



Analysis of Geometrical Errors of XYZAC 5-Axis Milling Machine using BALLBAR Device



ARTICLE INFO

Authors

Shahabzadeh M.^{1*},
Jahedi R.²

¹ Islamic Azad University
Shiraz, Iran.

² Islamic Azad University
Shiraz, Iran.

* Correspondence

Address: Islamic Azad University
Shiraz, Iran.
shahabeaseman@gmail.com

How to cite this article

Shahabzadeh M. Jahedi R. Analysis of Geometrical Errors of XYZAC 5-Axis Milling Machine using BALLBAR Device. Proceedings of 3rd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2023;23(10):223-235.

ABSTRACT

In this research, errors and accuracy of a 5-axis machine tools are investigated using a balbar device. The focus is on the measurement of positional errors and rotational errors related to rotational axes. Therefore, first, using homogeneous transformation matrices and based on the kinematic chain of machine axes, a mathematical error modeling is done for each axis in order to get an overview of the impact of errors on machine operation. In the following, a method to measure these errors is proposed, and to validate this proposed method, its results are compared with a valid method. Homogeneous transformation matrices (HTMs) are used to create a machine tool model and generate bearing error diagrams due to machine tool geometric errors based on the given experimental design. Simulated payload trajectory patterns can be used to evaluate unique fault effects for detected faults and to diagnose machine tool conditions.

Keywords 5-Axis Machine Tools, Geometric Errors, BALLBAR Test, Machine Tools Accuracy

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه نامه مجموعه مقالات سومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته
مهر ۱۴۰۲، دوره ۲۳، شماره ۱۰، صفحه ۲۲۳-۲۳۵



تجزیه و تحلیل خطاهای هندسی ماشین فرز پنج محور با استفاده از دستگاه بالبار



چکیده

در این پژوهش به بررسی خطاها و دقت یک ماشین ابزار پنج محور با استفاده از دستگاه بالبار پرداخته می‌شود. تمرکز بر اندازه‌گیری خطاهای موقعیتی و خطاهای چرخشی مربوط به محورهای دورانی می‌باشد. بنابراین ابتدا با استفاده ماتریس‌های تبدیل همگن و بر اساس زنجیره سینماتیکی محورهای ماشین، یک مدل‌سازی ریاضی خطا برای هر محور انجام می‌شود تا یک دید کلی نسبت به تأثیر خطاها روی کارکرد ماشین به دست آید. در ادامه یک روش برای اندازه‌گیری این خطاها پیشنهاد می‌شود و برای اعتبار سنجی این روش پیشنهادی، نتایج آن با یک روش معتبر مقایسه می‌شود. ماتریس‌های تبدیل همگن برای ایجاد یک مدل ماشین ابزار و تولید نمودارهای خطای بالبار به دلیل خطاهای هندسی ماشین‌های ابزار و بر اساس طرح آزمایشی ارائه شده، استفاده می‌شوند. الگوهای مسیر حرکتی بالبار شبیه‌سازی شده را می‌توان برای ارزیابی اثرات خطای منحصربه‌فرد برای خطاهای شناسایی شده و تشخیص شرایط ماشین ابزار استفاده کرد.

مشخصات مقاله

نویسنده‌ها

محمد حسین شهاب زاده پورا^{۱*}
رضا جاهدی^۲

^۱ دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز
^۲ دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز

* نویسنده مسئول

آدرس: شیراز شهرک صدرا، پردیس
دانشگاه آزاد

shahabeaseman@gmail.com

کلیدواژه‌ها ماشین فرز پنج محوره، خطای هندسی، خطاهای ماشین ابزار، بالبار، دقت ماشین ابزار

۱- مقدمه

هنگام استفاده از یک ماشین ابزار ۵ محور بسیار حائز است که اطمینان حاصل شود که در محدوده تلورانس هندسی خود کار می‌کند. اما، منابع مختلفی از خطاها بر صحت کارکرد آن تأثیر می‌گذارد. آزمایش خطاهای آن‌ها با روش‌های فعلی به تجهیزات گران قیمت و زمان طولانی خواب ماشین برای اندازه‌گیری خطا نیاز دارد. بنابراین این انگیزه ایجاد می‌شود که یک روش ساده و سریع برای شناسایی و مشخص کردن خطاهای هندسی ماشین ابزارهای ۵ محور شناسایی شود [۱].

با استفاده از یک بالبار (DBB) روشی برای مشخص کردن خطاهای هندسی مستقل موقعیت محورهای چرخشی (PIGE) پیشنهاد شده است، که این خطا به دلیل نقص در هنگام مونتاژ اجزای ماشین ایجاد می‌شود. در این روش، یک بالبار با طول معمولی برای آزمایش موقعیت PIGE ها استفاده می‌شود درحالی‌که یک بالبار با میله افزایش طول برای آزمایش PIGE های چرخشی استفاده می‌شود. این امر باعث کاهش تعداد تنظیمات و زمان برای کالیبره کردن اجزای بالبار می‌شود و در نتیجه کارایی اندازه‌گیری را افزایش می‌دهد. یک روش ایجاد شده برای آزمایش همان PIGE ها استفاده می‌شود و از نتایج برای اعتبارسنجی روش توسعه یافته استفاده می‌شود.

از ماتریس‌های تبدیل همگن (HTMs) برای ایجاد یک مدل ماشین ابزار و تولید نمودارهای خطای بالبار به دلیل وجود PIGE های مختلف با توجه به نوع آزمون انجام شده استفاده می‌شوند. از الگوهای بالبار می‌توان برای ارزیابی خطاهای منحصربه‌فرد و تشخیص شرایط ماشین‌کاری ابزار استفاده کرد.

۱-۱- شرح مسأله

امروزه ساخت دقیق در واحدهای تولید به یک ضرورت تبدیل شده است. برای دستیابی به این امر، نیاز به قطعات با دقت بالا به دلایل زیر موردنیاز است [۲]:

- عملکرد و قابلیت اطمینان محصول بهتر
- قابلیت تعویض بهتر در طول فرآیند مونتاژ
- بازدهی بهتر به دلیل کاهش خرابی محصول

بنابراین، روش‌شناسی برای تولید اجزای دقیق، کارآمد و مقرون به صرفه موضوعی قابل توجه در حوزه توسعه تولید است. به دلیلی که ماشین‌کاری مهم‌ترین ابزار تولید است، ماشین ابزار به طور گسترده در بخش‌های مختلف صنایع، به عنوان مثال، صنایع هوافضا استفاده می‌شوند. با توجه به پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های تولید ماشین ابزار، ماشین ابزارهای فعلی می‌توانند به اتوماسیون بالایی با دقت هندسی و ابعادی موردنیاز دست یابند.

سیستم‌های راهنمای خطی با قابلیت روانکاری و موقعیت‌یابی بهتر بهینه‌سازی شده‌اند. قسمت‌های اسپیندل با سرعت بالا و ابزارهای برشی سخت‌کاری شده به طور گسترده برای ساخت دقیق

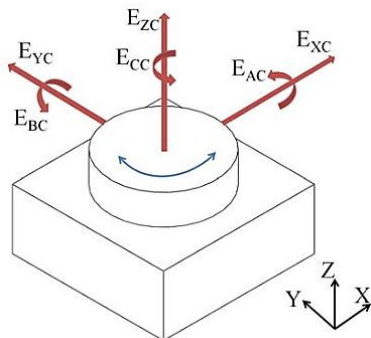
استفاده می‌شوند. از نظر نرم‌افزار کنترل، ماشین‌های دستی معمولی با ماشین‌های مدرن مجهز به کنترل‌کننده‌های کنترل عددی کامپیوتری (CNC) جایگزین شده‌اند. علاوه بر این، استراتژی‌های درون‌یابی پیشرفته (Interpolation) و تکنیک‌های جبران نرم‌افزاری به طور گسترده در دسترس هستند. نوآوری‌ها نه تنها در اصلاح اجزای ماشین ابزار، بلکه در توسعه و بهینه‌سازی توپولوژی آن‌ها نیز رخ می‌دهد. ماشین ابزارهای ۵ محوره نمونه‌ای عالی برای نشان دادن چنین پیشرفتی هستند. در مقایسه با ماشین ابزارهای ۳ محوره معمولی با سه محور خطی که به صورت متعامد پیکربندی شده‌اند، ماشین ابزارهای ۵ محوره دارای دو محور چرخشی اضافی هستند. محورهای چرخشی به منظور تنظیم جهت ابزار برش نسبت به قطعه کار طراحی شده‌اند. این به ابزار اجازه می‌دهد تا در زوایای مختلف نسبت به قطعه کار متمایل شود و بنابراین مسیرهای برش احتمالی بیشتری را بدون تنظیمات اضافی فراهم می‌کند. با توجه به درجات آزادی چرخشی اضافی، ماشین ابزارهای ۵ محوره مزایای قابل توجهی از جمله کیفیت ماشین‌کاری بهتر و راندمان ماشین‌کاری بالاتر را ارائه می‌دهند. آن‌ها قادر به تولید سطوح پیچیده مانند پروانه یک پمپ و سطوح دارای پیچیدگی‌های خاص بدون فیکسچر یا ابزار برش‌های خاص هستند و مهم‌تر از آن کیفیت پرداخت سطح بهتری را ارائه می‌دهند. بنابراین، آن‌ها به طور گسترده‌ای در انواع صنایع تولیدی، مانند هواپیماسازی، ساخت قالب، صنایع نفت، گاز، پتروشیمی، صنایع خوردویی و غیره استفاده می‌شوند [۳].

