



اندازه‌گیری و مدل‌سازی خطاهای هندسی میز دورانی در فرز CNC چهارمحور

حمید نوروزی داینی¹، بهنام معتکف ایمانی^{2*}

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

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

* مشهد، صندوق پستی 9177948944-1111، imani@um.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

جبران خطا بصورت نرم‌افزاری در ماشین ابزارهای CNC یک راه حل مؤثر و کم هزینه برای افزایش دقت ماشین کاری می‌باشد. در تحقیق پیش رو، هدف اصلی توسعه یک روش اندازه‌گیری، مدل‌سازی و جبران خطاهای هندسی برای میز دورانی ماشین ابزار CNC چهارمحور بر پایه روش ماتریس انتقال همگن (HTM) است. پس از طراحی مدل پارامتریک خطا، داده‌های عملی از آزمایش‌های بدست آمده و برای تخمین پارامترهای مجهول مدل خطا استفاده می‌شوند. بدین ترتیب آزمایش‌های داده برداری با استفاده از مکانیزم اندازه‌گیری BallBar طبق استاندارد ISO 230-7 در نقاط مختلف فضای کاری ماشین ابزار چهارمحور انجام می‌شود. مکانیزم BallBar انحراف‌های حرکتی ابزار در یک مسیر دایره‌ای شعاع ثابت در جهات مختلف اندازه‌گیری می‌کند. جایگذاری داده‌های آزمایش در مدل خطای پیشنهادی و استفاده از روابط ماتریسی و محاسباتی منجر به تکمیل فرایند مدل‌سازی خطا می‌شود. در نهایت خطاهای هندسی در زوایای مختلف میز دورانی از مدل خطا استخراج و در نمودارهای مشخصی رسم می‌شوند. از جمله دستاوردهای نوآورانه این پژوهش، ارائه یک مدل خطای جدید و روش صحت‌سنجی مدل خطا جهت بررسی میزان تطابق نتایج خطاهای اندازه‌گیری عملی و تئوری می‌باشد. جبران‌سازی مسیر حرکت ابزار بر پایه روش صحت‌سنجی انجام گرفته و دقت حرکت تا حد زیادی بهبود می‌یابد. بعلاوه روش جبران خطای نصب تجهیزات و نحوه حرکت مکانیزم BallBar روی ماشین ابزار چهارمحور ارائه شده در این پژوهش، باعث افزایش صحت و دقت نتایج اندازه‌گیری می‌شود.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 12 بهمن 1397
پذیرش: 15 فروردین 1398
ارائه در سایت: آذر 1398

کلیدواژگان:

مکانیزم BallBar
فرز CNC چهارمحور
ماتریس انتقال همگن
خطاهای هندسی
اندازه‌گیری خطا

Measurement and Modeling of Rotary Table geometric errors in CNC 4-axis Machine Tool

Hamid Nowruzi Daeni, Behnam Moetakef-Imani*

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

* P.O.B. 9177948944-1111, Mashhad, Iran, imani@um.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 1 February 2019
Accepted 4 April 2019
Available November 2019

Keywords:

BallBar Mechanism
CNC Four-axis Milling
Homogeneous Transformation Matrix (HTM)
Geometric Errors
Error Measurement

Abstract

Error compensation using software methods is an effective and low-cost solution for increasing machining accuracy in CNC machine tools. In current research, the main goals are to develop a method for measuring geometric error, modeling, and geometric error compensation for the Rotary table of a 4-axis machine tools by implementing Homogeneous Transformation Matrix (HTM) method. After designing parametric-error model, empirical data is experimentally obtained, required for calculating unknown parameters of the model. Then, data measurement tests were carried out by a BallBar Measurement mechanism according to ISO 230-7 standard on the four-axis CNC milling machine. BallBar mechanism can measure the movement deviations of a constant radius circular path for different directions. After substituting experimental data in the proposed error model, by using matrix and computational relations the complete error model of the process is achieved. Finally, geometric errors for different angles of the rotary table are extracted from the error model and presented. Among achievements of this research, the new error model and the method of verification could be mentioned. Based on the validated model, compensations on the tool path can be carried out in order to reach higher accuracy. In addition, the error compensation method used for equipment installation, and the type of movement selected for BallBar mechanism on the 4-axis machine tool, will elevate the precision and accuracy of results. From the innovative outcomes of the present study, optimum error model and its validation to investigate the consistency of the results in both empirical and theoretical approaches is absolutely worth mentioning.

1- مقدمه

قطعات دقیقتر، اهمیت ویژه‌ای یافته و دقت در طراحی و ساخت

امروزه افزایش دقت ماشین‌های ابزار با توجه به نیاز روزافزون به ماشین ابزارها به شکل گسترده مورد توجه می‌باشد. ولی به دلیل

Please cite this article using:

H. Nowruzi Daeni, B. Moetakef-Imani, Measurement and Modeling of Rotary Table geometric errors in CNC 4-axis Machine Tool, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 6, No. 7, pp. 1-11, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

این پژوهش‌ها می‌باشد. از جمله نوآوری‌های تحقیق حاضر می‌توان به مدل‌سازی ریاضی حرکت‌های خطی و دورانی فرز CNC چهارمحور، ارائه یک مدل خطای جهت محاسبه خطاهای هندسی خطی و دورانی میز دورانی، ارائه روش نصب مکانیزم Ball Bar روی میز دورانی و نحوه رفع خطاهای نصب مکانیزم Ball Bar و در نهایت بیان یک روش صحت‌سنجی برای بررسی دقت مدل خطای پیشنهادی را نام برد.

2- شرح مساله

جبران خطاها و انحرافات ماشین‌کاری در یک ماشین کنترل عددی یک راه قوی برای دستیابی به دقت بالا در فرایندهای براده برداری است. عوامل خطا در ماشین ابزار، ربات‌ها و وسایل اندازه‌گیری شامل: رفتار دینامیکی ماشین، تغییر شکل سازه، خطاهای مربوط به ساخت و مونتاژ قطعات ماشین، عدم همراستایی و تعامد محورها، خطای لقی و گام پیچ‌ها، سایش و فرسودگی اجزای متحرک ماشین ابزار، خطاهای هندسی، تغییرات حرارتی، خطای حرکتی محور چرخشی و نیروهای ماشین‌کاری می‌باشد [6]. این خطاها همواره بصورت ترکیب با هم در یک ماشین ابزار وجود دارند. خطاهای هندسی نفوذ زیادی روی کیفیت و دقت قطعه تولیدی با فرایند ماشین‌کاری دارند و بعنوان فاکتور اصلی عدم دقت در ماشین ابزارهای CNC مطرح می‌شوند. در این پژوهش، یک مدل خطای سینماتیک بر پایه ماتریس‌های انتقال همگن برای مدل‌سازی خطاهای هندسی میز دورانی در یک فرز CNC چهارمحور بیان می‌شود. اینگونه مدل‌سازی می‌تواند کمک فراوانی به تعیین خطاهای هندسی میز دورانی در فرزهای چند محور کند. همچنین روشی برای صحت‌سنجی مدل خطای پیشنهادی ارائه شده که برای مدل‌های خطای دیگر در سایر ماشین ابزارهای چند محور نیز قابل استفاده است. روش مدل‌سازی نرم‌افزاری خطا به مراتب نسبت به سایر روشهای دیگر بهینه‌تر و ارزانتر بوده و استفاده از BallBar جهت اندازه‌گیری خطاهای ماشین ابزار از جمله روش‌های کم هزینه می‌باشد.

