



Design, Fabrication, and Kinematic Analysis of a 6 DOF Mobile Wheeled Parallel Robot

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Maleki Roudposhti M.¹ BSc,
Agheli Hajiabadi M.*¹ PhD

How to cite this article

Maleki Roudposhti M, Agheli Hajiabadi M. Design, Fabrication, and Kinematic Analysis of a 6 DOF Mobile Wheeled Parallel Robot. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(7):1749-1759.

ABSTRACT

Wheeled robots have various applications in industrial, laboratory, art, and filming environments. The choice of wheel and platform type in these robots depends on the motion and the degrees of freedom expected from the robot. With an appropriate choice of the wheel and platform, the degrees of freedom of 3 (known as holonomic robots) can be achieved in which the robot can move in both x and y directions and also rotate about the z axis in the general coordinate system. If the wheeled robot is designed to carry objects, it is necessary to consider a platform on top of the robot for this purpose. In this paper, a 3-DOF Stewart platform is used such that it provides rotation about x and y axes as well as motion in direction of z axis. The goal of this research is to develop a wheeled robot equipped with the 3-DOF Stewart platform to carry objects with ability of orientation control within the path. With integrating these two robots, the resultant robot will have 6 degrees of freedom, three of which are provided by the Stewart platform (α , β , Δz) and the other three are provided by the wheeled platform (Δx , Δy , γ). Therefore, the robot, with 6 degrees of freedom, can be controlled via the six parameters of Δx , Δy , Δz , α , β , γ .

Keywords Wheeled Parallel Robot; Stewart Platform; Swerve Drive; Holonomic

¹Mechanical Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Electronic Engineering Department, Engineering Faculty, International Imam Khomeini University, Qazvin, Iran. Postal Code: 3414916818
Phone: -
Fax: -
n.bigdeli@eng.ikiu.ac.ir

Article History

Received: June 25, 2019
Accepted: December 13, 2019
ePublished: July 20, 2020

CITATION LINKS

[1] AZIMUT, a leg-track-wheel robot [2] Locomotion modes of a hybrid wheel-legged robot [3] Articulated wheeled robots: Exploiting reconfigurability and redundancy [4] Hybrid locomotion of leg-wheel ASTERISK H [5] Design of a leg-wheel hybrid mobile platform [6] Development of hexapod robot with maneuverable wheel [7] Dynamics and wheel's slip ratio of a wheel-legged robot in wheeled motion considering the change of height [8] Mechanical system and stable gait transformation of a leg-wheel hybrid transformable robot [9] Study on control schemes of flexible steering system of a multi-axle all wheel steering robot [10] Design of motion control system for omnidirectional four-drive mobile robot [11] Wheelchair stabilization by the control of a spatial 3-RRS mechanism [12] Stability and gait planning of 3-UPU hexapod walking robot [13] Motion planning and implementation for the self-recovery of an overturned multi-legged robot [14] Study on hexapod robot manipulation using legs [15] A novel six wheel-legged robot: Structure design and stability analysis in different typical gaits [16] Lab automation drones for mobile manipulation in high throughput systems [17] Force analysis of parallel robot machine tool with 4DoF [18] Instantaneous center of rotation of flexure joints and velocity kinematic analysis of microhexapod using screw theory [19] Introduction to autonomous mobile robots [20] omnidirectional drive systems kinematics and control [21] Introduction to Robotics, Mechanics, Planning, and Control [22] The kinematics study of a class of spatial parallel mechanism with fewer degree of freedom

طراحی، ساخت و تحلیل حرکتی ربات ۶ درجه آزادی چرخ دار موازی متحرک

محمد ملکی رودپشتی MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

محمد مهدی عاقلی حاجی آبادی PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

ربات‌های چرخ‌دار کاربردهای متنوعی در محیط‌های صنعتی، آزمایشگاهی، هنری، فیلم‌سازی و غیره دارند. در ربات‌های چرخ‌دار انتخاب نوع چرخ و نوع پلتفرم به شرایط محیطی، نحوه حرکت ربات و درجه آزادی حرکتی ربات بستگی دارد. با انتخاب نوع چرخ و پلتفرم مناسب، درجه آزادی ۳ (معروف به ربات‌های هولونومیک) را می‌توان به دست آورد به طوری که ربات بتواند در دو جهت x و y حرکت کرده و در طول حرکت نیز بتواند حول محور z در مختصات مرجع بچرخد. اگر ربات چرخ‌دار با هدف حمل و نقل طراحی شود باید بستری روی ربات در نظر گرفته شود تا بتواند محموله را حمل نماید. در این مقاله از پلتفرم موازی استوارت ۳ درجه آزادی برای این منظور استفاده شده است به طوری که به تنهایی قابلیت چرخش حول محورهای x ، y و حرکت در راستای محور z را دارد. هدف از این گزارش، ساخت رباتی چرخ‌دار است به طوری که یک پلتفرم ۳ درجه آزادی استوارت جهت قرارگیری محموله با قابلیت کنترل شیب در طی مسیر روی آن سوار شود. با ترکیب این دو ربات، ربات ساخته شده دارای ۶ درجه آزادی حرکتی خواهد بود. این درجات آزادی شامل ۳ درجه آزادی از سوی پلتفرم استوارت (پارامترهای Δx ، Δy ، Δz) و ۳ درجه آزادی از سوی پلتفرم چرخ‌دار (پارامترهای α ، β ، γ) است. در نتیجه به طور کلی ربات مذکور با پارامترهای Δx ، Δy ، Δz ، α ، β ، γ ۶ درجه آزادی قابل کنترل خواهد بود.

کلیدواژه‌ها: ربات چرخ‌دار، پلتفرم استوارت، سوئرو درایو، هولونومیک

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۲۲

*نویسنده مسئول: agheli@modares.ac.ir

مقدمه

با توجه به اهمیت جابجایی و موقعیت‌دهی قطعات کار چه در محیط‌های بیرونی و چه در داخل کارگاه‌های تولیدی، تجهیزات گوناگونی از گذشته تاکنون ساخته و ارایه شده است. از جمله ابتدایی‌ترین و ساده‌ترین این تجهیزات می‌توان به گاری‌هایی که به منظور جابجایی قطعات در کارگاه‌های مختلف استفاده می‌شود اشاره کرد. با مرور زمان جرتقیل‌های سقفی مانند جرتقیل‌های مکانیکی، مغناطیسی و غیره کاربرد گسترده‌ای پیدا کردند. این سیستم‌ها جابجایی و موقعیت‌دهی را نسبت به گاری‌ها به صورت چشمگیری بهبود بخشیدند، اما باز هم از دقت مناسبی در موقعیت‌دهی و جابجایی قطعات برخوردار نبودند و همچنین محدود به جابجایی قطعات در داخل کارگاه‌ها بودند. سیستم‌های دیگری نیز نظیر لیفتراک‌ها، امروزه در کارخانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند که این سیستم‌ها به دلیل انعطاف‌پذیری پایینی که دارند به منظور جابجایی قطعات سنگین و موقعیت‌دهی با دقت بسیار پایین مورد استفاده قرار می‌گیرند. با ادامه تحقیقات در این زمینه و نیل بیشتر

به سمت اتوماسیون، محققان موفق به ارایه دستگاه‌های (Automate Guided Vehicle; AGV) شدند. امروزه این سیستم‌ها مورد توجه محققان زیادی است و دارای مکانیزم‌های متفاوتی به منظور هدایت و ناوبری هستند که این خود باعث ایجاد خطاهایی در کاربرد این دستگاه‌ها شده است. به عنوان مثال AGV‌هایی که براساس GPS کار می‌کنند در فضاهای بسته خطا ایجاد می‌کنند و یا AGV‌هایی که براساس رنگ روی زمین قطعات را جابجا می‌کنند در صورت پاک‌شدن این خطوط باعث ایجاد خطا می‌شوند. از جمله معایب دیگر این سیستم‌ها می‌توان عدم توانایی در موقعیت‌دهی دقیق قطعه‌کار را نام برد. این سیستم‌ها همچنین در برخورد با موانع به دلیل انعطاف‌پذیری پایینی که دارند قادر به عبور از مانع و انجام وظیفه محوله نیستند.

