فصلنامه
مهندسی مکانیک و ارتعاشات
jvibme.semnaniau.ac.ir

امکان سنجی استفاده از ربات موازی 6RUS به عنوان کارگیر 6 درجه آزادی دستگاه سنگ محور به منظور سنگ زنی قطعات با ناهم محوری موازی و زاویه ای

سید مرتضی جوادی نصر آبادی[1*]، محرم حبیب نژاد کورایم[2]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکاترونیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران
2- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
* تهران صندوق پستی 1713936613 s.morteza.javadi@srbiau.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت:4 تیر 1397
پذیرش: 24 شهریور 1397
ارائه در سایت: 15 آبان 1397

کلید واژگان

نا هم محوری موازی
نا هم محوری زاویه ای
ماشین سنگ زنی
ربات موازی
اسپیندل
ساعت کردن قطعات

چکیده

تولید و سنگ زنی قطعات دوار با ناهم محوری موازی و زوایه‌ای یکی از موضوعات مورد بحث در زمینه مهندسی ساخت و تولید بوده و برای اتصال این نوع قطعات به دستگاه سنگ زنی نیازمند استفاده از سه نظام های خاص یا ساخت قید و فیکسچر است که کاری پیچیده و زمان بر است. در این پژوهش به بررسی امکان سنجی استفاده از ربات 6RUS به عنوان کارگیر شش درجه آزادی دستگاه سنگ محور پرداخته خواهد شد. این پژوهش شامل طراحی ربات 6RUS و بررسی سینماتیک معکوس و فضای کاری ربات خواهد بود و پس از آن به بررسی امکان سنجی استفاده از ربات به عنوان کارگیر شش درجه دستگاه سنگ محور پرداخته خواهد شد که تحلیل تنش کرنش و فرکانسی در نرم افزارهای المان محدود را شامل می‌شود.

The feasibility of using the 6RUS parallel robot as a 6-DOF chuck in Grinding machine for grinding parts with parallel and angular misalignment.

S. Morteza Javadi Nasr Abadi[1*], M.H. korayem[2]

1- Master student of Mechatronics, Islamic Azad University of Science and Research branch, Tehran, Iran
2- Professor, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 1713936613 Tehran, Iran, s.morteza.javadi@srbiau.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 25 JUNE 2018
Accepted: 15 September 2018
Available Online 6 August 2018

Keywords
Parallel misalignment
angular misalignment
grinding machine
parallel robot
spindle
centering parts

ABSTRACT

The production and grinding of rotating parts with parallel and angular misalignment is one of the topics issues in the field of Manufacturing engineering. To connect these types of parts to the grinding machine, it is necessary to use three jaw chuck or Jig & Fixtures that are complicated and Time-consuming. This study examines the feasibility of using the 6RUS parallel robot as a six-degree of freedom chuck in the grinding machine. This research will include the design of the 6RUS robot and the reverse kinematics and robot workspace, and then examine the feasibility of using the robot as a six-degree of freedom chuck, which will analyze strain and frequency stress in finite element software includes.

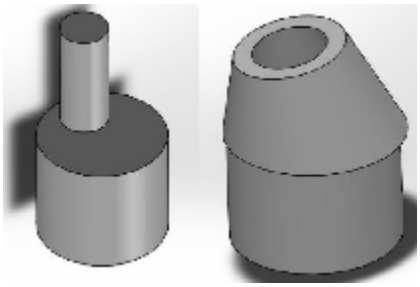
Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

S. Morteza Javadi, H.korayem, The feasibility of using the 6RUS parallel robot as a 6-DOF chuck in Grinding machine for grinding parts with parallel and angularly misalignment , *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 9, No. 3, pp. 23-33, 2018 (In Persian)

1- مقدمه

یکی از فرآیند های سنگ زنی که با دستگاه سنگ محور انجام می شود سنگ زنی قطعات نامرسوم است که سنگ زنی این قطعات جز به کمک کارگیرهایی خاص امکان پذیر نیست. این نوع قطعات عموما دارای یک ناهم محوری موازی یا زاویه ای هستند[1] که با اتصال آن به چهار نظام دستگاه سنگ دچار لنگی شده و سنگ زنی بر روی دستگاه سنگ را عملا غیرممکن می‌کند برای حل این مشکل در سنگ زنی این نوع قطعات، ساخت فیکسچر[2] خاص خود است که این کار در قطعات با تعداد محدود هزینه تمام شده را بالا می برد. همچنین استفاده از چهار نظام‌های مستقل هم یکی از روش های مرسوم در این زمینه است. اما این چهار نظام نمی‌تواند قطعاتی با ناهم محوری زاویه ای را در خود جای دهد. همچنین بستن قطعه به این نوع کارگیرها نیازمند ساعت کردن[3] قطعات است که خود نیازمند زمان نصب است. "شکل1" نمونه ای از قطعات با نا هم محوری موازی و زاویه ای است.



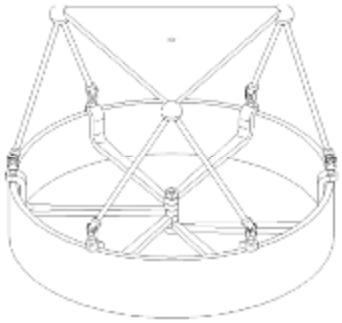
شکل 1: نمونه ای از قطعات با نا هم محوری زاویه ای(راست) و موازی(چپ)

برای سنگ زنی قطعات با نا هم محوری موازی و زاویه ای از تجهیزاتی همچون چهار نظام مستقل، ساخت فیکسچر استفاده می‌شود. همچنین باید گفت که قطعات با نا هم محوری زاویه ای را نمی‌توان به کمک تجهیزاتی همچون چهار نظام مستقل به محور دستگاه سنگ متصل کرد و این قطعات نیازمند ساخت فیکسچر خاص خود است.

در این پژوهش ایده استفاده از ربات موازی به عنوان کارگیر ماشین ابزارها مورد نقد و بررسی قرار گرفته است تا صحت عملکرد آن را به عنوان یک کارگیر هوشمند به اثبات برساند. بررسی ربات بر روی ماشین ابزارهایی است که در آن المان هایی همانند دور موتور[4] و نیروی براده برداری در آن قابل اغماض است.

ربات موازی شامل یک سیستم مکانیکی است که به وسیله زنجیره سریالی عملگر کنترلی به عضو نهایی متصل و آن را پشتیبانی می‌کند. معروف ترین ربات موازی را می‌توان به ربات گاف استوارت نام برد که از شش عملگر خطی بهره می‌برد [1] .

