



Modeling and Experimental Evaluation of Stiffness of a Linear Decoupled 3 Degree of Freedom Parallel Robot

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Chalangari Juybari H.¹ *MSC*,
Tale Masouleh M.^{*2} *PhD*,
Dadashzadeh B.¹ *PhD*

How to cite this article

Chalangari Juybari H, Tale Masouleh M, Dadashzadeh B. Modeling and Experimental Evaluation of Stiffness of a Linear Decoupled 3 Degree of Freedom Parallel Robot. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(6):1385-1396.

ABSTRACT

Parallel robots have a lot of advantageous compared to their counterparts, serial robots, such as higher accuracy, more load to weight ratio, and higher stiffness, which contribute to their various, and precise applications. Stiffness of the robot, as one of the most crucial parameters which should be considered in design procedure of the robot, ensures optimal accuracy respect to the desired application. In this paper, an experimental study is investigated on evaluation of the robot's stiffness and the errors corresponding to compliance of the mechanism, which indicate the displacement of end-effector of the robot with respect to external imposed forces. The aim of this paper is to evaluate the stiffness and the errors due to the softness behavior of the mechanism of a 3 degree of freedom (3-DoF) parallel robot; for this end, the amount of transfer of the final executor to the applied load is simulated. First, the 3-DoF decoupled robot is introduced and its features are expressed and the stiffness of the mechanism is modeled using Finite Element Method (FEM). Then, stiffness behavior of the mechanism is determined in different positions of the end-effector by considering predefined boundary conditions. In order to evaluate the obtained model of the robots' stiffness, a novel experimental setup is developed to measure the stiffness of the mechanism. By employing the setup, stiffness behavior of the robot is measured in different conditions. Finally, the output results of the stiffness model are compared to the experimental tests. The results reveal that the 3-DoF decoupled parallel robot shows a proper stiffness behavior. Hence, it can be employed in various applications with high precision.

Keywords Parallel Robot; Stiffness Modeling; Finite Element Method; Measuring Stiffness Platform

¹Mechatronics Engineering Department, Faculty of Engineering Emerging Technologies, University of Tabriz, Tabriz, Iran

²Machine Intelligence and Robotics Department, School of Electrical and Computer Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: School of Electrical and Computer Engineering, University College of Engineering, University of Tehran, North Kargar st., Tehran, Iran. 143951374

Phone: +98 (21) 61118413

Fax: -

m.t.masouleh@ut.ac.ir

Article History

Received: May 12, 2018

Accepted: November 25, 2018

ePublished: June 01, 2019

CITATION LINKS

[1] Parallel ... [2] Robot measuring form errors. Robotics and ... [3] Finite element analysis with error estimators: An introduction to the FEM and ... [4] A stiffness analysis for CaPaMan ... [5] A comparative stiffness analysis of a reconfigurable parallel machine ... [6] Rigidity analysis of T3R1 parallel ... [7] Optimal structural design of a planar ... [8] Computation of stiffness and stiffness bounds ... [9] Evaluation of a 4-degree of freedom parallel ... [10] Introduction to matrix methods ... [11] A systematic analytical method for PKM stiffness matrix calculation. Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation ... [12] Contribution to the elasto-geometrical modeling and ... [13] Active stiffness control of a manipulator ... [14] Stiffness mapping for parallel ... [15] Stiffness analysis of parallel ... [16] Kinetostatic analysis and optimization of parallel and hybrid ... [17] Stiffness mappings employing different frames ... [18] Stiffness analysis of 3-dof overconstrained translational ... [19] Structural synthesis of parallel robots generating ... [20] Design of parallel manipulators via the displacement ... [21] Synthesis by screw algebra of translating ... [22] Generation of parallel manipulators with three translational ... [23] Type synthesis of input-output decoupled parallel ... [24] Parallel mechanisms of the multipteron family: kinematic ... [25] Kinematics and singularity analysis of a novel type ... [26] A fully decoupled 3-dof translational parallel ...

مدل‌سازی و ارزیابی عملی سختی ربات موازی با سه‌درجه آزادی مستقل خطی

حامد چلنگری جویباری MSc

گروه مهندسی مکترونیک، دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

مهدی طالع ماسوله PhD

گروه هوش ماشین و رباتیک، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تهران، تهران، ایران

بهنام داداش‌زاده PhD

گروه مهندسی مکترونیک، دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

ربات‌های با مکانیزم موازی در مقایسه با ربات‌های سری، دارای مزیت‌هایی از جمله دقت بالا، نسبت بالای بار اعمالی به وزن ربات و همچنین سختی بالاتر هستند که موجب استفاده از این مکانیزم‌ها در کاربردهای دقیق می‌شود. در نظر گرفتن رفتار سختی مکانیزم، یکی از جنبه‌های مهم در حین طراحی است که باعث می‌شود دقت مطلوب با توجه به کاربرد مورد نظر حاصل شود. هدف از این مقاله، ارزیابی سختی و خطاهای ناشی از نرمی مکانیزم یک ربات موازی سه‌درجه آزادی است. به همین منظور میزان جابه‌جایی مجری نهایی به‌ازای بار اعمالی به‌صورت شبیه‌سازی و عملی مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا مکانیزم موازی مورد مطالعه در این مقاله معرفی و ویژگی‌های آن بیان شده است. سپس، سختی مکانیزم با استفاده از روش آنالیز المان محدود مدل می‌شود و با اعمال شرایط مرزی مورد نظر، رفتار سختی مکانیزم ربات در موقعیت‌های معین مجری نهایی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه، به‌منظور راستی‌آزمایی نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی سختی، دستگاهی نوین به‌منظور اندازه‌گیری سختی مکانیزم، معرفی و نحوه کار با آن دستگاه نیز شرح داده شده است. با استفاده از این دستگاه، رفتار سختی مکانیزم ربات در موقعیت‌های مشابه اندازه‌گیری شده است. در انتها، جواب مدل‌سازی سختی و نتایج به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری عملی، گزارش و با هم مقایسه می‌شوند که نشان می‌دهد ربات با مکانیزم موازی مورد مطالعه در این مقاله، دارای رفتار سختی مناسب بوده و در کاربردهای دقیق مورد اطمینان و قابل به‌کارگیری است. **کلیدواژه‌ها:** ربات موازی درجه آزادی محدود، مدل‌سازی سختی، روش آنالیز المان محدود، دستگاه اندازه‌گیری سختی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۰۴

* نویسنده مسئول: m.t.masouleh@ut.ac.ir

۱- مقدمه

در چند دهه اخیر، مکانیزم‌های موازی به‌طور وسیع مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برخلاف زنجیره‌های سینماتیک سری که مکانیزم‌های سینماتیک آن محدود است، در ساختارهای موازی برای یک الگوی حرکتی خاص، تعداد زیادی ساختار سینماتیک وجود دارد. ربات‌های موازی در قیاس با ربات‌های سری از مزیت‌های زیادی برخوردارند که از جمله آنها می‌توان به سختی بیشتر، نسبت بار اعمالی به وزن بالاتر، دقت بیشتر و قابلیت رسیدن به سرعت‌ها و شتاب‌های بالاتر اشاره کرد [1]. همین امر موجب استفاده از ربات‌های با مکانیزم موازی در کاربردهایی نظیر ماشین‌های ابزار با دقت بالا، شبیه‌سازهای حرکت و عملیات پزشکی شده است. در شرایط صنعتی، هنگام جابه‌جایی یک جسم ممکن است جهت خاصی از حرکت یا زاویه خاصی از جهت‌گیری جسم، اهمیت نداشته باشد. در این صورت مکانیزم‌های موازی درجه آزادی محدود مورد توجه قرار می‌گیرند. یک مکانیزم موازی درجه آزادی محدود که به آن مکانیزم کم‌متحرک نیز گفته می‌شود، مکانیزمی

است که الگوی حرکتی با کمتر از شش‌درجه آزادی را ایجاد می‌نماید.

با توجه به پژوهشی، منابع اصلی تولید خطا در ربات، خطاهای وابسته به هندسه و خطاهای غیروابسته به هندسه است [2]. معمولاً در کاربردهایی که نیرو و گشتاور اعمالی به مجری نهایی، به نسبت کوچک است، منبع اصلی عدم دقت ربات، خطاهای هندسی هستند. منشا این خطاها می‌تواند ناشی از اختلاف بین مقادیر واقعی و مطلوب پارامترهای هندسی، لینک یا مفصل باشد که می‌توان به مواردی همچون اختلاف بین طول مطلوب و واقعی لینک‌ها، اختلاف بین مقادیر صفر مختصات عملگرها در ربات واقعی و مدل ریاضی و همچنین خطای مونتاژ اشاره کرد. واضح است که خطاهای هندسی به ساختار یا مکانیزم ربات وابسته نیستند. این خطاها را می‌توان با تکنیک‌های مختلف کالیبراسیون مشخص کرد و در نتیجه، آنها را می‌توان با تنظیم ورودی کنترلر جبران کرد.

از طرف دیگر، خطاهای غیرهندسی هستند که نسبت به خطاهای هندسی مهم‌تر هستند. برای نمونه، نیرو و گشتاور اعمالی به مجری نهایی است که باعث تغییر شکل اجزای ربات می‌شوند. به این نوع خطاها، خطای انعطاف‌پذیری یا خطای نرمی می‌گویند که تاثیر آن برای ربات‌های سنگین و برای ربات‌هایی با سختی کم بسیار مهم است. در این موارد، تاثیر خطاهای انعطاف‌پذیری روی دقت ربات می‌تواند بیشتر از خطاهای هندسی باشد. این بحث برای طراحان ربات‌های موازی بسیار مهم است و در واقع، کار آنها یک مصالحه بین انتخاب سختی ربات و ویژگی‌های دینامیکی ربات است.

سختی یک ربات با ساختار موازی به چندین فاکتور بستگی دارد که مهم‌ترین فاکتور، ساختار بازوی ماهر است. استفاده از زنجیره‌های سینماتیک بسته در ساختار ربات به‌صورت قابل توجهی باعث سختی بالاتر و دقت موقعیت بهتر می‌شود و این یکی از مزیت‌های برجسته ربات‌های موازی در مقایسه با نوع سری است. از دیگر فاکتورها مانند سایز و جنس لینک‌ها، نوع عملگرها و سیستم‌های انتقال حرکت و سیستم‌های کنترل می‌توان نام برد که در سختی کلی بازوی ماهر دخیل هستند. آنالیز سختی ربات‌های با مکانیزم موازی تحت نیروهای خارجی، یک موضوع مهم در طراحی این ربات‌ها است. لذا مدل‌سازی و تحلیل این ویژگی قبل از طراحی، به سرانجام بهتری برای کاربرد مورد نظر می‌انجامد. در حالت کلی، روش‌های موجود برای مدل‌سازی سختی ربات‌های با مکانیزم موازی به سه گروه آنالیز المان محدود (FEA)، آنالیز ساختاری ماتریس (MSA) و روش مدل‌سازی مفصل مجازی (VJM) تقسیم می‌شود.