3- قاعده کلی اندازه‌گیری با مکانیزم BallBar

استاندارد ISO 230-7 توسط کمیته فنی ISO / TC 39 برای ماشین ابزارهای براده برداری فلزات تهیه و تنظیم شده است. با توجه به این استاندارد، منبع اصلی خطاهای حرکتی میز دورانی خطاهای هندسی هستند که به دو گروه دسته‌بندی می‌شوند [7]:

محدودیت‌ها و افزایش هزینه ساخت و جایگزینی تجهیزات دقیق، امکان دسترسی به دقت بالای ساخت قطعات در ماشین ابزارها بسیار مشکل است. استفاده از روش‌های جبران خطاهای ماشین‌کاری با توجه به نیاز صنایع به قطعات دقیق، یک راه مؤثر و مقرون به صرفه برای دستیابی به دقت بالا می‌باشد. همچنین مدل‌سازی، محاسبه و جبران خطاهای هندسی و موقعیتی محورهای ماشین ابزار و تأثیر آن روی جهت‌دهی و موقعیت‌گیری ابزار با توجه به کاربرد فزاینده ماشین ابزارهای CNC مورد توجه بوده و با تکنیک‌های نرم‌افزاری امکان پذیر می‌باشد. مطالعه خطاهای سینماتیک ماشین ابزار بمنظور مدل‌سازی و جبران خطا توسط محققین زیادی صورت گرفته و روش مختلفی ارائه شده است.

رخصت یک تکنیک برای استخراج خطاهای حجمی ماشین ابزار کنترل عددی بکمک اندازه‌گیری BallBar و مدل خطای هندسی ارائه کرد که خطاهای سه بعدی ماشین ابزار به اندازه‌گیری BallBar مرتبط می‌شود. پارامترهای خطاهای هندسی نظیر خطاهای خطی، دورانی، خطای عمود بودن محورها و خطاهای مربوط به لقی‌ها محاسبه شده‌اند [1]. ناپ یک تست دایره‌ای برای ماشین‌های اندازه‌گیری سه محوره پیشنهاد کرده که تست ماشین در امتداد یک لبه دایره‌ای اندازه‌گیری شده، انجام می‌شود. بعد از انجام تست دایره‌ای در نقاط مختلف فضای کاری ماشین، اقدام به محاسبه و آنالیز خطاهای ماشین می‌شود [2]. براین اساس یک BallBar تلسکوپ‌ی برای جمع‌آوری داده‌های خطای موقعیتی استفاده کرد که یک روش سریع داده برداری خطا برای برخی مولفه‌های خطا با تخمین مناسب ارائه می‌دهد [3]. رحمان و هیگالا یک مدل ریاضی برای اندازه‌گیری و آنالیز خطا ارائه کردند و این مدل بر اساس زنجیره سینماتیک ایده‌آل در یک ماشین ابزار تعریف شده است. ارتباط محوره‌های ماشین بوسیله قانون انتقال ماتریس بیان و در نهایت به کمک BallBar داده‌های خطا اندازه‌گیری می‌شوند. سپس مختصات حرکتی ماشین بوسیله مدل خطا اصلاح و خطاها جبران می‌شوند [4]. فلورسن و اسپان جهت اندازه‌گیری خطای لقی دینامیکی در محور دورانی از تکنیک R-Test روی محورهای X, Y, C استفاده کردند. مجدداً آزمایش‌ها با استفاده از BallBar روی این سه محور انجام و در نهایت نتایج بدست آمده از دو روش فوق، باهم مقایسه می‌شوند [5]. اغلب پژوهش‌های انجام شده به بررسی خطاهای هندسی در محورهای خطی پرداخته و محور دورانی عمودی مورد پژوهش قرار نگرفته است. همچنین وجود مدل خطای پیچیده و محاسبات طولانی از دیگر نواقص

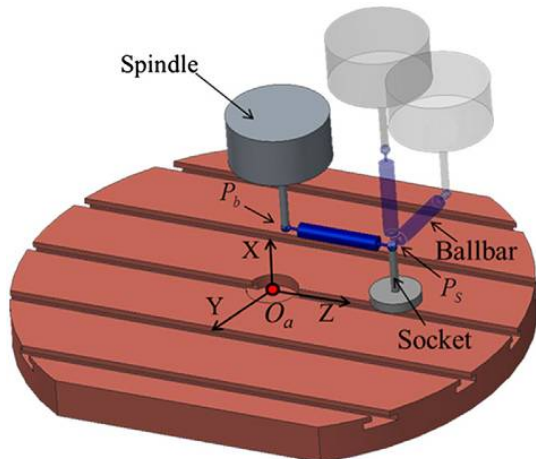


Fig. 2 Ballbar movement in work Plans

شکل 2 نحوه حرکت BallBar در صفحات کاری

سوکت‌های BallBar روی میزکار و اسپیندل با استفاده از سه محور خطی X,Y,Z شروع به چرخش می‌کنند. در اثر وجود خطاهای هندسی فرز چهارمحور که اجتناب ناپذیرند، سوکت‌ها از مسیر حرکت تعریف شده و ایده‌آل خود منحرف شده و فاصله سوکت‌ها بین نقاط مرکزی P_s, P_b بطور مرتب در طول مسیر دایره‌ای تغییر می‌کند. اگر طول ایده‌آل میله تلسکوپی L ، تغییر طول آن dL و P'_s, P'_b موقعیت نقاط مرکزی واقعی بعد از انجام حرکت در نظر گرفته شود؛ رابطه آنها طبق معادله (1) بیان می‌شود:

$$(L + dL)^2 = \|P'_s - P'_b\|_2 \quad (1)$$

خطاهای محورهای خطی بمراتب کوچکتر از خطاهای محورهای دورانی است و میتوان این خطاها را قبل از حرکت ابزار به نقاط مختلف مسیر، بدقت کالیبره کرد. اگر انحرافات نقطه مرکزی P_s در جهات محورهای مختصات برابر با $[dx_s, dy_s, dz_s]$ باشد؛ موقعیت واقعی نقاط مرکزی P_s, P_b (مرکز Ball سوکت‌ها) بصورت $[x_s + dx_s, y_s + dy_s, z_s + dz_s]$ و $[x_b, y_b, z_b]$ بیان می‌شود. رابطه مابین پارامتر dL و انحرافات نقطه مرکزی P_s می‌تواند با معادله درجه یک (2) بیان شود.

$$L * dL = -(x_s - x_b) * dx_s - (y_s - y_b) * dy_s - (z_s - z_b) * dz_s \quad (2)$$

با حرکت BallBar بوسیله اسپیندل و قرارگیری در راستای محور X، انحرافی که مکانیزم BallBar نمایش می‌دهد، معادل dx_s می‌باشد. بطور مشابه با قرارگیری مکانیزم BallBar در راستای محورهای Y,Z نیز انحرافات dy_s, dz_s تعیین می‌شوند. همین روش اندازه‌گیری روی میز دورانی برای اندازه‌گیری خطاهای موقعیتی قابل اجرا می‌باشد. با توجه به معلوم بودن طول L ، موقعیت نقاط P_s, P_b و اندازه‌گیری بردار خطای

1- خطاهای حجمی¹ که در اثر حرکت‌های خطادار میز دورانی ایجاد می‌شوند.

2- خطاهای مکانیزم² که همان خطاهای مربوط به محور مرکزی میز دورانی است.

در طول حرکت میز دورانی سه خطای انتقال خطی و سه خطای دورانی ایجاد می‌شود که این خطاها با تغییر موقعیت میز دورانی، تغییر می‌کنند. از کنار هم قرار دادن این شش خطا، بردار خطای هندسی حجمی $[\delta_x, \delta_y, \delta_z, \epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z]$ برای محور دورانی بدست می‌آید.

تمامی این خطاها در شکل 1-a نشان داده شده است. همچنین 4 خطای دیگر حرکتی شامل $[Y_{oa}, Z_{oa}, B_{oa}, C_{oa}]$ خطاهای مکانیزم نام دارند و در اثر عدم دقت در بخش تولید و مونتاژ ایجاد و در طول چرخش میز ثابتند (شکل 1-b).

