ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2019;19(1):115-123

Mechanical Improvement, Simulation, and Implementation of a Visual Servoing Position Controller of a 4-DOF Delta Parallel Robot

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Rouhollahi A.[1] *BSc,*
Azmoun M.[2] *MSc,*
Tale Masouleh M.*[3] *PhD,*
Kalhor A.[1] *PhD*

How to cite this article
Rouhollahi A, Azmoun M, Tale Masouleh M, Kalhor A. Mechanical Improvement, Simulation, and Implementation of a Visual Servoing Position Controller of a 4-DOF Delta Parallel Robot. Modares Mechanical Engineering.2019;19(1):115-123.

[1]Control Engineering Department, Electrical & Computer Engineering School, University of Tehran, Tehran, Iran
[2]Mechatronics Engineering Department, New Science & Technologies Faculty, University of Tehran, Tehran, Iran
[3]Machine Intelligence & Robotics Department, Electrical & Computer Engineering School, University of Tehran, Tehran, Iran

***Correspondence**
Address: Human-Robot Interaction Laboratory, Electrical & Computer Engineering School, University of Tehran, Amir Abad, North Kargar Street, Tehran, Iran.
Phone: +98 (21) 61118413
Fax: +98 (21) 88617078
m.t.masouleh@ut.ac.ir

Article History
Received: July 31, 2018
Accepted: October 01, 2018
ePublished: January 01, 2019

ABSTRACT

This article investigated design and construction of a 4-DOF delta parallel robot's components and additionally inverse kinematics and kinematics control of the robot. The initial and final version of the robot based on existing needs, the addition of gearboxes due to the low torque of motors, and flange transformations to connect the gearbox to the robot's base were also discussed. In the following, by simulating the robot in MATLAB software, the integrity of the inverse kinematic equation of the robot was investigated. In the other part, the design of the kinematic control in the joint space was discussed and the results were plotted in the graphs for a z-direction. By designing a suitable robot controller, tracing the desired path and comparing its results with other controllers become possible. By designing a conveyor for the robot and equipping it with a camera, detecting the objects that the robot moves them become possible with image processing. For the purpose of picking and placing the objects, the robot's end effector is equipped with a controlled suction. The results, through which the paths crossed, showed the designed PID controller for the robot was working correctly and the desired path was followed with small error.

Keywords Delta Robot; Inverse kinematics; Controller Designing; Simulation; Image Processing

CITATION LINKS

[1] Optimal design of a 4-DOF parallel manipulator: From academia to industry [2] Singularity analysis and representation of the general gough-stewart platform [3] The agile eye: A high-performance three-degree-of-freedom camera-orienting device [4] On human-robot interaction of a 3-DOF decoupled parallel mechanism based on the design and construction of a novel and low-cost 3-DOF force sensor [5] Experimental dynamic identification and model feed-forward control of Novint Falcon haptic device [6] DELTA: A simple and efficient parallel robot. Robotica [7] Dynamic modeling and base inertial parameters determination of a 2-DOF spherical parallel mechanism [8] Optimal design and fabrication of a 4-DOF quattrotaar parallel robot with singularity-free workspace by ABC and PSO algorithms [9] Kinematics analysis, design and control of an isoglide3 parallel robot (IG3PR) [10] Kinematic analysis of 5-RPUR (3T2R) parallel mechanisms [11] Object detection from complex background image using circular hough transform [12] An experimental study on the development, kinematics and control of a 4-DOF delta parallel manipulator [13] Experimental study on the visual servoing of a 4-DOF parallel robot for pick-and-place purpose [14] Parallel robots [15] Design and development of a high-speed and high-rotation robot with four identical arms and a single platform [16] Inverse kinematics and singularities of manipulators with offset wrist [17] Dynamic modeling and sensitivity analysis of an n-linkage planar serial robot to design parameters based on Sobol and EFAST methods [18] Forward kinematic problem of three 4-DOF parallel mechanisms (4-PRUR1, 4-PRUR2 and 4-PUU) with identical limb structures performing 3T1R motion pattern [19] Position control of a 3-CPU spherical parallel manipulator [20] Predictive functional control of a parallel robot [21] Object detection from complex background image using circular hough transform [22] Experimental dynamic identification and model feed-forward control of Novint Falcon haptic device [23] Image processing and object detection [24] Object tracking system for video recording based Qt and OpenCV

Copyright© 2019, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

ارتقای سخت‌افزاری، شبیه‌سازی و پیاده‌سازی یک کنترلر موقعیت مبتنی بر بینایی ربات ۴درجه آزادی دلتا

علی روح‌اللهی BSc
گروه مهندسی کنترل، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، تهران، ایران
مهدی آزمون MSc
گروه مهندسی مکاترونیک، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران
مهدی طالع‌ماسوله* PhD
گروه هوش ماشین و رباتیک، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، تهران، ایران
احمد کلهر PhD
گروه مهندسی کنترل، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده
در این مقاله ابتدا طراحی و ساخت اجزای تشکیل‌دهنده ربات دلتا بررسی شده و سپس تحلیل سینماتیک معکوس و کنترل موقعیت آن مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین پیرامون نسخه اولیه و نهایی ربات براساس نیازهای موجود و اضافه‌شدن گیربکس به دلیل کم‌بودن گشتاور موتورها و ساخت فلنج تبدیل برای اتصال گیربکس به پایه ثابت ربات نیز بحث شده است. در ادامه با شبیه‌سازی ربات در نرم‌افزار متلب، صحت معادله سینماتیک معکوس ربات ۴درجه آزادی دلتا بررسی شده است. در قسمت دیگر به طراحی کنترل موقعیت در فضای مفصلی پرداخته شده و نتایج آن روی ربات به طور عملی در نمودارها برای یک حرکت در راستای z آورده شده است. با طراحی کنترل‌کننده مناسب برای ربات امکان ردیابی مسیر دلخواه را در آن ایجاد نموده و نتایج آن با کنترل‌کننده‌های دیگر مقایسه شده است. همچنین با طراحی یک کانوایر برای ربات و مجهزکردن آن به یک دوربین امکان تشخیص اجسامی که ربات آنها را جابه‌جا می‌کند با استفاده از پردازش تصویر فراهم شده است. به منظور گذاشت و برداشت اجسام، مجری نهایی ربات به یک ساکشن که قابلیت کنترل دارد مجهز شده است. خروجی‌های به‌دست‌آمده از مسیرهایی که ربات آنها را طی کرده نشان داد که کنترل‌کننده PID طراحی‌شده برای ربات به درستی عمل کرده و همچنین با خطای کمی مسیر دلخواه توسط ربات دنبال شده است.
کلیدواژه‌ها: ربات دلتا، سینماتیک معکوس، طراحی کنترل‌کننده، شبیه‌سازی، پردازش تصویر

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۵/۰۹
تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۷/۰۹
*نویسنده مسئول: m.t.masouleh@ut.ac.ir

۱- مقدمه
در سال‌های اخیر، علم رباتیک مورد توجه دانشمندان علوم مختلف قرار گرفته است. استفاده از ربات‌ها به‌دلیل دقت بالا، استهلاک کم و چالش‌های مدیریت نیروی انسانی در صنایع اهمیت بسیاری پیدا کرده است. ربات‌ها در دو دسته موازی و سری طبقه‌بندی می‌شوند. ربات‌های موازی ربات‌هایی هستند که مجری نهایی آنها توسط شاخه‌های موازی به بستر ربات متصل است. در واقع نام این ربات‌ها ارتباط زیادی به شکل فیزیکی و ساختار مکانیکی آنها ندارد. مکانیزم‌های متشکل از یک زنجیره بسته سینماتیک که مجری نهایی آن به‌وسیله چند زنجیره سینماتیک مستقل به پایه ارتباط داشته باشند، ربات موازی نامیده می‌شوند. به‌دلیل کاربرد و مزایای فراوان ربات‌های موازی، این گونه ربات‌ها همواره مورد توجه محققان عرصه رباتیک قرار گرفته‌اند. از جمله ربات‌های موازی می‌توان به ربات دلتا[1]، گاف- استورات[2]، چشم چابک[3]، تریپترون[4] و غیره اشاره کرد که همگی به‌عنوان ربات‌های مهم و صنعتی شناخته می‌شوند[5]. ربات‌های دلتا به دو نوع کلی ۳درجه آزادی و ۴درجه آزادی تقسیم می‌شوند. نوع ۴درجه آزادی از لحاظ ساختاری به دو نوع تقسیم می‌شود[6, 7]، نوع اول دارای سه بازوی متوازی‌الاضلاع و یک بازو در وسط آن متوازی‌الاضلاع که از پایه ثابت به مجری نهایی وصل است و نوع دیگر دارای چهار بازوی متوازی‌الاضلاع است[8].

