مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان ۱۳۹۴، دوره ۱۵، شماره ۱۳، ویژه‌نامه مجموعه مقالات کنفرانس، ص‌ص ۴۹۰-۴۹۴

مجموعه مقالات کنفرانس ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳ و ۱۴ آبان ۱۳۹۴

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران
Society of Manufacturing Engineering of Iran

دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

ماشین‌کاری منحنی‌های نربز با استفاده از میز هگزاپاد

علی ربانی[۱]، رضا احدی[۱]، محمدجواد ناطق[۲*]

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
* تهران، صندوق پستی ۱۴۱۱۵-۱۴۳، nategh@modares.ac.ir

چکیده

با توجه صنعت رقابتی، برای بالا بردن سرعت تولید همراه با کم کردن هزینه‌ها، نیاز به ماشین‌ابزارهایی با عملکرد دینامیکی بالا، سفتی زیاد و جرم محرک کمتر احساس شد. با توجه به این‌که مکانیزم حرکتی ماشین‌ابزارهای سنتی به‌صورت سری می‌باشد، پاسخگوی نیازهای فوق نبودند. به‌همین دلیل ربات‌هایی با مکانیزم موازی مانند ربات هگزاپاد مورد توجه قرار گرفتند. میز ماشین‌ابزار هگزاپاد نیز یک ربات موازی است که براساس سکوی استوارت کار می‌کند. این میز از دو سکو تشکیل شده است. سکوی پایینی در جای خود ثابت است و سکوی بالایی با تغییر طول پایه‌ها، موقعیت آن تغییر می‌یابد. این سکو دارای شش درجه آزادی است و به‌عنوان میز ماشین‌ابزار اعمال وظیفه می‌کند. این دستگاه با قرار گرفتن کنار یک ماشین‌ابزار معمولی قدیمی می‌تواند به یک ماشین‌ابزار CNC شش محوره تبدیل گردد. دراین پژوهش برای اولین بار با قرار دادن دستگاه هگزاپاد زیر کلگی یک دستگاه فرز، ماشین‌کاری صورت پذیرفت. در ابتدا مراحل آماده‌سازی دستگاه برای ماشین‌کاری آورده شده است. ابتدا بر روی چوب و سپس برروی آلومنیوم گرید سه هزار منحنی‌های نربز با استفاده از نقاط کنترلی ماشین‌کاری شد. سپس این قطعات با استفاده از روش سنتی ماشین‌کاری شدند و نتایج با یکدیگر مقایسه گردند.

کلید واژگان: هگزاپاد، ماشین‌کاری، منحنی نربز

Machining NURBS curves with hexapod machine tool

Ali Rabbani, Reza Ahadi, Mohammad Javad Nategh*

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
* P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran, nategh@modares.ac.ir

ABSTRACT

For increasing the production speed along with decreasing the costs in competitive industry, machines with high dynamic performance and stiffness are needed with low driven mass. Since serial mechanism of the traditional machine tools is not appropriate for above requirement, robots with parallel mechanism have been given attention. Hexapod machine tool is a parallel robot which is based on Stewart platform. The latter consists of two platforms. The lower platform is fixed in its place and the upper platform’s position changes by changing the lengths of pods. This platform has six degrees of freedom and acts as a table of machine tool. This machine is able to convert an ordinary machine tool into a new CNC machine tool. In this research, machining experiments have been done with the developed hexapod machine for the first time. At the beginning of this paper, preparation of hexapod machine for machining is explained. Then machining of NURBS curve on wood and aluminum grade 3000 specimens has been carried out. Then, similar experiments were carried out with the traditional machine. Finally, the result of each method has been compared with each other.

Keywords: Hexapod, Machining, NURBS Curve.

