تحلیل و شبیه سازی واحد درونیاب(Interpolator)در ماشینهای CNC با قابلیت فرزکاری سریع(HSM)

بهنام معتکف ایمانی[۱]، محمد جواد برکچی فرد[۲]
گروه مکانیک دانشکده مهندسی- دانشگاه فردوسی مشهد-صندوق پستی ۱۱۱۱-۹۱۷۷۵
E-mail: imani @ ferdowsi.um.ac.ir

چکیده:

امروزه ماشینهای CNCقابلیتهای فراوانی را در ایجاد انواع شکلهای آزاد (Free-Form) دارند. یکی از این قابلیتها ماشینکاری با سرعت بالا HIGH SPEED MILLING (HSM) می باشد.برای استفاده از این قابلیت و همچنین ایجاد انواع شکلهای آزاد نیاز به درونیابی در راستای یک منحنی در واحد درونیاب (Interpolator) است. لذا استفاده از منحنیهایی که دارای خواص هندسی مناسب باشند لازم بنظر می رسد.در این مقاله با بکار گیری منحنیهای فیثاغورث-هدوگراف(P H) درونیابی در راستای این منحنیها شبیه سازی شده است.همچنین پیشنهاداتی جهت تنظیم سرعت در نقطه اتصال ترکیبی از این منحنیها ارا ئه شده است.

واژه های کلیدی: ماشینکاری با سرعت بالا-منحنی فیثاغورث هدوگراف-درونیاب

۱)مقدمه :

ماشینهای ابزار کنترل عددی(NC) در ابتدا با بکار گیری مدارهای الکترونیکی دیجیتال و بدون داشتن واحد پردازش مرکزی برای ماشینکاری قسمتهای پیچیده هواپیما و قالبهای شکل دهی بکار گرفته شدند.در دهه ۱۹۷۰ماشینهای ابزار با قابلیت کنترل عددی بکمک کامپیوتر (CNC)با بکار گیری مینی کامپیوترها بعنوان واحد کنترل توسعه یافتند.امروزه با پیشرفت تکنولوژی در زمینه های مختلف ماشینهای CNC قابلیت های فراوانی پیدا کرده اند[۱].ماشینکاری با سرعتهای بالا یکی از مزیتهایی است که قاعدتا CNC های جدید از آن برخوردارند.با توسعه

[۱] استاد یار گروه مکانیک
[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد

صنعت ساخت ابزارهایی با سختی بسیار بالا بکار گیری ماشینکاری با سرعتهای بالا(HSM) رواج یافت.اصولا با بکارگیری این قابلیت ضمن افزایش نرخ براده برداری و کاهش زمان تولید سطح نهائی حاصل از ماشینکاری نیز مطلوبتر بوده ونیازی به انجام عملیات ثانویه بعد از ماشینکاری نخواهد بود.همچنین اثرات ناشی از حرارت بعلت براده برداری سریع به قطعه کار منتقل نمی گردد.یکی دیگر از مزایای قابل توجه در استفاده از این روش کاهش نیروهای برش وارد بر ابزار و در نتیجه مینیمم شدن وزن فیکسچرهای مورد نیاز است[۲].

برای بدست آوردن قابلیت HSM باید ماشینهای CNC دارای توانائیهای خاصی باشند .یکی از این قابلیتها که در HSM مورد نیاز است قابلیت درونیابی در راستای یک منحنی می باشد در ماسینهای CNC سنتی برای ایجاد یک شکل روی قطعه کار مسیر هندسی بصورت قطعاتی از خط و دایره شکسته می شود[۳]. این روش در ماشینکاری با سرعت بالا مناسب نیست.

اصولا چون اکثر قطعات مورد استفاده در صنعت دارای شکلهای آزاد (free-form) می باشند نیاز به استفاده از درونیابی در راستای یک منحنی لازم به نظر می رسد[۴و۵و۶و۷].سیستمهای طراحی بکمک کامپیوتر (CAD) انعطاف پذیری زیادی را در طراحی شکلهای آزاد از خود نشان می دهندو در این راستا از منحنیهای BEZIER و B-SPLINE وNURBS استفاده می کنند[۸].اگر چه این منحنیها از نظر طراحی بسیار مناسبند اما در مبحث تولید کارایی چندانی ندا رندو عامل محدود کننده که از راه اندازی مستقیم CNC بر اساس تعاریف منحنیهای فوق ممانعت می کنند عبارت است از:

۱. با توجه باینکه طول کمانهای این منحنیها بصورت انتگرالی هستند نیاز به حل معادله ای است که حل تحلیل نداشته وباید بصورت عددی حل شود
۲. افستهای(Offset) آنها برای تعیین مسیر مرکز ابزار روی منحنی بصورت دقیق ریاضی مشخص نیست و باید تقریب زده شوند[۹].