ربات 6RUS یک ربات 6 درجه آزادی است که به وسیله 6 عملگر دورانی که در انتهای اتصالات قرار دارد، حرکت می‌کند. با جابه‌جا شدن مفاصل نسبت به یکدیگر در یک مسیر مشخص دایره‌ای که بر روی صفحه ثابت قرار دارد، صفحه متحرک به 3 جهت کارتزینی و 3 جهت دورانی آزادی عمل داشته و توانایی حرکت دارد. 12 عدد مفصل 3 درجه آزادی بر روی دو صفحه ثابت و متحرک قرار دارد که اتصالاتی[5] با طول ثابت آنها را به هم متصل کرده است. عملگرهای[6] این ربات 6 عدد سروموتور گیربکس‌دار و ترمزدار است که در هنگام خاموش شدن سروموتور شفت را قفل می‌کند. "شکل2" شماتیک ربات 6RUS را نشان می‌دهد.

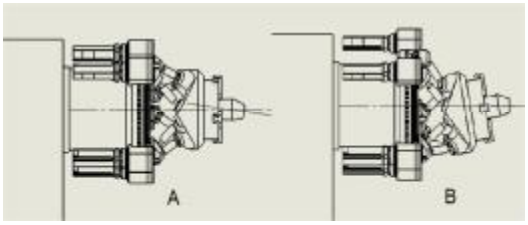


شکل 2 :شماتیک ربات6RUS **[2]**

در ناهم محوری زاویه ای ربات موازی با حرکت صفحه شناور خود در راستای دورانی مقدار این نا هم محوری را خنثی می‌کند و در هنگامی که قطعه ای با ناهم محوری موازی بر روی دستگاه سوار می‌شود، ربات با حرکت خود این نا هم محوری را خنثی می‌نماید. در بعضی از قطعات این ناهم محوری به صورت ترکیبی (ناهم محوری موازی و زاویه ای) است که ربات با حرکت در دو راستا این مشکل را بر طرف می نماید. باید توجه داشت که در

[1] Parallel & angular misalignment
[2] Fixture
[3] Dialing
[4]. Spindle
[5] link
[6] Actuators

هنگام نصب قطعات با ناهم محوری باید راستای حرکت ربات با راستای انحرافات قطعه کار در یک راستا است. اما این کار با دقت کافی انجام نخواهد شد. این مشکل به صورت مقدار کمی نا هم محوری در ساعت اندیکاتور خود را نشان خواهد داد که باید به کمک خود این اندیکاتور این مشکل را بر طرف کرد. "شکل3" عملکرد ربات موازی 6RUS در خنثی سازی نا هم محوری زاویه ای را نشان می‌دهد.

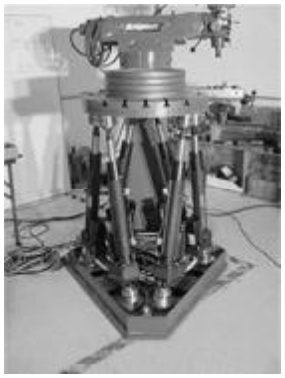


شکل 3: نا هم محوری زاویه‌ای قطعه کار(A) و رفع شدن آن توسط رباتB) 6RUS)

2- تحقیقات گذشته

در زمینه های اجرایی این دستگاه می‌توان استفاده از این دستگاه به عنوان کارگیر فرز های میکرو ماشین نام برد که ساخت شرکت ولیلمن ماکودل[1]است، در این طراحی از میز دلتا که شباهت زیادی به ربات های موازی دارد، به عنوان کارگیر استفاده شده است. این ربات به کمک 3 عدد بازو به میز متصل شده است که 5 حرکت مورد نیاز برای میز را فراهم می‌کند[3] .

نمونه دیگر در صنعت را می‌توان میز 6 محور ساخت شرکت مایکرولار[2] نام برد. این ماژول توانایی این را دارد که بتواند به یک فرز معمولی متصل شده و آن را به یک دستگاه فرز سی ان سی 5 محور تبدیل کند[4] . "شکل4"نمونه ای از ربات ساخت این شرکت را نشان می‌دهد.


شکل 4: ربات موازی هگزا پاد به عنوان کارگیر فرز 6 محور **[4]**

[1] willemin-macodel
[2] Mikrolar

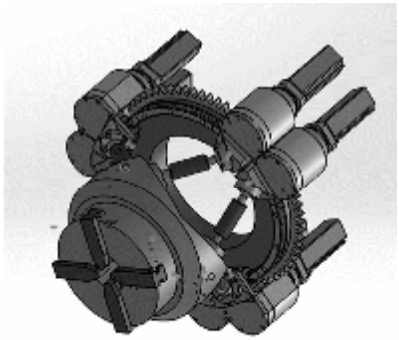
استفاده از مکانیزم استوات که به عنوان ابزارگیر دستگاه سنگ استفاده شده است که به نگارش وای پی لی [3]است که در مورد تئوری غیر تماسی با کارآمدی بالا در دستگاه سنگ منحنی است. در این سیستم CNC سنگ سنباده بر روی پلت فرم متحرک متصل می باشد که موتور به صورت مستقیم و بدون گیربکس است، حرکت موتور و پوزیشن گیری نیز به صورت حلقه باز است. در این مقاله قبل از هر چیز در مورد معایب سیستم های سنتی صحبت شده و پس از آن در مورد بدنه به صورت کامل توضیح می‌دهد و سر انجام در مورد نحوه درایو کردن موتور ها توضیح می‌دهد[5] . همچنین استفاده از ربات موازی سه پایه4 به عنوان کارگیر فرز 6 محور مورد بررسی تیان هونگ و دیوید جی وایت هاوس[5] قرار گرفت که به بررسی راه حل برای کاهش خطاهای دستگاه است[6] . تحقیقات دیگری به بررسی نوع دیگری از ربات های موازی با نام 6RUS می‌پردازد. مقاله‌ای با نگارش جانبی شریفی و بی شونکن [6]به بررسی ربات موازی دوار[7] می‌پردازد. این مقاله در ابتدا به معرفی ربات پرداخته و سپس به مدل سازی و آنالیز فضای کاری ربات می‌پردازد[7] . در بررسی دیگری علاوه بر بررسی سینماتیک معکوس[8]ربات به بررسی نقاط تکین ربات هم می‌پردازد، این مقاله توسط ایلین آ بونف و کلمنت ام گاسلین [9]نوشته شده است [8] . ایلین آ بونف به معرفی ربات 6RUS با تغییرات جدیدی در مفاصل پرداخته است و توانسته علاوه بر سینماتیک معکوس و فضای کاری، سینماتیک مستقیم این ربات را نیز بدست آورد. جاناتان کولمپ[10] و ایلین آ بونف به بررسی مکانیکی ربات، سینماتیک مستقیم و معکوس و فضای کاری ربات پرداخته است.[9]