میچائوود و همکاران^[1]، ربات آزیموت (Azimot) را که یک ربات پادار چرخ‌دار است طراحی کردند. این ربات به شکل متقارن ساخته شده است و از ۴ چرخ- پای جداگانه تشکیل شده است. این ربات می‌تواند در جهت بالا، پایین یا مستقیم حرکت کند و حتی می‌تواند بدون تغییر جهت ربات به طرفین نیز حرکت کند که مزیتی در مانورپذیری بالای این ربات محسوب می‌شود. بسرون و همکاران^[2]، بر روی مودهای حرکتی ربات چرخ‌دار- پادار هایلوس (Hylos) کار کرده‌اند. آنها حرکات ربات چهارپای خود را در سه وضعیت حالت چرخش خالص، حالت چرخش به همراه تغییر موقعیت بدنی ربات و حالت حرکت کرم‌وار بررسی کردند. بررسی‌های به عمل آمده جهت کنترل بهتر مکانیزم ربات بود تا شرایط فیزیکی ربات و نیروهای وارده بر آن در حالت بهینه باشد. فو و همکاران^[3]، از دانشگاه بوفالو رباتی را معرفی کردند که دارای سه درجه آزادی بوده و قابلیت حرکت در مسیرهای باریک را نیز داشت. این ربات قابلیت تغییر مکان هندسی چرخ‌ها نسبت به شاسی را داشته و در تقابل با مسیرهای باریک قابلیت تغییر شکل و کوچک‌شدن را دارا است. یوشیوکا و همکاران^[4]، ربات استریکس اچ (Asterisk H) را در دانشگاه اوساکا ژاپن ساختند که یک ربات هگزاپاد مجهز به شش چرخ است. هر کدام از چرخ‌ها قابلیت چرخش حول محور خود را دارا بوده و این ربات با انتقال مرتب حرکت بین چرخ‌ها و پاهای براساس سنسور بازخورد حرکت می‌کند. در حالت ایستاده در سطح صاف، ربات به وسیله سه پا با چرخ‌ها برای حرکت استفاده می‌کند و بعد از تشخیص مانع پاهای حمایتی و حرکتی وارد عمل شده و از مانع عبور می‌کند. شن و همکاران^[5]، ربات کوادروپد (Quattroped) را طراحی کردند. این ربات ترکیبی شامل چهار پا بوده که هر پا می‌تواند به صورت جداگانه به یک چرخ و بالعکس تبدیل شود. هر چرخ- پا از یک چرخ بزرگ ساخته شده است که این چرخ از دو نیم‌دایره تشکیل شده که به روی همدیگر جمع می‌شوند در حالت نیم‌دایره ربات به حالت حرکت پادار تبدیل می‌شود و وقتی یکی از نیم‌دایره‌ها باز می‌شود پای ربات به حالت چرخ تبدیل شده و می‌تواند در سطوح صاف عملکرد مناسب‌تری داشته باشد، اما قسمت پای این ربات دارای پیچیدگی‌های زیادی است که قابلیت تغییر ارتفاع دارد.

انعطاف‌پذیری بالایی است که هم می‌تواند با چرخ در مسیر حرکت و هم از پاهای خود به‌عنوان منیپولاتور استفاده کند. کیم و^[16]، یک ربات دلتا از خانواده ربات‌های استوارت ۶ درجه آزادی را بر روی یک پرنده چهار ملخی نصب کردند تا برای جابجایی قطعات با دقت بالا از آن استفاده کنند. نتیجه این پژوهش به گونه‌ای بوده که جابجایی‌های خطی و زاویه‌ای را با موفقیت گذرانده که نشان‌دهنده نقش مهم پلتفرم استوارت خواهد بود.

در زمینه محاسبات درجات آزادی به وسیله تئوری پیچواره، محبوب‌خواه و دانشمند^[17]، یک ربات موازی چهار درجه آزادی را از تئوری پیچواره برای تحلیل نیرویی ربات استفاده کردند که در این مقاله برای تحلیل نیاز به محاسبه درجه آزادی بود. روحانی اصفهانی و ناطق^[18]، از یک میکروهاگزیپاد بر روی هاگزیپادی بزرگتر جهت افزایش دقت در منیپولاسیون استفاده کرد. این پژوهش به بررسی درجات آزادی مفصل خمشی میله‌ای به وسیله تئوری پیچواره پرداخته است و پس از آن محور آبی دوران مفصل‌های خمشی به ازای هر پیچه محدود سکوی متحرک به‌دست آمد.

طبق مطالعات صورت‌گرفته بیشتر ربات‌های چرخ‌دار ترکیبی، از ترکیب پلتفرم چرخ‌دار و مکانیزم ربات سری هستند. نوع پلتفرم چرخ‌دار با توجه به محیط کاری انتخاب می‌شود. مانورپذیری ربات در مسیر حرکت اهمیت بالایی دارد که از قابلیت‌های مهم ربات محسوب می‌شود و همچنین طراحی مکانیزمی ساده و کارآمد از نقاط قوت یک ربات بوده و موجب کاهش وزن و مصرف انرژی ربات خواهد شد. نوع دیگری از ربات‌های چرخ‌دار ترکیبی را می‌توان از نوع چرخ‌دار موازی نام برد، که مطالعات کمتری روی آن صورت گرفته است. هدف از مطالعه بر روی این نوع ربات‌ها طراحی مکانیزمی بهینه با بیشترین درجات آزادی ربات و کمترین تعداد عملکرد است. مزیت ترکیب این دو پلتفرم، استفاده در سیستم‌های حمل‌ونقل و استفاده در مناطقی که به حضور انسان نیازی نیست، است. این نوع ربات‌ها قابلیت استفاده در محیط‌هایی از جمله صنعتی، آزمایشگاهی، هنری، فیلم‌سازی و غیره را دارند. با توجه به بررسی انواع پلتفرم، مکانیزم، مزایا و معایب ربات‌های معرفی‌شده، هدف از این تحقیق طراحی و ساخت یک ربات ترکیبی چرخ‌دار- موازی با ۶ درجه آزادی متحرک است، به‌طوری که بتوان از مزایای حرکتی ربات‌های چرخ‌دار و نیز قابلیت منیپولاسیون ربات‌های موازی به‌طور همزمان بهره برد. طبق مطالعه پیشینه پژوهش صورت‌گرفته و آخرین اطلاعات نویسندگان، هیچکدام از ربات‌ها ۶ درجه آزادی متحرک نبوده و ربات ارائه‌شده در این مقاله در نوع خود نوین بوده و نمونه مشابهی ندارد.

در بخش دوم، مدل سینماتیک ربات در مورد پلتفرم‌های استوارت و سوئرو دایور بررسی شده و درجات آزادی ربات محاسبه می‌شود. و در بخش سوم ساخت ربات گزارش شده و مباحث مکانیک، الکترونیک و برنامه‌نویسی ربات ارائه خواهد شد. در بخش چهارم، ربات ساخته شده و نتایج عملی و تئوری آن مورد بررسی قرار گرفته و در انتها در بخش پنجم نتیجه‌گیری پژوهش معرفی خواهد شد.

شهریل و همکاران^[6]، یک ربات هاگزیپاد را به رباتی ترکیبی تبدیل کردند که هر پای آن قابلیت تبدیل به سازه چرخ‌دار برای ربات را دارد. هدف از افزودن این چرخ‌ها مانند سایر ربات‌های ترکیبی، استفاده از آنها در سطوح صاف است. اینکه ربات از کدام مکانیزم حرکت استفاده کند به اطلاعات سنسورهای دستگاه و به الگوریتمی که در کنترلر ربات توسعه داده شده است بستگی دارد.

دینگ و همکاران^[7]، ربات ترکیبی پادار- چرخ‌داری را مورد بررسی دینامیکی قرار دادند. این ربات هاگزیپاد دارای چرخ در مفصل بالایی هر پا است که با خم‌شدن قسمت پایین، چرخ به زمین تماس می‌شود. لو و همکاران^[8]، ربات هیتر و (Hitro I) را معرفی کردند.

این ربات یک ربات پادار- چرخ‌دار با قابلیت تغییر فرم است. این ربات از چرخ‌ها برای سرعت سریع در سطوح صاف و همچنین از حالت پادار برای انعطاف‌پذیری ربات در سطوح ناهموار بهره می‌برد.

این ربات می‌تواند از سه حالت حرکت، حرکت چرخ‌دار، حرکت چهارپا و حرکت ترکیبی استفاده کند. ژانگ و همکاران^[9]، در مقاله‌ای یک سیستم کنترل فرمان جدید را جهت درک بهتر فرمان هر چرخ با

کمترین متغیرهای کنترل پیشنهاد کردند. در این مکانیزم ربات حول مرکز آبی دوران گردش می‌کند، سرعت چرخش و زاویه فرمان هر چرخ برحسب فاصله از مرکز گردش ربات متفاوت خواهد بود که

نشان داده شد. سوئرو درایوها دارای مانورپذیری بالایی در مسیر حرکت هستند ولی به‌دلیل مکانیزم پیچیده آن می‌توان از تعداد کمتری از چرخ‌ها در پلتفرم استفاده کرد. لو و همکاران^[10]، رباتی

را معرفی کردند که بر روی یک پلتفرم چندجهته چرخ‌دار نصب بوده که از نوع سوئرو درایو است. در این پلتفرم انواع حالت‌های حرکتی برای این پلتفرم مورد بررسی قرار گرفت که سه درجه آزادی را برای

این پلتفرم محیا کردند. جواد و همکاران^[11]، ربات استوارت پلتفرم از نوع 3-RRS را بر روی پلتفرم چرخ‌دار نصب کردند.