برای دوری از این محدودیتها در ماشینهای CNC می توان از نوع دیگری منحنی بنام منحنیهای فیثاغورث- هدوگراف (Pythagorean-Hodograph)استفاده نمود[۱۰].این منحنیها ضمن عاری بودن از این محدودیتها ارتباط نزدیکتری بین طراحی و تولید بوجود می آورند.

در این مقاله پس از مقدمه در قسمت دوم به معرفی منحنیهای PH و بررسی خواص و روابط حاکم بر آن پرداخته می شود و در قسمت سوم دو روش برای درونیابی بصورت REAL-TIME بر اساس منحنیهای PH ،بکار گرفته می شود. این روشها مبتنی بر پروفیلهای سرعت مختلف می باشند. .همچنین لزوم و چگونگی ترکیب پروفیلهای سرعت مختلف برای بکار گیری در واحد درونیاب بیان می گردد . در قسمت چهارم به لزوم و چگونگی تنظیم سرعت پیشروی در محل اتصال منحنیهای PH پرداخته و پیشنهاداتی برای حالات مختلف اتصال ارائه می گرددو در قسمت پایانی بحث و نتیجه گیری کلی و زمینه کار های آینده بیان می شود.

۲)معرفی منحنی های PH :

منحنی های PH که برای اولین بار توسط فروکی و ساکالیس(Farouki & Sakkalis 1990)[۱۰] معرفی شدند دارای خواص منحصر بفردی هستند که می توان از این خواص در واحد درونیاب(Interpolator) CNC بهره گرفت.بررسی تمامی روابط حاکم وخواص این منحنیها فراتر از نگاه این مقاله است اما سعی می شود بطور اجمالی به معرفی این منحنیها پرداخته و بعضی از خواص مهم آنها بیان گردد.جزئیات بیشتر را می توان در مراجع[۱۰و۱۱و۱۲و۱۳] یافت.

منحنیهای PH بعلت ساختمان خاصی که دارند دارای سه خاصیت مهم زیراند:

۱. طول کمان آنها بصورت یک تابع پارامتری چند جمله ای ساده قابل بیان است.
۲. منحنیهای افست (Offset) آنها بصورت کسری می باشند.

از خاصیت اول برای یافتن الگوریتمی جهت درونیابی منحنیهای PH استفاده می گردد و خاصیت دوم برای یافتن مسیر دقیق حرکت مر کز ابزار بکار می رود.

هدو گراف یک منخنی پارامتریک صفحه ای مانند $r(t)=\{x(\xi),y(\xi)\}$ عبارت است از مکان هندسی نقاطی که بو سیله مشتق اول پارامتری آن منحنی یعنی $r'(t)=\{x'(\xi),y'(\xi)\}$ تعریف می گردد.یک منحنی پارامتری چند جمله ای دار ای یک فیثاغورث-هدوگراف(pythagorean-hodograph) است اگر چند جمله ای مانند$\sigma(\xi)$ وجود داشته باشد که :

$$\sigma^2(\xi)=x'^2(\xi)+y'^2(\xi) \qquad (۱)$$

به عبارتی $\{x'(\xi),y'(\xi),\sigma(\xi)\}$ تشکیل یک مثلث فیثاغورث دهند.$\sigma(\xi)$ را سرعت پارامتریک نامیده و عبارتست از تغییر طول کمانs نسبت به پارامترξ.

ثابت می شود که اجزا یک فیثاغورث هدوگراف باید به شکل زیر با شند[۱۰]:

$$\begin{aligned} x'(\xi) &= w(\xi)\left[u^2(\xi)-v^2(\xi)\right] \\ y'(\xi) &= 2w(\xi)u(\xi)v(\xi) \end{aligned} \qquad (۲)$$

با بکار بردن عبارت "منحنی هدوگراف -فیثاغورث" منظور هر منحنی چند جمله ای می باشد که مشتقاتش بشکل(۲) باشند.

