مقایسه تجربی الگوریتم های Iso scallop ,Iso planar و Iso parametric در ماشینکاری سطوح sculpture

محمد صدیقی[1] ، ناصر شکرالهی[2]

چکیده

سطوح sculpture معمولا درطراحی قطعات پیچیده مانند بدنه اتومبیل,پره های توربین و...به کار می رود.با گسترش روز افزون نرم افزارهای cad/cam وکاربردآن درصنایع مباحث مربوط به قابلیت ماشینکاری(زمان ماشینکاری,صافی سطح و...)اهمیت بیشتری می یابد. دراین مقاله ابتدابه بررسی استراتژیهای مختلف ماشینکاری سطوح free form و الگوریتمهای مورد استفاده دراین استراتژیها می پردازیم.درمرحله بعدبا استفاده ازیک مثال تشریحی به مقایسه این الگوریتم ها پرداخته و روش مناسب جهت ماشینکاری سطوح sculpture بر اساس معیارهای ماشینکاری معرفی می نماییم.

واژه های کلیدی:سطوحsculpture-زمان ماشینکاری-ارتفاع scallop.

Experimental comparison of ,Iso scallop, Iso planar and Iso-parametric algorithms in machining sculptured surfaces

M. Sedigi ; N. Shokrollahi

Abstract

Sculpture surfaces are extensively used in designing complex shapes such as automobile bodies, turbine blades. Nowadays, by development of CAD/CAM software & its application in industries, the problems related to machinability (machining time, surface roughness,…) of sculpture surfaces have been investigated. In this paper, three main distinguish methods of sculpture surface machining have been selected. Firstly the algorithms and the mathematical logics of each method have been explained. Then an experimental comparison has been made between the methods. Finally, the optimal algorithm for machining Free-Form surfaces has been suggested.

Keywords: Free-Form surfaces, Scallop height, Iso parametric, Iso planar, Iso scallop

۱-مقدمه

سطوح sculptureبه طورگسترده ای درطراحی تولیدات پیچیده با سطوح آیرودینامیک استفاده می شوند.این سطوح اغلب به وسیله ماشینهای CNC ۳محوره و بالاتربا استفاده از ابزارهای سرگردتولید می شوند.قابلیت های ماشینهای CNCجهت تولید سطوح پیچیده کارهای تحقیقی گسترده ای را خصوصا در حوزه تولید مسیر ابزار ایجاد کرده است.معمولا دو معیار جهت تخمین کارایی مسیرهای ابزار تولید شده استفاده می شود.یکی عبارت است از

[1] استادیار دانشکده مکانیك دانشگاه علم وصنعت ایران
[2] دانشجوي کارشناسي ارشد مکانیك دانشگاه علم وصنعت ایران

کیفیت مسیرهای ابزار ایجاد شده ودیگری بهینه بودن این مسیرها.تحقیقاتی که برروی تولید مسیر ابزار بهینه کار می کنند بر روی دو هدف متضاد متمرکز می باشند:کیفیت وکارائی.این تحقیقات منجر به تعیین فواصل بهینه[3] بین دو مسیر ابزار پشت سرهم جهت بهینه سازی این دو هدف متضاد می باشد.یک فاصله کناری[4] بزرگ منجر به ایجا یک سطح خشن و فاصله کوچک باعث افزایش زمان ماشینکاری شده وپروسه را غیر کارا می کند.

هدف اصلی تولید مسیر ابزار (tool path generation) عبارت است از محاسبه یک دسته از نقاط موقعیت ابزار(CL[5]) ازسطح طراحی شده.روشهای تولید مسیر ابزار به دو دسته روش مسیر ابزار بر پایه نقطه تماس ابزار(CC point[6]) وبر پایه نقطه موقعیت ابزار(CL point) دسته بندی می شوند.در روش تولید مسیر ابزار بر پایه نقطه تماس ابزار مسیرابزار به وسیله نمونه گیری یک دسته از نقاط CC و سپس تبدیل این نقاط به نقاط CL تولید می شود.روشهای Iso parametric, Iso planar در این دسته قرار می گیرند.در روش تولید مسیر ابزار برپایه موقعیت مرکز ابزار سطح CL به عنوان یک سطح تولید مسیر مورد استفاده قرار می گیرد.در این روش سطح CL بایستی از سطح طراحی شده تولید گردد.پس از تولید مسیرهای ابزار بر روی این سطح این مسیرها بر روی سطح قطعه کار ایجاد می گردد.روش Iso scallop دراین دسته قرار می گیرد.