بیشترین تعداد درجات آزادی این ربات، ۵ درجه آزادی است و به‌منظور کنترل ربات در عبور از مسیرهای ناهموار و پایداری اجسام روی پلتفرم مطالعاتی صورت گرفته است، از معایب این ربات می‌توان به استفاده از پلتفرم چرخ‌دار نامناسب که از نوع تسمه‌ای

و پلتفرم استوارت از نوع 3-RRS که توان کمی برای حمل بار دارد اشاره کرد. لی و همکاران^[12]، بر روی پلتفرم استوارت از نوع 3-

UPU پژوهش انجام داده‌اند که با توجه به درجات آزادی این پلتفرم مکانیزمی طراحی کردند که بتواند با تغییرات ارتفاع و زاویه‌های پلتفرم، ربات مذکور حرکت کرده و از موانع عبور کند. این ربات با توجه به انعطاف‌پذیری محدود، سرعت بسیار کمی در حرکت دارد.

پنگ و همکاران^[13]، یک ربات شش‌پا با الهام از حرکت حشرات معرفی کردند تا در اثر واژگونی در مسیر بتواند ربات به حالت اولیه بازگشته و به حرکت خود ادامه دهد. دینگ و یانگ^[14] رباتی با

شش‌پا را معرفی کردند که با توجه به هر موقعیتی که ربات قرار دارد، چندپای ربات وظیفه منیپولیشن را دارند که مواقع ضروری برای حمل قطعات بسیار کاربردی خواهد بود. ژانگ و همکاران^[15]،

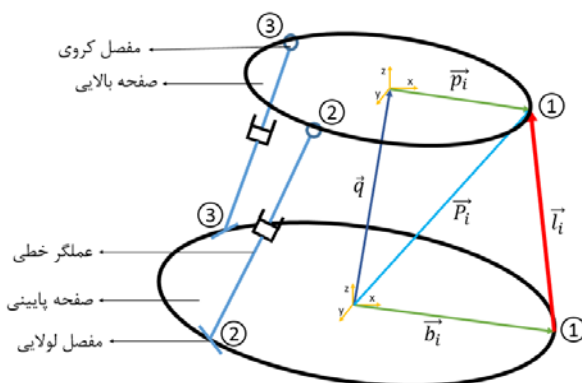
ربات را معرفی کردند که دارای شش‌پای متحرک است که دارای

مدل سینماتیک

در این بخش، تئوری هر دو پلتفرم موازی و چرخدار تحت مطالعه قرار گرفته تا براساس درجات آزادی آنها، مکانیزم مناسب ربات طراحی شود.

پلتفرم استوارت

ربات استوارت از معروفترین ربات‌های موازی است که در صنعت کاربردهای فراوانی دارد. این ربات به دلیل درجات آزادی مناسب و انعطاف‌پذیری بالای پلتفرم، برای جابجایی و دوران در راستای محورهای اصلی بسیار مناسب است. از مرسوم‌ترین این پلتفرم نوع سه درجه آزادی و شش درجه آزادی است، نوع سه درجه آزادی قابلیت جابجایی در راستای محور Z و دوران حول محورهای X و Y را دارد و همچنین نوع شش درجه آزادی قابلیت جابجایی در راستا و دوران حول محورهای اصلی را خواهد داشت. برای ربات مورد نظر در این پروژه پلتفرم سه درجه آزادی از نوع 3-RPS که به دلیل وجود موتورهای خطی توانایی تحمل بار بیشتر نسبت به انواع دیگر را دارد انتخاب شد. این پلتفرم شامل دو صفحه بالایی و پایینی و سه عملگر خطی بوده که توسط سه مفصل کروی و سه مفصل لولایی به یکدیگر متصل شده‌اند. مزیت این مکانیزم نسبت به سایر مکانیزم‌های سه درجه آزادی تحمل نیروی بیشتر در راستای محور Z است. شکل ۱ بیانگر تصویر شماتیک از این پلتفرم است.



شکل ۱) نمای شماتیک استوارت پلتفرم سه درجه آزادی

در تئوری این پلتفرم، ابتدا باید برای دو صفحه بالا و پایین، دو مبدا مختصات جدا از هم تعریف کرده و مختصات هر مفصل را در همان صفحه به دست آورد. با دانستن این مختصات باید یک ماتریس دوران برای دوران حول محورهای X و Y محاسبه کرد، زیرا این پلتفرم تنها حول این محورها دوران دارد. ماتریس دوران حول محورهای X و Y برابر است با:

$$R_T = \begin{bmatrix} c\beta & 0 & -s\beta \\ -s\alpha \cdot s\beta & c\alpha & -s\alpha \cdot c\beta \\ c\alpha \cdot s\beta & s\alpha & c\alpha \cdot c\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

بردار $\vec{q} = [0 \ 0 \ q_z]^T$ بردار جابجایی نامیده می‌شود که مبدا مختصات دو صفحه بالا و پایین را به یکدیگر وصل می‌کند. با قراردادن مختصات مفصل‌های بالایی و پایینی و همچنین بردار جابجایی و ماتریس دوران در رابطه ۲ (سینماتیک معکوس)، بردار

هر پای پلتفرم به دست می‌آید که مقدار طول بردار برابر با طول هر کدام از عملگرهای خطی است.

$$\vec{l}_i = \vec{q} + (R \times \vec{p}_i) - \vec{b}_i \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

با توجه به اینکه پلتفرم استوارت دارای سه درجه آزادی حرکتی است، سه متغیر در این پلتفرم کنترل می‌شود که شامل پارامتر α که زاویه دوران حول محور X، β زاویه دوران حول محور Y و q_z فاصله مرکز تا مرکز دو صفحه بالایی و پایینی است. تغییر مقادیر و کنترل این سه پارامتر که منجر به موقعیت‌دهی پلتفرم می‌شود مستلزم تغییر طول پاهای پلتفرم استوارت است. از این رو، رابطه ۲ معادله اصلی به‌عنوان سینماتیک معکوس ربات به حساب می‌آید.

سوئرو درایو

مانورپذیری (Maneuverability) ربات چرخدار به چرخ‌ها و نوع عملگر آن بستگی دارد که با توجه به انواع آن، ربات‌های چرخدار سه درجه آزادی هولونومیک (Holonomic) بیشترین مانورپذیری در مسیر را دارند. ربات‌های چرخدار غیرهولونومیک (Non-holonomic) کمتر از سه درجه آزادی داشته و در ساختار ساده‌تر و ارزان‌تر هستند زیرا برای حرکت به کمتر از سه عملگر نیاز دارند. یک وسیله هولونومیک می‌تواند به صورت آبی در هر جهت حرکت کند این قابلیت، چندجهته بودن نامیده می‌شود. همچنین تعادل به صورت ذاتی در رباتی با سه چرخ یا بیشتر وجود دارد، اما در مواردی که تعداد چرخ‌ها از سه بیشتر است برای اطمینان از تماس تمام چرخ‌ها با سطح مسیر در سطوح ناهموار، یک سیستم تعلیق باید استفاده شود [19].

با توجه به درجات آزادی پلتفرم موازی باید برای پلتفرم ربات‌های چرخدار پلتفرمی را انتخاب کرد که بتواند درجات آزادی مکمل برای پلتفرم استوارت (موازی) را مهیا نماید. درجات آزادی مکمل یعنی، پلتفرم بتواند قابلیت جابجایی در راستای محورهای X و Y و دوران حول محور Z را داشته باشد چرا که جابجایی در راستای محور Z و دوران حول محورهای X و Y توسط پلتفرم استوارت تامین می‌شود. در این پلتفرم می‌توان از چرخ‌های چندجهته استفاده کرد. این چرخ‌ها شامل چرخ‌های کروی، فرمان‌پذیر و سوئدی است. برای هر نوع چرخ تعداد متفاوتی موتورهای الکتریکی استفاده می‌شود و هر نوع پلتفرم دارای محیط کاربری متفاوت نسبت به یکدیگر هستند. به‌عنوان مثال از پلتفرم چرخ‌های سوئدی در سطوح صاف و هموار استفاده می‌شود. اما با توجه به محیط کاربری ربات مذکور باید پلتفرمی را طراحی کرد تا بتواند در محیط‌های ناهموار نیز قابلیت جابجایی و مانورپذیری داشته باشد.

با توجه به شرایط محیطی و درجه آزادی حرکتی ربات، از پلتفرم ربات‌های چرخدار با چرخ‌های فرمان‌پذیر می‌توان استفاده کرد که با توجه به قطر چرخ‌های آن می‌تواند از ناهمواری مسیر عبور کند. با توجه به تعداد سه عدد عملگرهای پلتفرم استوارت، باید پلتفرم چرخ‌داری را طراحی کرد که دارای سه چرخ فرمان‌پذیر باشد و نحوه قرارگیری پلتفرم استوارت به صورتی خواهد بود که هر عملگر بر روی هر چرخ قرار گیرد تا تقسیم وزنی کاملاً بر روی چرخ‌ها اعمال شود.

عمده برای محاسبات درجه آزادی استفاده می‌شود. با توجه به ساختار سه درجه آزادی بخش استوارت، دو نوع از این پلتفرم مورد بررسی قرار گرفت. نوع 3-UPU که در دو سر عملگر خطی مفصل‌های یونیورسال قرار می‌گیرد و نوع 3-RPS که در یک طرف موتور خطی مفصل لولایی و طرف دیگر مفصل کروی قرار گرفته است. معادله گرابلر نشان می‌دهد که این ربات در هر دو نوع مذکور، سه درجه آزادی خواهد داشت. ولی در عمل این‌گونه نبوده و نشان‌دهنده نقص در معادله گرابلر خواهد بود.