مهم‌ترین اصل در عملکرد مناسب یک ربات، کنترل آن است. منظور از کنترل یک ربات، اعمال سیگنال‌های مناسب به‌منظور ایجاد رفتاری مطلوب در مجری نهایی ربات است. ربات ۴درجه آزادی دلتا از جمله ربات‌های کاربردی موازی است که هم‌اکنون نمونه‌های زیادی از آن در طیف گسترده‌ای از کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد[9, 10].

در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی برای هوشمندساختن ربات‌ها به‌منظور به‌کارگیری آنها در صنایع مختلف صورت گرفته است. یکی از روش‌های هوشمندسازی ربات‌ها، افزودن بینایی به آنها است که به‌وسیله آن می‌توانند تا حدی با دنیای اطراف خود ارتباط برقرار کنند و از آن به دریافت اطلاعات بپردازند. بینایی نقش مهمی در استفاده از ربات‌ها در کاربردهای مختلف دارد. ربات‌ها بدون بینایی نمی‌توانند جزئیات اشیایی که باید روی آنها عملیاتی را پیاده‌سازی کنند، بیابند. بینایی به ربات‌ها کمک می‌کند تا محیط اطراف خود را بیشتر درک کنند. اساس بینایی بر مبنای پردازش تصویر است و این قابلیت را به ربات می‌دهد تا مشاهده کند. همان طور که می‌دانید ربات باید تصاویر یک فضای سه‌بُعدی را در فضای دوبُعدی تحلیل نماید و کاهش یک بُعد از فضا باعث ازدست‌رفتن اطلاعات می‌شود و فرآیند پردازش داده‌های تصویر را مشکل‌تر می‌کند. پردازش تصویر عموماً به‌معنی ترجمه پیکسل‌های آن به تعدادی عدد است که شیوه‌های مختلفی برای ترجمه تصویر وجود دارد. قبلاً روش‌هایی برای ذخیره داده‌های تصویر وجود داشت که به حافظه زیادی نیاز داشتند، اما با توسعه تکنیک‌های پیشرفته، نیاز به حافظه زیاد کاهش پیدا کرد. برای پردازش تصاویر باید داده‌های آنها به‌صورت گسسته در ماتریس‌ها ذخیره شود. در واقع تصویر گسسته نیست، اما از آنجایی که داده‌ها به‌صورت گسسته هستند و پیوستگی برای داده‌ها بی‌معناست، بنابراین باید تصاویر را به‌صورت گسسته تبدیل کند تا امکان ذخیره‌شدن آنها فراهم شود. به‌منظور شناسایی اشکال در یک تصویر باید به‌دنبال یک‌سری ویژگی‌های خاص در مجموعه داده‌های مربوط به تصویر اقدام نمود. به‌عنوان مثال لبه‌های یک شیء در تصویر، مقادیر خاصی نسبت به دیگر مقادیر در مجموعه داده‌ها دارد و این ویژگی کمک می‌کند تا محل شیء در تصویر توسط پردازشگر مشخص شود[11].

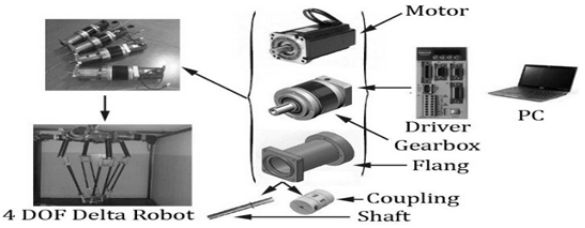
کتابخانه اوپن‌سی‌وی یک کتابخانه مرتبط با بینایی است که به‌صورت متن‌باز در دسترس همگان قرار دارد. این کتابخانه دارای پروانه نرم‌افزار توزیع برکلی (BSD) است و به همین منظور می‌تواند در مصارف تجاری و دانشگاهی به‌صورت رایگان مورد استفاده قرار گیرد. توابع این کتابخانه به زبان‌های مختلف برنامه‌نویسی از جمله سی‌پلاس‌پلاس، سی، پایتون و جاوا قابل استفاده هستند[12]. از ویژگی‌های آن می‌توان به پشتیبانی از سیستم‌عامل‌های لینوکس، مک، ویندوز و اندروید اشاره کرد. این کتابخانه بیشتر برای کاربردهای همزمان و آنی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

بهبود تعامل با کاربر در ربات‌ها به اپراتور کمک می‌کند تا آنها را با تنظیمات دلخواه مورد استفاده قرار دهد. رابط کاربری مناسب می‌تواند یک امتیاز برای ربات محسوب شود تا از جنبه‌های مختلف مورد استفاده قرار گیرد. به همین علت برای ربات یک رابط کاربری

طراحی شده است تا اپراتور بتواند از آن برای اهداف مختلف استفاده کند[13]. ارتقای سخت‌افزاری، افزودن بینایی و نوار نقاله به‌منظور هوشمندسازی و همچنین طراحی کنترل‌کننده مناسب برای طی‌کردن مسیر دلخواه با دقت بالا از اهداف و نوآوری‌های این مقاله است. در بخش دوم این مقاله، نسخه صنعتی ربات مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش سوم، تفاوت نسخه ساخته‌شده اولیه و نسخه جدید بیان می‌شود. در بخش چهارم، معادلات سینماتیک معکوس، بیان و در بخش پنجم، کنترل‌کننده مبتنی بر معادلات سینماتیک معکوس طراحی می‌شود. در بخش ششم، تجهیزات ربات دلتا بررسی و در بخش هفتم مراحل تشخیص اجسام بیان می‌شود. در بخش‌های پایانی، ارایه نتایج شبیه‌سازی و نتایج عملی ربات صورت می‌گیرد.

۲- نسخه صنعتی ربات دلتا

در شکل ۱، نسخه صنعتی یک ربات دلتا با تمام جزئیات نشان داده شده است. به‌دلیل کم‌بودن گشتاور نامی موتورها و افزایش جریان موتورها در هنگام رسیدن به گشتاور حداکثر، از یک گیربکس در هر موتور استفاده شده است تا گشتاور مورد نیاز را برای حرکت بازوهای ربات ایجاد کند و بعد از آن یک فلنج تبدیل هم برای اتصال گیربکس و موتور به صفحه ثابت ربات استفاده شده است. البته کاربرد دیگر فلنج قراردادن کوپلینگ و شفت کمکی به‌منظور کاهش خطرهای احتمالی است. مشخصات نمونه صنعتی ربات در جدول ۱ درج شده است. گیربکس استفاده‌شده ۱ به ۵۰ بوده و گشتاور را ۵۰برابر افزایش می‌دهد، اما سرعت را ۰/۰۲برابر می‌کند که به‌دلیل بالابودن سرعت موتورها و محدودبودن فضای کاری ربات، کاهش سرعت تاثیری در عملکرد ربات ندارد.