۱- مقدمه

ماشین‌ابزارهای هگزاپاد نسل جدیدی از ماشین‌های ابزار می‌باشند که محققین به خاطر نیاز به دقت و سرعت‌های بالای ماشین‌کاری به آن‌ها روی آورده‌اند. این نیاز با حرکت سیستم‌های تولیدی به سوی ماشین‌کاری پر-سرعت بیشتر احساس شد. زیرا این در این حالت نیاز به ماشین‌ابزاری با عملکرد دینامیکی بالا، سفتی بهبود یافته و جرم در حال حرکت کمتر، بیشتر است. از آن‌جایی که ساختار ماشین‌ابزارهای سنتی پاسخگوی نیازهای فوق نبود، برای برآورده کردن این نیازها به ربات‌های موازی می‌باشد که توسط محققین زیادی مورد پژوهش قرار گرفته است [۱].

از ماشین‌های ابزار سه محوره و پنج محوره به‌طور گسترده در ماشین-کاری سطوح با شکل دلخواه استفاده می‌گردد. پنج حرکت توسط پنج محور ماشین به طور پیوسته و همزمان کنترل می‌شوند. حرکت‌های انتقالی در سه راستای مختصات کارتزین و نیز دو حرکت دورانی هر کدام به گیره ابزار یا میز ماشین و یا هر دو اعمال می‌شود [۲]. برخلاف ماشین‌های سه محوره، ماشین‌های پنج محوره می‌توانند سطوح پیچیده را با کیفیت و کارآیی بهتر تولید نمایند. ماشین‌های $3\frac{1}{2}\frac{1}{2}$ محوره نیز به دلیل هزینه کمتر نیز در صنعت کاربرد خاص خود را دارند. این ماشین‌ها در مقایسه با ماشین‌های پنج محوره از استحکام و سفتی بالایی برخوردار هستند. زیرا محورهای چرخشی در حین حرکت برشی دستگاه قفل می‌گردند [۳]. اگر چه برخلاف دستگاه‌های پنج محوره، در ماشین‌های $3\frac{1}{2}\frac{1}{2}$ جهت دستگاه در حین عملیات برش نمی‌تواند به صورت پیوسته تغییر یابد [۲] و لذا زمان ماشین‌کاری افزایش می‌یابد.

در ضمن ساختار ماشین‌ابزارهای سنتی براساس مختصات کارتزین می-باشد. بیشتر شکل‌های پیچیده در حالت بهینه فقط توسط ماشین‌های پنج محوره قابل ماشین‌کاری هستند. این ساختار ماشین‌های پنج محوره به دو محور چرخشی دیگر نیازمند است. برای داشتن ماشین‌ابزار دقیق با سفتی مورد نیاز و قابلیت حمل قطعات سنگین، ماشین‌ابزارهایی بزرگ و سنگین

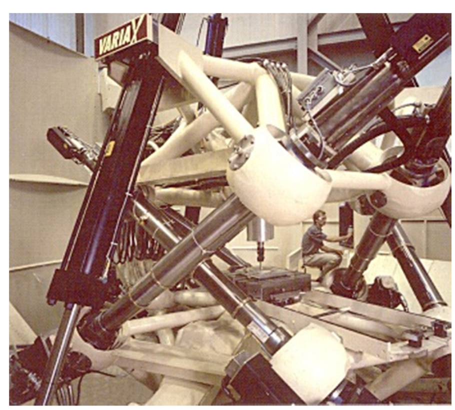
برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:
Please cite this article using:
A. Rabbani, R. Ahadi, M.J. Nategh, Machining NURBS Curves with Hexapod Machine Tool, *Modares Mechanical Engineering*, *Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 490-494, 2015 (in Persian فارسی)