همچنین منحنی چند جمله ای مربوط به هدو گرا ف فیثاغورث (۲) دارای درجه $n=\lambda+2\mu+1$ می باشد که در آن:

$\lambda=\deg(w)$, $\mu=\max[\deg(u),\deg(v)]$

است.اگر چه که منحنیهای PH درجه آزادی کمتری نسبت به منحنیهای چند جمله ای عمومی دارند اما خوا ص جالبتری را در عمل از خود نشان می دهند.

با وجود اینکه منحنیهای PH درجه ۵ برای کاربرد های عملی مناسبترند اما در شروع کار از حالت ساده تری از این منحنیها یعنی منحنیهای PH درجه ۳ استفاده می گردد. برای این منحنیها داریم:

$\lambda=0$, $\mu=1$

برای سازگاری بیشتر با سیستمCAD این منحنیها را بشکل بزیر(Bezier) [۱۰] ارائه می کنند بدین منظور u,v بشکل زیر انتخاب می گردند:

$$\begin{aligned} u(\xi) &= u_0 b_0^1(\xi)+u_1 b_1^1(\xi) = u_0(1-\xi)+u_1\xi \\ v(\xi) &= v_0 b_0^1(\xi)+v_1 b_1^1(\xi) = v_0(1-\xi)+v_1\xi \end{aligned} \qquad (۳)$$

با قرار دادن معادلات فوق در معادلات (۲) و انتگرال گیری معادله یک PH درجه ۳ بصورت زیر بدست می آید:

$$r(\xi)=\sum_{k=0}^{3} P_k \binom{3}{k}(1-\xi)^{3-k}\xi^k \qquad (۴)$$

که دارای نقاط کنترلی بشکل:

$$\begin{aligned} P_1 &= P_0+\frac{1}{3}(u_0^2-v_0^2, 2u_0v_0) \\ P_2 &= P_1+\frac{1}{3}(u_0u_1-v_0v_1, u_0v_1+u_1v_0) \\ P_3 &= P_2+\frac{1}{3}(u_1^2-v_1^2, 2u_1v_1) \end{aligned} \qquad (۵)$$

و سرعت پارامتریک بصورت:

$$\begin{aligned} \sigma(\xi) &= (u_0^2+v_0^2)b_0^2(\xi)+(u_0u_1+v_0v_1)b_1^2(\xi) \\ &+(u_1^2+v_1^2)b_2^2(\xi) \end{aligned} \qquad (۶)$$

می باشد.

برای یک منحنی صفحه ای بزیر(Bezier)ثابت می شود که دو شرط:$L_2=(L_1.L_3)^{1/2}$ و$\theta_1=\theta 2$ برای تضمین اینکه منحنی یک فیثاغورث هدوگراف داشته باشد لازم وکافیند.که در آن L طول اضلاع چند ضلعی کنترل و θ زوایای بین آنها می باشند(شکل ۱). بر این اساس در منحنیهای PH درجه ۳ میتوان رابطه مناسبتری برای سرعت پارامتری بر حسب طول پایه های چند ضلعی کنترل و زوایای بین پایه ها بصورت زیر یافت[۱۰]:

$$\sigma(\xi) = 3\left[L_1 b_0^2(\xi) - L_2 \cos\theta b_1^2(\xi) + L_3 b_2^2(\xi)\right] \quad (۷)$$

۲-۱)طول کمان:

با توجه به اینکه برای یک منحنی PH درجه ۳ می توان نوشت :

$$\sigma(\xi) = \sum_{k=0}^{2} \sigma_k \xi^k > 0 \quad (۸)$$

طول کمان را بصورت زیر می توان محاسبه نمود[۱۰]:

$$\frac{ds}{d\xi} = \sqrt{x'^2(\xi) + y'^2(\xi)} \quad (۹)$$

$$s(\xi) = \int_0^{\xi} |\sigma(\xi)| d\xi \quad (۱۰)$$

$$s(\xi) = \sum_{k=1}^{3} \frac{1}{k} \sigma_{k-1} \xi^k \quad (۱۱)$$

با استفاده از رابطه (۷)و(۸)و(۱۱) می توان طول کمان را بر حسب مشخصات چند ضلعی کنترل در منحنیهای PH درجه ۳ بصورت زیر یافت:

(۱۲)

$$s(\xi) = 3L_1\xi - 3(L_1 + L_2\cos\theta)\xi^2 + (L_1 + L_3 + 2L_2\cos\theta)\xi^3$$

رابطه فوق بیانگر خاصیت منحصر بفرد منحنیهای PH است که رابطه ای پارامتری چند جمله ای را بین طول کمان و پارامتر منحنی نمایش می دهد.