3- تعریف ربات موازی و استفاده از آن به عنوان کارگیر دستگاه سنگ محور

ربات 6RUS[11] یک ربات 6 درجه آزادی است[1] که به جای استفاده از عملگر خطی از 6 عدد سروموتور گیربکس‌دار دورانی استفاده می‌کند که در یک راهنما[12]ی دایره ای در حال حرکت

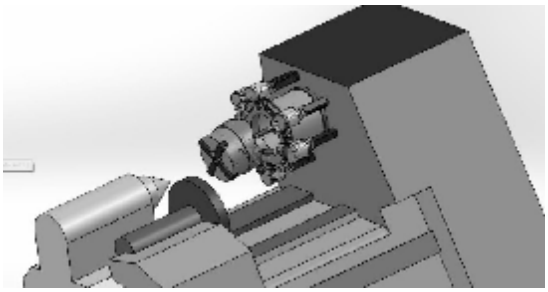
[3] Y.p.li
[4] .tripod
[5] Tan Huang, David J. Whitehouse
[6]. B. Shchokin
[7]. Rotary parallel manipulator
[8]. Inverse kinematic
[9]. Clement M. Gosselin
[10]. Jonathan Coulombe
[11] 6 Revelute Universal Spherical
[12]. guide

است و حرکت ربات به با دور و نزدیک شدن مفاصل نسبت به هم انجام می شود. حذف عملگرهای خطی باعث ساده تر شدن این ربات نسبت به مدل های مشابه شده است. به دلیل این که عملگرهای دورانی این دستگاه دیگر مابین مفاصل وجود ندارد، این نوع چیدمان باعث کاهش وزن بخش متحرک ربات نسبت به نمونه های قبل شده است. "شکل5" ربات 6RUS طراحی شده در نرم‌افزار SolidWorks را نشان می‌دهد. این طراحی با استفاده از قطعات استاندارد شامل چرخدنده‌های استوانه ای[1]، ریل و واگن [2]و مفاصل دورانی [3]ساچمه دار استفاده شده است که دارای با کمترین لقی در نوع خود است.



شکل 5: ربات 6RUS طراحی شده به عنوان کارگیر دستگاه سنگ محور

باید توجه داشت که سروموتور های این ربات باید دارای ترمز است و مقدار ترمز آن نسبت به عملگر های خطی موجود در ربات های معرفی شده بیشتر باشد. این موضوع به دلیل ضریب تبدیل کمتر این گیربکس نسبت به عملگر های خطی و نداشتن بال اسکرو در این نوع عملگر دورانی است. باید گفت که ربات های موازی استفاده شده به عنوان کارگیر دستگاه سنگ، در هنگام انجام کار در وضعیت خاموش است و ربات به وسیله ترمز های انتهای سروموتور قفل شده است و تنها در هنگام خنثی کردن نا هم محوری که آن هم در وضعیت خاموش بودن اسپیندل است در حال فعالیت است. "شکل6" نحوه قرار گیری ربات 6RUS بر روی شماتیک دستگاه سنگ را نشان می‌دهد.

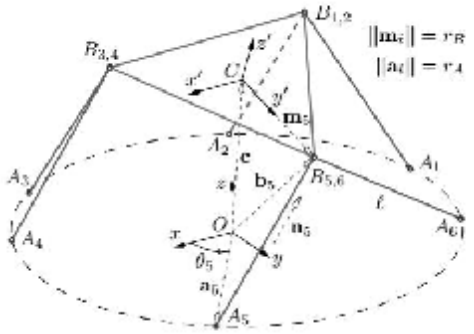


شکل 6: نصب ربات 6RUS بر روی دستگاه سنگ محور

4- بررسی سینماتیک معکوس ربات به صورت کارکتری و عددی

در این بخش سینماتیک معکوس ربات 6RUS به صورت کارکتری و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. دلیل پیدا کردن فضای کاری ربات 6RUS به کمک سینماتیک مستقیم ربات و در نرم افزار MATLAB به دلیل ساختار پیچیده و غیر خطی بودن بسیار پیچیده است[9] . بنابراین این کار با پیدا کردن سینماتیک معکوس و پیاده سازی آن در نرم افزار MATLAB انجام خواهد شد تا با دانستن طول مفاصل، شعاع صفحه ثابت و متحرک و محدوده زوایای حرکتی مفاصل، فضای کاری ربات در فضای دورانی و کارتزینی به دست خواهد آمد.

بر اساس "شکل7" ربات دارای 6 پایه با اندیس Ai (i=1,2.....6) است که نشان دهنده فاصله نقطه O تا مرکز مفاصل است، که به کمک لینک L به مفصل B_i متصل شده است. همچنین r_B که برابر مقدار نرم M_i می‌باشد برابر شعاع مرکز صفحه متحرک تا مرکز مفاصل می باشد. راستاهای کارتزینی XYZ برای صفحه ثابت و X'Y'Z' برای صفحه متحرک در نظر گرفته شده است و زاویه مفصل Bi نسبت به راستای X برابر مقدار θ_i می باشد. مفاصل Ai به کمک موتور در مسیری به شعاع r_A در حال چرخش است [8].



شکل 7 : شماتیک و نشانه گذاری ربات **[8]**

[1] Roller pinion
[2] Linear motion
[3] Spherical joint

مقدار حرکت صفحه ثابت به کمک ماتریس R نوشته خواهد شد که فاصله دو نقطه OC در "شکل 7"با این ماتریس نشان داده خواهد شد. در نهایت "معادله 1" به دست خواهد آمد.

$$ln_i = c = Rm_i' - a_i \quad (1)$$

که در آن c بردار موقعیت صفحه متحرک و m_i' برابر بردار فاصله CB_i و a_i برابر شعاع مفاصل پایین است. با محاسبه نرم[1] این معادله، "معادله 2" به دست می‌آید.

$$l^2 = (c + Rm_i' - a_i)^T(c + Rm_i' - a_i) \quad (2)$$

$$l^2 = \| b \|^2 + r_A^2 - 2b_i^T \quad (3)$$

که در مقدار b_i از "معادله 4" به دست می آید

$$\| b_i \| = l^2 - r_A^2 \quad (4)$$

رابطه بردار b_i را می‌تواند با کمک مقدار هایی که نشان دهنده راستاهای کارتزینی صفحه متحرک باشد نشان داد. "معادله 5" نشان دهنده این مقدار است که متناسب با P_i است.