عموما روش تولید مسیر ابزار جهت ماشینکاری سطوح پیچیده را می توان در سه گروه تقسیم بندی کرد:روش ماشینکاری ISO PARAMETRIC از نتایج بیان پارامتریک سطوح sculptureاستفاده کرده وبه طور گسترده ای استفاده می شود.این روش یکی از اولین تکنیک های مورد استفاده جهت ماشینکاری سطوح sculpture می باشد[1]. با نگه داشتن یکی از دو ثابت پارامتری منحنی های ISO PARAMETRIC شکل گرفته و به عنوان مسیر ابزار استفاده می شوند[2].در این روش هر مسیر ابزار بر اساس یکی از دو حالت پارامتریک اصلی تولید می گردد[3].روش ماشینکاری ISO PLANAR از منحنی های تقاطع سطح-صفحه به عنوان مسیرهای ابزار استفاده می کند.خصوصیت این روش عبارت است از یک فاصله ثابت بین مسیرهای پشت سر هم در فضای اقلیدسی وهر فاصله مطابق با الزامات ارتفاع قله[7] تعیین می شود[4].ابزار در راستای این صفحات که صفحات رانش نامیده می شوند به حرکت در می آید.صفحات رانش بر اساس محدودیت ارتفاع scallop تعریف شده توسط طراح محاسبه گردیده و تنظیم می گردند.Happiniemi وهمکاران وHermannجزء ابداع کنندگان این روش جهت ماشینکاری سطوح Free-Form می باشند.[5,6].در روش ماشنیکاری ISO SCALLOP مسیرهای ابزار به گونه ای تعریف می شوند که ارتفاع قله در کل مسیر ابزار ثابت باقی ماند.تولید مسیر ابزار بر اساس این روش اولین بار توسط Suresh وهمکاران گزارش شده است[7].در این روش با ثابت نگه داشتن ارتفاع Cusp در کل مسیر میزان overlap(بر روی هم افتادگی ابزار در پاسهای پشت سر هم)ابزار بسته به نوع منحنی ماشینکاری جهت به دست آوردن ارتفاع Scallop ثابت در کل مسیر تغییر می یابد[8].

در این مقاله استخراج روش بهینه جهت ماشینکاری سطوح SCULPTURE با توجه به معیار قابلیت ماشینکاری تعریف شده از سوی طراح مورد بررسی قرار می گیرد.

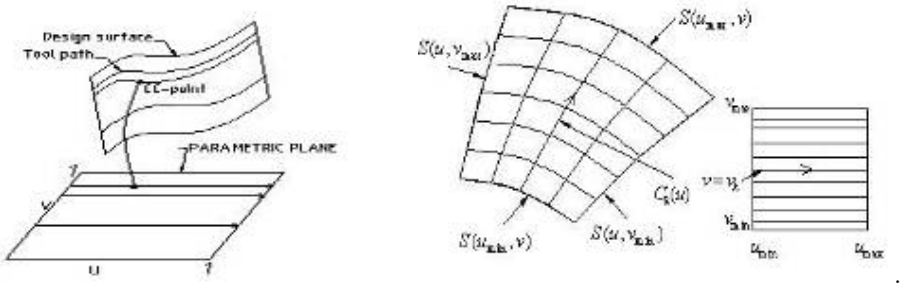
۲-الگوریتم های Iso parametric, Iso planar, Iso scallop

۲-۱-ماشینکاری Iso parametric

---

[3] Path Interval
[4] side step
[5] cutter location point
[6] cutter contact point
[7] Cusp height

یک توضیح شماتیک جهت مسیرهای ماشینکاری Iso parametric در شکل ۱ نشان داده شده است.در این حالت یکی از پارامترهای سطح (مثلu)را به عنوان جهت ماشینکاری(یا جهت جلو)ویکی از منحنی های مرزی(درv=vmin)را به عنوان اولین مسیر CC انتخاب می کنیم



شکل۱:مسیرهای ماشینکاری Iso parametric .