شکل ۱) نسخه صنعتی ربات ۴درجه آزادی دلتا

جدول ۱) مشخصات اجزای نسخه صنعتی ربات

مولفه	مدل	کارخانه سازنده
موتور	Ac Servo Motor SME80S-0075-30AAK-3LKH	کینکو
درایور سرو	FD422	کینکو
گیربکس	PEII 120	اپکس
کوپلینگ	JM65	اس.کا.اف
فلنج و شفت	جنس استیل	-

۳- تفاوت نسخه جدید با نسخه اولیه

نسخه اولیه ربات به‌دلیل پایین‌بودن گشتاور موتورها کارآیی مناسب را نداشت و گشتاور مورد نیاز برای حرکت بازوها تامین نمی‌شد و درایور مربوطه آنها را از مدار خارج می‌کرد. موتورهای نسخه اولیه متعلق به شرکت بونمت بوده است و بدون گیربکس مورد استفاده قرار می‌گرفتند. مشخصات این نوع موتورها در جدول ۲ آمده است و با توجه به تنظیم ضرایب کنترل‌کننده داخلی موتورها در حالت حداکثر، همچنان گشتاور موتورها توان لازم برای حرکت مناسب بازوها را تامین نمی‌کرد و حرکت ربات دچار مشکل می‌شد. با محاسبه دقیق‌تر گشتاور مورد نیاز برای ربات، نوع موتورها تغییر داده شد، ولی با توجه به این که بازه قیمت موتورها با افزایش گشتاور به‌شدت افزایش می‌یابد، مقرون به صرفه نیست که از موتورهای با گشتاور بالا استفاده نمود. بنابراین از یک گیربکس با نسبت دنده ۱ به ۵۰ استفاده شد. با استفاده از گیربکس، گشتاور واردشده به بازوها ۵۰برابر و سرعت ۰/۰۲برابر می‌شود و با توجه به این که فضای کاری ربات دلتا محدود بوده، سرعت با وجود ۰/۰۲برابرشدن نیز مطلوب است. در بخش نتایج عملی نمودارهای تاثیر وجود و عدم وجود گیربکس آورده شده است.

نوع درایور موتورها براساس نوع اتصال آنها انتخاب می‌شود. درایورهای بونمت فقط از پروتکل مدباس با اتصال توصیه استاندارد ۲۳۲ (RS232) پشتیبانی می‌کنند که از نظر چک‌کردن بیت‌های ارسالی و دریافتی کند هستند، اما درایورهای نسخه جدید که متعلق به شرکت کینکو است، با توجه به دیتاشیت، کار با آنها ساده بوده و از پروتکل مدباس با اتصال توصیه استاندارد ۴۸۵ (RS485) پشتیبانی می‌کنند. همچنین به‌صورت اتصال مستقیم توصیه استاندارد ۲۳۲ و اتصال توصیه استاندارد ۴۸۵ بوده که در حالت اتصال مستقیم نسبت به حالت مدباس، دستوردادن به موتورها کمی پیچیده‌تر است، اما مزیت آنها سرعت بالا در ارسال داده‌ها است.

جدول ۲) مشخصات موتورهای بونمت

پارامتر	مقدار
گشتاور (نیوتن‌متر)	۶
جریان (آمپر)	۶
سرعت (دور بر دقیقه)	۲۰۰۰
توان (کیلووات)	۱/۲

۴- معادلات سینماتیک ربات دلتا

در این قسمت تحلیل سینماتیک ربات موازی دلتا به‌طور کامل با جزئیات توضیح داده شده است. با تحلیل سینماتیک، هندسه حرکت یک بازو بدون درنظرگرفتن نیروها و گشتاورها مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این تحلیل ارتباط بین پارامترهای هندسی بازوها همراه با حرکت نهایی مجری نهایی مورد بحث قرار می‌گیرد[14, 15].

۴-۱- معادلات سینماتیک معکوس

هدف از حل معادلات سینماتیک معکوس این است که با توجه به موقعیت مجری نهایی در یک مختصات مرجع، زوایای مفاصل متحرک یا همان موقعیت موتورها به دست بیاید، به‌طوری که موقعیت مطلوب برای مجری نهایی ایجاد شود[16]. با توجه به شکل ۲، ابتدا به معرفی پارامترهای موجود در شکل پرداخته و سپس روند حل معادلات سینماتیک معکوس و شیوه به‌دست‌آوردن آن نشان داده می‌شود[17, 18].

با توجه به شکل ۲، یک دستگاه مختصات مرجع و دستگاه مختصات دیگر روی مجری نهایی (EE Frame) تعریف شده است. پارامترهای هندسی موجود روی شکل به‌صورت زیر هستند:

$$R_{\text{base}} = R_1,\ R_{\text{EE}} = R_2,\ B_1C_1 = L_1,\ C_1P_1 = L_2 \qquad (۱)$$

زاویه دوران و به‌عبارتی درجه‌آزادی چهارم روی مجری نهایی با φ نشان داده شده و زوایای موتورها با ϑ نمایش داده شده و مختصات نقطه B_1 به‌صورت زیر است:

$$B_1 = (R_1, 0, 0) \qquad (۲)$$

مختصات نقطه P_1 در موقعیت صفر بر مبنای دستگاه مختصات روی مجری نهایی به‌صورت زیر است:

$$P_1 = (R_2 \cos(\pi/12), R_2 \sin(\pi/12), 0) \quad (۳)$$

و مختصات $P1$ بعد از انتقال به دستگاه مختصات مرجع و اعمال ماتریس دوران به‌صورت زیر است:

$$P'_1 = Rot(\varphi) \times P_1 + [X \quad Y \quad Z]^T \quad (۴)$$

و مختصات نقطه C_1 به‌صورت زیر است:

$$C_1 = (R_1 - L_1 \sin\theta_1, 0, -L_1 \cos\theta_1) \quad (۵)$$

ماتریس دوران حول محور z به‌صورت زیر است:

$$Rot(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۶)$$

با استفاده از قید زیر:

$$|C_1 P'_1| = L_2 \quad (۷)$$

داریم:

$$\cos\theta_1 = \frac{-mZ \pm |Y + R_2 \sin\varphi| F}{2L_1[Z^2 + (Y + R_2 \sin\varphi)^2]} \quad (۸)$$

که در این رابطه m برابر است با:

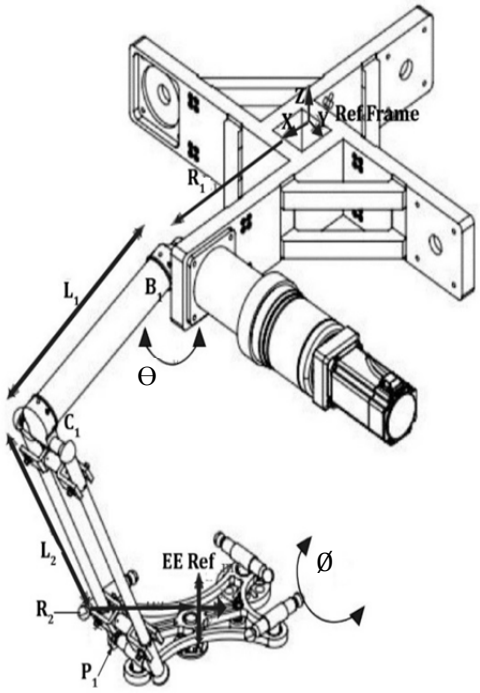
$$m = (Y + R_2 sin\varphi)^2 + (X + R_2 \cos\varphi - R_1)^2 + Z^2 + L_1^2 - L_2^2 \quad (۹)$$

