



## ارتقاء سیستم کنترل عددی ماشین ابزار هگزاپاد با افزودن جبران شعاع ابزار پنج محوره

حسین شاه‌محمدی درمنی<sup>1</sup>، محمدجواد ناطق<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک - ساخت و تولید دانشگاه تربیت مدرس، تهران  
2- دانشیار، مهندسی مکانیک - ساخت و تولید، دانشگاه تربیت مدرس، تهران  
\* تهران، صندوق پستی 143-14115، nategh@modares.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 10 بهمن 1394  
پذیرش: 03 خرداد 1395  
ارائه در سایت: 29 تیر 1395  
کلید واژگان:  
کنترل عددی  
جبران شعاع ابزار پنج محوره  
هگزاپاد  
ماشین ابزار

### چکیده

تحقیق حاضر در صدد اضافه کردن کد حرکتی جبران شعاع ابزار پنج محوره به سیستم کنترل عددی هگزاپاد است. زمانی که شعاع ابزار تغییر می‌کند، به ویژه هنگام تغییر شعاع بر اثر سایش حین ماشین کاری، جبران شعاع از دوباره‌نویسی برنامه جلوگیری می‌کند. الگوریتم ذکر شده شامل هر سه بخش اصلی یک برنامه کنترل عددی یعنی واحد مترجم، واحد میانپای و واحد سینماتیک بوده و اطلاعات موقعیت و جهت مطلوب ابتدا از کد حرکتی نوشته شده توسط کاربر به وسیله واحد مترجم استخراج شده و سپس برای دستیابی به طول پایه و سرعت تغییر طول پایه مطلوب به واحد میانپای و سینماتیک معکوس موجود در برنامه ارسال می‌شود. در کد جبران شعاع ابزار پنج محوره، جبران شعاع علاوه بر مسیر حرکت و شعاع، به بردار نرمال سطح نیز وابسته بوده و تغییر زاویه میز بر جهت جبران شعاع تأثیر می‌گذارد که این موجب می‌شود جبران شعاع علاوه بر راستای X و Y در راستای Z نیز صورت پذیرد. برای این منظور با استفاده از بردار یکه مسیر حرکت و بردار نرمال سطح، بردار جهت جبران شعاع به دست آمده و مسیر اصلاح شده حرکت ابزار بر اساس شعاع ابزار محاسبه می‌شود. در این مقاله به منظور صحت‌سنجی الگوریتم ارائه شده آزمایش عملی انجام شده که نتایج آزمایش صحت الگوریتم ارائه شده را نشان می‌دهد.

## Upgrading the CNC system of hexapod machine tool by adding the five axis tool radius compensation

Hossein Shahmohammadi Dermeni, Mohammad Javad Nategh\*

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

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 30 January 2016  
Accepted 23 May 2016  
Available Online 20 July 2016

**Keywords:**  
CNC  
Five Axis Tool Radius Compensation  
Hexapod  
Machine Tool

### ABSTRACT

This paper is seeking to add a CNC G-code to hexapod CNC system. The mentioned G-code is five axis tool radius compensation. Once the tool radius is changed, especially in the case of tool size changing with tool wear in machining, a new NC program has to be recreated. Five axis tool radius compensation corrects cutter path automatically. This G-code contains all the main parts of a standard code such as: interpreter, interpolator and inverse kinematics unit. The interpreter unit extracts the position and orientation from the received code and sends it to the interpolation and kinematics units to correct the errors and achieve the desired six pods lengths. In the tool radius compensation algorithm, the unique vector of the movement direction of the tool tip and the normal vector of the machining surface have been used to calculate the direction of the tool radius compensation. The offset path is calculated by offsetting the tool path along the direction of the offset vector. Accuracy of the proposed method is tested with a number of experiments. The experimental results confirmed the accuracy of the proposed methods.

### 1- مقدمه

اگر چه کاربرد زنجیره سینماتیکی باز ساده<sup>1</sup> در بسیاری از ماشین‌های ابزار متداول است ولی استفاده از این مکانیزم محدودیت‌هایی ایجاد می‌کند. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به حمل چندین محور حرکتی توسط یک محور اشاره کرد. استفاده از مکانیزم‌های موازی در ماشین‌های ابزار موجب بر طرف شدن این محدودیت می‌شود [1-3]. انواع مختلفی از مکانیزم‌های موازی تاکنون به عنوان ماشین‌ابزار مورد استفاده قرار گرفته است. اولین نمونه

هگزاپاد ماشین ابزار در سال 1994 ارائه شد [4]. شاو و چن الگوریتمی برای تولید مسیر حرکت ماشین ابزار هگزاپاد ارائه کردند که در آن، هدف، تولید مسیر بهینه به نحوی که نیروی محوری پایه‌ها کمینه باشند، بود [5]. کومار و همکاران از روشی عددی به منظور تولید مسیر بهینه در داخل فضای کاری ربات موازی با اجتناب از نقاط تکین استفاده کردند [6]. ژنگ و ژائو روشی برای ایجاد مسیر یک ماشین ابزار پنج محوره موازی ارائه کردند. آنها از نقطه میانی برای اندازه‌گیری خطای سینماتیکی استفاده نمودند [7]. فن و همکاران او از روشی مشابه برای میانپایی یک ماشین‌ابزار هیبریدی استفاده

