ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. Proceedings of 3rd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT). 2023;23(10):223-235.

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

مشخصات مقاله

نویسنده‌ها
محمد حسین شهاب زاده پور[1*]
رضا جاهدی [2]

[1] دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز
[2] دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز

*** نویسنده مسئول**
آدرس: شیراز شهرک صدرا، پردیس دانشگاه آزاد
shahabeaseman@gmail.com

چکیده

در این پژوهش به بررسی خطاها و دقت یک ماشین‌ابزار 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 ماشین‌ابزار و تولید نمودارهای خطای بالبار به دلیل خطاهای هندسی ماشین‌های ابزار و بر اساس طرح آزمایشی ارائه‌شده، استفاده می‌شوند. الگوهای مسیر حرکتی بالبار شبیه‌سازی‌شده را می‌توان برای ارزیابی اثرات خطای منحصربه‌فرد برای خطاهای شناسایی‌شده و تشخیص شرایط ماشین‌ابزار استفاده کرد.

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

۱- مقدمه

هنگام استفاده از یک ماشین‌ابزار 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 گران‌قیمت 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 ماشین‌ابزارهای ۵ محور شناسایی شود [۱].

با استفاده از یک بالبار (DBB) روشی برای مشخص کردن خطاهای هندسی مستقل موقعیت محورهای چرخشی (PIGE) پیشنهادشده 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 ایجادشده برای آزمایش همان PIGE ها استفاده می‌شود و از نتایج برای اعتبارسنجی روش توسعه‌یافته استفاده می‌شود.

از ماتریس‌های تبدیل همگن (HTMs) برای ایجاد یک مدل ماشین‌ابزار و تولید نمودارهای خطای بالبار به دلیل وجود PIGE های مختلف با توجه به نوع آزمون انجام‌شده 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 تبدیل‌شده 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 مقرون‌به‌صرفه موضوعی قابل‌توجه در حوزه توسعه تولید است. به دلیلی که ماشین‌کاری مهم‌ترین ابزار تولید است، ماشین‌ابزار به‌طور گسترده در بخش‌های مختلف صنایع، به‌عنوان‌مثال، صنایع هوافضا استفاده می‌شوند. با توجه به پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های تولید ماشین‌ابزار، ماشین‌ابزارهای 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 به‌طور 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 به‌طور گسترده در دسترس هستند. نوآوری‌ها نه تنها در اصلاح اجزای ماشین‌ابزار، بلکه در توسعه و بهینه‌سازی توپولوژی آن‌ها نیز رخ می‌دهد. ماشین‌ابزارهای ۵ محوره نمونه‌ای عالی برای نشان دادن چنین پیشرفتی هستند. در مقایسه با ماشین‌ابزارهای ۳ محوره معمولی با سه محور خطی که به‌صورت متعامد پیکربندی‌شده‌اند، ماشین‌ابزارهای ۵ محوره دارای دو محور چرخشی اضافی هستند. محورهای چرخشی به‌منظور تنظیم جهت ابزار برش نسبت به قطعه کار طراحی‌شده‌اند. 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، ماشین‌ابزارهای ۵ محوره مزایای قابل‌توجهی ازجمله 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 به‌طور گسترده‌ای در انواع صنایع تولیدی، مانند هواپیماسازی، ساخت قالب، صنایع نفت، گاز، پتروشیمی، صنایع خوردویی و غیره استفاده می‌شوند [۳].

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

در ماشین‌ابزارهای ۵ محوره، دو محور چرخشی یک انعطاف‌پذیری را در ماشین‌کاری ایجاد می‌کنند، ولی سبب ایجاد خطاهای اضافی می‌شوند. بنابراین ماشین‌ابزارهای ۵ محوره در مقایسه با ماشین‌ابزارهای ۳ محوره منابع خطای بیشتری دارند. در نتیجه، به دلیل پیچیدگی در پیکربندی، تعیین منابع خطای یک ماشین‌ابزار ۵ محوره دشوارتر است [۵]. بااین‌وجود، 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 ماشین‌ابزار است [۶].

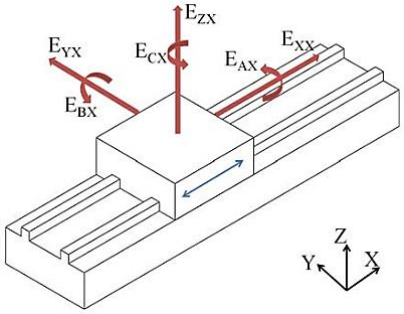
بدین منظور، این پژوهش به بررسی خصوصیات خطای ماشین‌ابزارهای ۵ محوره می‌پردازد. به‌طور خاص‌تر، محورهای چرخشی به‌عنوان منبع خطای اصلی ماشین‌ابزارهای ۵ محوره به‌تفصیل موردبحث قرار خواهند گرفت.