۳ .درونیابی REAL-TIME بر اساس منحنیهای PH :

وظیفه واحد درونیاب(Interpolator) درCNC تبدیل مسیر هندسی ابزار-که در CAD تولید شده است-به داده هایی در محدوده زمانی است که به سیستم درایو دستگاه ارسال می گرددمعمولا این تبدیل با تعیین یک سرعت پیشروی مطلوب و سپس محاسبه یک سری نقاط مرجع (Reference Point) در بازه زمانی Δt انجام می گیرد.

در این راستا می توان انواع سرعتهای پیشروی متفاوتی را برای استفاده در درونیاب یک CNC بکار گرفت.چهار نوع سرعت پیشروی را می توان بصورت زیر بیان نمود[۱۴]:

۱. سرعت پیشروی ثابت $V=V_0$
۲. سرعت پیشروی بصورت تابعی از پارامتر منحنی $V=V(\xi)$
۳. سرعت پیشروی بصورت تابعی از طول کمان $V=V(s)$.
۴. سرعت پیشروی بعنوان تابعی از انحناء محلی $V=V(\kappa)$.

روش اول ساده ترین روش است و می توان از آن برای یافتن نقاطی روی منحنی که دارای فواصل یکسانی می باشند استفاده کرد.

در روش دوم با توجه به اینکه پارامتر سازیهای متفاوتی را می توان برای یک منحنی ارائه داد پروفیلهای سرعت مختلفی مر بوط به هر پارامتر سازی خواهیم داشت لذا این روش پیشنهاد نمی گردد[۱۴] .روشهای سوم و چهارم روشهای مناسبتری جهت تعیین سرعت پیشروی متغیر هستند. البته برای منحنیهای چند جمله ای عمومی این روشها از لحاظ محاسباتی پیچیده تر می باشند. اما ویژگیهای خاص منحنیهای PH اجازه می دهد که این روشها در کاربردهای عملی با محاسبات ساده تری انجام شوند.

در بکار گیری هر یک از روشهای فوق درونیابی Real-Time منجر به حل معادله:

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{V}{\sigma} \quad (۱۳)$$

می شود. که در آن V سرعت پیشروی در امتداد منحنی(mm/s)و σ سرعت پارامتری(mm) و t زمان (s) است[۱۴]. در این مقاله روشهای اول وسوم در درونیابیReal-Time منحنیهای PH درجه ۳ در واحد درونیاب CNC بکار گرفته می شوند.

۳-۱)درونیابی بر اساس سرعت ثابت:

هنگامیکه سرعت پیشروی Vمقدار ثابت V_0 را داراست می توان از معادله (۱۳) بطور مستقیم انتگرال گیری کرد در حقیقت مقادیرξ_0.....ξ_k باید بنحوی باشند که:

$$s(\xi_k) = k.\Delta s_0 \qquad (۱۴)$$

در حالیکه $\Delta s_0=V_0.\Delta t$ است.

برای منحنیهای PH معادله فوق دارای ریشه حقیقی یگانه ای می باشد که می توان آنرا با بکار گیری روش تکراری نیوتن-رافسون(Newton-Raphson) بصورت زیر یافت:

$$\xi_k^{(r)} = \xi_k^{(r-1)} - \frac{s(\xi_k^{(r-1)}) - k\Delta s_0}{\sigma(\xi_k^{(r-1)})} \qquad (۱۵)$$

برای تقریب اولیه :

$$\xi_k^0 = \xi_{k-1} + \frac{\Delta s_0}{\sigma(\xi_{k-1})} \quad ;\xi_0 = 0 \qquad (۱۶)$$

پیشنهاد می گردد.