$$\cos\theta_i x_{B_i} + \sin\theta_i y_{B_i} = \frac{\| b_i \|^2 + r_A^2 - l^2}{2r_A} \equiv p_i \quad (5)$$

که در نهایت "معادله 6، 7، 8"به عنوان معادله نهایی سینماتیک معکوس ربات شناخته شده است.

$$\theta_i = atan2(S_i \cdot C_i) \quad (6)$$

$$\sin\theta_i = \frac{p_i y_{B_i} + x_{B_i}\delta_i\sqrt{\Gamma_i}}{\rho_i} \quad (7)$$

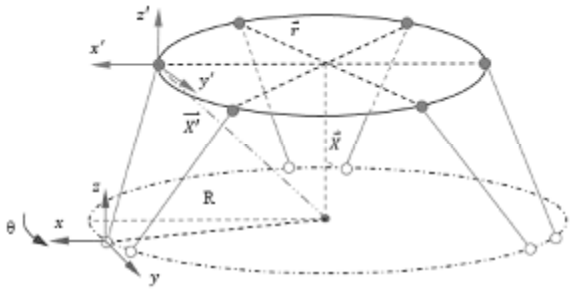
$$\cos\theta_i = \frac{p_i x_{B_i} + y_{B_i}\delta_i\sqrt{\Gamma_i}}{\rho_i} \quad (8)$$

مقدار Γ و ρ_i نیز از معادلات زیر به دست خواهد آمد [8].

$$x_{B_i}^2 + y_{B_i}^2 - p_i^2 \equiv \Gamma_i \geq 0 \quad (9)$$

$$\rho = x_{B_i}^2 + y_{B_i}^2 \quad (10)$$

در حل عددی سینماتیک معکوس، زوایای بین مفاصل ثابت در صفحه متحرک به صورت 30 درجه و90 درجه قرار داده شده است. در "شکل8"مرکز مختصات صفحه اینرسی برابر با O ، ماتریس $\vec{R}$ محل قرار گیری مفصل در صفحه اینرسی که با $[x \quad y \quad z]$ نشان داده شده و ماتریس $\vec{r}$، نیز محل قرار گیری مفصل در صفحه متحرک است که با $[x' \quad y' \quad z']$نشان داده می‌شود. مقادیر برداری $\vec{r}$ ثابت و مقادیر برداری $\vec{R}$ متغیر و جواب مسئله به عنوان سینماتیک معکوس است. $\vec{X}$ نیز ماتریس مختصات مرکز صفحه متحرک است. همچنین مقدار طول مفصل ثابت و با L نمایش داده می‌شود.



شکل 8: مختصات و نماد گذاری ربات 6RUS در سینماتیک معکوس

طول L مقداری ثابت است و به کمک آن "معادله 11"حاصل می‌شود.

$$L = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + (z' - z)^2} \quad (11)$$

همچنین به کمک مختصات قرار گیری مفاصل در صفحه اینرسی، به "معادله15 " به دست آمده است.

$$x = Rcos\theta \quad (12)$$

$$y = Rsin\theta \quad (13)$$

$$z=0 \quad (14)$$

$$x^2 + y^2 = R^2 \quad (15)$$

مقادیر x' و y' در "معادله11" مقادیر ثابت است و مقدار z و z' نیز برابر صفر است. به کمک دو معادله و دو مجهول به روش کرامر در نرم افزار MATLAB حل می‌شود. معادله دیگر برای حل سینماتیک معکوس استفاده از ماتریس انتقال است که به صورت معادله زیر بیان می‌شود. ماتریس انتقال در "معادله19" نشان داده شده است.

$$A\vec{X} + \vec{r} = \vec{X}' \quad (16)$$

که در این معادله A ماتریس انتقال است.

$$A^{-1}AX + A^{-1}r = A^{-1}\vec{X}' \quad (17)$$

$$X + A^{-1}r = A^{-1}\vec{X}' \quad (18)$$

"معادله 16" در A^{-1} ضرب شده است و با در نظر گرفتن این که A^{-1} A= 1 خواهد بود در نتیجه به "معادله 18"خواهد رسید. با وارد کردن "معادلات 11، 15" و حل دو معادله و دو مجهول و استفاده از "معادله 18 " در نرم افزار MATLAB فضای کاری ربات به دست خواهد آمد.

[1] Norm

(19)

$$\begin{bmatrix} \cos\beta\cos\gamma & \cos\gamma\sin\alpha\sin\beta-\cos\alpha\sin\gamma & \cos\alpha\sin\beta\cos\gamma+\sin\alpha\sin\beta \\ \cos\beta\sin\gamma & \cos\gamma\cos\alpha+\sin\gamma\sin\alpha\sin\beta & \sin\gamma\cos\alpha\sin\beta-\cos\gamma\sin\alpha \\ -\sin\beta & \cos\beta\sin\alpha & \cos\beta\cos\alpha \end{bmatrix}$$

شکل 9:ماتریس انتقال

5- محاسبه فضای کاری ربات

پس از بررسی سینماتیک معکوس ربات و کد نویسی آن، خروجی سینماتیک معکوس ربات دارای نکاتی است که شامل دو بخش زیر است.

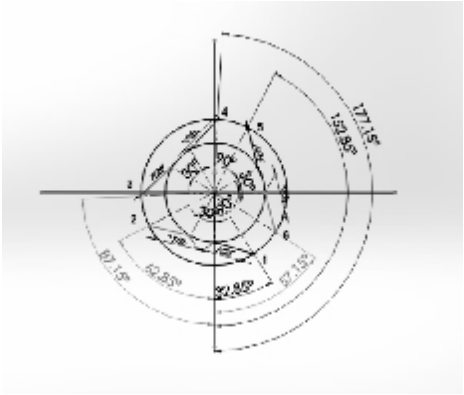
1- وجود دو جواب برای موقعیت هر کدام از مفاصل
2- وجود نقاط تکین[1]

که برطرف کردن آن در دو بخش توضیح داده شده است.

5-1- پیدا کردن جواب صحیح خروجی سینماتیک و به کمک نرم افزار SolidWorks

خروجی سینماتیک معکوس ربات که به کمک کد نویسی atan2d اجرا و تحلیل شده است که دارای دو جواب در صفحه ثابت، برای هر کدام از مفاصل است که بدون شک یکی از خروجی های مفاصل جواب درست است که تشخیص این جواب به کمک نرم افزار SolidWorks انجام شده است.

