

ایجاد نقشه‌ی نرخ پیشروی بیشینه برای پرداخت خشن تک مرحله‌ی با فرز انگشتی ته - تخت

وحید جوهری مجد (استاد یار)
هومن حسن زادگان (دانشجوی کارشناسی ارشد)
گروه مهندسی کنترل، دانشگاه تربیت مدرس

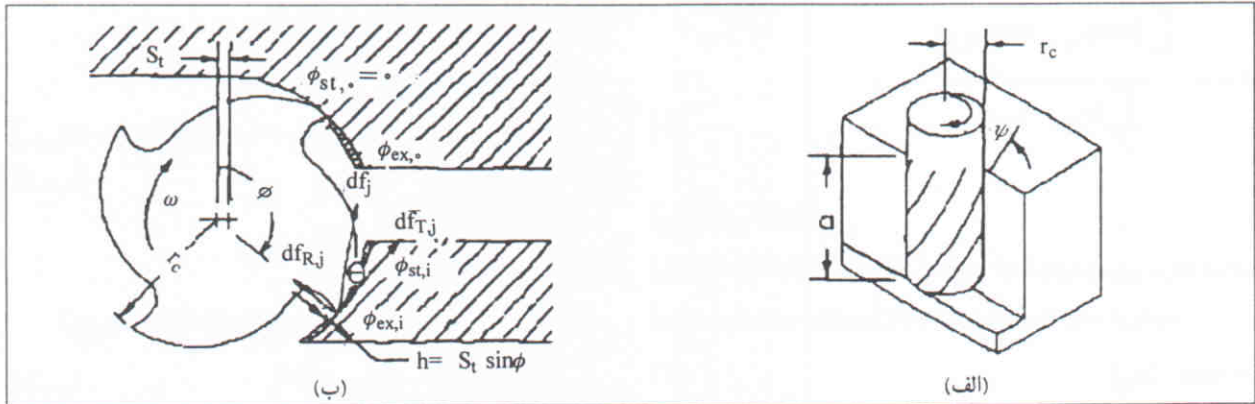
برای افزایش بازدهی زمانی یک دستگاه CNC باید مسیرهای حرکت ابزار را به گونه‌ی انتخاب کرد که بتوان بیشترین مقدار نرخ پیشروی ممکن را برای آن در نظر گرفت - بدون آنکه نیروی وارده بر ابزار برش از حد مجاز بیشتر شود. در این نوشتار، برای رسیدن به هدف فوق با استفاده از روش جدیدی به نام «جابه‌جایی مجازی»، نقشه‌ی نرخ پیشروی بیشینه^۱ محاسبه می‌شود. این شیوه‌ی جدید برای پرداخت خشن^۲ یک مرحله‌ی با فرز انگشتی ته-تخت^۳ بر روی قطعه‌ی که با استفاده از معادلات اسپلاین^۴ تعریف شده ارائه می‌شود. با به‌کارگیری روی خط این نقشه برای مسیریابی، پرداخت خشن قطعه در حداقل زمان ممکن و با برآورده شدن شرط نیرو انجام می‌گیرد.

مقدمه

در نواحی با عمق برش و انحنا کم افزایش یافته و در نواحی حساس که دارای عمق برش و انحنا زیاد می‌باشد کاهش می‌یابد. با این شیوه زمان پرداخت به‌نحو چشمگیری کاهش پیدا می‌کند و به‌علاوه شرط نیرو و خطا نیز در حین پرداخت برآورده می‌شود.^[۵] از جمله ابزارهای مفیدی که می‌توان از آن در انتخاب جهت‌های حرکت و نرخ پیشروی ابزار برش روی قطعه بهره برد، نقشه‌ی نرخ پیشروی بیشینه است. ایده‌ی استفاده از این نقشه در مسیریابی، برای اولین بار در سال ۱۹۹۷، توسط لیم و منک مطرح شد.^[۲] اگرچه مدل نیروی مورد استفاده‌ی آنان تنها در پرداخت با فرزانگشتی ته-گرد^۶ معتبر است. همچنین در این مدل روابط مربوط به نیرو و برحسب زاویه‌ی حرکت ابزار برش در صفحه‌ی XY است؛ در نتیجه این امکان وجود دارد که مستقیماً به کمک روابط مربوط به مدل نیرو، نقشه‌ی نرخ پیشروی بیشینه محاسبه شود.

