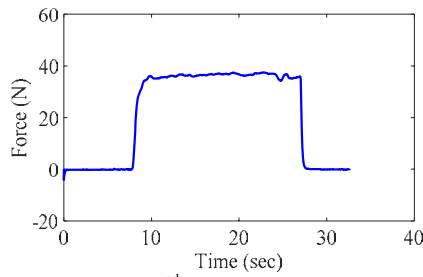


Fig. 19 Actual force in the 2<sup>nd</sup> experiment

شکل 19 نیروی سنسور در آزمایش دوم

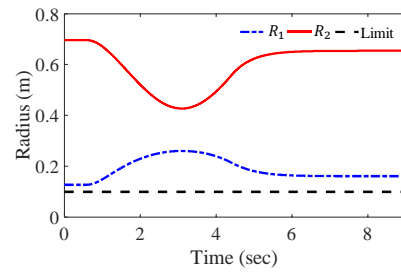


Fig. 18 Manipulability ellipsoid radii variation

شکل 18 تغییرات شعاع‌های بیضی‌گون حرکت‌پذیری

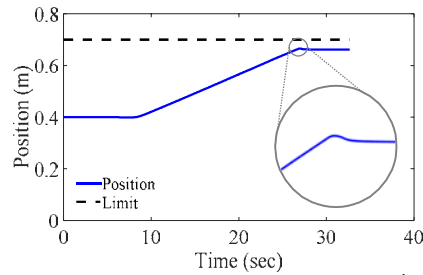


Fig. 20 End-effector position in the x direction in the 2<sup>nd</sup> experiment

شکل 20 موقعیت مجری نهایی در راستای محور x در آزمایش دوم

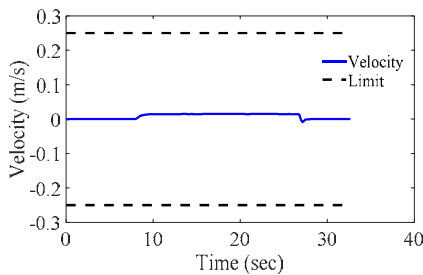


Fig. 21 End-effector velocity in the x direction in the 2<sup>nd</sup> experiment

شکل 21 سرعت مجری نهایی در راستای محور x در آزمایش دوم

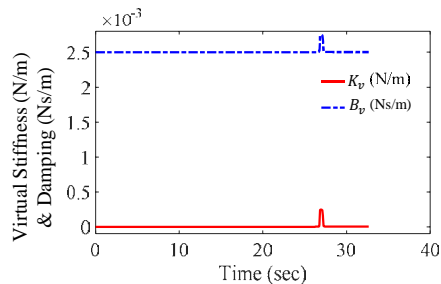


Fig. 22 Virtual stiffness and damping in the 2<sup>nd</sup> experiment

شکل 22 سفتی و میرایی مجازی در آزمایش دوم

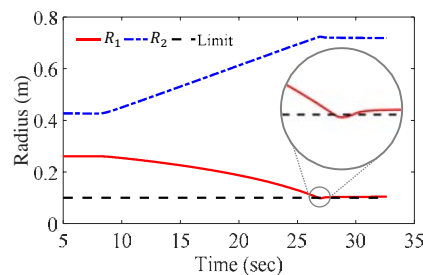


Fig. 23 First and second radius of manipulability ellipsoid in the 2<sup>nd</sup> experiment