<sup>1</sup> Simple open kinetic chain

توجه به موجودی ابزار، در قالب فرمت قابل فهم برای دستگاه به واحد ساخت می‌دهد و واحد ساخت بر اساس ابزار موجود تنها شعاع ابزار و هندسه دریافتی از واحد طراحی را به سیستم کنترل عددی دستگاه داده و قطعه تولید می‌شود. هم‌چنین چنانچه سایش ابزار موجب تغییر قطر آن شود به منظور جبران سایش ایجاد شده نیز می‌توان از این کد بهره برد. برای تولید قطعات پیچیده‌تر استفاده از دستگاه‌هایی با درجات آزادی بالا مانند دستگاه کنترل عددی پنج‌محوره ضروری است. در نتیجه ایجاد کد جبران شعاع ابزار جهت استفاده از مزایای عنوان شده، در اینجا نیز مفید خواهد بود. در دستگاه‌های کنترل عددی پنج‌محوره جبران شعاع با پیچیدگی‌هایی همراه است زیرا علاوه بر اطلاعات مسیر حرکت و شعاع ابزار، فرم سطح قطعه‌کار (که چون در اینجا فرض شده ابزار همواره عمود بر سطح ماشین‌کاری شونده خواهد بود، یعنی بردار نرمال سطح) نیز در جهت اعمال جبران شعاع تاثیرگذار است. در این کد علاوه بر جبران شعاع در راستای محور  $X$  و  $Y$  در راستای محور  $Z$  نیز جبران شعاع صورت می‌گیرد.

### 3- تئوری جبران شعاع ابزار پنج‌محوره

همان‌طور که در بخش قبل گفته شد در کد جبران شعاع ابزار پنج‌محوره علاوه بر مسیر حرکت و شعاع ابزار، بردار نرمال سطح نیز مهم می‌باشد. در حقیقت جبران شعاع به اندازه شعاع ابزار در راستای عمود بر بردار نرمال سطح صورت می‌پذیرد. برای این منظور در ابتدا بردار یکه مسیر ابزار با استفاده از دو نقطه ابتدا و انتهای حرکت تشکیل می‌شود. در گام بعدی با فرض اینکه در ماشین‌کاری پنج‌محوره جهت ابزار در امتداد بردار نرمال سطح می‌باشد بردار یکه نرمال سطح طبق توضیحات گفته شده در ادامه به دست می‌آید. بردار نرمال سطح قبل از دوران میز و هنگامی که میز در راستای افق است به صورت رابطه (1) می‌باشد:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

بعد از دوران به منظور محاسبه بردار نرمال جدید می‌بایست از ماتریس‌های دوران استفاده نمود. ترتیب اعمال ماتریس‌های دوران ابتدا حول محور  $X$  سپس حول محور  $Y$  و در نهایت دوران حول محور  $Z$  می‌باشد. بنابراین ماتریس دوران کلی حاصل ضرب سه ماتریس دوران حول این محورها بوده که در رابطه (2) نشان داده شده است:

$$\begin{bmatrix} Cc & -Sc & 0 \\ Sc & Cc & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Cb & 0 & Sb \\ 0 & 1 & 0 \\ -Sb & 0 & Cb \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & Ca & -Sa \\ 0 & Sa & Ca \end{bmatrix} \quad (2)$$

که در آن  $a$  دوران حول محور  $X$ ،  $b$  دوران حول محور  $Y$  و  $c$  دوران حول محور  $Z$  می‌باشد. ماتریس دوران کلی (حاصل ضرب سه ماتریس رابطه (2)) به صورت رابطه (3) به دست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} CcCb & CcSbSa - ScCa & CcSbCa + ScSa \\ ScCb & SaSbSa + CcCa & ScSbCa - CaSa \\ -Sb & CbSa & CbCa \end{bmatrix} \quad (3)$$

از ضرب ماتریس دوران کلی در بردار نرمال اولیه بردار نرمال جدید بعد از دوران به صورت رابطه (4) به دست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} CcCb & CcSbSa - ScCa & CcSbCa + ScSa \\ ScCb & SaSbSa + CcCa & ScSbCa - CaSa \\ -Sb & CbSa & CbCa \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} =$$

کردند [8]. طرح ارائه شده توسط آنها شامل لایه کد<sup>1</sup>، لایه کم<sup>2</sup>، لایه کنترل عددی<sup>3</sup> و لایه سرو<sup>4</sup> بود. ون هونان و همکاران از روش بهینه سازی چند هدفه<sup>5</sup> به منظور مسیریابی حرکت ربات موازی چهار درجه آزادی استفاده نمودند که هدف اصلی آن کمینه نمودن زمان پیمایش مسیر بود [9]. جینانگ بو و همکاران به آنالیز سینماتیکی و ساختار سیستم کنترل عددی یک ماشین‌ابزار سری-موازی پرداختند. اجزای سیستم کنترل عددی ارائه شده توسط آنها شامل واسط کاربر، تجزیه ورودی، واحد میان‌یاب و واحد سینماتیک معکوس بود [10]. لارس اسکارت از سکوی استورات جهت ساخت یک مکانیزم نمونه‌سازی سریع استفاده نمود [11]. او هم‌چنین سیستم کنترلی آن را نیز طراحی کرد. چانگ یک سیستم سه‌محوره و پنج‌محوره کنترل عددی بر پایه سکوی استورات توسعه داد که قابلیت شبیه‌سازی عملیات ماشین‌کاری پیش از فرآیند ماشین‌کاری را دارا بود [12]. ساپورتا از دو سیستم هگزپاد جهت افزایش انعطاف‌پذیری مکانیزم پیشنهادی خود استفاده نمود [13]. در سیستم پیشنهادی او یک ربات هگزپاد مخصوص حمل ابزار در بالا قرار گرفته و یک ربات هگزپاد دیگر وظیفه حمل قطعه کار را داشت که در این مکانیزم هم ابزار و هم قطعه‌کار متحرک بود. هم‌چنین او یک سیستم کنترل عددی برای مکانیزم پیشنهادی خود طراحی نمود که ورودی آن کد حرکتی<sup>6</sup> بود.

