مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان 1395، دوره 16، شماره 8، ص‌ص 395-400

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

ماشینکاری سطوح با شکل آزاد با استفاده از دستگاه هگزاپاد

علی ربانی[1]، محمدجواد ناطق[2*]، داوود کریمی[3]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
3- استادیار، مهندسی مکانیک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران
* تهران، صندوق پستی 14115-143، nategh@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 19 خرداد 1395
پذیرش: 06 مرداد 1395
ارائه در سایت: 21 شهریور 1395

کلید واژگان:
هگزاپاد
ماشین‌کاری
سطوح با شکل آزاد
سیستم CNC
فرمول‌بندی نربز

چکیده

دستگاه هگزاپاد با دارا بودن ساختاری موازی از شش درجه آزادی برخوردار است. این دستگاه بر خلاف ماشین‌ابزارهای سنتی چالاکی بالایی دارد. با توجه به این شش درجه آزادی از آن می‌توان برای ماشینکاری سطوح با شکل آزاد استفاده نمود. سطوح با شکل آزاد از جمله سطوح پرکاربرد در صنعت امروز می‌باشند. از این سطوح در صنایع خودرو سازی، هوا فضا و قالب‌سازی به وفور استفاده می‌گردد. با توجه به این کاربرد روزافزون، ماشین‌کاری این سطوح نیز بسیار مورد توجه پژوهشگران واقع شده است. در ماشین‌ابزارهای فرز پنج محوره در این زمینه کارهای فراوانی صورت پذیرفته است. در این مقاله ماشینکاری سطوح با شکل آزاد با استفاده از دستگاه هگزاپاد مورد بررسی قرار گرفته است و بحث اصلی آن تایید امکان پذیری استفاده از دستگاه هگزاپاد به عنوان میز ماشین‌ابزار و ماشینکاری به کمک آن است. ابتدا نحوه میانیابی این سطوح با توجه به ساختار موازی دستگاه آورده شده است. در ادامه استخراج اطلاعات سطوح با شکل آزاد به کمک فرمول‌بندی نربز توضیح داده شده است. سپس ماشینکاری سطوح نربز با دستگاه هگزاپاد بررسی شد. در نهایت هم دو قطعه با شکل آزاد در نرم‌افزار کتیا طراحی شدند و سپس ماشین‌کاری گردیدند.

Machining Free Form Surfaces with Hexapod Machine Tool

Ali Rabbani[1], Mohammad Javad Nategh[1], Davoud Karimi[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Iranian Research Organization for Science and Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran, nategh@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 08 June 2016
Accepted 27 July 2016
Available Online 11 September 2016

Keywords:
Hexapod
Machining
Free form surfaces
CNC system
NURBS formulation

ABSTRACT

A hexapod machine tool with a parallel structure has six degrees of freedom. This machine has a high dexterity unlike traditional machine tools. The hexapod can be used in machining free form surfaces. Free form surfaces are widely used in today's industries. These surfaces are much encountered in auto, aerospace and mold design industries. Consequently, machining of these surfaces has attracted the attention of researchers. In this field much research has been done on five axis machine tools. In this paper machining free form surfaces with hexapod machine tool has been investigated. The main topic of this paper is the feasibility of using hexapod as a machine tool table and machining with it. First, the interpolation of free form surfaces for parallel structure machines is explained. Then NURBS curves and surfaces are described and its formulation in matrix form is explained. After that, extracting information of free form surfaces with NURBS formulation is explained. Subsequently, some explanations about preparation of machining are given. Finally, two free form surfaces designed in Catia have been machined with the developed hexapod machine tool.

1- مقدمه

ماشین‌ابزار هگزاپاد به عنوان ماشین‌ابزاری که دارای شش درجه آزادی و هم چنین از چالاکی بالایی برخوردار است، جایگاه ویژه‌ای در ماشین‌کاری قطعات با شکل آزاد دارد. ماشین‌کاری سطوح و منحنی‌های آزاد نیز در تولید قطعات پیچیده در صنایع مختلف مانند هوافضا، قالب‌سازی و غیره کاربرد فراوانی دارند. در همین زمینه در دستگاه‌های فرز تلاش‌های زیادی صورت پذیرفته است. لذا انجام ماشین‌کاری این سطوح در ماشین‌ابزار هگزاپاد و همچنین بررسی نتایج نیز امری ضروری به نظر می‌رسد.