دراینجا k امین مسیرCC بوسیله $C_k(u) = S(u, v_k)$ نشان داده می شود.باید توجه داشت که منحنی $v = v_k$ درحالت پارامتریک (u, v) مطابق باشد با C_k مسیرCC درحالت کارتزین(x, y, z).مقدارپارامتریک کناری را می توان یک به یک بوسیله $V_{k+1} = V_k + \Delta V_k$ تعیین نمود جائیکه ΔV_k (فاصله کناری پارامتریک بین دومسیرCC پشت سر هم)برپایه محدودیت ارتفاع قله h تعیین می شود.معمولا مسیرCC, Iso parametric همراه با یک ارتفاع قله[۸] ثابت نمی باشدومعمولا یک ΔV_k محافظه کارانه تعیین می شودتا ماکزیمم ارتفاع قله ازمقدارh ازپیش تعیین شده تجاوز ننماید.ابتدا نیاز داریم که ρ شعاع انحناء در جهت کناری را محاسبه کنیم.این پارامتر را می توان به روش زیر محاسبه نمود[9]

$$\rho = \frac{e\alpha^2 + 2f\alpha + g}{a\alpha^2 + 2b\alpha + c}$$

جائیکه:

$$\alpha = \frac{\frac{\partial S}{\partial v}.T}{\frac{\partial S}{\partial u}.T}, \quad e = \frac{\partial S}{\partial u}.\frac{\partial S}{\partial u}, \quad f = \frac{\partial S}{\partial v}.\frac{\partial S}{\partial v}, \quad g = \frac{\partial S}{\partial v}.\frac{\partial S}{\partial v}, \quad a = \frac{\partial^2 S}{\partial u^2}.N, \quad b = \frac{\partial^2 S}{\partial u \partial v}.N,$$

$$c = \frac{\partial^2 S}{\partial v^2}.N$$

که T عبارت است از بردار مماس واحد در جهت CC و N بردار واحد نرمال بر سطح می باشد.فاصله پله کناری(جهش کناری)پیشنهاد شده Δl برای هر نقطه تخمین زده شده را می توان به صورت زیر محاسبه نمود:

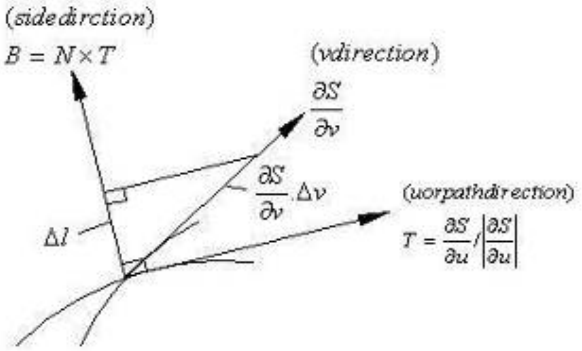
$$\Delta l = \sqrt{\frac{8\rho h}{\rho \pm r}}$$

که ρ شعاع انحناء درجهت کناری,h مقدارمحدودیت ارتفاع قله وr شعاع ابزار می باشد.مقدار $\pm$ بسته به اینکه سطح محدب یا مقعر باشداستفاده می شود(محدب+ومقعر-).جهت قدم کناری عمودبرجهت CC(T) ونرمال سطح(N) می باشد.به دلیل اینکه Δl درواحد فاصله mm می باشدومعمولا درجهت V قرار ندارد یک تبدیل از Δl به فاصله کناری پارامتریک ΔV موردنیاز می باشد.یک توضیح شماتیک برای این تبدیل درشکل۳ نشان داده شده است.براساس روابط هندسی نشان داده شده درشکل ۳ داریم که $\Delta l = B.(\frac{\partial S}{\partial V})$ جائیکه B=N*T یک بردار