شکل 23 شعاع اول و دوم بیضی‌گون حرکت‌پذیری در آزمایش دوم

همچنان به اعمال نیرو مبادرت می‌کند. این فرآیند تا زمانی که کاربر متوجه نزدیکی به تکینگی نشده و از وارد نمودن نیرو صرف‌نظر نمی‌کند، ادامه می‌یابد تا سرانجام به این موضوع پی برده و از وارد نمودن نیرو به سمت تکینگی صرف‌نظر کند. "شکل 24" تا "شکل 28" نتایج این آزمایش را نشان می‌دهند. افزایش چندین باره امیدانس ربات به دلیل کاهش شعاع بیضی‌گون به ترتیب در "شکل 27" و "شکل 28" قابل مشاهده است. با وجود این‌که طبق "شکل 27" سفتی و میرایی ربات از لحظه 23 ثانیه افزایش یافته است اما کاربر در لحظه 27 ثانیه از اعمال نیرو دست کشیده است (شکل 24). همان‌طور که در "شکل 26" و "شکل 27" مشاهده می‌شود، نمودار تغییرات سرعت و سفتی و میرایی دارای نوسان است. با گذشت زمان این نوسانات در حال کاهش است. دلیل اصلی کاهش نوسانات یاد شده پس از مدتی، به تعادل رسیدن نیروی تماسی در مقابل سفتی، میرایی و جرم موجود در معادله امیدانس است.

#### 4-5- مقایسه آزمایش دوم و سوم

هدف از ارائه دو آزمایش براساس دو رفتار متفاوت از کاربر، بررسی و ارزیابی نحوه عملکرد رویکرد پیشنهادی در برخورد با مسأله تکینگی در شرایط گوناگون است. تغییرات مقدار شعاع‌های بیضی‌گون حرکت‌پذیری در این دو آزمایش به ترتیب طبق "شکل 23" و "شکل 28" مشاهده شد. در لحظاتی که مقادیر شعاع بیضی‌گون حرکت‌پذیری از حد مجاز کمتر می‌شود، سفتی و میرایی طبق "شکل 22" و "شکل 27" تغییر خواهند کرد. با وجود استمرار اعمال نیرو توسط کاربر در آزمایش سوم، رویکرد پیشنهادی پاسخ مناسبی داده و از تکین شدن ربات جلوگیری کرده است. برای مقایسه بهتر این دو آزمایش موقعیت مجری نهایی در فضای کاری ربات بررسی می‌شود. طبق "شکل 29" موقعیت مطلوب از (0.3 و 0.4) تا (0 و 0.4) تعریف شده تا ربات در راستای محور x قرار بگیرد. سپس کاربر به سنسور نیروی نصب شده در مجری نهایی، نیرو وارد نموده و ربات را به سمت تکینگی راهنمایی می‌کند. پس از کاهش مقدار شعاع بیضی‌گون حرکت‌پذیری از حد مجاز، امیدانس ربات افزایش یافته و کاربر تولید مسیر را رها می‌کند. همچنین "شکل 29" موقعیت مجری نهایی را به صورت بزرگنمایی شده نشان می‌دهد.

طبق "شکل 29"، مجری نهایی قبل از رسیدن به (0 و 0.7) بوسیله رویکرد پیشنهادی متوقف شده است. "شکل 30" موقعیت مجری نهایی در آزمایش سوم را نشان می‌دهد. با وجود استمرار اعمال نیروی خارجی توسط کاربر در این آزمایش، ربات تکین نشده است. براساس "شکل 29" و "شکل 30" می‌توان نتیجه گرفت اعمال رویکرد پیشنهادی برای پرهیز از نقاط تکین مانند مفهوم دیوار مجازی که در [8] ارائه شده است، عمل می‌کند. با این