در این پژوهش از روش تست دایره‌ای با استفاده از مکانیزم BallBar برای اندازه‌گیری خطاهای میز دورانی و تعیین کارایی مدل خطای موردنظر استفاده می‌شود. انتخاب این روش به دلیل کارایی، قابلیت تعیین خطای حرکتی، در دسترس بودن و هزینه کمتر نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد [8]. BallBar یک وسیله بادقت است و مطابق شکل 2 از سه قسمت مکانیکی شامل دو سوکت نصبی و یک میله تلسکوپی تشکیل شده است. یک سوکت روی اسپیندل و سوکت دیگر روی میزکار نصب و تنظیم می‌شود. میله تلسکوپی BallBar بوسیله حرکت سه محور X,Y,Z روی یک مسیر دایره‌ای مشخص با شعاع ثابت (برابر طول میله تلسکوپی) در صفحات کاری و جهات مختلف، شروع به حرکت می‌کند.

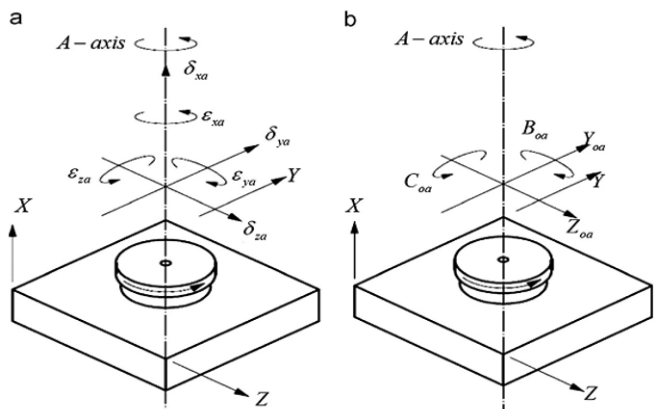


Fig. 1 The geometric errors of rotary axis A: (a) volumetric error (b) linkage errors

شکل 1 خطاهای هندسی محور دورانی: (a) خطاهای هندسی حجمی، (b) خطاهای هندسی مکانیزم

¹ Volumetric errors

² Linkage errors

همچنین دوران حول محور Y و Z باندازه زوایای γ, β مطابق معادلات (6) و (7) نمایش داده می‌شود [9]:

$${}^{XYZ}T_{X_1Y_1Z_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$${}^{XYZ}T_{X_1Y_1Z_1} = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$${}^{XYZ}T_{X_1Y_1Z_1} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

4-2- قانون ترکیب

با اتصال N جسم صلب به هم و با توجه به مشخص بودن نسبت ماتریس‌های انتقال همگن بین محورها، موقعیت نوک ابزار (در محور N ام) تابعی از سیستم مختصات مرجع است. نتیجه حرکت نوک ابزار که روی فریم مختصاتی N ام قرار گرفته عبارتست از: ضرب داخلی تمام ماتریس‌های انتقال همگن [9]:

$${}^R T_N = \prod_{m=1}^N {}^{m-1} T_m = {}^0 T_1 \cdot {}^1 T_2 \cdot {}^2 T_3 \dots \quad (8)$$

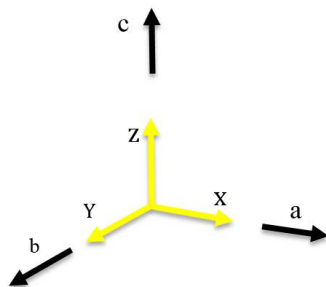


Fig. 3 Translational Transformation in X,Y,Z Directions

شکل 3 انتقال خطی در امتداد سه محور X,Y,Z

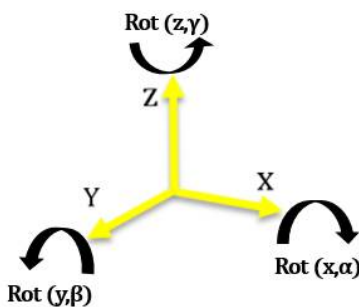


Fig. 4 Rotational Transformation in X,Y,Z Directions

شکل 4 انتقال دورانی حول سه محور X,Y,Z

5- مدل‌سازی خطاهای هندسی میز دورانی

برای انجام آزمایش از یک فرز CNC چهارمحور عمودی⁴ مشابه

$[dx_s, dy_s, dz_s]$ در زوایای مختلف میز دورانی در طول انجام آزمایشات، براحتی امکان محاسبه dL در هر زاویه از میز دورانی وجود دارد. باید به این نکته توجه داشت که خطاهای موقعیتی $[dx_s, dy_s, dz_s]$ اندازه‌گیری شده با مکانیزم BallBar، در اثر خطاهای هندسی میز دورانی بوجود آمده و تابع آنها می‌باشند.

4- تئوری مدل‌سازی خطای ماشین ابزار

برای نمایش یک جسم صلب نسبت به سیستم مختصات مرجع در یک فضای سه بعدی از یک ماتریس 4×4 استفاده می‌شود. این ماتریس، سیستم مختصات جسم صلب یا محور حرکتی مورد نظر (X_n, Y_n, Z_n) نسبت به سیستم مختصات مرجع ماشین (X_R, Y_R, Z_R) را نمایش می‌دهد و به آن ماتریس انتقال همگن¹ یا به اختصار HTM می‌گویند. خطا و حرکت‌های محوره‌های خطی و دورانی ماشین ابزار با ماتریس انتقال همگن مدل‌سازی می‌شود و فرم کلی این ماتریس در رابطه (3) بیان شده است [9]:

$${}^R T_n = \begin{bmatrix} O_{ix} & O_{iy} & O_{iz} & P_x \\ O_{jx} & O_{jy} & O_{jz} & P_y \\ O_{kx} & O_{ky} & O_{kz} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & P_s \end{bmatrix} \quad (3)$$

سه ستون اول ماتریس HTM کسینوس‌های هادی بردارهای یکه (i,j,k) هستند و جهت‌دهی فریم مختصاتی قطعه یا محورها را نسبت به سیستم مختصاتی مرجع نمایش می‌دهند. ستون آخر نیز مربوط به انتقالات خطی فریم مختصاتی دلخواه نسبت به فریم مرجع می‌باشد.

4-1- انتقال خطی و دورانی²

اگر سیستم مختصات مرجع XYZ در نظر گرفته و فریم مختصاتی $X_1Y_1Z_1$ باندازه مقدار فاصله a, b, c در جهت محور مختصاتی X,Y,Z نسبت به سیستم مختصات مرجع انتقال خطی انجام دهد، انتقال خطی³ بوده و ماتریس HTM بصورت زیر است [9]:

$$H = \text{Trans}(a, b, c) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

همچنین اگر فریم مختصاتی مورد نظر $X_1Y_1Z_1$ بخواهد حول محور X سیستم مختصاتی مرجع باندازه زاویه α دوران کند، ماتریس انتقال همگن این دوران بصورت رابطه (5) می‌باشد.

¹ Homogeneous Transformation Matrix-HTM

² Translational and Rotational Transformation

³ Translational Transformation

⁴ Four-axis machining center

بردار خطا به فرم ماتریس ستونی نوشته می‌شود که به آن ماتریس خطا می‌گویند. مرکز P_s به دلیل وجود خطاهای هندسی از موقعیت ایده‌آل فاصله گرفته و یک بردار خطا بصورت $[dx_s, dy_s, dz_s]$ با موقعیت ایده‌آل می‌سازد. با توجه به تئوری ماتریس انتقال همگن، سه خطای موقعیتی سوکت P_s می‌تواند مطابق ماتریس زیر نمایش داده می‌شود:

$$[dx_s, dy_s, dz_s, 1]^T = T'_a [x_s, y_s, z_s, 1]^T - T_a [x_s, y_s, z_s, 1]^T \quad (9)$$

T_a ماتریس انتقال ایده‌آل است که بصورت زیر بدست می‌آید:

$$T_a = \begin{bmatrix} x' & y' & z' & 0 \\ \cos 90^\circ & \cos 90^\circ & \cos 90^\circ & 0 \\ \cos 90^\circ & \cos \alpha & \cos(90^\circ + \alpha) & 0 \\ \cos 90^\circ & \cos(90^\circ - \alpha) & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{matrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