[8] Cusp height

واحد درجهت کناری است.درنهایت مقدارکاندیدای $\Delta V_{i,k}$ برای نقطه i نمونه گیری شده بر روی مسیرkام به صورت زیر محاسبه می شود.

$$\Delta V_{i,k} = \frac{\Delta l}{(N*T).\frac{\partial S}{\partial V}}$$



شکل۲: فاصله پله کناری Δl وفاصله پارامتریک ΔV معادل آن

درنهایت به وسیله الگوریتم طرح ریزی مسیر CC والگوریتم های میانیابی مسیروآفست دهی ابزار میانیاب سطح Iso parametric دریک ماشین CNC به اجراء درمی آید.

۲-۲-ماشینکاری Iso planar

توضیحی شماتیک برای مسیرهای Iso planar درشکل ۳ نشان داده شده است.همانطوریکه میتوان دید مسیرهای CC عبارتند از تقاطع سطح پارامتریک ویک سری ازصفحات موازی(صفحات رانش).دراین حالت بردار نرمال عمودبراین صفحات موازی را بوسیله $M = (m_x, m_y, 0)$ نشان می دهیم وفاصله بین دوصفحه پشت سرهم موازی را بوسیله Δm نشان می دهیم.

شکل۳ : مسیرهای ماشینکاری Iso planar .

روش پیشنهادی برای برنامه ریزی مسیر درحالتهای Iso planar وIso scallop مشابه یکدیگر هستند.برای هردومورد هرمسیر CC,C(t) مطابق است با منحنی خاص U(t) درحالت پارامتریک C(t)=S(U(t)) درطرح ریزی U(t) به صورت پیوسته به وسیله $U_{k+1} = U_k + \Delta U_k$ جائیکه

$\Delta U_k = (\Delta u_k, \Delta v_k)$ به دست می آید.تفاوت اصلی بین Iso scallop وIso planar عبارت است ازراه محاسبه پارامترافزایشی $(\Delta u_k, \Delta v_k)$ برای k امین مسیر داده شده $U_k(t_k)$ منحنی افزایشی Iso planar عبارت است از $U_{k+1}(t_{k+1})$ جائیکه $t_{k+1} = t_k$. برای یک جفت از نقاط برروی U_k و U_{k+1} نقاط CC متعاقب $C_{k+1} = S(U_{k+1}), C_k = S(U_k)$ هردو برروی سطح واقع شده اند.

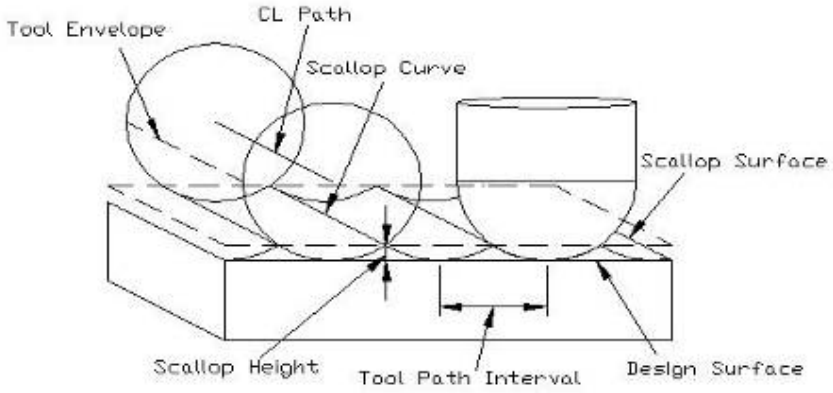
درنهایت به وسیله الگوریتم طرح ریزی مسیرCCوالگوریتم های میانیابی مسیروآفست دهی ابزارمیانیاب سطح Iso planar دریک ماشین CNC به اجراء درمی آید.[10]