۱-۲-**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 تعریف‌شده 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

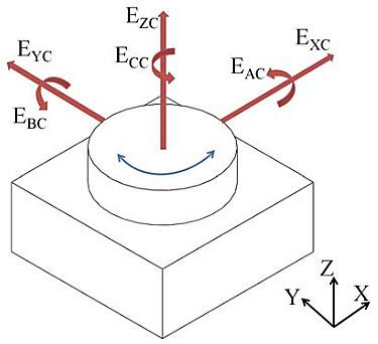
E_{AX} : خطای زاویه‌ای حول محور A

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 برجهت حرکت اسمی، یک حرکت خطای موقعیت‌یابی در امتداد جهت حرکت و سه حرکت خطای زاویه‌ای در حول هر محور مختصات است.

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



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

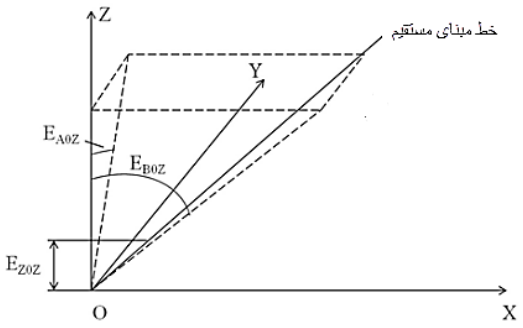
خطاهای هندسی مستقل از موقعیت (PIGE) به دلیل نقص در فرآیند مونتاژ اجزای ماشین‌ابزار ایجاد می‌شوند. می‌توانند باعث انحرافات ثابت در موقعیت و جهت محورها شوند. با توجه به ماهیت PIGE ها، آن‌ها بدون توجه به موقعیت‌هایی که در آن قرار می‌گیرند، به‌عنوان مقادیر ثابت مدل می‌شوند. در ادامه خطاهای محور خطی و دورانی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

برای نشان دادن PIGE محورهای خطی مربوط به یک عضو متحرک (یک محور حرکتی) در ماشین‌ابزار که حرکتی خطی دارد از شکل ۳ استفاده می‌شود. خط مبنای مستقیم در شکل ۳ نشان‌دهنده میزان حرکت و مقدار انحراف از مسیر حرکتی تعیین‌شده 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 محورهای دستگاه مختصات تعیین می‌شوند. در شکل ۳ خطاها به‌صورت زیر هستند:

E_{ZOZ} : خطای موقعیت صفر خطی

E_{AOZ} : خطای جهت‌گیری محور Z در محور A؛

E_{BOZ} : خطای جهت‌گیری محور Z در محور B؛



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

زوایای بین تصویر کردن خط مبنای مستقیم بر روی صفحات YOZ/XOZ و محور Z دو خطای جهت‌گیری هستند که به‌عنوان خطاهای عمود بودن نیز شناخته می‌شوند. سومین جزء خطا، "E_{ZOZ}"، 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 O 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. شکل۴ 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_{AOA} : خطای موقعیتی صفر زاویه‌ای

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

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

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

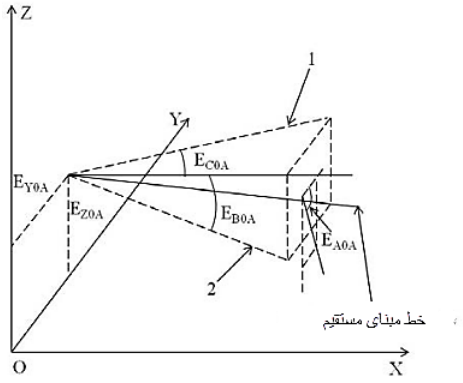
E_{ZOA} : خطای جهت‌گیری محور A در جهت محور C

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-اندازه‌گیری با بالبار

۱-۲-۲-۱-سیستم اندازه‌گیری بالبار

یک سیستم بالبار برای اندازه‌گیری خطای ماشین‌ابزار ۵ محوره انتخاب‌شده 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 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 داده‌شده 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 قرارگرفته است. که گاها میله دو سرکروی نیز خوانده می‌شود. طول اسمی میله میانی کامپوزیتی ۱۰۰ میلی‌متر بین مرکز دو کره است. میله‌های افزایش طول به‌اندازه های ۵۰، ۱۵۰، ۳۰۰ میلی‌متر را می‌توان به‌صورت جداگانه یا ترکیبی برای ارائه شعاع آزمایش تا ۶۰۰ میلی‌متر استفاده کرد.