لازم است. در ضمن اگر به زنجیره سینماتیکی یک دستگاه پنج محوره رجوع شود می‌توان دید که محور اول زنجیره، بقیه محورها را حمل می‌کند. بنابراین پاسخ دینامیکی توسط اینرسی مجموعه محدود می‌گردد. لذا مکانیزمی ایده‌آل می‌باشد که بتواند قطعه‌کار را حرکت دهد بدون این که نیاز باشد محورهای دیگر را حمل کند. در نتیجه این ایده دستگاه هگزاپاد مورد طراحی قرار گرفت. با توجه به این ایده استفاده‌های زیادی مطرح گردیدند، ولی به دلیل پیچیدگی کنترل شش پایه از این مکانیزم تنها به‌عنوان شبیه‌ساز سکوی هواپیما استفاده می‌گردید. اما اخیرا با توجه به پیشرفت خیره کننده در سرعت محاسبات و همچنین کاهش هزینه آن از این ایده برای طراحی میز ماشین‌ابزار مورد استفاده واقع گردید. ماشین‌ابزار اولی که با ایده ساخته شد دستگاه واریاکس[1] ساخت شرکت گیدینگس و لویس[2] می‌باشد که در شکل ۱ آمده است. این ماشین‌ابزار دارای فضای کاری ۶۳۰×۶۳۰×۶۳۰ میلی‌متر و با قابلیت چرخش حدود ۲۵ درجه حول محورهای اصلی و هم‌چنین با دقت ۱۱ میکرومتر می‌باشد. ماشین دوم با نام هگزاپاد ابرادونی است که ساخت شرکت اینگرسول می‌باشد. این ماشین‌ابزار با فضای کاری ۱۲۰۰×۱۰۰۰×۱۰۰۰ میلی‌متر و چرخش حدود ۱۵ درجه حول محورهای اصلی و دقت ۲۰ میکرومتر موجود می‌باشد که در شکل ۲ نمونه‌ای از این دستگاه آورده شده است [۴]. بعد از این شرکت‌ها، نمونه‌های دیگری توسط دیگر شرکت‌های صنعتی برای موارد مختلف ساخته شد که به بازار نیز عرضه گردیدند.

در این پژوهش ابتدا دستگاه ماشین‌ابزار هگزاپاد ساخته شده در آزمایشگاه فناوری‌های پیشرفته در ماشین ابزار در دانشگاه تربیت مدرس معرفی می‌گردد. سپس مراحل آماده‌سازی دستگاه برای ماشین‌کاری آورده شده است. در انتها نیز چند نمونه از آزمایش‌های انجام شده توسط این مجموعه به‌همراه تحلیل آن آورده شده است. لازم به‌ذکر است که این مجموعه یک نمونه آزمایشگاهی می‌باشد و برای اولین بار است که ماشین‌کاری توسط آن صورت می‌گیرد.

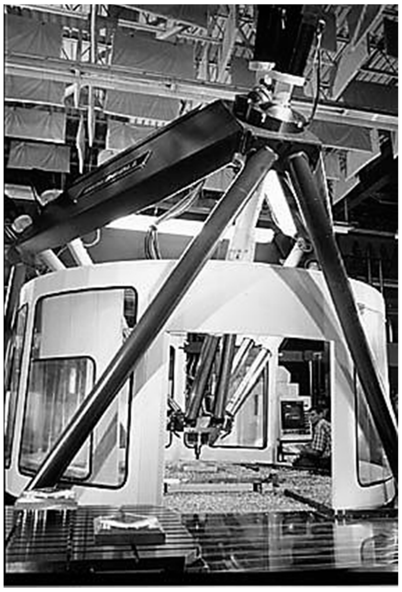
۲- دستگاه هگزاپاد

میز ماشین‌ابزار هگزاپاد از دو سکو تشکیل شده است که این دو سکو توسط شش پایه با طول قابل تغییر به کمک مفاصل کشویی از بالا و شش مفصل یونیورسال از پایین به یکدیگر متصل شده‌اند. سکوی پایینی در جای خود ثابت است و به عنوان پایه برای سکوی بالایی مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۱ نمونه‌ای از دستگاه واریاکس ساخت شرکت گیدینگ و لویس [۵]

1. VARIAX
2. Giddings and Lewis



شکل ۲ ماشین‌ابزار ابرادونی ساخت شرکت اینگرسول [۶]

سکوی بالای با شش درجه آزادی به عنوان میز ماشین‌ابزار انجام وظیفه می‌کند. این میز قادر است که سه حرکت انتقالی در راستای x ,y ,z و سه حرکت دورانی حول محورهای نامبرده انجام دهد. مکانیزم فوق کاربردهای فراوانی دارد که عبارت‌اند از:

- ماشین‌کاری قطعات پیچیده با اندازه‌های متوسط و کوچک
- ماشین‌کاری میکرو
- کنترل ابزار برای ماشین‌کاری و ساخت دقیق
- موقعیت‌دهی و جهت‌دهی تلسکوپ و تجهیزات ماهواره
- جراحی پزشکی

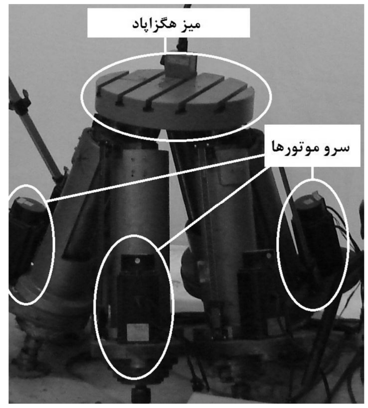
این نوع پیکر بندی به عنوان یک میز فرز مزایای زیر را دارد:

- سفتی و صلبیت بالای سیستم در نتیجه ساختار موازی و محوری بودن نیروها
- نسبت بار به وزن زیاد
- خطاهای اتصال غیرتجمعی (یعنی خطاهای محرکه‌ها جمع نمی‌شود)
- حرکت‌های دقیق حتی در بارهای متناوب سنگین و شتاب‌های بالا
- افزایش سرعت ماشین‌کاری
- عدم نیاز به موتور پایه قوی

به‌طورکلی این طرح برای فرآیندهای ساخت و تولید متغیر و ماشین‌کاری با سرعت بالا، تبدیل ماشین‌ابزارهای معمولی قدیمی به ماشین‌ابزارهای CNC جدید و شبیه سازهای پرواز مناسب می‌باشد.

در شکل ۳ نمونه ساخته شده این دستگاه را در آزمایشگاه فناوری‌های پیشرفته در ماشین‌های ابزار مشاهده می‌نمایید.

در مکانیزم هگزاپاد که یک مکانیزم موازی به‌شمار می‌آید، دو پارامتر موقعیت میز بالایی و طول پایه‌های مکانیزم توسط سینماتیک دستگاه به یکدیگر مرتبط می‌شوند. بدین معنی که با معلوم بودن هر یک دیگری را می‌توان به دست آورد. سینماتیک معکوس مکانیزم، موقعیت مشخص مکانیزم را به طول پایه‌ها تبدیل می‌کند. ولی برای یک مجموعه طول پایه‌ها در مکانیزم می‌توان از طریق سینماتیک مستقیم مکانیزم، یک موقعیت منحصر به فرد برای میز بالایی به‌دست آورد.



شکل ۳ نمونه آزمایشگاهی هگزاپاد ساخته شده در دانشگاه تربیت مدرس

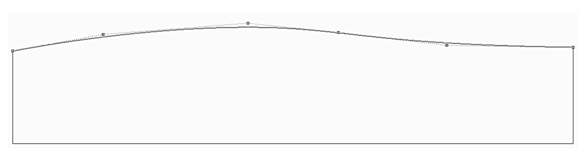
۳- منحنی نربز

سطوح با شکل دلخواه به‌طور گسترده در صنایع هوافضا و خودرو استفاده می‌شوند و همچنین در صنعت قالب‌سازی کاربرد فراوانی دارند. تعریف این سطوح بدین صورت است که به سطحی گفته می‌شود که شامل یک یا چند سطح غیرمسطح یا درجه دو باشد [۷].