۲-۳-ماشینکاری Iso scallop

۲-۳-۱ اجزاء هندسی مربوط به ماشینکاری Iso scallop

اجزاء هندسی مربوط به مشتقات این کار در این بخش توضیح داده می شود(شکل۴).همانند بیشتر ادبیات ساخت به کمک کامپیوتر مسیر موقعیت ابزار(CL) بیان کننده مرکز عبور مسیر ابزار برای یک مسیر خاص می باشد.مسیر نقطه تماس ابزار(CC) نشان دهنده خط سیر مماسی بین فرز سرگرد وسطح طراحی می باشد.درماشینکاری یک سطح سه بعدی مسیرهای CL در واقع برروی یک سطح آفست که بوسیله آفست سطح طراحی درجهت نرمال بر سطح به اندازه برابر با شعاع ابزار تولید قراردارند.این سطح آفست سطح مرکز ابزار نامیده می شود.درحالیکه درطول مسیر ابزار حرکت می کند,یک سطح محیط ابزار بر روی قطعه کار ایجاد می شود.این سطح را می توان به وسیله جاروب دادن یک دایره به شعاع ابزاردرامتدادمسیرCL ایجاد نمود.

فاصله افقی بین دو مسیر ابزار پشت سرهم فاصله برهم افتادگی ابزار یا قدم کناری نامیده می شودکه منجر به تولید scallop(cusp) درسطح ماشینکاری شده می شود.منحنی scallop عبارت است از منحنی ۳بعدی که scallop ماشینکاری را طی می کند.ارتفاع scallop عبارت است از فاصله بین منحنیscallop وسطح طراحی.جهت ماشینکاری با ارتفاع scallop ثابت منحنی های scallop بر روی یک سطح آفست(سطحscallop) از سطح طراحی وبا ارتفاع scallop به عنوان فاصله آفست استفاده می شود.درحقیقت این سطح عبارت است از منحنی تقاطع مشترک دوسطح محیط ابزار بین مسیرهای ابزار پشت سر هم وسطح scallop .[11]

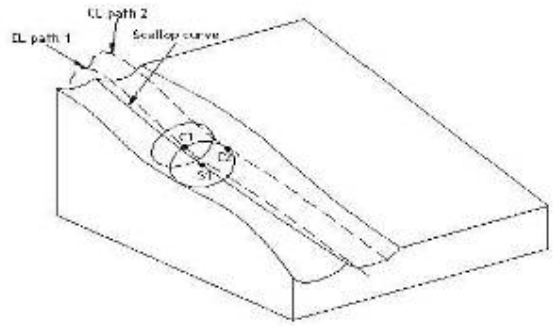


شکل ۴ : اجزاء هندسی مربوط به ماشینکاری Iso scallop

۲-۳-۲ تعیین مسیر ابزار

مسیرهای ابزار جهت ماشینکاری با ارتفاع scallop ثابت توسط انجام دومرحله پشت سرهم تعیین می شوند.ابتدا یک مسیر ابزار داده شده با توجه به الزامات scallop مورد نیاز جهت مشخص کردن منحنی scallop در جهت جهش کناری استفاده می شود(روشIso planar).سپس منحنی scallop با استفاده از روش توضیح داده شده درقسمت قبل شناسایی شده وبه منظور تعیین مسیر ابزار بعدی استفاده می شود.شکل ۵ دو مسیر پشت سر هم CL (مطابق توضیحات مسیرهای CL بر روی سطح آفست تولید می شوند) ومنحنی scallop مشترک برای یک سطح ماشین کاری شده را نشان می دهد.برای نقطه C_1 بر روی مسیر CL_1صفحه مماس برآن,منحنی scallop را درنقطه S_1 قطع می کند ونقطه S_1 بر روی دایره مرکز شعاع ابزار به مرکز C_1 در صفحه عمود می افتد.مماس منحنی scallop در S_1 عموما موازی با مسیر CL_1 در C_1 نمی باشد.مشابه این توضیحات صفحه عمود بر مماس منحنی scallop در S_1مسیر CL بعدی را در C_2 قطع می کند(مسیر CL_2) و C_2(مشابه C_1) برروی دایره شعاع ابزار به مرکز S_1 درصفحه عمود قرارمی گیرد.مماس منحنی CL_2 در C_2 نیز موازی با منحنی scallop در S_1 نمی باشد.به این ترتیب منحنی scallop جهت کل سطح ماشین کاری مشخص می گردد.با توجه به انحراف کم مماسهای منحنی از همدیگر و خطای بسیار جزئی ناشی شده از این خطا بردارهای مماس موازی فرض می