برای ماشینکاری سطوح با شکل آزاد از ماشین‌ابزارهای سه محوره و پنج محوره به طور گسترده استفاده می‌شود. ماشین‌های پنج محوره انعطاف پذیری بیشتری داشته و می‌توانند سطوح پیچیده را با کیفیت بهتر و در زمان کمتر نسبت به ماشین‌ابزار سه محوره تولید کنند. ماشین‌ابزارهای 3 ½ ½ محوره نیز به دلیل اینکه در مقایسه با ماشین‌ابزار پنج محوره هزینه کمتری دارند و از استحکام و سفتی بهتری برخوردارند، در صنعت کاربرد خاص خود را دارا می‌باشند [1].

محور اول در زنجیره سینماتیکی یک ماشین‌ابزار سنتی پنج محوره

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:
Please cite this article using:
A. Rabbani, M. J. Nategh, D. Karimi, Machining Free Form Surfaces with Hexapod Machine Tool, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 8, pp. 395-400, 2016 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-04-04]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.8.14.1]

(شکل 1)، بقیه محورها را حمل می‌کند و در نتیجه پاسخ دینامیکی توسط اینرسی مجموعه محدود می‌شود. در شکل 2 یک ماشین پنج محور نشان داده شده است. در این ماشین همانطور که مشاهده می‌گردد همه محورها ابزار را حمل می‌کنند و قطعه کار ثابت در نظر گرفته می‌شود. در این حالت محور X دستگاه بر روی یک قاب ثابت قرار می‌گیرد. در ادامه محور چرخشی B بر روی این محور قرار می‌گیرد. به همین ترتیب محور Y بر روی B و سپس محور A بر روی Y و سپس محور Z بر روی A قرار گرفته است. در شکل 2 مشهود است که محور X بقیه محورها را حمل کرده و در صورت اعمال تغییری در راستای X همه محورها در این راستا بایستی انتقال یابند. این زنجیره پاسخ دینامیکی مجموعه را نیز محدود می‌کند. حال اگر قطعه کار بزرگ باشد و نیاز به دستگاهی با سفتی بالا باشد، ماشین‌ابزارهایی حجیم و سنگین بایستی طراحی گردند تا با دقت مطلوب ماشینکاری صورت پذیرد.

این عیب در مکانیزم سری، باعث شد تا دستگاه هگزاپاد با ساز و کار موازی طراحی شود. در ساز و کار موازی هر محور خود را حمل می‌کند و در نتیجه قطعه‌کار تغییر موقعیت پیدا می‌کند در حالی که نیازی به حمل به بقیه محورها نیست. با این ایده چندین ماشین‌ابزار ساخته شده است. برای مثال ماشین‌ابزاری با نام هگزاپاد ابرادونی است که ساخت شرکت اینگرسول می‌باشد. این ماشین‌ابزار دارای فضای کاری 1200×1000×1000 میلیمتر می‌باشد. همچنین دستگاه قابلیت چرخش حدود 15 درجه حول محورهای اصلی را دارا می‌باشد و دقت آن نیز 20 میکرومتر می‌باشد. نمونه‌ای از این دستگاه در شکل 3 قابل مشاهده است [2].

با توجه به دارا بودن شش درجه آزادی و همچنین چالاکی بالای دستگاه هگزاپاد از آن می‌توان برای ماشینکاری سطوح با شکل آزاد بهره برد.

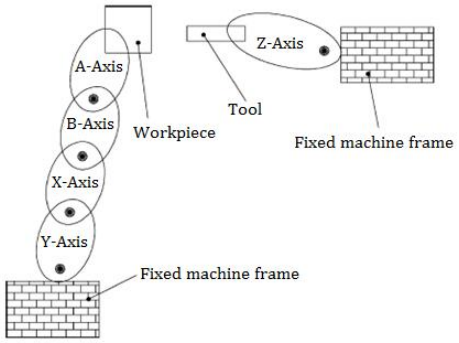

Fig. 1 Kinematic chain of a five axis mill

شکل 1 زنجیره سینماتیکی یک دستگاه پنج محوره [2]

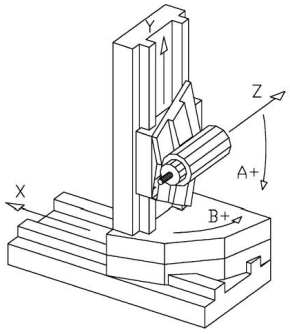

Fig. 2 Five axis machine

شکل 2 ماشین پنج محور [2]

Fig. 3 a sample of octahedral machine manufactured by Ingersoll company

شکل 3 نمونه‌ای از دستگاه ابرادونی ساخت شرکت اینگرسول [3]

