

تخمین خطای حجمی در ماشین ابزار سه محوره CNC از طریق مدل سازی سینماتیکی خطاهای هندسی

مهرداد واهبی نوجه ده^۱ و بهروز آرزو^۲

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(تاریخ دریافت: ۸۸/۴/۸؛ تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۰/۲۷)

چکیده

ماشین های CNC به منظور تولید قطعاتی با دقت های ابعادی و هندسی بالا و توانایی اجرای عملیات ماشین کاری گران بها و حساس به صورت گسترده در صنایع تولیدی به کار گرفته می شوند. یکی از عمده موانع دستیابی به تلورانس های ابعادی و هندسی در قطعات دقیق، خطاهای حجمی ناشی از انحراف های هندسی محورهای حرکتی ماشین ابزار می باشد. مدل سازی سینماتیکی ساختمان ماشین ابزار این امکان را فراهم می سازد تا بتوان مقادیر خطای برآیند اعمال شونده به قطعه کار و ناشی از مؤلفه های خطاهای هندسی ماشین ابزار را محاسبه نمود. در مقاله حاضر مدل سازی خطاهای هندسی در ماشین ابزار CNC سه محوره بررسی شده است (مدل ارائه شده برای هر نوع ترکیب بندی سه محوره قابل اعمال می باشد). چنین مدلی می تواند کارایی مناسبی در روش های جبران نرم افزاری و غیرهمزمان خطا و نیز تخمین شکل واقعی قطعات پس از ماشین کاری/ اندازه گیری در ماشین حاوی خطاهای هندسی داشته باشد. نتایج حاصل از ارزیابی مدل خطای ارائه شده حاکی از موفقیت این مدل در تخمین مقادیر واقعی خطاهای حجمی اعمال شده توسط ماشین ابزار به قطعه کار است.

واژه های کلیدی: ماشین ابزار کنترل عددی، مدل سازی سینماتیکی، خطای حجمی، خطای هندسی، جبران خطا

Volumetric Error Estimation in Three-axes CNC Machine Tool, via Kinematics Modeling of Geometric Error

M. Vahebi Nojeh Deh and B. Arezoo

Mech. Eng. Dep't.

Amirkabir Univ. of Tech.

(Received: 29 June 2009; Accepted: 17 Jan. 2011)

ABSTRACT

CNC machine tools are widely used to produce precise parts through executing expensive operations. In precision machining, the machine tool's geometrical and kinematical errors cause geometrical and dimensional deviations in vital features of machined parts. Kinematic modeling of a machine tool structure can help to predict the real value of the overall tool positioning error. In this paper, modeling of three-axes CNC machine tools has been considered. The developed model can simply be used for all kinds of linear axes configurations, like three-axes CNC machine tools. The model can be useful for a large variety of applications, including software based error compensation systems and prediction of the real shape of parts after being machined or measured by error contained CNC or CMM machines. Experimental tests were conducted to validate the model. Analytical estimations were shown to be in good accordance with experimental tests.

Keywords: CNC Machine Tool, Kinematics Modeling, Volumetric Error, Geometrical Error, Error Compensation

۱- کارشناس ارشد: Vahebi.Mehrdad@Mapnaturbine.com

۲- دانشیار (نویسنده پاسخگو): arezoo@aut.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه پیشرفت سریع تکنولوژی ساخت و نیاز به تولید قطعات پیچیده و دقیق، صنایع تولیدی را ملزم به استفاده از ماشین‌هایی می‌سازد که خصوصیات متضادی چون دقت و سرعت عمل بالا را یکجا داشته باشند. بر این اساس، در سال‌های اخیر ماشین‌ابزار CNC به نحو گسترده‌ای در مجموعه‌های تولیدی به کار گرفته شده است. دستیابی به محدوده‌های بسته تلورانسی و دقت‌های ابعادی بالا در قطعات ماشین‌کاری شده، از کیفیت هندسی و موقعیتی بالای ماشین‌های ابزار حاصل می‌شود. بهبود کیفیتی ماشین‌های ابزار از طریق تعمیرات مکانیکی و افزایش دقت ساخت اجزای ماشین، روشی گران‌قیمت و در مواردی غیرقابل اجراست. روش‌های جبران نرم‌افزاری در کنار تنظیمات سخت‌افزاری و تعمیرات مکانیکی می‌توانند به راهکاری مؤثر و کم‌هزینه جهت افزایش کیفیت ابعادی و هندسی قطعات تولید شده تبدیل گردد. مدل‌سازی خطاهای هندسی و تخمین درست مقادیر خطاهای حجمی، گام نخست پیاده‌سازی روش‌های جبران نرم‌افزاری می‌باشد. اندازه‌گیری خطاهای موقعیتی و هندسی زمانی می‌تواند نشانگر وضعیت کیفی ماشین باشد که تبدیل به یک کمیت واحد قابل لمس گردد. این کمیت همان خطای حجمی است که برآیند جبری و سینماتیکی پارامترهای متعدد خطای ماشین می‌باشد.

در مقاله حاضر مدل‌سازی سینماتیکی خطاهای هندسی و تخمین مقادیر خطاهای حجمی برآیند ناشی از مؤلفه‌های این نوع خطا بررسی شده است. سعی شده تا مفاهیم و تعاریف مرتبط با بحث مدل‌سازی سینماتیکی ماشین‌ابزار به صورت شفاف ارائه گردد. مدل ارائه شده قابلیت معادل‌سازی و تخمین مقادیر خطا برای تمام انواع ترکیب‌بندی ماشین‌های ابزار سه محوره را فراهم می‌سازد.

اولین ایده‌های مدل‌سازی خطاهای هندسی ماشین‌ابزار به سال‌های ۱۹۶۰ باز می‌گردد. زمانی که لیت [۱] بحث مدل‌سازی خطاهای هندسی را با استفاده از روش‌های هندسه مثلثاتی مطرح نمود. از مدل ارائه شده به دلیل پیچیدگی‌های فراوان چندان استقبال نشد. چند سال پس از آن هاگن و همکارانش [۲-۳] و نیز امان [۴] موضوع مدل‌سازی خطاهای حرکتی را برای هر کدام از محورهای خطی مطرح نمودند.

ایده و روش ارائه شده می‌توانست بدون نیاز به دقت ساخت فراوان در اجزای ماشین و از طریق پیش‌بینی مقادیر خطا، کارکرد ماشین‌های اندازه‌گیر مختصات را بهبود بخشد. کریدنا [۵-۷] مجموعه مقاله‌هایی را منتشر نمود که حاوی مدلی ریاضی جهت برآورد خطای حجمی، ارائه روشی جهت اندازه‌گیری پارامترهای مدل و طرح تمهیداتی جهت جبران خطاهای شبه استاتیکی در یک دستگاه سه محوره CNC بود. مدل خطای ارائه شده، بر مبنای روابط سینماتیکی جسم صلب بوده و تابعی از مقادیر خطا در هر کدام از محورها است. لی [۸] ضمن ارائه تحلیل هندسی برای ساختمان ماشین‌ابزاری سه محوره با اسپیندل عمودی، از ماتریس انتقال همگن جهت مدل‌سازی خطاهای تکرارپذیر استفاده کرده است. وی برای هر نقطه از فضای کاری ماشین، بردار خطایی در نظر گرفته و الگوریتم‌هایی جهت کاهش این بردار از طریق تغییر دادن نقطه مقصد ارائه نموده است. یانگ [۹] بر اساس داده‌هایی که از نتایج تجربی به دست آورده، خطاهای ناشی از لقی اجزا را نیز به بحث خطاهای هندسی افزوده است. بر اساس این تحقیق، تشخیص خطای لقی در ۱۸ مورد از ۲۱ مورد خطای هندسی امکان‌پذیر بوده و نشان داده شده که خطای لقی می‌تواند خاصیت تکرارپذیری داشته باشد. باراکت [۱۰] روابط سینماتیکی را به روی دستگاه اندازه‌گیر مختصات سه بعدی^۱ دروازه‌ای بررسی نموده است. مدل ارائه شده با به‌کارگیری فرض‌های ساده کننده تا حد امکان ساده‌سازی شده و ضرایب تصحیح کننده، جهت کاهش خطای ناشی از ساده‌سازی بیش از معمول به مدل اضافه شده است. اوکافو [۱۱] خطاهای هندسی ماشین ابزار سه محوره CNC را بررسی نموده و خطای موجود به روی هر کدام از محورهای سه‌گانه‌ی ماشین را توسط مدل سینماتیکی جسم صلب مدل کرده است. مدل به کار گرفته شده به فرم ماتریس انتقال همگن بوده و برآیند کل خطاها به صورت یک بردار خطا در سطح تماس ابزار و قطعه کار به دست آمده است. فلوراس [۱۲] با ارائه مدل تحلیلی از خطاهای هندسی سعی در تخمین مقادیر پارامترهای این خطا از طریق انجام اندازه‌گیری‌های سه بعدی داشته است. وانگ [۱۳-۱۴] در مدل‌هایی که به منظور تخمین مقادیر خطای حجمی ارائه