حمدی‌پور سیستم کنترل عددی مربوط به ربات هگزپاد با قابلیت میان‌یابی خطی را ارائه کرد [14]. چالاک الگوریتم مربوط به میان‌یابی دایروی را در سیستم کنترل عددی هگزپاد ارائه نمود [15]. کریبی قابلیت پیمایش منحنی و سطوح نیز را به سیستم کنترل عددی هگزپاد افزود [16]. او هم‌چنین به توسعه الگوریتمی جهت کمینه کردن خطاهای سینماتیکی هگزپاد در حین پیمایش مسیر پرداخت [17]. در تحقیق دیگری از نویسنده مقاله حاضر، کد حرکتی سیکل سوراخ‌کاری پنج‌محوره با توجه به مکانیزم دستگاه هگزپاد دانشگاه تربیت مدرس که در آن ابزار ثابت و قطعه‌کار متحرک است، به سیستم کنترل عددی آن افزوده شد [18]. با وجود تلاش‌های صورت گرفته هنوز تعدادی از کدهای حرکتی برای سیستم کنترل عددی هگزپاد تعریف نشده است. از این رو تحقیق حاضر در صدد اضافه کردن یکی دیگر از کدهای حرکتی ماشین‌کاری یعنی جبران شعاع ابزار پنج‌محوره به سیستم کنترل عددی هگزپاد است. کد جبران شعاع ابزار سه‌محوره در بسیاری از دستگاه‌های سه‌محوره وجود دارد ولی تعداد کمی از دستگاه‌های پنج‌محوره از کد جبران شعاع ابزار پنج‌محوره پشتیبانی می‌کنند که جزئیات الگوریتم آنها به دلایل تجاری منتشر نمی‌شود. فرق اساسی کد جبران شعاع ابزار در دستگاه هگزپاد با سایر ماشین‌ابزارهای پنج‌محوره، انجام میان‌یابی خطی بوده (یعنی شکستن مسیر حرکت به خطوط کوتاه‌تر برای جلوگیری از خطا) که خاص مکانیزم هگزپاد است.

### 2- ضرورت استفاده از کد جبران شعاع ابزار پنج‌محوره

با استفاده از کد جبران شعاع ابزار پنج‌محوره می‌توان بدون تغییر عمده کدهای ماشین‌کاری با ابزارهایی به قطر مختلف ماشین‌کاری انجام داد. با کمک کد مذکور ارتباط بین واحد طراحی و واحد ساخت در چرخه تولید ساده‌تر می‌شود، زیرا طراح تنها هندسه مطلوب قطعه درخواستی را بدون

<sup>1</sup> CAD

<sup>2</sup> CAM

<sup>3</sup> CNC

<sup>4</sup> Servo

<sup>5</sup> Multi-objective optimization

<sup>6</sup> G-Code

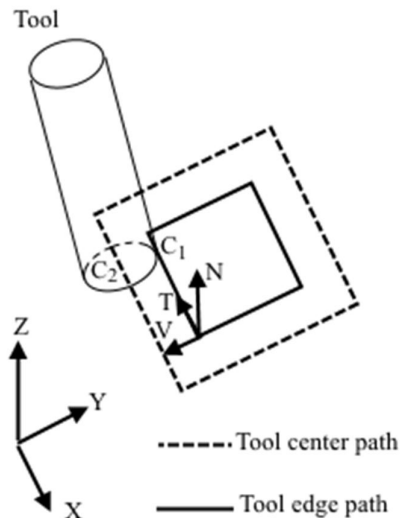


Fig. 1 The coordinates of the points before and after the tool radius compensation

شکل 1 مختصات نقاط قبل و بعد از جبران شعاع

بر روی کد وارد شده توسط کاربر، استخراج می‌شود. در حقیقت کاربر مسیری که مطلوب است لبه ابزار طی کند را وارد می‌کند و برنامه آن را به موقعیتی که مرکز میز می‌بایست طی کند تبدیل می‌کند. سپس اطلاعات این مسیر مطلوب که توسط مرکز میز می‌بایست طی شود، به واحد میانیاپ ارسال می‌شود. به دلیل اینکه مسیری که می‌بایست طی شود مسیر خطی است و کد جبران شعاع ابزار تنها برای حرکات خطی تعریف شده، در نتیجه واحد میانیاپ این برنامه نیز دقیقاً مشابه واحد میانیاپ حرکات خطی که قبلاً توسط حمدی پور [14] ایجاد شده است عمل می‌کند.

از جمله مهمترین خطاهایی که در کنترل مکانیزم هگزپاد امکان مواجه شدن با آن وجود دارد، خطای حرکت خطی است. در حرکت مستقیم بین دو نقطه مکانیزم به جای آنکه مسیر را در خطی صاف همانند ماشین‌های ابزار معمولی طی کند، آنرا به صورت کمان طی می‌کند که این امر موجب بروز خطا می‌شود. با در نظر گرفتن فواصل حرکتی کوتاه‌تر میزان خطای حرکت خطی کاهش می‌یابد. بنابراین در کنترل هگزپاد برای آنکه حرکت در مسیر خطی با کمترین خطا صورت گیرد، مسیر حرکت به خطوط کوتاه‌تر شکسته می‌شود تا جایی که خطا در محدوده مجاز باشد. اطلاعات اصلاح شده در واحد میانیاپ بعد از این مرحله به واحد سینماتیک معکوس ارسال می‌شود که خروجی آن طول پایه و سرعت تغییر طول پایه خواهد بود. این کد مخصوص ماشین‌کاری با ابزارهای سر تخت در نظر گرفته شده است و در صورت استفاده از ابزار سرکروی به دلیل فرم نوک ابزار، بسته به عمق ماشین‌کاری قطر ابزار تغییر می‌کند که این امر موجب به وجود آمدن نقاط ماشین‌کاری نشده معروف به کاسپ<sup>1</sup> بر روی سطح ماشین‌کاری می‌شود.