بابکار گیری الگوریتم فوق وتکنیکهای رسم منحنیهای بزیر(Bezier)[۸] می توان نقاطی با فواصل یکسان را در طول منحنی بدست آورد(شکل ۱) . در این شکل طول اضلاع چند ضلعی کنترل بصورت$L_1/2=L_2=2L_3=1$ می باشند.واضح است که با ثابت گرفتن Δt و افزایش یا کاهش سرعت می توان فواصل نقاط را بر حسب نیاز کم یا زیاد کرد.

بعلت خواص منحنیهای PH روش نیوتن-رافسون با تعداد تکرار کمی(در این مثال یک الی سه تکرار) به سوی جواب با دقت بالایی همگرا می شود.

۳-۲)درونیابی با سرعت پیشروی بصورت تابعی خطی از طول کمان

در این بخش سرعت بصورت تابعی از طول منحنی بیان می گردد بدین منظور می توان سرعت را بصورت تابعی خطی ویا تابعی درجه دو از طول کمان در نظر گرفت .در این مقاله حالت خطی بررسی می گردد.جزئیات بیشتر را می توان در مرجع [۱۴] یافت.

برای حل معادله(۱۳) می توان سرعت پارامتری را بر حسب طول کمان وارد این معادله نمود.در اینصورت معادله (۱۳) بصورت زیر تبدیل می گردد:

$$\int_{s_{k-1}}^{s_k} \frac{ds}{V(s)} = \Delta t \qquad (۱۷)$$

که درآن $s_{k-1}=s(\xi_{k-1})$ و$s_k=s(\xi_k)$ می باشد.

پروفیل سرعت خطی بر حسب طول کمان بصورت:

$$V(s)_1 = V_0(1-\frac{s}{S}) + V_1(\frac{s}{S}) \qquad (۱۸)$$

بیان می شود.که در آن V_0و V_1 بترتیب سرعت پیشروی اولیه و نهائی می باشد بر این اساس انتگرال (۱۷) بصورت زیر بدست می آید:

$$s(\xi_k) = \frac{V_s(\xi_{k-1})e^{(V_1-V_0)\Delta t/S} - V_0}{V_1 - V_0}S \qquad (۱۹)$$

معادله چند جمله ای فوق را نیز می توان با روش تکراری نیو تن- رافسون با حدس اولیه :

$$\xi_k^{(0)} = \xi_{k-1} + \frac{V_s(\xi_{k-1})\Delta t}{\sigma(\xi_{k-1})} \qquad (۲۰)$$

حل نمود.این روش در رسم شکل ۲ بکار گرفته شده است.در رسم این شکل $V_0=0.01$و$V_1=2V_0$ و$\Delta t=0.02$ در نظر گرفته شده است.

ترکیب انواع سرعتها بر روی یک منحنی PH:

در عمل هنگام ماشینکاری یک منحنی تو سط CNC ترکیب دو نوع سرعت مورد نیاز است ابتدا در ناحیه اول سرعت با شتاب ثابت افزایش یافته و به سرعت ثابت مورد نظر می رسد در ناحیه دوم سرعت ثابت بوده و نهایتا در ناحیه سوم سرعت با شتاب ثابت کاهش یافته و به صفر می رسد.در نتیجه عملا هر کدام از پروفیلهای سرعت بیان شده در قسمت قبل نمی توانند به تنهایی مفید باشند و نیاز به استفاده از هر دو پروفیل سرعت ثابت و خطی در ایجاد یک

هر دو پروفیل سرعت ثابت و خطی را در ایجاد یک منحنی بکار گرفت.همچنین برای یافتن سرعت هر یک از محورهای CNC در دو جهت x,y نیز میتوان بصورت زیر عمل نمود[۱]:

$$\Delta\vec{s} = \Delta x\vec{i} + \Delta y\vec{j} \qquad (۲۱)$$

که در آن i و j بردار های یکه در جهات x وy می باشند .اگر دو طرف معادله فوق را بر بازه زمانی درونیابی Δt_i تقسیم کنیم خواهیم داشت:

$$\frac{\Delta\vec{s}}{\Delta t_i} = \frac{\Delta x}{\Delta t_i}\vec{i} + \frac{\Delta y}{\Delta t_i}\vec{j} \qquad (۲۲)$$

$$\vec{V} = V_x\vec{i} + V_y\vec{j} \qquad (۲۳)$$

$$V = \sqrt{V_x^{\,2} + V_y^{\,2}} \qquad (۲۴)$$

با استفاده از معادلا ت فوق و با توجه به معین بودن Δx و Δy که بر اساس نقاط میانیابی شده روی منحنی محاسبه شده ا ند می توان سرعتهای هر یک از محورها را نیز شبیه سازی کرد.