مقادیر خطاهای حجمی با دقت قابل قبولی میسر می‌باشد.

۲- اهمیت مدل‌سازی خطاهای هندسی ماشین‌ابزار

در کنار خطاهای هندسی و سینماتیکی، دقت ابعادی و هندسی قطعات تولید شده توسط ماشین‌ابزار CNC متأثر از عوامل متعدد دیگری نیز هست. در این میان مواردی از قبیل خطاهای ناشی از تغییرات دمایی و تغییر شکل ابزار می‌توانند دقت کارکرد ماشین را به شدت تحت تأثیر قرار دهند. اما کنترل شرایط محیطی و پارامترهای ماشین‌کاری از جمله مواردی است که می‌تواند عوامل یاد شده را تا حد زیادی تحت کنترل درآورد و به همین دلیل این نوع منابع ایجاد خطا در اصطلاح عوامل وابسته به فرآیند ماشین‌کاری نامیده شده‌اند. در مقابل، خطاهای سینماتیکی و هندسی به طور مستقیم با ماشین مرتبط می‌باشند و تغییر تنظیمات و پارامترهای ماشین‌کاری در عمل به عنوان راه‌کار بهبود دقت ابعادی و هندسی قطعه به شمار نمی‌آید. این نوع خطاها نیز خطاهای وابسته به ماشین نامیده شده‌اند و تعمیرات مکانیکی راه‌کار اصلی و غیرقابل انکار برای بهبود این نوع خطاها می‌باشد. ولی مدل‌سازی خطاهای هندسی و تلاش برای دستیابی به یک روش جبران نرم‌افزاری مؤثر، می‌تواند مکملی مناسب برای روش‌های تعمیراتی و در مواردی حتی تنها راه‌حل بهبود دقت عملکرد ماشین‌ابزار باشد.

۳- مدل‌سازی سینماتیک خطاهای هندسی

خطاهای هندسی موجود در محورهای حرکتی ماشین‌ابزار با فرض اینکه نوعی انتقال هندسی می‌باشند، می‌توانند مدل شوند [۱۰-۱۱]. جسم صلب در فضا شش درجه آزادی دارد و جهت بررسی موقعیت جسم در فضا لازم است علاوه بر دستگاه مختصاتی مرجع یا قاب مرجع، دستگاه مختصاتی متناظر با جسم نیز تعریف گردد. رابطه بین دو دستگاه مختصاتی یا قاب، از طریق روابط سینماتیکی انتقال و چرخش قابل توصیف است.

۳-۱- انتقال جابه‌جایی خالص

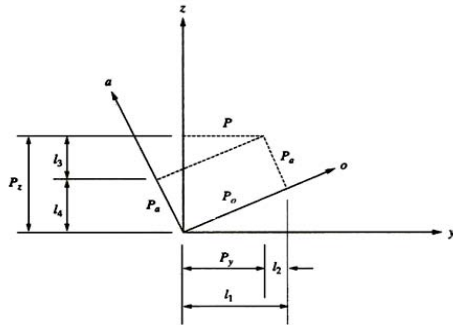
اگر جسم صلب به نحوی در فضا انتقال یابد که محورهای قاب آن نسبت به قاب مبنا موازی بماند، جابه‌جایی خالص صورت گرفته است. در این صورت تنها مختصات مبدأ قاب جسم

داده، راه‌کار اندازه‌گیری مستقیم خطا و به‌کارگیری توابع شکل^۱ را دنبال نموده است. راکسیری [۱۵] جبران غیر همزمان خطاهای هندسی را بررسی نموده و از الگوریتم شبکه عصبی جهت تخمین مقادیر خطاهای هندسی در نقطه‌های مجهول استفاده کرده است. اکینسی [۱۶] بحث مدل‌سازی سینماتیکی خطاهای هندسی را ادامه داده و با هدف بهبود در طبقه‌بندی مفاهیم و شناسایی بهتر مؤلفه‌های خطای هندسی، اقدام به تحلیل رابطه بین مؤلفه‌های خطاهای هندسی با خطای موقعیتی ابزار نموده است. این کار از طریق بررسی رابطه بین خطاهای عدم مستقیم بودن و خطای زاویه‌ای برای یک محور حرکتی واحد انجام شده است.

از مجموعه کارهای صورت گرفته چنین بر می‌آید که نیاز به یک مدل انعطاف‌پذیر که قابلیت پیاده‌سازی برای هر نوع ترکیب سه محور متحرک را داشته و در عین حال به صورت عملی نیز قابل اجرا به‌رومی ماشین‌های CNC مختلف باشد، احساس می‌شود. امروزه کارایی مناسب روش‌های جبران نرم‌افزاری در بهبود دقت ابعادی و هندسی قطعات ماشین‌کاری شده بر همگان ثابت شده است، لذا بررسی عمیق‌تر و تدوین روشی فراگیر جهت پیاده‌سازی عملی مدلی نرم‌افزاری و مستقل از سیستم کنترل ماشین‌ابزار مورد نیاز فراوان می‌باشد. علی‌رغم ساده بودن مبانی اولیه تخمین و جبران نرم‌افزاری خطاهای هندسی، پیاده‌سازی عملی آن حاشیه‌های تکنیکی فراوانی را به‌دنبال دارد. علاوه بر این لازم است مدل ارائه شده به نحو مقتضی مورد آزمایش قرار گیرد تا در عمل نیز نقاط ضعف و قوت چنین روشی مشخص گردد.

در مقاله حاضر، به بررسی و ارائه راهکاری مناسب جهت پیاده‌سازی عملی مدل سینماتیکی خطاهای هندسی ماشین‌ابزار سه محوره پرداخته شده است. مدل ارائه شده، امکان تخمین مقادیر واقعی خطاهای حجمی را برای هر نوع ماشین‌ابزار سه محوره CNC فراهم می‌سازد. چنین مدلی به‌سادگی و با دقت عمل مناسبی در کاربردهای چون جبران نرم‌افزاری خطا و نیز تخمین فرم واقعی قطعه ماشین‌کاری شده در ماشین‌ابزار حاوی خطا سودمند خواهد بود [۱۷].

نتایج حاصل از آزمون‌های عملی و شبیه‌سازی رایانه‌ای مؤید این مطلب است که با استفاده از مدل ارائه شده امکان تخمین



شکل (۲): چرخش خالص حول یک محور.