T'_a ماتریس انتقال واقعی است و با انجام یک سری ضرایب

و نیز در نظر گرفتن برخی فرضیات (محاسبه فرمول با استفاده از قانون ترکیب ماتریسهای انتقال همگن) بصورت زیر است:

$$T'_a = \begin{bmatrix} 1 & \varepsilon_{ya} \cdot \sin \alpha - \varepsilon_{za} \cdot \cos \alpha & \varepsilon_{ya} \cdot \cos \alpha + \varepsilon_{za} \cdot \sin \alpha & \delta_{xa} \\ \varepsilon_{za} & \cos \alpha - \varepsilon_{xa} \cdot \sin \alpha & -\sin \alpha - \varepsilon_{xa} \cdot \cos \alpha & \delta_{ya} \\ -\varepsilon_{ya} & \sin \alpha + \varepsilon_{xa} \cdot \cos \alpha & \cos \alpha - \varepsilon_{xa} \cdot \sin \alpha & \delta_{za} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

با بسط معادله (9) و جایگذاری T_a و T'_a در این معادله، خطاهای موقعیتی بصورت ترکیب خطی از خطاهای هندسی میز دورانی نمایش داده می‌شوند:

$$\begin{cases} dx_s = \delta_{xa} + (y_s \cdot \sin \alpha + z_s \cdot \cos \alpha) \varepsilon_{ya} + (z_s \cdot \sin \alpha - y_s \cdot \cos \alpha) \varepsilon_{za} \\ dy_s = \delta_{ya} - (y_s \cdot \sin \alpha + z_s \cdot \cos \alpha) \varepsilon_{xa} + x_s \cdot \varepsilon_{za} \\ dz_s = \delta_{za} + (y_s \cdot \sin \alpha - z_s \cdot \cos \alpha) \varepsilon_{xa} - x_s \cdot \varepsilon_{ya} \end{cases} \quad (11)$$

با فرض خلاصه‌سازی $S_a = \sin \alpha$, $C_a = \cos \alpha$ معادله (11) می‌توان فرم زیر را بدست آورد:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & y_s \cdot \sin \alpha + z_s \cdot \cos \alpha & y_s \cdot \cos \alpha + z_s \cdot \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 & -y_s \cdot \sin \alpha - z_s \cdot \cos \alpha & 0 & x_s \\ 0 & 0 & 1 & y_s \cdot \cos \alpha - z_s \cdot \sin \alpha & -x_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{xa} \\ \delta_{ya} \\ \delta_{za} \\ \varepsilon_{xa} \\ \varepsilon_{ya} \\ \varepsilon_{za} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dx_s \\ dy_s \\ dz_s \end{bmatrix} \quad (12)$$

معادله (12) فرم کلی مدل خطا می‌باشد ولی برای محاسبه خطاهای هندسی حجمی $[\delta_{x_s}, \delta_{y_s}, \delta_{z_s}, \varepsilon_{x_s}, \varepsilon_{y_s}, \varepsilon_{z_s}]$ میز دورانی، باید چند فرض در نظر گرفته شود:

شکل 5 استفاده می‌شود. همچنین مکانیزم BallBar مورد استفاده برای انجام آزمایش‌ها، مدل Renishaw QC-10 دارای سنسور اندازه‌گیری با دقت $0/1 \mu m$ می‌شود. یک سوکت مکانیزم BallBar مطابق شکل 6 روی اسپیندل و سوکت دیگر روی سطح میز دورانی نصب می‌شود. موقعیت نصب مراکز Ball نصب شده بنام P_b و P_s بوده و مبدا مختصات محور A (O_w) در محل تقاطع سطح میز دورانی و خط مرکزی محور A واقع شده است. به دلیل وجود خطاهای هندسی در میز دورانی، نقطه مرکزی P_s در زمان انجام حرکت روی یک مسیر دایره‌ای از موقعیت ایده‌آل خود (x_s, y_s, z_s) منحرف شده و دارای انحرافات موقعیتی باندازه (dx_s, dy_s, dz_s) در سیستم مختصاتی محور دورانی A موقعیت دهی می‌شود. بردار خطا، فاصله و انحراف نقطه P_s در حالت ایده‌آل¹ و حالت واقعی² در سه جهت را بیان می‌کند.

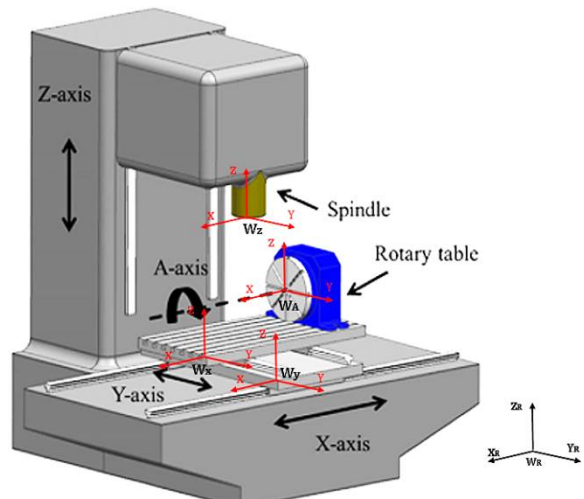


Fig. 5 Four-axis machining center with cinematic chain

شکل 5 شماتیک یک فرز عمودی چهارمحور به همراه زنجیره سینماتیک آن

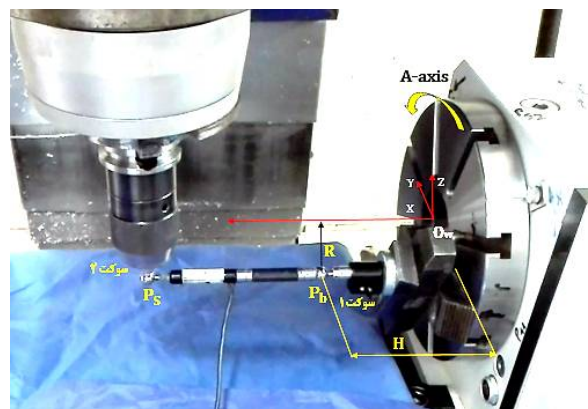


Fig. 6 BallBar mechanism Install on rotary table

شکل 6 نصب مکانیزم BallBar روی میز دورانی

¹ Ideal Position

² Real Position

با توجه به فرضیات فوق، خطاهای هندسی حجمی در هر کدام از سه موقعیت نصب P_{s1}, P_{s2}, P_{s3} برای هر زاویه ثابت میز دورانی $(A=\alpha)$ برابر می‌باشد. در نهایت 9 مقدار خطای موقعیتی $[dx_{s1}, dy_{s1}, dz_{s1}]$ و $[dx_{s2}, dy_{s2}, dz_{s2}]$ و $[dx_{s3}, dy_{s3}, dz_{s3}]$ طی آزمایشات بترتیب برای نقاط نصب سوکت در P_{s3}, P_{s2}, P_{s1} بدست می‌آید. با جایگذاری داده‌های بدست آمده در معادله (12)، تعداد معادلات برای محاسبه خطاهای هندسی حجمی میز دورانی در زاویه α به تعداد مجاز میرسد. با انجام تمام آزمایشات در زوایای مشخص شده روی میز دورانی و تکمیل مدل خطا، شش خطای هندسی در زوایای مورد نظر $(A=\alpha)$ بدست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & y_{s1} \cdot S_a + z_{s1} \cdot C_a & y_{s1} \cdot C_a + z_{s1} \cdot S_a \\ 0 & 1 & 0 & -y_{s1} \cdot S_a - z_{s1} \cdot C_a & 0 & x_{s1} \\ 0 & 0 & 1 & y_{s1} \cdot C_a - z_{s1} \cdot S_a & -x_{s1} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & y_{s2} \cdot S_a + z_{s2} \cdot C_a & y_{s2} \cdot C_a + z_{s2} \cdot S_a \\ 0 & 1 & 0 & -y_{s2} \cdot S_a - z_{s2} \cdot C_a & 0 & x_{s2} \\ 0 & 0 & 1 & y_{s2} \cdot C_a - z_{s2} \cdot S_a & -x_{s2} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & y_{s3} \cdot S_a + z_{s3} \cdot C_a & y_{s3} \cdot C_a + z_{s3} \cdot S_a \\ 0 & 1 & 0 & -y_{s3} \cdot S_a - z_{s3} \cdot C_a & 0 & x_{s3} \\ 0 & 0 & 1 & y_{s3} \cdot C_a - z_{s3} \cdot S_a & -x_{s3} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{xa} \\ \delta_{ya} \\ \delta_{za} \\ \epsilon_{xa} \\ \epsilon_{ya} \\ \epsilon_{za} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dx_{s1} \\ dy_{s1} \\ dz_{s1} \\ dx_{s2} \\ dy_{s2} \\ dz_{s2} \\ dx_{s3} \\ dy_{s3} \\ dz_{s3} \end{bmatrix} \quad (13)$$