شکلهای ۲ و۳ با بکار گیری ترکیب سرعتهای ثابت و خطی ایجاد شده اندکه نماد "o" در این اشکال نمایانگر نقاط میانیابی شده در روی منحنی در ناحیه شتاب گیری و کاهش شتاب می باشد و نماد "*" مربوط به نقاط میانیابی شده با سرعت ثابت و در نتیجه طول کمان یکنواخت می با شد .

همچنین شکلهای ۴و۵ نشانگر پروفیل سرعت بکار گرفته شده برای ایجاد منحنیهای شکلهای به ترتیب ۲و۳ می باشندکه در آنها نماد "x" و"o" بترتیب بیانگر پروفیل تغییر سرعت محور x و y دستگاه می باشند.

۴)تنظیم سرعت پیشروی در نقطه اتصال منحنی های PH:

با توجه به اینکه هنگام ماشینکاری قطعات صنعتی اکثرا با ترکیب منحنیهای شکل آزاد (free-form) مواجه می شویم بعنوان مثال در حالت دو بعدی انواع پروفیلهای بادامک و در حالت سه بعدی انواع قالبها و قطعات پیچیده را می توان ذکر کرد.لذا پیشنهاد الگوریتمهائی برای تنظیم سرعت پیشروی در محل اتصال منحنیها لازم بنظر می رسد این عمل می تواند قبل از درونیابی بصورت Real– Time با توجه به مشخصات هندسی منحنیها صورت گیرد . بدین ترتیب که می توان الگوریتمهائی ارائه داد که با بررسی مشخصات چند ضلعی کنترل در محل اتصال منحنی ها نحوه تنظیم سرعت در نقطه اتصال را بیان نماید.در این بخش مساله تنظیم سرعت پیشروی در چند حالت خاص اتصال منحنیهای PH بررسی می گردد:

حالت اول زمانی است که دو منحنی در نقطه اتصال پیوستگی موقعیت دارند (C^0) و زاویه مماس دو منحنی در نقطه تماس ۹۰ درجه می باشد.لذا لازم است اینرسی حرکت سیستم در نقطه اتصال صفر شده و سپس حرکت بصورت شتابدار در جهت عمود بر راستای قبلی ادامه یابد در غیر اینصورت بعلت اینرسی سیستم مشکل فرا جهش (overshoot) در محل اتصال(گوشه) خواهیم داشت. بنا بر این پروفیل سرعت مطابق شکل(۶) برای اتصال دو منحنی پیشنهاد می گردد.

حالت دوم حالتی است که جهت حرکت در امتداد هر دو محور معکوس میشود.بعنوان مثال در شکل۳ در نقطه اتصال A جهت حرکت در امتداد محور X وY عوض شده است لذا در این حالت پروفیل سرعتی پیشنهاد می گردد که مشابه حالت قبل سرعت در محل اتصال ابتدا با شتاب کاهنده به صفر رسیده و سپس با شتاب افزاینده به سرعت مورد نظر افزایش می یابد (شکل۶).

حالت سوم هنگامی است که دو منحنی PH در محل اتصال بصورت C^0 وC^1 پیوسته باشند یا به عبارت دیگر در محل اتصال علاوه بر پیوستگی موقعیت پیوستگی شیب نیز داشته باشند(شکل ۷).برای این حالت با توجه باینکه تغییر جهت در حرکت وجود ندارد پروفیل سرعت در نقطه اتصال بصورت شکل۸ پیشنهاد می گردد.