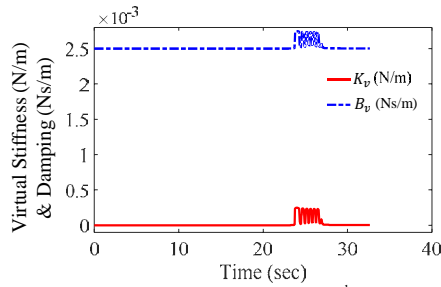


Fig. 27 Virtual stiffness and damping in the 3<sup>rd</sup> experiment

شکل 27 سفتی و میرایی مجازی در آزمایش سوم

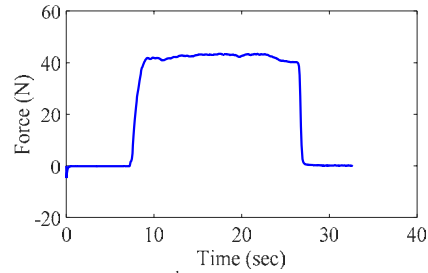


Fig. 24 Actual force in the 3<sup>rd</sup> experiment

شکل 24 نیروی واقعی در آزمایش سوم

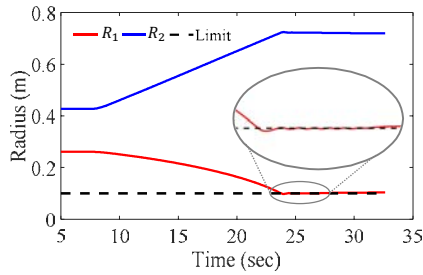


Fig. 28 First and second radius of manipulability ellipsoid in the 3<sup>rd</sup> experiment

شکل 28 شعاع اول و دوم بیضیگون حرکت‌پذیری در آزمایش سوم

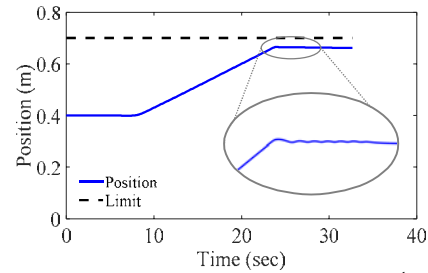


Fig. 25 End-effector position in the x direction in the 3<sup>rd</sup> experiment

شکل 25 موقعیت مجری نهایی در راستای محور x در آزمایش سوم

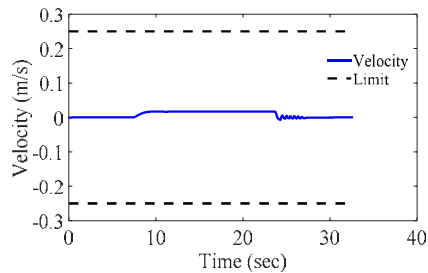


Fig. 26 End-effector velocity in the x direction in the 3<sup>rd</sup> experiment

شکل 26 سرعت مجری نهایی در راستای محور x در آزمایش سوم

### 6- نتیجه‌گیری

در این مقاله به پیاده‌سازی عملی روش کنترل امپدانس برای راهنمایی دستی ربات‌های صنعتی توسط کاربر پرداخته شد. مسیر مطلوب با راهنمایی فیزیکی ربات توسط کاربر و از طریق اعمال نیرو به سنسور نصب شده در مجری نهایی ربات تولید شد. این نیرو بوسیله کنترل امپدانس به موقعیت تبدیل شده و به صورت بلادرنگ به کمک روش بیضی‌گون حرکت‌پذیری مورد بررسی قرار گرفت. در صورت نزدیکی به نقاط تکین و با به‌کارگیری رویکرد پیشنهادی، امپدانس نسبت داده شده به ربات افزایش پیدا کرد. بدین صورت کاربر از نزدیک شدن به نقاط تکین آگاه می‌شود. بنابراین از ادامه راهنمایی ربات منصرف شده و تولید مسیر را متوقف خواهد نمود. از طرف دیگر، مسأله اشباع سرعت مجری نهایی به جهت جلوگیری از خطرات جانی احتمالی برای کاربر، مورد بررسی قرار گرفت. در پیاده‌سازی عملی این روش، سرعت مجری نهایی در مقداری منطبق بر استاندارد ایزو اشباع شد.