معادله (13) را به شکل پارامتریک (14) می‌توان نوشت:

$$A * X = B \quad (14)$$

در معادله (14)، پارامتر A ماتریس ضرایب خطا¹ در زاویه چرخش α میز دورانی و X مفهوم ماتریس بردار خطای هندسی که شش خطای هندسی میز دورانی در $A=\alpha$ را بیان می‌کند. ماتریس B بردار خطای موقعیتی است که نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری خطاهای موقعیتی در طول انجام آزمایشات بوسیله BallBar را نمایش می‌دهد. در این مرحله با توجه به مقادیر معلوم ماتریس‌های A و B ، مقادیر مجهول ماتریس خطاهای هندسی X بدست می‌آید. بر اساس خاصیت جابجایی ماتریس، فرم ماتریس معادله (14) بصورت (15) نوشته می‌شود:

$$A^T \cdot A \cdot X = A^T \cdot B \quad (15)$$

با یک خلاصه‌سازی، مقادیر $A^T \cdot A = A^*$ و $A^T \cdot B = B^*$ معادل قرار داده و سپس شش پارامتر خطای هندسی میز دورانی

- فرض اول: خطاهای هندسی حجمی میز دورانی مطابق استاندارد ISO 230-7 در اثر تغییرات زاویه میز دورانی (α) ایجاد می‌شود.

- فرض دوم: خطاهای هندسی سه محور خطی X, Y, Z در زمان انجام آزمایشات در نظر گرفته نمی‌شود (برابر صفر).

- فرض سوم: با توجه به فرض دوم، بردار خطای موقعیتی میز دورانی $[dx_s, dy_s, dz_s]$ ، در اثر خطاهای هندسی حجمی میز دورانی ایجاد می‌شود. این بردار با داده برداری عملی توسط مکانیزم BallBar روی میز دورانی بدست می‌آید.

- فرض چهارم: با توجه به تغییر خطاهای هندسی دورانی در اثر حرکت میز باندازه زاویه α ؛ تمام خطاهای هندسی در تمام نقاط سطح میز دورانی تا زمانیکه زاویه α تغییر نکند، هم برابرند.

- فرض پنجم: با بسط معادله (12) شش خطای هندسی $[\delta_x, \delta_y, \delta_z, \epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z]$ از سه معادله بوجود آمده، قابل محاسبه نیستند. بنابراین نیاز به تعداد معادلات بیشتری بوده و منجر به بسط دادن ماتریس و محاسبه بردار خطای هندسی میز دورانی می‌شود. با تکیه بر این نکته که برای تحلیل ابعادی یک سطح نیاز به حداقل سه نقطه از آن سطح بوده و همچنین جهت رساندن تعداد معادلات حاصل باندازه مجاز، نتایج اندازه‌گیری خطاهای موقعیتی dx_s, dy_s, dz_s توسط BallBar در سه موقعیت نصب سوکت روی سطح میز دورانی در یک زاویه ثابت α اندازه‌گیری می‌شود. برای این منظور سه نقطه P_{s1}, P_{s2}, P_{s3} برای نصب سوکت روی میز دورانی مطابق شکل 7 مشخص شده است. این نقاط علاوه بر کامل کردن تعداد معادلات جهت محاسبه خطاهای هندسی میز دورانی، امکان تحلیل خطاهای موقعیتی در تمامی سطح میز دورانی نیز امکان پذیر می‌کنند.

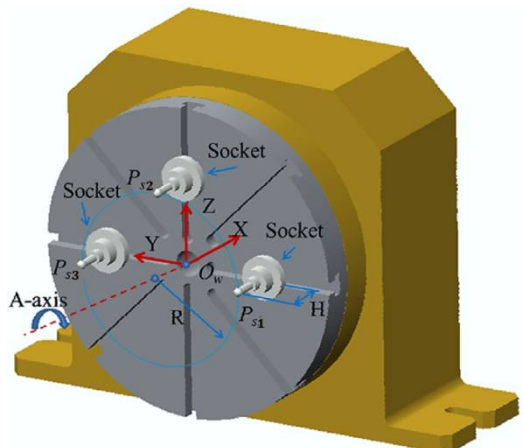


Fig. 7 Three mounting positions of the socket on the rotary table

شکل 7 سه موقعیت نصب سوکت BallBar روی میز دورانی

¹ Error Coefficient Matrix

$$\frac{\|\delta X\|}{\|X\|} \leq \frac{\|(A^*)^{-1}\| \|A^*\|}{1 - \|(A^*)^{-1}\| \|A^*\|} \left(\frac{\|\delta B\|}{\|B\|} + \frac{\|\delta A^*\|}{\|A^*\|} \right) \quad (18)$$

قاعده ماتریس ضرایب $\|(A^*)^{-1}\| \|A^*\|$ ، حساسیت حل معادلات نسبت به داده‌های اصلی خطا⁴ را نمایش می‌دهد و در مباحث تئوری به آن شاخص حالت⁵ می‌گویند. برای سادگی انجام محاسبات از قاعده ∞ برای نمایش شاخص حالت ماتریس ضرایب A^* استفاده می‌شود:

$$\text{cond}(A^*) = \|(A^*)^{-1}\|_{\infty} \|A^*\|_{\infty} \quad (19)$$

طبق معادله (19)، ماتریس ضرایب A^* بوسیله پارامترهای نصب R, H, α تعیین می‌شود. پارامتر H وابسته به ارتفاع سوکت و بصورت یک پارامتر ثابت در نظر گرفته می‌شود و پارامتر R در طول فرایند نصب به راحتی تغییر می‌کند. بنابراین انتخاب یک مقدار مناسب R برای حداقل کردن شاخص حالت ماتریس A^* میتواند باعث کاهش و تقلیل خطای نتایج نهایی شود. بعلاوه عدم دقت نتایج اندازه‌گیری به موقعیت نصب BallBar وابسته و حداقل کردن شاخص حالت به زاویه چرخش میز دورانی (α) وابسته است. بنابراین بهینه‌سازی این پارامتر بصورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$\min (\|(A^*)^{-1}\|_{\infty} \|A^*\|_{\infty})_{R, \alpha} \quad (20)$$

با در نظر گرفتن یک حالت بهینه برای ارزیابی شاخص حالت، مقدار R با توجه به زوایای مختلف چرخش میز دورانی تغییر می‌کند. مطابق شکل 8 با رسم نمودار تغییرات شعاع نصب سوکت یک بر روی میز دورانی (R) و معادله شاخص حالت ماتریس ضرایب ($\text{Condition Number } A^*$) برای زوایای مختلف میز دورانی (α) مشاهده می‌شود که شاخص حالت با افزایش مقدار R تا حدود 100 میلی‌متر با شیب تند کاهش می‌یابد و بعد از این مقدار مجدد با شیب ملایم افزایش می‌یابد. قابل ذکر است که مقدار بهینه R باعث دستیابی به کمترین مقدار شاخص حالت و در نهایت بالاترین دقت اندازه‌گیری در ماتریس ضرایب A^* حاصل می‌شود.

بعد از نصب سوکت یک بر روی میز دورانی، ارتفاع نصب برابر با $H = -247.51 \text{ mm}$ می‌باشد، مقدار پارامتر R طبق نمودار 8، مقدار 100 میلی‌متر منظور می‌شود. مقدار تنظیمی R روی میز دورانی تا حد ممکن باید به 100 میلی‌متر نزدیک بوده و بعد از نصب سوکت با استفاده از لبه یاب اندازه‌گیری می‌شود.