همان‌طور که در شکل 3 آورده شده است این ایده صنعتی شده است و نمونه‌هایی نیز روانه بازار شده است. اما راجع به نتایج ماشینکاری و همچنین در زمینه ماشینکاری سطوح به خصوص سطوح با شکل آزاد توسط این دستگاه پیشینه پژوهشی موجود نمی‌باشد. در ضمن در نمونه‌ی نشان داده شده در شکل 3 و همچنین دیگر نمونه‌های صنعتی شده‌ی هگزاپاد، ابزار بر روی دستگاه قرار گرفته و مجموعه ابزار بالای قطعه‌کار واقع می‌گردد و سپس ماشینکاری صورت می‌پذیرد. ولی در این جا این قطعه کار است که بر روی دستگاه هگزاپاد واقع می‌گردد و ابزار بالای قطعه کار ثابت می‌باشد. در این پژوهش این ابزار کلگی یک دستگاه فرز معمولی می‌باشد. بدین ترتیب یک دستگاه فرز معمولی توسط این ربات هگزاپاد به یک دستگاه با شش درجه آزادی تبدیل شده است که از مزیت‌های این طرح می‌باشد. در این پژوهش برای اولین بار یک سطح با شکل آزاد توسط دستگاه هگزاپاد ماشینکاری می‌گردد. برای تعریف سطوح با شکل آزاد نیز از فرمول بندی نربز بهره برده شده است. در زمینه ماشینکاری سطوح با شکل آزاد و با استفاده از فرمول بندی نربز در ماشین فرز 5 محور سنتی کارهای فراوانی صورت گرفته است که در ادامه مقدمه‌ای مختصر در این باره آورده شده است.

ورنر و همکاران در سال 1998 بر روی مهندسی معکوس قطعات با شکل آزاد پرداختند. آنها اطلاعات سطح را پس از استخراج، با استفاده از فرمول‌بندی نربز بهینه کرده و سپس قطعه را با دستگاه فرز 5 محور ماشینکاری کردند. نتایج آنها حاکی از افزایش دقت نهایی سطح پس از بهینه نمودن تعریف سطح است [4].

وی لی و همکاران در سال 2008 به بررسی نحوه ایجاد مسیر با استفاده از فرمول‌بندی نربز پرداختند. آنها یک پیش‌میانیاب برای تولید مسیر ارائه دادند که این پیش‌میانیاب مزیت فرمول‌بندی نربز را در برنامه های کنترل عددی کامپیوتر بیش از پیش نشان می‌دهد. تحقیقات آنها حاکی از این است که هموار کننده مسیر نربز، تغییرات سرعت و شتاب را خیلی کاهش می‌دهد که این کاهش تغییرات در افزایش صافی سطح موثر است [5].

ژیفنگ و همکاران در سال 2012 با استفاده از منحنی های دوآل نربز[1] به میانیابی سطوح پیچیده برای دستگاه فرز 5 محوره پرداختند. آنها با استفاده از این روش یک پره توربین را ماشینکاری کردند که نتایج حاکی از بهتر شدن کیفیت سطح در مقایسه با روش ماشینکاری سنتی است [6].

[1] Dual NURBS

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-04-04]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.8.14.1]

جیچون وو و همکاران در سال 2015 به بررسی یک روش برای پیش‌پردازش نقاط کنترلی با استفاده از منحنی‌های نربز برای ماشینکاری با سرعت بالا پرداختند. نتایج ماشینکاری آنان نشان داد که روش آنان کیفیت سطح ماشینکاری را افزایش داده و همزمان نیز زمان ماشینکاری را حدود 19 % کاهش داده است [7].

در آزمایشگاه فناوری‌های پیشرفته در ماشین ابزار دانشگاه تربیت مدرس یک عدد دستگاه هگزاپاد ساخته شده است که می‌تواند به عنوان میز ماشین-ابزار مورد استفاده قرار گیرد. این ربات موازی از یک سکوی ثابت پایینی، یک سکوی متحرک بالایی، شش محرکه و مفاصل یونیورسال و کروی تشکیل شده است. میز متحرک بالایی توسط شش مفصل کروی به محرکه‌های ماشین‌ابزار وصل شده است. این محرکه‌ها توسط شش مفصل یونیورسال به سکوی ثابت پایینی متصل گردیده‌اند. میز ماشین‌ابزار هگزاپاد دارای شش درجه آزادی می‌باشد که سه درجه آن طولی و سه درجه آن آزادی زاویه‌ای در فضاست. نمونه ساخته شده این میز در شکل 4 آمده است.

ربات هگزاپاد دارای شش پایه است که هر کدام از این پایه‌ها به یک سرو موتور متصل شده‌اند. هر کدام از این سرو موتورها با اتصال به سیستم کنترل مرکزی ماشین با دریافت هر پالس مشخص، می‌توانند مقدار مشخصی تغییر طول در پایه‌ها ایجاد نمایند. هر تغییر مشخص پایه‌ها، باعث ایجاد یک موقعیت منحصر به فرد برای میز محرک بالایی در فضا می‌شود.