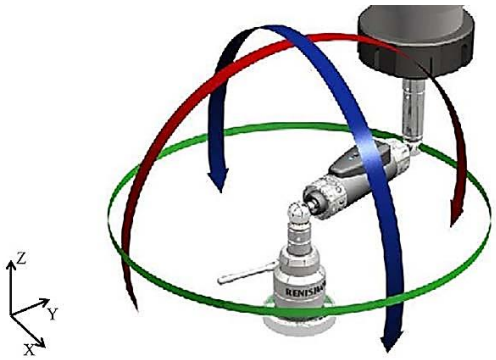
بالبار در ابتدا برای آزمایش ماشین‌ابزارهای ۳ محوره طراحی شد. محورهای X، Y و Z از طریق سه آزمایش دایره‌ای در سه صفحه اصلی دستگاه مختصات یعنی در سطوح XY، YZ و ZX موردبررسی قرار می‌گیرند. یک نمودار شماتیک از مسیرهای آزمایش در شکل ۶ آورده شده است.

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

صفحات YZ و XZ است. دلیل اینکه آزمایش‌ها در صفحات YZ و XZ فقط به‌صورت 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 تجزیه‌وتحلیل نمودارهای خطاهای به‌دست‌آمده و مقایسه آن‌ها با نمودار خطاهایی که با شکل‌ها و نمودار استاندارد مشخص‌شده‌اند، به دست می‌آید. یک مثال معمولی اثر خطای عمود بودن دو محور متعامد اسمی است.

شکل‌ها و نمودار استاندارد مشخص‌شده‌اند، 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، درحالی‌که 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 ۰/۰۱ درجه ب: خطای عمود بودن۰/۰۱- درجه

اخیراً از سیستم بالبار برای ارزیابی عملکرد ماشین‌ابزارهای ۵ محوره استفاده‌شده است. خطاهای هندسی و دینامیکی به‌طور گسترده با مسیرهای آزمایشی مشخص موردمطالعه 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 نحوه‌ی آزمایش، شرایط خطای انواع مختلف ماشین‌ابزارهای ۵ محوره را می‌توان تخمین زد. این روش‌ها اکنون در پیش‌نویس استاندارد ISO در سال ۲۰۱۲ گنجانده‌شده است. بااین‌حال، ازآنجایی‌که محورهای خطی در اندازه‌گیری‌ها دخالت دارند، جدا کردن خطاهای محورهای خطی از نتایج دشوار است. 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 ارائه‌شده 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 تجزیه‌وتحلیل 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. بااین‌حال چندین تنظیم در طول آزمایش موردنیاز است که بر دقت اندازه‌گیری تأثیر می‌گذارد. روش جبران خطاها وابسته به یک وسیله اختصاصی است که به‌راحتی در دسترس نیست.

اکثر روش‌های ذکرشده در بالا نیاز به تنظیمات متعدد دارند، بنابراین زمان اندازه‌گیری طولانی‌تر می‌شود و خطاهای راه‌اندازی ایجاد می‌شود. روش ارائه‌شده 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 به‌صورت [۱۷، ۱۸] داده می‌شود:

$$ {}^{R}Tc = \begin{bmatrix} & R_{3\times3} & & \vert & T_{3\times1} \\ & & & \vert & \\ 0 & 0 & 0 & \vert & S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{ix} & r_{iy} & r_{iz} & t_x \\ r_{jx} & r_{jy} & r_{jz} & t_y \\ r_{kx} & r_{ky} & r_{kz} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

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. R3×3 نشان‌دهنده ماتریس حرکتی مختصات جسم صلب C با توجه به دستگاه مختصات R است.T3×1 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 به‌صورت [۰۰۰۱] داده می‌شود.

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

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

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

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

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، X_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_Zدر ${}^{R}T_{Y,ideal}$ ، و Z_X، Z_y و Z_Zدر ${}^{R}T_{Z,ideal}$ استفاده می‌شود.

به‌طور 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 به‌عنوان مضاربی از HTMهای اولیه،که شامل HTMهای پارامترهای سینماتیکی و PIGEها است بیان می‌شود. به‌عنوان‌مثال، میز چرخشی محور C به‌طور 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 شکل۳-۱ 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 $O_{C,actual}$ نشان داده می‌شود. بنابراین موقعیت و جهت واقعی میز دوار محور C را می‌توان با توجه به چارچوب مختصات مرجع R به‌صورت زیر بیان کرد:

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

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

$$ {}^{R}T_{C,actual} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \theta_{y0c} & e_{x0c} \\ 0 & 1 & -\theta_{x0c} & e_{y0c} \\ -\theta_{y0c} & \theta_{x0c} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta_C & -s\theta_C & 0 & C_x \\ s\theta_C & c\theta_C & 0 & C_y \\ 0 & 0 & 1 & C_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times $$