در این نوشتار با استفاده از یک مدل نیروی مناسب برای فرز انگشتی ته-تخت در یک دستگاه CNC سه‌محوره، نقشه‌ی نرخ پیشروی بیشینه برای پرداخت خشن یک قطعه‌ی توصیف شده از طریق معادلات اسپلاین تولید می‌شود. از آنجا که در این مدل وابستگی نیرو به جهت حرکت به‌طور صریح در روابط وجود ندارد و نمی‌توان مستقیماً به کمک روابط نیرو نقشه‌ی نرخ پیشروی بیشینه را به‌دست آورد، روش جدیدی به نام جابه‌جایی مجازی ارائه، و به کمک آن نقشه‌ی نرخ پیشروی بیشینه تولید می‌شود. در ایجاد این نقشه، فقط آنالیز نیرو به کار گرفته خواهد شد، زیرا

نیاز روزافزون صنایع مختلف از قبیل هواپیماسازی، اتومبیل سازی، ریخته‌گری و غیره به قطعاتی با اشکال هندسی پیچیده و کاربردهای ویژه، طراحی روش‌های توسعه‌یافته در مدل‌سازی قطعه، برنامه‌ریزی هوشمند دستگاه‌های CNC و بهینه‌سازی روش‌های قدیمی را اجتناب‌ناپذیر می‌کند. برای افزایش بازدهی دستگاه‌های CNC و جلوگیری از بروز اتفاقات ناخواسته از قبیل خم شدن زیاد، شکستن ابزار برش و یا تجاوز خطای پرداخت از حدی معین، اخیراً شیوه‌های جدیدی در برنامه‌ریزی مسیر ارائه شده‌اند که مسیرهای حرکت و نرخ پیشروی ابزار برش بر روی قطعه را به‌صورت بهینه به‌دست می‌آورند.^[۵-۱] این در حالی است که در گذشته مسیرهای حرکت ابزار برش بر روی قطعه، مسیرهای ساده‌ی از پیش تعیین شده بود و نرخ پیشروی نیز بر روی این مسیرهای ساده تاحدی ثابت فرض می‌شد. از این رو برنامه‌نویس قطعه^۵ مجبور بود برای پرهیز از اتفاقات ناخواسته، نامناسب‌ترین محل روی سطح قطعه را که متناظر با بیشترین عمق برش و بیشترین انحنا بود برای محاسبات در نظر بگیرد و نرخ پیشروی ثابت را برای پرداخت کل قطعه به‌گونه‌ی انتخاب کند که مقدار نیرو و خطا برای این مکان از حد مجاز بیشتر نشود. نتیجه‌ی این کار کند شدن عمل پرداخت کل قطعه و کاهش بازدهی دستگاه CNC بود. در روش‌های جدید برنامه‌ریزی، نرخ پیشروی روی هر نقطه از مسیر حرکت با استفاده از مقادیر مجاز نیرو و خطا محاسبه می‌شود.^[۶-۹] با به‌کارگیری این روش‌ها نرخ پیشروی



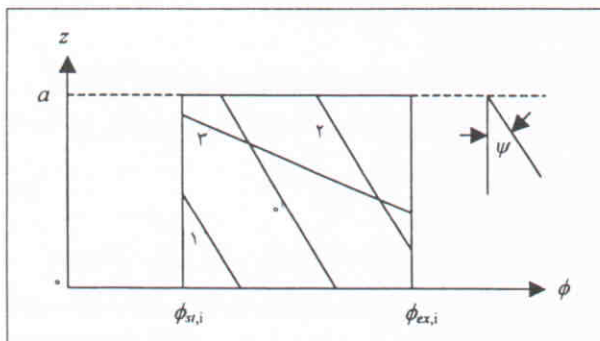
شکل ۱. الف) فرز انگشتی ته-تخت، ب) نیروهای وارده بر ابزار و هندسه‌ی آن.