و

$$\theta_1 = \cos^{-1}\left\{\frac{-mZ + (Y + R_2 \sin\varphi)F}{2L_1[Z^2 + (Y + R_2 \sin\varphi)^2]}\right\} \quad (۱۰)$$

که در آن F برابر است با:

$$F = \sqrt{4L_1^2 Z^2 - m^2 + 4L_1^2 (Y + R_2 \sin\varphi)^2} \quad (۱۱)$$



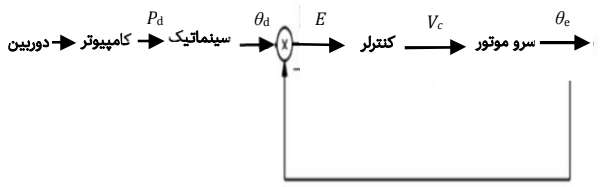
شکل ۲) پارامترهای موجود در یک بازوی ربات دلتا برای حل معادلات سینماتیک معکوس

۴-۲- معادلات سینماتیک مستقیم

هدف از حل معادلات سینماتیک مستقیم در ربات‌های موازی، تشخیص موقعیت مجری نهایی از روی موقعیت شفت موتورها است[19]. بر خلاف معادلات سینماتیک معکوس که جواب یکتا دارند، معادلات مستقیم جواب منحصربه‌فرد ندارند. با توجه به این که تحلیل سینماتیک مستقیم بازوها مد نظر این مقاله نیست، از توضیح بیشتر در این مورد صرف نظر شده است.

۵- طراحی کنترل‌کننده PID بر مبنای معادلات سینماتیک معکوس

کنترل، یکی از مهم‌ترین مسایل موجود در بحث رباتیک است. چندین روش برای کنترل سیستم وجود دارد که مهم‌ترین روش، استفاده از کنترل‌کننده تناسبی- انتگرال‌گیر- مشتق‌گیر است که پیچیدگی کمتری نسبت به دیگر کنترل‌کننده‌ها دارد. در این قسمت به طراحی کنترل‌کننده تناسبی- انتگرال‌گیر- مشتق‌گیر مبتنی بر معادلات سینماتیک معکوس پرداخته شده است. همچنین اجزای این کنترل‌کننده در شکل ۳ به‌طور کامل مشخص شده است[20]. ابتدا موقعیت مجری نهایی به‌عنوان ورودی به معادلات سینماتیک معکوس داده می‌شود و مقادیر مطلوب زوایای مفاصل فعال یا همان زوایای عملگرها به‌عنوان خروجی به دست می‌آیند[21, 22]. این مقادیر با مقادیر خوانده‌شده از انکودرهای موتورها، مقایسه می‌شود و اختلاف آنها که خطا نام دارد، به‌عنوان ورودی به بلوک کنترل‌کننده داده می‌شود. از آنجایی که در حالت سرعت به موتورها دستور داده می‌شود، خروجی کنترلر به‌عنوان دستور سرعت به موتورها داده می‌شود و این کار تا جایی ادامه پیدا می‌کند که خطای به‌دست‌آمده به اندازه مورد نظر برسد و مجری نهایی به مکان مطلوب انتقال یابد. همچنین مشخصات کنترل‌کننده طراحی‌شده در این بخش در جدول ۳ آورده شده است.



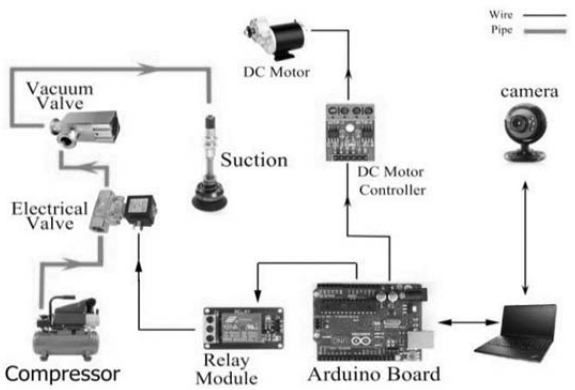
شکل ۳) کنترلر تناسبی- انتگرال‌گیر- مشتق‌گیر طراحی‌شده

جدول ۳) مشخصات پارامترهای موجود در شکل ۳

پارامتر	واحد	توضیح
P_d	میلی‌متر	موقعیت مجری نهایی
ϑ_d	رادیان	زوایای مورد نظر موتور
ϑ_e	رادیان	زوایای خوانده‌شده از انکودر
V_c	دور بر دقیقه	-
E	رادیان	تفاضل ϑ_d و ϑ_e

۶- تجهیزات نسخه صنعتی ربات دلتا

همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده، تجهیزات نسخه صنعتی ربات که متشکل از بینایی و کانوایر است شامل دوربین، برد آردوینو، ماژول رله، ماژول کنترلر موتور DC، شیر خلا، شیر برقی، کمپرسور و موتور DC می‌شود. شیر برقی، جریان هوای انتقالی به شیر خلا را کنترل می‌کند. موتور DC وظیفه گردش کانوایر را بر عهده دارد و به یک ماژول کنترلر به‌منظور تنظیم سرعت مجهز شده است. برد آردوینو نیز برای اتصال کامپیوتر به ماژول رله و کنترلر موتور DC مورد استفاده قرار می‌گیرد. درایور موتورها توسط یک کامپیوتر فرمان داده می‌شوند. زمانی که جسمی تشخیص داده شد، موقعیت آن روی کانوایر تعیین می‌شود و بازوهای ربات برای برداشتن آن هدایت می‌شوند. در شکل ۵ نسخه کامل ربات دلتا قابل مشاهده است.

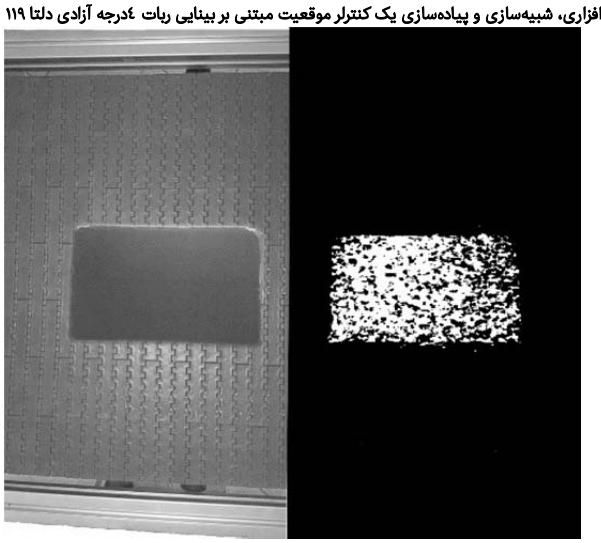


شکل ٤) نسخه صنعتی سیستم بینایی و کانوایر ربات

شکل ۵) نسخه کامل صنعتی سیستم بینایی، کانوایر و ربات

۷- مراحل تشخیص اجسام

تشخیص یک جسم نیاز به جست‌وجوی یک‌سری ویژگی‌ها در تصویر دارد و طبق این ویژگی‌ها جزئیات از تصویر استخراج می‌شود. یکی از این ویژگی‌ها که در تشخیص اجسام مورد استفاده قرار می‌گیرد، لبه محیط جسم است. برای پیداکردن آن کتابخانه اوپن‌سی‌وی دارای توابعی است که لبه اجسام را همراه با یک‌سری پارامترهای خاص تشخیص می‌دهد. در این قسمت برخی توابع همراه با جزئیات معرفی می‌شوند. تابع پیداکردن کانتور، تصویر را به شکل ماتریسی دریافت می‌کند و نقاط لبه جسم را در یک بردار دوبُعدی ذخیره می‌نماید[23]. از آنجایی که تصویر ورودی باید به شکل ۸بیتی تک‌کانال باشد، فضای رنگ تصویر از آرجی‌بی به اچ‌اس‌وی تغییر می‌یابد. فضای رنگ اچ‌اس‌وی، رنگ‌ها را بر پایه سه خاصیت رنگ، اشباع و وزن بیان می‌کند. در شکل ۶ برای تغییر فضای رنگ تصویر از تابع سی‌وی‌تی کالر استفاده می‌شود. برای رسم نقاط لبه جسم به‌منظور اطمینان از صحت عملکرد توابع استفاده‌شده از تابع رسم کانتور استفاده می‌شود. پیکسل مبدا تصویر نقطه گوشه چپ بالا در نظر گرفته می‌شود و برای دسترسی به سایر پیکسل‌های تصویر باید شماره آن نسبت به این پیکسل تعیین شود[24].