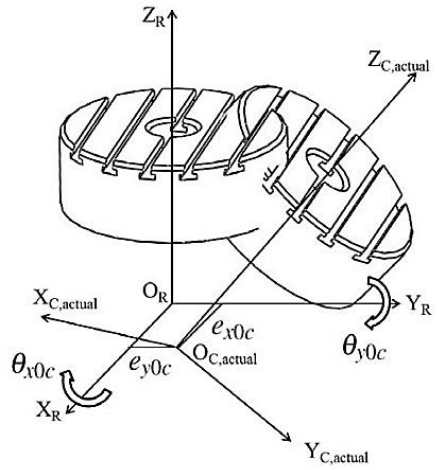
$$ \begin{bmatrix} c\theta_c & -s\theta_c \\ \theta_{x0c}\theta_{y0c}c\theta_c + s\theta_c & -\theta_{x0c}\theta_{y0c}s\theta_c + c\theta_c \\ -\theta_{y0c}c\theta_c + \theta_{x0c}s\theta_c & \theta_{y0c}s\theta_c + \theta_{x0c}c\theta_c \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \dots $$

$$ \begin{bmatrix} \theta_{y0c} & C_x + \theta_{y0c}C_z + e_{x0c} \\ -\theta_{x0c} & \theta_{x0c}\theta_{y0c}C_X + C_Y - \theta_{x0c}C_Z + e_{y0c} \\ 1 & -\theta_{y0c}C_X + \theta_{x0c}C_Y + C_Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} $$

HTMها امکان ترکیب عدم دقت یک محور متحرک را با حرکت اسمی سینماتیکی آن فراهم می‌کند. بنابراین ساختار ماشین‌ابزار 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 به‌صورت 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:

$$ {}^{0}T_n = \prod_{i=1}^{n} \left({}^{i-1}T_i \right) = {}^{0}T_1 \, {}^{1}T_2 \, {}^{2}T_3 \dots . {}^{n-1}T_n \quad (۱-۳) $$

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.



شکل۷) بستر آزمایش مورداستفاده در این مطالعه

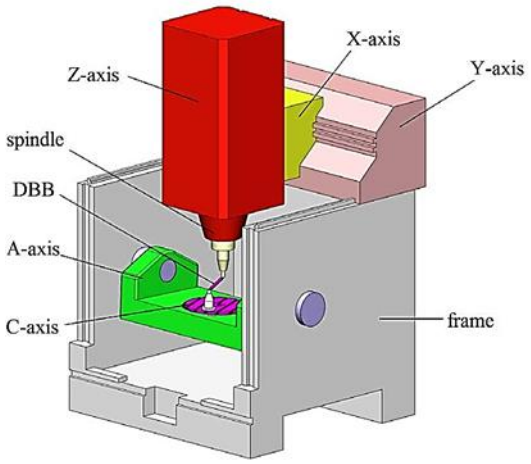
ارزیابی خطا در آزمون‌های بالبار

پس از شناسایی HTM ها برای هر محور جداگانه، گام بعدی ساختن مدل ماشین‌ابزار با آن‌هاست. شکل۷ بستر آزمایش مورداستفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد، یک ماشین‌ابزار ۵ محوره AWEA FMV99.

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

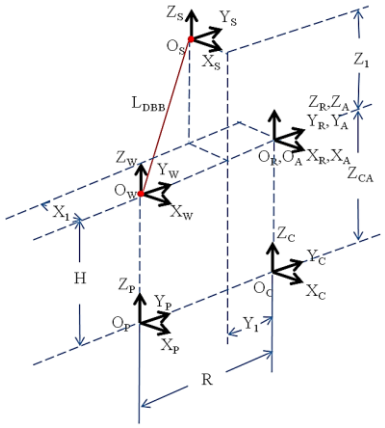
نمای شماتیک ساختار ماشین‌ابزار ۵ محوره AWEA FMV99



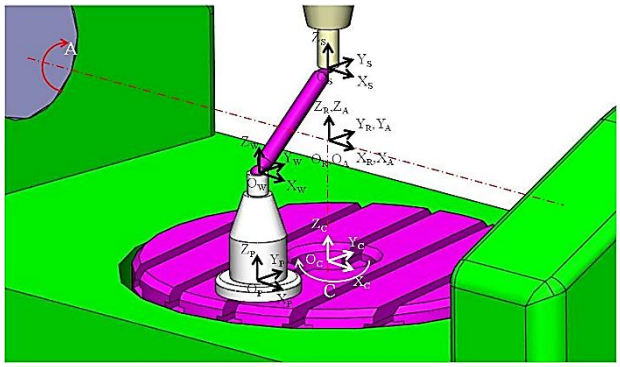
شکل ۸) ساختار سینماتیک ماشین‌ابزار

شکل ۸ ساختار سینماتیک ماشین‌ابزار را با دستگاهای مختصات الحاق شده بر روی اجزای مختلف ماشین‌ابزار نشان می‌دهد. شکل ۹ موقعیت نسبی بین هر دو دستگاه مختصات مجاور را نشان می‌دهد. زنجیره سینماتیکی متشکل از اتصالات حرکت خطی و چرخشی به‌صورت 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 نصب‌شده است. اسلاید محور Z به‌صورت عمودی نسبت به اسلاید محورX حرکت می‌کند که نسبت به اسلاید محور Y به‌صورت 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 طراحی‌شده است که با استفاده از مکانیسمی خاص نصب می‌شود.