برای رفع این نقص ژو و همکاران [22]، از تئوری پیچواره برای محاسبه درجات آزادی مکانیزم‌ها استفاده کردند. بدین صورت که:

1- مکانیزم به صورت حلقه‌ای تجزیه شود.
 2- مختصات پلوکر برای هر مفصل در حلقه نوشته شود.
 3- پیچواره سینماتیک $S_i = [T_x \ T_y \ T_z \ R_x \ R_y \ R_z]$ تشکیل داده شود.

4- پیچواره معکوس براساس تئوری پیچواره متناوب محاسبه شود.
 $S_i \circ S_i^r = 0$
 $T_x \cdot R_x^r + T_y \cdot R_y^r + T_z \cdot R_z^r + R_x \cdot T_x^r + R_y \cdot T_y^r + R_z \cdot T_z^r = 0$ (5)
 5- ابعاد ماتریس در پیچواره معکوس و درجه آزادی $F = 6 - \dim S_i^r$ محاسبه شود.

پارامترهای فوق مربوط به تئوری پیچوار است که در بخش علایم انگلیسی توضیح داده شده است.

بدین منظور برای بخش استوارت، مکانیزم را تجزیه کرده که در شکل 3 نشان داده شده است. سپس مختصات پلوکر برای هر مفصل در حلقه P_1B_1 با توجه به مختصات $B_1(l \cos \beta_1 \cos \alpha_1 \ l \cos \beta_1 \sin \alpha_1 \ l \sin \beta_1)$ نوشته شده است که در رابطه 6 نشان داده شده است:

$S_1 = [\sin \alpha_1 \ -\cos \alpha_1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$
 $S_2 = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$
 $S_3 = [\sin \alpha_1 \ -\cos \alpha_1 \ 0 \ l \cos \beta_1 \cos \alpha_1 \ l \cos \beta_1 \sin \alpha_1 \ l \sin \beta_1]$
 $S_4 = [0 \ 0 \ 1 \ l \cos \beta_1 \cos \alpha_1 \ l \cos \beta_1 \sin \alpha_1 \ l \sin \beta_1]$
 داده‌های رابطه 6 برابر با درایه‌های ماتریس مختصات پلوکر $S_{P_1B_1}$ خواهد بود که به وسیله آن پیچواره معکوس ماتریس به دست می‌آید، که در رابطه 7 نشان داده شده است.

$S_{P_1B_1} = [S_1 \ S_2 \ S_3 \ S_4]^T$
 $S_{P_1B_1} \circ S_{P_1B_1}^r = 0$ (7)
 $S_{P_1B_1}^r = (0 \ 0 \ 0 \ \cos \alpha_1 \ \sin \alpha_1 \ 0)$

با توجه به تقارن مکانیزم، هر سه حلقه پیچواره معکوس برابر دارند که ماتریس پیچواره معکوس پلتفرم برابر رابطه 8 خواهد بود.

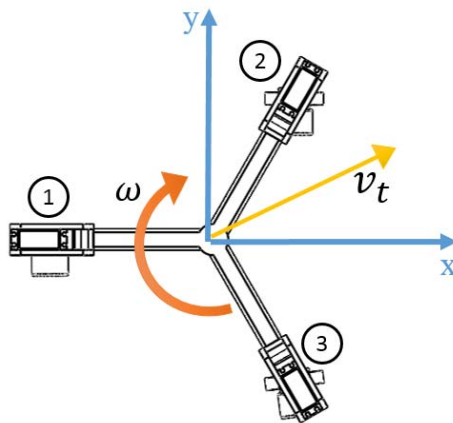
$S_T^r = \begin{bmatrix} S_{P_1B_1}^r \\ S_{P_2B_2}^r \\ S_{P_3B_3}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_1 & \sin \alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_2 & \sin \alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_3 & \sin \alpha_3 & 0 \end{bmatrix}$ (8)

در نتیجه با به دست آوردن این ماتریس درجه آزادی پلتفرم برابر $F = \dim S_T^r = 6 - 2 = 4$ خواهد بود.

درجه آزادی مکانیزم که برای ساختار 3-UPU محاسبه شده است، نشان می‌دهد که مکانیزم مربوطه دارای چهار درجه آزادی شامل

در کنترل یک ربات برای حرکت در مختصات مرجع دو پارامتر ω, v_t معرف حرکت ربات با سرعت و گردش، مورد نیاز است. همچنین در ربات‌های هولونومیک حرکت چرخنگی نیز در حرکت ربات موثر خواهد بود. با استفاده از فرمول‌های سینماتیک معکوس، ربات توسط سه پارامتر θ, ω, v_t کنترل می‌شود.

برای فهم بهتر نمای شماتیک ربات در شکل 2، موقعیت چرخ‌ها نسبت به نقطه مرجع محلی در پلتفرم ربات مشخص می‌شود. سپس با توجه به موقعیت چرخ‌ها معادلات سینماتیک معکوس به دست می‌آید. این تئوری مربوط به تئوری ربات‌های همه جهته است که توسط بیکر و مکینزی در کنفرانس فرست (FIRST) ارایه شده است [20].



شکل 2) نمای شماتیک پلتفرم سوئرو درایو و موقعیت چرخ‌های پلتفرم نسبت به مختصات مرجع

با توجه به شکل 2، با به دست آوردن مختصات هر چرخ می‌توان معادلات مربوط به سرعت خطی و سرعت دورانی را به دست آورد. با توجه به مختصات و سرعت پارامتری هر چرخ و زاویه فرمان چرخ‌ها در روابط 3 و 4 به دست می‌آید.

$v_i = (v_{tx} + \omega \cdot d_{iy})\hat{i} + (v_{ty} - \omega \cdot d_{ix})\hat{j}$ (3)

$\beta_i = \text{atan2} \left(\frac{v_{ty} - \omega \cdot d_{ix}}{v_{tx} + \omega \cdot d_{iy}} \right)$ (4)

در جدول 1 برای هر سه چرخ، سرعت پارامتریک و زاویه فرمان‌پذیری چرخ‌ها بیان شده است. در نتیجه با پارامترهای سرعت خطی، زاویه حرکت و سرعت گردشی ربات (v_t, θ, ω) ، می‌توان ربات را به طور کامل کنترل کرد.

جدول 1) زاویه و سرعت‌های پارامتریک چرخ‌ها

شماره	β_i	Scalar approach
1	$\text{atan2} \left(\frac{v_{ty}}{v_{tx} - \omega \cdot d} \right)$	$v_{1x} = v_{tx} - \omega \cdot d$ $v_{1y} = v_{ty}$
2	$\text{atan2} \left(\frac{v_{ty} - 0.5 \cdot \omega \cdot d}{v_{tx} + 0.867 \cdot \omega \cdot d} \right)$	$v_{2x} = v_{tx} + 0.867 \cdot \omega \cdot d$ $v_{2y} = v_{ty} - 0.5 \cdot \omega \cdot d$
3	$\text{atan2} \left(\frac{v_{ty} - 0.5 \cdot \omega \cdot d}{v_{tx} - 0.867 \cdot \omega \cdot d} \right)$	$v_{3x} = v_{tx} - 0.867 \cdot \omega \cdot d$ $v_{3y} = v_{ty} - 0.5 \cdot \omega \cdot d$

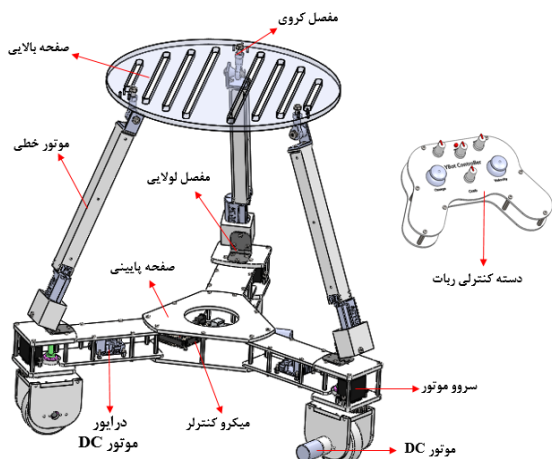
درجه آزادی ربات

برای محاسبه تعداد درجه آزادی ابتدا روی بخش موازی ربات محاسبات انجام می‌شود، از فرمول درجات آزادی گرابلر [21] به صورت

کند. همان طور که بیان شد با توجه به ساختار پلتفرم استوارت، پلتفرم چرخ‌دار آن طراحی می‌شود یعنی پلتفرم استوارت با عملگر خطی بر روی پلتفرمی چرخ‌دار با سه چرخ فرمان‌پذیر نصب خواهد شد.