در این رابطه ϕ زاویه‌ی دورانی لحظه‌ی نوک پایینی دندانه‌ی شماره صفر ($z=0$) و r_c شعاع ابزار برش است. همچنین گام زاویه‌ی بین دو دندانه‌ی متوالی است که برابر است با:

$$\phi_c = \frac{2\pi}{J} \quad (4)$$

در رابطه‌ی فوق J مجموع دندانه‌های پیرامون ابزار برش است. حال اگر استوانه‌ی ابزار برش را در ناحیه‌ی که با قطعه تماس دارد به‌طور فرضی روی یک سطح صاف پهن کنیم، مستطیلی با طول $2\pi r_c$ و عرض عمق برش a به‌دست می‌آید. در این صورت دندانه‌ها به‌صورت خطوطی مورب که با محور قائم زاویه‌ی ψ را درست می‌کنند و به فواصل زاویه‌ی ϕ_c از یکدیگر قرار دارند روی این مستطیل ظاهر می‌شوند. ناحیه‌ی i ام تماس ابزار برش با قطعه، مستطیلی است که بین خطوط عمودی مشخص کننده‌ی زاویه‌های $\phi_{st,i}$ و $\phi_{ex,i}$ و خطوط افقی $z=0$ و $z=a$ محدود شده است. با چرخش ابزار برش به‌دور محور خود، هر یک از دندانه‌ها ممکن است در یکی از پنج وضعیت نشان داده شده در شکل ۲ قرار بگیرند. این وضعیت‌ها را می‌توان چنین نوشت: [۵]

$$\phi_{st,i} \leq \phi_j(z=a) < \phi_j(z=0) < \phi_{ex,i} : \begin{cases} z_{i,j,1} = 0 \\ z_{i,j,2} = a \end{cases} \quad (5-الف)$$



شکل ۲. وضعیت‌های مختلف تماس دندانه‌ی ابزار با قطعه.

در پرداخت خشن هدف طی کردن مسیره‌های حرکت در حداقل زمان ممکن، با رعایت شرط نیرو است. در مراحل بعدی پرداخت، شامل پرداخت نیمه نهایی^۷ و پرداخت نهایی^۸، چون هدف ایجاد قطعه‌ی با کیفیت بالا و خطای پرداخت بسیار کم است، می‌توان برای محاسبه‌ی نرخ پیشروی به‌جای آنالیز نیرو و از آنالیز خطا استفاده کرد.

مدل نیروی صلب لحظه‌ی

مدل نیروی استفاده شده در این نوشتار، مدل نیروی صلب لحظه‌ی^۹ است که برای یک دستگاه CNC دو و نیم محوره ارائه شده است [۵] که در اینجا به معرفی مختصر آن می‌پردازیم. همزمان با چرخش ابزار برش به‌دور محور خود، براده‌ی از روی قطعه‌ی خام برداشته می‌شود که ضخامت آن از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$h = s_f \sin \phi \quad (1)$$

در این رابطه s_f نرخ پیشروی بر واحد دندانه^{۱۰}، ϕ زاویه‌ی گردش ابزار برش دستگاه به‌دور محور خود و h ضخامت براده است. شکل ۱ انواع پرداخت و نیروی وارده بر ابزار برش را نشان می‌دهد.

نیروی کل وارده بر ابزار برش از جمع برداری مؤلفه‌های قائم و افقی نیرو به‌دست می‌آید. بازه‌ی $[\phi_{st,i}, \phi_{ex,i}]$ نشان‌دهنده‌ی فاصله‌ی زاویه‌ی است که در آن ابزار برش با قطعه در تماس است.

چنانچه زاویه‌ی دندانه با محور قائم را ψ بنامیم، برای فرز انگشتی ته-تخت، ثابت زاویه‌ی دندانه با خط قائم از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$k_\psi = \tan(\psi) / r_c \quad (2)$$

در این صورت زاویه‌ی دوران دندانه‌ی i ام ابزار برش در موقعیت قائم z از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$\phi_j(z) = \phi + j\phi_c - k_\psi z \quad (3)$$

$$\bar{h} = -s_t \frac{\sum_i (\cos \phi_{ex,i} - \cos \phi_{st,i})}{\sum_i (\phi_{ex,i} - \phi_{st,i})} \quad (8)$$

نیروهای لحظه‌یی

برای به دست آوردن نیروهای لحظه‌یی ابتدا زاویه‌ی بین بردارهای نیروی مماسی و نیروی برآیند به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\theta = \tan^{-1}(k_R) \quad (9)$$