با دانستن ابعاد ربات که در نرم افزار MATLAB وارد شده بود این ربات را در نرم افزار SolidWorks و در بخش 3D Sketch شبیه سازی شد. "شکل 10" ربات را در ابعاد واقعی خود از نمای بالا و محل قرار گیری مفاصل را به دقت خوبی نشان می‌دهد.



شکل 10: شبیه سازی ربات در نرم افزارSolidWorks

محل قرار گیری هر کدام از مفاصل به کمک نرم افزار SolidWorks به دست آمده است که با خروجی نرم افزار MATLAB نزدیک است. حال برای تفکیک کردن خروجی های فضای کاری با کد atan2d از هم در خروجی سینماتیک معکوس، باید تا کورس حرکتی هر کدام از مفاصل با لحاظ کردن محل درست هر کدام از مفاصل در نرم افزار SolidWorks پیدا شود. بدون شک در کورس حرکتی هر کدام از مفاصل تنها خروجی درست قرار خواهد داشت و خروجی نادرست خارج خواهد شد. "جدول1" خروجی دو نرم افزار MATLAB و SolidWorks را در نقطه صفر ربات نشان می‌دهد.

جدول 1: مقایسه خروجی نرم افزارSolidWorks و MATLAB

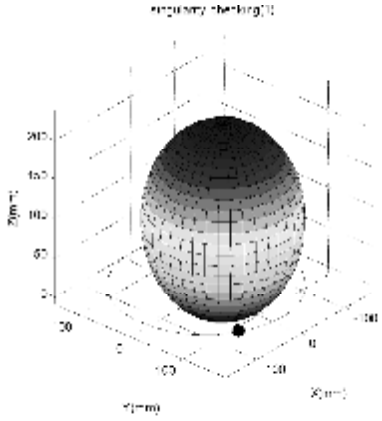
MATLAB output -2	MATLAB output -1	SLD output	Joint angle	joint
32,85	-32,85	-32,7	0	1
62,85	-2,85	62,7	30	2
87,14	152,85	87,15	120	3
177,14	-177,15	-177,2	150	4
87,14	-152,85	-152,88	240	5
-57,15	-122,85	-57,15	270	6

برای بررسی کورس ربات از دوران در راستای حرکتی Yaw مورد بررسی قرار گرفته است که سینماتیک آن در نرم افزار MATLAB انجام شده است تا به کمک آن کورس مفاصل دورانی ربات مشخص شود. این مقدار برای هر کدام از مفاصل برابر 40 درجه است که در نرم افزار SolidWorks استخراج شده است. بدون شک در این بازه حرکتی که برای هر کدام از مفاصل در نظر گرفته شده است، جواب دوم atan2d در آن جای نخواهد داشت و با اضافه کردن این شرط به کد نویسی نرم افزار MATLAB به صورت خودکار جواب ناصحیح حذف خواهد شد.

5-2- وجود نقاط تکین

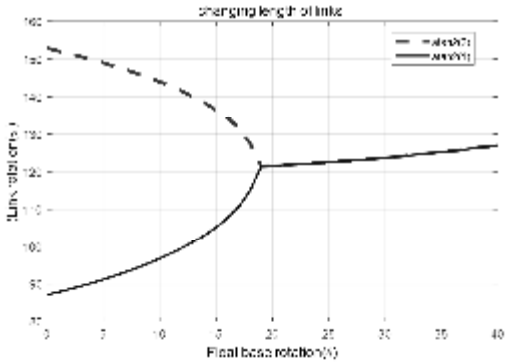
نقاط تکین موجود در خروجی سینماتیک معکوس به نقطه ای گویند که برای آن هیچ عنصر ریاضی تعریف نشده باشد. این نقطه در سینماتیک معکوس بدین صورت است که یا جواب ندارد و یا بینهایت جواب دارد. این خروجی در نرم‌افزار MATLAB به صورت "شکل11" نشان داده می‌شود.

[1] Singularity



شکل 11: نمونه ای از نقطه تکین یکی از مفاصل

نقاط تکین در مفاصل به گونه ای است که دو جواب بر روی هم منطبق می‌شود و جواب هر دو یکی می‌شود. "شکل12" نمونه ای از حرکت مفصل را نشان می‌دهد که تحت اثر حرکت صفحه متحرک در راستای دورانی Yaw قرار گرفته است.



شکل 12: حرکت مفصل در حرکت دورانی Pitch

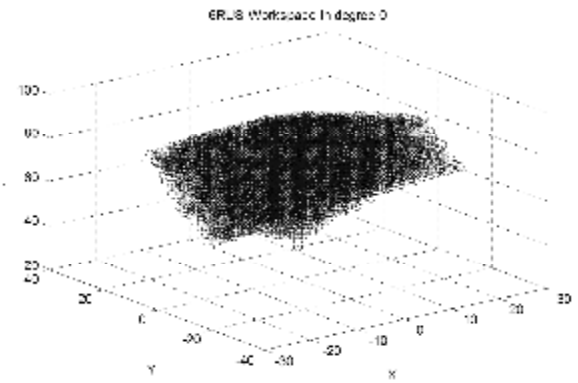
در شکل مشاهده می‌شود که نقاط پس از عبور از دوران 18 درجه بر روی هم منطبق می‌شوند و از این زاویه به بعد مفصل وارد بخش تکین می‌شود. برای تفکیک نقاط جواب از نقاط تکین می‌توان شرط تفاضل جواب ها را در نظر گرفت به صورتی که اگر قدر مطلق تفاضل دو جواب برابر صفر شد آنگاه مفصل وارد نقطه تکین شده و از استفاده از این جواب برای فضای کاری صرف نظر می‌شود.

3-5- فضای کاری ربات 6RUS

پس از رسیدن به جواب صحیح از خروجی سینماتیک معکوس و فیلتر کردن نقاط تکین از نقاط داری جواب، فضای کاری ربات 6RUS به دست خواهد آمد. شرط صادق بودن فضای کاری ربات در یک نقطه وجود جواب در تمامی 6 مفصل ربات است. به معنای دیگر، فضای کاری ربات در یک نقطه در فضا زمانی صادق است که تمامی مفاصل در آن نقطه دارای جواب باشد. این شرط می‌تواند به کد نویسی فضای کاری ربات اعمال شود.