مکانیک ربات

در ابتدا باید پلتفرم زیرین را طراحی کرد. مکانیزم‌های سوئرو درایو مکانیزمی پیچیده و گران بوده که به‌وسیله سوئروموتور و چرخ‌دنده، ساده‌سازی شد. این پلتفرم دارای سه چرخ فرمان‌پذیر است که توسط سه عدد سوئرو دورانی با محدوده حرکتی صفر تا ۱۸۰ درجه کنترل می‌شود. به‌دلیل آنکه به ۳۶۰ درجه دوران برای فرمان‌پذیری چرخ‌ها نیاز است، برای اتصال سوئروموتور به محور عمودی چرخ‌ها، چرخ‌دنده با مشخصات مدول ۱ و تعداد دندانه‌های ۱۸ و ۳۶ استفاده شد. این کار موجب شد تا محدوده دوران ۱۸۰ درجه‌ای سوئروموتورها به ۳۶۰ درجه افزایش یابد. همچنین برای چرخ‌های این پلتفرم از موتورهای DC با سرعت دورانی ۳۰۰ دور در دقیقه استفاده شد. به‌دلیل هندسه متقارن محوری، چرخ‌ها با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به یکدیگر در پلتفرم با فاصله ۲۴۰ میلی‌متر قرار گرفتند. با توجه به اتصال این چرخ‌ها به پلتفرم این ربات، شکل این پلتفرم به‌صورت ستاره‌ای سه‌گوش خواهد بود که نام YBot از شکل ظاهری ربات گرفته شده است. همچنین با توجه به اتصال عملگرهای پلتفرم استوارت به مفصل لولایی، این مفصل‌ها در راستای محور فرمان‌پذیری چرخ‌ها قرار گرفته تا وزن به‌طور کامل روی چرخ‌ها اعمال شود، سپس در انتها با یک مفصل کروی به صفحه بالایی متصل می‌شود. با توجه به موارد گفته‌شده، ربات در نرم‌افزار Solidworks طراحی شد که در شکل ۵، طراحی CAD ربات نشان داده شده است. برای ساخت نمونه آزمایشگاهی از بدنه با جنس پلکسی گلس (Plexiglas) به‌دلیل کاهش هزینه در طراحی استفاده شد. نحوه اتصال اجزای بدنه به‌صورت صفحه ستون بوده است زیرا به‌وسیله این روش با کمترین هزینه بدنه مونتاژ و تمامی قطعات روی آن نصب می‌شود. ربات ساخته‌شده در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۵) طراحی CAD ربات و دسته کنترلی آن

دوران حول سه محور اصلی و جایجایی در راستای محور Z خواهد بود. این در حالی است که معادله گرابلر درجه آزادی این سیستم را سه درجه محاسبه کرده بود. در نتیجه با توجه به تحلیل صورت‌گرفته، می‌توان نتیجه گرفت که ساختار 3-UPU با سه عملگر خطی پایدار نخواهد بود، بنابراین حالت 3-RPS برای پلتفرم استوارت انتخاب شد که طبق هر دو روش، درجه آزادی ۳ را نتیجه می‌دهد.

حال با انتخاب مفصل‌های پلتفرم استوارت، درجه آزادی کلی ربات به‌دست می‌آید. با قراردادن تعداد مفصل‌ها و لینک‌ها در معادله گرابلر، درجه آزادی ربات محاسبه می‌شود. در شکل ۴ تعداد لینک‌ها و مفصل‌ها مشخص شده است، جواب نهایی به شرح رابطه ۹ است.

$$DOF = 6(N - j) + \sum_{i=1}^j f_i$$

$$N = 1$$

$$f_1 = 12$$

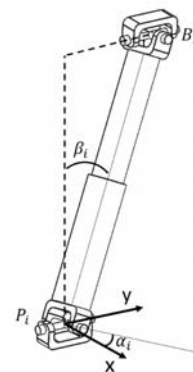
$$f_3 = 3$$

$$f_4 = 3$$

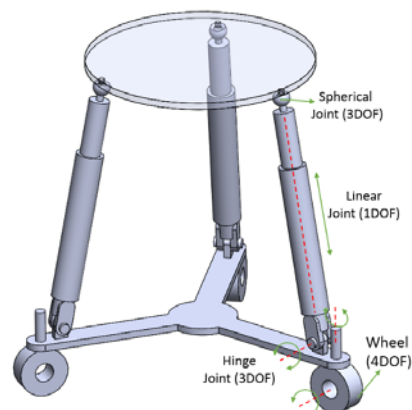
$$DOF = 6(14 - 18) + 12 + 9 + 12 = 9$$

با قراردادن این اعداد در فرمول گرابلر درجات آزادی این مکانیزم عدد ۹ خواهد بود. با توجه به عدد به‌دست‌آمده باید ۹ عملگر الکتریکی برای کنترل ربات استفاده کرد. این موتورها به شرح زیر است:

- ۱- موتورهای سوئرو دورانی برای فرمان‌پذیری چرخ‌ها (۳ عدد)
- ۲- موتورهای DC برای دوران چرخ‌ها (۳ عدد)
- ۳- موتورهای خطی برای عملگرهای پلتفرم استوارت (۳ عدد)



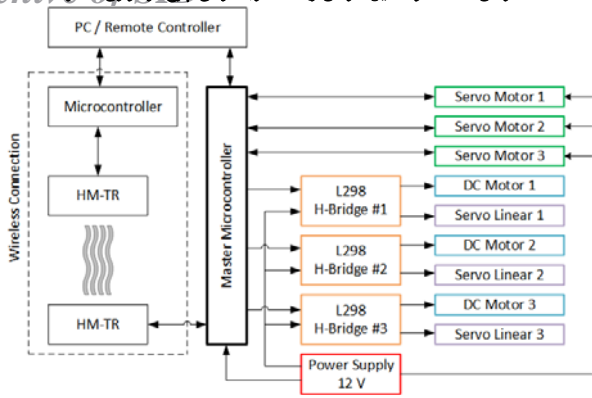
شکل ۳) یک عضو از پلتفرم 3-UPU در مختصات محلی حلقه $P_i B_i$



شکل ۴) شماتیک لینک و مفصل‌های کل ربات

ساخت

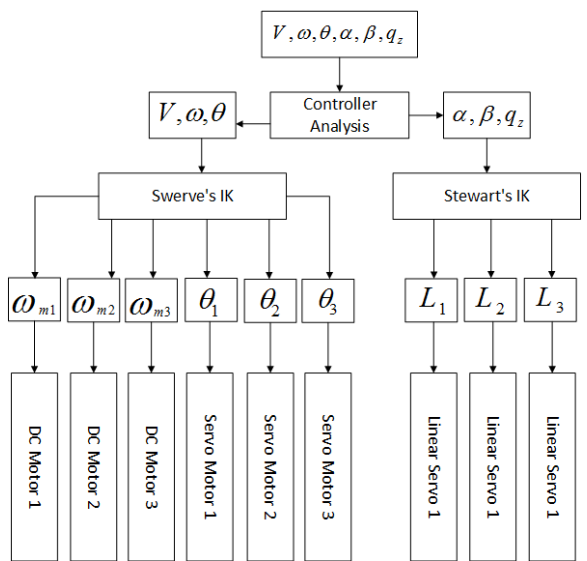
با توجه به تئوری‌های مربوطه و درجات آزادی به‌دست‌آمده از فرمول گرابلر، باید مکانیزمی را طراحی کرد که تئوری مساله صحت پیدا



شکل ۷) دیاگرام سخت‌افزاری قطعات الکترونیکی ربات



شکل ۶) نمونه ساخته‌شده ربات YBot



شکل ۸) دیاگرام نرم‌افزاری ربات

آزمایش عملی

پس از ساخت نمونه آزمایشی ربات، آزمون‌های مختلف جهت صحت نتایج تئوری و عملکرد تجربی ربات انجام پذیرفت. پس از محاسبات صورت‌گرفته برای سینماتیک ربات، قبل از تبدیل آن به زبان C++ جهت برنامه‌نویسی در کنترلر، نیاز به بررسی و تحلیل خروجی‌های معادلات است. همچنین برای بررسی صحت داده‌های وارده به سخت‌افزار نیاز به آزمایش عملی است که در ادامه به این دو مبحث پرداخته می‌شود.

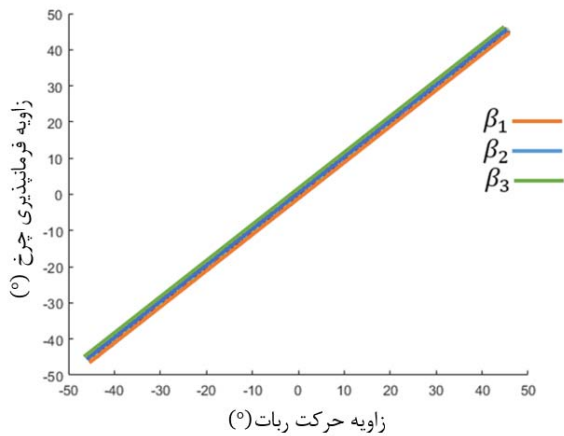
ارزیابی مدل ربات

ارزیابی تئوری سینماتیک معکوس ربات و کد پیاده‌سازی شده در نرم‌افزار متلب مورد بررسی قرار گرفت. بدین‌گونه که خروجی‌های به‌دست‌آمده از نرم‌افزار متلب که شامل پارامترهای $\omega_{m1}, \omega_{m2}, \omega_{m3}, \theta_1, \theta_2, \theta_3, L_1, L_2, L_3$ است را به‌عنوان مقادیر مفاصل فعال (Active Joints) ربات در نرم‌افزار Solidworks وارد شد و نتایج اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که پارامترهای $\alpha, \beta, q_z, V, \omega, \theta$ در نرم‌افزار Solidworks با مقادیر ورودی در نرم‌افزار متلب مطابقت دارد.