مقادیر تغییر موقعیت در انتقال چرخشی حول محور X از رابطه (۲) و ماتریس انتقال رابطه (۳) و انتقال چرخشی حول دو محور دیگر از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$p_x = p_n,$$

$$p_y = l_1 - l_2 = p_o \cos \theta - p_a \sin \theta, \quad (2)$$

$$p_z = l_3 + l_4 = p_o \sin \theta + p_a \cos \theta,$$

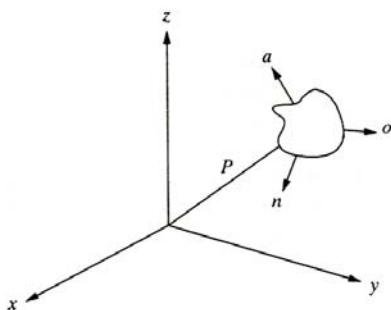
$$R_x = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_n \\ p_o \\ p_a \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

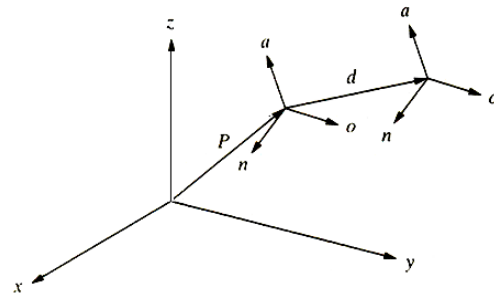
۳-۳- انتقال مرکب

حرکت جسم صلب در فضا شامل ترکیبی از انتقال‌های جابه‌جایی و حرکتی است (شکل ۳).



شکل (۳): نمایش جسم صلب در فضا.

تغییر می‌کند و زاویه محورهای مربوطه نسبت به قاب مبنا ثابت است (شکل ۱). خطاهای خطی محورهای حرکتی ماشین‌ابزار رفتاری شبیه این نوع انتقال از خود نشان می‌دهند. این خطاها شامل یک خطا در راستای موقعیت‌دهی محور و دو خطای عدم مستقیم بودن در صفحه عمود بر راستای موقعیت‌دهی می‌باشد (شکل ۶).



شکل (۱): جابه‌جایی خالص (d) و جابه‌جایی به همراه چرخش (p).

ماتریس همگن متناظر با انتقال جابه‌جایی مطابق رابطه زیر می‌باشد:

$$d = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

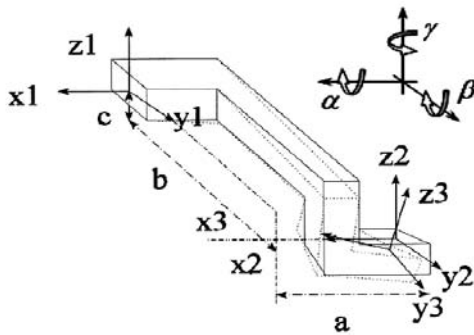
که در آن، d_x مؤلفه جابه‌جایی در راستای محور X از قاب مبنا می‌باشد.

۳-۲- انتقال چرخشی خالص

ساده‌ترین حالت در انتقال چرخشی دستگاه‌های مختصاتی، حالتی است که مبدأ مختصاتی قاب جسم به‌روی مبدأ مختصاتی قاب مبنا منطبق باشد و قاب جسم حول یک محور نسبت به قاب مبنا بچرخد (شکل ۲). این نوع انتقال می‌تواند در مدل‌سازی خطاهای چرخشی بکار گرفته شود. موقعیت نقطه p در قاب جسم (p_n, p_o, p_a) و در قاب مبنا (p_x, p_y, p_z) می‌باشد. قبل از انتقال چرخشی، هر دو موقعیت با هم برابرند. پس از چرخش قاب جسم، موقعیت نقطه مذکور در قاب مبنا به اندازه زاویه θ تغییر خواهد کرد.

دستگاه مختصاتی ۳ قرار می‌گیرند. ماتریس همگن متناظر این انتقال مطابق با رابطه (۶) می‌باشد.

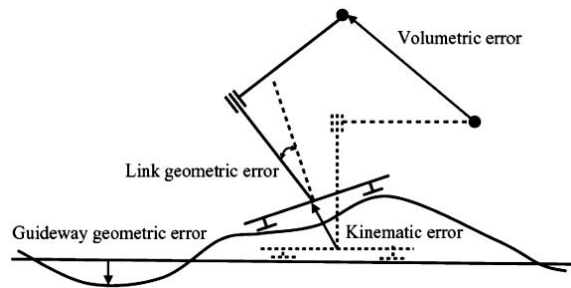
$$El_i = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma_i & \beta_i & a_i + \Delta a_i \\ \gamma_i & 1 & -\alpha_i & b_i + \Delta b_i \\ -\beta_i & \alpha_i & 1 & c_i + \Delta c_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$



شکل (۴): نمونه‌ای از انحراف هندسی ایجاد شده در رابط [۱۰].

۳-۴-۲- خطای هندسی بند

بر خلاف خطای هندسی رابط که در آن اندازه و جهت خطا با تغییر موقعیت‌های مکانی محور حرکتی ثابت می‌باشد، خطای هندسی بند باعث ایجاد انحرافات با اندازه و جهت وابسته به موقعیت محور حرکتی می‌گردد (شکل ۵).



شکل (۵): خطای هندسی ریل، خطای هندسی رابط، خطای سینماتیکی و بردار خطای حجمی [۱۶].

انحراف‌های سینماتیکی مشاهده شده در یک محور حرکتی، مجموع خطاهای هندسی رابط و بند است که وابسته به موقعیت محور بوده در اصطلاح خطای سینماتیکی محور حرکتی نامیده می‌شود. سهم ثابت این خطا متعلق به رابط و بخش متغیر آن متعلق به بند می‌باشد. رابطه (۷) ماتریس

با تعریف مناسب قاب‌های حرکتی برای اجزای یک محور و ترکیب انتقال‌های متوالی جابه‌جایی و چرخشی، می‌توان رفتار خطاهای ترکیبی را مدل کرد. ماتریس انتقال متوالی برای چنین خطایی از طریق ضرب متوالی ماتریس‌های انتقال تک‌تک خطاها بدست می‌آید. این منطبق می‌تواند حرکت هر کدام از محورهای حرکتی ماشین‌ابزار که اغلب در آن‌ها چند مؤلفه خطا با هم وجود دارند را مدل کند. صورت کلی ماتریس انتقال همگن برای انتقال مرکب به صورت زیر است:

$${}^{ref}T_{Object} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

که در آن، n, o, a مؤلفه‌های خطای چرخشی حول محورهای سه‌گانه X, Y, Z و $p_{x,y,z}$ مؤلفه‌های خطای جابه‌جایی در راستای این محورها می‌باشند.

۳-۴-۳- مدل‌سازی خطای سینماتیکی در محورهای حرکتی

انحراف‌های ابعادی و هندسی قطعات و اجزای سازنده محور حرکتی ماشین‌ابزار، عمده دلیل بروز خطاهای هندسی تکرارپذیر در عملکرد ماشین می‌باشند. گام نخست در مدل‌سازی صحیح این نوع از خطاها، آشنایی با اصطلاحات و مفاهیم بکار رفته در ادبیات خطاهای هندسی ماشین‌ابزار است. هر کدام از محورهای حرکتی ماشین‌ابزار از تعدادی رابط^۱ و بند^۲ تشکیل شده‌اند. در ادامه، نحوه به‌کارگیری قوانین انتقال هندسی برای یک محور حرکتی و مدل‌سازی خطاهای رابط و بند با استناد به این روابط تشریح می‌گردد.