در این صورت مؤلفه‌های قائم و افقی نیرو از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$dF_{X,j}(\phi, z) = -dF_j(\phi, z) \cos(\phi_j(z) - \theta) \quad (10-الف)$$

$$dF_{Y,j}(\phi, z) = dF_j(\phi, z) \sin(\phi_j(z) - \theta) \quad (10-ب)$$

که در آن:

$$dF_j(\phi, z) = s_t k_{TR} \sin \phi_j(z) dz \quad (11-الف)$$

$$k_{TR} = k_T \sqrt{1 + k_R^2} \quad (11-ب)$$

نیروهای برشی را می‌توان از جای‌گذاری معادله‌ی (11-الف) در رابطه‌ی 10 و انتگرال‌گیری آنها در فاصله‌ی $z = z_{i,j,1}$ تا $z = z_{i,j,2}$ از جای‌گذاری معادله‌ی (11-الف) در دست آورد. این عمل را باید روی همه‌ی دندانها و همه‌ی نواحی تماس تکرار کرد. محاسبه‌ی این انتگرال‌ها به روابط زیر منتهی می‌شود: [5]

$$F_x(\phi) = \omega s_t k_{TR} [- (A + E\phi) \sin \theta + C \cos \theta + B \sin(\gamma\phi - \theta) - D \cos(\gamma\phi - \theta)] \quad (12-الف)$$

$$F_y(\phi) = \omega s_t k_{TR} [(A + E\phi) \cos \theta + C \sin \theta + B \cos(\gamma\phi - \theta) + D \sin(\gamma\phi - \theta)] \quad (12-ب)$$

که در آن:

$$A = \sum_i \sum_j a_{i,j}, B = \sum_i \sum_j b_{i,j}, C = \sum_i \sum_j c_{i,j}, D = \sum_i \sum_j d_{i,j}, E = \sum_i \sum_j e_{i,j} \quad (13)$$

در روابط فوق ضرایب $a_{i,j}$ تا $e_{i,j}$ برای دندانهای زام و ناحیه‌ی تماس z ام به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$a_{i,j} = a;$$

$$\phi_j(z=a) \leq \phi_{st,i} < \phi_j(z=0) < \phi_{ex,i}:$$

$$\begin{cases} z_{i,j,1} = 0 \\ z_{i,j,2} = (\sqrt{k_\psi}) [\phi + j\phi_c - \phi_{st,i}] \end{cases} \quad (5-ب)$$

$$\phi_{st,i} \leq \phi_j(z=a) < \phi_{ex,i} < \phi_j(z=0):$$

$$\begin{cases} z_{i,j,1} = (\sqrt{k_\psi}) [\phi + j\phi_c - \phi_{ex,i}] \\ z_{i,j,2} = a \end{cases} \quad (5-ج)$$

$$\phi_j(z=a) \leq \phi_{st,i} < \phi_{ex,i} < \phi_j(z=0):$$

$$\begin{cases} z_{i,j,1} = (\sqrt{k_\psi}) [\phi + j\phi_c - \phi_{ex,i}] \\ z_{i,j,2} = (\sqrt{k_\psi}) [\phi + j\phi_c - \phi_{st,i}] \end{cases} \quad (5-د)$$

$$\phi_{ex,i} \leq \phi_j(z=a): \begin{cases} \text{در این حالت دندان با سطح برش} \\ \text{تماسی ندارد.} \end{cases} \quad (5-ه)$$

در روابط فوق، $z_{i,j,1}$ و $z_{i,j,2}$ به ترتیب موقعیت قائم نوک پائینی و بالایی دندانهای زام در ناحیه‌ی z ام سطح تماس ابزار برش با قطعه است. تنها قسمتی از دندانها که درون مستطیل ناحیه‌ی تماس قرار می‌گیرند هنگام محاسبه‌ی نیروی وارده بر ابزار برش در نظر گرفته می‌شوند.