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



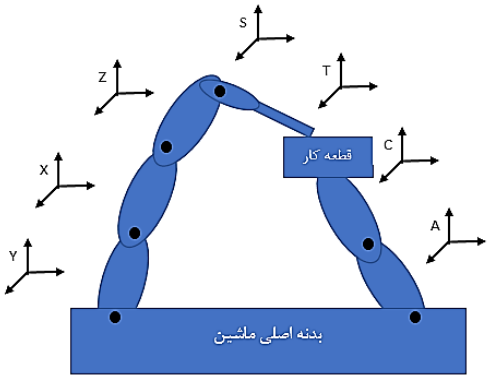
شکل ۹) موقعیت نسبی بین هر دو دستگاه مختصات مجاور



شکل ۱۰) موقعیت دستگاه مختصات برای اجزای زنجیره سینماتیک

محورهای X، Y و Z دستگاه مختصات مرجع موازی با جهت حرکت اسلایدهای X، Y و Z انتخاب می‌شوند. هنگامی‌که 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 به‌عنوان مبدأ دستگاه مختصات اسپیندل S انتخاب‌شده است.

دستگاه مختصات دارای افست‌های X1، Y1 و Z1 به ترتیب در جهت X ، Y و Z دستگاه مختصات مرجع R است.



شکل ۱۱) نجیره سینماتیکی یک ماشین‌ابزار ۵ محور A/C

کره اتکا بالبار (O_PO_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 محورهای مختلف، کره اتکا در موقعیت‌های متفاوت قرار می‌گیرد. به‌عنوان‌مثال، 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_PO_W در شکل ۱۰ و ۱۱ با H نشان داده می‌شوند.

روابط بین دستگاه‌های مختصات مختلف

در این حالت، محورهای خطی X، Y و Z بدون خطا در نظر گرفته می‌شوند، زیرا محورهای خطی با روش‌های موجود به‌راحتی قابل‌اندازه‌گیری 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 گرفته‌شده 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 ارائه‌شده در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، HTM ها برای هر جزء در زنجیره سینماتیک را می‌توان به‌صورت زیر به دست آورد. HTM میز گهواره‌ای محور A حاصل‌ضرب یک HTM برای PIGE ها 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 PIGE موقعیت محور A در جهت Y و Z هستند. θ_{y0a} و θ_{z0a} دو PIGE جهت‌گیری محور A به ترتیب در مورد محورهای Y و Z هستند.

$$ {}^{R}T_{A} = \begin{bmatrix} 1 & -\theta_{z0a} & \theta_{y0a} & 0 \\ \theta_{z0a} & 1 & 0 & e_{y0a} \\ -\theta_{y0a} & 0 & 1 & e_{z0a} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_a & -\sin\theta_a & 0 \\ 0 & \sin\theta_a & \cos\theta_a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۲-۳) $$

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

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

که در آن θ_c موقعیت زاویه‌ای سینماتیکی میز دوار محور C است. Z_{CA} فاصله بین O_P و O_C است. e_{x0c} و e_{y0c} دو PIGE موقعیت محور C در جهت X و Y هستند. θ_{x0c} و θ_{y0c} دو PIGE چرخشی محور C به ترتیب در مورد محورهای X و Y هستند.

تبدیل از دستگاه مختصات محوری P به دستگاه مختصات میز چرخشی محور C به‌صورت زیر ارائه می‌شود:

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

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.

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

و موقعیت O_S در دستگاه مختصات مرجع R :

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

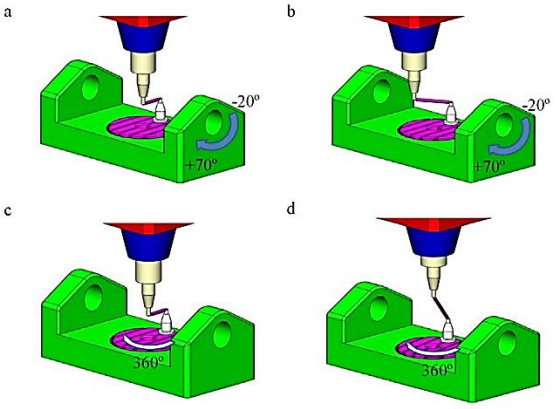
با توجه به، یک زنجیره سینماتیک بسته را می‌توان به‌عنوان یک "گراف تبدیل" نشان داد (شکل ۱۲). هر خط عمودی کوتاه نشان‌دهنده یک دستگاه مختصات است که بر روی اجزای ماشین انتخاب‌شده در زنجیره سینماتیکی الحاق شده است. فلشی که از یک خط عمودی به خط دیگر اشاره می‌کند، نشان‌دهنده تبدیل از یک مختصات به مختصات بعدی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