۳-۴-۳-۱- خطای هندسی رابط

این نوع خطا موجب پدیدار شدن انحرافی با اندازه و جهت ثابت در موقعیت‌گیری مؤثر نهایی محور حرکتی می‌گردد. شکل ۴ یک رابط حاوی انحراف هندسی را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. در این شکل، نقص مکانیکی رابط، سبب بروز انحراف موقعیتی در انتقال از دستگاه مختصاتی ۱ به دستگاه مختصاتی ۲ شده است. موقعیت واقعی نقاط انتقال یافته در

1- Link
2- Joint

می‌باشند.

$$\begin{bmatrix} x_{p'} \\ y_{p'} \\ z_{p'} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -xRz & xRy & xTx+X \\ xRz & 1 & -xRx & xTy \\ -xRy & xRx & 1 & xTz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \\ 1 \end{bmatrix} \quad (۸)$$

نام‌گذاری مؤلفه‌های خطای هندسی بر اساس توصیه‌های ارائه شده در استاندارد VDI/VDE 2617 می‌باشد [۱۸].

۳-۴-۴-۴- خطای عدم عمود بودن بین دو محور حرکتی
انحراف راستای حرکت محورهای خطی متعامد از زاویه قائمه، تحت عنوان خطای عدم عمود بودن مطرح می‌گردد. این خطا برای هر کدام از صفحه‌های سه‌گانه در دستگاه مختصاتی سه محوره اندازه‌گیری می‌شود. در هر یک از این صفحه‌ها، یکی از محورها مبنا فرض شده و مقادیر خطای عدم عمود بودن برای محور دیگر به صورت زیر ثبت می‌گردد:

$$E_s = \begin{bmatrix} 0 & -Sxy & Sxz & 0 \\ 0 & 0 & -Syz & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (۹)$$

x, y, z در رابطه بالا، نشان دهنده فاصله مؤثر از مبدأ مختصاتی محورها می‌باشد. Sxy به مفهوم مقدار خطای زاویه‌ای محور y ، در صفحه xy و نسبت به محور x است.

۳-۵- ترکیب محور در دستگاه‌های سه محوره

دستگاه‌های CNC سه محوره در آرایش محوری متفاوتی طراحی و ساخته شده‌اند. با توجه به اینکه مدل‌سازی خطاها از طریق انتقال هندسی صورت می‌گیرد، با تغییر چیدمان محورهای حرکتی، نحوه ترکیب و تأثیر مؤلفه‌های خطای هندسی به‌روی خطای حجمی تغییر خواهد کرد. محورهای حرکتی از جهت آرایش سینماتیکی به دو دسته عمده تقسیم می‌شوند. دسته اول محورهایی هستند که خود به تنهایی حامل قطعه‌کار یا ابزار گیر بوده و به‌روی بدنه اصلی ماشین حرکت می‌کنند (محور مستقل). دسته دیگر شامل محورهایی است که در زنجیره سینماتیکی ابزار به بدنه یا قطعه‌کار به بدنه در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند (محورهای وابسته یا مرکب). به عبارتی بین یک محور وابسته و قطعه‌کار و یا بین یک محور وابسته و ابزارگیر، محور وابسته دیگری نیز قرار می‌گیرد. از این‌رو لازم است وابسته یا مستقل بودن محور

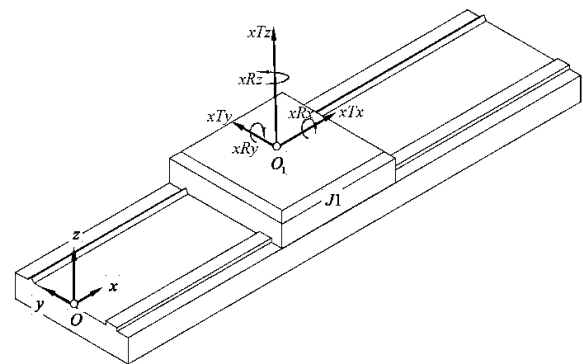
انتقال متناظر با بند حاوی خطای هندسی را نشان می‌دهد.

$$Ej_i = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma_{ix} & \beta_{ix} & X_i + \Delta X_i \\ \gamma_{ix} & 1 & -\alpha_{ix} & Y_i + \Delta Y_i \\ -\beta_{ix} & \alpha_{ix} & 1 & Z_i + \Delta Z_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۷)$$

برآیند خطاهای رابط و بند در هر موقعیتی از محور حرکتی به صورت خطای سینماتیکی محور ظاهر می‌شود.

۳-۴-۳- خطای هندسی محورهای حرکت خطی

ماشین‌ابزار سه محوره CNC ایده‌آل، تنها شامل یک درجه آزادی در راستای هر یک از محورهای حرکتی خود است. اما در عمل بر اثر انحراف‌های هندسی ناشی از مجموع خطای رابط و بند، شش درجه آزادی ناخواسته نیز به حرکت محور تحمیل می‌گردد. این درجات آزادی و به عبارتی مؤلفه‌های خطای هندسی، شامل سه مؤلفه خطای چرخشی، و سه مؤلفه خطای جابه‌جایی می‌باشند. از این‌رو در ماشین سه محوره، با داشتن شش مؤلفه خطا برای هر یک از محورهای حرکتی، مجموع خطاها به هجده مورد خواهد رسید. علاوه بر آن، بین هر دو محور حرکتی ماشین، یک مؤلفه خطای عدم تعامد نیز وجود دارد که در کنار موارد قبلی مجموع خطاها برای یک ماشین‌ابزار سه محوره CNC را به بیست و یک مورد خواهد رساند (شکل ۶).



شکل (۶): مؤلفه‌های خطای هندسی برای محور حرکت خطی.

رابطه (۸) ماتریس انتقال همگن متناظر با یک محور حرکت خطی را نشان می‌دهد. مؤلفه‌های ذکر شده در این ماتریس برآیند، خطاهای تکرارپذیر در جهت‌های مختلف

بند R_t ثابت می‌باشد. موقعیت واقعی ابزار در شکل مذکور از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$[P]_{\text{Real}} = \text{Base1}T_{R_t} \cdot R_t P_t. \quad (10)$$

در رابطه بالا، $R_t P_t$ ماتریس انتقال از ابزار به مبنای ابزار و $\text{Base1}T_{R_t}$ ماتریس انتقال از قاب مبنای ابزار به مبنای محور ابزارگیر می‌باشد. موارد ذکر شده در حالتی که ابزار از طریق دو یا سه محور به بدنه وصل می‌شود نیز همچنان صادق است. در حالت چند محوری، ماتریس انتقال همچنان ترکیبی از ماتریس‌های انتقال متوالی محورهای مرکب خواهد بود. برای مثال در شکل ۷-ب موقعیت واقعی ابزار از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$[P]_{\text{Real}} = \text{Base2}T_{\text{Base1}} \cdot \text{Base1}T_{R_t} \cdot R_t P_t. \quad (11)$$

در رابطه بالا، $R_t P_t$ ماتریس انتقال ابزار به مبنای محور اول و به عبارتی موقعیت واقعی ابزار (Z) به روی محور حامل ابزار است. $\text{Base1}T_{R_t}$ ماتریس خطای متناظر با رابط محور Z به محور دوم (Y) می‌باشد. در این ماتریس موقعیت Z جهت فراخوانی مقادیر خطا از بانک اطلاعاتی خطاهای هندسی این محور استفاده خواهد شد. $\text{Base2}T_{\text{Base1}}$ ماتریس خطای متناظر با رابط و بند متصل به محور Y می‌باشد و موقعیت Y جهت فراخوانی مقادیر خطا از بانک اطلاعاتی خطاهای هندسی در محور مذکور استفاده خواهد شد. رابطه (۱۲) بردار خطای موقعیتی ابزار را برای محور ابزارگیر متناظر با شکل ۷-الف و رابطه (۱۳) بردار خطای متناظر با محور شکل ۷-ب را نشان می‌دهد.