خروجی فضای کاری ربات در 4 درجه آزادی انجام شده است. دلیل بررسی در چهار درجه آزادی برای این ربات به این دلیل است که به دست آوردن فضای کاری ربات در این پژوهش در چهار درجه آزادی انجام می‌شود. این جهت ها شامل 3 جهت کارتزینی و یک جهت دورانی Pitch است و در دو راستای دورانی Roll وYaw تحلیل انجام نمی‌گیرد. دلیل انجام این کار در راستای Yaw به دلیل بی نهایت بودن این حرکت در این راستا است که خاصیت ربات6RUS به شمار می‌آید. همچنین به دلیل این که ماهیت طراحی این ربات به عنوان کارگیر دستگاه سنگ و به عنوان خنثی کننده نا هم محوری موازی و زاویه ای است، پس حرکت ربات در راستای دورانی Pitch وRoll تفاوتی ندارد و می‌توان یکی از این دو راستا را مورد بررسی قرار داد. به طور کلی در نرم افزار MATLAB مقدار 1392000 نقطه[1] در فضای کاری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

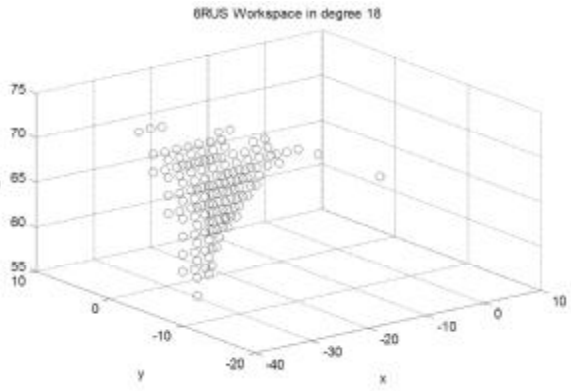
فضای کاری نشان داده شده در یک فضای XYZ نشان داده می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که برای هر کدام از زوایای دورانی در راستای Pitch یک فضای کاری جداگانه خواهد داشت. "شکل 13" فضای کاری ربات در زاویه صفر را نشان می‌دهد.



شکل 13: فضای کاری ربات در زاویه صفر

به دلیل کاهش کورس هر کدام از مفاصل، فضای کاری ربات با افزایش زاویه کاهش پیدا می‌کند. "شکل 14" فضای کاری ربات در زاویه 18 درجه را نشان می‌دهد.

[1]. Node



شکل 14: فضای کاری ربات در زاویه 18 درجه

به دلیل این که ربات توانایی حرکت به تمامی نقاط به دست آمده در تمامی فضای کاری را دارد پس فضای کاری ربات برابر با اشتراک تمامی نقاط به دست آمده است. باید توجه داشت که که رسیدن به بعضی نقاط نیازمند این است که ربات با حرکت در مسیر غیر مستقیم به نقطه نهایی برسد و حتی نتواند به صورت مستقیم به نقطه مورد نظر برود چون احتمال می‌رود که ربات وارد نقطه تکین شود.

6- امکان سنجی ربات

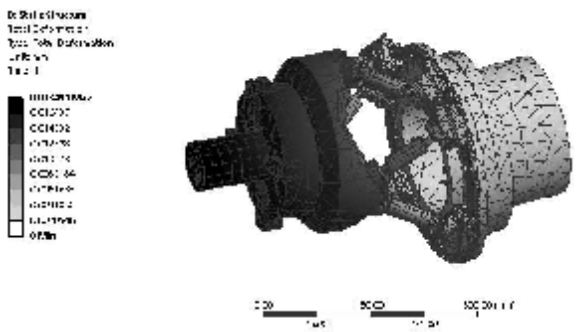
در این پژوهش، ربات 6RUS به عنوان کارگیر دستگاه سنگ محور مورد بررسی قرار گرفته است تا پس از طراحی و بررسی سینماتیک معکوس آن، به بررسی امکان سنجی استفاده از این ربات به عنوان کارگیر قرار می‌گیرد. این امکان سنجی شامل تحلیل کرنش ربات و تحلیل ارتعاشی ربات در نرم‌افزارهای المان محدود است که با اثبات این تحلیل، این امکان سنجی به واقعیت نزدیک تر خواهد شد.

6-1- تحلیل استاتیک:

ناهم محوری موازی و زاویه ای در ربات 6RUS زمانی به وجود می آید که قطعه‌ای با ناهم محوری موازی یا زاویه‌ای که نیاز به سنگ زنی داشته باشد بر روی ربات شروع به دوران کند. ربات بر اساس مقدار زاویه نا هم محوری که به صورت پیش فرض و یا به کمک سیستم های اندازه گیری مانند شماره گیر شاخص به دست آمده و این مقدار به صورت بلعکس به ربات داده خواهد شد.

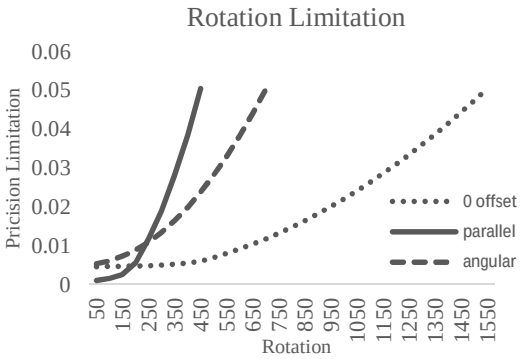
از نظر دینامیکی این کار باعث می‌شود که مرکز جرم ربات از محور دوران خارج شده و باعث ایجاد شتاب دورانی از مرکز جرم و به طبع آن لنگی می‌شود. این لنگی باعث ایجاد کرنش در ربات و خارج شدن ربات از دقت خود و همچنین تنش در نقاط طراحی ربات می‌شود. بهترین راه حل برای این چالش طراحی رباتی با صلبیت بالا و کوچک است. این طراحی کوچک خود تمامی حرکات در 6 درجه آزادی را فراهم آورده و نا هم محوری های موازی و دورانی را جبران می‌نماید. این تحلیل یک تحلیل کرنشی در نرم افزار ANSYS است که مقدار کرنش ربات در دورهای مختلف و در بیشترین ناهم محوری‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. دلیل انجام این تحلیل پیدا کردن محدودیت دور برای دستگاه، در ناهم محوری‌های مختلف است تا دقت دستگاه از دقت سنگ زنی یعنی 0,02 میلی‌متر و در نهایت 0,05 میلی‌متر فراتر نرود و همچنین بررسی صحت عملی بودن این ایده را نشان می‌دهد.