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

جدول ۱) پارامترهای شبیه‌سازی

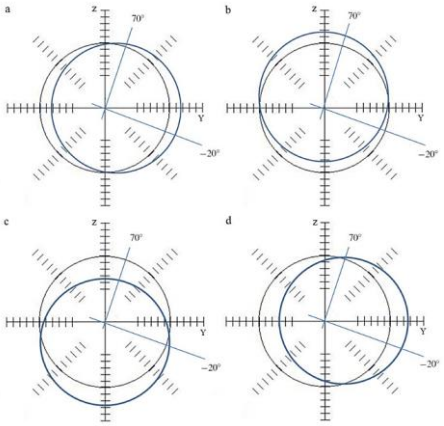
پارامتر	مقدار
طول اسمی بالبار (mm)	۱۰۰
طول اسمی بالبار با میله افزایش طول (mm)	۱۵۰
e_{z0a} ، e_{y0a} ، e_{x0c} ، e_{y0c} (میکرومتر)	۱۰
θ_{z0a} ، θ_{y0a} ، θ_{y0c} ، θ_{x0c} (درجه)	0.01
شعاع مورد آزمایش (mm)	100
فاصله بین O_C و $O_R Z_{CA}$ (mm)	75
فاصله مرکز کره اتکا تا کف میز (H)	75

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

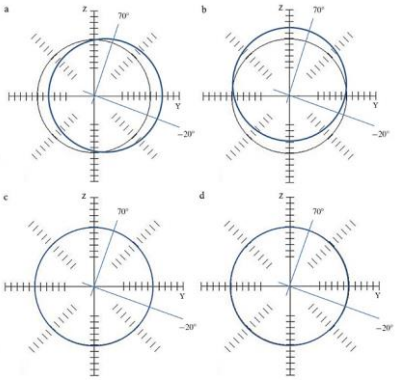


شکل ۱۲) چهار مرحله آزمون. (الف) آزمون محور A بدون میله افزایش طول. (ب) آزمون محور A با میله افزایش طول. (ج) آزمون محور C بدون میله افزایش طول. (د) آزمون محور C با میله افزایش طول

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

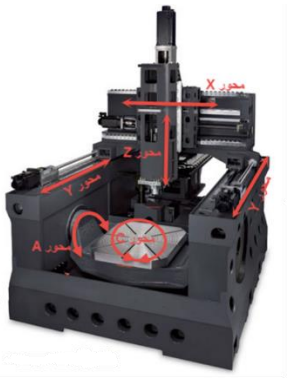


شکل ۱۳) الگوهای ردیابی خطای بالبار آزمون محور A بدون میله افزایش طول ناشی از (الف) e_y0c،(ب) e_z0a، (ج) θ_y0a و (د) 〖θ〗_z0a (۵ =۱div میکرومتر).



شکل ۱۴) الگوهای ردیابی خطای بالبار آزمایش محور A با میله افزایش طول ناشی از (الف) e_y0c،(ب) e_z0a، (ج) θ_y0a و (د) 〖θ〗_z0a (۵=۱div میکرومتر)

برای شناسایی و مشخص کردن PIGE محورهای چرخشی یک ماشین‌ابزار ۵ محوره، یک رویکرد اندازه‌گیری با استفاده از یک بالبار در این بخش ارائه‌شده 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 ارائه‌شده است. برای اهداف راستی آزمایی، یک مدل آزمایشی منتشرشده برای آزمایش همین دستگاه ارائه‌شده است. PIGE ها با یک بالبار، با نتایج به‌دست‌آمده در فصل‌های قبلی مقایسه شدند. اثربخشی روش منتشرشده را می‌توان از تفاوت بین نمودارهای خطای بالبار با و بدون جبران PIGE های شناسایی‌شده مشاهده کرد.

آزمون چهار مرحله‌ای و تنظیمات آن در این بخش توضیح داده‌شده 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.

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

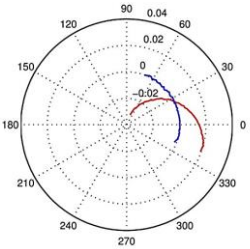
تجزیه‌وتحلیل خطا روش پیشنهادی در این پژوهش

برای آزمون‌های با و بدون میله افزایش طول، فرآیندهای مدل‌سازی و تجزیه‌وتحلیل خطاها متفاوت است. بااین‌حال، تجزیه‌وتحلیل برای یک نوع آزمایش (با یا بدون میله افزایش طول) از محورهای مختلف مشابه است، ازاین‌رو روش زیر را می‌توان برای هر دو محور اعمال کرد. در اینجا محور A برای نشان دادن استخراج خطاهای موقعیت انتخاب‌شده است. برای آزمایش محور C بدون میله افزایش طول این روش با یک تغییر ساده صفحه آزمایش از YZ به XY نیز معتبر است.