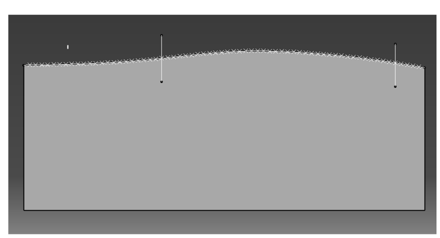
برای بیان یک منحنی به زبان ریاضی از فرمول‌بندی نربز استفاده می‌شود. این نوع فرمول‌بندی در نرم‌افزارهای مکانیکی کاربرد خاص خود را دارا می‌باشد. برای بیان یک منحنی نربز به یک بردار نقاط کنترل به همراه وزن هر نقطه و همچنین بردار گره نیاز می‌باشد. اطلاعات منحنی نربزی که در این پژوهش ماشین‌کاری گردید، در جدول ۱ آمده است. هم‌چنین در شکل ۴ و ۵ این منحنی در نرم‌افزار راینو[1] و کتیا[2] شبیه‌سازی شده است.

جدول ۱ اطلاعات منحنی نربز ماشین‌کاری توسط دستگاه هگزاپاد

شماره نقطه	X	Y	Z	وزن
۱	۱۴۰-	۰	۷۰۰	۱
۲	۹۰-	۰	۷۰۹	۱
۳	۱۰-	۰	۷۱۵	۱
۴	۴۰	۰	۷۱۰	۰/۹
۵	۱۰۰	۰	۷۰۳	۱/۱
۶	۱۷۰	۰	۷۰۲	۱



شکل ۴ شبیه‌سازی منحنی در محیط نرم‌افزار راینو با نقاط کنترلی آن



شکل ۵ محدوده ماشین‌کاری شده منحنی در نرم‌افزار کتیا

1. Rhino
2. Catia

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد محدوده ماشین‌کاری تمام منحنی نمی‌باشد و بین دو خطی که در شکل مشخص گردیده‌اند می‌باشد. دلیل این امر بزرگی طول منحنی نسبت به اندازه قطعه‌کار می‌باشد. لازم به ذکر است که اطلاعات این منحنی از قبیل نقاط کنترلی، تابع وزن و بردار گره از برنامه نوشته شده در زبان برنامه‌نویسی پایتون[3] استخراج گردید. در شکل ۶ تصویری از این برنامه به همراه قطعه‌کار که وارد آن شده است، مشاهده می‌گردد.

٤- روش انجام آزمایش

همان‌طور که پیش‌تر مطرح گردید، از دستگاه هگزاپاد برای اولین بار به‌عنوان میز ماشین‌ابزار مورد استفاده قرار می‌گرفت. لذا انجام یک سری مقدمات لازم به نظر می‌رسید. از جمله این کارها خرید یک دستگاه فرز و افزودن یک قطعه رابط به آن برای افزایش محدوده فضای کاری آن می‌باشد. در شکل ۷ مجموعه گیره و قطعه‌کار و دستگاه فرز به همراه دستگاه هگزاپاد را مشاهده می‌گردد.

برای شروع آزمایش ابتدا از ماشین‌کاری یک دایره و تحلیل آن شروع شد. دایره‌ای با شعاع ۴۰ میلی‌متر و مرکز مختصات (X=۱۵، Y=-۲۰) و در صفحه Z=۷۰۰ ماشین‌کاری شد. در ادامه منحنی نربز معرفی شده در شکل ۵ به همراه محدوده آن توسط دو روش ماشین‌کاری شد. یک بار از طریق روش سنتی با استفاده از G01 و بار دیگر با استفاده از فرمول‌بندی و برنامه منحنی نربز دستگاه. در شکل ۸ عملیات ماشین‌کاری دایره و شکل ۹ نمونه نهایی ماشین‌کاری شده و شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ماشین‌کاری منحنی نربز آورده شده است.