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \\ 1 \end{bmatrix}_{\text{Tool}} = (\text{Base1}T_{R_t} - I) \cdot \Delta = \begin{bmatrix} 0 & -zRz & zRy & zTx \\ zRz & 0 & -zRx & zTy \\ -zRy & zRx & 0 & zTz \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_Z \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \\ 1 \end{bmatrix}_{\text{Tool}} = ((\text{Base2}T_{\text{Base1}} \text{Base1}T_{R_t}) - I) \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ z + \Delta z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

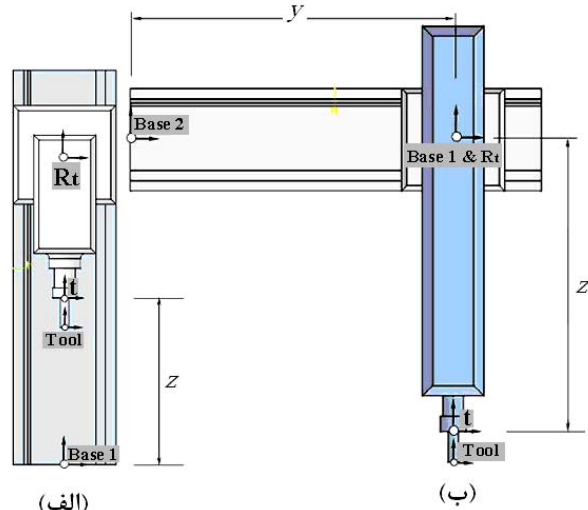
در روابط فوق، I ماتریس واحد، $[e]$ بردار خطا، $[T]$ ماتریس انتقال خطای هندسی، Z موقعیت محور Z در قاب ماشین و $[\Delta]$ طول رابط ابزارگیر نسبت به بند محور حامل ابزارگیر می‌باشد.

حرکتی در مدل سینماتیکی لحاظ گردد.

به منظور ارائه مدل سینماتیکی جامع و انعطاف‌پذیر، در کار حاضر محورهای حرکتی از دید نوع مؤثر نهایی به دو دسته کلی محورهای حامل ابزار و محورهای حامل میز ماشین یا قطعه‌کار تقسیم‌بندی شده‌اند. این تقسیم‌بندی به جهت روشن شدن وضعیت خطاهای زاویه‌ای و بازوهای مؤثر آن در مدل سینماتیکی و نیز ساده‌تر کردن الگوریتم‌های برنامه‌نویسی حائز اهمیت است.

۳-۵-۱- محور حامل ابزار

عبارت است از محور یا محورهایی که حامل ابزارگیر بوده و رابط ابزار، به بدنه ماشین می‌باشند. در شکل ۷ دو نمونه از این نوع محورها نمایش داده شده است.



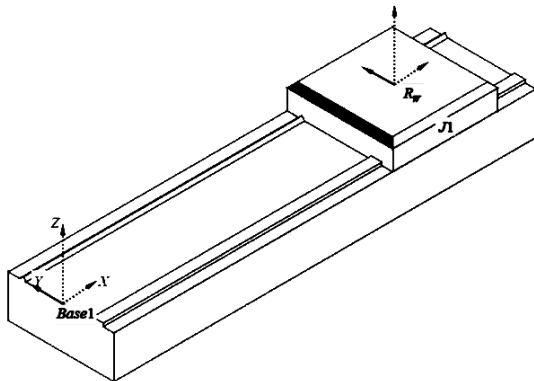
شکل (۷): زنجیره سینماتیکی انتقال مربوط به محور ابزارگیر.

در این شکل، $Tool$ قاب متصل به ابزار، t قاب متصل به ابزارگیر و R_t قاب مبنای محور حامل ابزار می‌باشد. در فرآیند آزمون ماشین ابزار و استخراج داده‌های مربوط به خطای هندسی محور ابزارگیر، موقعیت مؤثر نهایی در سیستم مختصاتی ماشین (قاب t) مبنای قرار می‌گیرد. از این رو فراخوانی مقادیر خطا از بانک اطلاعاتی حاصل از فرآیند آزمون ماشین ابزار، با استناد به همین موقعیت انجام خواهد شد. در این حالت طول بازوهای تقویت کننده خطاهای زاویه‌ای معادل است با اختلاف فاصله قاب‌های t و R_t . در شکل ۷-الف طول بازوهای مؤثر در تقویت خطاهای زاویه‌ای

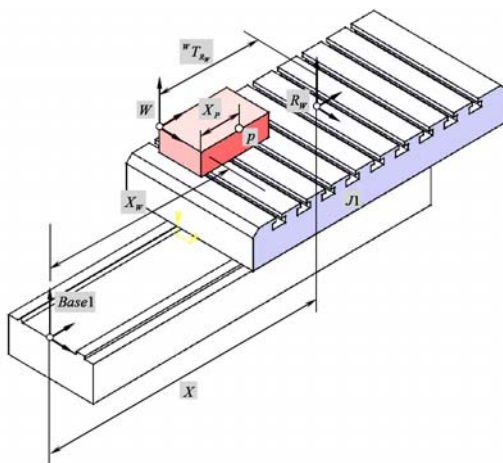
۳-۵-۲- محوره‌های حامل قطعه‌کار

شامل محورهایی است که میز ماشین را به بدنه متصل می‌کنند. همان‌گونه که در محوره‌های حامل ابزار عنوان شد، نقطه مقصد، موقعیت نوک ابزار بوده و هدف از ارائه مدل سینماتیکی برای محوره‌های مذکور، تعیین مؤلفه‌های خطای حجمی ابزار در یک نقطه (نقطه درگیری با قطعه‌کار) است. اما در محور حامل قطعه‌کار، نقطه‌ی مقصد می‌تواند هر کدام از نقطه‌های موجود در فضای حرکتی ماشین و در محدوده قطعه‌کار باشد. موقعیت این نقطه در مختصات محلی قطعه‌کار که مبدأ آن صفر قطعه‌کار است، تغییر می‌کند. از این رو لازم است در این نوع محورها، از تعریف قاب مختصاتی محلی استفاده شود. این قاب محلی می‌تواند معادل قاب R_f تعریف شده در محوره‌های حامل ابزار باشد و به همین دلیل R_W نامیده خواهد شد. هدف از تعریف این قاب، تعیین طول بازوهای مؤثر در خطای زاویه‌ای برای محوره‌های حامل قطعه‌کار می‌باشد. در بخش محوره‌های حامل ابزار، مشاهده گردید که در حالت خاصی از این نوع محورها موقعیت قاب‌های t و R_f نسبت به هم ثابت است (شکل ۷ و شکل ۷-۱). در محوره‌های حامل قطعه‌کار اغلب قاب W (معادل قاب t در ابزار) نسبت به مبنای خود R_W ثابت در نظر گرفته می‌شود. آنچه تغییر می‌کند مختصات نقطه مقصد است که مقادیر این تغییرات در قالب جابه‌جایی‌های اعمال شده توسط دستورات حرکتی از قبیل $G1, G2$ در متن برنامه NC و نسبت به قاب W ارائه می‌گردد. معیار فراخوانی مقادیر خطا از بانک اطلاعاتی خطاهای هندسی، مختصات نقاط مقصد در دستگاه مختصاتی ماشین می‌باشد. در شکل ۸ این دستگاه مختصاتی برای محور یک درجه آزادی نشان داده شده است. در این محور رابط $J1$ به‌روی ریل $Base1$ و دستگاه مختصاتی محلی R_W به‌روی نقطه میانی بند $J1$ قرار گرفته است. موقعیت مبدأ R_W معیار تعیین طول بازوهای خطای زاویه‌ای می‌باشد. موقعیت $J1$ در دستگاه مختصاتی $Base1$ برای ثبت و فراخوانی مقادیر خطاهای هندسی به‌کار گرفته می‌شود. نمایی از یک میز واقعی و نحوه قرارگیری قطعه‌کار به‌روی آن در شکل ۹ نشان داده شده است. در این شکل، قاب‌های مختصاتی در حالتی که قطعه‌کار از طریق یک محور به بدنه ماشین متصل است، نشان داده شده‌اند. مبدأ قاب W

به‌روی صفر قطعه‌کار منطبق است و در واقع قاب مختصاتی برنامه‌نویسی می‌باشد. جهت بررسی وضعیت خطا در هر کدام از نقاط مقصد حرکت ابزار لازم است مختصات این نقاط در دستگاه مختصاتی R_W تعیین گردند. p یک نقطه مقصد به‌روی قطعه‌کار و تعریف شده در قاب برنامه (W) است. فاصله این نقطه از قاب برنامه با x_p نشان داده شده است.