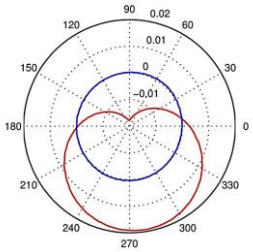
مرحله اول شامل یک حرکت ۱۱۰ درجه بالبار است. داده‌های اندازه‌گیری شده بالبار، حاصل فواصل بین موقعیت کره نسب شده در اسپیندل و کره بسته‌شده روی میز است. مسیر حرکتی بالبار، که توسط دو کره تشکیل‌شده است، در یک صفحه باقی می‌ماند، و یک حرکت دایره‌ای در یک صفحه انجام می‌شود. مسیر حرکتی بالبار به خاطر خطای اثر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

برای روش پیشنهادی که بر روی یک ماشین‌ابزار ۵ محوری AWEA FM99U آزمایش‌شده است. یک حرکت زاویه به مقدار زیاد قبل و بعد از شروع کمان جمع‌آوری داده‌ها در همه آزمون‌ها ارائه‌شده 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 توصیه‌شده اعمال شد. بااین‌حال، برای آزمایش‌های محور A، ازآنجایی‌که 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)

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

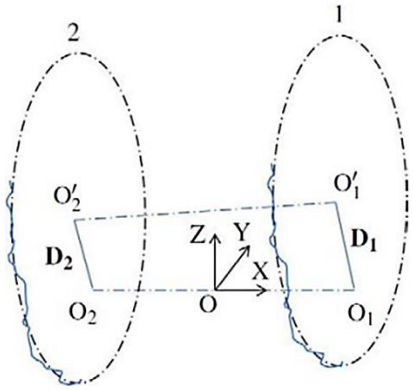
پارامترها	میانگین (میلی‌متر)	میزان انحراف (میلی‌متر)
e_{y0a}	۰/۰۳۴۲	۰/۰۰۰۸
e_{z0a}	-۰/۰۳۵۳	۰/۰۰۰۳۷
e_{x0c}	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۰۱۵
e_{y0c}	-۰/۰۵۲۵	۰/۰۰۰۶۰

جدول ۳) نتیجه آزمون برای PIGE های چرخشی

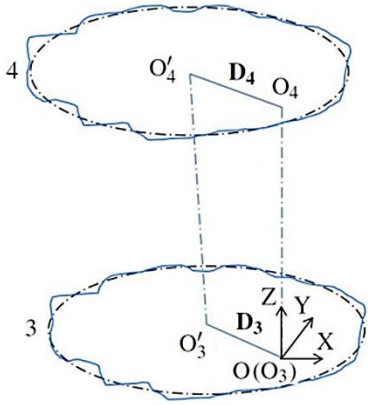
پارامترها	میانگین (ثانیه)	میزان انحراف (ثانیه)
θ_{y0a}	۶/۶۲	۰/۵۷۷
θ_{z0a}	۱/۸۹	۰/۳۸۸
θ_{x0c}	-۲۲/۳۳	۰/۴۸۹
θ_{y0c}	-۳/۷۵	۰/۵۲۷

آزمایش‌های دایره‌ای مسطح برای اندازه‌گیری فاصله مرکزی چهار مسیر دایره‌ای در چهار موقعیت ارائه‌شده است. افست‌های مرکزی، یعنی PIGE های موقعیت محلی، به دلیل تأثیرات PIGE های چرخشی، کاملاً با موارد اندازه‌گیری شده با توجه به RCS یکسان نیستند. ازآنجایی‌که خطوط مستقیم مرجع محورهای چرخشی به سیستم مختصات انتخاب‌شده 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 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

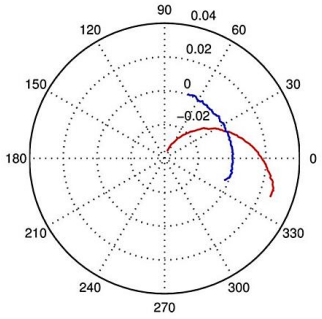
پارامترها	مقادیر
بازه حرکتی محور چرخشی A	**-۱۰۰ تا +۱۰ درجه**
بازه حرکتی محور چرخشی C	**۴۵۰ درجه**
طول اسمی R_n (میلی‌متر)	**۱۰۰**
طول کالیبره R_C بدون میله افزایش طول (میلی‌متر)	**۹۹/۹۸۸**
حرکت زاویه اضافی محور B (درجه)	**۴۵ درجه**
حرکت زاویه اضافی محور C (درجه)	**۲ درجه**
میزان پیشروی (میلی‌متر بر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