شکل ۶ قطعه‌کار و استخراج اطلاعات لازم برای ماشین‌کاری

شکل ۷ مجموعه دستگاه هگزاپاد، فرز و گیره‌بندی در حین ماشین‌کاری

3. Python

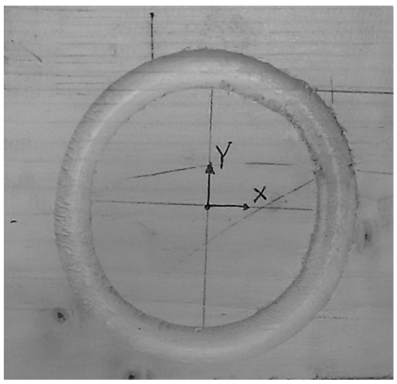
۵- نتایج و تحلیل آن

در اولین قدم توسط دستگاه یک دایره با مختصات مرکز (X=-۱۵، Y=-۲۰) و با شعاع ۴۰ میلی‌متر ماشین‌کاری گردید که در شکل ۸ و ۹ تصاویر آن آمده است. با توجه به آزمایشگاهی بودن دستگاه اما نتایج خوبی حاصل گردید. قطر دایره در راستای محور Y دستگاه حدود ۸۵/۰۵۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شد که میزان خطای دستگاه در این راستا حدود ۶/۳۲٪ و هم‌چنین در راستای X قطر دایره ۸۰/۹۴ میلی‌متر اندازه‌گیری شد و در نتیجه میزان خطای آن حدود ۱/۲٪ برآورد گردید. لازم به‌ذکر است که این دایره دو بار ماشین‌کاری شد و در هر دو بار نتایج بسیار نزدیک به هم بودند. لذا می‌توان این نتیجه را دریافت که این خطا تکرارپذیر است و با کالیبراسیون قابل رفع است. یا به‌عبارتی با تغییرات در برنامه نوشته شده برای میان‌یابی دایره می‌توان این خطا را کاهش داد. در ضمن تکرارپذیری دستگاه نیز مورد بررسی قرار گرفت. بدین صورت که در هر دو دفعه دایره بزرگ‌تر از اندازه واقعی و با خطاهایی تقریبا یکسان ارزیابی شد که حاکی از تکرارپذیری قابل دستگاه می‌باشد.

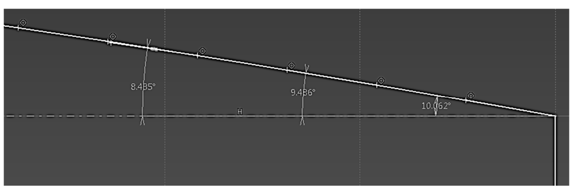
در قدم بعدی منحنی نربز توضیح داده شده در جدول ۱ و شکل‌های ۴ و ۵ ماشین‌کاری گردید. این منحنی توسط دو روش ماشین‌کاری شد. روش اول با استفاده از نقاط کنترل منحنی که توسط برنامه مربوط به آن (شکل ۶) اطلاعات لازم برای دستگاه استخراج گردید، ماشین‌کاری صورت پذیرفت. در روش بعدی این منحنی به تکه‌های کوچکی تقسیم شد و اطلاعات هر منحنی در نرم‌افزار کتیا مطابق شکل ۱۰ استخراج گردید و با استفاده از G01 ماشین‌کاری انجام شد. در این حالت منحنی به ۶۶ تکه خط تقسیم شد و هر قسمت نقطه شروع و پایان و زاویه منحنی با خط راست ذخیره شد و در نهایت مجموع این خطوط وارد دستگاه شد و ماشین‌کاری صورت پذیرفت. در حالت اول زمان ماشین‌کاری قسمت مشخص شده در شکل ۵ با سرعت پیشروی ۵ میلی‌متر بر ثانیه حدود ۴۰ ثانیه به طول انجامید. در حالی‌که در روش دوم ماشین‌کاری همین قسمت از منحنی حدود ۱۱۵ ثانیه به طول انجامید. در شکل ۱۱ قطعه ماشین‌کاری شده توسط این دو روش را مشاهده می‌نمایید. در روش سنتی دستگاه هر تکه خط را با یک شتاب افزایشی شروع به پیمایش می‌کند و پس از رسیده به اواسط پاره‌خط شروع به کاهش سرعت می‌کند و لذا همین امر باعث افزایش چشم‌گیر زمان ماشین‌کاری در این حالت نسبت به حالت ماشین‌کاری با نقاط کنترلی نربز شد. مشکل دیگر این روش این است که چون میان‌یابی هر تکه خط با مقداری خطا همراه است با افزایش این تکه خط‌ها میزان خطای دستگاه به صورت تجمعی افزایش می‌یابد. این خطا حتی به صورت چشمی قابل مشاهده است. نقطه پایانی هر دو روش یکی است اما به دلیل خطای تجمعی روش سنتی، مکان واقعی آن در نقطه‌ای دیگر قرار دارد. با وجود زمان بیشتر ماشین‌کاری در روش سنتی اما در پایان مشاهده شد که کیفیت سطح هر دو روش تقریبا یکی می‌باشد. زبری سطح هر دو منحنی حدود (Ra=۳/۴µ) به‌دست آمد. لازم به ذکر است که از دستگاه زبری سنج پرتابل ماهر برای اندازه‌گیری زبری استفاده شده است.