2- ماشینکاری سطح نربز

در این قسمت امکان‌سنجی ماشینکاری سطح با شکل آزاد توسط دستگاه هگزاپاد مورد بررسی می‌گیرد. ماشینکاری سطح تاکنون توسط دستگاه هگزاپاد انجام نشده است و در این پژوهش دو سطح با شکل آزاد ماشینکاری می‌گردد. روش کار بدین صورت است که ابتدا یک سطح با شکل آزاد انتخاب می‌گردد. این سطح می‌تواند از ابر نقاط به دست آمده باشد و یا اینکه در نرم‌افزارهای شبیه‌سازی طراحی شده باشد. سپس با استفاده از کد نوشته شده در نرم‌افزار برنامه‌نویسی پایتون اطلاعات سطح در قالب فرمول‌بندی نربز به‌دست می‌آید. لازم به ذکر است که این اطلاعات شامل: نقاط کنترلی، بردار گره و بردار وزن است. حال این نقاط وارد قسمت کنترلی دستگاه هگزاپاد شده و میانیاب سطوح نربز نیز این سطح را تشکیل می‌دهد. پس از تشکیل سطح، نقاط میانیابی شده استخراج می‌گردند و این نقاط به واحد سینماتیک دستگاه ارسال می‌شوند. این واحد نیز با توجه به نقاط میانیابی شده طول پایه‌ها را استخراج می‌نماید. این طول پایه‌ها به واحد کنترل حرکت ارسال شده و این واحد نیز سیگنال‌های حرکتی را برای سروو موتورها می‌فرستد و در نتیجه پیمایش سطح صورت می‌پذیرد.

2-1- سطح نربز

سطوح با شکل آزاد یا سطوح مجسمه‌ای شکل، در قالب سازی کاربرد زیادی داشته و از آنها در صنایع هوافضا و خودروسازی نیز استفاده می‌گردد. سطحی که شامل یک یا چند سطح غیر مسطح یا درجه دو باشد از جمله سطوح با شکل آزاد به حساب می‌آید [8].

بعد از تقریب منحنی‌ها با روش بی- اسپلاین و معرفی سطوح توسط این معادلات مهندسان به مشکلاتی برخوردند که برای جبران این مشکلات از منحنی و سطوح نربز استفاده کردند. از فواید سطوح نربز این است که توسط آنها هر خط یا منحنی دلخواهی را می‌توان به زبان ریاضی بیان کرد. توسط این معادلات مهندسین قادر هستند که کنترل کاملی بر روی شکل منحنی

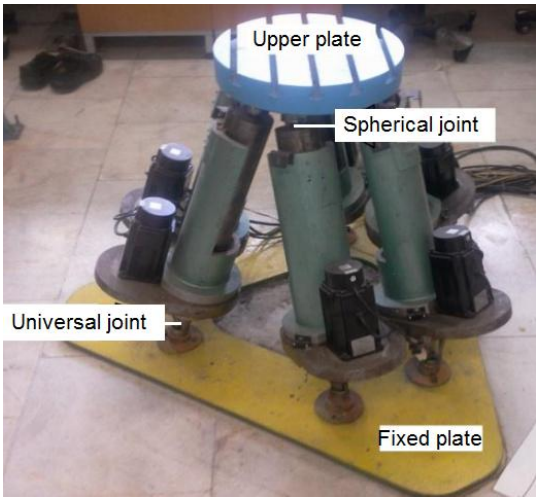

Fig. 4 Hexapod machine tool

شکل 4 دستگاه هگزاپاد

داشته باشند. با استفاده از نقاط کنترلی و بردار گره و بردار وزن می‌توان انحنا و همواری منحنی را تنظیم نمود. این معادلات قادر به بیان منحنی‌های پیچیده با کمترین میزان اطلاعات می‌باشند. برای مثال یک دایره با شعاع 20 سانتی‌متر اگر توسط خطوط ساده تعریف شود، حدود 4 هزار پاره خط برای تعریف آن نیاز است تا از یک چند ضلعی به دایره شبیه گردد. در حالی که همین دایره با فرمول‌بندی نربز توسط هفت نقطه قابل تعریف است.