محاسبه‌ی نیروی وارده بر ابزار برش

در مدل نیروی صلب لحظه‌یی، مؤلفه‌های جزئی نیروهای مماسی و شعاعی متناسب با نرخ پیشروی بر واحد دندان و همچنین متناسب با سینوس زاویه دوران ابزار برش در نظر گرفته می‌شود. در این صورت خواهیم داشت:

$$dF_{T,j}(\phi, z) = k_T s_t \sin \phi_j(z) dz \quad (6-الف)$$

$$dF_{R,j}(\phi, z) = k_R dF_{T,j}(\phi, z) \quad (6-ب)$$

در روابط فوق، ضریب فشار k_T و ضریب نسبت نیروی شعاعی به مماسی k_R از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$k_T = M_T \bar{h}^{-P_T}, k_R = M_R \bar{h}^{-P_R} \quad (7)$$

متغیرهای M_T, P_T, M_R, P_R دارای مقادیر ثابت و معینی هستند و \bar{h} ضخامت متوسط براده است که از رابطه‌ی 8 به دست می‌آید: [5]

دورانی جدیدی می‌شود باید این ضرایب را مجدداً محاسبه کرد.

محاسبه نرخ پیشروی

در این نوشتار نرخ پیشروی پرداخت خشن با استفاده از تحلیل نیرو محاسبه می‌شود. این کار موجب می‌شود که در حین پرداخت، نیرو از آستانه‌ی شکستگی ابزار برش فراتر نرود. آنچه موجب شکستگی ابزار برش می‌شود نیرویی است که در امتداد صفحه‌ی XY به محور ابزار برش وارد می‌شود. در حالت کار عادی، این نیرو گشتاوری را روی محور ابزار برش ایجاد می‌کند که باعث خمیدگی آن می‌شود. اگر فرض کنیم F برآیند نیروی وارد شده بر ابزار برش باشد که در نقطه‌ی میانی عمق برش بر آن اثر می‌کند، گشتاوری که باعث خمیدگی ابزار برش می‌شود از رابطه‌ی ۱۵ به دست می‌آید:

$$M = F(L - \frac{a}{\psi}) \quad (15)$$

که در آن L طول کلی ابزار برش از ابتدا تا انتهاست. شوک کششی وارده بر ابزار برش نیز از رابطه‌ی ۱۶ محاسبه می‌شود:

$$\sigma = \frac{Mr_c}{I} \quad (16)$$

در رابطه‌ی فوق r_c شعاع ابزار برش، و I متغیری است که تقریب آن از طریق رابطه‌ی ۱۷ برابر است با: [۵]

$$I = \frac{\pi (\cdot / \wedge r_c)^4}{4} \quad (17)$$

با کمک این روابط می‌توان آستانه‌ی شکستگی ابزار برش را برحسب نیروی F به دست آورد و در نتیجه، با معلوم بودن آستانه‌ی شکستگی، F را محاسبه کرد. نیروی برآیند وارده بر ابزار برش را می‌توان از رابطه‌ی ۱۸ محاسبه کرد:

$$F(\phi) = \sqrt{F_x^2(\phi) + F_y^2(\phi)} = \cdot / \omega s_t k_{TR} F_{GEO}(\phi) \quad (18)$$

که در آن $F_{GEO}(\phi)$ از رابطه‌ی ۱۹ به دست می‌آید:

$$F_{GEO}(\phi) = \{(A + E\phi)^2 + B^2 + C^2 + D^2 + 2C[B \sin 2\phi - D \cos 2\phi] + 2(A + E\phi)[B \cos 2\phi + D \sin 2\phi]\}^{\cdot / 5} \quad (19)$$

بنابراین مقدار $F_{GEO}(\phi)$ را می‌توان مستقل از متغیرهای k_T و k_R و نرخ پیشروی s_t محاسبه کرد. هنگامی که مقدار دقیق ضرایب k_T و k_R معلوم باشد، می‌توان نرخ پیشروی را که شرط نیرو با آن برآورده می‌شود از رابطه‌ی ۲۰ به دست آورد:

$$\begin{aligned} b_{i,j} &= \frac{1}{\psi k_\psi} [\sin \psi (j\phi_c - k_\psi a) - \sin \psi j\phi_c]; \\ c_{i,j} &= 0; \end{aligned} \quad (14-الف)$$

$$\begin{aligned} d_{i,j} &= \frac{1}{\psi k_\psi} [\cos \psi (j\phi_c - k_\psi a) - \cos \psi j\phi_c]; \\ e_{i,j} &= 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{i,j} &= \frac{1}{\psi k_\psi} \sin \psi \phi_{st,i} + \frac{1}{k_\psi} [j\phi_c - \phi_{st,i}]; \\ b_{i,j} &= -\frac{1}{\psi k_\psi} \sin \psi (j\phi_c); \end{aligned} \quad (14-ب)$$