#### 5- آزمایش عملی

برای صحت‌سنجی الگوریتم ارائه شده طراحی آزمایش عملی به روش تاگوچی انجام شده و برای آزمایش دو فاکتور و دو سطح مختلف در نظر گرفته شد. متغیرهای ورودی مسیر ماشین‌کاری و قطر ابزار بوده و خروجی آزمایش فاصله دیواره نسبت به خط افقی مبنا در چهار نقطه از مسیر بود. به دلیل

$$\begin{bmatrix} CcSbCa + ScSa \\ ScSbCa - CcSa \\ CbCa \end{bmatrix} \quad (4)$$

سپس از ضرب خارجی بردار نرمال در بردار مسیر حرکت (T) بردار یکه جهت جبران شعاع (V) مطابق رابطه (5) محاسبه می‌شود.

$$V = T \times N$$

$$V = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

که در این رابطه T بردار مشخصه مسیر، N بردار نرمال سطح و V بردار جهت جبران شعاع می‌باشد. در قدم بعدی طبق رابطه (6) و (7) مختصات نقطه اصلاح شده محاسبه می‌شود. برای این منظور ابتدا نقطه  $C_1$  به صورت بردار  $OC_1$  (بردار از مبدا به نقطه  $C_1$ ) فرض شده و با بردار جبران شعاع جمع شده و سپس نقطه انتهایی بردار انتقال یافته یعنی  $C_2$  که ابتدای آن روی مبدا است به عنوان نقطه جدید پس از انتقال شناخته می‌شود. برای جبران شعاع در سمت راست مسیر (کد G141) از رابطه (6) و برای جبران شعاع در سمت چپ مسیر (کد G142) از رابطه (7) استفاده می‌شود.

$$C_2 = C_1 + RV \quad (6)$$

$$C_2 = C_1 - RV \quad (7)$$

که در این رابطه،  $C_1 = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix}$  مختصات نقطه اولیه،  $C_2 = \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix}$

مختصات نقطه بعد از جبران شعاع و R شعاع ابزار است. در شکل 1 مختصات نقاط قبل و بعد از جبران شعاع نشان داده شده است.

#### 4- جزئیات کد جبران شعاع ابزار پنج محوره

کد جبران شعاع ابزار پنج‌محوره نوشته شده برای دستگاه هگزپاد فقط مخصوص حرکات خطی می‌باشد و در مسیرهای منحنی نمی‌توان از آن استفاده کرد. این کد در سیستم کنترل عددی دستگاه هگزپاد با کد حرکتی G141 و G142 تعریف شده است. کد G141 برای جبران شعاع در سمت راست (در راستای مسیر حرکت ابزار) و کد G142 برای جبران شعاع در سمت چپ (در راستای مسیر حرکت ابزار) می‌باشد و از نظر تئوری با هم مشابه می‌باشند. کدهای ذکر شده به صورت ناپایدار می‌باشد یعنی تنها چنانچه بلوک برنامه شامل این کد حرکتی باشد فعال می‌شود و در خطوط بعدی نیازی به غیر فعال کردن آن با کد حرکتی مخصوص نمی‌باشد. برای اجرای ماشین‌کاری با آن می‌بایست حداقل دو خط برنامه‌نویسی شده و دو نقطه متفاوت به عنوان ورودی به برنامه داده شود تا الگوریتم بتواند با مختصات این دو نقطه مسیر حرکت مطلوب لبه ابزار را مشخص کند.

اطلاعات لازم برای اجرای این کد، مسیر حرکت لبه برنده ابزار (مختصات X و Y و Z)، جهت ابزار در این مسیر، شعاع ابزار و میزان پیشروی هنگام پیمایش مسیر می‌باشد.

فرمت کلی کد جبران شعاع ابزار در سمت راست به صورت رابطه (8) است:

$$G141 \ X \ Y \ Z \ A \ B \ C \ W \ F \quad (8)$$

و فرمت کد حرکتی جبران شعاع در سمت چپ مطابق رابطه (9) است:

$$G142 \ X \ Y \ Z \ A \ B \ C \ W \ F \quad (9)$$

که در این روابط G141 (یا G142) کد معرف، X و Y و Z مشخص کننده موقعیت، A و B و C مشخص کننده جهت یا زاویه ابزار، W مشخص کننده شعاع ابزار و F معرف پیشروی طی مسیر ماشین‌کاری است. مختصات نقطه‌ای که می‌بایست طی شود، با اعمال اصلاحات عنوان شده در بخش قبل

<sup>1</sup> Cusp

زیر از جمله علل استفاده از چوب به منظور انجام آزمایش‌ها می‌باشد:

- سهولت ماشین‌کاری به دلیل عدم نیاز به نیروهای بالا حین ماشین‌کاری
- استهلاک کمتر ابزار
- هزینه پایین‌تر چوب نسبت به فلز و حتی پلاستیک

بنابراین برای ماشین‌کاری قطعه‌کار از جنس چوب انتخاب شده است. از میان چوب‌ها نیز چوب نراد انتخاب گردید. این چوب قابلیت ماشین‌کاری نسبتاً خوبی دارد و همچنین از نظر قیمت نسبت به سایر چوب‌ها ارزان‌تر است. آزمایش‌ها بر روی قطعه‌کارهایی با ابعاد یکسان انجام گرفته است. ابعاد قطعه‌کار برابر  $100 \times 210 \times 240$  میلی‌متر بوده و به وسیله ابزار گندگی مخصوص برش چوب به صورت کاملاً عمود برش داده شده و به اندازه مطلوب درآمده است.