در قدم بعدی قطعه‌کار زیر دستگاه اندازه‌گیری مختصات[1] قرار گرفت و ابر نقاط مربوط به هر منحنی استخراج گردید. از این ابر نقاط یک منحنی عبور داده شد و دقت منحنی ماشین‌کاری شده مطابق شکل ۱۱ و ۱۲ مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌گردد منحنی ماشین‌کاری شده توسط روش سنتی بین دو منحنی اصلی قرار گرفته است. فاصله این دو

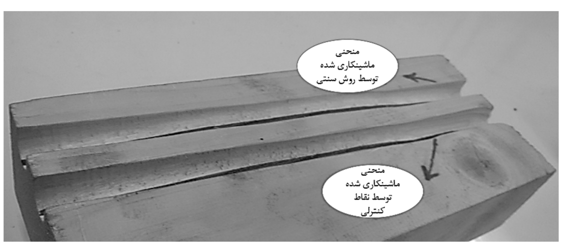
شکل ۸ دستگاه در حین ماشین‌کاری دایره



شکل ۹ دایره ماشین‌کاری شده توسط دستگاه هگزاپاد



شکل ۱۰ منحنی نربز و تقسیم آن به تکه های کوچک

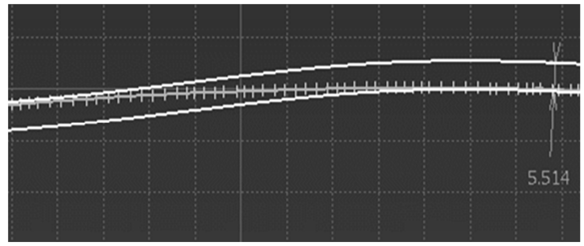


شکل ۱۱ منحنی ماشین‌کاری شده توسط دو روش نربز و سنتی

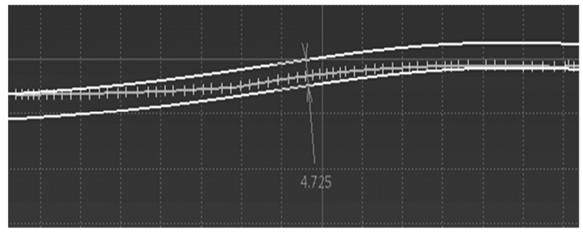
منحنی ۵/۵۱۴ میلی‌متر محاسبه شده است. در شکل ۱۲ نیز منحنی ماشین‌کاری شده توسط نقاط کنترلی نربز آمده است. در این حالت فاصله بین دو منحنی اصلی ۴/۷۲۵ میلی‌متر گزارش شده است که با توجه به آزمایشگاهی بودن دستگاه این مقادیر قابل قبول می‌باشند. لازم به ذکر است که طول منحنی ماشین‌کاری شده حدود ۲۰۰ میلی‌متر می‌باشد. در نتیجه دقت تلرانس هندسی ماشین‌کاری با استفاده از نقاط کنترلی منحنی نربز بهتر از روش سنتی می‌باشد. همچنین در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ منحنی هاشوردار منحنی ماشین‌کاری شده می‌باشد که بین دو منحنی اصلی قرار گرفته است.