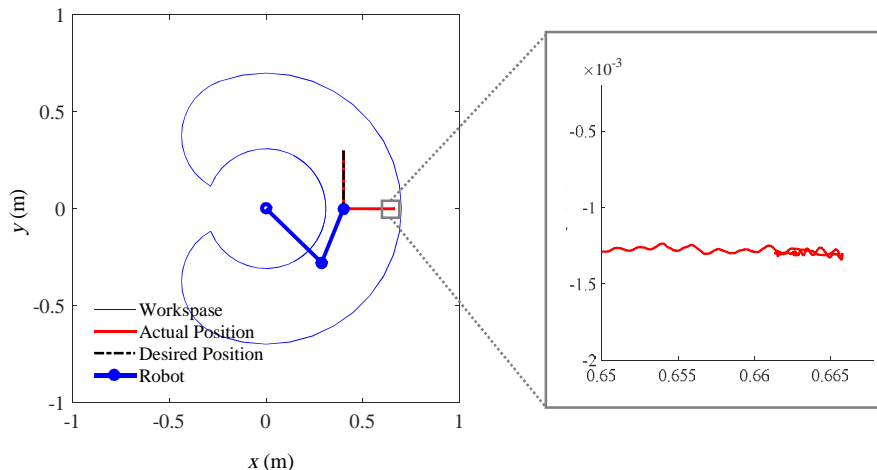


Fig. 29 Actual end-effector position in the 2<sup>nd</sup> experiment and magnified view of the path while impedance is increased

شکل 29 موقعیت مجری نهایی در آزمایش دوم و نمای بزرگنمایی شده آن در انتهای مسیر، زمانی که امپدانس ربات افزایش یافته است

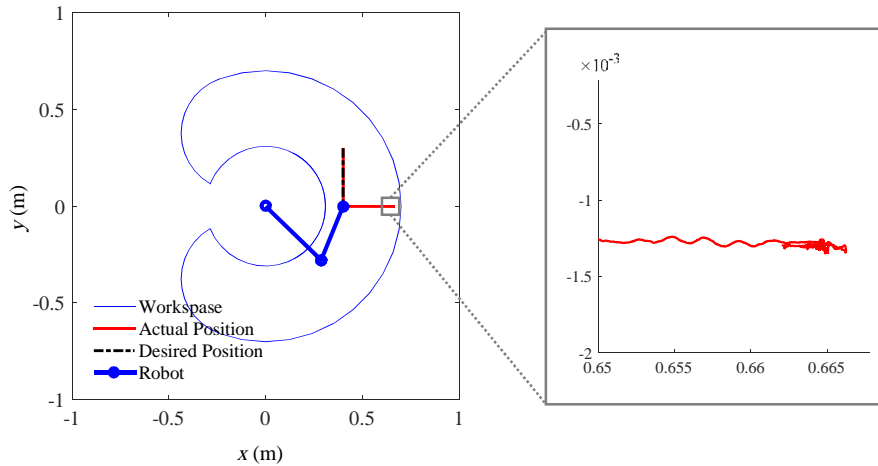


Fig. 30 Actual end-effector position in the 3<sup>rd</sup> experiment and magnified view of the path while impedance is increased

شکل 30 موقعیت مجری نهایی در آزمایش سوم و نمای بزرگنمایی شده آن در انتهای مسیر، زمانی که امپدانس ربات افزایش یافته است

8- مراجع

[1] M. Vukobratovic, D. Surdilovic, Y. Ekalov, 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.

[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] E. G. Kaigom, J. Roßmann, Physics-based simulation for manual robot guidance—An eRobotics approach, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2015.

[12] T. Yoshikawa, Manipulability of robotic mechanisms, *The international journal of Robotics Research*, Vol. 4, No. 2, pp. 3-9, 1985.

[13] 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.

[14] 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).

[15] V. Khoshdel, A. Akbarzadeh, Robust impedance control for rehabilitation robot, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 8, pp. 429-437, 2015 (in Persian).

[16] B. Behzadpour, M. M. Moghadam, M. A. Tafti, Design, simulation and implementation of admittance and impedance control methods on a haptic device, *Sharif Mechanical Engineering*, Vol. 30-3, No. 2.1, pp. 3-13, 2014 (in Persian).