شکل ۶) خروجی توابع cvtColor و findCountor

۸- رابط کاربری گرافیکی (GUI)

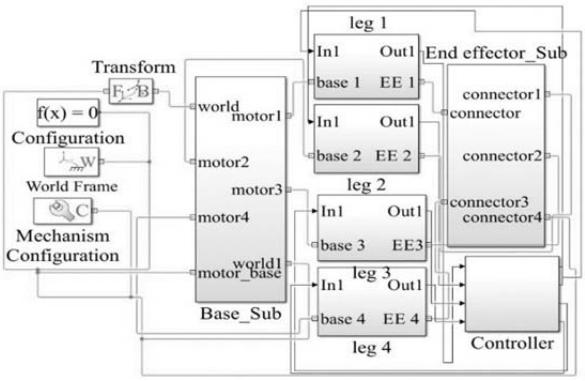
از آنجایی که برنامه طراحی‌شده برای تشخیص اجسام و همچنین کنترلر ربات به زبان پایتون برنامه‌نویسی شده است و تمام مراحل باید به‌صورت همزمان انجام شوند، پلت‌فرم پای‌کیوت ۵ (PyQt5) برای طراحی رابط کاربری گرافیکی انتخاب شده است. رابط کاربری شامل تصویر جسم شناسایی‌شده، موقعیت مجری نهایی ربات و سرعت موتور کانوایر و ربات است. برای کنترل سرعت موتور DC و فعال‌کردن ساکشن، یک بورد آردوییینو به رابط کاربری از طریق درگاه سریال کامپیوتر وصل شده است. ماژول کنترل سرعت موتور DC، ولتاژ را از طریق یکی از پین‌های مبدل دیجیتال به آنالوگ (DAC) بورد آردوییینو دریافت می‌کند و سپس سرعت موتور را مطابق با آن تغییر می‌دهد. همچنین ماژول رله با دریافت ولتاژ از یکی از پین‌های بورد آردوییینو، شیر خلا متصل به ماژول را فعال می‌کند.

۹- ساکشن مجری نهایی

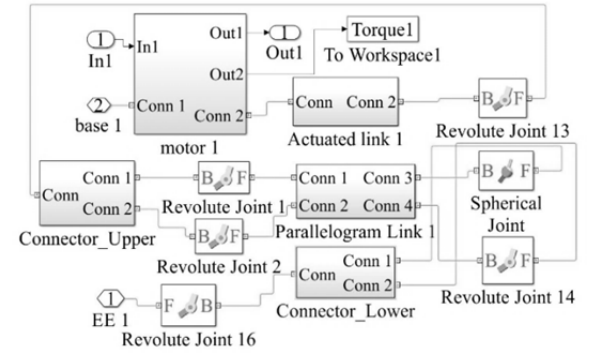
مجری نهایی برای برداشتن اجسام باید به یک ساکشن‌کاپ یا قاپک مجهز شود. قاپک‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند. نوع اول یک شیر خلا داخلی دارد و نوع دوم آن باید جداگانه به شیر خلا در بیرون از خود مجهز شود. روش عملکرد شیر خلا بدین صورت است که هوا با فشار بیشتر از فشار اتمسفر داخل شیر خلا دمیده می‌شود و در قاپک متصل به آن خلا به وجود می‌آید. زمانی که قاپک با جسم تماس پیدا می‌کند به‌علت این که در دو طرف آن اختلاف فشار وجود دارد، هوا به جسم نیرو وارد می‌کند تا اختلاف فشار را جبران کند. اما جسم سد راه آنها بوده و به همین خاطر جسم به قاپک چسبیده است و تا زمانی که فشار هوای داخل شیر خلا کمتر از فشار هوای اتمسفر شود، از آن جدا نمی‌شود.

۱۰- شبیه‌سازی

در این بخش مدل شبیه‌سازی‌شده ربات دلتا در نرم‌افزار MATLAB و در محیط سیم‌مکانیک آورده شده است. شکل ۷ نمای کلی از بلوک‌های شبیه‌سازی‌شده ربات را نشان می‌دهد که شامل صفحه ثابت، لینک‌های ربات و مجری نهایی است. شکل ۸ بلوک دیاگرام یک بازو از ربات را نشان می‌دهد و با توجه به این که دیگر بازوهای ربات نیز شبیه هم هستند، از نمایش آنها خودداری شد و توضیحات هر بلوک در شکل‌ها مشخص شده است.



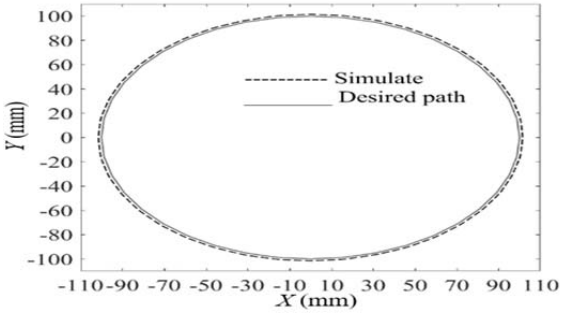
شکل ۷) بلوک دیاگرام شبیه‌سازی ربات



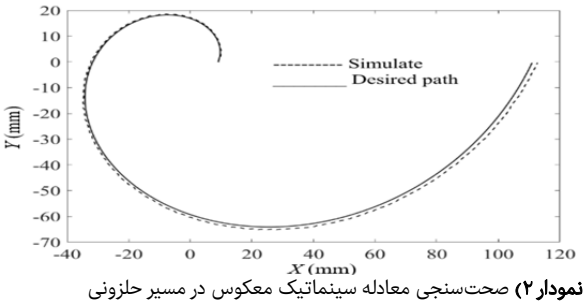
شکل ۸) بلوک دیاگرام یک بازو

۱۰-۱- صحت‌سنجی معادلات سینماتیک معکوس در شبیه‌سازی

در این قسمت معادلات سینماتیک به‌دست‌آمده، صحت‌سنجی و درستی این معادلات با استفاده از شبیه‌سازی ربات در نرم‌افزار MATLAB بررسی و ملاحظه می‌شود که بدون کنترل‌کننده، مسیر تعیین‌شده با دقت بالا دنبال می‌شود و خطای موجود به‌دلیل اندازه لینک‌های ربات و شعاع‌های مجری نهایی و صفحه ثابت ربات است. همچنین به‌دلیل روش حل معادلات سینماتیک معکوس نیز خطا مشاهده می‌شود. برای صحت‌سنجی، یک مسیر دایره‌ای به معادلات سینماتیک ربات داده می‌شود و زوایای هر چهار موتور به دست می‌آیند و در محیط شبیه‌سازی به مفصل‌های چرخشی که به‌جای موتور شبیه‌سازی شده‌اند، داده و موقعیت و جهت‌گیری ربات با استفاده از سنسورهای موجود در نرم‌افزار شبیه‌سازی خوانده می‌شود و با موقعیت و جهت‌گیری مطلوب داده‌شده به معادلات سینماتیک معکوس مقایسه می‌شوند. همان طور که در نمودار ۱ مشاهده می‌شود، مسیر دایره‌ای به شعاع ۱۰۰میلی‌متر با دقت بالا ردیابی شده است و در نمودار ۲ نیز مشاهده می‌شود که مسیر حلزونی با دقت بالایی ردیابی شده است. پس نتیجه گرفته می‌شود که معادلات سینماتیک معکوس به‌درستی محاسبه شده‌اند.