در $A = \alpha$ با استفاده از قانون معکوس ماتریس¹ بدست می‌آید:

$$(A^*)^{-1} \cdot B^* = X \quad (16)$$

برای اطمینان از قابل حل بودن معادله (16)، باید ماتریس A^* غیرمنفرد بوده و همچنین پارامترهای نصب R و H برابر با صفر نباشد ($R \neq 0, H \neq 0$). مقادیر پارامترهای R و H تأثیر بسیار مهمی روی حل معادله (16) دارند. با مدل خطای فوق، مقادیر خطاهای هندسی در زوایای مورد نظر میز دورانی تعیین می‌شود.

6- بهینه‌سازی پارامترهای نصب BallBar

طول میله تلسکوپی BallBar (فاصله اسمی بین نقاط P_s, P_b) یا همان L با توجه به کورس حرکتی محورهای فرز و شرایط کاری انتخاب می‌شوند. طول ثابت میله تلسکوپی با توجه به ابعاد فرز چهارمحور، 150 میلی‌متر انتخاب می‌شود. پارامتر مهم دیگر فاصله محور مرکزی BallBar تا خط مرکزی محور دورانی $A(R)$ می‌باشد و این پارامتر در انجام محاسبات مدل خطا بسیار مهم بوده و با استفاده از لبه یاب با توجه به محل نصب سوکت یک روی میز دورانی تعیین می‌شود. پارامتر سوم ارتفاع مرکز Ball سوکت یک تا سطح میز دورانی بوده که آنرا H می‌نامند و با توجه به ارتفاع سوکت و زیرکار مورد استفاده تعیین می‌شود. زاویه چرخش میز دورانی (α) پارامتر مهم دیگریست که روی خطاهای نصب مؤثر بوده و بصورت پیوسته در طول انجام آزمایشات تغییر می‌کند. نحوه انتخاب پارامترهای نصب مکانیزم روی میز دورانی مهم بوده و باید با روشی مناسب، یک ارتباط بهینه بین سه پارامتر R, H, α جهت جبران خطاهای نصب² و انجام یک آزمایش با کمترین خطا برقرار شود. عدم ایجاد رابطه بهینه بین سه پارامتر R, H, α در ماتریس ضرایب A^* در معادله 16 باعث ایجاد خطا در این ماتریس شده که بصورت δA^* ، δB^* ، δX ماتریس خطاهای هندسی حجمی میز دورانی (ماتریس X)، می‌شود و این خطا را با δX نمایش داده می‌شود [10]:

$$(A^* + \delta A^*)(X + \delta X) = (B^* + \delta B^*) \quad (17)$$

با توجه به منبع [10] نرخ تغییر راه حل³ معادله (17) می‌تواند با نامساوی (18) بیان شود:

⁴ Original data errors

⁵ Condition number

¹ Pseudo- invert matrix

² Mounting Errors

³ Change rate of the solution

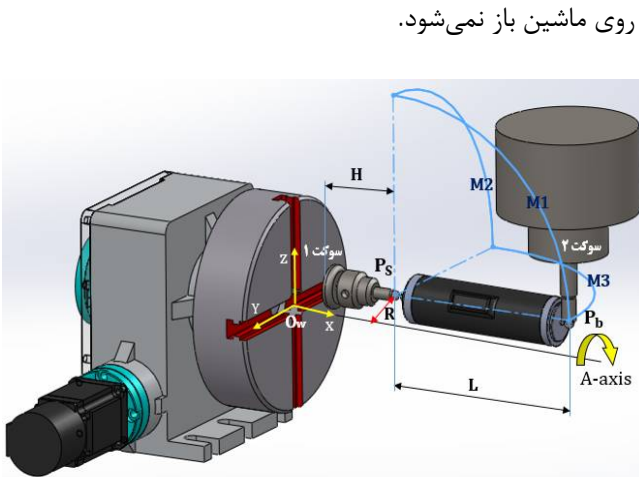


Fig. 9 Three circular paths for measuring the derivations of the ball on the rotary table

شکل 9 مسیره‌های دایره‌ای برای اندازه‌گیری انحرافات بر روی میز دورانی

با توجه به نسبت تقسیم میز دورانی، زاویه 5 درجه برای انجام آزمایش‌های اندازه‌گیری انتخاب می‌شود. بدین ترتیب بعد از نصب سوکت در موقعیت P_{s1} ، سه مرحله فوق در زوایای 0، 5، ...، 360 درجه انجام می‌شود و در نهایت 72 مقدار خطای موقعیتی $[dx_{s1}, dy_{s1}, dz_{s1}]$ بدست می‌آید. در دو موقعیت نصب P_{s2}, P_{s3} نیز به همین ترتیب عملیات اندازه‌گیری انجام می‌گیرد. فاصله مرکز Ball سوکت یک روی میز دورانی تا محور مرکزی میز دورانی (R) برابر با $86/4$ میلی‌متر تنظیم شده است. همچنین طول ایده‌آل BallBar (L) برابر 150 میلی‌متر و ارتفاع سوکت یک از مرکز Ball آن تا سطح میز دورانی (H) نیز برابر با $247/51$ میلی‌متر است. سه پارامتر R, H, L در ابتدای آزمایش انتخاب شده و در طول انجام آزمایش‌ها ثابت هستند. خطاهای موقعیتی توسط BallBar در هر 5 درجه چرخش میز دورانی اندازه‌گیری می‌شوند. بطور مثال در زاویه α برابر با 5 درجه در موقعیت‌های نصب P_{s1}, P_{s2}, P_{s3} سه گروه خطای موقعیتی $[dx_{s1}, dy_{s1}, dz_{s1}]$ و $[dx_{s2}, dy_{s2}, dz_{s2}]$ و $[dx_{s3}, dy_{s3}, dz_{s3}]$ ثبت می‌شود. این فرایند ثبت خطاهای موقعیتی در 72 زاویه اندازه‌گیری روی میز دورانی انجام می‌شود. جبران خطاهای نصب قبل از انجام آزمایشات یک امر کاملاً ضروری و مهم است. نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری خطاهای موقعیتی در فرایند انجام آزمایش در شکل 10 ترسیم شده است.

8- شناسایی خطاهای هندسی حجمی

دو عامل اصلی خطاهای هندسی روی میز دورانی وجود دارد که خطاهای مکانیزم و خطاهای حجمی نامیده می‌شوند. خطاهای مکانیزم ثابت بوده و خطاهای حجمی با توجه به زاویه چرخش

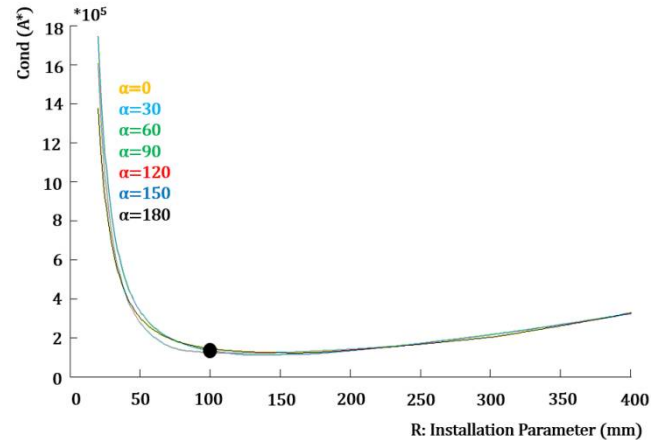


Fig. 8 Simulation results for the condition number according to the R installation parameter at the different rotation angle

شکل 8 نتایج شبیه‌سازی مربوط به شاخص حالت با توجه به پارامتر R در زوایای مختلف چرخشی

7- آزمایش اندازه‌گیری خطاهای موقعیتی میز دورانی

قبل از انجام آزمایش اندازه‌گیری روی ماشین فرز CNC، باید مکانیزم BallBar کالیبره شود. عدم کالیبراسیون و صفر کردن خطای اندازه‌گیری می‌تواند نتایج نامشخصی برای اندازه‌گیری ارائه دهد. مسیر دقیق ابزار برای انجام آزمایش اندازه‌گیری روی یک فرز CNC چهارمحور طراحی می‌شود. با تنظیم میز دورانی روی یک زاویه خاص، محورهای خطی ماشین ابزار BallBar در جهت مسیره‌های دایره‌ای مشخص شده حرکت کرده و بعد از رسیدن به نقطه نهایی، چند ثانیه توقف کرده و انحرافات توسط BallBar ثبت می‌شود. فرایند اندازه‌گیری مطابق شکل 9 شامل سه مرحله بشرح زیر می‌باشد:

(a) در نقطه اول موازی با محور X می‌باشد. اسپیندل BallBar طی یک مسیر ربع دایره‌ای در صفحه کاری ZX حرکت کرده و در امتداد محور Z قرار گرفته و متوقف می‌شود. مقدار خطای خطی در این حالت برابر با dz می‌باشد و ثبت می‌گردد (M1).