در این مقاله از شکل ماتریسی منحنی های رشنال در میانیابی آنها استفاده شده است. کوهن و رسنفلد نشان دادند که شکل عمومی mامین تکه از یک تابع بی اسپلاین رشنال می‌تواند به شکل رابطه (1) ارائه شود [9].

$$B_m = [T][N][P] \quad 1 < m < n-k+1 \tag{1}$$

که در آن k مرتبه تابع مبنای بی اسپلاین است و چندضلعی کنترل $n+1$ راس دارد. P برداری است حاوی k نقطه کنترلی متوالی و T مطابق رابطه (2) تعریف شده است.

$$T = [t^{k-1} \quad t^{k-2} \quad \dots \quad t \quad 1]^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

برای به دست آوردن بردار T، منحنی باید مطابق رابطه (3) تغییر پارامتر دهد.

$$t = \frac{u-u_m}{u_{m+1}-u_m} \tag{3}$$

که در آن t پارامتر جدید منحنی و u_m $(m+k)^{th}$ امین مقدار گره منحنی است. المانهای N را می‌توان از رابطه (4) به دست آورد.

$$N_{i+1,j+1} = \frac{1}{(k-1)!}\binom{k-1}{i}^{k-1} \sum_{h=j}^{i} (k-(h+1))^{i}(-1)^{h-j}\binom{k}{h-j}; \quad 0 < i,j < k-1 \tag{4}$$

به این ترتیب برای منحنی نربز می توان رابطه (5) را استخراج کرد.

$$C_m = \frac{[T][N][WP]}{[T][N][W]} \quad 1 < m < n-k+1 \tag{5}$$

که در آن

$$[WP] = [W_m P_m \quad W_{m+1}P_{m+1} \quad W_{m+2}P_{m+2}]$$
$$[W] = [W_m \quad W_{m+1} \quad W_{m+2}]$$

که $[W]$ بردار حاوی سه وزن متوالی مربوط به رئوس چندضلعی کنترل

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-04-04]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.8.14.1]

می‌باشند. استفاده از شکل ماتریسی منحنی های نربز در محاسبه مشتق مرتبه اول و دوم آن موجب سهولت و کاهش حجم محاسبات می‌شود [9].

2-2- تجهیزات آزمایش

همانطور که عنوان گردید دستگاه هگزاپاد با دارا بودن شش درجه آزادی به عنوان میز ماشین‌ابزار مورد استفاده واقع شده است. در شکل 5 مجموعه آزمایش آورده شده است. حرکت دورانی ابزار را نیز کلگی دستگاه فرز تامین می‌کند. برای تطبیق فضای کاری دستگاه فرز با دستگاه هگزاپاد، از یک قطعه واصل برای افزایش محدوده فضای کاری دستگاه استفاده شده است که در شکل 5 قابل مشاهده است. محفظه اجزای کنترلی دستگاه که در شکل 5 مشخص شده است، نیز شامل کامپیوتر صنعتی، کنترل کننده حرکت[1] و درایورهای سروو موتور می‌باشد.

همان‌طور که در شکل 5 مشاهده می‌گردد کلگی دستگاه فرز 180 درجه چرخانده شده است و بر روی دستگاه هگزاپاد قرار گرفته است. در حقیقت با افزودن دستگاه هگزاپاد، یک دستگاه فرز معمولی تبدیل به یک مجموعه ماشینکاری با شش درجه آزادی شده است. در عین حالی که با چرخاندن دوباره کلگی، می‌توان از دستگاه فرز نیز برای انجام کارهای معمولی بهره برد. برای تطبیق فضای کاری فرز با دستگاه هگزاپاد از یک قطعه واصل استفاده شده است. این قطعه واصل فضای کاری دستگاه فرز را افزایش داده و باعث قرارگیری کلگی فرز بر روی میز دستگاه هگزاپاد شده است.

3-2- ماشینکاری سطح

در این قسمت دو سطح با شکل آزاد معرفی شده‌اند. سپس مراحل ماشینکاری این دو سطح نربز در ادامه توضیح داده شده است. در شکل 6