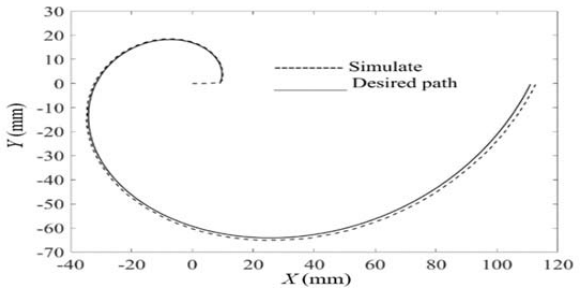
نمودار ۱) صحت‌سنجی معادله سینماتیک معکوس در مسیر دایره‌ای



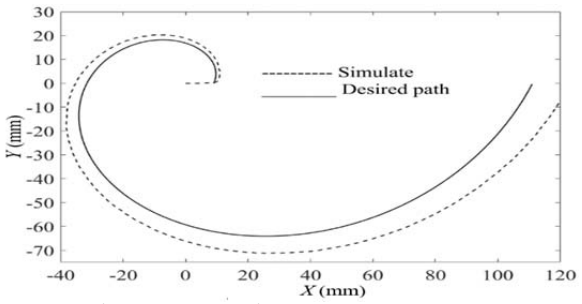
نمودار ۲) صحت‌سنجی معادله سینماتیک معکوس در مسیر حلزونی

۱۰-۲- نتایج شبیه‌سازی همراه با کنترل‌کننده

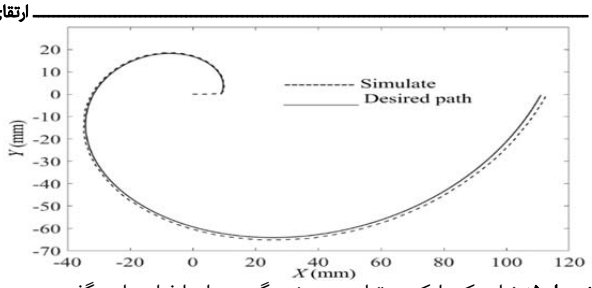
در این بخش کنترل ربات در فضای مفصلی و محیط شبیه‌سازی انجام شده و نتایج در نمودارهای ۵-۳ آورده شده است. ابتدا کنترلر تناسبی (p Controller)، سپس تناسبی- مشتق‌گیر (PD Controller) و در انتها تناسبی- انتگرال‌گیر- مشتق‌گیر طراحی شد و با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، کنترلر تناسبی-انتگرال‌گیر- مشتق‌گیر نتایج قابل قبولی را نشان داد. زمانی که از کنترلر تناسبی استفاده می‌شد، هر چه ضریب تناسبی زیادتر شد، همچنان جواب مورد نظر مشاهده نشد و حتی مقدار تناسبی از حدی که بیشتر می‌شود حرکت ربات را دچار مشکل می‌کند و خطا از خود نشان می‌دهد. در ادامه از کنترلر تناسبی- مشتق‌گیر استفاده شد. در طراحی اولیه کنترلر در قسمت مشتق‌گیر از تفاضل خطای لحظه آنی و لحظه قبل آن استفاده شد و به عبارتی بدون فیلتر پایین‌گذر بود و نتایج مورد قبول نبود و کنترلر بسیار ضعیف عمل کرد. به همین دلیل کنترلر تناسبی- مشتق‌گیر همراه با فیلتر پایین‌گذر طراحی شد که نتایج نسبت به قبل بهتر بود، اما خطای حالت ماندگار همچنان وجود داشت. در انتها از کنترل‌کننده تناسبی- انتگرال‌گیر- مشتق‌گیر استفاده شد تا خطای حالت ماندگار را نیز از بین ببرد و با دقت بسیار زیادی، مسیر حلزونی تعیین‌شده را که در نمودار ۶ قابل مشاهده است، ردیابی کند. خطای جذر میانگین مربعات کنترل‌کننده‌های طراحی‌شده برای ربات در جدول ۴ ذکر شده است. در تمامی نتایج ارایه‌شده برای انواع کنترل‌کننده‌ها، مجری نهایی در یک ارتفاع ثابت قرار دارد.



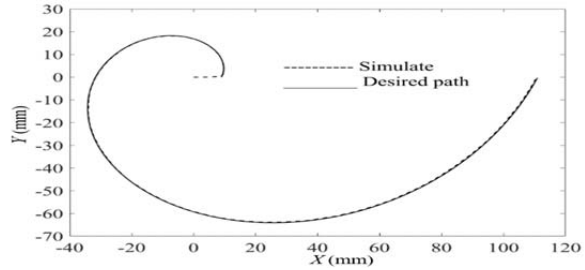
نمودار ۳) نتایج کنترل‌کننده نوع تناسبی



نمودار ۴) نتایج کنترل‌کننده تناسبی- مشتق‌گیر بدون فیلتر پایین‌گذر



نمودار ۵) نتایج کنترل‌کننده تناسبی- مشتق‌گیر همراه با فیلتر پایین‌گذر



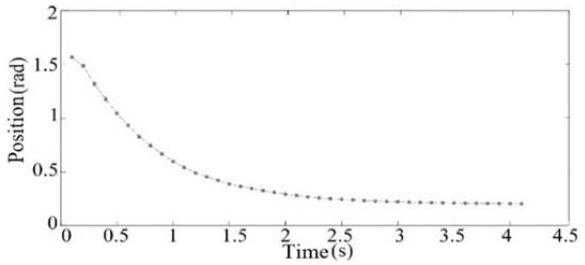
نمودار ۶) نتایج کنترل‌کننده تناسبی- انتگرال‌گیر- مشتق‌گیر

جدول ۴) خطای کنترل‌کننده‌های طراحی‌شده برای ربات

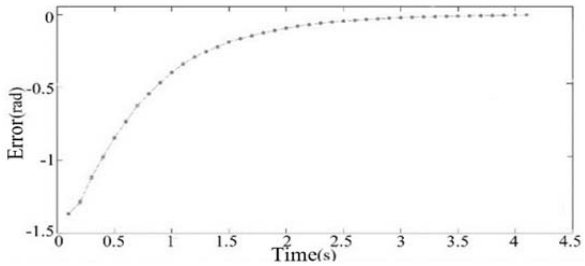
کنترل‌کننده	خطای جذر میانگین مربعات
تناسبی	۰/۰۰۹
تناسبی- مشتق‌گیر با فیلتر پایین‌گذر	۰/۰۰۹۱
تناسبی- مشتق‌گیر بدون فیلتر پایین‌گذر	۰/۰۲۸
تناسبی- انتگرال‌گیر- مشتق‌گیر	۰/۰۰۶۸

۱۱- نتایج عملی

نتایج به‌دست‌آمده از کنترل‌کننده طراحی‌شده در بخش ۵ مطابق نمودارهای ۷ و ۸ است. بعد از محاسبه معادله سینماتیک معکوس، θهای به‌دست‌آمده از معادله سینماتیک معکوس با زوایای حاصل از انکودرهای موتورها، مقایسه و خطای حاصل به‌عنوان ورودی سرعت به موتورها اعمال می‌شود. این کنترلر برای حالتی که مجری نهایی در راستای محور z حرکت کند، با خطای مورد نظر، موتورها را به نقاط مطلوب رسانده است. در تست انجام‌شده می‌توان نتیجه گرفت که کنترل‌کننده مورد استفاده با دقت بالا عمل می‌کند.