$$\begin{aligned} c_{i,j} &= -\frac{1}{\psi k_\psi} \cos \psi \phi_{st,i}; \\ d_{i,j} &= -\frac{1}{\psi k_\psi} \cos \psi j\phi_c; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e_{i,j} &= \frac{1}{k_\psi}; \\ a_{i,j} &= a - \frac{1}{\psi k_\psi} \sin \psi \phi_{ex,i} - \frac{1}{k_\psi} [j\phi_c - \phi_{ex,i}]; \end{aligned}$$

$$b_{i,j} = \frac{1}{\psi k_\psi} \sin \psi (j\phi_c - k_\psi a); \quad (14-ج)$$

$$\begin{aligned} c_{i,j} &= \frac{1}{\psi k_\psi} \cos \psi \phi_{ex,i}; \\ d_{i,j} &= \frac{1}{\psi k_\psi} \cos \psi (i\phi_c - k_\psi a); \end{aligned}$$

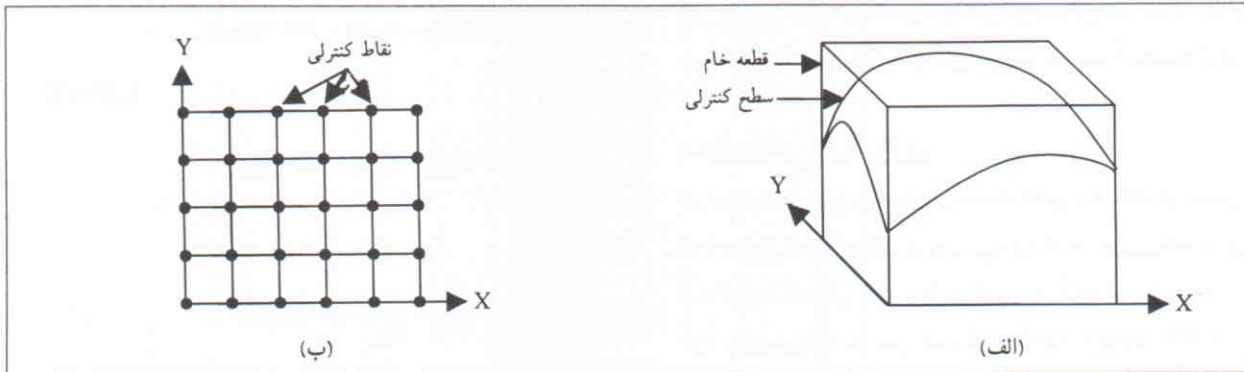
$$\begin{aligned} e_{i,j} &= -\frac{1}{k_\psi}; \\ a_{i,j} &= \frac{1}{k_\psi} [\phi_{ex,i} - \phi_{st,i}] - \frac{1}{\psi k_\psi} [\sin \psi \phi_{ex,i} - \phi_{ex,i} - \sin \psi \phi_{st,i}]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_{i,j} &= 0; \\ c_{i,j} &= \frac{1}{\psi k_\psi} [\cos \psi \phi_{ex,i} - \cos \psi \phi_{st,i}]; \end{aligned} \quad (14-د)$$

$$\begin{aligned} d_{i,j} &= 0; \\ e_{i,j} &= 0; \end{aligned}$$

$$a_{i,j} = b_{i,j} = c_{i,j} = d_{i,j} = e_{i,j} = 0 \quad (14-ه)$$

در محاسبه‌ی ضرایب A تا E ، باید با استفاده از روابط ۱۳ و ۱۴ همه‌ی دندانه‌ها و همه‌ی نواحی تماس را در نظر گرفت. مقادیر به دست آمده برای این ضرایب تا زمانی که ϕ در بازه‌ی دورانی فعلی



شکل ۳: الف) قطعه‌ی خام و سطح کنترلی، ب) نقاط کنترلی بر روی تصویر سطح کنترلی.

بیشینه از مدل نیروی صلب استفاده می‌شود.