خطاهای ماشین ابزار در عدم دقت اجزای ماشین‌کاری شده تأثیر خواهد گذاشت. این خطاها در زمان ساخت، مونتاژ و کارکرد ماشین ابزار رخ می‌دهند. استفاده از ماشین ابزارهای معیوب بدون کالیبراسیون ممکن است به طور قابل توجهی بهره‌وری را کاهش دهد و باعث زیان اقتصادی شود. این موضوع در مورد ماشین ابزارهای ۵ محوره نیز صادق است [۴].

در ماشین ابزارهای ۵ محوره، دو محور چرخشی یک انعطاف‌پذیری را در ماشین‌کاری ایجاد می‌کنند، ولی سبب ایجاد خطاهای اضافی می‌شوند. بنابراین ماشین ابزارهای ۵ محوره در مقایسه با ماشین ابزارهای ۳ محوره منابع خطای بیشتری دارند. در نتیجه، به دلیل پیچیدگی در پیکربندی، تعیین منابع خطای یک ماشین ابزار ۵ محوره دشوارتر است [۵]. با این وجود، اطمینان از اینکه دقت موقعیت و چرخشی از نوک ابزار تا قطعه کار در محدوده تلورانسی موردنظر باقی بماند، بسیار مهم است، زیرا دقت هندسی و ابعادی اجزای مورد ماشین‌کاری را تعیین می‌کند. این یکی از دغدغه‌های اصلی سازندگان و کاربران ماشین ابزار است [۶].

بدین منظور، این پژوهش به بررسی خصوصیات خطای ماشین ابزارهای ۵ محوره می‌پردازد. به طور خاص‌تر، محورهای چرخشی به عنوان منبع خطای اصلی ماشین ابزارهای ۵ محوره به تفصیل مورد بحث قرار خواهند گرفت.

خطای هندسی وابسته به موقعیت چرخشی. برای یک شی که حول محور C می‌چرخد، شش خطای هندسی وابسته به موقعیت در شکل ۲ نشان داده شده است. برای همخوان بودن زیرنویس‌ها، خطاهای هندسی وابسته به موقعیت برای محوره‌های چرخشی به همان شکل محوره‌های خطی نام‌گذاری می‌شوند.

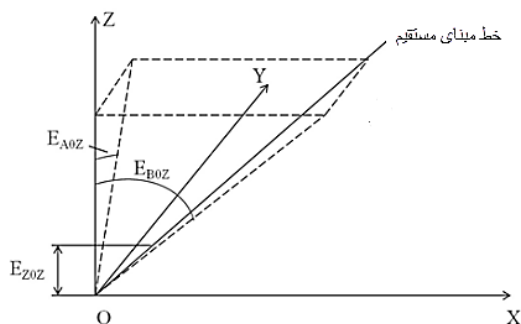


شکل ۲) خطاهای هندسی وابسته به موقعیت‌های مربوط به محور چرخشی C

خطاهای هندسی مستقل از موقعیت (PIGE) به دلیل نقص در فرآیند مونتاژ اجزای ماشین ابزار ایجاد می‌شوند. می‌توانند باعث انحرافات ثابت در موقعیت و جهت محورها شوند. با توجه به ماهیت PIGE ها، آنها بدون توجه به موقعیت‌هایی که در آن قرار می‌گیرند، به‌عنوان مقادیر ثابت مدل می‌شوند. در ادامه خطاهای محور خطی و دورانی شرح داده خواهد شد.

برای نشان دادن PIGE محوره‌های خطی مربوط به یک عضو متحرک (یک محور حرکتی) در ماشین ابزار که حرکتی خطی دارد از شکل ۳ استفاده می‌شود. خط مبنای مستقیم در شکل ۳ نشان‌دهنده میزان حرکت و مقدار انحراف از مسیر حرکتی تعیین شده است. این مقدار با استفاده از حداقل مربعات محاسبه می‌شود، که نمایشی از وضعیت واقعی محورها ارائه می‌دهد. خطاهای موقعیت و جهت با توجه به خط مبنای مستقیم و محوره‌های دستگاه مختصات تعیین می‌شوند. در شکل ۳ خطاها به‌صورت زیر هستند:

- E_{Z0Z} : خطای موقعیت صفر خطی
- E_{A0Z} : خطای جهت‌گیری محور Z در محور A;
- E_{B0Z} : خطای جهت‌گیری محور Z در محور B;



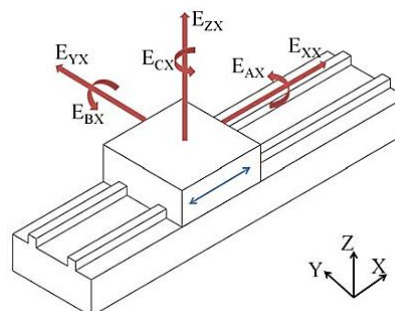
شکل ۳) PIGE های مربوط به محور خطی (محور Z)

۲-۱- روش حل

۱-۲-۱- خطاهای هندسی وابسته به موقعیت (PDGE)

بر اساس سینماتیک بدنه صلب، یک جسم صلب دارای شش درجه آزادی است که موقعیت و جهت آن را در فضای سه‌بعدی تعیین می‌کند. شش درجه آزادی شامل سه درجه انتقالی و سه درجه چرخشی است. به همین ترتیب، هر درجه آزادی دارای یک خطای جزئی است و مقدار آن وابسته به موقعیت است.

فرضیه رفتار جسم صلب بیانگر این است که خطاهای هندسی وابسته به موقعیت بر موقعیت جسم متحرک نسبت به یک مرجع از پیش تعریف شده وابسته است و تنها تابعی از حرکت اسمی آن است. اگر اجزای متحرک دارای نقص از نظر ساخت باشند، دقت حرکت کاهش می‌یابد و در نتیجه باعث ایجاد خطاهای هندسی وابسته به موقعیت می‌شود. شکل ۱ نمونه‌ای از یک سیستم حرکت خطی را نشان می‌دهد که جهت حرکت اسمی آن محور X است.



شکل ۱) خطاهای هندسی مستقل از موقعیت مربوط به یک سیستم حرکت خطی

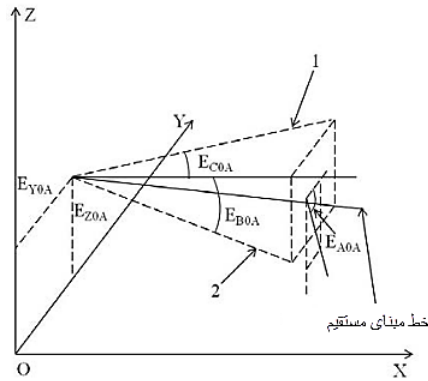
در این شکل خطاها به‌صورت زیر نام‌گذاری می‌شوند:

- E_{XX} : خطای موقعیت خطی در راستای محور X
- E_{YX} : خطای هم‌راستایی در راستای محور Y
- E_{ZX} : خطای موقعیت خطی در راستای محور Z
- E_{AX} : خطای زاویه‌ای حول محور A
- E_{BX} : خطای زاویه‌ای حول محور B
- E_{CX} : خطای زاویه‌ای حول محور C

خطای چرخشی حول هر محور به ترتیب با A، B و C مشخص می‌شود. شش خطای PDGE شامل دو خطای حرکت هم‌راستایی در جهات عمود بر جهت حرکت اسمی، یک حرکت خطی موقعیت‌یابی در امتداد جهت حرکت و سه حرکت خطی زاویه‌ای در حول هر محور مختصات است.

خطاهای هندسی وابسته به موقعیت برای محوره‌های چرخشی به دلیل الگوهای حرکتی چرخشی آنها، تعریف متفاوتی دارند. همچنین برای یک جسم در حال چرخش، شش درجه آزادی وجود دارد. بنابراین منجر به شش خطای هندسی وابسته به موقعیت می‌شود - سه خطای هندسی وابسته به موقعیت انتقالی و سه

روز زمان نیاز دارند، ساده‌تر است. همچنین دقت بالبار می‌تواند به یک میکرون برسد که از دستگاه‌های CNC معمولی دقیق‌تر است. در شکل ۵ مجموعه دستگاه بالبار به همراه ملحقات آن نشان داده شده است که محصول شرکت Renishaw می‌باشد.