جنس ابزارها تنگستن کارباید به قطرهای 12 و 20 میلی‌متر ساخت شرکت دامار است. میزان پیشروی برای ماشین‌کاری برابر 2 متر بر دقیقه و دوران اسپیندل برابر 500 دور بر دقیقه انتخاب شده‌اند.

### 5-1- مثال از روند آزمایش‌ها

به منظور درک بهتر مطلب نمونه فعالیت‌های انجام شده برای یکی از آزمایش‌ها در ادامه آمده است.

به عنوان مثال در آزمایش شماره 1 مسیر شماره 1 در نظر گرفته شده است. سپس قسمتی از ابتدای این مسیر با استفاده از ابزار با قطر 20 میلی‌متر و ادامه آن با مقداری هم‌پوشانی با استفاده از ابزار با قطر 10 میلی‌متر ماشین‌کاری شده است. با توجه به اینکه در این کد فرض شده ابزار در طی مسیر حرکت بر سطح ماشین‌کاری شونده عمود است و چون در ماشین‌ابزار هگزپایاد، ابزار قسمت ثابت دستگاه می‌باشد کلگی ماشین‌فرز به مقدار مطلوب (4- درجه حول محور Y) به صورت دستی چرخانده و در تمام طول مسیر زاویه میز ثابت در نظر گرفته شده تا همواره ابزار بر سطح ماشین‌کاری شونده عمود باشد. شکل 2 نشان دهنده کلگی فرز بعد از دوران می‌باشد. کد وارد شده به منظور ماشین‌کاری با ابزار به قطر 20 میلی‌متر به صورت رابطه (10) می‌باشد:

$$G141 X50 Y-80 Z630 A0 B-4 W10 F2; \quad (10)$$

$$G141 X50 Y-20 Z630 A0 B-4;$$

همان‌طور که در رابطه 10 مشاهده می‌شود مسیر ماشین‌کاری در نظر گرفته شده برای ابزار به قطر 20 میلی‌متر از  $X=50\text{mm}$  تا  $Y=-80\text{mm}$  و  $Z=20\text{mm}$  می‌باشد. بعد از آن ابزار تعویض شده و ابزار به قطر 10 میلی‌متر جایگزین می‌شود. برای سادگی کار، این ابزار طوری بر روی کلگی دستگاه سوار می‌شود که مقدار طول برابری با ابزار قطر 20 میلی‌متر داشته باشد تا نیازی به در نظر گرفتن تغییر طول ابزار در کد نباشد. بعد از آن کد مربوط به ادامه مسیر با ابزار به قطر 10 میلی‌متر اجرا شده است. کد وارد شده به صورت رابطه (11) می‌باشد.

**Table 1** Taguchi design of experiment table to verifying tool radius compensation

جدول 1 جدول طراحی آزمایش به روش تاگوچی به منظور صحت‌سنجی جبران شعاع ابزار

| شماره | ورودی       |            |
|-------|-------------|------------|
|       | ترکیب ابزار | شماره مسیر |
| 1     | 10-20       | 1          |
| 2     | 12-20       | 2          |
| 3     | 10-20       | 3          |
| 4     | 12-20       | 4          |

اینکه هم راستا بودن دیواره در تمام طول آن صحت الگوریتم ارائه شده را نشان می‌دهد؛ اندازه فاصله دیواره ماشین‌کاری شده توسط ابزار اول نسبت به خط افقی مبنا در دو نقطه از ابتدا و انتهای دیواره اندازه‌گیری شده و با اندازه فاصله ادامه همان دیواره نسبت به خط افقی مبنا که با مقداری هم‌پوشانی توسط ابزار دوم ماشین‌کاری شده در دو نقطه از ابتدا و انتهای مسیر مقایسه می‌شود. چنانچه مقادیر اندازه چهار فاصله با هم برابر باشد صحت الگوریتم ارائه شده مورد تأیید خواهد بود.