انتخاب ربات 6RUS به عنوان ربات 6 محور برای هم محور کردن قطعات در دستگاه سنگ به خاطر صلبیت و کوچک بودن ربات انتخاب شده است اما این کار باعث جابه‌جایی مرکز جرم و خارج شدن آن از مرکز دوران شود. این کار باعث ایجاد یک شتاب گریز از مرکز در ربات شده که باعث ایجاد کرنش در ربات می‌شود و محل قطعه کار را در محل خود جا به جا می‌کند. این مقدار کرنش تا حدی که در محدوده دقت دستگاه سنگ قرار بگیرد مجاز است. در غیر این صورت این مقدار از دقت دستگاه سنگ خارج می شود. برای جلوگیری از این کار و با دانستن این که کرنش ربات یک رفتار ذاتی است، باید تا در مقدار ناهم محوری‌های مختلف، محدوده دور برای ربات تعیین کرد تا از این محدوده خارج نشود. تحلیلی که برای این ربات در نرم افزار ANSYS انجام می‌شود بررسی 3 نقطه از ربات در این نرم افزار است. این نقاط شامل حرکت بدون نا هم محوری، انتهای کورس ناهم محوری موازی(39 میلی متر) نا هم محوری زاویه ای(19 درجه) است. "شکل15" خروجی کرنش ربات در وضعیت ناهم محوری موازی در نرم‌افزار المان محدود را نشان می‌دهد.


شکل 15: خروجی کرنش ربات در نرم افزار ANSYS

برای تحلیل این مدل در نرم افزار ANSYS باید این طراحی را ساده سازی کرد و قطعات اضافی که در تحلیل تاثیری ندارند را حذف کرد. در فرآیند ساده سازی باید توجه شود که وزن و ممان اینرسی مدل دچار تغییر نشود. این مدل همراه با قطعه کار به صورت پیش فرض برابر 3 کیلوگرم است و برابر گرده ای به قطر 70 میلی متر و طول 100 میلی متر ساخته شده و بر روی قطعه کار نصب شده است.

نمودار "شکل16" محدودیت دور ربات در وضعیت صفر، حد اکثر ناهم محوری موازی و زاویه ای از نرم افزار ANSYS استخراج شده است که هر کدام محدودیت ربات در دقت سنگ زنی 0,02 میلی متر و 0,05 میلی متر را نشان می‌دهد.این ربات نشان می‌دهد ربات در حداکثر نا هم محوری موازی برای رسیدن به دقت سنگ زنی 0,02 میلی متر محدودیت دور اسپیندل آن برابر 450 دور بر دقیقه و برای دقت 0,05 میلی متر برابر 650 دور بر دقیقه است.



شکل 16: نمودار تغییر کرنش ربات در نا هم محوری های متفاوت

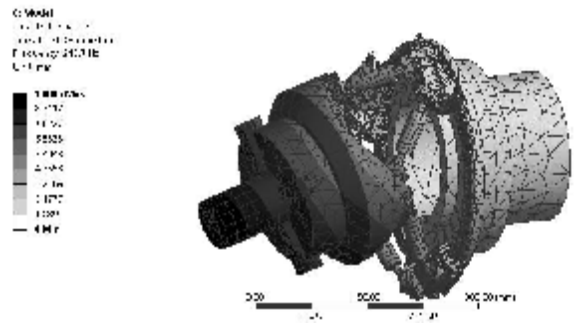
این نوع محدودیت دور در بازه کاری دستگاه سنگ زنی سنگ محور قرار دارد و اسپیندل دوران دهنده قطعه کار دارای در این محدوده توانایی کار کردن را دارد.

6-2-تحلیل ارتعاشات:

در این بخش به بررسی فرکانس طبیعی و تشدید ربات[1] 6RUS پرداخته می‌شود. فرکانس تشدید در رباتی با دقت بالا و منابع فرکانسی متعدد اهمیت بررسی ربات را دو چندان می‌کند. تشدید عبارت است از تمایل سیستم به نوسان با بیشینه دامنه در فرکانس‌هایی خاص که به آنها فرکانس رزونانس و یا فرکانس تشدید گویند. ایجاد فرکانس تشدید در ربات باعث کاهش دقت دستگاه، آسیب رسیدن به تجهیزات دقیق و یا حتی شکست قطعات شود [10]. این موضوع باعث شد تا به بررسی ارتعاشات ربات در دورهای مختلف پرداخته شود تا دورهایی که به فرکانس تشدید وارد می‌شود تفکیک شود تا در هنگام کار ربات، از کار در دورهای مورد نظر پرهیز شود. تحلیل ارتعاشات ربات در نرم افزار ANSYS و در بخش آنالیز مودال[2] انجام شده است.

در دو دهه گذشته، آنالیز مودال به دانشی فراگیر با هدف تعیین، بهبود و بهینه‌سازی مشخصات دینامیکی سازه های مهندسی تبدیل شده است. آنالیز مودال، فرآیند تعیین خواص ذاتی دینامیکی یک سیستم در قالب فرکانس های طبیعی، ضرایب میرایی و شکل حالت‌ها و به کارگیری آنها به منظور ایجاد مدلی ریاضی از رفتار دینامیکی سیستم است. این مدل ریاضی به مدل مودال سیستم و اطلاعات مربوط به مشخصات آن، داده های مودال نامیده می‌شوند. آنالیز مودال، هر دو مبحث تئوری و تجربی را در بر می‌گیرد. آنالیز مودال تئوری، بر اساس یک مدل فیزیکی از سیستمی دینامیکی شامل خواص جرمی، سختی و میرایی است. به کمک تحلیل اجزای محدود مدرن می‌توان تقریباً هر سازه دینامیکی خطی را گسسته سازی کرد و در نتیجه به طور قابل ملاحظه‌ای قابلیت و میدان کاری آنالیز مودال تئوریک افزایش یافته است[28] .

تحلیل ارتعاشاتی ربات در نرم افزار المان محدود ANSYS انجام می‌شود. این تحلیل به عنوان یک آنالیز مودال بر روی ربات انجام می‌شود که در 6 حالت3 مورد بررسی قرار گرفته است. هر کدام از حالت‌ها نشان دهنده این است که ربات در چه فرکانسی و در چه جهتی شروع به ارتعاش می‌کند و مقدار فرکانس تشدید و مقدار کرنش آن در این فرکانس چه مقدار است. "شکل17" نمونه ای از فرکانش تشدید ربات در وضعیت نا هم محوری زاویه ای را نشان می‌دهد.



شکل 17: تحلیل فرکانسی ربات در نرم افزار المان محدود ANSYS

[1]. Resonance

[2]. modal

[3]. mode

به طور کلی این سه تحلیل نشان می‌دهد که بازه فرکانس تشدید ربات بسیار بالاتر از بازه کاری ربات در وضعیت صفر و تمامی نا هم محوری‌ها است. بازه فرکانسی ربات در بیشترین حالت و در وضعیت بدون ناهم محوری برابر 2000 دور بر دقیقه است اما بازه فرکانس تشدید ربات در بازه فرکانسی 190 تا760 هرتز است که معادل 11000 تا 62000 دور بر دقیقه قرار دارد.