شکل ۴) PIGE های مربوط به محور چرخشی A

بالبار اساساً یک وسیله اندازه‌گیری طول یک‌بعدی با یک کره دقیق در یک انتها و یک نیم‌کره فنجان‌ی شکل در انتهای دیگر است بین این دو یک میله کامپوزیتی و یک سنسور LVDT قرار گرفته است. که گاهی میله دو سرکروی نیز خوانده می‌شود. طول اسمی میله میانی کامپوزیتی ۱۰۰ میلی‌متر بین مرکز دو کره است. میله‌های افزایش طول به اندازه های ۵۰، ۱۵۰، ۳۰۰ میلی‌متر را می‌توان به صورت جداگانه یا ترکیبی برای ارائه شعاع آزمایش تا ۶۰۰ میلی‌متر استفاده کرد.

بالبار در ابتدا برای آزمایش ماشین‌ابزارهای ۳ محوره طراحی شد. محوره‌های X، Y و Z از طریق سه آزمایش دایره‌ای در سه صفحه اصلی دستگاه مختصات یعنی در سطوح XY، YZ و ZX مورد بررسی قرار می‌گیرند. یک نمودار شماتیک از مسیرهای آزمایش در شکل ۶ آورده شده است.



شکل ۵) دستگاه بالبار به همراه ملحقات

در یک ماشین فرز ۳ محوره عمودی، آزمون بالبار شامل یک آزمون دایره‌ای کامل در صفحه XY و دو آزمون نیم‌دایره‌ای در

زوایای بین تصویر کردن خط مبنای مستقیم بر روی صفحات YOZ/XOZ و محور Z دو خطی جهت‌گیری هستند که به‌عنوان خط‌های عمود بودن نیز شناخته می‌شوند. سومین جزء خطا، "E_{Z0Z}"، خطای موقعیت صفر خطی محور Z است. در یک سیستم کنترلی عددی (CNC)، این خطا را می‌توان نادیده گرفت زیرا این مورد در امتداد جهت حرکت اسمی محور رخ می‌دهد و می‌توان با تنظیم پارامترهای عددی جبران کرد. بنابراین از دید محوره‌ای خطی دو PIGE در نظر گرفته می‌شود.

طبق، PIGE ها با حرف "E" و به دنبال آن یک زیرنویس سه کاراکتری علامت‌گذاری می‌شوند. حرف اول در زیرنویس نام محوری است که به جهت خطا اشاره دارد. حرف دوم عدد 0 و حرف سوم محور حرکتی است.

PIGE های محوره‌ای چرخشی کمی پیچیده‌تر هستند زیرا نه تنها خطاهای جهت‌گیری بلکه خطاهای موقعیت نیز باید در نظر گرفته شوند. شکل ۴ ترکیب خطا را برای محور A نشان می‌دهد. هر محور چرخشی دارای پنج PIGE است که شامل دو خطای موقعیت، دو خطای چرخشی و یک خطای موقعیتی صفر زاویه‌ای است. خطای موقعیتی صفر زاویه‌ای را می‌توان از محاسبات حذف کرد زیرا می‌توان آن را در انکودر یا سیستم کنترل‌کننده عددی جبران کرد. علائم اختصاری خطاهای اشاره در شکل ۱-۸ به شرح زیر است.

E_{A0A} : خطای موقعیتی صفر زاویه‌ای

E_{Y0A} : خطای موقعیتی محور A در جهت محور Y

E_{Z0A} : خطای موقعیتی محور A در جهت محور Z

E_{Y0A} : خطای جهت‌گیری محور A در جهت محور B

E_{Z0A} : خطای جهت‌گیری محور A در جهت محور C

همان‌طور که توضیح داده شد، PIGE ها به‌عنوان خطاهای ثابت در فرآیندهای مدل‌سازی و اندازه‌گیری خطا در نظر گرفته می‌شوند. برای ماشین‌آلات سه محوره، PIGE برای هر محور خطی به‌عنوان سه خطای عمود برهم بین هر دو محور متعامد اسمی ساده‌سازی می‌شود. برای ماشین‌ابزارهای ۵ محوری، این ساده‌سازی قابل‌دستیابی است، اما به پیکربندی ماشین‌ابزار بستگی دارد. بنابراین در حالت کلی، PIGE های تحلیل‌شده در این پژوهش بر اساس نمایش‌های هندسی بالا هستند اما نه PIGE های ساده‌شده برای یک پیکربندی ماشین‌ابزار خاص.

۱-۲-۲-۱- اندازه‌گیری با بالبار

۱-۲-۲-۱- سیستم اندازه‌گیری بالبار

یک سیستم بالبار برای اندازه‌گیری خطای ماشین‌ابزار ۵ محوره انتخاب شده است. بالبار در مقایسه با سایر تجهیزات اندازه‌گیری ارزان است. نحوه کار بالبار در مقایسه با سایر تکنیک‌های اندازه‌گیری که برای تنظیم و اندازه‌گیری به ساعت‌ها یا حتی یک

یک ایده، شبیه‌سازی از آزمون برشی یک مخروط با استفاده از یک بالبار برای بررسی خطاهای حرکتی محورهای چرخشی از طریق حرکات پنج محور هم‌زمان ارائه شده است. لی و همکاران برای آزمایش عملکرد دینامیکی محورهای دوار، مسیر جدیدی را پیشنهاد کردند که محورهای A و C به‌طور هم‌زمان بر روی یک میز چرخشی مایل که نوعی از ماشین‌ابزار ۵ محوره است حرکت می‌کنند. آن‌ها تعدادی مقاله در مورد کاربردهای مختلف سیستم بالبار منتشر کردند. ایده استفاده از آزمون بالبار به روش مارپیچ نیمکره‌ای سه‌بعدی برای تجزیه و تحلیل دقت حجمی یک ماشین‌ابزار سه محوره پیشنهاد شد. یک آزمایش چهار مرحله‌ای برای ارزیابی PIGE های محورهای A و C یک ماشین‌ابزار ۵ محوری میز چرخشی گهواره‌ای ارائه شد. هشت PIGE با موفقیت آزمایش شدند و با کمک یک فیکسچر جدید، می‌توان آن خطاها را جبران کرد. این روش‌ها امکانی را برای اندازه‌گیری ماشین‌ابزار ارائه می‌دهند. با این حال چندین تنظیم در طول آزمایش مورد نیاز است که بر دقت اندازه‌گیری تأثیر می‌گذارد. روش جبران خطاها وابسته به یک وسیله اختصاصی است که به راحتی در دسترس نیست.

اکثر روش‌های ذکر شده در بالا نیاز به تنظیمات متعدد دارند، بنابراین زمان اندازه‌گیری طولانی‌تر می‌شود و خطاهای راه‌اندازی ایجاد می‌شود. روش ارائه شده در این پژوهش قادر است از ایرادات فوق جلوگیری کند.

تفسیر

ماتریس تبدیل همگن یک ماشین‌ابزار ۵ محوره در فرضیه سینماتیک اجسام صلب، شش درجه آزادی به هر جزء ماشین‌ابزار شامل سه درجه انتقالی و سه درجه دورانی اختصاص می‌یابد. بنابراین، یک HTM یک بدنه صلب به صورت [۱۷، ۱۸] داده می‌شود:

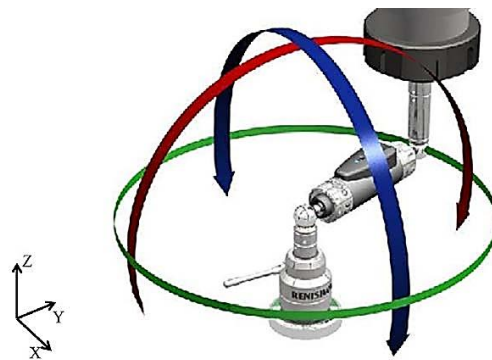
$${}^R T_C = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & | & T_{3 \times 1} \\ 0 & 0 & 0 & | & S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{ix} & r_{iy} & r_{iz} & t_x \\ r_{jx} & r_{jy} & r_{jz} & t_y \\ r_{kx} & r_{ky} & r_{kz} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

که در آن پارامتر R نشان‌دهنده دستگاه مختصات مرجع است که نتایج با توجه به آن بیان می‌شوند و زیرنویس C بیانگر دستگاه مختصاتی است که نتایج تبدیل می‌شوند. $R_{3 \times 3}$ نشان‌دهنده ماتریس حرکتی مختصات جسم صلب C با توجه به دستگاه مختصات R است. $T_{3 \times 1}$ بیانگر انتقال از دستگاه مختصات C به دستگاه مختصات مرجع R را نشان می‌دهد. ردیف پایین نشان‌دهنده ضریب مقیاس است. در تئوری اجسام صلب، $S = 1$ و به صورت [۱۰۰] داده می‌شود.