[17] H. Kazerooni, Robust, non-linear impedance control for robot manipulators, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 4, pp. 741-750, 1987.

[18] 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.

نتایج آزمایشگاهی به خوبی نشان‌دهنده تولید مسیر مطلوب توسط کاربر بوده و همچنین کارکرد رویکرد پیشنهادی در برخورد با مسأله تکنیکی و اشباع سرعت مجری نهایی تأیید می‌شود. یک آزمایش برای ارزیابی اشباع سرعت و دو آزمایش برای سنجش رویکرد پرهیز از تکنیکی روی ربات فام اسکرا انجام شد. در آزمایش اول، تغییرات سرعت در مقدار 0.25 متر بر ثانیه اشباع شد. کاربر در آزمایش دوم، به محض احساس تغییر در امپدانس ربات تولید مسیر را متوقف می‌کند ولی در آزمایش سوم به تولید مسیر ادامه می‌دهد. قابلیت رویکرد پیشنهادی در برخورد با اصرار کاربر به ادامه حرکت به سوی نقاط تکین رضایت بخش می‌باشد. بنابراین در هر دو مورد کاربر هشدار لازم را دریافت کرده و از ادامه مسیر صرف نظر می‌کند.

7- پیوست

در این بخش به کمک نرم‌افزار متلب و به صورت نمادین<sup>1</sup>، روابطی برای ماتریس  $J^*$  و همچنین شعاع‌های بیضی‌گون حرکت‌پذیری به دست می‌آید. ابتدا برای ماتریس  $J^*$ :

$$J^* = \begin{bmatrix} J_{11}^* & J_{12}^* \\ J_{21}^* & J_{22}^* \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$J_{11}^* = l_2^2 \sin^2(\theta_1 + \theta_2) + (l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_1 \sin(\theta_1))^2 \quad (19)$$

$$J_{12}^* = -\sin(2\theta_1 + 2\theta_2) l_2^2 - l_1 \sin(2\theta_1 + \theta_2) l_2 - \frac{l_1^2 \sin(2\theta_1)}{2} \quad (20)$$

$$J_{21}^* = J_{12}^* \quad (21)$$

$$J_{22}^* = l_2^2 \cos^2(\theta_1 + \theta_2) + (l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_1 \cos^2(\theta_1))^2 \quad (22)$$

و سپس برای شعاع‌ها:

$$r_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} (l_1^4 - (l_1^4 + 4l_1^4 + 8l_1^2 l_2^2 \cos^2(\theta_2) + 8l_1 l_2^3 \cos(\theta_2) + 4l_1^3 l_2 \cos(\theta_2))^{0.5} + 2l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos(\theta_2))^{0.5} \quad (23)$$

$$r_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} ((l_1^4 + 4l_1^4 + 8l_1^2 l_2^2 \cos^2(\theta_2) + 8l_1 l_2^3 \cos(\theta_2) + 4l_1^3 l_2 \cos(\theta_2))^{0.5} + l_1^2 + 2l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos(\theta_2))^{0.5} \quad (24)$$

با عددگذاری در روابط (23) و (24)، مقادیر شعاع‌های بیضی‌گون حرکت‌پذیری به دست خواهد آمد.

<sup>1</sup> Symbolic

- 539, Tehran, 2014.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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>.
- [27] Dacell, *Compression & Tension - CMM2*, Accessed on 12 Nov 2015; <http://www.dacell.com/en/loadcell/show/view/cno/10/page/2/id/743>.
- [19] J. J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, Third Edition, pp. 149-153, United States of America: Pearson Prentice Hall Upper Saddle River, 2005.
- [20] 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.
- [21] C. Qiu, Q. Cao, S. Miao, An on-line task modification method for singularity avoidance of robot manipulators, *Robotica*, Vol. 27, No. 04, pp. 539-546, 2009.
- [22] S. S. Rao, *Mechanical vibrations*, Vol. 4, pp. 19-25, United States of America: Prentice Hall, 2003.
- [23] 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-