شکل (۸): ترکیب سینماتیکی محور یک درجه آزادی حامل قطعه‌کار.



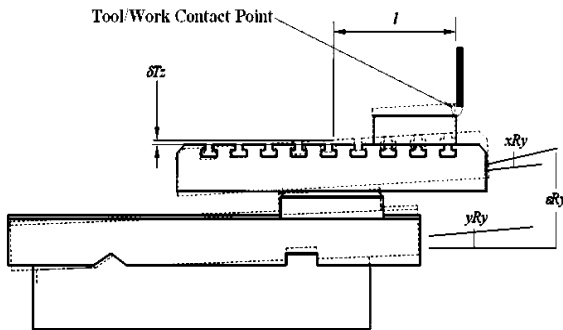
شکل (۹): محور یک درجه آزادی حامل قطعه‌کار و قاب‌های مختصاتی مربوطه.

عبارت ${}^W T_{R_W}$ است از طول بازوهای مؤثر برای خطاهای چرخشی در محور حامل قطعه‌کار و مطابق رابطه (۱۴) تعیین می‌گردد.

واقعی و نامی در موقعیت مورد نظر محاسبه می‌گردد و مطابق رابطه (۱۷) می‌باشد.

$$[E]_{Work} = (({}^{Base2}E_{Base1}, {}^{Base1}E_{Rw}) - I) \cdot {}^{Rw}T_{Base1} \cdot {}^{Base1}T_W \cdot P \quad (17)$$

در رابطه بالا، I ماتریس واحد و $[E]$ بردار خطای متناظر با موقعیت P می‌باشد. با ضرب ماتریس‌های انتقال همگن، خطاهای هندسی متناظر و هم‌جهت با هم جمع می‌شوند. در شکل ۱۱ به صورت شماتیک ترکیب خطاهای چرخشی و نحوه تأثیر آن در ایجاد بردار خطا نشان داده شده است.



شکل (۱۱): ترکیب خطاهای زاویه‌ای در محور حامل قطعه‌کار.

در این شکل، δTz مؤلفه Z از بردار برآیند خطاهای خطی محورهای وابسته و εRy برآیند خطاهای زاویه‌ای حول محور y می‌باشند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مطابق با رابطه (۱۸) در محورهای وابسته، مقادیر خطاهای هم‌راستا با هم به صورت زیر جمع می‌شوند:

$$\begin{aligned} \varepsilon Ry &= xRy + yRy, \\ \delta Tz &= xTz + yTz. \end{aligned} \quad (18)$$

۳-۵-۳- بردار برآیند خطا

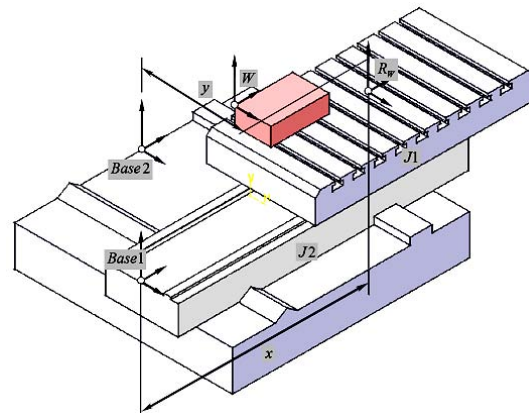
با محاسبه بردارهای خطا برای زنجیره‌های مجزای ابزار و قطعه‌کار و هم‌چنین بردار ناشی از خطای عدم تعامد بین محورهای حرکتی، در مجموع سه بردار خطای حجمی به‌دست می‌آید. بردار برآیند نهایی که در واقع اختلاف موقعیتی ابزار و قطعه‌کار در موقعیت نامی تعیین شده است، حاصل جمع این سه بردار خواهد بود. اگر ${}^R T_{tool}$ ماتریس نهایی جهت انتقال همگن از ابزار به مبنا، و ${}^R T_{Work}$ ماتریس انتقال همگن متناظر برای قطعه باشد، مقدار برآیند خطای

$${}^{Rw}T_W = {}^{Rw}T_{Base1} \cdot {}^{Base1}T_W = (-{}^{Base1}T_{Rw}) \cdot {}^{Base1}T_W \quad (14)$$

در این رابطه ${}^{Base1}T_W$ مختصات صفر قطعه‌کار و ${}^{Base}T_{Rw}$ مختصات قاب Rw در دستگاه مختصاتی ماشین می‌باشند. موقعیت واقعی نقطه p از رابطه (۱۵) محاسبه می‌گردد.

$$[P]_{Real} = {}^{Base1}E_{Rw} \cdot {}^{Rw}T_{Base1} \cdot {}^{Base1}T_W \cdot P \quad (15)$$

در رابطه بالا ماتریس انتقال ${}^{Base1}E_{Rw}$ حاوی پارامترهای خطای هندسی مربوط به بند $J1$ می‌باشد. اگر محور حامل قطعه‌کار ترکیبی از دو یا سه محور باشد، ماتریس‌های حاوی خطای هندسی بندهای متوالی در همدیگر ضرب شده و ماتریس انتقال خطا را تشکیل خواهند داد. نمونه‌ای از محورهای ترکیبی حامل قطعه‌کار در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در این شکل قطعه‌کار از طریق بند $J1$ و سپس $J2$ به بدنه متصل شده است. از این‌رو ماتریس انتقال همگن $J1$ قبل از ماتریس مربوط به $J2$ در بردارهای موقعیتی ضرب خواهد شد. رابطه (۱۶) موقعیت واقعی نقطه‌ای به مختصات نامی P تعریف شده در دستگاه مختصاتی قطعه‌کار را در سیستم دو محوری نشان می‌دهد. داشتن دو درجه آزادی به مفهوم وجود دو بند مؤثر در زنجیره سینماتیکی می‌باشد که هر کدام از این بندها خود شامل شش مؤلفه خطای هندسی خواهند بود.



شکل (۱۰): محور دو درجه آزادی حامل قطعه‌کار و قاب‌های مختصاتی مربوطه.

$$[P]_{Real} = {}^{Base2}E_{Base1} \cdot {}^{Base1}E_{Rw} \cdot {}^{Rw}T_{Base1} \cdot {}^{Base1}T_W \cdot P. \quad (16)$$

بردار خطای متناظر با مجموعه دو محوری، از تفاضل موقعیت

موقعیتی مطابق با رابطه (۱۹) خواهد بود.