در بیان HTM داده شده، حرکات سینماتیک ایدئال محورهای خطی (X، Y و Z) با توجه به چارچوب مختصات مرجع R را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

صفحات YZ و XZ است. دلیل اینکه آزمایش‌ها در صفحات YZ و XZ فقط به صورت نیم‌دایره قابل انجام هستند، جلوگیری از برخورد بالبار و ماشین‌ابزار است. سه آزمایش در سه صفحه را می‌توان به‌طور متوالی انجام داد تا این آزمایش در یک فضای سه‌بعدی حجمی تشکیل شود. با استفاده از بالبار ۱۶ منبع خطا شامل خطاهای هندسی و دینامیکی را می‌توان برای سه محور خطی بر اساس نتیجه آزمایش حجمی شناسایی کرد. این امر با تجزیه و تحلیل نمودارهای خطاهای به دست آمده و مقایسه آن‌ها با نمودار خطاهایی که با شکل‌ها و نمودار استاندارد مشخص شده‌اند، به دست می‌آید. یک مثال معمولی اثر خطای عمود بودن دو محور متعامد اسمی است.

شکل‌ها و نمودار استاندارد مشخص شده‌اند، به دست می‌آید. یک مثال معمولی اثر خطای عمود بودن دو محور متعامد اسمی است. نمودار خطای بالبار برای آزمایش صفحه XY بدون خطا یک دایره کامل است، در حالی که به دلیل خطای عمود بودن، به شکل یک بیضی اریب تبدیل می‌شود (شکل ۶). محور بزرگ بیضی در جهت زاویه ۴۵ درجه یا ۱۳۵ درجه است که این امر بسته به علامت و اندازه خطای عمود بودن است. با مشاهده اختلاف بین محور بزرگ و محور اسمی می‌توان میزان خطا را مشاهده کرد.



شکل ۶) یک نمای شماتیک از سه صفحه آزمون بالبار

نمایش خطای عمود بر هم دو محور الف: خطای عمود بودن ۰/۱ درجه ب: خطای عمود بودن ۰/۱- درجه

اخیراً از سیستم بالبار برای ارزیابی عملکرد ماشین‌ابزارهای ۵ محوره استفاده شده است. خطاهای هندسی و دینامیکی به‌طور گسترده با مسیرهای آزمایشی مشخص مورد مطالعه قرار می‌گیرند. این تحقیق از حرکات هم‌زمان، شامل یک محور چرخشی و دو محور خطی شروع می‌شود، که حرکات هم‌زمان را در سه جهت مختلف (شعاعی، مماسی و محوری) تشکیل می‌دهند. هشت PIGE به‌طور مؤثر با روش پیشنهادی اندازه‌گیری می‌شود. با چند تغییر در نحوه آزمایش، شرایط خطای انواع مختلف ماشین‌ابزارهای ۵ محوره را می‌توان تخمین زد. این روش‌ها اکنون در پیش‌نویس استاندارد ISO در سال ۲۰۱۲ گنجانده شده است. با این حال، از آنجایی که محورهای خطی در اندازه‌گیری‌ها دخالت دارند، جدا کردن خطاهای محورهای خطی از نتایج دشوار است.

نشان داده می‌شود. بنابراین موقعیت و جهت واقعی میز دوار محور C را می‌توان با توجه به چارچوب مختصات مرجع R به صورت زیر بیان کرد:

$${}^R T_{C,actual} = E_{e_{xoc}} \cdot E_{e_{yoc}} \cdot E_{\theta_{xoc}} \cdot E_{\theta_{yoc}} \cdot {}^R T_{C,ideal}$$

از آنجایی که PIGE های چرخشی همگی کمتر از ۱ درجه هستند، فرض تقریب زاویه کوچک $\sin(\theta) \approx \theta$ ، $\cos(\theta) \approx 1$ ، زمانی که زاویه $\theta < 1^\circ$ اعمال می‌شود و توانهای دوم حذف می‌شوند. بنابراین ماتریس خطا برای میز چرخشی محور C را می‌توان به صورت زیر ساده کرد:

$${}^R T_{C,actual} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \theta_{yoc} & e_{xoc} \\ 0 & 1 & -\theta_{xoc} & e_{yoc} \\ -\theta_{yoc} & \theta_{xoc} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta_c & -s\theta_c & 0 & C_x \\ s\theta_c & c\theta_c & 0 & C_y \\ 0 & 0 & 1 & C_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} c\theta_c & -s\theta_c & & \\ \theta_{xoc}\theta_{yoc}c\theta_c + s\theta_c & -\theta_{xoc}\theta_{yoc}s\theta_c + c\theta_c & & \\ -\theta_{yoc}c\theta_c + \theta_{xoc}s\theta_c & \theta_{yoc}s\theta_c + \theta_{xoc}c\theta_c & & \\ 0 & 0 & & \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \theta_{yoc} & C_x + \theta_{yoc}C_z + e_{xoc} \\ -\theta_{xoc} & \theta_{xoc}\theta_{yoc}C_x + C_y - \theta_{xoc}C_z + e_{yoc} \\ 1 & -\theta_{yoc}C_x + \theta_{xoc}C_y + C_z \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

HTM ها امکان ترکیب عدم دقت یک محور متحرک را با حرکت اسمی سینماتیکی آن فراهم می‌کند. بنابراین ساختار ماشین ابزار می‌تواند به یک سری HTM تجزیه شود و موقعیت نسبی واقعی و جهت هر محور متحرک را توصیف کند. طبق [۱۷، ۱۸، ۲۱]، اگر n جسم صلب به صورت سری به هم وصل شوند و HTM های نسبی بین هر دو محور متوالی مشخص باشند، وضعیت نوک ابزار (دستگاه مختصات n ام) نسبت به دستگاه مختصات صفرام می‌تواند با ضرب متوالی تمام HTM ها به دست می‌آید:

$${}^0 T_n = \prod_{i=1}^n ({}^{i-1} T_i) = {}^0 T_1 {}^1 T_2 {}^2 T_3 \dots {}^{n-1} T_n \quad (1-3)$$

که در آن بیانگر ${}^0 T_n$ (n = 0; 1; 2; ...; n) بیانگر ماتریس تبدیل مختصات تبدیل از دستگاه مختصات n-1 به دستگاه مختصات n است.

$${}^R T_{X,ideal} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_m + X_x \\ 0 & 1 & 0 & X_y \\ 0 & 0 & 1 & X_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^R T_{Y,ideal} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & Y_x \\ 0 & 1 & 0 & Y_m + Y_y \\ 0 & 0 & 1 & Y_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^R T_{Z,ideal} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & Z_x \\ 0 & 1 & 0 & Z_y \\ 0 & 0 & 1 & Z_m + Z_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

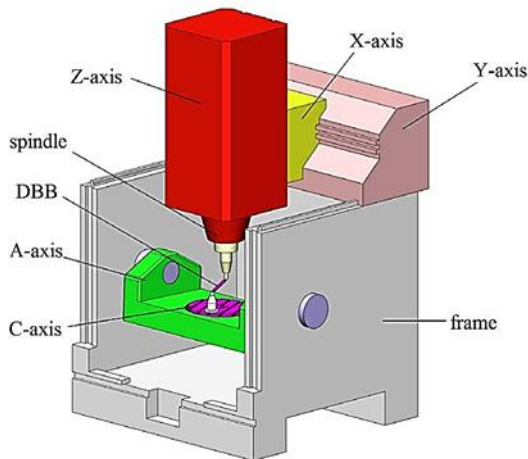
که در آن X_m ، Y_m و Z_m نشان‌دهنده موقعیت خطی سینماتیکی محورهای X، Y و Z با توجه به سیستم مختصات مرجع R هستند. X_x ، Y_y و X_z جابجایی‌های ثابت در جهت‌های X، Y و Z هستند. مبدأ سیستم‌های مختصات محور X نسبت به سیستم مختصات مرجع R، به ترتیب نمادهای مشابه برای Y_x ، Y_y و Y_z در ${}^R T_{Y,ideal}$ و Z_x ، Z_y و Z_z در ${}^R T_{Z,ideal}$ استفاده می‌شود. به طور مشابه، HTM های محورهای چرخشی (A، B و C) عبارتند از:

$${}^R T_{A,ideal} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & A_x \\ 0 & \cos \theta_a & -\sin \theta_a & A_y \\ 0 & \sin \theta_a & \cos \theta_a & A_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^R T_{B,ideal} = \begin{bmatrix} \cos \theta_b & 0 & \sin \theta_b & B_x \\ 0 & 1 & 0 & B_y \\ -\sin \theta_b & 0 & \cos \theta_b & B_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^R T_{C,ideal} = \begin{bmatrix} \cos \theta_c & -\sin \theta_c & 0 & C_x \\ \sin \theta_c & \cos \theta_c & 0 & C_y \\ 0 & 0 & 1 & C_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