(b) اسپیندل BallBar را در صفحه کاری ZY با یک حرکت دایره‌ای دیگر در امتداد محور Y قرار می‌گیرد و در این حالت انحراف نمایش داده شده برابر با dy می‌باشد (M2).

(c) در نهایت BallBar با یک حرکت دیگر در صفحه کاری YX به محل شروع حرکت انتقال داده می‌شود و مقدار انحراف dx ثبت می‌گردد (M3).

بعد از انجام سه مرحله فوق، میز دورانی به همراه مکانیزم BallBar به اندازه 5 درجه دوران کرده و در موقعیت جدید، مجدد سه مرحله فوق انجام می‌شود. بدین ترتیب روند آزمایش در تمام زوایای میز دورانی انجام می‌شود. سوکت نصب شده در نقطه نصب P_{s1} تا اتمام انجام فرایند اندازه‌گیری به هیچ وجه از

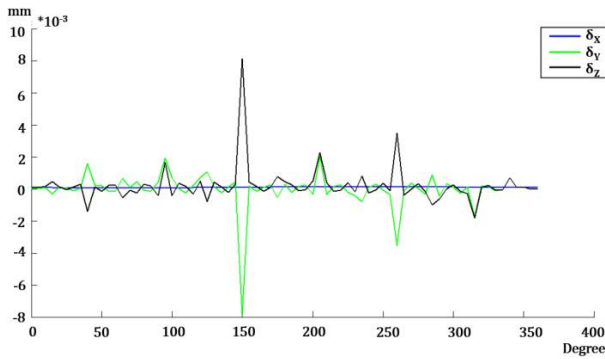


Fig. 11 Linear geometric errors parameters of the rotary table ($\delta_x, \delta_y, \delta_z$)

شکل 11 خطاهای هندسی خطی میز دورانی ($\delta_x, \delta_y, \delta_z$)

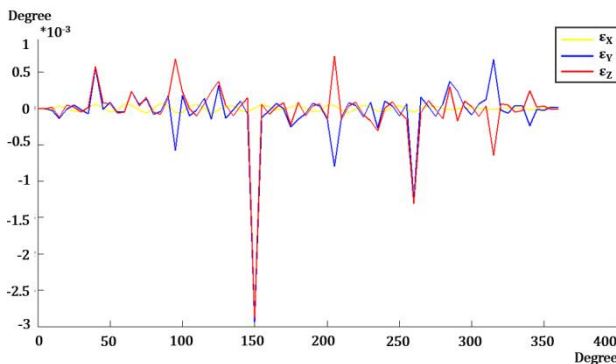


Fig. 12 Angular geometric errors parameters of the rotary table ($\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$)

شکل 12 خطاهای هندسی زاویه ای میز دورانی ($\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$)

در این حالت مقدار انحراف اندازه‌گیری شده توسط BallBar در دو حالت تئوری و عملی در زوایای مختلف بدست آمده و با یکدیگر مقایسه می‌شوند. در این حالت هرچقدر نتایج به یکدیگر نزدیکتر باشند، صحت و اعتبار مدل پیشنهادی بالاتر می‌باشد. در اندازه‌گیری مقدار انحراف عملی (dL_A) مطابق شکل 13، مقدار انحراف BallBar در هر 5 درجه زاویه میز دورانی اندازه‌گیری می‌شود. سپس برای محاسبه مقدار انحراف تئوری (dL_T) از معادله (2) استفاده شده و در نهایت اقدام به مقایسه نتایج بدست آمده می‌شود. مطابق شکل 14، نمودارهای رسم شده از نزدیکی بالایی برخوردار و تقریباً بر هم منطبق شده اند. با مقایسه دو نمودار، مشخص می‌شود که روش پیشنهادی برای شناسایی خطاهای هندسی حجمی میز دورانی مناسب و دقیق می‌باشد.

10- جبران سازی

با توجه به وجود خطاهای هندسی در میز دورانی، هیچگاه مسیر پیموده شده توسط ماشین با مسیر فرمان داده شده از واحد کنترل، یکسان نخواهد بود. فرایند جبران سازی مسیر حرکت بصورت نقطه‌ای انجام می‌گیرد.

میز دورانی تغییر می‌کنند.

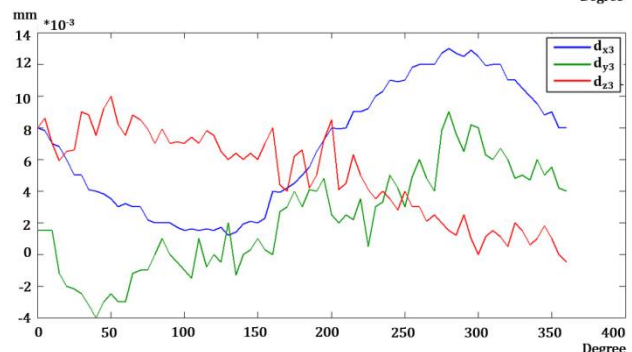
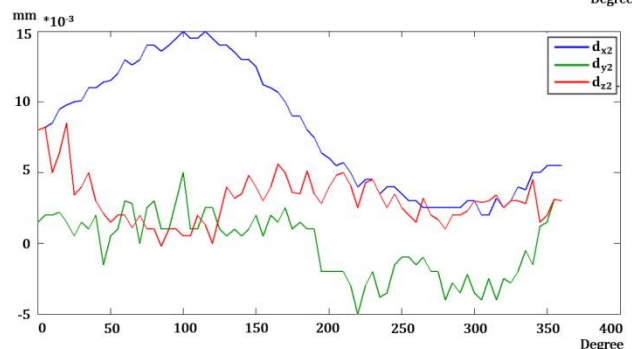
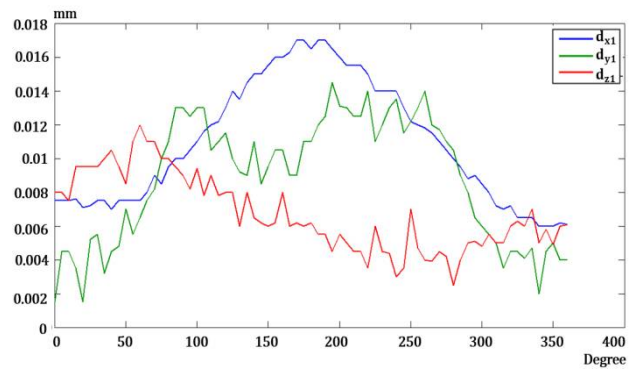


Fig. 10 Initial measured results of three mounting positions (P_{s1}, P_{s2}, P_{s3})
شکل 10 نتایج اولیه اندازه‌گیری در سه موقعیت نصب BallBar (P_{s1}, P_{s2}, P_{s3})

هدف محاسبه خطاهای حجمی بعد از اندازه‌گیری خطاهای موقعیتی روی میز دورانی می‌باشد که با حرکت میز دورانی تغییر کرده و تأثیر بالایی روی خطاهای هندسی دارند. با جایگذاری خطاهای موقعیتی اندازه‌گیری شده در بخش 7 (ماتریس B) و پارامترهای معلوم ماتریس ضرایب A^* شامل مختصات حرکتی و زاویه α در معادله (13)، مقادیر خطاهای هندسی حجمی میز دورانی (ماتریس X) با استفاده از معادله (16) در زوایای مختلف میز دورانی بدست می‌آید (نمودارهای 11 و 12).