به منظور اندازه‌گیری و تحلیل نتایج از نرم‌افزار ایمیج‌جی<sup>1</sup> استفاده شده است. این نرم‌افزار یک نرم‌افزار تحلیل تصاویر متن‌باز نوشته شده بر پایه جاوا بوده که اندازه‌گیری را بر اساس یک مبنا انجام می‌دهد و در بسیاری از مسائل پردازش و تحلیل تصاویر در مقالات علمی به کار می‌رود. در این تحقیق از قابلیت اندازه‌گیری این نرم‌افزار استفاده شده است. همان‌طور که گفته شد برای اندازه‌گیری با این نرم‌افزار ابتدا می‌بایست فاصله‌ای مشخص که مقدار آن معلوم است برای آن به عنوان اندازه مبنا معرفی کرده تا نرم‌افزار بتواند بر اساس این اندازه مبنا ارتباط بین تعداد پیکسل و فاصله را سنجیده و با توجه به آن اندازه‌گیری را انجام دهد. در مرحله بعدی از قطعه‌کاری که باید اندازه‌گیری شود تصویری کاملاً عمودی تهیه شده (به کمک تراز موجود بر روی پایه دوربین) و وارد نرم‌افزار ایمیج‌جی می‌شود. رزولوشن تصاویر وارد شده داخل نرم‌افزار برای آزمایش‌های تحقیق حاضر برابر 12 پیکسل در هر میلی‌متر می‌باشد. همچنین به منظور معرفی اندازه مرجع، تصویر دهانه کولیس که به مقدار 25 میلی‌متر باز شده بود به عنوان اندازه مرجع در نظر گرفته شده است. خط مبنا خطی که دقیقاً موازی محور Y ترسیم شده در نظر گرفته شده است. این خط که مرجع اندازه‌گیری و صحت‌سنجی الگوریتم است به این صورت مشخص شده که داخل نرم‌افزار ایمیج‌جی خطی به فاصله 30 میلی‌متر از دیواره قطعه‌کار که مجاور مسیر ماشین‌کاری شونده است ترسیم کرده و این خط را به عنوان خط مبنا فرض کرده و کلیه فواصل نسبت به این خط اندازه‌گیری شده‌اند.

آزمایش به این صورت انجام شده است که مسیری را برای ماشین‌کاری در نظر گرفته و قسمتی از مسیر با یک ابزار و ادامه آن با مقداری هم‌پوشانی با ابزاری به قطر متفاوت ماشین‌کاری شده است. چنانچه دیواره مطلوب در یک خط مستقیم ماشین‌کاری شود صحت آزمایش مورد تأیید می‌باشد. ترکیب ابزارهای در نظر گرفته شده برای ماشین‌کاری ابزار قطر 10 و 20 میلی‌متر و ابزار قطر 12 و 20 میلی‌متر می‌باشد. مسیر شماره یک از موقعیت:  $X=50\text{mm}$ ,  $Y=-80\text{mm}$ ,  $Z=630\text{mm}$  به موقعیت:

$$X=50\text{mm}, Y=20\text{mm}, Z=630\text{mm}$$

می‌باشد. ضمن اینکه در تمام طول مسیر، زاویه میز  $A=0$  و  $B=-4$  درجه است. مسیر شماره دو از موقعیت:

$$X=30\text{mm}, Y=100\text{-mm}, Z=658\text{mm}$$

به موقعیت:

$$X=30\text{mm}, Y=50\text{mm}, Z=658\text{mm}$$

می‌باشد. زاویه میز در طول مسیر ماشین‌کاری  $A=0$  و  $B=-8$  درجه است. بر اساس اطلاعات گفته شده طراحی آزمایش انجام و هر آزمایش دو بار تکرار شده است که جدول 1 جدول طراحی آزمایش با روش تاگوچی برای صحت‌سنجی کد جبران شعاع ابزار را نشان می‌دهد.

به منظور ماشین‌کاری، قطعه‌کار از جنس چوب انتخاب شده است. دلایل

<sup>1</sup> Imagej

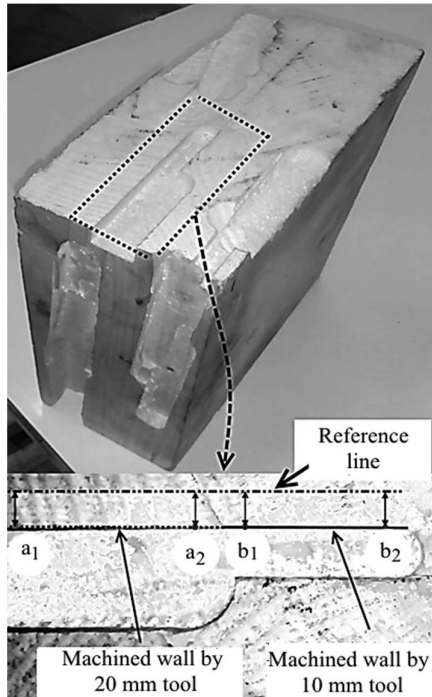


Fig. 3 Measurement of the first experiment work piece

شکل 3 اندازه گیری قطعه مربوط به آزمایش شماره 1

میلی متر می باشد.

در تکنولوژی ماشین های ابزار به طور معمول خطاهای قابل قبول برای ماشین کاری در حدود 0.01 میلی متر است. در حقیقت در مرحله بعد از طراحی، آزمایش های استاندارد به منظور اندازه گیری خطا و کالیبره نمودن خطاهای حین ماشین کاری بر روی ماشین های ابزار صورت می پذیرد تا میزان خطای دستگاه در محدوده ذکر شده قرار گیرد. رسیدن به خطاهایی به حداکثر بزرگی 0.3 میلی متر در نتایج آزمایش تحقیق حاضر، ارزش انجام چنین آزمایش هایی را بیش از پیش روشن می سازد. ولی چنین آزمایش هایی زمان بر بوده و محدودیت های زمانی مانع انجام این آزمایش ها توسط نویسنده تحقیق پیش رو شد.

با توجه به اینکه دستگاه هگزپایاد مورد آزمایش نمونه آزمایشگاهی می باشد و اولین مراحل آزمایش ماشین کاری توسط آن صورت می گیرد و هنوز فعالیت جدی بر روی خطاهای حین ماشین کاری بر روی دستگاه صورت نگرفته است مقدار خطای حداکثر 0.3 میلی متر قابل چشم پوشی می باشد. البته میانگین مقادیر خطای مجموع نتایج آزمایش ها برابر 0.175 میلی متر است که از حداکثر خطا کمتر است ولی با وجود این با مقدار استاندارد فاصله زیادی دارد.