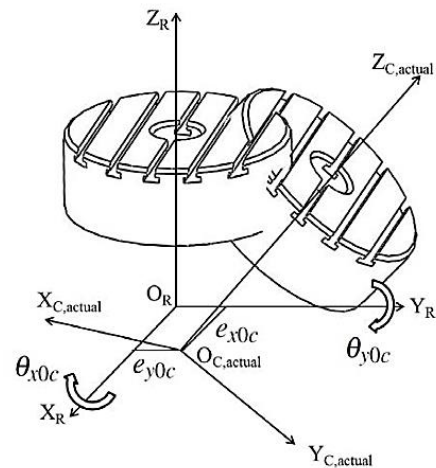
جایی که θ_a ، θ_b و θ_c ، به ترتیب موقعیت‌های زاویه‌ای سینماتیکی محورهای A، B و C نسبت به سیستم مختصات مرجع R هستند. A_x ، A_y و A_z ، به ترتیب جابجایی‌های ثابت در جهت‌های X، Y و Z مبدأ سیستم‌های مختصات محور A نسبت به سیستم مختصات مرجع R هستند. نمادهای مشابه برای B_x ، B_y و B_z در ${}^R T_{B,ideal}$ و C_x ، C_y و C_z در ${}^R T_{C,ideal}$ استفاده می‌شود. موقعیت و میزان چرخش واقعی محورها به دلیل PIGE ها تحت تأثیر قرار می‌گیرند. برای شناسایی واضح همه منابع خطا، HTM هر جزء یا محوری که با سروو موتور حرکت می‌کند به عنوان مضاربی از HTM های اولیه، که شامل HTM های پارامترهای سینماتیکی و PIGE ها است بیان می‌شود. به عنوان مثال، میز چرخشی محور C به طور اسمی حول خط مرکزی محور C می‌چرخد و موقعیت و جهت آن تحت تأثیر دو خطای موقعیتی e_{xoc} و e_{yoc} دو خطای چرخشی θ_{xoc} و θ_{yoc} قرار می‌گیرد. PIGE های محور C را می‌توان در شکل ۳-۱ مشاهده کرد که دستگاه مختصات میز محور C در دو دستگاه مختصات که یکی دستگاه مختصات مرجع O_R است و دیگری دستگاه مختصات واقعی $O_{C,actual}$



شکل ۸) ساختار سینماتیک ماشین ابزار

شکل ۸ ساختار سینماتیک ماشین ابزار را با دستگاههای مختصات الحاق شده بر روی اجزای مختلف ماشین ابزار نشان می‌دهد. شکل ۹ موقعیت نسبی بین هر دو دستگاه مختصات مجاور را نشان می‌دهد. زنجیره سینماتیکی متشکل از اتصالات حرکت خطی و چرخشی به صورت متوالی است. انتهای زنجیره سینماتیک نوک ابزار در ناحیه اسپیندل است (مرکز ابزار گیر اسپیندل). قسمت مخروطی ابزار به اسپیندل متصل شده و اسپیندل بر روی اسلاید محور Z نصب شده است. اسلاید محور Z به صورت عمودی نسبت به اسلاید محور X حرکت می‌کند که نسبت به اسلاید محور Y به صورت عمودی حرکت می‌کند. اسلاید محور Y یک حالت دروازه‌ای متحرک در سراسر بدنه اصلی دستگاه است که توسط دو عدد لینیر گاید موازی پشتیبانی می‌شود. انتهای دیگر زنجیره سینماتیکی از کره اتکا متصل به میز چرخشی محور C شروع می‌شود. کره اتکا با میز دوار حول خط مرکزی محور C می‌چرخد. میز چرخشی محور C روی محور گهواره‌ای A طراحی شده است که با استفاده از مکانیسمی خاص نصب می‌شود.

مدل‌سازی با تعریف دستگاه مختصات مرجع R شروع می‌شود. نقطه‌ای که محورهای A و C به طور اسمی باهم تلاقی می‌کنند به عنوان مبدأ دستگاه مختصات مرجع O_R انتخاب می‌شود. این نقطه مرکز دوران نامیده می‌شود.



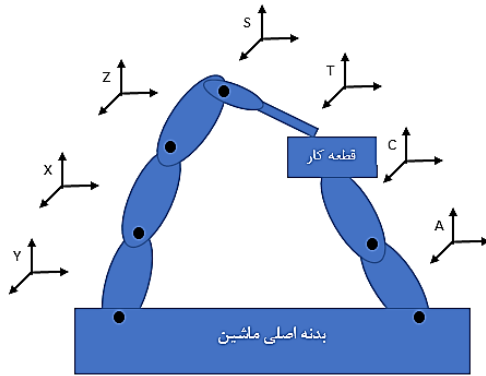
شکل ۷) بستر آزمایش مورد استفاده در این مطالعه

ارزیابی خطا در آزمون‌های بالبار پس از شناسایی HTM ها برای هر محور جداگانه، گام بعدی ساختن مدل ماشین ابزار با آن‌هاست. شکل ۷ بستر آزمایش مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد، یک ماشین ابزار ۵ محوره AWEA FMV99.

یک ماشین ابزار چرخشی ۵ محوره میز چرخشی AWEA FMV99. از سه محور خطی X, Y, Z و دو محور چرخشی A و C تشکیل شده است که به ترتیب چرخش حول محورهای X و Z هستند. این نوع ماشین ابزار ۵ محوره را می‌توان ترکیبی از یک ماشین ابزار ۳ محوره پیکربندی شده در یک سیستم مختصات دکارتی استاندارد و یک میز چرخشی گهواره‌ای در قسمت پایینی بدنه دستگاه مشاهده کرد. برای تجزیه تحلیل یک ماشین ابزار از زنجیره سینماتیکی که بین اجزا وجود دارد استفاده می‌شود. برای درک بهتر زنجیره سینماتیکی در شکل ۸ زنجیره سینماتیکی یک ماشین ابزار ۵ محوره A/C نشان داده شده است. که نحوه قرارگیری ابزار، قطعه کار و سایر اجزا محورها و نحوه ارتباط بین آن‌ها مشخص شده است. راستای جابجایی هر محور با یک دستگاه مختصات نشان داده شده است. ابزار براده برداری به سه محور خطی متصل و در نهایت به بدنه ماشین متصل می‌شود. قطعه کار از طریق دو محور چرخشی به بدنه ماشین متصل می‌شود تا زنجیره سینماتیکی کامل شود.

زنجیره سینماتیکی یک ماشین ابزار ۵ محوره A/C

نمای شماتیک ساختار ماشین ابزار ۵ محوره AWEA FMV99



شکل ۱۱) نجیره سینماتیکی یک ماشین ابزار ۵ محور C/A

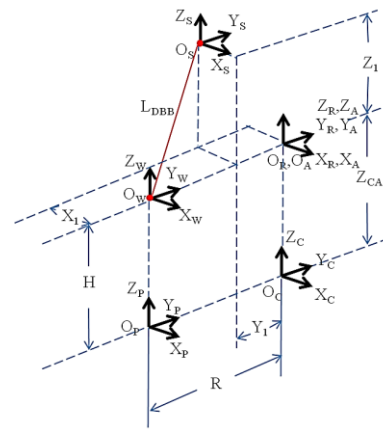
کره اتکا بالبار $O_P O_W$ در شکل‌های ۱۰ و ۱۱) به سطح میز چرخشی محور C متصل می‌شود و دستگاه مختصات آن تعیین می‌شود که همان ارتفاع Z را با O_C نسبت به دستگاه مختصات مرجع R داشته باشد. اما، موقعیت‌های X و Y به تنظیمات آزمایش وابسته هستند، زیرا هنگام آزمایش محوره‌های مختلف، کره اتکا در موقعیت‌های متفاوت قرار می‌گیرد. به عنوان مثال، فاصله بین O_P و O_C در جهت Y در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ برابر با R است. دستگاه مختصات قطعه کار W به مرکز کره اتکا اختصاص داده می‌شود. فاصله از مرکز کره اتکا تا پایین کره اتکا در امتداد کره اتکا، یعنی $O_P O_W$ در شکل ۱۰ و ۱۱ با H نشان داده می‌شوند.

روابط بین دستگاه‌های مختصات مختلف در این حالت، محوره‌های خطی X، Y و Z بدون خطا در نظر گرفته می‌شوند، زیرا محوره‌های خطی با روش‌های موجود به راحتی قابل اندازه‌گیری هستند و با کنترل‌کننده‌های CNC فعلی جبران می‌شوند. بنابراین تنها موقعیت ابزار فنجان‌ی شکل اسپیندل با توجه به دستگاه مختصات مرجع R در این مدل ماشین‌ابزار در نظر گرفته شده است.