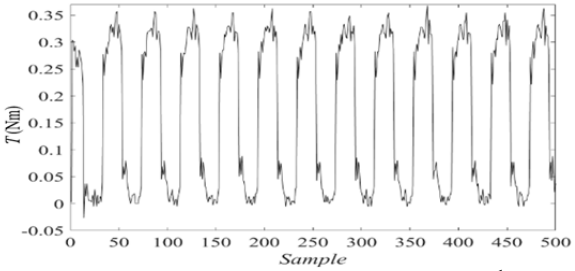


نمودار ۷) موقعیت موتورها در حرکت در راستای Z

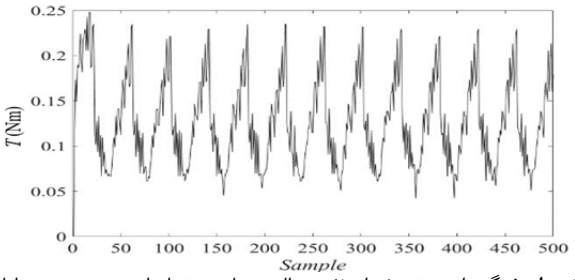


نمودار ۸) خطای موقعیت در حرکت در راستای Z

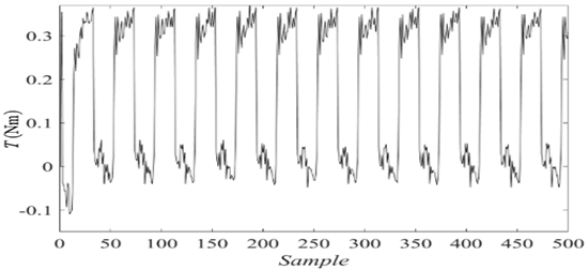
از آنجایی که در ربات از گیربکس استفاده شده و در شبیه‌سازی، گیربکس اعمال نشده است، گشتاور خوانده‌شده از موتورها در حالت شبیه‌سازی و عملی در این بخش مقایسه شده است. همان طور که از نمودارهای ۱۶-۹ مشخص است، گشتاور موتورها در حالت شبیه‌سازی بیشتر از گشتاور عملی بوده و از آنجایی که نسبت دنده گیربکس ۱ به ۵۰ است، گشتاور موتور در ۵۰ ضرب می‌شود و به ربات اعمال می‌شود. تفاوت ایجادشده در اندازه گشتاورهای شبیه‌سازی و عملی هم به‌دلیل وجود گیربکس و هم مدل شبیه‌سازی است. به عبارتی از آنجایی که در مدل شبیه‌سازی، وزن لینک‌ها با توجه به هندسه لینک‌ها محاسبه می‌شود، در اندازه گشتاورها تفاوت بیشتری مشاهده می‌شود.



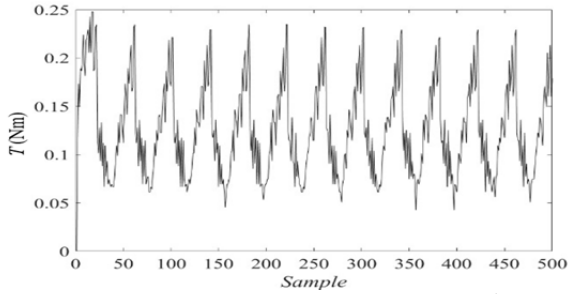
نمودار ۹) گشتاور موتور شماره ۱ در حالت عملی مرتبط با صحت‌سنجی معادله سینماتیک معکوس مسیر دایره‌ای‌شکل



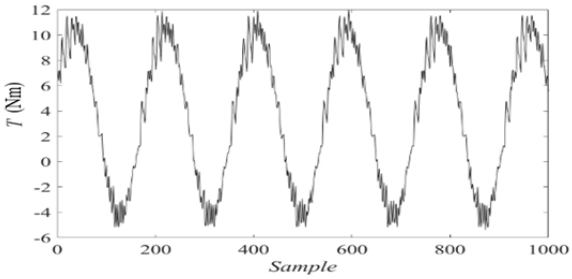
نمودار ۱۰) گشتاور موتور شماره ۲ در حالت عملی مرتبط با صحت‌سنجی معادله سینماتیک معکوس مسیر دایره‌ای‌شکل



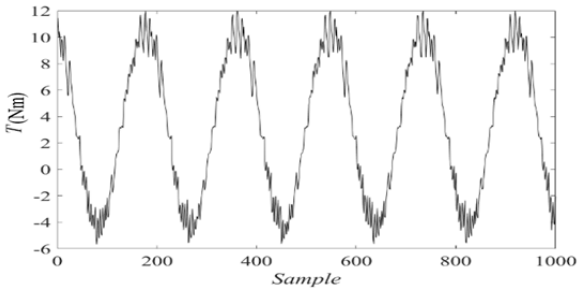
نمودار ۱۱) گشتاور موتور شماره ۳ در حالت عملی مرتبط با صحت‌سنجی معادله سینماتیک معکوس مسیر دایره‌ای‌شکل



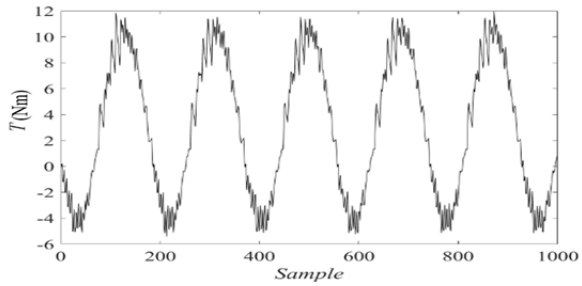
نمودار ۱۲) گشتاور موتور شماره ۴ در حالت عملی مرتبط با صحت‌سنجی معادله سینماتیک معکوس مسیر دایره‌ای‌شکل



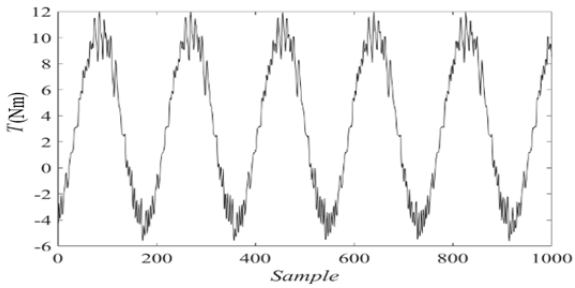
نمودار ۱۳) گشتاور موتور شماره ۱ در حالت شبیه‌سازی، مرتبط با صحت‌سنجی معادله سینماتیک معکوس مسیر دایره‌ای‌شکل



نمودار ۱۴) گشتاور موتور شماره ۲ در حالت شبیه‌سازی، مرتبط با صحت‌سنجی معادله سینماتیک معکوس مسیر دایره‌ای‌شکل



نمودار ۱۵) گشتاور موتور شماره ۳ در حالت شبیه‌سازی، مرتبط با صحت‌سنجی معادله سینماتیک معکوس مسیر دایره‌ای‌شکل



نمودار ۱۶) گشتاور موتور شماره ٤ در حالت شبیه‌سازی، مرتبط با صحت‌سنجی معادله سینماتیک معکوس مسیر دایره‌ای‌شکل