ضمن اینکه رابطه معناداری میان مقدار خطا در موقعیت های مختلف دیده نمی شود. با توجه به صحت الگوریتم برای حالات مورد آزمایش قرار

Table 2 The results of the experiment

| شماره | خروجی      |            |            |
|-------|------------|------------|------------|
|       | $d_4$ (mm) | $d_3$ (mm) | $d_2$ (mm) |
| 1     | 7.7        | 7.7        | 7.8        |
| 2     | 8.2        | 8.3        | 8.1        |
| 3     | 7.9        | 7.9        | 8.2        |
| 4     | 7.9        | 7.8        | 8          |

جدول 2 نتایج آزمایش



Fig. 2 Rotating the milling machine's head

شکل 2 چرخاندن کلگی ماشین فرز

G141 X50 Y-30 Z630 A0 B-4 W5 F2;

G141 X50 Y20 Z630 A0 B-4;

(11)

همان طور که مطابق رابطه (11) مشاهده می شود مسیر ماشین کاری در نظر گرفته شده برای ابزار به قطر 10 میلی متر از  $X=50\text{mm}$  و  $Y=-30\text{mm}$  تا  $X=50\text{mm}$  و  $Y=20\text{mm}$  می باشد.

به منظور صحت سنجی الگوریتم، تصویر قطعه کار ماشین کاری شده داخل نرم افزار ایمیج جی مورد تحلیل قرار گرفته است.

برای این منظور لبه دیواره ماشین کاری شده توسط ابزار اول و ابزار دوم داخل نرم افزار به کمک پردازش تصویر استخراج شده و فاصله آن با خط مبنا در چهار نقطه اندازه گیری شده است.

شکل 3 تصویر تحلیل شده از قطعه آزمایش 1 داخل نرم افزار را نشان می دهد. نتیجه ایده آل فاصله برابر دیواره با خط مبنا در تمام طول آن است. طبق نتایج تحلیل تصاویر فاصله دیواره تا خط مبنا در نقطه  $a_1$  برابر 8 میلی متر، در نقطه  $a_2$  برابر 7.8 میلی متر، در نقطه  $b_1$  برابر 7.7 و در نقطه  $b_2$  نیز برابر 7.7 میلی متر می باشد. با توجه به فاصله تقریباً برابر نقاط با خط مبنا می توان نتیجه گرفت ماشین کاری دیوار با دو ابزار در تمام طول آن در یک امتداد صورت گرفته که این امر نشان دهنده صحت الگوریتم می باشد.

در جدول 2 نتایج برای سایر آزمایش ها آمده است. در این جدول  $d_1$  و  $d_2$  به ترتیب اندازه فاصله دیواره ماشین کاری شده با ابزار اول نسبت به خط مبنا در دو نقطه از ابتدا ( $a_1$ ) و انتهای مسیر ( $a_2$ ) ماشین کاری شده توسط ابزار اول (با مقداری همپوشانی با ابزار دوم) بوده و  $d_3$  و  $d_4$  اندازه فاصله نسبت به خط مبنا در دو نقطه از ابتدا ( $b_1$ ) و انتهای دیواره ( $b_2$ ) مسیر ماشین کاری شده توسط ابزار دوم می باشد.

همان طور که مشاهده می شود مقدار حداکثر بزرگی خطا برابر 0.3

عددی دستگاه هگزپاد اضافه شده است. در این کد علاوه بر مسیر حرکت و شعاع ابزار، بردار نرمال سطح نیز در مقدار جبران شعاع تأثیرگذار می باشد. در حقیقت جبران شعاع به اندازه شعاع ابزار در راستای عمود بر بردار نرمال سطح صورت می پذیرد. بر مبنای این اطلاعات کد حرکتی جبران شعاع ابزار به سیستم کنترل عددی هگزپاد افزوده شده است. همچنین میانمایی خطی به منظور اصلاح خطای حرکت خطی انجام می شود. برای صحت سنجی این روش، آزمایش عملی انجام شده که نتایج آزمایش صحت الگوریتم را تأیید نموده است.