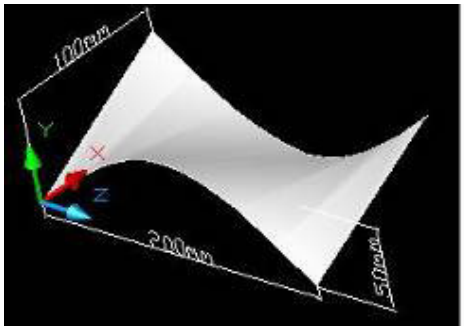
شوند.در نهایت با استفاده از الگوریتم طرح ریزی مسیرCC والگوریتم های میانیابی مسیر و آفست دهی ابزار میانیاب سطح Iso-scallop در یک ماشین CNC به اجراء در می آید[11].



شکل۵:مسیرهای CL پشت سرهم و منحنی scallop مشترک تولید شده

۳- متدولوژی اجراء CASE STUDY

در این بخش به بررسی ماشینکاری یک سطح free form با استفاده از استراتژیهای ماشین کاری توضیح داده شده می پردازیم.سطح مذکور یک سطح double curvature زین اسبی به ابعاد ۵۰×۱۰۰×۲۰۰mm می باشد.



شکل ۶ : سطح sculpture مورد استفاده در case study

شعاع ابزار $r = 4mm$, میزان پیشروی $f = 300mm/mn$,سرعت اسپیندل $S = 1500mm/\min$ محـدودیت ارتفاع قلهscallop height=0.15mm و تلرانس ماشینکاریMt=0.01mmمی باشد.

ماشینکاری سطح مذکور با استفاده از نرم افزار CATIA صورت گرفته است.

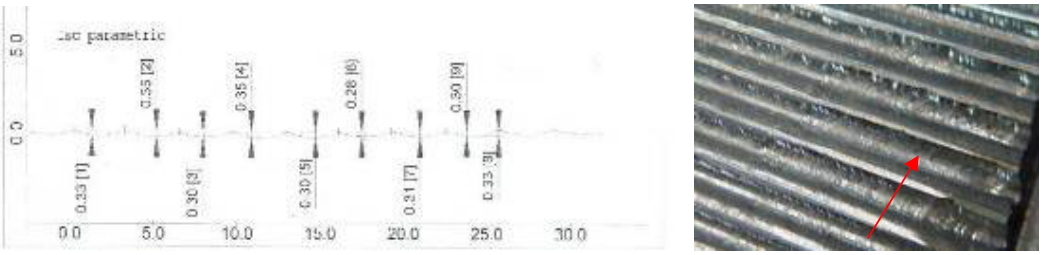
ماشینکاری Iso parametric به عنوان یک استراتژی ماشینکاری درویرایش 13این نرم افزار تعریف شده است.بـا دقت در macro های تعریف شده جهت سایر متدهای ماشینکاری می توان استراتژیهای ماشینکاری Iso planar و Iso scallop را در روش contour driven پیدا نمود. پس از تعریف پارامترهای مورد نیاز جهـت ماشـینکاری واجراء عملیات با Replay(verify) کردن مسیر ماشینکاری وضعیت سطح ماشینکاری شده را می تـوان مـشاهده نمود.یکی از قابلیتهای این نرم افزار به این صورت است که با تهیه عکس ازسطح ماشینکاری نهایی می توان وضعیت سطح به دست آمده از ماشینکاری را نسبت به سطح طراحی تجزیه وتحلیل نمود.موارد اشاره شده در جدول شـماره ۱ (میزان material باقیمانده و برخورد ابزار با سطح) با استفاده از این قابلیت نرم افزار به دست آمده است.