تولید نقشه‌ی نرخ پیشروی بیشینه به روش جابجایی مجازی

فرض کنید مکعب مستطیل نشان داده شده در شکل ۳ الف قطعه‌ی خام یا قطعه‌ی پیش از انجام پرداخت است و رویه‌ی داخل مکعب همان سطح پرداخت مطلوب است که آن را سطح کنترلی^{۱۳} نیز می‌گویند. تصویر این سطح روی صفحه XY مستطیلی است که در شکل ۳ ب نشان داده شده است. چنانچه سطح این مستطیل را در امتداد محورهای X و Y تقسیم‌بندی کنیم، تعدادی نقطه روی آن به دست می‌آید که آنها را نقاط کنترلی^{۱۴} می‌نامیم. تعداد و چگالی نقاط کنترلی بر حسب کاربرد می‌تواند در مکان‌های مختلف این سطح کنترلی متفاوت باشد. معمولاً در مکان‌هایی که لازم است آنالیز دقیق‌تری داشته باشیم، چگالی نقاط کنترلی را بیشتر در نظر می‌گیریم. در شکل ۴ نقطه‌ی کنترلی P به عنوان نمونه مشاهده می‌شود. چنانچه ابزار از این نقطه در جهت θ_1 به اندازه‌ی طول کوچک d (که مقداری ثابت در نظر گرفته می‌شود) جلو برود، نقطه‌ی P_1 به دست می‌آید. به کمک مدل نیرو می‌توان مقدار نیروی وارد شده بر ابزار برش در نقطه‌ی P_1 نرمالیزه شده با ضرایب k_{TR} و s_i را از روابط ۱۸ و ۱۹ محاسبه کرد. با استفاده از مقدار محاسبه شده‌ی نیرو در این نقطه و با کمک روش عددی توضیح داده شده در انتهای بخش قبل برای محاسبه‌ی معکوس تابع f_k^{-1} ، حداکثر مقدار نرخ پیشروی به گونه‌ی محاسبه می‌شود که نیرو از حد مجاز بیشتر نشود. در شکل ۴ حداکثر مقدار مجاز نرخ پیشروی در نقطه‌ی P_1 با طول بردار PH_1 مشخص شده است.

حال اگر ابزار از نقطه‌ی P به اندازه‌ی طول d در جهت θ_p جلو برود، به نقطه‌ی P_p می‌رسد که می‌توان مانند نقطه‌ی قبلی مقدار نیرو و حداکثر مقدار مجاز نرخ پیشروی را برای آن محاسبه کرد و از آنجا بردار PH_p را که طول آن نشان‌دهنده‌ی حداکثر نرخ پیشروی مجاز

$$s_{t,igt} = f_k^{-1} \left(\frac{\sqrt{F_{Max,igt}}}{F_{Geo,Max}} \right) \quad (20)$$

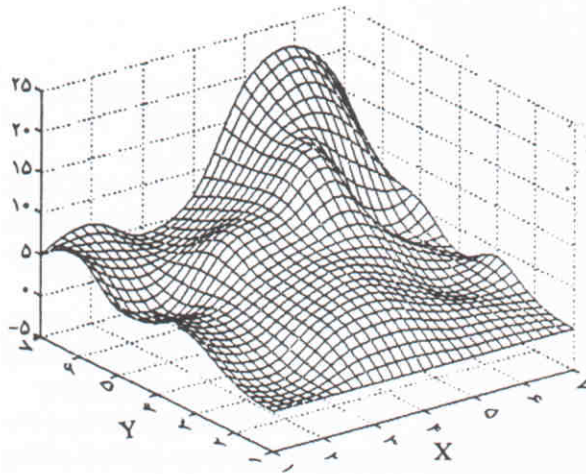
که در آن $F_{Max,igt}$ بیشینه مقدار نیروی مجاز، بوده و $f_k^{-1}(\cdot)$ معکوس تابع زیر است:

$$f_k(S_t) = M_T \bar{h}_s^{-P_T} \sqrt{S_t^{2(1-P_T)} + M_R^2 \bar{h}_s^{-P_R} S_t^{2(1-P_T-P_R)}} \quad (21)$$