ایده اساسی در روش آنالیز المان محدود این است که مدل فیزیکی ساختار مکانیکی را به تعداد نسبتاً کوچکی (المان) تجزیه کند و رابطه‌ای بین گره‌های مجاور با استفاده از ماتریس‌های سختی نسبی معرفی کند. با استفاده از این گسسته‌سازی، موازنه معادلات استاتیکی برای هر گره به دست می‌آید و در یک ماتریس سراسری جمع می‌شوند که بیان‌کننده رابطه بین نیرو و گشتاور اعمالی و انحراف گره‌ها است. سپس، ماتریس با سایز نسبتاً بزرگ به‌دست‌آمده، معکوس می‌شود و برای به‌دست‌آوردن ماتریس سختی مطلوب به‌وسیله استخراج المان‌های مناسب مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک مزیت بدیهی مدل‌سازی به روش آنالیز المان محدود، دقت بالای آن است که فقط محدود به مرحله سسته‌سازی

آخرین توسعه در این حوزه به‌کارگرفتن فنرهای مجازی با شش بعد است که با استفاده از روش بر مبنای آنالیز المان محدود شناسایی شده است^[18]. اشکال اساسی روش مدل‌سازی مفصل مجازی مربوط به بعضی مشکلات در مدل‌سازی سختی بازوهای ماهر موازی است.

ربات مورد مطالعه در این مقاله، حاصل بهینه‌سازی مکانیکی و ابعادی با توجه به مدل‌سازی سختی به روش آنالیز المان محدود است تا انتظارات از مکانیزم برای کاربردهای مورد نظر که دارای دقت‌های مشخصی هستند، برآورده شود. از نوآوری‌های انجام‌شده در این کار، لینک‌کردن نرم‌افزارهای تحلیلی و مدل‌سازی به‌منظور بهینه‌سازی است که به پژوهشگر اجازه می‌دهد در حین طراحی ساختار مکانیکی، ابعاد بهینه را به دست آورد و اعمال کند. همچنین در ساخت بازوهای مکانیزم از مواد فیبر کربن استفاده شده است که باعث سبکی سازه و بهبود رفتار سختی ربات می‌شود. در این کار، به‌منظور راستی‌آزمایی نتایج به‌دست‌آمده، به‌صورت نوآورانه یک دستگاه اندازه‌گیری سختی طراحی و ساخته شده است که امکان بررسی و ارزیابی سختی مکانیزم ربات را فراهم می‌کند. روند کار در این مقاله، به این صورت است که در ابتدا ربات‌های موازی درجه آزادی محدود که کمتر از شش‌درجه آزادی دارند توضیح داده شده‌اند و کاربردهای آنها بیان شده و در ادامه ربات مورد مطالعه در این مقاله معرفی شده و ساختار سینماتیک و مکانیکی آن تشریح شده است. سپس مراحل مدل‌سازی سختی به روش آنالیز المان محدود و نحوه بررسی سختی مکانیزم ربات و چگونگی به‌دست‌آوردن نتایج به‌طور کامل تشریح شده است. در ادامه، روند بررسی سختی به روش عملی بیان شده و دستگاه طراحی‌شده به این منظور به‌طور کامل معرفی و نحوه کار با آن بیان شده است. سپس نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی سختی و اندازه‌گیری عملی گزارش شده است و مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند. در انتها نیز نتیجه‌گیری کلی از کار انجام‌شده آورده شده است.

۲- ربات موازی سه‌درجه آزادی

مکانیزم‌های موازی با کمتر از شش‌درجه آزادی را مکانیزم‌های درجه آزادی محدود می‌نامند. هرچند که هگزاپاداها با شش‌درجه آزادی می‌توانند در بسیاری از کاربردها مانند ماشین‌های ابزار به کار آیند، اما پیچیدگی آنها یک مانع اصلی در استفاده وسیع در صنعت است. با کاهش درجات آزادی، معادلات سینماتیک مکانیزم‌های ربات ساده‌تر شده و به دنبال آن کنترل این ربات‌ها بسیار آسان می‌شود. به‌طور کلی در مقایسه با مکانیزم‌های شش‌درجه آزادی، یک مکانیزم موازی با درجه آزادی محدود، ساختار مکانیکی ساده‌تر، هزینه ساخت کمتر، الگوی کنترلی ساده‌تر، سختی بیشتر، دقت بالاتر و در نتیجه سرعت بالاتری خواهد داشت.

از میان مکانیزم‌های درجه آزادی محدود، مکانیزم‌های موازی با سه‌درجه آزادی را می‌توان برشمرد که درجات آزادی در این مکانیزم‌ها می‌تواند انتقالی، دورانی یا ترکیبی از این دو باشد. ربات‌های موازی با سه‌درجه آزادی انتقالی دارای آزادی حرکت در سه راستای اصلی بوده و حول آن سه راستا دورانی ندارند یا به بیان دیگر مقید هستند. این دسته از ربات‌های موازی به‌طور گسترده در کاربردهایی مانند گذاشت و برداشت در خطوط تولید کارخانه‌ها، عملیات ماشین‌کاری با دقت بالا و کاربردهایی دقیق مانند چاپگرهای سه‌بعدی به کار می‌روند.

۲-۱- ساختار سینماتیک ربات مورد مطالعه

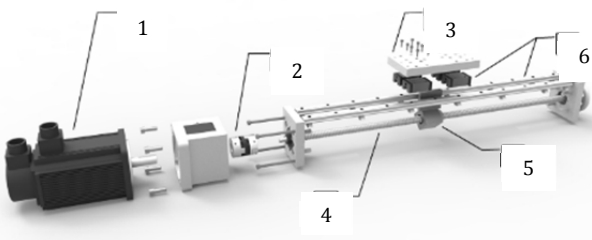
چندین روش سیستماتیک برای سنتز نوعی مکانیزم‌های موازی

آن است. این روش برای کاربرد رباتیک بسیار جالب توجه است، چون لینک‌ها و مفاصل با ابعاد و شکل درست خودشان مدل می‌شوند^[3]. از طرف دیگر، با افزایش تعداد المان‌های محدود، مساله محدودیت حافظه کامپیوتر و دشواری وارون‌کردن ماتریس با ابعاد بالا بیشتر و بیشتر بحرانی می‌شود. در رباتیک، این موارد نسبتاً بار محاسباتی زیادی برای تکرار مش‌بندی و محاسبات دارند، بنابراین در این حوزه از روش آنالیز المان محدود معمولاً در انتهای مرحله طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرد^[4, 5]. یکی از موارد استفاده از روش آنالیز المان محدود در رباتیک، مطالعه سختی سینماتیک و دینامیک مکانیزم‌های موازی به‌منظور دستیابی به طراحی بهینه مکانیکی است^[6, 7]. سختی ربات برای یک ساختار مکانیکی موجود، در موقعیت‌ها و جهت‌گیری‌های مختلف مجری نهایی و همچنین جهت‌های گوناگون اعمالی نیرو و گشتاور روی آن، متغیر است. از روش آنالیز المان محدود برای دستیابی به بیشینه و کمینه سختی مکانیزم ربات و جهت‌هایی که در آن رخ می‌دهند استفاده می‌شود. یکی از کارهای انجام‌شده در این زمینه، مطالعه روی سختی ربات با مکانیزم استوارت بوده که یکی از مکانیزم‌های شناخته‌شده موازی است^[8]. همچنین به‌دلیل پیچیدگی مدل‌سازی سختی ربات‌های با مکانیزم موازی، از روش آنالیز المان محدود به‌منظور ارزیابی دقیق سختی مکانیزم ربات استفاده می‌شود که میزان انحراف مجری نهایی را به‌ازای بار اعمالی به آن نشان می‌دهد. در مطالعه‌ای، یک مکانیزم موازی چهاردرجه آزادی مورد ارزیابی سختی قرار گرفته و به‌منظور دستیابی به صحت مدل، به‌صورت عملی نیز میزان انحراف مجری نهایی به‌ازای بار اعمالی به آن اندازه‌گیری شده است^[9].

در روش آنالیز ساختاری ماتریس، از ایده اصلی روش آنالیز المان محدود بهره برده شده است، اما از تعداد زیادی المان‌های مورد قبول مثل تیر، طاق، کابل‌ها و غیره استفاده می‌شود^[10]. این کار به‌طور بدیهی باعث کاهش بار محاسباتی می‌شود و در بعضی از موارد باعث خواهد شد که یک ماتریس سختی تحلیلی برای وظیفه‌ای خاص حاصل شود. این روش برای ربات‌های با ساختار موازی در کارهای انجام‌شده در برخی مطالعات^[11, 12] توسعه پیدا کرد که در آنها یک روش کلی برای مدل‌سازی سختی بازوی ماهر با لینک‌های صلب یا منعطف و مفاصل غیرفعال پیشنهاد شده است. از دید محاسباتی، روش آنالیز ساختاری ماتریس نسبت به روش آنالیز المان محدود پیچیدگی کمتری دارد. علی‌رغم این حقیقت که روش آنالیز ساختاری ماتریس هنوز شامل اعمال ماتریسی با بعد بالا هستند، یک مصالحه منطقی بین دقت و زمان محاسبات صورت می‌گیرد.

هسته روش مدل‌سازی مفصل مجازی، توسعه و بسط مدل‌سازی مرسوم جسم صلب بازوهای ماهر رباتیک است که لینک‌ها به‌عنوان یک جسم صلب رفتار می‌کنند، اما مفاصل قابل انعطاف فرض می‌شوند (فقط به‌منظور جمع‌کردن تمام انواع انعطاف‌پذیری موجود در مفاصل). از نظر هندسی، چنین تقریبی معادل افزودن مفاصل مجازی کمکی به مفاصل است که با جاسازی کردن فنرهای مجازی به دست می‌آیند. این روش اولین بار و به‌ترتیب در دو پژوهش^[13, 14] معرفی شده که فرض کردند منبع انعطاف‌پذیری اصلی در مفاصل عمل‌کننده متمرکز شده است. در ابتدا، فرض می‌شد که هر مفصل عمل‌کننده به‌وسیله یک فنر یک‌بعدی به‌طور مجزا نمایش داده شود^[15-17]. بعدها، به‌منظور به‌حساب‌آوردن انعطاف‌پذیری لینک‌ها، تعداد مفاصل مجازی افزایش یافت و هر مفصل واقعی فعال و غیرفعال را شامل چندین فنر مجازی خطی و دورانی کردند.