ماشین CNC مورد استفاده یک دستگاه فرز عمودی با مشخصات ذیل می باشد:

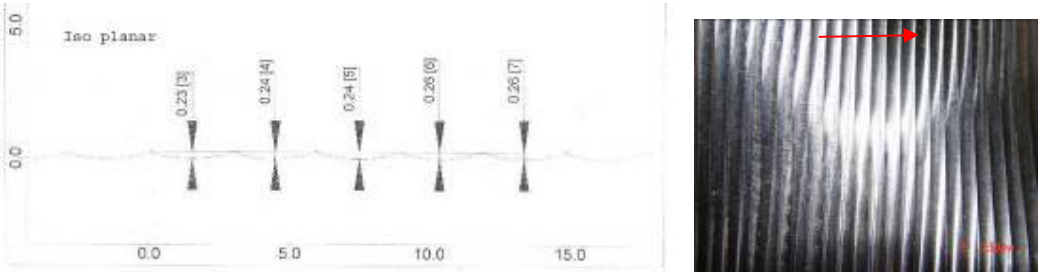
JOHN FORD VMC 1050 X=1050 mm Y=500 mm Z=500 mm PLC FANUC OM

جهت اندازه گیری سطوح تولید شده با استراتژیهای مختلف از دستگاه Mahr form tester استفاده شده است.در این روش پروب اندازه گیری سطح ماشینکاری را جاروب کرده ومنحنی های ایجاد شده بر روی سطح (مـسیر هـای حرکت ابزار) را می توان با بزرگنمایی 200 * برابر مشاهده نموده و اندازه گیری کرد.در تمام مراحل ماشینکاری از

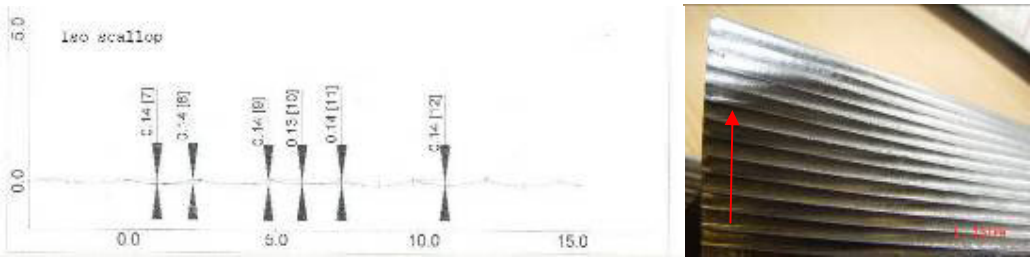
ابزار $\phi 8mm$ سرگرد نو جهت ثابت نگه داشتن وضعیت ماشینکاری استفاده شده است.سطوح تولید شده با هر سه استراتژی در شکل های زیر مشاهده می گردد(شکل۹,۸,۷).



شکل ۷ : سطح ماشینکاری iso parametric ونتایج اندازه گیری آن مشاهده می گردد(mm).کرنجه ابزار بر روی این سطح مشخص می باشد ◄نشان دهنده جهت اندازه گیری می باشد.



شکل ۸ سطح ماشینکاری iso planar ونتایج اندازه گیری آن مشاهده می گردد(mm).بر روی هم افتادگی مسیرهای ابزار مشخص است. ◄نشان دهنده جهت اندازه گیری می باشد.



شکل ۹:. سطح ماشینکاری iso scallop ونتایج اندازه گیری آن مشاهده می گردد(mm). ◄نشان دهنده جهت اندازه گیری می باشد.

پس از ماشینکاری این سطح با استراتژیهای فوق نتایج ذیل استخراج گردید.(کلیه پارامترهای ماشینکاری,پروسه خشن کاری,جنس ابزار و جنس قطعه کار در هر سه پروسه انجام شده ثابت بوده است). همانگونه که در جدول ۱ مشاهده می شود از لحاظ زمان ماشینکاری اختلاف زیادی بین روش های ماشینکاری وجود ندارد.در خصوص ارتفاع قله(صافی سطح)زوش ماشینکاری Iso scallopنسبت به روش های 1 و2 به ترتیب 233% و173% بهبود کیفیت را نشان می دهد.در روش اول مقدار مواد باقیمانده 1480 نقطه, روش دوم 199 نقطه و در روش سوم 21 نقطه می باشد.در مورد تعداد نقاط برخورد ابزار با سطح درروش Iso scallop فقط در لحظه ورود ابزار به سطح ماشینکاری برخورد ابزار مشاهده گردید.