#### 8- مراجع

- [1] S. Muruganandam, S. Pugazhenth, Selection of optimal machining parameters for hexapod machine tool, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 46, No. 5, pp. 801-810, 2009.
- [2] O. Altuzarra, Y. San Martín, E. Amezua, A. Hernández, Motion pattern analysis of parallel kinematic machines: A case study, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 25, No. 2, pp. 432-440, 2009.
- [3] F. Xie, X.-J. Liu, Y. Zhou, Optimization of a redundantly actuated parallel kinematic mechanism for a 5-degree-of-freedom hybrid machine tool, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 228, No. 12, pp. 1630-1641, 2014.
- [4] I. Fassi, G. J. Wiens, Multiaxis machining: PKMs and traditional machining centers, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 2, No. 1, pp. 1-14, 2000.
- [5] D. Shaw, Y.-S. Chen, Cutting path generation of the Stewart-Platform-Based Milling Machine using an end-mill, *International Journal of Production Research*, Vol. 39, No. 7, pp. 1367-1383, 2001.
- [6] A. K. Dash, I.-M. Chen, S. H. Yeo, G. Yang, Workspace generation and planning singularity-free path for parallel manipulators, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 40, No. 7, pp. 776-805, 2005.
- [7] K.-J. Zheng, J.-S. Gao, Y.-S. Zhao, Path control algorithms of a novel 5-DOF parallel machine tool, *Proceeding of IEEE International Conference Mechatronics and Automation*, Niagara Falls, Canada, pp. 1381-1385, 2005.
- [8] S. Fan, X. Wang, M. Shi, H. Huang, Study on interpolation principle and method for IPS+ 4TPS type hybrid machine tool, *Proceeding of IEEE Third International Conference on Natural Computation*, Haikou, pp. 124-129, 2007.
- [9] W. Nan, X. Tang, B. Song, A new automatic motion planning algorithm for a 4-degree-of-freedom parallel kinematic manipulator based on the centre sphere method, *The Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, pp. 64-77, 2015.
- [10] Q. Jiang-bo, G. Tie-hong, Z. Jin-zhang, W. Wei, The Kinematics Analysis of a Novel 5-DOF Series-Parallel Machine Tool and Study on Its NC Architecture, *Proceeding of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Harbin, pp. 1328-1333, 2007.
- [11] L. Skaret, A Stewart platform based replicating rapid prototyping system with biologically inspired path-optimization, Master thesis, University of Oslo, 2011.
- [12] N. C. CHUNG, 3-Axis and 5-Axis Machining with Stewart Platform, PhD Thesis, Mechanical Engineering, National University of Singapore, 2012.
- [13] V. B. Saputra, Development of Two Cooperative Stewart Platforms for Machining, PhD Thesis, Mechanical Engineering National University of Singapore, 2012.
- [14] V. Hamdipoor, Toolpath Generation for Hexapod Machine Tools, Master of Science Thesis, Mechanical Engineering, Tarbiat Modares, 2010. (in Persian فارسی)
- [15] M. R. C. Qazani, S. Pedrammehr, M. J. Nategh, A study on motion of machine tools' hexapod table on freeform surfaces with circular interpolation, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 75, No. 9-12, pp. 1763-1771, 2014.
- [16] D. Karimi, M. J. Nategh, Development of a novel adaptive nonuniform rational basis spline interpolator with limited kinematic error for hexapod machine tools, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, pp. 68-77, 2013.
- [17] D. Karimi, M. J. Nategh, Contour maps for developing optimal toolpath and workpiece setup in hexapod machine tools by considering the kinematics nonlinearity, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, pp. 0954405415592123, 2015.
- [18] H. Shahmohammadi Dermani, M. J. Nategh, M. M. Agheli, Upgrading the CNC system of hexapod machine tool by adding the five axis drilling cycle, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 485-489, 2015. (in Persian فارسی)

گرفته می توان نتیجه گرفت الگوریتم برای سایر حالات نیز برقرار می باشد.

#### 6- کد جبران شعاع ابزار پنج محوره G142

با توجه به اینکه از لحاظ عملکرد و جزئیات، دو کد G141 و G142 مطابق مطالب گفته شده در فصل گذشته دارای شباهت زیادی هستند، صحت کارکرد این کد تنها برای یک آزمایش با دو بار تکرار بررسی شده و از تکرار طراحی آزمایش به صورت جداگانه برای این کد خودداری شده است. برای این منظور مسیر شماره یک با ترکیب ابزار 10 و 20 میلی متر ماشین کاری شد. به منظور صحت سنجی الگوریتم، تصویر قطعه کار ماشین کاری شده داخل نرم افزار ایمپج جی مورد تحلیل قرار گرفت. برای این منظور لبه دیواره ماشین کاری شده توسط ابزار اول و ابزار دوم داخل نرم افزار به کمک پردازش تصویر استخراج شده و فاصله آن با خط مبنا در چهار نقطه اندازه گیری شده است.

شکل 4 تصویر قطعه کار ماشین کاری شده با کد حرکتی G142 را نشان می دهد.

طبق نتایج تحلیل تصاویر فاصله دیواره تا خط مبنا در نقطه a1 برابر 8 میلی متر، در نقطه a2 برابر 7.7 میلی متر، در نقطه b1 برابر 7.9 و در نقطه b2 نیز برابر 8.1 میلی متر می باشد. با توجه به فاصله تقریباً برابر نقاط با خط مبنا می توان نتیجه گرفت ماشین کاری دیوار با دو ابزار در تمام طول آن در یک امتداد صورت گرفته که این امر نشان دهنده صحت الگوریتم می باشد.

#### 7- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر کد حرکتی جبران شعاع ابزار پنج محوره به سیستم کنترل

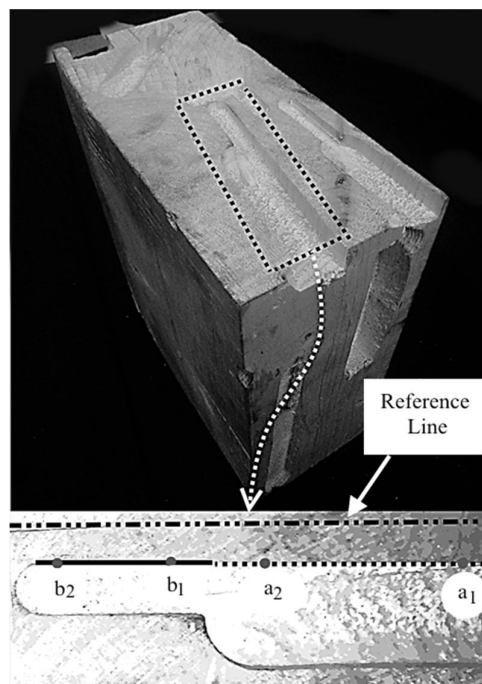


Fig. 4 Measurement of the G142 experiment work piece

شکل 4 اندازه گیری قطعه مربوط به آزمایش کد G142