الکترونیک ربات

جهت استفاده از موتورهای الکتریکی و کنترل آنها، به یک کنترلر با قابلیت‌هایی از جمله ورودی‌های آنالوگ، دیجیتال و PWM نیاز خواهد بود. با توجه به جستجوهای فراوان در این زمینه از کنترلر آردوینو استفاده شد که با توجه به حجم دیتاهای ورودی و توان بالای پردازشی، از کنترلر آردوینو Mega 2560 استفاده شد. موتورهای سروو دورانی که با PWM کنترل می‌شوند به‌طور مستقیم به کنترلر وصل می‌شوند، ولی موتورهای DC و خطی به‌وسیله ماژول L298 تحریک شده و این ماژول مستقیماً به کنترلر وصل خواهد شد. جهت تغذیه ولتاژ موتورها و کنترلر از یک باتری ۱۲ ولت استفاده شد. این باتری ولتاژ تغذیه کافی را برای یک ترمینال مهیا می‌کند. این ترمینال وظیفه تغذیه تمامی ادوات و اجزای این ربات را دارد. خروجی این ترمینال شامل خطوط ۱۲ ولت برای موتورهای خطی DC و کنترلر و ماژول‌های L298 و همچنین ولتاژ ۶ ولت برای سرووموتورهای دورانی را دارد. دیاگرام نصب قطعات الکترونیکی ربات در شکل ۷ نشان داده شده است.

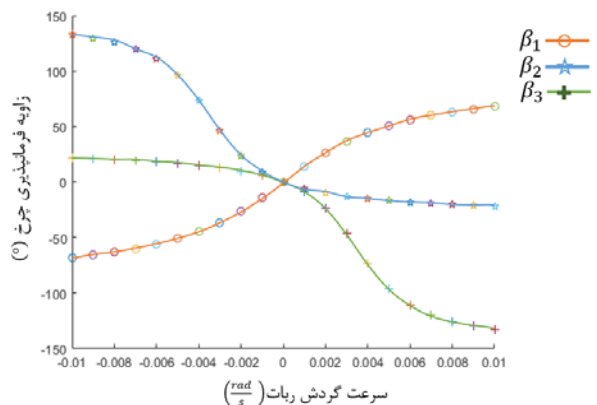
ربات مذکور براساس تئوری ربات‌های چرخ‌دار و موازی برنامه‌نویسی شد. برای برنامه‌نویسی این ربات در ابتدا دستورهایی سخت‌افزاری آن پیاده‌سازی و سپس تئوری‌های سینماتیک معکوس ربات به زبان C++ برنامه‌نویسی شد و در انتها اطلاعات به‌دست‌آمده از تئوری، طبق پروتکل اصلی به سخت‌افزار داده شد تا به‌صورت لحظه‌ای موتورهای الکتریکی در موقعیت خود قرار گیرند. دیاگرام نرم‌افزاری ربات در شکل ۸ نمایش داده شده است. با توجه به بلوک دیاگرام شکل ۸، کنترلر ۶ پارامتر را دریافت کرده و توسط معادلات سینماتیک معکوس ربات به ۹ پارامتر دیگر برای کنترل موتورها تبدیل می‌شوند. این ۹ پارامتر به‌طور مجزا جهت کنترل ۹ موتور اصلی به درایور آنها ارسال شده و کلیه موتورها کنترل می‌شوند.



نمودار ۳ زاویه θ با مقادیر بین (۴۵ تا -۴۵) که پارامترهای $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ با همان مقادیر تغییر کرده است؛ به دلیل آنکه heading ربات با تغییرات زاویه θ تغییر می‌کند، چرخ‌های فرمان‌پذیر در جهت heading ربات قرار می‌گیرند.

در قدم بعد سرعت زاویه ربات با واحد رادیان بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. این پارامتر میزان گردش ربات به دور خود در واحد زمان را نشان می‌دهد. مقدار این پارامتر در بازه بین (۰/۱ تا ۰/۰-) و با توجه به تغییرات آن، مقادیر $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ که زاویه فرمان‌پذیری هر چرخ را نشان می‌دهد، مقادیر متفاوتی خواهد داشت که در نمودار ۴ به صورت نمودار مشخص شده است.

پس از بررسی معادلات سینماتیک ربات، معادلات به زبان ++C در کنترلر برنامه‌نویسی شد و آزمایش تجربی بر روی ربات انجام پذیرفت.

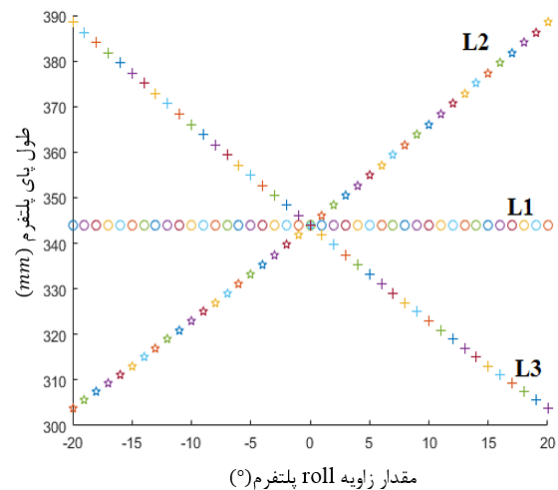


نمودار ۴ تغییرات پارامترهای $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ با توجه به تغییرات پارامتر ω ؛ به دلیل مختصات متفاوت هر چرخ و تغییرات سرعت گردشی ربات، هر چرخ فرمان‌پذیر در موقعیت متفاوتی نسبت به دیگر چرخ‌ها قرار می‌گیرد.

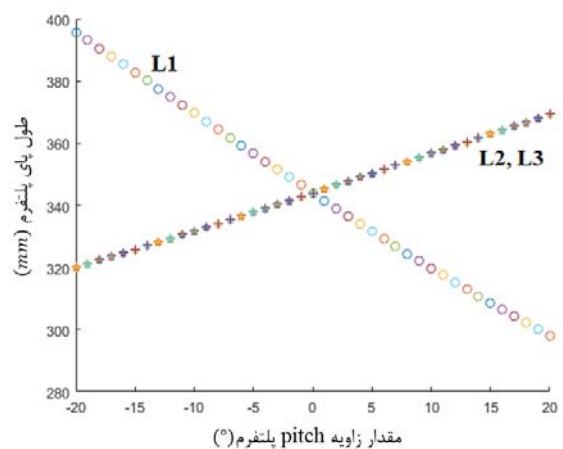
نتایج و بحث

پس از بررسی معادلات تئوری ربات، این معادلات در کنترلر ربات برنامه‌نویسی شد و جهت صحت‌سنجی عملی ربات از شیب‌سنج الکترونیکی جهت اندازه‌گیری زاویه شیب و خطکش آزمایشگاهی جهت اندازه‌گیری ارتفاع استفاده شد. در قدم اول با استفاده از دسته کنترلر ربات، تمامی مقادیر را در حالت صفر قرار داده و برای آزمون

با توجه به مقادیر α و β طول عملگرهای خطی به وسیله نرم‌افزار Solidworks بررسی شد. بدین صورت که طول هر کدام از پاهای ربات در نرم‌افزار ترسیم و میزان شیب به دست آمده اندازه‌گیری شد. در ابتدا فرمول‌های تئوری پلتفرم استوارت را در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی کرده و یکی از زوایا صفر در نظر گرفته شده است. همچنین زاویه دیگر در محدوده (۲۰ تا -۲۰ درجه) تغییر داده شده است. با تغییرات پارامترهای roll و pitch، تغییرات طول پاها متفاوت خواهد بود، زیرا این تغییرات وابسته به موقعیت مفصل‌های بالا و پایین پاهای پلتفرم است که در نمودارهای ۱ و ۲ نتایج نشان داده شده است. سپس فرمول‌های تئوری پلتفرم چرخ‌دار سوئو در برنامه متلب نوشته شد. اولین پارامتر، θ است که دستوری جهت حرکت خرچنگی ربات استفاده می‌شود. طبق معادلات سینماتیک ربات، با تغییرات این پارامتر همه زوایای سروو به همان مقدار تغییر می‌کند. برای صحت این قضیه به وسیله نرم‌افزار متلب نمودار آن رسم شد که در نمودار ۳ مشاهده می‌شود.