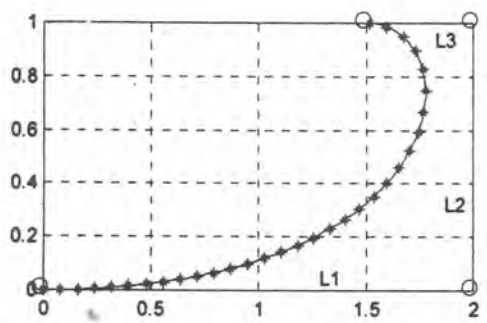
بحث و نتیجه گیری:

در این مقاله از منحنیهای PH با توجه به ویژگیهای خاص آنها در درونیابی منحنیهایی با شکل آزاد استفاده شده است.الگوریتمها یی که بر اساس این روشها توسعه یافته اند در چند کاربرد عملی شبیه سازی و آزمایش شده اند . ابتدا الگوریتم میان یابی برای یک منحنی با شکل آزاد و ترکیب دو پروفیل سرعت طراحی و پیاده شده سپس این الگوریتم برای ترکیبی از منحنی های با شکل آزاد توسعه یافته است. .همچنین با تدابیرخاصی جهت تنظیم سرعت پیشروی در محل اتصال منحنی ها فراجهش(overshoot)کنترل شده است.

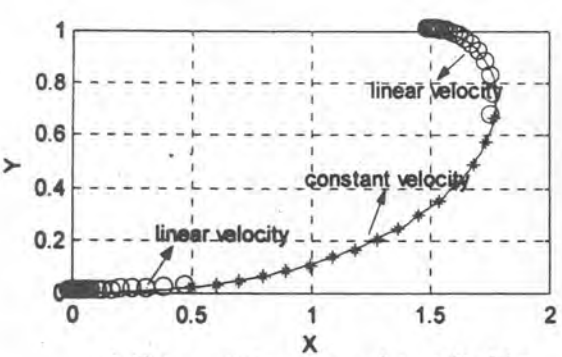
در ادامه این تحقیق مواردی از قبیل استفاده از منحنیهای PH درجه پنج، کنترل شتاب در محل اتصال ،بکار گیری پروفیلهای سرعت درجه دو و کنترل لقی هنگام تغییر جهت حرکت بررسی خواهند شد.

مراجع:

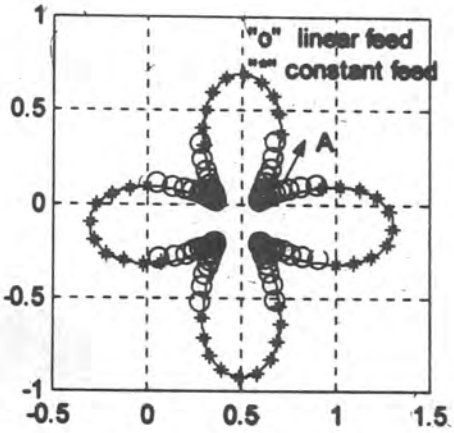
1. Y.Altintas,"Manufacturing Automation" cambridge university press ,2000
2. S.Ashley," high-speed machining goes mainstream",ASME , J. of Mech. Eng. pp56-61
3. Y.koren,"Computer Control Of Manufacturing Systems".Mc Graw-Hill, New York . 1983
4. J.J.chou & Yang "Command Axis Generation For Three-Axis CNC Machining" ASME Journal of engineering for Industry 113 , 1991 . 305-310
5. D.C.Yang and T. kong " Parametric Interpolator Versus Linear Interpolator For Precision CNC Machining ",Computer Aided Design 26 ,1994 . 225-234
6. S.Schofield,P.Wright," Open Architecture Controllers For Machine Tools, Part 1:Design Principles" Engineering Vol. 120 . 1998 425-432
7. Fu-Chung Wang, P.Wright," Open Architecture Controllers For Machine Tools, Part 2:A Real Time Quintic Spline Interpolator " Engineering Vol. 120 . 1998 425-432
8. Les Piegl , Wayne Tiller , "The NURBS Book " springer-verlag Berlin , Heidelberg 1995
9. R.T.Farouki, Manjunathaiah , Guo-feng Yuan" G Codes For The Specification Of Pythagorean-Hodograph Tool Path And Associated Feedrate Function On Open-Architercture CNC Machines" International Journal of machine Tools & manufacture 39 1999 .123-142
10. R.T.Farouki & T.Sakkalis," Pythagorean-Hodographs", IBM Journal of research and Development 34 , 1990 . 41-66
11. R.T. Farouki & C.A.Neff,"Hermite Interpolation By Pythagorean-Hodograph Quintics", Math. Comput. 64 ,1995 , 1589-1609
12. R.T.Farouki ,"The Elastic Bending Energy Of Pythagorean-Hodograph curves",Computer Aided Geometry Design 13 , 1996 227-241
13. Albrecht and R.T Farouki, "Construction of C^2 Pythagorean-Hodograph Interpolating Spline By The Homotopy Method ", Advances in computational Mathematics, 1996