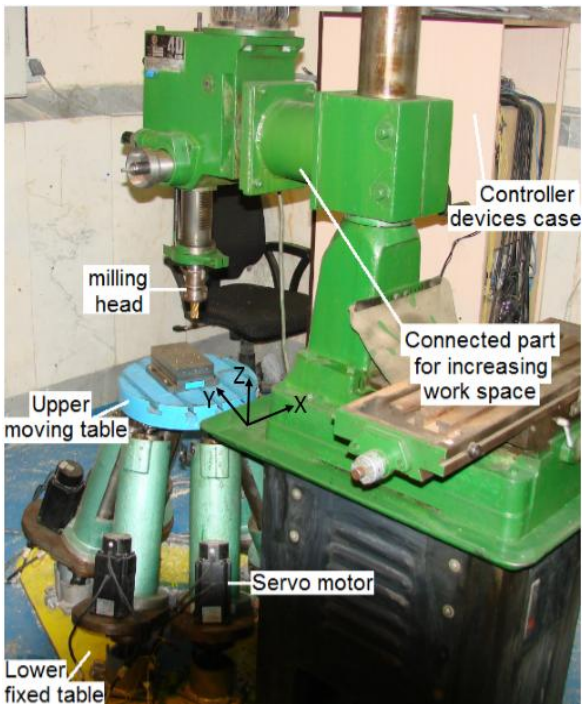

Fig. 5 set of Hexapod machine, milling machine and control system

شکل 5 مجموعه دستگاه فرز، دستگاه هگزاپاد به همراه سیستم کنترل آن

سطح نربز طراحی شده در نرم‌افزار کتیا آورده شده است و در شکل 7 استخراج آن توسط کد نوشته شده در برنامه پایتون مشاهده می‌گردد.

همانطور که در شکل 6 مشاهده می‌گردد این سطح دارای یک شکل دلخواه می‌باشد. اطلاعات سطح استخراج شده در جدول 1 آمده است. لازم به ذکر است که درجه سطح نربز استخراج شده برابر با 3 می‌باشد و از آنجایی که میانیاب دستگاه نیز سطح نربز را با درجه 3 ایجاد می‌نماید، مطابقت کامل بین درجه سطح شکل دلخواه با میانیاب دستگاه وجود دارد.

پس از استخراج اطلاعات حال بایستی این اطلاعات وارد دستگاه هگزاپاد شوند. پس از وارد کردن اطلاعات به دستگاه، در این مرحله میانیاب دستگاه سطح را تشکیل می‌دهد. میانیاب دستگاه با توجه به فاصله تعیین شده توسط کاربر، سطح را به چند منحنی با فاصله تعیین شده تقسیم می‌کند و سپس با عبور از هر منحنی، سطح را پیمایش می‌کند. دستگاه در حین پیمایش هر منحنی برای تشکیل سطح، زاویه میز را هم در راستای X و هم در راستای Y تغییر می‌دهد. زوایای میز دستگاه در هر نقطه واقع بر روی منحنی، مطابق با زوایای بردار نرمال صفحه مماس بر سطح در این نقطه می‌باشد. راستای X و Y در شکل 5 مشخص شده اند.

در مرحله اول با ابزار سرتخت[2] با قطر 12 میلیمتر خشن‌تراشی صورت می‌گیرد. در این حالت فاصله بین هر دو منحنی برابر 10 میلیمتر است. برای مرحله نهایی با ابزار سر کروی با قطر 12 میلیمتر ماشینکاری شده است. در این حالت فاصله بین دو منحنی نیز 1 میلیمتر انتخاب می‌گردد تا کیفیت و دقت سطح نهایی بالا برود. در شکل 8 قطعه‌کار در حین خشن‌تراشی آورده شده است. در شکل 9 نیز قطعه کار بعد از ماشینکاری خشن و در شکل 10 نیز قطعه کار نهایی مشاهده می‌گردد.

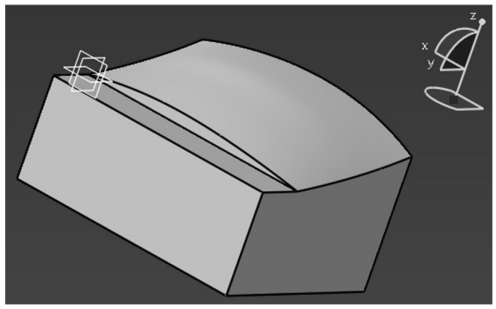

Fig. 6 Modeling of NURBS surface in Catia

شکل 6 سطح نربز شبیه سازی شده در نرم‌افزار کتیا به همراه نقاط کنترلی

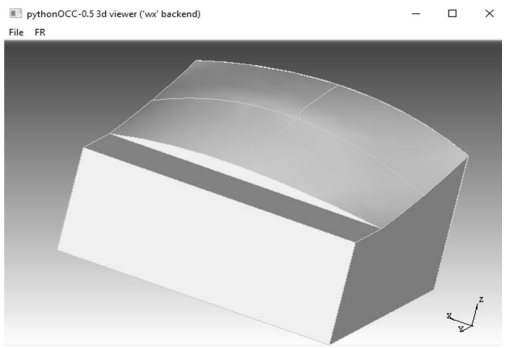

Fig. 7 Opening workpiece in Pyhton programming language and extracting data

شکل 7 وارد نمودن قطعه در نرم‌افزار به زبان پایتون و استخراج اطلاعات

[1] Trajexia

[2] End mill tool

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-04-04]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.8.14.1]