جدول ۵) نتیجه آزمون برای PIGE های موقعیتی

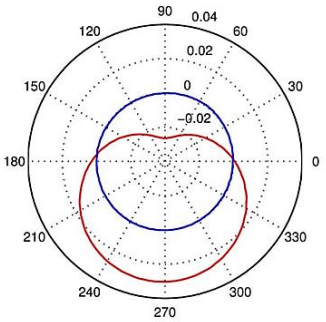
پارامترها	میانگین (میلی‌متر)	میزان انحراف (میلی‌متر)
e_{y0a}	۰/۰۳۳۵	۰/۰۰۰۸
e_{z0a}	-۰/۰۳۵۶	۰/۰۰۰۲
e_{x0c}	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۰۱۲
e_{y0c}	-۰/۰۵۱۳	۰/۰۰۰۶

جدول ۶) نتیجه آزمون برای PIGE های چرخشی

پارامترها	میانگین (ثانیه)	میزان انحراف (ثانیه)
θ_{y0a}	۷/۲۳"	۰/۱۳"
θ_{z0a}	۲/۹۴"	۰/۶۴"
θ_{x0c}	-۲۶/۰۳"	۰/۷۸۵"
θ_{y0c}	-۱۴/۳۸"	۰/۶۶۵"



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



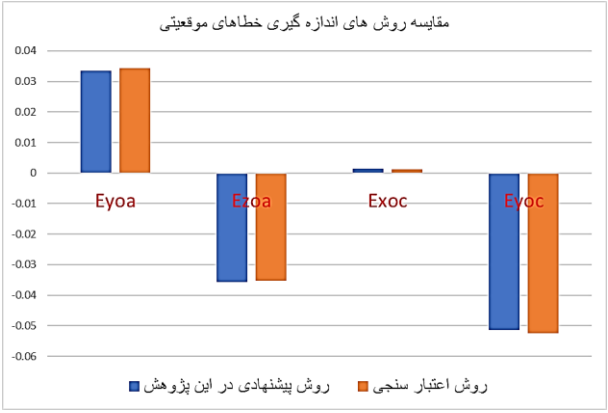
شکل ۲۱) نتیجه آزمایش محور A با (آبی) و بدون جبران (قرمز)

مقایسه نتایج

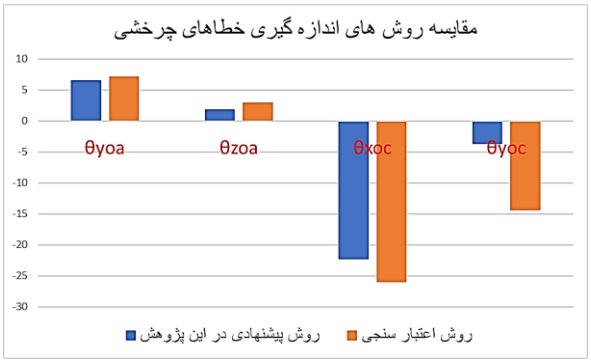
همان ایده آزمایشی برای فصل سوم اعمال شد که در آن محورهای چرخشی با استفاده از یک بالبار با میله افزایش طول و بدون آن اندازه‌گیری شدند. تفاوت بین این دو روش در موقعیت کره اتکا روی میز است.

مقایسه دو روش نشان می‌دهد که موقعیت PIGE ها در تلورانس‌های داده‌شده متفاوت است درحالی‌که PIGE های 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



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 ماشین‌ابزار ۵ محوره شامل دو PIGE موقعیت و دو PIGE چرخشی شد، پیشنهاد شد. نقطه قوت روش‌ها این است که فقط محور چرخشی مورد آزمایش در حین آزمایش حرکت می‌کرد، بنابراین جداسازی خطا را بسیار ساده می‌کند. ایده این بود که با داشتن مسیر حرکت بالبار عمود بر خط مستقیم محور دوار PIGE های موقعیت هر محور چرخشی را به‌طور جداگانه آزمایش کنیم. چنین تنظیمات آزمایشی تضمین می‌کند که فقط PIGE های موقعیت محلی در انحراف مسیر حرکت دخیل هستند.

به دلایل زیر PIGE های 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 به‌دست‌آمده است. محورهای چرخشی با حداقل تنظیمات و بدون وسایل اضافی اندازه‌گیری می‌شوند که یک مزیت عمده نسبت به روش‌های منتشرشده است

مراجع

1- Uddin, M.S. Tool path modification appraoches 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).

of Machine Tools and Manufacture, 2013; 70, 45-52.

5- Tlusty, 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