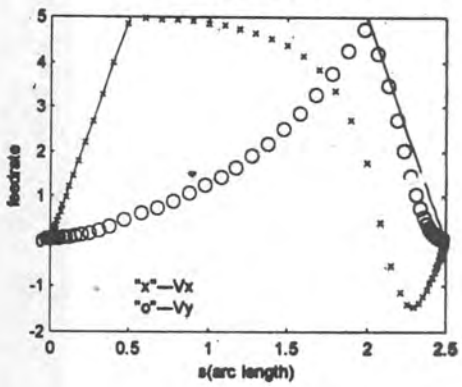
شکل ۱)درونیابی منحنی PH درجه ۳ با پروفیل سرعت ثابت



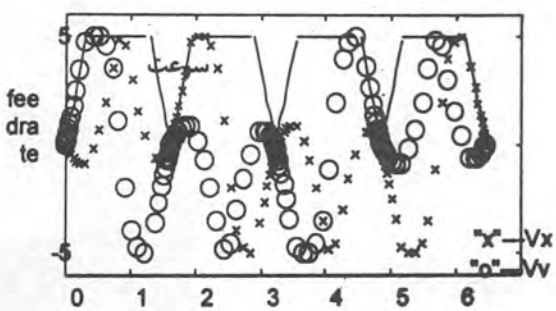
شکل ۲)درونیابی منحنی PH درجه ۳ با استفاده از ترکیب سرعت ثابت و خطی



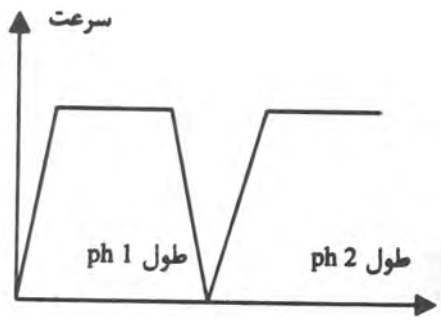
شکل ۳) میانیابی ترکیبی از منحنیهای PH درجه ۳ با استفاده از پروفیل سرعت ثابت و خطی



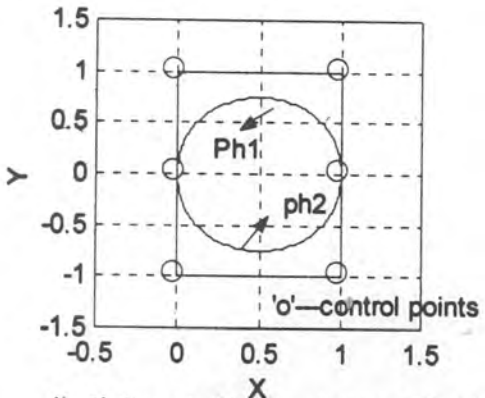
شکل ۴) پروفیل سرعت شکل ۲



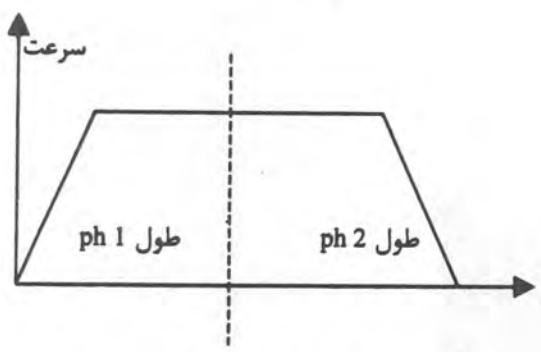
شکل ۵) پروفیل سرعت شکل ۳



شکل ۶) پروفیل سرعت پیشنهادی برای دو PH که بر هم عمود اند.



شکل ۷) دو منحنی PH که در محل اتصال C^0 و C^1 هستند.



شکل ۸) پروفیل سرعت پیشنهادی برای منحنی