جدول 1 اطلاعات استخراج شده برای سطح نربز

Table 1 Extracted data for NURBS surface

شماره منحنی	شماره نقطه	وزن	X	Y	Z
	1	1	-140	70	650
منحنی	2	1.1	-90	70	657
اول	3	0.9	-10	07	660
	4	1.1	40	07	655
	1	1	-140	40	654
منحنی	2	1.1	-90	40	660
دوم	3	0.9	-10	40	663
	4	1.1	40	40	658
	1	1	-140	10	658
منحنی	2	1.1	-90	10	664
سوم	3	0.9	-10	10	666
	4	1.1	40	10	662
	1	1	-140	-20	662
منحنی	2	1.1	-90	-20	669
چهارم	3	0.9	-10	-20	670
	4	1.1	40	-20	665

در مرحله اول با ابزار سرتخت با قطر 12 میلیمتر خشن‌تراشی صورت می‌گیرد. در این حالت فاصله بین هر دو منحنی برابر 10 میلیمتر است. برای مرحله نهایی با ابزار سر کروی با قطر 12 میلیمتر ماشینکاری شده است. در این حالت فاصله بین دو منحنی نیز 1 میلیمتر انتخاب می‌گردد تا کیفیت و دقت سطح نهایی بالا برود. شکل 8 قطعه‌کار در حین خشن‌تراشی آورده شده است. در شکل 9 نیز قطعه کار بعد از خشن‌تراشی و در شکل 10 نیز قطعه کار نهایی مشاهده می‌گردد.

در ادامه برای تایید امکان‌پذیری ماشینکاری سطوح با شکل آزاد توسط دستگاه هگزاپاد، یک سطح دیگر نیز در نرم‌افزار کتیا شبیه سازی گردید که در شکل 11 مشاهده می‌گردد. سپس اطلاعات آن استخراج گردید و مانند نمونه قبلی وارد دستگاه گردید. در نهایت هم سطح نربز نهایی ماشینکاری شده در شکل 12 نشان داده شده است.