گشتاور دینامیک نامی ۶ نیوتن متر و گشتاور استاتیکی ۶۰ نیوتن متر هستند که بیشینه سرعت آن برابر با ۲۰۰۰ دور بر دقیقه است. هر یک از موتورهای به کار برده شده از یک انکودر افزایشی ۱۰۰۰۰ پالس به بهره می‌برند که امکان تعیین زاویه روتور و سرعت چرخش موتور را برای درایور موتور امکان‌پذیر می‌نماید. همچنین در سیستم‌های انتقال حرکت دورانی به خطی، سیستم شفت و بال اسکرو به همراه مهره مربوطه، یکی از دقیق‌ترین سیستم‌ها است. برای دستیابی به دقت تفکیک‌پذیری مورد نظر از بال اسکرو با گام ۵ میلی‌متر استفاده شده است، زیرا با در نظر گرفتن موتور با انکودر ۱۰۰۰۰ پالس که در اختیار داریم و همچنین گام ۵ میلی‌متر، دقت تفکیک‌پذیری به میزان ۰.۵ میکرومتر حاصل شده است. در شکل ۲ طرح انفجاری این سیستم انتقال حرکت نشان داده شده است که اجزای اصلی مکانیکی آن در جدول ۱ لیست شده‌اند.



شکل ۲) نقشه انفجاری سیستم انتقال حرکت دورانی به خطی

جدول ۱) اجزای مکانیکی سیستم انتقال حرکت دورانی به خطی در طرح انفجاری در شکل ۲

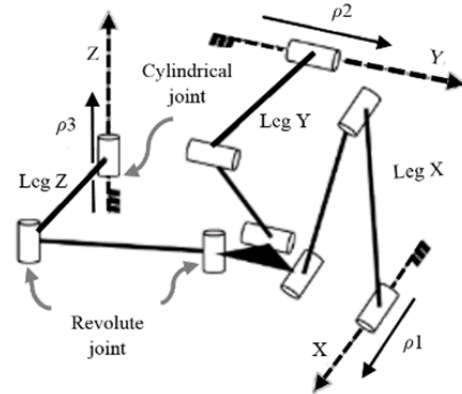
شماره در شکل ۲	توضیحات
۱	سروو موتور
۲	کوپلینگ
۳	صفحه اتصال شاخه‌ها به عملگر
۴	شفت بال اسکرو
۵	مهره رزوه‌دار بال اسکرو
۶	سیستم راهنمای ریل و واگن

همان‌طور که اشاره شد، از مزیت‌های ربات‌های با مکانیزم موازی، نسبت بالای بار اعمالی به وزن کل ربات، در مقایسه با ربات‌های سری است. لذا با سبک‌تر کردن شاخه‌ها در مکانیزم موازی، این قابلیت ارتقا داده شده و موجب کاهش خطای نرمی می‌شود. بنابراین موادی در ساخت شاخه‌ها به کار برده شد که از سبکی و استحکام بالایی برخوردار باشند. در ربات مورد بحث در این مقاله، برای بدنه لینک‌ها از مواد مرکب یا فیبر کربن استفاده شده است. این انتخاب به مقدار مناسبی باعث استحکام و سبکی سازه مکانیزم می‌شود.

در این مقاله، به منظور محاسبه خواص مکانیکی فیبر کربن، از روش تحلیلی میکرومکانیک استفاده شده است. به منظور استفاده از تئوری میکرومکانیک، ابتدا نیاز است خواص مکانیکی الیاف و زمینه را داشته باشیم. برای این منظور، درصد حجمی الیاف و زمینه و همچنین خواص مکانیکی اسمی و استحکام‌های آنها از سازنده و کاتالوگ مواد مورد استفاده به دست آورده شده است. با در نظر گرفتن این اطلاعات و مراجعه به روابط میکرومکانیک لایه‌ها، خواص مکانیکی و استحکام‌های یک لایه از فیبر کربن به دست آورده شده و در جدول ۲ نشان داده شده است. در این مقاله، درصد حجمی الیاف ۶۰٪ در نظر گرفته شده است.

انتقالی انجام شد، مثل روشی بر پایه تئوری گروه [19, 20] و همچنین روش‌هایی بر پایه جبر پیچ یا تئوری پیچ [21, 22]. ربات متقارن تریپترون با سه‌درجه آزادی و پس از آن مکانیزم موازی چهاردرجه آزادی کوادریپترون که به خانواده مالتی‌پترون‌ها از مکانیزم‌های موازی متعلق هستند، به ترتیب حاصل سنتز نوعی اجرا شده روی مکانیزم‌های سه و چهاردرجه آزادی هستند.

اولین عضو خانواده مالتی‌پترون‌ها ربات سه‌درجه آزادی تریپترون است. تریپترون یک ربات موازی مستقل کامل [23] با سه‌درجه آزادی انتقالی است. طبق شکل ۱ این ربات شامل سه پایه از نوع \overline{PRRR} است که به صورت عمود بر هم به پلتفرم متحرک متصل هستند [24]. در هر پایه، جهت مفصل عملگر خطی، هم‌محور با مفصل دورانی در آنها است. این مکانیزم مستقل کامل است که هر عملگر خطی در آن، یکی از حرکت‌های انتقالی را کنترل می‌کند. در مطالعه‌ای [25] سینماتیک و فضای کاری تریپترون ارایه شده و طراحی آن در یک پژوهش [26] مورد بحث قرار گرفته است.



شکل ۱) ساختار کلی ربات موازی سه‌درجه آزادی مورد مطالعه

۲-۲- معرفی ربات

قبل از طراحی و ساخت ربات مورد مطالعه در این مقاله، ملاحظات و انتظاراتی مورد توجه قرار گرفته و برای دستیابی به این انتظارات، آنالیزها و بهینه‌سازی‌هایی انجام شده است. در ابتدا، کاربردهای مورد انتظار از ربات تعیین شد که استفاده از آن به‌عنوان چاپگرهای سه‌بعدی، مکانیزمی برای عملیات گذاشت و برداشت، ماشین‌های ابزار کنترل عددی و پلتفرمی برای تحقیقات آکادمیک جزء کاربردهای مورد نظر بود.

در قدم بعدی با توجه به کاربردهای مورد نظر، میزان فضای کاری مورد انتظار ربات ۵۰ سانتی‌متر مکعب تعیین شد که این انتخاب یک مصالحه بین کاربردهای مورد انتظار از این ربات بود. مکانیزم ربات موازی مورد مطالعه در این مقاله، برای دستیابی به سه حرکت انتقالی مستقل، نیاز به سه عملگر دارد که توانایی تولید حرکت خطی را داشته باشند. از طرف دیگر، با توجه به کاربردهای مورد نظر، دقت تفکیک‌پذیری این حرکت‌های خطی در سه راستای اصلی، زیر یک میکرومتر در نظر گرفته شده است. بنابراین عملگرهایی انتخاب شدند تا این توانایی را داشته باشند. به این منظور، در طراحی مکانیزم ربات از سه سروو موتور استفاده شده است که با استفاده از سه سیستم انتقال حرکت دورانی به خطی، حرکت مورد نظر را تولید می‌کنند.

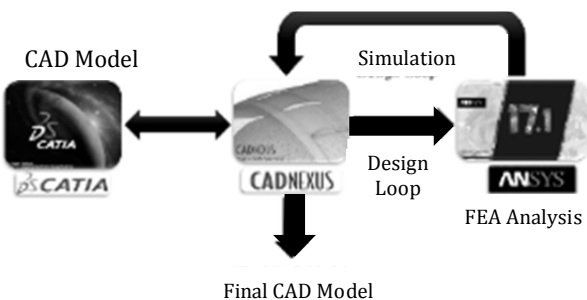
به‌منظور دستیابی به دقت تفکیک‌پذیری مورد نظر، از سه سروو موتور جریان متناوب استفاده شده است که این موتورها دارای

۳- مدل‌سازی سختی

مدل‌سازی پدیده‌ها و تحلیل مسایل فیزیکی به‌صورت دقیق و بدون ساده‌سازی، عملاً کار غیرممکنی است. بنابراین در علوم مهندسی مختلف، با ساده‌سازی و ایده‌آل‌سازی مسایل، پدیده‌ها مدل‌سازی و تحلیل می‌شوند. مشکل اصلی، حل معادلات حاکم بر پدیده‌ها بوده، اما امروزه با پیشرفت علوم کامپیوتر، انقلابی در تحلیل مسایل مهندسی رخ داده است. در حقیقت به‌دلیل افزایش بسیار زیاد توان محاسباتی در سال‌های اخیر، استفاده از روش‌های عددی در طراحی و تحلیل، افزایش چشمگیری داشته است.

در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار ANSYS، برای مدل‌سازی سختی از روش آنالیز المان محدود و حل عددی برای تحلیل استفاده شده است. روند کار به این صورت است که ابتدا مدل طراحی شده در نرم‌افزار کتیا به‌عنوان مدل سه‌بعدی در محیط نرم‌افزار ANSYS فراخوانی می‌شود. برای این منظور از نرم‌افزاری واسطه به نام کدنکسوس استفاده شده است. این نرم‌افزار میانی ابتدا مدل را از نرم‌افزار مدل‌سازی سه‌بعدی می‌گیرد و به نرم‌افزار تحلیل عددی می‌فرستد، سپس نرم‌افزار ANSYS با حلقه‌ای که با نرم‌افزار واسطه به‌وجود می‌آورد، پارامترهای مدل سه‌بعدی را به‌منظور بهینه‌سازی تغییر می‌دهد و پس از اتمام عملیات تحلیل عددی، مدل نهایی را دوباره توسط این نرم‌افزار واسطه، به نرم‌افزار مدل‌سازی سه‌بعدی ارسال می‌کند. در شکل ۵ نمای کلی از ارتباط بین نرم‌افزار مدل‌سازی سه‌بعدی با نرم‌افزار تحلیلی عددی نشان داده شده است. پارامترهای بهینه‌سازی شده در این مقاله، قطر داخلی لوله فیبر کربن و تعداد لایه‌چینی روی آن است که به‌ترتیب با نمادهای D و n نام‌گذاری شده‌اند. با توجه به نتایج بررسی ضریب همبستگی، این دو پارامتر ارتباط مستقیمی با خیز دارند و در ادامه برای دستیابی رابطه‌ای بین این دو پارامتر با میزان خیز از روش‌شناسی سطح پاسخ استفاده شده است. روش کار به این صورت است که با استفاده از مجموعه‌ای از داده‌ها که آنها هم از روش‌های مخصوص به خود به دست می‌آیند، یک پاسخ بهینه به دست می‌آید. این داده‌ها، طراحی آزمایش نامیده می‌شوند و یک روش سازمان‌دهی شده علمی برای تعیین کردن نقاط آزمون هستند که در این مقاله از روش طراحی مرکزی مرکب استفاده شده است. بعد از این مرحله نقاط آزمون، از روش ژنتیک برای عبوردادن سطح پاسخ مورد استفاده قرار گرفته که به‌دلیل نویزی نبودن پارامترها روش مناسبی است. در ادامه، برای به‌دست‌آوردن مقادیر بهینه روی سطح پاسخ، از روش اسکریپینگ استفاده شده است که برای سطوح با پیچیدگی کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در آخر از بین چند جوابی که این روش کاندید کرده است، با توجه به هزینه، ضروریات طراحی مکانیکی و ضریب اطمینان مقادیر بهینه به دست آورده شده است (D=۵۰mm ; n=۱۱).