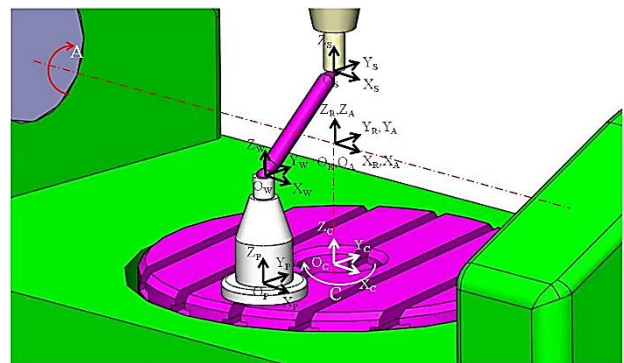
خطاها در ابزار فنجان‌ی شکل و کره اتکا در مرحله مدل‌سازی در نظر گرفته نمی‌شوند زیرا می‌توان آن‌ها را در فرآیند محاسبه خطا حذف یا جبران کرد. بنابراین خطاهای این دو در موقعیت در مراحل مدل‌سازی در نظر گرفته نمی‌شوند.

با توجه به ساختار سینماتیکی و ابعاد ارائه شده در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، HTM‌ها برای هر جزء در زنجیره سینماتیک را می‌توان به صورت زیر به دست آورد. HTM میز گهواره‌ای محور A حاصل ضرب یک HTM برای PIGE‌ها و یک HTM برای چرخش سینماتیک حول محور A است.

جایی که θ_a موقعیت زاویه‌ای سینماتیک گهواره‌ای محور A است e_{y0a} و e_{z0a} دو موقعیت محور A در جهت Y و Z هستند. θ_{y0a} و θ_{z0a} دو جهت‌گیری محور A به ترتیب در مورد محوره‌های Y و Z هستند.

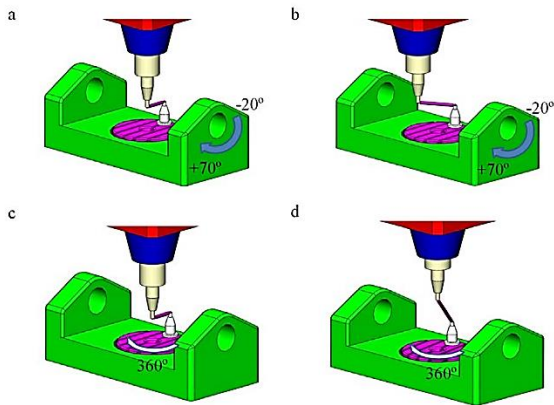


شکل ۹) موقعیت نسبی بین هر دو دستگاه مختصات مجاور



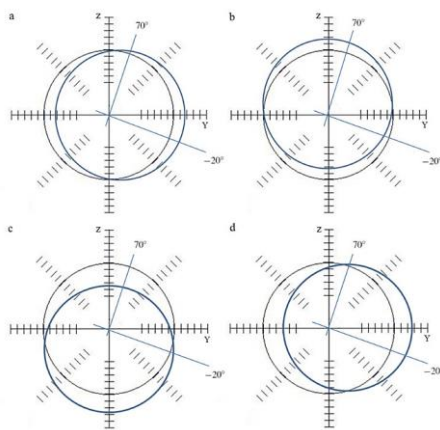
شکل ۱۰) موقعیت دستگاه مختصات برای اجزای زنجیره سینماتیک

محوره‌های X، Y و Z دستگاه مختصات مرجع موازی با جهت حرکت اسلایدهای X، Y و Z انتخاب می‌شوند. هنگامی که میز گهواره‌ای محور A در حالت کاملاً افقی تنظیم می‌شود (موقعیت زاویه‌ای که توسط سرو موتور کنترل می‌شود $\theta_A = 0$)، دستگاه مختصات محور A با دستگاه مختصات R بر هم منطبق هستند. دستگاه مختصات میز چرخشی محور C به آن الحاق می‌شود که سطح میز محور C، با مبدأ O_C دارای همان مختصات X و Y با O_R در دستگاه مختصات مرجع R است. فاصله بین O_C و O_R در امتداد جهت محور Z در چارچوب مختصات مرجع R برابر با Z_{CA} است. مرکز ابزار در اسپیندل به عنوان مبدأ دستگاه مختصات اسپیندل S انتخاب شده است. دستگاه مختصات دارای افست‌های X_1 ، Y_1 و Z_1 به ترتیب در جهت X، Y و Z دستگاه مختصات مرجع R است.

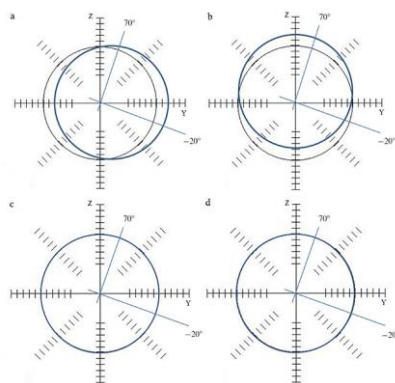


شکل ۱۲) چهار مرحله آزمون. (الف) آزمون محور A بدون میله افزایش طول. (ب) آزمون محور A با میله افزایش طول. (ج) آزمون محور C بدون میله افزایش طول. (د) آزمون محور C با میله افزایش طول

شکل‌های ۱۳ و ۱۴ الگوهای ردیابی بالبار را نشان می‌دهند که توسط PIGEs مختلف دو مرحله آزمایش محور A تحت تأثیر قرار گرفته‌اند.



شکل ۱۳) الگوهای ردیابی خطای بالبار آزمون محور A بدون میله افزایش طول ناشی از (الف) e_{y0c} , (ب) e_{z0a} , (ج) e_{y0a} و (د) θ (div=۵ میکرومتر).



شکل ۱۴) الگوهای ردیابی خطای بالبار آزمایش محور A با میله افزایش طول ناشی از (الف) e_{y0c} , (ب) e_{z0a} , (ج) e_{y0a} و (د) θ (div=۵ میکرومتر)

$${}^R T_A = \begin{bmatrix} 1 & -\theta_{z0a} & \theta_{y0a} & 0 \\ \theta_{z0a} & 1 & 0 & e_{y0a} \\ -\theta_{y0a} & 0 & 1 & e_{z0a} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_a & -\sin \theta_a & 0 \\ 0 & \sin \theta_a & \cos \theta_a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (۳-۷)$$

به‌طور مشابه، HTM میز چرخشی محور C به‌صورت زیر است:

$${}^R T_C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \theta_{y0c} & e_{x0c} \\ 0 & 1 & -\theta_{x0c} & e_{y0c} \\ -\theta_{y0c} & \theta_{x0c} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_c & -\sin \theta_c & 0 & 0 \\ \sin \theta_c & \cos \theta_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -Z_{CA} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (۳-۸)$$

که در آن θ_c موقعیت زاویه‌ای سینماتیکی میز دوار محور C است. Z_{CA} فاصله بین O_P و O_C است. e_{y0c} و e_{x0c} دو موقعیت محور C در جهت X و Y هستند. θ_{y0c} و θ_{x0c} دو چرخشی محور C به ترتیب در مورد محورهای X و Y هستند. تبدیل از دستگاه مختصات محوری P به دستگاه مختصات چرخشی محور C به‌صورت زیر ارائه می‌شود:

$${}^C T_P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -R \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (۴-۳)$$

که در آن R فاصله بین O_P و O_C در جهت Y سیستم مختصات محور C است. موقعیت O_W در دستگاه مختصات محوری P است.

$${}^P V_{OW} = [0 \ 0 \ H \ 1]^T (۵-۳)$$

و موقعیت O_S در دستگاه مختصات مرجع R:

$${}^R V_{OS} = [-X_1 \ 0 \ -Y_1 \ -Z_1 \ 1]^T (۶-۳)$$

با توجه به، یک زنجیره سینماتیک بسته را می‌توان به‌عنوان یک "گراف تبدیل" نشان داد (شکل ۱۲). هر خط عمودی کوتاه نشان‌دهنده یک دستگاه مختصات است که بر روی اجزای ماشین انتخاب شده در زنجیره سینماتیکی الحاق شده است. فلشی که از یک خط عمودی به خط دیگر اشاره می‌کند، نشان‌دهنده تبدیل از یک مختصات به مختصات بعدی است. بنابراین موقعیت نوک ابزار با توجه به سیستم مختصات مرجع R را می‌توان بر اساس HTM های داده شده و نمودار تبدیل به دست آورد.

بر اساس چهار مرحله آزمون پیشنهادی، برخی از مشخصات کلیدی ماشین ابزار و بالبار و همچنین شرایط شبیه‌سازی در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱) پارامترهای شبیه‌سازی

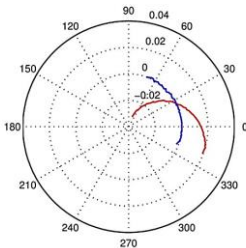
مقدار	پارامتر
۱۰۰	طول اسمی بالبار (mm)
۱۵۰	طول اسمی بالبار با میله افزایش طول (mm)
۱۰	e_{z0a} , e_{y0a} , e_{x0c} , e_{y0c} (میکرومتر)
0.01	θ_{z0a} , θ_{y0a} , θ_{y0c} , θ_{x0c} (درجه)
100	شعاع مورد آزمایش (mm)
75	فاصله بین O_C و O_{RZCA} (mm)
75	فاصله مرکز کره اتکا تا کف میز (H)

چهار مرحله روش پیشنهادی در شکل ۳-۷ نشان داده شده است.