3-نتیجه‌گیری

در این مقاله در مورد بررسی امکان‌سنجی ماشینکاری سطوح با شکل آزاد با

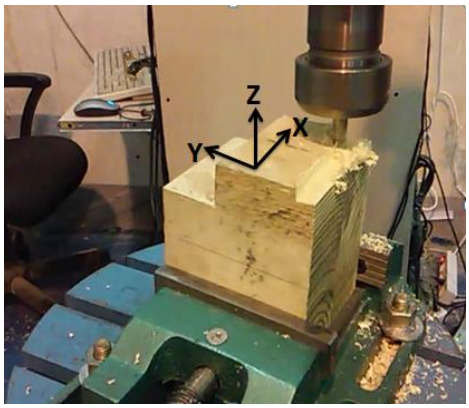

Fig. 8 Machine during rough machining of NURBS surface

شکل 8 دستگاه در حین خشن‌تراشی سطح نربز

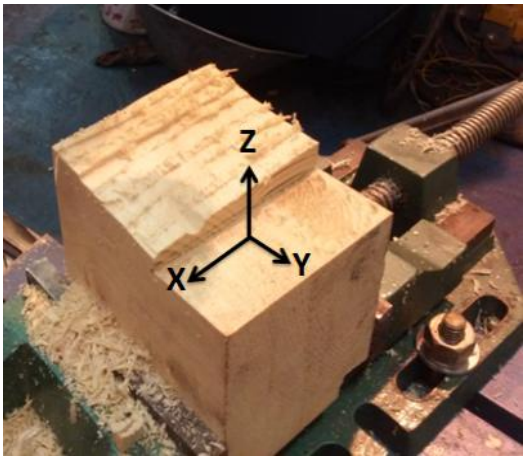

Fig. 9 NURBS surface after Rough machining

شکل 9 سطح نربز پس از ماشینکاری خشن

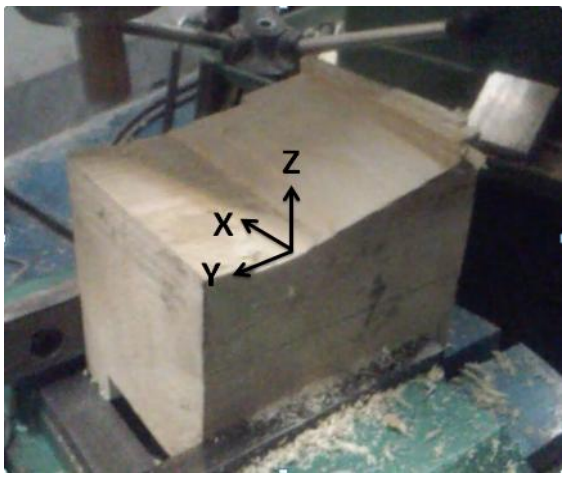

Fig. 10 Final machined NURBS surface

شکل 10 سطح نربز نهایی ماشینکاری شده

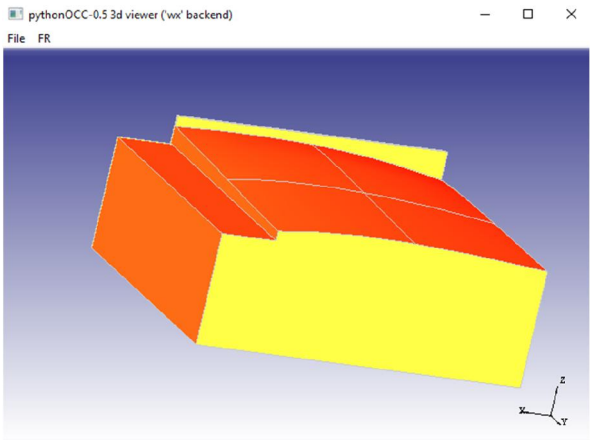

Fig. 11 extracting work piece data

شکل 11 استخراج اطلاعات قطعه‌کار

استفاده از دستگاه هگزاپاد بحث گردید. دستگاه هگزاپاد با ساختاری موازی دارای شش درجه آزادی می‌باشد که از آن به عنوان میز ماشین ابزار استفاده گردید. در این سیستم چرخش ابزار توسط کلگی یک دستگاه فرز تامین شد

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-04-04]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.8.14.1]

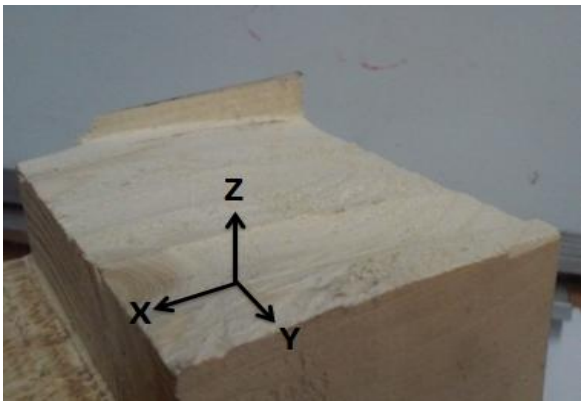

Fig. 12 Final machined NURBS surface

شکل 12 سطح نربز نهایی ماشینکاری شده

و حرکت قطعه کار، توسط شش درجه آزادی دستگاه هگزاپاد تامین گردید. در ادامه اطلاعات یک سطح با شکل آزاد در قالب فرمول بندی نربز استخراج گردید و وارد دستگاه شد. سپس این اطلاعات وارد دستگاه شد و در نهایت هم سطح نربز ماشینکاری شد. برای تایید امکان پذیری ماشینکاری سطوح با شکل دلخواه یک سطح دیگر نیز مورد تحلیل واقع شد و سپس ماشینکاری گردید.

4- مراجع

[1] P. J. Gray, F. Ismail, S. Bedi, Arc-intersect method for-axis tool paths on a 5-axis machine, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No. 1, pp. 182-190, 2007.
[2] E. L. Bohez, Five-axis milling machine tool kinematic chain design and analysis, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, No. 4, pp. 505-520, 2002.
[3] M. Terrier, A. Dugas, J. Y. Hascoet, Qualification of parallel kinematics machines in high-speed milling on free form surfaces, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, No. 7, pp. 865-877, 2004.
[4] A. Werner, K. Skalski, S. Piszczatowski, W. Święszkowski, Z. Lechniak, Reverse engineering of free-form surfaces, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 76, No. 1, pp. 128-132, 1998.
[5] W. Li, Y. Liu, K. Yamazaki, M. Fujisima, M. Mori, The design of a NURBS pre-interpolator for five-axis machining, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 36, No. 9-10, pp. 927-935, 2008.
[6] Z. Qiao, T. Wang, Y. Wang, M. Hu, Q. Liu, Bézier polygons for the linearization of dual NURBS curve in five-axis sculptured surface machining, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 53, No. 1, pp. 107-117, 2012.
[7] J. Wu, H. Zhou, X. Tang, J. Chen, Implementation of CL points preprocessing methodology with NURBS curve fitting technique for high-speed machining, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 81, No. 1, pp. 58-64, 2015.
[8] A. Lasemi, D. Xue, P. Gu, Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review, *Computer-Aided Design*, Vol. 42, No. 7, pp. 641-654, 2010
[9] E. Cohen, R. F. Riesenfeld, General matrix representations for Bézier and B-spline curves, *Computers in Industry*, Vol. 3, No. 1, pp. 9-15, 1982.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-04-04]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.8.14.1]