Request Shape Update with Change Parameters

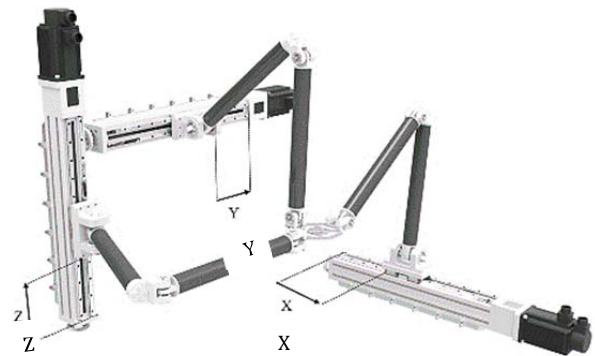


شکل ۵) ارتباط بین نرم‌افزارهای مدل‌سازی سه‌بعدی و تحلیل عددی

جدول ۲) خواص تک‌لایه از فیبر کربن

خواص مکانیکی	مقادیر
چگالی	$1/8 \left(\frac{kg}{m^3} \right)$
خواص الاستیک	$E_1 = E_2 = 71 (Gpa), E_3 = 3.8 (Gpa)$ $G_{12} = G_{13} = 5.9 (Gpa), G_{23} = 5.23 (Gpa)$ $\theta_{12} = \theta_{13} = 0.272, \theta_{23} = 0.238$
استحکام	$X_t = 600.1872 (Mpa), X_c = 570.5688 (Mpa)$ $Y_t = 597.117 (Mpa), Y_c = 572.832 (Mpa)$ $S_{12} = S_{23} = S_{13} = 90.456 (Mpa)$

در شکل ۳ نحوه اتصال شاخه‌های ربات موازی سه‌درجه آزادی مورد مطالعه در این مقاله به‌همراه مبنای تعیین وضعیت پارامترهای X، Y و Z نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مکانیزم ربات دارای سه زنجیره سینماتیک است و هر عملگر به‌همراه سیستم انتقال حرکت، وظیفه حرکت در یک راستا را دارد. همچنین در شکل ۴ مونتاژ نهایی ربات نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، سیستم‌های انتقال حرکت به بدنه ثابت پیچ شده است و شاخه‌ها از یک طرف به این سیستم‌های انتقال حرکت و از طرف دیگر به مجری نهایی متصل هستند.



شکل ۳) ربات موازی مورد مطالعه به‌همراه مبنای پارامترهای تعیین وضعیت



شکل ۴) مونتاژ نهایی ربات موازی سه‌درجه آزادی

که برای تمام پنج وضعیت، به ازای نیرو در راستای Z- بیشترین جابه‌جایی در همان راستای Z رخ می‌دهد. در جدول ۴ میزان جابه‌جایی به ازای نیرو در جهت Z- برای وضعیت‌های اول تا پنجم آورده شده است.

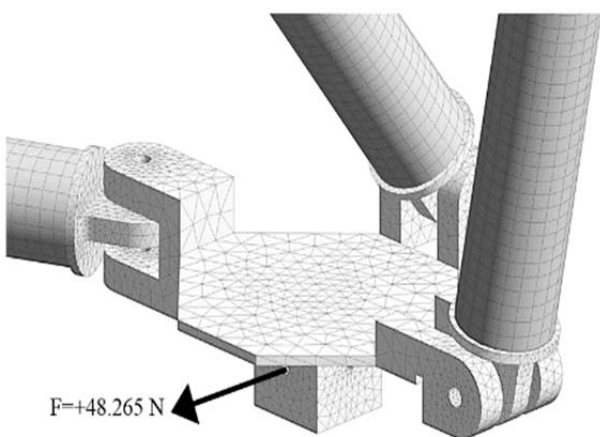
جدول ۴) میزان جابه‌جایی به ازای اعمال نیرو در جهت Z-

وضعیت ربات	میزان جابه‌جایی (میلی‌متر)
اول	۰/۶۴۳۶
دوم	۰/۵۸۵۷
سوم	۰/۶۱۲۰
چهارم	۰/۶۱۲۶
پنجم	۰/۶۴۱۵

با توجه به جدول ۴ که از نتایج مدل‌سازی سختی در نرم‌افزار ANSYS به دست آمده است، نتیجه‌گیری می‌شود که وضعیت اول در این پنج وضعیت بحرانی‌تر بوده و در نتیجه مدل‌سازی سختی و اندازه‌گیری عملی در این وضعیت مورد بررسی و نتایج آن مورد مقایسه قرار گرفته است.

پروتکل چگونگی اندازه‌گیری و ثبت داده‌های مدل‌سازی سختی ربات مورد مطالعه در این مقاله به این صورت بوده که اعمال بار روی ربات به‌طور افزایشی و در بیست مرحله و به‌ترتیب در سه راستای X, Y و Z در وضعیت مشخصی از ربات، اعمال شده است. یعنی با توجه به حداکثر بار عملی در نظر گرفته شده که ۵۰ نیوتن بوده، این مقدار را به بیست قسمت تقسیم کرده است و در هر مرحله، یک‌بیستم نیرو به وجوه مکعب متصل به مجری نهایی که مرتبط با جهت اعمال نیرو بوده، وارد شده و در هر یک از این مرحله، میزان جابه‌جایی وجوه مکعب متصل به مجری نهایی در سه راستا به دست آمده است. در این مقاله، به‌منظور اعمال نیرو در سه راستای اصلی و همچنین به‌دست‌آوردن میزان انحراف و جابه‌جایی در این سه راستا، از یک مکعب مربع که در مرکز مجری نهایی متصل شده، استفاده شده است.

برای نمونه در شکل ۶ بارگذاری در راستای X+ و در وضعیت اول نشان داده شده است و در شکل‌های ۹-۷ نیز به‌ترتیب جابه‌جایی‌های وجوه مکعب نصب شده روی مجری نهایی در راستاهای X, Y و Z به ازای بارگذاری نشان داده شده در شکل ۶ آورده شده است.



شکل ۶) بارگذاری در جهت X+ در محیط ANSYS

اساس کار نرم‌افزار ANSYS به‌منظور مدل‌سازی سختی این است که مدل سه‌بعدی به تعداد زیادی المان کوچک تجزیه شده و رابطه‌ای بین این گره‌های مجاور با استفاده از ماتریس سختی نسبی برقرار می‌شود. برای اینکه ماتریس سختی بتواند به‌صورت تحلیلی محاسبه شود، المان‌های محدود باید طبق استاندارد خاص و به شکل‌هایی مانند هرم یا مکعب المان‌بندی شوند. پس از مرحله مش‌بندی که در همان نرم‌افزار ANSYS انجام می‌شود، با اعمال شرایط مرزی از جمله اعمال نیرو به ربات، موازنه معادلات استاتیکی برای هر گره به دست می‌آید که در یک ماتریس سراسری جمع می‌شوند. این ماتریس، بیان‌کننده رابطه نیرو و گشتاور اعمالی و انحراف گره است.

رابطه کلی سختی بازوی ماهر، انحراف بی‌نهایت کوچک مجری نهایی را با رنج اعمالی مرتبط می‌کند که به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$F = K \cdot \Delta X \quad (1)$$

K ماتریس سختی بازوی ماهر، F رنج اعمالی به مجری نهایی و ΔX انحراف خطی و زاویه‌ای مجری نهایی است.

در این مقاله پنج وضعیت از فضای کاری ربات، مورد مطالعه قرار داده شده است و پارامترهای تعیین وضعیت ربات در این پنج نقطه، مطابق شکل ۳، در جدول ۳ آورده شده است. در واقع در این مقاله یک سطح از فضای کاری ربات مورد مطالعه قرار گرفته که به‌صورت یک مربع است و نقاط مورد بررسی روی رئوس و مرکز مربع واقع شده‌اند.

جدول ۳) پارامترهای تعیین وضعیت ربات در محل‌های مدل‌سازی و اندازه‌گیری عملی سختی

وضعیت ربات	X (میلی‌متر)	Y (میلی‌متر)	Z (میلی‌متر)
اول	۲۵	۲۵	۲۰
دوم	۲۵	۵۲۰	۲۰
سوم	۵۲۰	۵۲۰	۲۰
چهارم	۵۲۰	۲۵	۲۰
پنجم	۲۷۰	۲۷۰	۲۰

به‌منظور ارزیابی سختی، ربات در این پنج نقطه یا وضعیت از فضای کاری مورد بررسی سختی قرار گرفته است. ابتدا، در این پنج وضعیت، وضعیتی که به ازای نیروی یکسان، جابه‌جایی‌ها یا انحراف بیشتری داشت، به‌عنوان وضعیت بحرانی انتخاب شده است.

روش کار به این صورت است که در هر یک از این پنج وضعیت ربات، به ازای بیشینه نیرو در سه جهت اصلی، آن جهتی که بیشترین میزان جابه‌جایی یا خیز، روی مجری نهایی در آن رخ داده، در نظر گرفته شده است. به همین منوال برای چهار وضعیت دیگر هم، جهت نیرویی که بیشینه میزان جابه‌جایی را دارد انتخاب شده و در آخر، در این پنج وضعیت، آن وضعیت که بیشترین جابه‌جایی یا بیشترین میزان انحراف در آن رخ داده به‌عنوان وضعیت بحرانی انتخاب شده و مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از انتخاب این است که بتوان نشان داد در بدترین وضعیت ربات، آیا به اهداف و انتظارات از پیش تعریف شده دست یافته شده است یا خیر.