9- صحت‌سنجی روش پیشنهادی

برای تعیین اثر بخشی و صحت روش پیشنهادی، یک آزمایش روی میز دورانی ماشین ابزار چهارمحور طراحی می‌شود.

خاص از میز دورانی بدست می‌آید. BallBar در طول فرایند آزمایش با استفاده از محورهای خطی روی یک سری مسیره‌های دایره‌ای مشخص حرکت کرده و خطاهای موقعیتی سه گانه اندازه‌گیری می‌شود. بعلاوه انتخاب پارامترهای نصب BallBar روی میز دورانی از اهمیت بالایی برخوردار بوده و باید قبل از انجام آزمایش‌ها تعیین شود. ساده‌سازی انجام فرایند باعث کاهش قیمت، مهارت اپراتور و زمان اندازه‌گیری می‌شود. همچنین با قراردادی خطاهای موقعیتی اندازه‌گیری شده با BallBar در مدل خطا، یک معادله خطی بزرگ ایجاد می‌شود که باید برای محاسبه شش پارامتر خطای هندسی در زوایای مختلف میز دورانی حل شود. در نهایت یک روش صحت‌سنجی برای تأیید مدل خطا و روش پیشنهادی روی فرز چهارمحور انجام می‌شود. نتایج روش صحت‌سنجی، معتبر بودن مدل خطا و نیز دقت خطاهای اندازه‌گیری شده در روش پیشنهادی را تأیید می‌کند. همچنین اندازه‌گیری و شناسایی خطا با مکانیزم BallBar در کارگاه یا آزمایشگاه به‌عنوان یک روش ارزیابی و محاسبه سریع خطاهای هندسی میز دورانی بصورت دوره‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. جبران سازی مسیره‌های ماشین‌کاری نیز بصورت نقطه‌ای با مدل خطای ارائه شده برای قطعات روی میز دورانی قابل انجام می‌باشد.

12- فهرست علائم

R	شعاع محور مرکزی BallBar تا محور مرکزی میز دورانی
H	ارتفاع سوکت نصبی روی میز دورانی
L	طول میله تلسکوپي BallBar
علائم یونانی	
α	دوران حول محور X
β	دوران حول محور Y
γ	دوران حول محور Z
δ	خطاهای هندسی خطی میز دورانی
ϵ	خطاهای هندسی زاویه ای میز دورانی

13- تقدیر و تشکر

از شرکت تراش رایانه توس که در انجام پروژه با اینجانب همکاری نمودند؛ کمال امتنان و سپاس را دارم.

14- مراجع

[1] جواد رخصت، 1383، مدل‌سازی خطاهای سینماتیک در ماشین‌های CNC، پایان نامه کارشناسی ارشد.

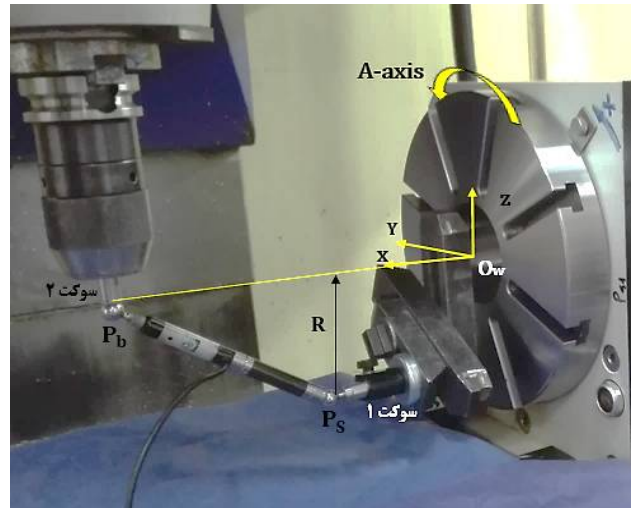


Fig. 13 BallBar position in accuracy evaluation test

شکل 13 موقعیت BallBar جهت تست صحت‌سنجی

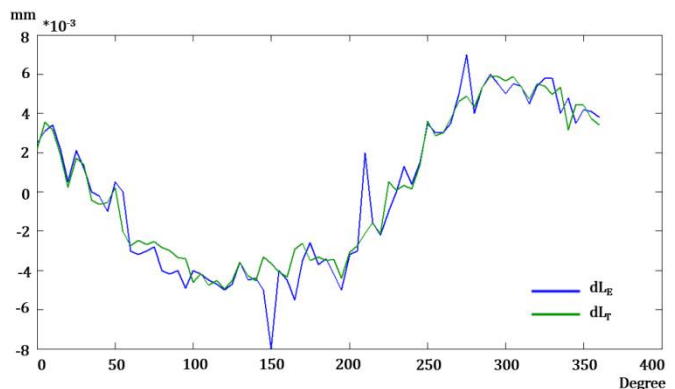


Fig. 14 Accuracy evaluation test result (Theoretical & Practical)

شکل 14 نتایج تئوری و عملی آزمایش صحت‌سنجی

با جایگذاری دو سری داده معلوم شامل مختصات نقطه حرکتی مقصد ابزار (x, y, z, α) و خطاهای هندسی در زاویه مورد نظر میز دورانی در نمودارهای 11 و 12 شامل $[\delta_x, \delta_y, \delta_z, \epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \alpha]$ در فرمول مدل خطا (معادله 12)، انحرافات موقعیتی نقطه مقصد $[dx_s, dy_s, dz_s]$ محاسبه می‌شود و با جمع جبری انحرافات موقعیتی بدست آمده با مختصات مقصد ابزار، مختصات حرکتی اصلاح شده (x', y', z', α') جهت اجرا روی فرز چهارمحور بدست می‌آید.

11- نتیجه‌گیری

در این مقاله خطاهای هندسی حجمی یک میز دورانی بوسیله مدل خطای طراحی شده و با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری بدست آمده از BallBar شناسایی و محاسبه می‌شود. از سه موقعیت نصب سوکت در یک زاویه خاص از میز دورانی، 9 نتیجه خطای موقعیتی استخراج می‌شود. با جایگزینی 9 خطای موقعیتی در مدل خطا، خطاهای هندسی حجمی در آن زاویه

- inspection*, Journal of Manufacturing Systems, Vol. 1, pp. 229-237, 1992.
- [7] ISO 230-7, *Test Code for Machine Tools-Part 7: Geometric Accuracy of axes of rotation*, ISO, 2014.
- [8] Renishaw Company, *QC20-W wireless BallBar system description and specifications*, Issued: 0413 Part No. L-8014-1588-07-A-2016.
- [9] Alexander H.Slocum, *Precision Machine Design*, 1992 by Prentice – Hall, Inc. Asimon & Schuster Company, Englewood Cliffs, New Jersey 07632-2015.
- [10] G.H. Golub, C.F. Van Loan, *Matrix Computations, fourth ed.*, Johns Hopkins University Press, Maryland, 2012.
- [2] W.knapp, *Circular test for 3 Coordinate measuring and machine tools*, Precision Engineering Vol. 17, pp. 115-124, 1983.
- [3] J.B.Bryan, *A simple method for testing measuring and machine tools*, Precision Engineering Vol. 4, pp. 61-69, 1982.
- [4] Mahbubor Rahman, JoukoHeikkala, *Modeling measurement and error compensation of multi-axis machine tools*, Journal of Machine Tools and Manufacture, pp. 1535-1546, 2000.
- [5] G.H.J. Florussen, H.A.M, *Dynamic R-test for rotary tables on 5-axes machine tools*, Spaan, Procedia CIRP1 (2015), pp. 536 -539.
- [6] J.Mou & C.R. Liu, *A method for enhancing the accuracy of CNC machine tiols for on machine*