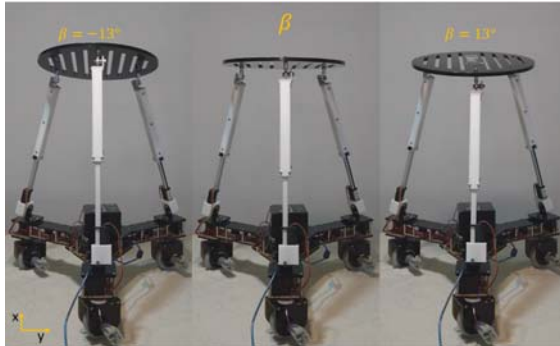


نمودار ۱ مختصات مفصل‌ها در صفحات بالایی مفصل کروی شماره ۱ روی محور x؛ با تغییرات پارامتر α طول پای شماره ۱ تغییر می‌کند.



نمودار ۲ مختصات مفصل‌ها در صفحات بالایی پلتفرم استوارت؛ فاصله مفصل‌های شماره ۲ و ۳ به محور y نزدیک‌تر از مفصل شماره ۱ بوده، در نتیجه تغییرات طول پاهای شماره ۲ و ۳ از پای شماره ۱ کمتر خواهد بود.

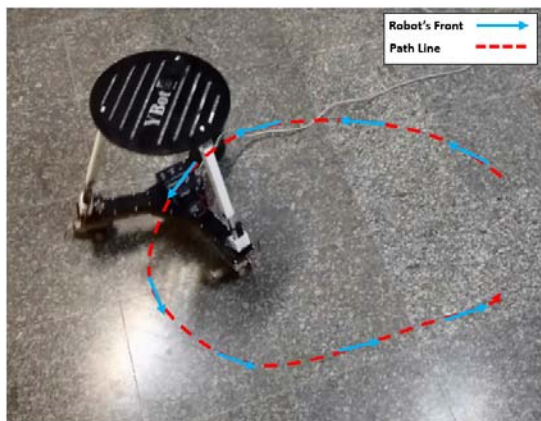
آن هر پارامتر به تنهایی تغییر داده می‌شود. برای شروع آزمون، از تغییر پارامتر Altitude آغاز شد، بدین صورت که روی دسته کنترلی ربات پتانسیومتر مربوط به این پارامتر، در کمترین مقدار قرار داده شد، سپس مقدار اولیه در ربات در ارتفاع ۳۹ سانتی‌متری قرار گرفت. برای صحت‌سنجی این مقادیر از یک خطکش فلزی استفاده شد. مقدار خطای پارامتر Altitude در نتایج به دست آمده برابر با $(۶۷ \pm ۰/۳)$ ، $(۳۹ \pm ۰/۳)$ سانتی‌متر است که علت آن مقدار تلرانس وارد شده در کدهای دستوری موتورهای خطی در کنترلر است. نتایج به دست آمده را می‌توان در شکل ۹ مشاهده کرد.



شکل ۱۱ آزمون پارامتر β : الف) β با زاویه ۲۰ درجه، ب) β با زاویه صفر درجه، ج) β با زاویه ۲۰- درجه

در بخش چرخدار ربات، دو حالت حرکت مورد بررسی قرار گرفت. در حالت اول، ربات با دو پارامتر V و ω حرکت می‌کند، که در این حالت ربات به جلو حرکت کرده و حول محور Z در مختصات محلی ربات گردش می‌کند. همان طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، هدینگ ربات در راستای مسیر بوده و با توجه به مسیر حرکت تغییر جهت می‌دهد. همان طور که در تئوری ربات بیان شد، زوایای چرخ‌های ربات با توجه به تغییرات پارامتر ω به طور مجزا تغییر می‌کنند که در نتایج عملی کاملاً مشهود بود.

همچنین با توجه به شکل ۱۳، حالت دوم بررسی شده و ربات با پارامترهای V و θ حرکت می‌کند که در این حالت هدینگ ربات در مختصات مرجع ثابت خواهد بود. همان طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، هدینگ ربات در مختصات مرجع ثابت بوده ولی یک مسیر منحنی را طی می‌کند. این حالت تنها در ربات‌های هولونومیک وجود داشته که کاربرد بسیار فراوانی در بخش حمل و نقل دارد.



شکل ۱۲ حرکت ربات به وسیله دو پارامتر V و ω طی مسیر منحنی با تغییرات هدینگ ربات نسبت به مختصات مرجع

شکل ۹ آزمون پارامتر Altitude: الف) ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر، ب) بیشترین ارتفاع استوارت پلتفرم، ج) کمترین ارتفاع استوارت پلتفرم



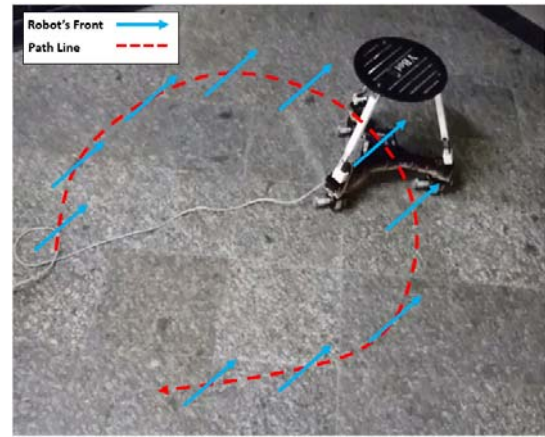
شکل ۹ آزمون پارامتر Altitude: الف) ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر، ب) بیشترین ارتفاع استوارت پلتفرم، ج) کمترین ارتفاع استوارت پلتفرم

برای آزمون مقدار α ، پس از قراردادن ربات در ارتفاع ۵۰ سانتی‌متری، ابتدا پارامتر مربوطه را در زاویه صفر قرار داده و با کمترین مقدار پتانسیومتر در دسته کنترلی، ربات در موقعیت مقدار ۱۳- درجه قرار گرفته و نتیجه با شیب‌سنج الکترونیکی اندازه‌گیری می‌شود، سپس پتانسیومتر را در بیشترین مقدار قرار داده که برابر ۱۳+ درجه است. این آزمون به تعداد ۵ بار تکرار شد و نتایج به دست آمده مقدار پارامتر α را برابر (۱۳ ± ۱) ، (۱۳ ± ۱) درجه) گزارش می‌کند. علت وجود تلرانس در پارامتر، وجود لقی فیزیکی قطعات ربات و لختی موتور خطی است که این تاثیر در کدهای دستوری موتورهای خطی در کنترلر لحاظ شده است، در نتیجه باعث می‌شود مقدار ابتدا و انتها برای پارامتر α دقیقاً ۱۳ و ۱۳- نباشد. به دلیل محدودیت فیزیکی مفصل کروی مقدار α نمی‌تواند از این محدوده بیشتر شود. نتایج حاصل از آزمایش در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰ آزمون پارامتر α : الف) α با زاویه ۱۳ درجه، ب) α با زاویه صفر درجه، ج) α با زاویه ۱۳- درجه

این ربات به‌طور کلی برای حمل‌ونقل در مواقعی که نیاز به حضور انسان نیست مناسب است. با توجه به تئوری گفته‌شده می‌توان تغییرات فراوانی در طراحی ربات با توجه به کاربری آن اعمال کرد. بدین منظور می‌توان تغییراتی در ربات به‌کار برد که شامل استفاده از موتورخطی هیدرولیکی، نیوماتیکی با توجه به توان و سرعت خطی مورد نیاز، افزایش و کاهش درجات آزادی حرکتی ربات با توجه به کاربرد آن، استفاده از بدنه فلزی و مفصل‌های فلزی جهت کاهش لقی و انعطاف بدنه ربات، استفاده از انواع سنسورهای موقعیت جهت کنترل حلقه بسته، استفاده از انواع سنسور موقعیت برای مسیریابی ربات در جابجایی، انتخاب پلتفرم چرخ‌دار مناسب با توجه به کاربری ربات و همچنین جابجایی مفصل‌های بالا و پایین با یکدیگر در بخش استوارت پلتفرم که موجب تغییر در فضای کاری ربات می‌شود، است.



شکل ۱۳ حرکت ربات به‌وسیله دو پارامتر θ و V طی مسیر منحنی با ثابت ماندن هدینگ ربات نسبت به مختصات مرجع

نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، طراحی، ساخت و بررسی عملکرد یک ربات ترکیبی موازی-چرخ‌دار بود تا بتوان هم از قابلیت‌های ربات‌های چرخ‌دار و هم از قابلیت مانیپولاسیون ربات‌های موازی به‌صورت یک‌جا در یک ربات بهره برد. بدین ترتیب، با ترکیب ربات‌های موازی و چرخ‌دار با یکدیگر، رباتی جدید با توجه به نیاز و کاربردهای مورد نظر ساخته شد. درجات آزادی حرکت ربات برابر ۶ است، که بیانگر جابجایی و دوران در راستا و حول محورهای اصلی است و تعداد درجات آزادی مکانیزم ربات برابر ۹ است که بیانگر تعداد عملگرهای مورد نیاز در ربات است. در ابتدا از فرمول گرابلر برای محاسبه درجه آزادی مکانیزم سه‌بعدی استفاده شد، اما با توجه به انواع پلتفرم سه درجه آزادی استوارت این معادله در انتخاب مفصل‌ها محدودیت دارد. برای رفع این محدودیت تئوری پیچواره بسیار کاربردی است که در این پژوهش از آن استفاده شد. با ساده‌سازی در طراحی سوئرو درایو، می‌توان همه درجات آزادی حرکت را پوشش داد و نیازی به طراحی پیچیده و گران‌قیمت نیست. از جمله مواردی که باعث کاهش دقت در ربات می‌شود، بخش‌های مکانیکی مخصوصاً موتورهای آن است. برای حل این مشکل باید مقادیر ورودی به برد کنترلر را کالیبره کرد تا این مشکل تا حدی برطرف شود.