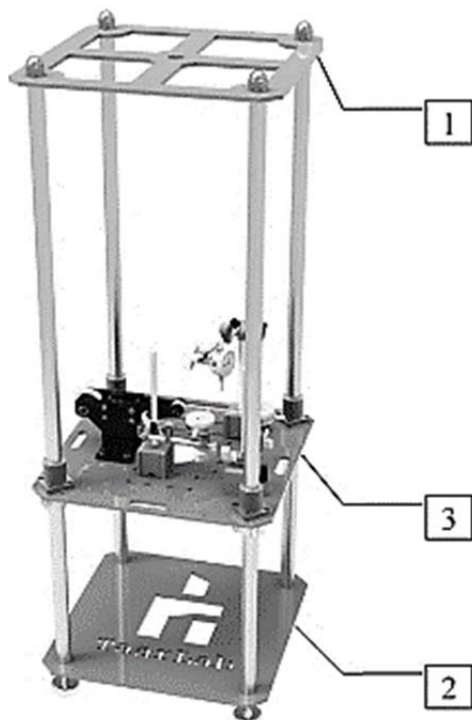
پس از اعمال شرایط مرزی طبق پاراگراف قبل مشخص شده است

۴-۱- دستگاه اندازه‌گیری سختی

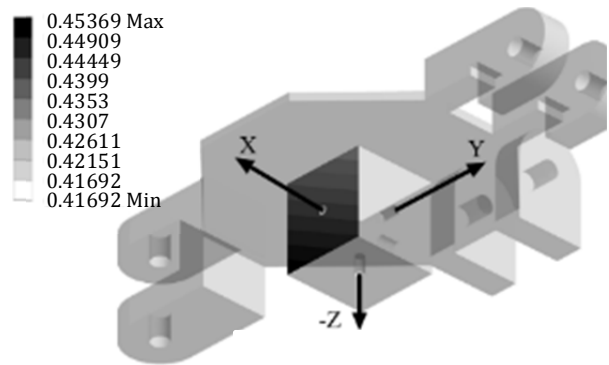
در این قسمت به شرح دستگاهی پرداخته می‌شود که رفتار سختی مکانیزم ربات را در یک وضعیت ثابت مورد اندازه‌گیری قرار می‌دهد. طبق رابطه کلی سختی، ماتریس سختی یک مکانیزم در وضعیت ثابت، میزان نیرو و گشتاور اعمالی را به میزان انحراف‌های خطی و جهت‌گیری‌های دورانی مرتبط می‌کند. لذا در این دستگاه، با اعمال نیرو و گشتاور مشخص به مجری نهایی ربات و اندازه‌گیری میزان انحرافات خطی و دورانی، می‌توان رفتار سختی ربات را بررسی کرد و به بیان دیگر، ماتریس سختی را به دست آورد.

این دستگاه وسیله‌ای برای راستی‌آزمایی نتایج به دست آمده از مدلسازی سختی به روش آنالیز المان محدود نیز است. با این کار میزان اختلاف نتایج عملی از نتایج مدلسازی مشخص می‌شود و طبق آن می‌توان مکانیزم ربات را مورد بررسی قرار داد. در ادامه، دستگاه طراحی شده به منظور اندازه‌گیری سختی به طور کامل توضیح داده شده و اجزای به کار برده شده در آن نیز معرفی شده‌اند و همچنین، نحوه ثبت داده برای ربات، توسط آن شرح داده می‌شود. این دستگاه از سه بخش اصلی تشکیل شده است که شامل بدنه اصلی، سیستم اعمال بار و ابزارهای اندازه‌گیری می‌شود.

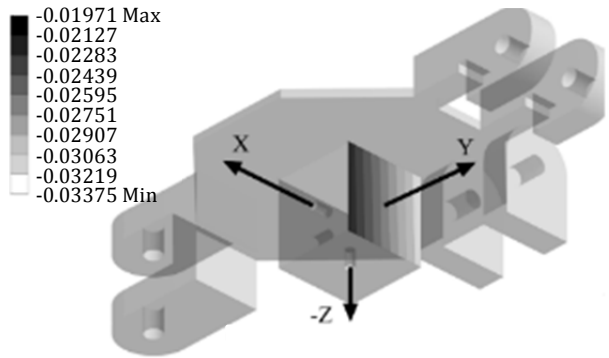
بدنه اصلی: در شکل ۱۰ اجزای بدنه اصلی نشان داده شده و در جدول ۵ نام برده شده‌اند. این بدنه اصلی از یک صفحه میانی تشکیل شده است که قابلیت تنظیم ارتفاع دارد. این قابلیت باعث می‌شود که از این دستگاه برای ربات‌های گوناگون از جمله ربات‌های سری و موازی و در وضعیت‌های مختلف آن و در ارتفاع‌های متفاوت یا سطوح دلخواه فضای کاری ربات استفاده شود. همچنین ابزارهای اندازه‌گیری روی این صفحه قرار می‌گیرند. همچنین در چهار طرف صفحه میانی، سوراخ‌هایی به منظور بستن سیستم اعمال نیرو و گشتاور در نظر گرفته شده است تا نیرو در راستای دلخواه به مجری نهایی اعمال شود.



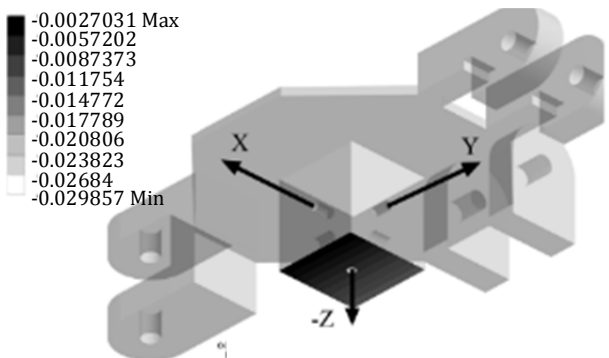
شکل ۱۰) دستگاه اندازه‌گیری سختی به همراه قسمت‌های اصلی



شکل ۷) جابه‌جایی در جهت X روی مکعب متصل به مجری نهایی به‌ازای نیرو در جهت +X



شکل ۸) جابه‌جایی در جهت Y روی مکعب متصل به مجری نهایی به‌ازای نیرو در جهت +X



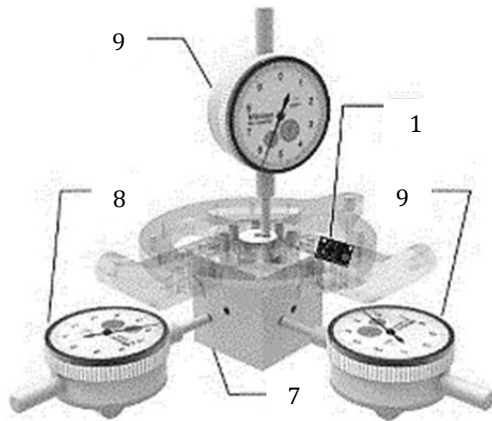
شکل ۹) جابه‌جایی در جهت Z روی مکعب متصل به مجری نهایی به‌ازای نیرو در جهت +X

۴- اندازه‌گیری سختی به‌طور عملی

در این قسمت، روشی نوین برای اندازه‌گیری سختی به‌طور عملی ارائه شده است. همان‌طور که در قسمت‌های قبل اشاره شد، بررسی‌های سختی روی مکانیزم ربات، با مدلسازی به روش آنالیز المان محدود در نرم‌افزار تخصصی ANSYS انجام شده است. همان‌طور که گفته شد، با توجه به اینکه در روش آنالیز المان محدود، مکانیزم ربات با تمام جزئیات مکانیکی و شرایط مرزی واقعی مدلسازی می‌شود، دقت در این روش بالاست.

برای اینکه بررسی شود که چقدر نتایج مدلسازی سختی به واقعیت نزدیک است، بایستی نتایج مدلسازی به‌طور عملی راستی‌آزمایی شود. برای این منظور دستگاهی طراحی و ساخته شده است تا این موضوع بررسی شود. در ادامه این دستگاه، معرفی و نحوه کار با آن بیان می‌شود.

به طوری که میله حسگر ساعت‌های اندیکاتور، عمود بر وجوه مکعب متصل به مجری نهایی باشد. به منظور خواندن و پردازش داده‌های سنسور IMU به کاررفته در اندازه‌گیری میزان دوران حول محورهای اصلی، از برد الکترونیکی MEGA2560 استفاده شده است. اطلاعات اندازه‌گیری شده توسط سنسور نیز به ورودی‌های دیجیتال برد آردوینو ارسال می‌شود تا بتوان روی آن پردازش انجام داد.



شکل ۱۲) چگونگی قرارگیری سیستم‌های اندازه‌گیری

۴-۲- روش عملکرد و به‌کارگیری دستگاه اندازه‌گیری سختی

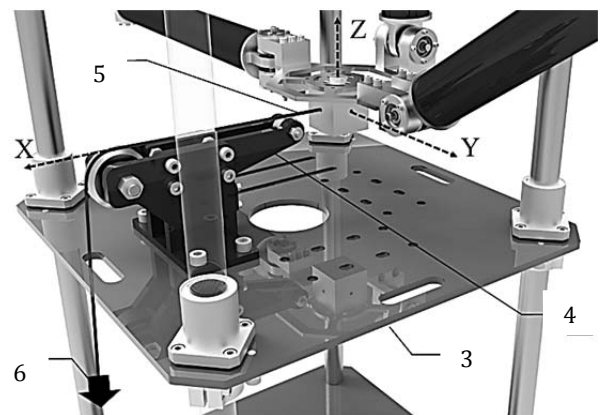
با معرفی قسمت‌های مختلف دستگاه اندازه‌گیری سختی ربات، تا حدودی طرز کار این دستگاه مشخص شده است. این دستگاه برای هر نوع ربات سری و موازی در یک وضعیت ثابت ربات در فضای کاری خودش مورد استفاده قرار می‌گیرد. روال به این صورت است که ابتدا ربات در وضعیت مشخصی برده و عملگرهای آن قفل می‌شوند، بنابراین ربات نباید حرکتی داشته باشد یا به بیان دیگر درجه آزادی آن باید صفر باشد. سپس دستگاه اندازه‌گیری سختی، در زیر مجری نهایی قرار داده شده و در ادامه، صفحه میانی تا ارتفاع مناسب بالا آورده و پیچ‌های آن سفت می‌شود. سپس سیستم اعمال نیرو با توجه به جهت اعمال نیرو، در سمت مناسبی روی صفحه میانی نصب می‌شود. سپس ساعت‌های اندیکاتور به همراه پایه‌های مغناطیسی، روی صفحه میانی قرار می‌گیرند و تنظیم می‌شوند. در این مرحله باید دقت شود که حسگرهای ساعت اندیکاتور عمود بر وجوه مکعب مربع متصل به مجری نهایی باشند.