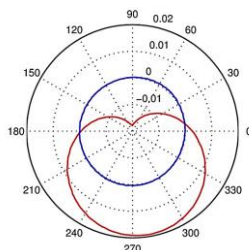
طول) از محورهای مختلف مشابه است، از این رو روش زیر را می‌توان برای هر دو محور اعمال کرد. در اینجا محور A برای نشان دادن استخراج خطاهای موقعیت انتخاب شده است. برای آزمایش محور C بدون میله افزایش طول این روش با یک تغییر ساده صفحه آزمایش از YZ به XY نیز معتبر است.

مرحله اول شامل یک حرکت ۱۱۰ درجه بالبار است. داده‌های اندازه‌گیری شده بالبار، حاصل فواصل بین موقعیت کره نسب شده در اسپیندل و کره بسته‌شده روی میز است. مسیر حرکتی بالبار، که توسط دو کره تشکیل شده است، در یک صفحه باقی می‌ماند، و یک حرکت دایره‌ای در یک صفحه انجام می‌شود. مسیر حرکتی بالبار به خاطر خطای اثر موقعیت و چرخش PIGE ها از مرکز اسمی خود فاصله می‌گیرد.

برای روش پیشنهادی که بر روی یک ماشین ابزار ۵ محوری AWEA FM99U آزمایش شده است. یک حرکت زاویه به مقدار زیاد قبل و بعد از شروع کمان جمع‌آوری داده‌ها در همه آزمون‌ها ارائه شده است. هدف از این حرکت زاویه‌ای ابتدایی و انتهایی این است که به ماشین اجازه می‌دهد قبل از شروع به حرکت بالبار در زمان پیمایش حرکت دایره‌ای و جمع‌آوری داده، شتاب موردنیاز جهت رسیدن به میزان پیشروی موردنیاز قبل از شروع ثبت داده و بعد از پایان ثبت داده را می‌دهد. بنابراین برای آزمون‌های محور C، زاویه ۴۵ درجه توصیه شده اعمال شد. باین‌حال، برای آزمایش‌های محور A، از آنجایی‌که بالبار فقط در یک قوس ۹۰ درجه حرکت می‌کند، زوایای بیش‌ازحد بزرگ دیگر امکان‌پذیر نیست. شکل ۱۶ نتیجه آزمایش محور A با جبران سازی و بدون جبران سازی آورده شده است. همچنین شکل ۱۷ نتیجه آزمون محور C با جبران سازی و بدون جبران سازی آورده شده است.



شکل ۱۶) نتیجه آزمایش محور A با جبران سازی (آبی) و بدون جبران سازی (قرمز) (اعداد به میلی‌متر هستند)



شکل ۱۷) نتیجه آزمون محور C با جبران سازی (آبی) و بدون جبران سازی (قرمز) (اعداد به میلی‌متر هستند)

برای شناسایی و مشخص کردن PIGE محورهای چرخشی یک ماشین ابزار ۵ محوره، یک رویکرد اندازه‌گیری با استفاده از یک بالبار در این بخش ارائه شده است. شکل ۱۵ نمای کلی ماشین ۵ محور مورد آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵) نمای کلی ماشین ۵ محور مورد آزمایش

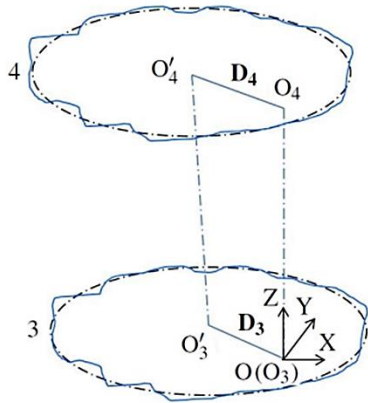
ایده استفاده از یک بالبار با و بدون میله افزایش طول برای تعیین PIGE های یک محور چرخشی در دو مرحله در بخش قبلی ارائه شده است. برای اهداف راستی آزمایشی، یک مدل آزمایشی منتشر شده برای آزمایش همین دستگاه ارائه شده است. PIGE ها با یک بالبار با نتایج به دست آمده در فصل‌های قبلی مقایسه شدند. اثربخشی روش منتشر شده را می‌توان از تفاوت بین نمودارهای خطای بالبار با و بدون جبران PIGE های شناسایی شده مشاهده کرد.

آزمون چهار مرحله‌ای و تنظیمات آن در این بخش توضیح داده شده است. آزمایش در چهار مرحله، دو مرحله برای هر محور، انجام شد. هنگام آزمایش محور A، دو موقعیت محوری ۱ و ۲ که با توجه به صفحه YZ نسبت به RCS متقارن هستند به ترتیب برای مراحل اول و دوم انتخاب شدند. کره اتکا (چرخش گاه) به میز گهواره‌ای محور A وصل شد تا از مبدأ RCS دور باشد. ابزار فنجان‌ی شکل مستقر در اسپیندل با محور A تراز شد و دارای همان مختصات X به‌عنوان مرکز فنجان‌ی ابزار محوری بود. در طول هر دو اندازه‌گیری، ابزار فنجان‌ی شکل در اسپیندل و در یک راستا با محور اسمی A نگه‌داشته شد، درحالی‌که کره اتکا (چرخش گاه) با میز محور A حول محور A می‌چرخد. فقط محور A در طول آزمایش چرخید و ارزیابی دقیقی از موقعیت PIGE های محور A ارائه داد.

از آنجایی‌که دقت هر دو (ابزار فنجان‌ی شکل و کره اتکا) مستعد خطا است، کالیبراسیون ابزار فنجان‌ی شکل پس از تنظیم موقعیت‌های محوری انجام شد.

تجزیه و تحلیل خطا روش پیشنهادی در این پژوهش

برای آزمون‌های با و بدون میله افزایش طول، فرآیندهای مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل خطاها متفاوت است. باین‌حال، تجزیه و تحلیل برای یک نوع آزمایش (با یا بدون میله افزایش



شکل ۱۹) دو مسیر آزمایش‌های محور C در موقعیت‌های ۳ و ۴

روش پیشنهادی بر روی همان ماشین‌ابزار ۵ محوری AWEA FMV99 با شرایط آزمایش مشابه اجرا شد. مشخصات آزمایش در جدول ۴ آورده شده است. آزمون‌های چهار مرحله‌ای پس از مرحله گرم کردن ۲۰ دقیقه‌ای ماشین‌ابزار انجام شد. نتایج پس‌ازاینکه تکرارپذیری آزمون در حد تلورانس بود (۱ میکرومتر برای PIGE های موقعیت و ۱۰۰ ثانیه برای PIGE های چرخشی) ثبت شد. نتایج در جداول ۵ و ۶ آورده شده است. شکل ۲۰ و ۲۱ الگوهای ردیابی بالبار را قبل و بعد از جبران نشان می‌دهد.

جدول ۴) مشخصات آزمون بالبار

مقادیر	پارامترها
بازه حرکتی محور چرخشی A ۱۰۰ تا +۱۰ درجه	
بازه حرکتی محور چرخشی C ۴۵۰ درجه	
طول اسمی R_H (میلی‌متر) ۱۰۰	
طول کالیبره R_C بدون میله افزایش طول (میلی‌متر) ۹۹٫۹۸۸	
حرکت زاویه اضافی محور B (درجه) ۴۵ درجه	
حرکت زاویه اضافی محور C (درجه) ۲ درجه	
میزان پیشروی (میلی‌متر بر دقیقه) ۵۰۰	
آفست D_A (میلی‌متر) ۵۵۰	
آفست D_B (میلی‌متر) ۷۸	

جدول ۵) نتیجه آزمون برای PIGE های موقعیتی

پارامترها	میانگین (میلی‌متر)	میزان انحراف (میلی‌متر)
e_{y0a}	۰٫۰۳۳۵	۰٫۰۰۰۸
e_{z0a}	-۰٫۰۳۵۶	۰٫۰۰۰۲
e_{x0c}	۰٫۰۰۱۴	۰٫۰۰۰۱۲
e_{y0c}	-۰٫۰۵۱۳	۰٫۰۰۰۶

جدول ۶) نتیجه آزمون برای PIGE های چرخشی

پارامترها	میانگین (ثانیه)	میزان انحراف (ثانیه)
θ_{y0a}	۷٫۱۳"	۰٫۱۳"
θ_{z0a}	۲٫۹۴"	۰٫۶۴"
θ_{x0c}	-۲۶٫۰۳"	۰٫۷۸۵"
θ_{y0c}	-۱۴٫۳۸"	۰٫۶۶۵"

در جدول ۲ نتیجه آزمون برای PIGE های موقعیتی و جدول ۳ نتیجه آزمون برای PIGE های چرخشی آورده شده است.