۱۲- نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

در این مقاله، یک نمونه صنعتی از ربات ۴درجه‌آزادی دلتا معرفی شد. مطابق با طراحی فلنج، کوپلینگ و شفت کمکی و استفاده از گیربکس، فشار بسیار کمتری به موتورها می‌آید. به عبارت دیگر، گشتاور مورد نیاز ربات دلتا تامین می‌شود. در ادامه معادلات سینماتیک با استفاده از روش هندسی به دست آمد و یک کنترل‌کننده تناسبی- انتگرال‌گیر- مشتق‌گیر مبتنی بر معادلات سینماتیک طراحی شد. برای صحت‌سنجی معادلات سینماتیک و همچنین طراحی کنترل‌کننده از شبیه‌سازی ربات در نرم‌افزار MATLAB استفاده و نتایج به‌صورت نمودار نشان داده شده است. همان طور که پیش‌بینی شده بود، مقدار خطا در کنترلر تناسبی- انتگرال‌گیر- مشتق‌گیر کمتر از کنترل‌کننده‌های دیگر است و خطا به مقدار ۰.۰۰۲۳ کاهش پیدا کرد. همچنین برای نشان‌دادن تاثیر وجود گیربکس، نمودارهای گشتاور در حالت عملی و شبیه‌سازی با هم مقایسه شده است. با توجه به این که کنترل‌کننده‌های طراحی‌شده در این مقاله در شبیه‌سازی و عمل در فضای مفصلی است، می‌توان در مقاله‌های آتی، کنترل‌کننده در فضای کاری را بررسی کرد و همچنین برای بهینه‌کردن کنترل‌کننده از روش‌های فازی عصبی و یادگیری ماشین در شناسایی سیستم استفاده شود.

تشکر و قدردانی: نویسندگان مقاله از کمک‌های علمی و معنوی جناب مهندس مرتضی شاه امیری در راستای انجام این مقاله کمال تشکر و سپاس را دارند.

تاییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

تعارض منافع: مقاله تعارض منافع ندارد.

سهم نویسندگان: علی روح‌اللهی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۲۵%)؛ مهدی آزمون (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۲۵%)؛ مهدی طالع‌ماسوله (نویسنده سوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۲۵%)؛ احمد کلهر (نویسنده چهارم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۲۵%)

منابع مالی: آزمایشگاه تعامل انسان و ربات دانشگاه تهران حمایت مالی پژوهش را برعهده داشته است.

منابع

1- Pierrot F, Nabat V, Company O, Krut S, Poignet P. Optimal design of a 4-DOF parallel manipulator: From academia to industry. IEEE Transactions on Robotics. 2009;25(2):213-224.

2- St-Onge BM, Gosselin CM. Singularity analysis and representation of the general gough-stewart platform. The International Journal of Robotics Research. 2000;19(3):271-288.

3- Gosselin CM, Hamel JF. The agile eye: A high-performance three-degree-of-freedom camera-orienting device. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 8-13 May, 1994, San Diego CA, USA. Piscataway: IEEE; 1994.

4- Sharifzadeh M, Tale Masouleh M, Kalhor A. On human-robot interaction of a 3-DOF decoupled parallel mechanism based on the design and construction of a novel and low-cost 3-DOF force sensor. Meccanica. 2017;52(10):2471-2489.

5- Karbasizadeh N, Zarei M, Aflakiyan A, Tale Masouleh M, Kalhor A. Experimental dynamic identification and model feed-forward control of Novint Falcon haptic device. Mechatronics. 2018;51:19-30.

6- Pierrot F, Reynaud C, Fournier A. DELTA: A simple and efficient parallel robot. Robotica. 1990;8(2):105-109.

7- Danaei B, Arian A, Tale Masouleh M, Kalhor A. Dynamic modeling and base inertial parameters determination of a 2-DOF spherical parallel mechanism. Multibody System Dynamics. 2017;41(4):367-390.

8- Zamani Fekri M, Zarei M, Tale Masouleh M, Yazdani M. Optimal design and fabrication of a 4-DOF quattrotaar parallel robot with singularity-free workspace by ABC and PSO algorithms. Modares Mechanical Engineering. 2016;16(6):149-158. [Persian]

9- Stan SD, Manic M, Maties V, Balan R. Kinematics analysis, design and control of an isoglide3 parallel robot (IG3PR). 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 10-13 Nov, 2008, Orlando FL, USA. Piscataway: IEEE; 2008.

10- Masouleh MT, Gosselin C, Saadatzi MH, Kong X, Taghirad HD. Kinematic analysis of 5-RPUR (3T2R) parallel mechanisms. Meccanica. 2011;46(1):131-146.

11- Bindu S, Prudhvi S, Hemalatha G, Sekhar MN, Nanchariahl MV. Object detection from complex background image using circular hough transform. International Journal of Engineering Research and Applications. 2014;4(4):23-28.

12- Azmoun M, Rouhollahi A, Tale Masouleh M, Kalhor A. An experimental study on the development, kinematics and control of a 4-DOF delta parallel manipulator. 4th International Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation (KBEI), 22-22 Dec, 2017, Tehran, Iran. Piscataway: IEEE; 2017.

13- Rouhollahi A, Azmoun M, Tale Masouleh M. Experimental study on the visual servoing of a 4-DOF parallel robot for pick-and-place purpose. 6th Iranian Joint Congress on Fuzzy and Intelligent Systems (CFIS), 28 Feb.-2 March, 2018, Kerman, Iran. Piscataway: IEEE; 2018.

14- Merlet JP. Parallel robots. Heidelberg: Springer Science & Business Media; 2006.

15- Xie F, Liu XJ. Design and development of a high-speed and high-rotation robot with four identical arms and a single platform. Journal of Mechanisms Robotics. 2015;7(4):041015.

16- Williams II RL. Inverse kinematics and singularities of manipulators with offset wrist. IASTED International Journal of Robotics and Automation. 1999;14(1):1-8.

17- Mehrafrooz B, Mohammadi M, Tale Masouleh M. Dynamic modeling and sensitivity analysis of an n-linkage planar serial robot to design parameters based on Sobol and EFAST methods. Modares Mechanical Engineering. 2016;16(6):321-332. [Persian]

18- Varshovi Jaghargh P, Naderi D, Tale Masouleh M. Forward kinematic problem of three 4-DOF parallel mechanisms (4-PRUR$_1$, 4-PRUR$_2$ and 4-PUU) with identical limb structures performing 3T1R motion pattern. Scientia Iranica Transaction B Mechanical Engineering. 2014;21(5):1671-1682.

19- Callegari M, Carbonari L, Palmieri G, Palpacelli MC, Tina D. Position control of a 3-CPU spherical parallel manipulator. Journal of Control Science and Engineering. 2013;2013:136841.

20- Vivas A, Poignet P. Predictive functional control of a parallel robot. Control Engineering Practice. 2005;13(7):863-874.

21- Bindu S, Prudhvi S, Hemalatha G, Raja Sekhar MN, Nanchariah MV. Object detection from complex background image using circular hough transform. International Journal of Engineering Research and Applications. 2014;4(4):23-28.

22- Karbasizadeh N, Zarei M, Aflakian A, Tale Masouleh M, Kalhor A. Experimental dynamic identification and model feed-forward control of Novint Falcon haptic device. Mechatronics. 2018;51:19-30.

23- Nidhi. Image processing and object detection. International Journal of Applied Research. 2015;1(9 Pt G):396-399.

24- Tang Z, Liu K, Yang Z, Pei Z, Zhang Z. Object tracking system for video recording based Qt and OpenCV. Proceedings of the 2016 International Conference on Mechatronics Engineering and Information Technology (ICMEIT). Paris: Advances in Engineering Research; 2016.