پس از این مرحله، باید ساعت‌ها صفر شوند. نکته‌ای که باید در نظر گرفته شود این است که ساعت باید در میانه بازه اندازه‌گیری قرار گیرد تا هم جابه‌جایی در جهت مثبت اندازه‌گیری شود و هم در جهت منفی قابلیت اندازه‌گیری داشته باشد. در مرحله بعد، سنسور IMU روی مجری نهایی نصب می‌شود. بعد از مهیاشدن شرایط داده‌گیری، در ادامه وزنه‌ها به‌طور افزایشی و در مراحل مختلف روی جای وزنه تعبیه‌شده، قرار داده می‌شوند. در عین حال باید بعد از هر مرحله، میزان جابه‌جایی‌ها از ساعت اندیکاتور خوانده و ثبت شود. همین روال بیست مرتبه تکرار می‌شود و به همراه افزایش وزنه، داده‌ها هم ثبت می‌شوند. در حین این مراحل هم، سنسور IMU، داده‌ها را ثبت می‌کند و بعد از اتمام بارگذاری، داده‌های سنسور هم ثبت می‌شوند. این داده‌ها، میزان جهت‌گیری مجری نهایی در مراحل تست را ثبت می‌کنند. در شکل ۱۳ استفاده از این

سیستم اعمال نیرو و گشتاور: در شکل ۱۱ سیستم اعمال نیرو و گشتاور نشان داده شده و در جدول ۵ قسمت‌های مختلف آن آورده شده است. همان طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، این مجموعه روی صفحه میانی بدنه اصلی بسته می‌شود. همچنین از یک مکعب مربع برای اعمال بار به مجری نهایی استفاده شده است. این قطعه که در شش وجه آن سوراخ رزوه‌دار تعبیه شده است، روی مجری نهایی ربات‌ها متصل می‌شود و برای اعمال نیرو در راستاهای اصلی و گشتاور حول آن محورها، مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیم بکسل از یک سمت به وجوه مکعب مربع متصل به مجری نهایی وصل می‌شود و از سمت دیگر، نیرو به آن اعمال می‌شود. سیستم اعمال نیرو طوری تنظیم می‌شود که نیرو در یک راستای خاص به مجری نهایی اعمال شود.

جدول ۵) اجزای دستگاه اندازه‌گیری سختی نشان‌دهنده در شکل‌های ۱۲-۱۰

شماره در شکل‌های ۱۰-۱۲	توضیحات
۱	صفحه ثابت بالایی
۲	صفحه ثابت پایینی
۳	صفحه متحرک
۴	سیستم اعمال نیروی متصل به صفحه متحرک
۵	کابل اعمال نیرو
۶	نیروی اعمالی به کابل
۷	مکعب مربع متصل به مجری نهایی
۸	ساعت اندیکاتور با دقت ۰/۱
۹	ساعت اندیکاتور با دقت ۰/۰۰۱
۱۰	سنسور IMU

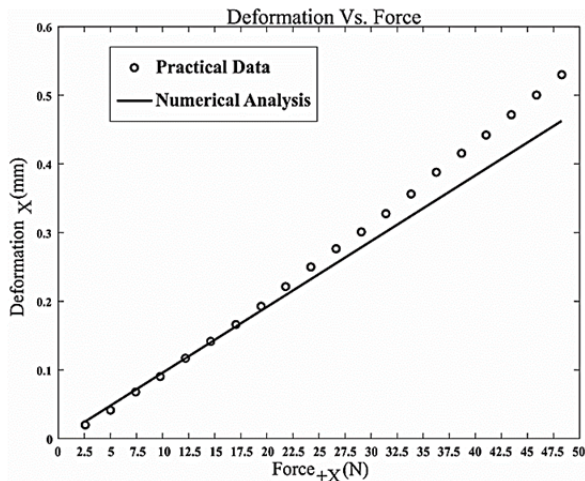


شکل ۱۱) سیستم اعمال نیرو در راستاهای اصلی

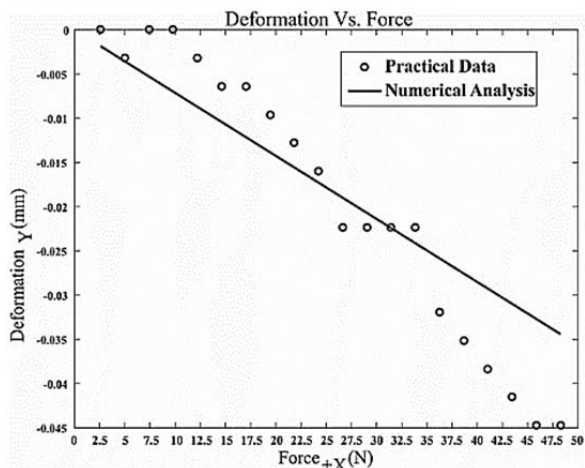
سیستم‌های اندازه‌گیری: در این دستگاه برای اندازه‌گیری جابه‌جایی خطی در سه راستای اصلی X ، Y ، Z از سه ساعت اندیکاتور استفاده شده و برای اندازه‌گیری دوران حول محورهای اصلی از سنسور IMU بهره برده شده است که روی مجری نهایی متصل می‌شود. در شکل ۱۲ نحوه جانمایی و قرارگیری این اجزا نشان داده شده و در جدول ۵ این اجزا به تفکیک نام برده شده‌اند.

ساعت‌های اندیکاتور به‌کارگرفته‌شده در این کار دارای دقت ۰.۰۱ و ۰.۰۰۱ میلی‌متر هستند. این ساعت‌ها معمولاً دارای یک پایه مغناطیسی بوده که یک سری پیچ‌های تنظیمات دارند که موجب تنظیم ساعت در جای دلخواه می‌شود. در این کار، پایه‌های مغناطیسی به صفحه میانی متصل شده و با استفاده از تنظیمات پایه مغناطیسی، ساعت در موقعیت مناسب فیکس می‌شود،

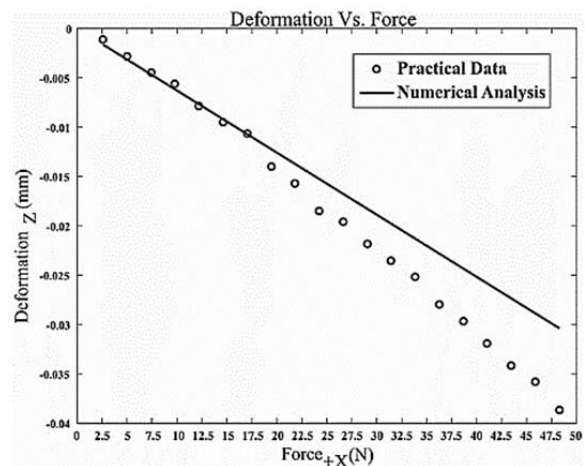
مدل‌سازی سختی و اندازه‌گیری عملی، در نمودارهای نیرو-جاب‌جایی به‌ازای نیرو در جهت +X و به‌ترتیب، برای راستاهای X، Y و Z آورده شده است. همان‌طور که در قسمت قبل توضیح داده شد، اعمال نیرو به‌طور افزایشی و در بیست مرحله اعمال شده است.



نمودار (۱) نمودار نیرو-جاب‌جایی، به‌ازای نیرو در جهت +X و جاب‌جایی در جهت X

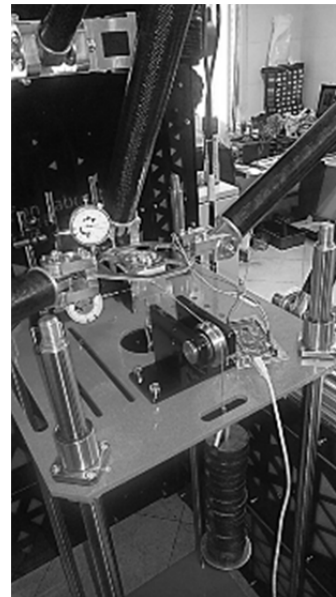


نمودار (۲) نمودار نیرو-جاب‌جایی، به‌ازای نیرو در جهت +X و جاب‌جایی در جهت Y



نمودار (۳) نمودار نیرو-جاب‌جایی، به‌ازای نیرو در جهت +X و جاب‌جایی در جهت Z

دستگاه در آنالیز سختی ربات مورد مطالعه در این مقاله آورده شده که در آزمایشگاه تعامل ربات دانشگاه تهران به کار گرفته شده است.



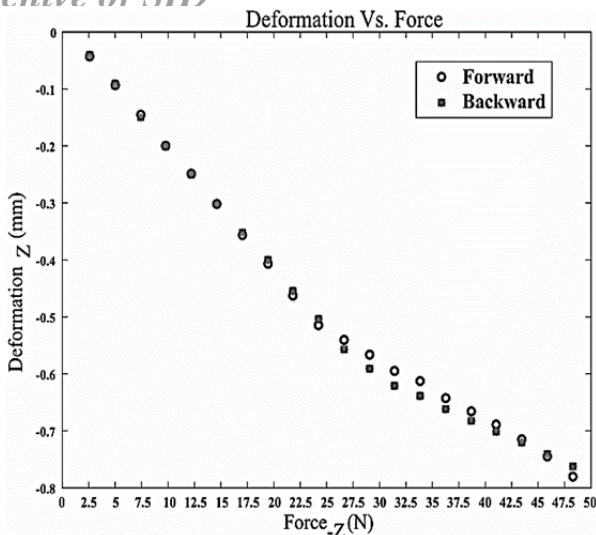
شکل (۱۳) اندازه‌گیری سختی برای وضعیت مشخصی از ربات

۵- بررسی نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی و اندازه‌گیری عملی

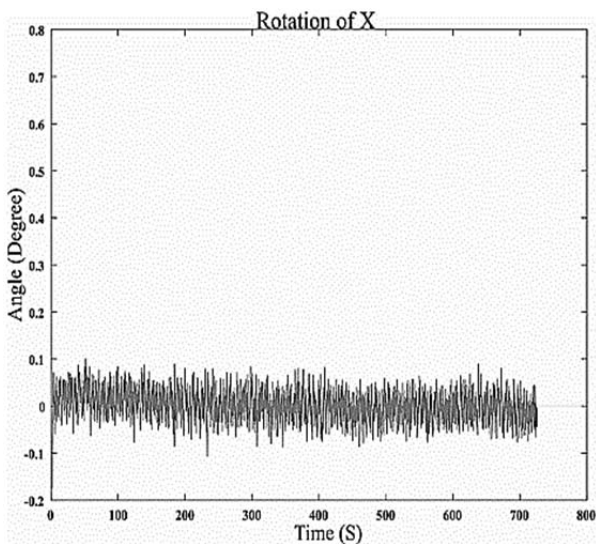
در این بخش، نتایج مدل‌سازی سختی و همچنین نتایج به‌دست‌آمده از تست عملی برای ربات، مورد بررسی قرار گرفته است. عوامل متعددی برای عدم همخوانی بین مدل‌سازی سختی و نتایج اندازه‌گیری عملی سختی وجود دارد. از جمله مهم‌ترین دلایل، دقت ساخت و لقی‌های موجود است که در مدل‌سازی از این موارد چشم‌پوشی می‌شود. همچنین در مدل‌سازی از بسیاری موارد جزئی چشم‌پوشی می‌شود و تمامی شرایط محیطی و مکانیکی ایده‌آل در نظر گرفته می‌شوند، از این رو نتایج مدل‌سازی‌ها معمولاً با نتایج تست عملی اختلافاتی دارند. از طرف دیگر، در تست عملی هم بسیاری از خطاها ممکن است رخ دهد. برای این مقاله تغییرات ناچیز در وزن و وزنه‌ها و همچنین لرزش دست هنگام گذاشتن وزنه‌ها، خطاهایی را به وجود می‌آورد. در بسیاری از موارد ممکن است خطاهای خواندن ساعت هم به وجود بیاید، زیرا ساعت‌های اندازه‌گیری به‌کاررفته در این کار بسیار حساس بوده و از آنجا که این ساعت‌ها عقربه‌ای بودند، اجتناب از خطای به‌وجودآمده در خواندن غیرقابل انکار است.