مقدار پارامترهای α, β (دوران حول محور x و y) با توجه به محدودیت فیزیکی مفصل کروی بین بازه ۱۳ درجه تا ۱۳۰ درجه با تolerانس ۱ درجه بوده، لازم به ذکر است این پلتفرم قادر به پوشش زوایای بیشتری نیز است. پارامتر q_z (ارتفاع پلتفرم استوارت) قابلیت تغییر ارتفاع در بازه ۳۹ و ۶۷ سانتی‌متر با تolerانس ۳/۰ سانتی‌متر را دارد. مقادیر سرعت دورانی ω و خطی v_t ربات وابسته به توان موتور DC است که در این پژوهش به‌ترتیب ۱/۰ رادیان بر ثانیه و ۵/۰ متر بر ثانیه به‌دست آمد. با توجه به تغییر در مکانیزم سوئرو و معرفی مکانیزمی جدید با استفاده از سروموتور، پوشش کامل زاویه‌ای بین بازه ۱۸۰ درجه تا ۱۸۰ درجه به‌دست آمد، تolerانس این پارامتر نیز مربوط به دقت سروموتور است که در این پژوهش ۱ درجه به‌دست آمد.

قردانی: بدین وسیله از آقایان دکتر امین پاک و مهندس محمد/امین امیری که با مشاوره‌های دلسوزانه ایشان در زمینه الکترونیک و برنامه‌نویسی پروژه در راستای پیشرفت پروژه، بنده را حمایت و هدایت کردند، کمال تشکر را دارم.

تاییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

سهم نویسندگان: محمد ملکی‌رودپشتی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ محمدمهدی عاقلی‌حاجی‌آبادی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪).

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

علامه انگلیسی

Δx	جابجایی در راستای محور x
Δy	جابجایی در راستای محور y
Δz	جابجایی در راستای محور z
v_t, V	سرعت خطی ربات
v_{tx}	سرعت خطی ربات در راستای محور x
v_{ty}	سرعت خطی ربات در راستای محور y
v_{tx}	سرعت خطی چرخ i ام در راستای محور x
v_{ty}	سرعت خطی چرخ i ام در راستای محور y
d_i	ماتریس مختصات چرخ‌های i ام
R_x	ماتریس دوران حول محور x
R_y	ماتریس دوران حول محور y
R_T	ماتریس دوران کل
b_i	مختصات مفصل‌های صفحه پایینی استوارت پلتفرم
p_i	مختصات مفصل‌های صفحه بالایی استوارت پلتفرم
q_z	فاصله دو مبدا مختصات در راستای محور z در بردار \vec{q}
\vec{l}_i	بردار طول پای استوارت پلتفرم
l_i	مقدار عددی طول پای استوارت پلتفرم
M	درجات آزادی مکانیزم
N	تعداد لینک‌های ربات
j	تعداد مفصل‌های ربات
f_i	تعداد درجه آزادی هر مفصل
S_i	ماتریس محدودیت فضا برای یک جسم صلب

Australia. Piscataway: IEEE; 2013.

9- Zhang P, Gao L, Zhu Y. Study on control schemes of flexible steering system of a multi-axle all wheel steering robot. *Advances in Mechanical Engineering*. 2016;8(6):1-13.

10- Luan Y, Wang H, Li X, Xu W, Huang R, Lv J. Design of motion control system for omnidirectional four-drive mobile robot. 8th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC), 24-26 May 2019, Chongqing, China. Piscataway: IEEE; 2019.

11- Javadi M, Afzalpour N, Jafari Taayemeh P, Khorsandijou SM. Wheelchair stabilization by the control of a spatial 3-RRS mechanism. *Iranian Journal of Mechanical Engineering*. 2016;17(2):84-100. Persian.

12- Li R, Meng H, Bai S, Yao Y, Zhang J. Stability and gait planning of 3-UPU hexapod walking robot. *Robotics*. 2018;7(3):48.

13- Peng S, Ding X, Yang F, Xu K. Motion planning and implementation for the self-recovery of an overturned multi-legged robot. *Robotica*. 2017;35(5):1107-1120.

14- Ding X, Yang F. Study on hexapod robot manipulation using legs. *Roboatica*. 2014;34(2):468-481.

15- Zheng Y, Ding X, Xu K. A novel six wheel-legged robot: Structure design and stability analysis in different typical gaits. The 14th IFToMM World Congress, October 25-30, 2015, Taipei, Taiwan. Unknown City: Airtilibrary; 2015.

16- Kim D, Oh PY. Lab automation drones for mobile manipulation in high throughput systems. IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), 12-14 Jan. 2018, Las Vegas, NV, USA. Piscataway: IEEE; 2018.

17- Mahboubkhah M, Daneshmand P. Force analysis of parallel robot machine tool with 4DoF. *Journal of Mechanical Engineering*. 2017;47(1):229-238. Persian.

18- Rouhani Esfahani E, Nategh MJ. Instantaneous center of rotation of flexure joints and velocity kinematic analysis of microhexapod using screw theory. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(3):173-180. Persian.

19- Siegwart R, Nourbakhsh IR, Scaramuzza D. Introduction to autonomous mobile robots. Cambridge: MIT press; 2011.

20- Baker A, Mackenzie I. omnidirectional drive systems kinematics and control [Internet]. Unknown City: AndyMark; Unknown Year [Unknown Cited]. Available from: <https://files.andymark.com/2008CON-Omni-Baker-McKenzie.pdf>

21- Park FC, Lynch KM. Introduction to Robotics, Mechanics, Planning, and Control. Unknown Publisher; Unknown Year.

22- Zhou K, Zhao JS, Mao DZ. The kinematics study of a class of spatial parallel mechanism with fewer degree of freedom. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2005;25:972-978.

S_i^r	پیچواره معکوس ماتریس S_i برای یک جسم صلب
T_i	بردار واحد انتقال در راستای محور i
T_i^r	بردار واحد انتقال در راستای محور i در پیچواره معکوس
R_i	بردار واحد دوران در راستای محور i
R_i^r	بردار واحد دوران در راستای محور i در پیچواره معکوس

علائم یونانی

α	پارامتر مقدار زاویه roll
β	پارامتر مقدار زاویه pitch
γ	پارامتر مقدار زاویه yaw
ω	سرعت چرخشی ربات حول محور z
β_i	زاویه فرمان هر چرخ
θ	زاویه محور حرکت (هدینگ) ربات نسبت به GRF

منابع

1- Michaud F, Létourneau D, Arsenault M, Bergeron Y, Cadrin R, Gagnon F, et al. AZIMUT, a leg-track-wheel robot. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003), Cat. No.03CH37453, 27-31 Oct. 2003, Las Vegas, NV, USA. Piscataway: IEEE; 2004.

2- Besseron G, Grand Ch, Ben Amar F, Plumet F, Bidaud Ph. Locomotion modes of a hybrid wheel-legged robot. In: Besseron G, Grand Ch, Ben Amar F, Plumet F, Bidaud Ph. Climbing and Walking Robots. Berlin: Springer; 2005.

3- Fu Q, Krovi V. Articulated wheeled robots: Exploiting reconfigurability and redundancy. Proceedings of DSCC2008, ASME Dynamic Systems and Control Conference, October 20-22 2008, Ann Arbor, Michigan, USA. New York: ASME; 2008.

4- Yoshioka T, Takubo T, Arai T, Inoue K. Hybrid locomotion of leg-wheel ASTERISK H. *Journal of Robotics and Mechatronics*. 2008;20(3):403-412.

5- Shen SY, Li CH, Cheng CC, Lu JC, Wang SF, Lin PC. Design of a leg-wheel hybrid mobile platform. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 10-15 Oct 2009, St. Louis, MO, USA. Piscataway: IEEE; 2009.

6- Shahrriel M, Aras M, Kassim AM. Development of hexapod robot with maneuverable wheel. Unknown Publisher. 2012.

7- Ding X, Li K, Xu K. Dynamics and wheel's slip ratio of a wheel-legged robot in wheeled motion considering the change of height. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2012;25:1060-1067.

8- Lu D, Dong E, Liu C, Wang Z, Zhang X, Xu M, et al. Mechanical system and stable gait transformation of a leg-wheel hybrid transformable robot. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 9-12 July 2013, Wollongong, NSW,