7 – جمع بندی و نتیجه گیری

ربات 6RUS به عنوان یک ربات موازی محسوب می‌شود که اخیرا به عنوان یک ربات جدید در دنیا معرفی و وارد بخش صنعت و تحقیقات شده است. این ربات دارای مزایا و معایب خاص خود است که از مزایا آن می‌توان به دقت، صلبیت، داشتن تمامی درجات آزادی و ساختار ساده تر (نسبت به ربات‌های موازی با عملگر های خطی) است. از معایب این ربات می‌توان به کورس کم و کنترلر پیچیده نام برد. توانایی این ربات در حرکت در 6 درجه آزادی و صلبیت آن باعث شد تا به عنوان کارگیر دستگاه سنگ محور مورد استفاده قرار گیرد. این ایده به شامل نصب ربات 6RUS ما بین اسپیندل و سه نظام است که می‌توان به کمک ربات مقدار ناهم محوری‌های موازی و زاویه ای را بر طرف کرد. حرکت ربات در 6 درجه آزادی این امکان را می‌دهد که سه نظام دستگاه سنگ محور به هر جهت حرکت کرده و این نا هم محوری را بر طرف سازد. به طور کلی در این پژوهش به بررسی ربات از جهت ساختار پرداخته و در مورد امکان سنجی این ربات برای استفاده به عنوان کارگیر دستگاه سنگ مورد بررسی قرار گرفت.

ساختار ربات در این پایان نامه به طراحی ربات 6RUS پرداخته شده است. . این طراحی در نرم افزار SolidWorks و با استفاده از تمامی قطعات و تجهیزات مورد استفاده در ربات های موازی با دقت های بالا از جمله مفاصل، گایدهای حرکتی، گیربکس و... بود، همچنین طراحی عملگر خطی برای ربات نیز با رعایت تمامی نکات طراحی و ساخت انجام شد تا وزن، مرکز جرم و ممان اینرسی ربات به دقت استخراج شود.

پس از آن به بررسی سینماتیک معکوس ربات پرداخته شده است تا به یررسی نقاط تکین و محل واقعی مفاصل دست یافت تا در نهایت فضای کاری ربات به دست آید. پس از بررسی ربات از جهت ساختاری، امکان سنجی استفاده ربات به عنوان کارگیر دستگاه سنگ مورد بررسی قرار گرفت. اولین کار در این زمینه بررسی تنش کرنش ربات بود. نا هم محوری زاویه ای و دورانی به وجود آمده برای ربات باید با ربات 6RUS بر طرف شود اما این کار باعث ایجاد لنگی برای ربات می‌شود. این لنگی خود را به صورت تنش و کرنش نشان می‌دهد. با این حال که ربات دچار کرنش می‌شود، نباید دقت کرنش دستگاه از 0,02 میلی متر و در نهایت تا 0,05 میلی متر کاهش یابد. این موضوع اهمیت استفاده از ربات موازی به عنوان یک ربات با صلبیت بالا را دو چندان می‌کند. با بررسی ربات در نرم افزار ANSYS در دو بخش تنش و کرنش نشان می‌دهد که ربات در بیشترین وضعیت نا هم محوری زاویه ای برابر 400 تا 700 و در نا هم محوری موازی برابر 300 تا 450 است.

بررسی بعدی که برای اماکن سنجی ربات انجام شد، تحلیل فرکانسی ربات بود. فرکانس تشدید ربات فرکانسی است که ربات در آن وارد طبیعی سیستم می شود که این فرکانس دچار اصطحلاک قطعات ، کاهش دقت و حتی شکست قطعات ربات شود. این تحلیل به طور کلی بر روی تمامی ماشین آلات انجام می‌شود تا فرکانس تشدید ربات تشخیص داده و ربات از رسیدن به آن دوری کند. در بررسی ربات 6RUS دور کاری ربات (که در فصل قبل این محدودیت برای ربات تعیین شد) از دور فرکانس تشدید ربات بسیار دور است و این صحه دیگری است بر استفاده ربات به عنوان کارگیر دستگاه سنگ محور.

در نهایت با بررسی و امکان سنجی ربات در فصل های مختلف این پایان نامه می‌توان به این نتیجه رسید که ربات می‌توان از این ربات به عنوان کارگیر دستگاه سنگ مورد استفاده قرار داد.

به طور کلی نتایجی که در این پژوهش انجام شد شامل موارد زیر است:

- صلبیت: صلبیت ربات 6RUS به کمک نرم افزار های المان محدود مورد بررسی قرار گرفت که نشان داد که ربات دارای صلبیت بالا و لقی کمی است
- درجات آزادی کافی : ربات 6RUS به عنوان یک ربات ماژولار و دارای 6 درجه آزادی می‌تواند به عنوان یک ربات کاربردی برای کارگیر 6 محور استفاده شود.

7- مراجع

[1] *Gao, Feng, et al. "New kinematic structures for 2-, 3-, 4-, and 5-DOF parallel manipulator designs." Mechanism and machine theory 37.11 (2002): 1395-1411*

[2] *Bonev, Ilian Alexandrov. Geometric analysis of parallel mechanisms. Canada: Université Laval, 2002..*

[3] *"willemin-macodel," machine producing company, [Online]. Available: http://www.willemin-macodel.com.*

[4] *"manufacturing corporation," robot, [Online]. Available: http://www.mikrolar.com.*

[5] *Li, Y. P. "Theoretical study on a non-transmission high efficient parallel camber grinding machine." Journal of materials processing technology 129.1-3 (2002): 551-554.*

[6] *Huang, Tian, and David J. Whitehouse. "A simple yet effective approach for error compensation of a tripod-based parallel kinematic machine." CIRP Annals-Manufacturing Technology 49.1 (2000): 285-288*

[7] *B. S. F. Janabi-Sharifi, "A Rotary Parallel Manipulator: Modeling and Workspace Analysis," in InternaUonaI Conference on Robotics L Autorndion, Now Orleans. LA, 2004.*

[8] *Bonev, Ilian A., and Clément M. Gosselin. "Geometric algorithms for the computation of the constant-orientation workspace and singularity surfaces of a special 6-RUS parallel manipulator." ASME 2002 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2002*

[9] *Coulombe, Jonathan, and Ilian A. Bonev. "A new rotary hexapod for micropositioning." Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on. IEEE, 2013.*

[10] *Fu, Zhi-Fang, and Jimin He. Modal analysis. Butterworth-Heinemann, 2001*

.