برای بررسی رفتار سختی ربات یا به بیان دیگر ارزیابی میزان انحراف ربات به‌ازای بار اعمالی به مجری نهایی در وضعیت اول، نمودارهای نیرو-جاب‌جایی برای اعمال نیرو در سه جهت اصلی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

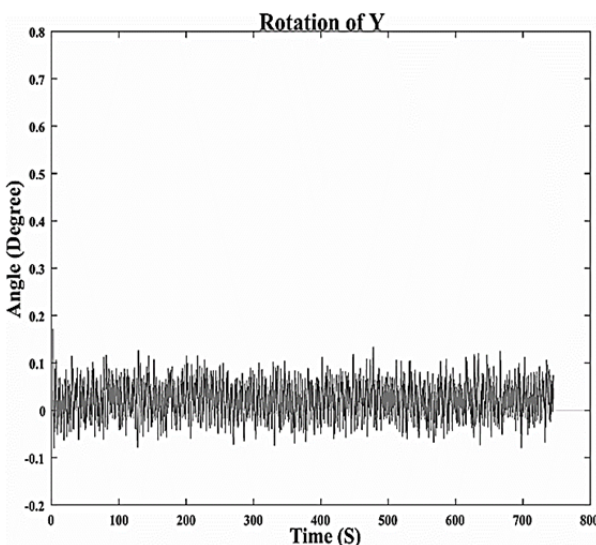
برای هر نیرو در جهت‌های اصلی، سه نمودار نیرو-جاب‌جایی در سه راستای اصلی اندازه‌گیری می‌شوند. از آنجا که در این کار اعمال نیرو به‌صورت ترکیبی نیست و فقط یک نیرو در یک جهت به مجری نهایی اعمال می‌شود، جاب‌جایی در آن جهت نسبت به دو جهت دیگر بیشتر است. در ادامه، به‌عنوان نمونه، نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی سختی به‌همراه نتایج حاصل از اندازه‌گیری سختی به‌صورت عملی آورده شده است. در نمودارهای ۱-۳، نتایج



نمودار (۶) نمودار نیرو- جابه‌جایی به‌منظور بررسی برگشت‌پذیری، به‌ازای نیرو در جهت Z- و جابه‌جایی در جهت Z



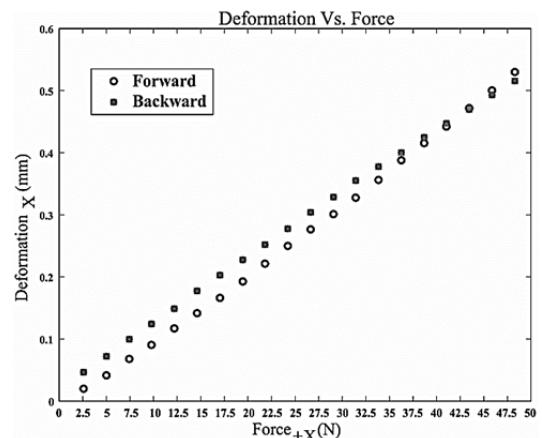
نمودار (۷) نمودار دوران مجری نهایی حول محور X برحسب زمان برای نیرو در جهت Z-



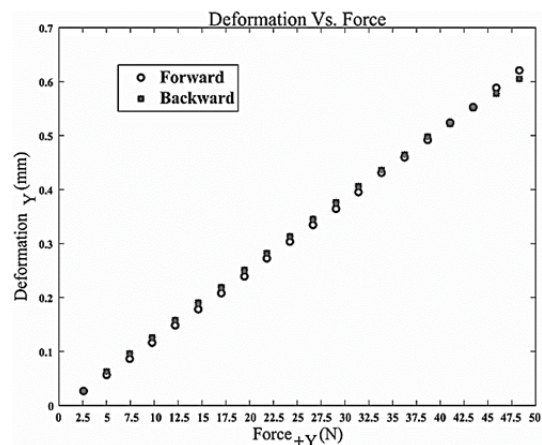
نمودار (۸) نمودار دوران مجری نهایی حول محور Y برحسب زمان برای نیرو در جهت Z-

یکی دیگر از بررسی‌های انجام‌شده در این قسمت، بررسی دقت برگشت‌پذیری ربات است. به این معنی که پس از اتمام بارگذاری‌های مرحله‌ای با استفاده از وزنه‌ها، به‌طور برعکس، وزنه‌ها کاهش پیدا می‌کنند تا در آخر، حالت بدون بار حاصل شود. برای این منظور در فرآیند تست عملی، پس از بارگذاری توسط وزنه‌ها، در مرحله بعد، این وزنه‌ها کاهش پیدا می‌کنند تا با استفاده از ساعت‌های اندازه‌گیری میزان برگشت‌پذیری بررسی شود. نتایج به این صورت است که در نمودار ۴، میزان برگشت‌پذیری در راستای X به‌ازای اعمال نیرو در جهت +X نشان داده شده است. به همین ترتیب، در نمودار ۵ میزان برگشت‌پذیری در راستای Y به‌ازای اعمال نیرو در جهت +Y و در نمودار ۶ میزان برگشت‌پذیری در راستای Z به‌ازای اعمال نیرو در جهت Z برای ربات نشان داده شده است.

مکانیزم ربات مورد مطالعه در این مقاله، دارای سه‌درجه آزادی مقید، برای دوران‌ها حول سه محور اصلی است. به این ترتیب، این دوران‌ها در هنگام بارگذاری باید صفر باشند. در این پژوهش، با استفاده از یک سنسور IMU که در قسمت قبل به‌طور کامل توضیح داده شده است؛ این ویژگی هنگام تست عملی مورد بررسی قرار داده شده است. این نتایج برای بارگذاری در جهت Z- از وضعیت اول ربات در نمودارهای ۹-۷ به‌ترتیب برای دوران حول محورهای اصلی X، Y و Z آورده شده است. این نمودارها برحسب زمان هستند که مدت‌زمان تست عملی را نشان می‌دهد.



نمودار (۴) نمودار نیرو- جابه‌جایی به‌منظور بررسی برگشت‌پذیری، به‌ازای نیرو در جهت +X و جابه‌جایی در جهت X



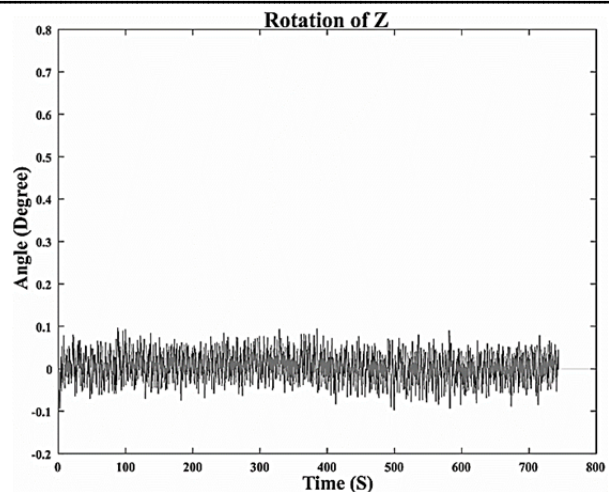
نمودار (۵) نمودار نیرو- جابه‌جایی به‌منظور بررسی برگشت‌پذیری، به‌ازای نیرو در جهت +Y و جابه‌جایی در جهت Y

قبل از اعمال بار است. با توجه به نمودارهای ۴-۶ که نمودارهای نیرو- جابه‌جایی، به‌منظور بررسی برگشت‌پذیری برای ربات هستند، می‌توان دقت برگشت‌پذیری ربات را مورد ارزیابی قرار داد. این نتایج به‌صورت عملی برای مرحله بارگذاری و باربرداری به‌صورت افزایشی و کاهش‌ی به دست آورده شده است. این نتایج برای اعمال بار در جهت $+X$ و میزان انحراف در راستای X در نمودار ۵ آورده شده و به همین ترتیب در نمودارهای ۵ و ۶ نتایج به‌ترتیب برای اعمال بار در جهت $+Y$ و $-Z$ و میزان انحراف در راستای Y و Z آورده شده است. با توجه به این نتایج می‌توان میزان دقت مکانیزم ربات را هنگامی که به مجری نهایی آن باری اعمال و سپس برداشته می‌شود، سنجید. طبق نتایج به‌دست‌آمده از تست عملی روی ربات مورد بررسی در این مقاله، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که پس از اعمال بار حداکثری در بیست مرحله که به‌صورت افزایشی اعمال شده و پس از بیست مرحله به‌طور کاهش‌ی، بار از روی مجری نهایی برداشته شده است، مجری نهایی با دقتی در حدود ۰.۱ میلی‌متر به موقعیت اول خود خواهد رسید.