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{bmatrix}^R + \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{bmatrix}^{Tool} + \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{bmatrix}^{Work} + \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{bmatrix}^{Squareness} \quad (19)$$

حجمی) در راستای عمود بر جهت حرکت ابزار ایجاد شوند. در چنین شرایطی مقایسه مؤثر مدل ثنوری و نتایج آزمون عملی توسط نمودار موقعیت - خطا فراهم شده و مقادیر خطای حجمی به سادگی با استفاده از یک سطح مبنا و کمپراتور^۲ دقیق قابل اندازه‌گیری خواهد بود (جدول ۱).

مقادیر پارامترهای ماشین‌کاری با انجام آزمون‌های متعدّد به نحوی تنظیم گردید که زبری سطح و آثار عواملی چون ارتعاشات و خطای ناشی از تغییر شکل ابزار در مقادیر خطاهای حجمی به حداقل ممکن برسد.

۴-۱- نمونه اول

مسیر حرکت ابزار در نمونه اول شامل حرکت در راستای محور X می‌باشد. مؤلفه‌های خطای هندسی متشکل از خطای خطی yTx ، خطای زاویه‌ای xRx و موقعیت ثابت این خطاها در موقعیت‌های مختلف از محور مذکور نمونه‌برداری شد. مقادیر ثبت شده در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

جدول (۱): مشخصات ابزار و پارامترهای ماشین‌کاری اعمال شده در آزمون عملی.

شرکت سازنده	FETTE
وضعیت براده برداری	Up Milling
سرعت چرخش (rpm)	800
ضخامت درگیری (mm)	1
عمق درگیری (mm)	8
پیشروی (mm/min)	50
طول برشی (mm)	11
قطر (mm)	10

با در دست داشتن بردار برآیند خطا، اختلاف موقعیت واقعی ابزار و قطعه‌کار در نقطه تماس مورد نظر $[e]$ تعیین می‌گردد. این اختلاف موقعیت به صورت برداری سه‌بعدی است که جهت و مقدار آن در کلیه نقطه‌های فضای ماشین‌کاری متفاوت بوده و به مقادیر مؤلفه‌های خطای هندسی ماشین‌ابزار وابسته است.

۳-۶- اندازه‌گیری خطاهای هندسی ماشین

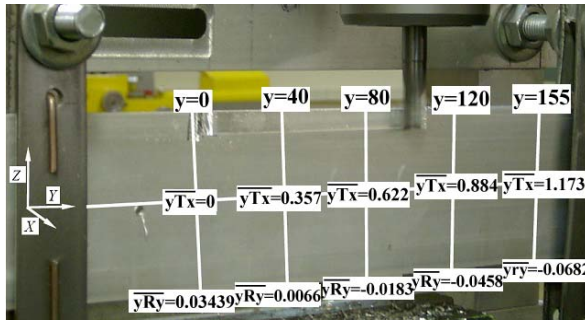
خطاهای موقعیتی برای کلیه محورهای حرکتی ماشین اعم از خطی و دورانی توسط تکنیک‌های نوری و تداخل‌سنجی انجام می‌شود. این فن‌آوری در قالب بسته‌های آزمون لیزر ارائه شده است که با اتصال به رایانه شخصی و حرکت محورها در فواصل مشخص، عمل داده‌برداری و مقایسه آن با طول موج لیزر را انجام و میزان خطاهای موقعیت دهی را ثبت می‌کند. علاوه بر خطاهای موقعیتی، خطاهای هندسی شامل عدم مستقیم بودن تعامد و خطاهای زاویه‌ای نیز با استفاده از آینه‌های مختلف این مجموعه قابل اندازه‌گیری می‌باشد. از طرفی خطاهای هندسی با ابزارهای مترولوژیکی متداول از قبیل گونیا و شمشه‌های دقیق گرانیته و چدنی، میکروسکوپ و سیم کشیده^۱ قابل انجام است. جزئیات مربوط به نحوه انجام آزمون‌ها و شرایط لازم در مراجع [۲۰-۱۹] ارائه شده است.

۴- ارزیابی

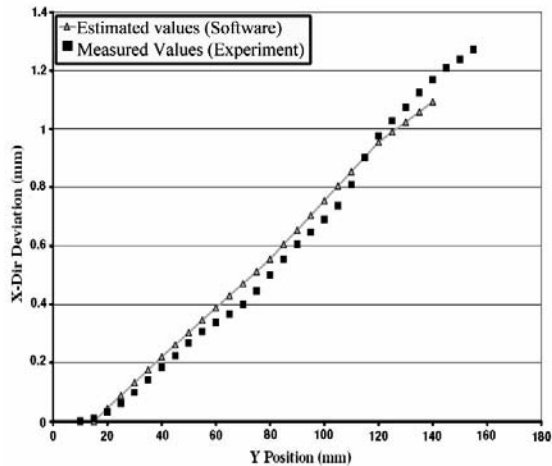
جهت حصول اطمینان از صحت روابط و مدل سینماتیکی ارائه شده برای تخمین خطاهای حجمی، نسبت به پیاده‌سازی عملی مدل به‌روی قطعه‌ای از جنس آلومینیوم توسط ماشین‌ابزار سه محوره DEKEL-FPM4A اقدام گردید. عملیات ماشین‌کاری در راستای یک خط راست انجام شد و پارامترهای خطای اعمال شده به‌روی ماشین‌ابزار و قطعه‌کار به نحوی انتخاب شدند که بردارهای برآیند (بردار خطای

خطاهای زاویه‌ای yRy مدل سازی گردید. مقادیر ثبت شده در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

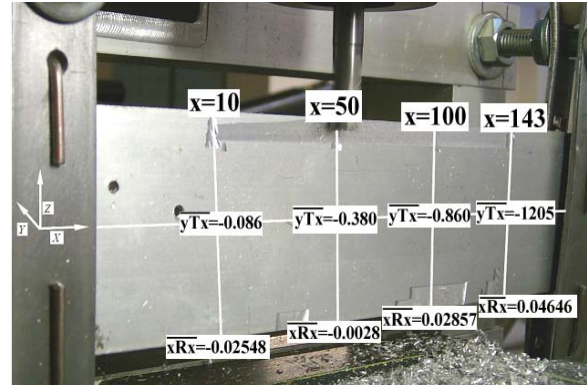
پارامترهای خطای اندازه‌گیری شده در این نمونه، وارد مدل سینماتیکی گردید و با مقادیری که از اندازه‌گیری مستقیم خطای برآیند به‌روی قطعه بدست آمده بود مقایسه شد. شکل ۱۵ نتایج این مقایسه را نشان می‌دهد. مقایسه نتایج آزمون‌های عملی و برآوردهای تئوری نمایانگر انطباق نزدیک و مناسب مدل خطای ارائه شده با شرایط واقعی ماشین‌ابزار می‌باشد.



شکل (۱۴): موقعیت و مقادیر خطای هندسی اندازه‌گیری شده به‌روی قطعه نمونه دوم (mm).

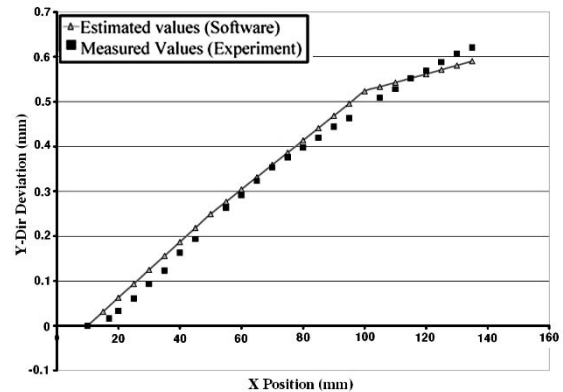


شکل (۱۵): مقایسه مقادیر خطاهای حجمی تخمین زده شده توسط مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمون‌های عملی.



شکل (۱۲): موقعیت و مقادیر خطای هندسی اندازه‌گیری شده به‌روی قطعه نمونه اول (mm).