در آخرین مرحله این منحنی بر روی یک نمونه آلومینیومی ماشین‌کاری شد که در شکل ۱۳ آورده شده است. صافی سطح این قطعه کار توسط دستگاه زبری‌سنج ماهر موردبررسی قرار گرفت و زبری سطح آن ۲/۲۵ گزارش گردید.

1. CMM (Coordinate Measuring Machine)



شکل ۱۱ ابر نقاط و منحنی ماشین‌کاری توسط روش سنتی



شکل ۱۲ ابر نقاط و منحنی ماشین‌کاری توسط نقاط نربز

شکل ۱۳ نمونه منحنی ماشین‌کاری شده بر روی آلومینیوم

٦- نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای اولین بار از دستگاه هگزاپاد به عنوان میز ماشین‌ابزار استفاده گردید و توسط آن ماشین‌کاری انجام شد. برای ماشین‌کاری ابتدا خطوط ساده و بعد از آن دایره و در نهایت هم منحنی نربز بر روی چوب ماشین‌کاری شدند. منحنی نربز ابتدا با استفاده از روش سنتی یا همان G01 ماشین‌کاری شدند. سپس بعد از استخراج اطلاعات منحنی با استفاده از نقاط کنترلی و بردار وزن ماشین‌کاری صورت پذیرفت. در نهایت هم این منحنی بر روی آلومینیوم ماشین‌کاری شد. نتایج حاصل به شرح زیر می‌باشند:

- دستگاه هگزاپاد موجود با وجود آزمایشگاهی بودن آن، از نتایج قابل قبولی برای ماشین‌کاری برخوردار است.
- میزان خطای شعاعی ماشین‌کاری دایره در راستای Y بیشتر از راستای X است که این خطا به دلیل تکرار پذیری با کالیبراسیون قابل رفع است.
- ماشین‌کاری منحنی‌های پیچیده با استفاده از نقاط کنترلی منحنی نربز بسیار ساده‌تر از روش سنتی می‌باشد.
- زمان ماشین‌کاری منحنی پیچیده در روش سنتی سه برابر روش منحنی نربز با استفاده از نقاط کنترلی می‌باشد.
- دقت ماشین‌کاری در روش سنتی پایین‌تر از روش نقاط کنترلی منحنی نربز است.
- در روش ماشین‌کاری منحنی‌های پیچیده با استفاده از نقاط کنترلی منحنی نربز، به وضوح تاثیر چالاکی دستگاه همراه با کاهش زمان ماشین‌کاری و همچنین افزایش دقت سطح نهایی قابل مشاهده است.

۷- مراجع

[1] D. Zhang, Parallel Robotic Machine Tools, Oshawa, ON, *Springer*, 2010.

[2] Chen ZC, Dong Z, Vickers GW. Automated surface subdivision and tool path generation for 3 ½ ½ axis CNC machining of sculptured parts. *Computers in Industry* 2003; 50:319_31

[3] Gray PJ, Ismail F, Bedi S. Arc-intersect method for 3 ½ ½ axis tool paths on a 5 axis machine. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2007; 47(1):182_90.

[4] E.L.J. Bohez. Five-axis milling machine tool kinematic chain design and analysis. *International Journal of Machine Tools & Manufacture,* Vol. 42, pp. 505–520, 2002

[5] Myriam Terrier, Arnaud Dugas, Jean-Yves Hascoët. Qualification of parallel kinematics machines in high-speed milling on free form surfaces. .*International Journal of Machine Tools and Manufacture.* Vol 44, Issues 7–8, Pages 865–877, 2004.

[6] Falco, Joseph A. Simulation tools for collaborative exploration of hexapod machine capabilities and applications. *Proc. of the 1997 International Simulation Conference and Technology Showcase.* 1997

[7] Ali Lasemi, Deyi Xue_, Peihua Gu. Recent development in CNC machining of freeform surfaces: *A state-of-the-art review. Computer-Aided Design.* Vol. 42, pp. 641_654, 2010.