همچنین با مقایسه نمودارهای دوران حول سه محور اصلی برحسب اعمال نیرو برای ربات که در نمودارهای ۹-۷ نشان داده شده و به‌ترتیب برای دوران حول X ، Y و Z است، می‌توان دریافت که حین اعمال نیرو به مجری نهایی در جهت $-Z$ ربات، این انحراف زاویه‌ها در حد صفر است. این امر به‌دلیل مقیدبودن کامل درجات آزادی دورانی، در ربات مورد مطالعه در این مقاله است که قابل انتظار بود. وجود لقی‌ها و عدم دقت در ساخت و مونتاژ از دلایل این اختلاف هستند که با توجه به این موارد می‌توان دریافت که ربات مورد مطالعه در این مقاله دارای دقت ساخت و مونتاژ مناسب است که باعث می‌شود لقی از بین رود و از این خطا جلوگیری به عمل آمده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله به مطالعه و ارزیابی رفتار سختی یک ربات موازی سهدرجه آزادی مستقل خطی پرداخته شده است. این ربات حاصل بهینه‌سازی سختی به‌منظور دستیابی به دقت نرمی زیر یک میلی‌متر به‌ازای حداکثر نیروی ۵۰ نیوتن و همچنین دقت برگشت‌پذیری مناسب بوده است که موجب استفاده از این ربات در کاربردهایی دقیق مانند چاپگرهای سه‌بعدی خواهد شد. بدین منظور و برای ارزیابی رفتار سختی، ابتدا با استفاده از روش آنالیز المان محدود، سختی مکانیزم ربات مدل‌سازی شده و با اعمال شرایط مرزی مورد نظر، میزان انحراف مجری نهایی در جهت‌های اصلی به دست آورده شده است. در ادامه و به‌منظور راستی‌آزمایی نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی سختی با استفاده از دستگاه نوینی که به‌منظور اندازه‌گیری میزان انحراف ربات به‌ازای اعمال بار به مجری نهایی طراحی و ساخته شده، با اعمال شرایط مرزی مشابه با مدل‌سازی، میزان انحراف مجری نهایی ربات در جهت‌های اصلی به دست آورده شده است. در نهایت با مقایسه نتایج به این نتیجه رسیده شده است که نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی و اندازه‌گیری عملی رفتار مشابهی داشته و اختلاف نتایج برای انحراف یا جابه‌جایی هم‌جهت با نیروی اعمالی به مجری نهایی، زیر ۰.۱ میلی‌متر بوده و برای هر دو نتیجه حداکثر میزان انحراف زیر ۰.۶ میلی‌متر است که صحت بهینه‌سازی در طراحی را نشان می‌دهد. همچنین با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری عملی، میزان دقت برگشت‌پذیری ربات، بررسی و نشان داده شد که این دقت در حدود صدم میلی‌متر است. در نهایت، با استفاده از نتایج



نمودار ۹) نمودار دوران مجری نهایی حول محور Z برحسب زمان برای نیرو در جهت $-Z$

۵-۱- مقایسه نتایج

ربات مورد مطالعه در این مقاله، حاصل بهینه‌سازی به‌منظور دستیابی به سختی مناسب برای رسیدن به یک سری از انتظارات و ملاحظات بوده که منجر به استفاده این ربات در کاربردهای مد نظر شده است. با توجه به کاربرد مورد انتظار از ربات، باید ملاحظات مکانیکی و طراحی خاصی را برای مکانیزم عملگرها و همچنین مواد اولیه در نظر گرفت تا مکانیزم ساخته‌شده، جابجایی آن کاربرد و عملیات باشد. با توجه به کاربردهای در نظر گرفته‌شده برای این ربات، حداکثر میزان تغییر شکل یا انحراف مکانیزم ربات برای حداکثر بار اعمالی به مجری نهایی که ۵۰ نیوتن بوده، زیر یک میلی‌متر در نظر گرفته شده است. به این صورت که با اعمال نیرو به میزان حداکثر ۵۰ نیوتن، میزان انحراف نباید بیشتر از یک میلی‌متر شود.

با توجه به نمودارهای ۳-۱ که به‌ترتیب نمودارهایی برحسب نیرو در جهت $+X$ و جابه‌جایی در جهت‌های X ، Y و Z هستند، مشاهده می‌شود که نتایج به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری عملی سختی، در مقایسه با نتایج مدل‌سازی سختی و تحلیل عددی برای ربات مورد مطالعه، رفتارهای یکسانی را از خود نشان می‌دهند. در نمودار ۱ میزان انحراف در راستای X مورد بررسی قرار گرفته است.

همان‌طور که از نتایج حاصل از مدل‌سازی و اندازه‌گیری عملی مشاهده می‌شود، داده‌های به‌دست‌آمده رفتار مشابهی داشته و میزان اختلاف آنها از هم زیر دهم میلی‌متر است و همچنین برای اعمال بار حداکثر به مجری نهایی، میزان انحراف در راستای X زیر ۰.۶ میلی‌متر بوده که انتظارات در نظر گرفته‌شده برای ربات مورد بررسی در این مقاله را برآورده کرده است. همچنین در نمودارهای ۲ و ۳ به‌ترتیب میزان انحراف در راستای Y و Z نشان داده شده است. با توجه به مکانیزم و قیود این ربات انتظار می‌رود که با اعمال نیرو در جهت $+X$ که عمود بر این راستاها است، انحرافی در حد صفر داشته باشیم. همان‌طور که از نتایج مدل‌سازی و اندازه‌گیری عملی مشخص بوده، میزان انحرافات در راستاهای Y و Z زیر ۰.۵ میلی‌متر است. همچنین نتایج حاصل از مدل‌سازی و اندازه‌گیری به‌صورت عملی دارای رفتار مکانیکی مشابهی است و اختلافی در حدود هزارم میلی‌متر دارند.

مقایسه دیگر نتایج برای ربات مورد مطالعه، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از تست عملی، میزان برگشت‌پذیری به وضعیت اولیه

- 13- Kenneth Salisbury J. Active stiffness control of a manipulator in cartesian coordinates. 1980 19th IEEE Conference on Decision and Control Including the Symposium on Adaptive Processes, 10-12 December, 1980, Albuquerque, New Mexico, USA. Piscataway: IEEE; 1980.
- 14- Gosselin C. Stiffness mapping for parallel manipulators. IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1990;6(3):377-382.
- 15- Gosselin C, Zhang D. Stiffness analysis of parallel mechanisms using a lumped model. International Journal of Robotics and Automation. 2002;17(1):17-27.
- 16- Zhang D. Kinetostatic analysis and optimization of parallel and hybrid architectures for machine tools [Dissertation]. Quebec City: Laval University; 2001.
- 17- Pigoski T, Griffis M, Duffy J. Stiffness mappings employing different frames of reference. Mechanism and Machine Theory. 1998;33(6):825-838.
- 18- Pashkevich A, Chablat D, Wenger P. Stiffness analysis of 3-dof overconstrained translational parallel manipulators. 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 19-23 May, 2008, Pasadena, California, USA. Piscataway: IEEE; 2008.
- 19- Hervé JM, Sparacino F. Structural synthesis of parallel robots generating spatial translation. 5th International Conference on Advanced Robotics, 19-22 June, 1991, Pise, Italy. Piscataway: IEEE; 1991.
- 20- Hervé JM. Design of parallel manipulators via the displacement group. In: Edizioni Unicopli. Proceedings of the 9th world congress on the theory of machines and mechanisms: Politecnico Di Milano, Italy, August 29/September 2, 1995, Proceedings. Milan: Edizioni Unicopli; 1995. pp. 2079-2082.
- 21- Frisoli A, Ceccacci D, Salsedo F, Bergamasco M. Synthesis by screw algebra of translating in-parallel actuated mechanisms. In: Lenarčič J, Stanišić MM, editors. Advances in robot kinematics. Dordrecht: Springer; 2000. pp. 433-440.
- 22- Kong X, Gosselin CM. 1. Generation of parallel manipulators with three translational degrees of freedom based on screw theory. Proceeding of 2001 CCToMM Symposium on Mechanisms, Machines and Mechatronics, June 2001, Saint-Hubert, Montreal. Quebec: CCToM; 2001.
- 23- Kong X, Gosselin CM. Type synthesis of input-output decoupled parallel manipulators. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering. 2004;28(2A):185-196.
- 24- Gosselin CM, Masouleh MT, Duchaine V, Richard PL, Foucault S, Kong X. Parallel mechanisms of the multipteron family: kinematic architectures and benchmarking. Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 10-14 April, 2007, Roma, Italy. Piscataway: IEEE; 2007.
- 25- Kong X, Gosselin CM. Kinematics and singularity analysis of a novel type of 3-CRR 3-DOF translational parallel manipulator. The International Journal of Robotics Research. 2002;21(9):791-798.
- 26- Gosselin CM, Kong X, Foucault S, Bonev IA. A fully decoupled 3-dof translational parallel mechanism. In: Neugebauer R, editor. Parallel kinematic machines in research and practice: The 4th chemnitz parallel kinematics seminar PKS 2004, April 20-21, 2004. Auerbach: Verlag Wissenschaftliche Scripten; 2004.

عملی، میزان مقیدبودن درجات آزادی مقید ارزیابی شد که دقت بالای ساخت و مونتاژ دقیق ربات را نشان داد.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

تأییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

تعارض منافع: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

سهم نویسندگان: حامد چلنگری جوییاری (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناسی/پژوهشگر اصلی (۳۳/۴٪)؛ مهدی طالع ماسوله (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۳۳/۳٪)؛ بهنام داداش‌زاده (نویسنده سوم)، پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۳۳/۳٪)

منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

منابع

- Merlet JP. Parallel robots. 2nd Edition. Berlin: Springer Science & Business Media; 2006.
- Paziani FT, Di Giacomo B, Tsunaki RH. Robot measuring form errors. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2009;25(1):168-177.
- Akin JE. Finite element analysis with error estimators: An introduction to the FEM and adaptive error analysis for engineering students. 1st Edition. Amsterdam: Elsevier; 2005.
- Ceccarelli M, Carbone G. A stiffness analysis for CaPaMan (Cassino parallel manipulator). Mechanism and Machine Theory. 2002;37(5):427-439.
- Rizk R, Fauroux JC, Mumteanu MG, Gogu G. A comparative stiffness analysis of a reconfigurable parallel machine with three or four degrees of mobility. Journal of Machine Engineering. 2006;6(2):45-55.
- Bouzgarrou BC, Fauroux JC, Gogu G, Heerah Y. Rigidity analysis of T3R1 parallel robot with uncoupled kinematics. Proceeding of the 35th International Symposium on Robotics (ISR), 23-26 March, 2004, Paris, France. Publisher City?: Publisher?: 2004.
- Long CS, Snyman JA, Groenwold AA. Optimal structural design of a planar parallel platform for machining. Applied Mathematical Modelling. 2003;27(8):581-609.
- El-Khasawneh BS, Ferreira PM. Computation of stiffness and stiffness bounds for parallel link manipulators. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1999;39(2):321-342.
- Corradini Ch, Fauroux JC, Krut S. Evaluation of a 4-degree of freedom parallel manipulator stiffness. Proceedings of the 11th World Congress in Mechanisms and Machine Science, 18-21 August, 2003, Tianjin, China. Unknown City: China Machinery Press; 2003.
- Martin HC. Introduction to matrix methods of structural analysis. New York: McGraw-Hill; 1966.
- Deblaise D, Hernot X, Maurine P. A systematic analytical method for PKM stiffness matrix calculation. Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 15-19 May, 2006, Orlando, Florida, USA. Piscataway: IEEE; 2006.
- Deblaise D. Contribution to the elasto-geometrical modeling and calibration of parallel manipulators [Dissertation]. Rennes: Institut national des sciences appliquées de Rennes; 2006. [French]