خطاهای اندازه‌گیری شده در محورهای ماشین‌ابزار در مدل سینماتیکی وارد شد و مقادیر خطاهای حجمی در فاصله‌های ۵ میلی‌متری مسیر حرکت ابزار تخمین زده شدند. مقادیر واقعی خطاهای حجمی به‌روی قطعه‌کار و از طریق اندازه‌گیری مستقیم میزان انحراف از مستقیم بودن مسیر حرکت ابزار استخراج گردید. شکل ۱۳ مقایسه مقادیر حاصل از اندازه‌گیری‌های عملی و مقادیر تخمین زده شده توسط مدل را نشان می‌دهد.



شکل (۱۳): مقایسه مقادیر خطاهای حجمی تخمین زده شده توسط مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمون‌های عملی.

۴-۲- نمونه دوم

در نمونه دوم خطاهای هندسی در راستای دیگری نسبت به نمونه اول مورد بررسی قرار گرفت. در این حالت حرکت ابزار در راستای محور Y بوده و خطاهای خطی yTx در کنار

pp. 445-448, 1985.

4. Eman, K., Wu, B., and Devries, M. "A Generalized Geometric Error Model for Multi-axis Machines", J. CIRP Annals-Manufacturing Tech., Vol. 36, No. 1, pp. 253-256, 1987.
5. Kiridena, V.S.B. and Ferreira, P.M. "Kinematic Modeling of Quasi Static Errors of Three Axis Machining Centers", J. Machine Tools & Manufacture, Vol. 34, No. 1, pp. 85-100, 1994.
6. Kiridena, V.S.B. and Ferreira, P.M. "Parameter Estimation and Model Verification of First Order Quasi static Error Model for 3-axis Machining Centers". J. Machine Tools & Manufacture, Vol. 34, No. 1, pp. 101-125, 1994.
7. Kiridena, V.S.B. and Ferreira, P.M. "Computational Approaches to Compensating Quasi static Errors of Three-axis Machining", J. Machine Tools & Manufacture, Vol. 34, No. 1, pp. 127-145, 1994.
8. Lee, E.S., Suh, S.H., and Shon, J.W. "A Comprehensive Method for Calibration of Volumetric Positioning Accuracy of CNC-Machines", Int. J. Advanced Manufacturing Tech., Vol. 14, No. 1, pp. 43-49, 1998.
9. Kyoung, G.A. and Dong, W.C. "Proposition for a Volumetric Error Model Considering Backlash in Machine Tools", Int. J. Advanced Manufacturing Tech., Vol. 15, No. 8, pp.554-561, 1999.
10. Barakat, N.A., Elbestawi, M.A., and Spence, A.D., "Kinematical and Geometrical Error Compensation of a Coordinate Measuring Machine", Int. J. Machine Tools and Manufacture, Vol. 40, No. 6, pp. 883-850, 2000.
11. Okafor, A.C. and Ertekin, Y.M. "Derivation of Machine Tool Error Models and Error Compensation Procedure for Three-axis Vertical Machining Center, Using Rigid Body Kinematics", Int. J. Machine Tools and Manufacture, Vol. 40, No. 8, pp. 1199-1213, 2000.
12. Florussen, G.H.J., Delbressine, F.L.M., Van de Molengraft, M.J.G., and Schellekens, P.H.J. "Assessing Geometrical Errors of Multi-axis Machines by Three-dimensional Length Measurements", Measurement, Vol. 30, No. 4, pp. 241-255, 2001.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، مدل‌سازی ریاضی رفتار ماشین‌ابزار سه محوره مورد بررسی قرار گرفته و مدلی ویرایش شده بر اساس مبانی اولیه سینماتیک رباتیک و ماتریس‌ها انتقال همگن ارائه گردید. امکان پیاده‌سازی عملی به‌روزی ماشین‌ابزار، دقت بالا در تخمین مقادیر خطاهای حجمی، سادگی به‌کارگیری و انعطاف در مدل‌سازی انواع مختلف ترکیب‌بندی سه محوره از قابلیت‌های مدل ارائه شده می‌باشد. نتایج به‌دست آمده از آزمون‌های عملی، انطباق مناسبی با مدل تئوری دارد. در نظر گرفتن مسیر مستقیم در ماشین‌کاری قطعه نمونه آزمون عملی، تنها به دلیل قیاس مؤثر نتایج آزمون تئوری و عملی بوده و به‌هیچ‌عنوان از قابلیت مدل ارائه شده در تعیین خطاهای حجمی در کل فضای ماشین‌کاری نمی‌کاهد. از برآیند کار صورت گرفته می‌توان نتیجه گرفت که مبانی سینماتیک رباتیک توانسته است به سادگی و در عین حال با کارایی خوبی رفتار ماشین‌ابزار CNC حاوی خطاهای هندسی را مدل‌سازی نماید. چنین مدلی می‌تواند اطلاعات اولیه مورد نیاز در رویکرد جبران خارج از خط^۱ خطاهای هندسی ماشین‌ابزار را فراهم سازد. ارائه تصویری واقعی از عملکرد دقتی ماشین‌ابزار در مواردی چون جبران نرم‌افزاری خطای ماشین، تصمیم‌گیری درباره نحوه پیاده‌سازی تعمیرات ساخت‌افزاری به‌روزی ماشین‌ابزار و نیز تعیین دقت عملکرد ماشین‌ابزار در محدوده مختلف از فضای کاری ماشین‌سودمند خواهد بود.

مراجع

1. Leete, D.L., "Automatic Compensation of Alignment Errors in Machine Tools", J. Machine Tool Design and Research, Vol. 1, No. 4, pp. 293-324, 1961.
2. Hocken, R., Simpson, J.A., Borchardt, B., Lazar, J., Reeve, C., and Stein, P., "Three-dimensional Metrology", J. CIRP Annals-Manufacturing Tech., Vol. 26, No. 2, pp. 403-408, 1977.
3. Zhang, G., Veale, R., Charlton, T., Borchardt, B., and Hocken, R., "Error Compensation of Coordinate Measuring Machines", J. CIRP Annals-Manufacturing Tech., Vol. 34, No. 1,

13. Wang, S.M., Liu, Y.L., and Kang, Y., "An Efficient Error Compensation System for CNC Multi-axis Machines", *Int. J. Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, No. 11, pp. 1235-1245, 2002.
14. Wang, S.M., Yu, H.J., and Liao, H.W., "A New High-efficiency Error Compensation System for CNC Multi-axis Machine Tools", *Int. J. Advanced Manufacturing Tech.*, Vol. 28, No. 5-6, pp. 518-526, 2006.
15. Raksiri, C. and Parnichkun, M., "Geometric and Force Errors Compensation in a 3-axis CNC Milling Machine", *Int. J. Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, No's 12-13, pp. 1283-1291, 2004.
16. Ekinci, T.O. and Mayer, J.R.R., "Relationships Between Straightness and Angular Kinematic Errors in Machines", *Int. J. Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No's. 12-13, pp. 1997-2004, 2007.
17. Mize, C.D., and Ziegert, J.C., "Durability Evaluation of Software Error Correction on a Machining Center" *Int. J. Machine Tools and Manufacture*, Vol. 40, No. 10, pp. 1527-1534, 2000.
18. VDI/VDE 2617 "Accuracy of Coordinate Measuring Machines-Characteristic Parameters and their Checking Components of Measurement Deviation of the Machine", Part 3, pp. 22-33, 1989.
19. Schlesinger, G. "Testing Machine Tools, for the Use of Machine Tool Makers, Users, Inspectors and Plant Engineers", The Machinery Pub. Co., New York, 1961.
20. ISO 230-1 "Test Code for Machine Tools, Part 1: Geometric Accuracy of Machines Operating under No-Load or Finishing Conditions", 1996.