جدول ۲) نتیجه آزمون برای PIGE های موقعیتی

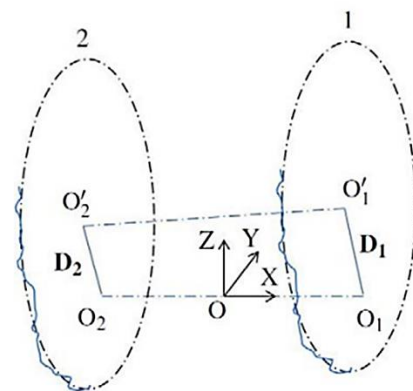
پارامترها	میانگین (میلی‌متر)	میزان انحراف (میلی‌متر)
e_{y0a}	۰٫۰۳۴۲	۰٫۰۰۰۸
e_{z0a}	-۰٫۰۳۵۳	۰٫۰۰۰۳۷
e_{x0c}	۰٫۰۰۱۳	۰٫۰۰۰۱۵
e_{y0c}	-۰٫۰۵۲۵	۰٫۰۰۰۶۰

جدول ۳) نتیجه آزمون برای PIGE های چرخشی

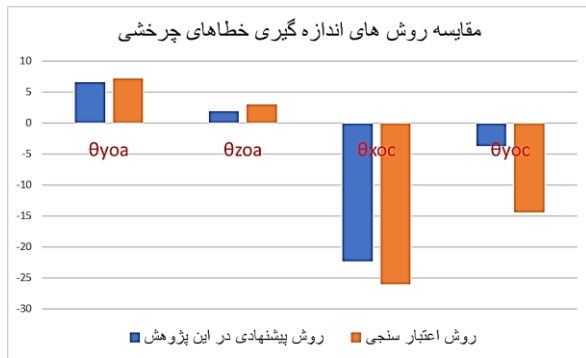
پارامترها	میانگین (ثانیه)	میزان انحراف (ثانیه)
θ_{y0a}	۶٫۶۲	۰٫۵۷۷
θ_{z0a}	۱٫۸۹	۰٫۳۸۸
θ_{x0c}	-۲۲٫۳۳	۰٫۴۸۹
θ_{y0c}	-۳٫۷۵	۰٫۵۲۷

آزمایش‌های دایره‌ای مسطح برای اندازه‌گیری فاصله مرکزی چهار مسیر دایره‌ای در چهار موقعیت ارائه شده است. افست‌های مرکزی، یعنی PIGE های موقعیت محلی، به دلیل تأثیرات PIGE های چرخشی، کاملاً با موارد اندازه‌گیری شده با توجه به یکسان نیستند. از آنجایی‌که خطوط مستقیم مرجع محورهای چرخشی به سیستم مختصات انتخاب شده متکی نیستند، PIGE های چرخشی بدون توجه به موقعیت‌های آزمایشی یکسان هستند.

در شکل ۱۸ دو مسیر آزمایش‌های محور A در موقعیت‌های ۱ و ۲ و در شکل ۱۹ دو مسیر آزمایش‌های محور C در موقعیت‌های ۳ و ۴ آورده شده است.



شکل ۱۸) دو مسیر آزمایش‌های محور A در موقعیت‌های ۱ و ۲



شکل ۲۳) مقایسه روش‌های اندازه‌گیری خطاهای چرخشی

نتیجه‌گیری

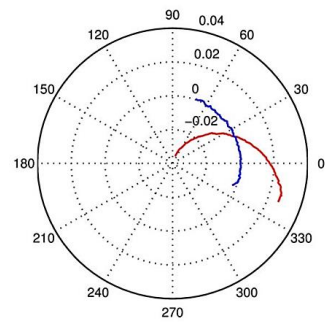
یک روش جدید اندازه‌گیری بالبار در بخش سوم برای مشخص کردن چهار PIGE از هر محور چرخشی یک ماشین ابزار ۵ محوره شامل دو موقعیت و دو PIGE چرخشی شد، پیشنهاد شد. نقطه قوت روش‌ها این است که فقط محور چرخشی مورد آزمایش در حین آزمایش حرکت می‌کند، بنابراین جداسازی خطا را بسیار ساده می‌کند. ایده این بود که با داشتن مسیر حرکت بالبار عمود بر خط مستقیم محور دوار PIGE‌های موقعیت هر محور چرخشی را به‌طور جداگانه آزمایش کنیم. چنین تنظیمات آزمایشی تضمین می‌کند که فقط PIGE‌های موقعیت محلی در انحراف مسیر حرکت دخیل هستند.

به دلایل زیر PIGE‌های موقعیت در دو آزمایش کمی متفاوت است:

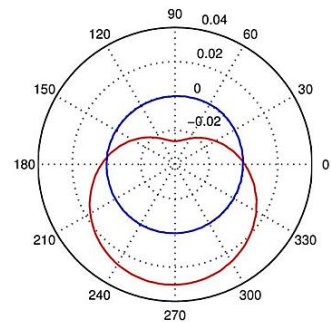
- تفاوت کوچک بین انحرافات مرکزی دایره‌ها با و بدون میله‌های افزایش طول در بالبار.
 - خطاهای مستقیم‌الخطی و تغییرپذیری موقعیت محورهای خطی.
 - فاصله بین تنظیمات مختلف
- به‌طور خلاصه، دستاوردهای اصلی پژوهش توسعه روشی ساده و سریع برای توصیف PIGE‌ها در محورهای چرخشی ماشین‌ابزارهای ۵ محوره بود. جداسازی خطاها با تک‌تک حرکات محور به‌دست آمده است. محورهای چرخشی با حداقل تنظیمات و بدون وسایل اضافی اندازه‌گیری می‌شوند که یک مزیت عمده نسبت به روش‌های منتشر شده است

مراجع

- 1- Uddin, M.S. Tool path modification approaches to enhance machining geometric accuracy in 3-axis and 5-axis machining. (PhD Thesis), Kyoto University, Kyoto, Japan (2007).
- 2- Theuws, F.C.C.J.M. Enhancement of machine tool accuracy: theory and implementation. (PhD Thesis), Eindhoven University of Technology, Eindhoven, Netherlands (1991).



شکل ۲۰) نتیجه آزمایش محور A با (آبی) و بدون جبران (قرمز). (mm)

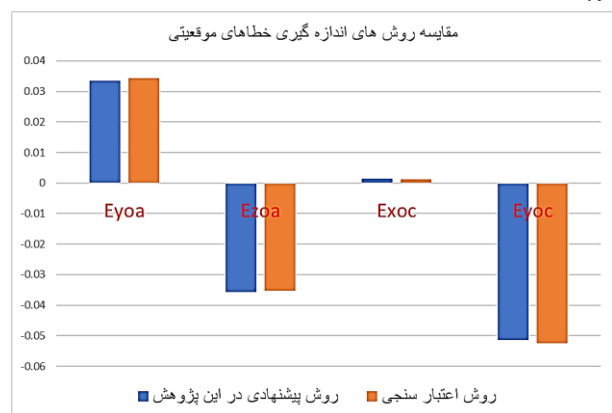


شکل ۲۱) نتیجه آزمایش محور A با (آبی) و بدون جبران (قرمز)

مقایسه نتایج

همان ایده آزمایشی برای فصل سوم اعمال شد که در آن محورهای چرخشی با استفاده از یک بالبار با میله افزایش طول و بدون آن اندازه‌گیری شدند. تفاوت بین این دو روش در موقعیت کره اتکا روی میز است.

مقایسه دو روش نشان می‌دهد که موقعیت PIGE‌ها در تلورانس‌های داده شده متفاوت است در حالی که PIGE‌های چرخشی بسیار متفاوت است. این به دلایل مختلفی است. مقایسه روش‌های اندازه‌گیری خطاهای موقعیتی در شکل ۲۲ و مقایسه روش‌های اندازه‌گیری خطاهای چرخشی در شکل ۲۳ آورده شده است.



شکل ۲۲) مقایسه روش‌های اندازه‌گیری خطاهای موقعیتی

- of Machine Tools and Manufacture, 2013; 70, 45-52.
- 5- Tlustý, J. Ziegert, J. Ridgeway, S. fundamental comparison of the use of serial and parallel kinematics for machine tools. *Annals of CIRP*, 1999, 48, 351-6.
 - 6- Liu, H. Li, B. Wang, X. Tan, G. Characteristics of and measurement methods for geometric errors in CNC machine tools. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011; 54, 195-201.
 - 3- Ramesh, R. Mannan, M.A. Poo, A.N. Error compensation in machine tools — a review: Part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2000; 40, 1235-6.
 - 4- Lee, K.I. Yang, S.H. Measurement and verification of position-independent geometric errors of a five-axis machine tool using a double ball-bar. *International Journal*