		زمان ماشینکاری	Cusp height	Remaining material	برخورد ابزار

1	ماشینکاری Iso parametric	25' 20"	0.30-0.35	1480نقطه	16
2	ماشینکاری Iso planar	21' 35"	0.23-0.26	199 نقطه	4
3	ماشینکاری Iso scallop	24' 23"	0.13-0.15mm	21	1

جدول۱: نتایج به دست آمده از ماشینکاری سطح sculpture نمونه

۴- نتایج Conclusion

در این مقاله استراتژیهای مختلف ماشینکاری سطوح free-form مورد بررسی قرار گرفته و میزان کارایی هریک ازاین استراتژیها در ماشینکاری یک سطح free-form که نیازهای اکثر موارد مشابه را پوشش می دهد مورد بررسی قرار گرفت.پس از ماشینکاری یک سطح double curvatureبا استفاده از استراتژیهای نختلف مشاهده گردید که روش ماشینکاری Iso scallopمناسب ترین روش جهت ماشینکاری این سطوح می باشد.

۵- لیست علائم

B بردار واحد درجهت جهش کناری یا دو مسیر ابزار پشت سر هم
C مسیرتماس ابزار
h محدودیت ارتفاع scallop
L مسیر موقعیت ابزار
M بردار واحد عمود بر صفحات در ماشینکاری iso-planar
N بردار واحد عمودبر صفحه
r شعاع ابزار سرگرد
S سطح پارامتریک
T بردار واحد مماس در جهت مسیر CC
t پارامتر فضایی در طول مسیر CC
U منحنی $u-v$ در حالت پارامتریک
u,v پارامترهای سطح
Δl فاصله جهش کناری
Δm فاصله صفحات در ماشینکاری Iso planar
ρ شعاع انحناء سطح در جهت قدم کناری

مراجع

1- Sata , T.;kimura , F.;Okada,N. , Hosaka,M.A New method for NC interpolator for machining of sculpture surface."Computer Aided Design 1981 (v22,n5),273-283
2- A computer aided prototype system for nc milling of free-form shaped mechanical part pieces.Computer in industry,1991.20(2),275-293
3- Cox,J.J., Takezaki,Y., Ferguson,H. R. P., Kohkonen,K .E. and Mulay,E. L.,Space-filling curves in tool path applications.Computer Aided Design,1994,26(3),215-224
4- Chen,y.d,Ni.j and wu.s.m,Real time cnc tool path generation for machining iges surfaces. ASME journal of engineering for industry,1993,115(4),480-486
5- Haapiniemi, A., Nagase, H., Fujimoto, M., Hiraoka, H., Kimura, F. ana sata, T.,develop[ment of a real time numerical controller for machining of sculptured surfaces.In soft ware for discretemanufacturing.Ingeometricmodelingforcadapplications,North Holland,Amsterdam.1986,205-214

6- Hermann, G.,Algorithms for real time toll path generation .In geometric modeling for cad applications.North Holland,Amsterdam,1988,295-305
7- Suresh k, Yang DCH .Constant scallop height machining of free form surfaces.ASME journal of engineering for industry1994;116:253-9
8- C. Tournier and E. Duc.,A surface based approach for constant scallop height tool-path generation ,The international journal of Advanced Manufacturing Technology(2002) 19:318-324
9- I D Faux, M J Pratt, Computational geometry for design and manufacturing.John Wiley and Sons 1981.
10- Chih-Ching Lo.CNC machine tool surface interpolator for ball-end milling of free form surfaces.Int journal of machine tools&manufacture40(2000).307-326
11- His-Yung Feng,Huiwen Li. Constant scallop height tool path generation for three axis sculptured surface machining,Computer Aided Design 34(2002)647-654