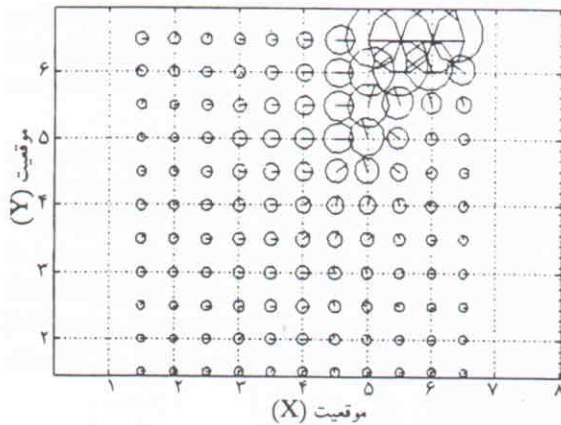
به‌طور معمول عبارات $1-P_T$ ، $-P_R$ و $1-P_T-P_R$ مقادیری مثبت‌اند. در نتیجه $f_k(S_t)$ یک تابع افزایشی محض، و بنابراین معکوس‌پذیر است. از آنجا که نمی‌توان معکوس $f_k(S_t)$ را به‌طور تحلیلی به دست آورد، بهتر است ابتدا مقدار $f_k(S_t)$ را به‌ازای همه‌ی مقادیر S_t قابل قبول محاسبه کرد و سپس برای به دست آوردن S_t مطلوب در هر نقطه روی مسیر ابزار برش، مقداری را انتخاب کرد که $f_k(S_t)$ را با تقریب مناسب برابر $\frac{\sqrt{F_{Max,igt}}}{F_{Geo,Max}}$ در آن نقطه قرار می‌دهد.

همان‌گونه که ملاحظه شد، استفاده از مدل نیروی صلب این امکان را ایجاد می‌کند که بتوان متغیر نرخ پیشروی را به‌عنوان یک عامل ضرب شونده از درون معادلات نیرو بیرون آورد و آن را به‌گونه‌ی محاسبه کرد که شرط نیرو را برآورده کند.

لازم به ذکر است که می‌توان در محاسبه‌ی نیرو به‌جای مدل نیروی صلب از مدل نیروی انعطاف‌پذیر^{۱۱} بهره گرفت.^[۷-۸] در این مدل برخلاف مدل قبلی اثر خمیدگی ابزار برش به‌صورت یک عامل پس‌خور در معادلات نیرو وارد می‌شود.^[۱۰] در نتیجه لازم است از یک روش تکراری^{۱۲} برای محاسبه‌ی نیرو بر حسب نرخ پیشروی و سایر متغیرهای پرداخت سود برد که در آن صورت به دلیل افزایش بار محاسبات نمی‌توان نرخ پیشروی را به‌سادگی بهینه‌سازی کرد. به همین دلیل در این نوشتار برای به دست آوردن نقشه‌ی نرخ پیشروی



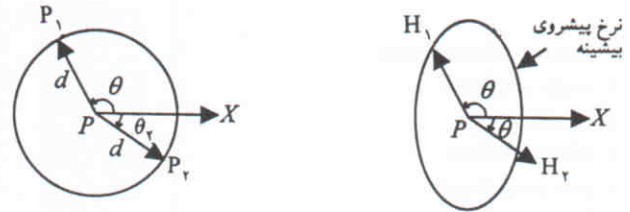
شکل ۵. نمونه‌ی یک سطح کنترلی.



شکل ۶. نقشه‌ی نرخ پیشروی بیشینه همراه با جهت‌های حرکت بیشینه.

نتیجه گیری

در این نوشتار با استفاده از یک روش جدید موسوم به «جابه‌جایی مجازی»، نقشه‌ی نرخ پیشروی بیشینه برای خشن‌کاری در یک دستگاه فرز CNC سه‌محوره محاسبه شد. در روش پیشنهادی لزومی ندارد جهت حرکت ابزار برش به‌طور صریح در معادلات نیرو ظاهر شود زیرا نقشه‌ی نرخ پیشروی بیشینه با استفاده از تکرار محاسبه‌ی مقدار نیروی نرمالیزه شده و محاسبه‌ی عددی معکوس یک تابع غیر خطی برای نقاط پیرامون هر نقطه‌ی کنترلی به‌دست می‌آید. این روش برای پرداخت خشن با فرز انگشتی ته-تخت بر روی قطعاتی که با معادلات اسپلاین تعریف شده‌اند قابل استفاده است. به‌کارگیری روش فوق این امکان را فراهم می‌آورد که پرداخت خشن قطعه در حداقل زمان ممکن و با رعایت محدوده‌ی مجاز نیرو برای جلوگیری از خمیدگی و یا شکستن ابزار انجام پذیرد.



شکل ۴. تعیین مرز نرخ پیشروی بیشینه برای نقطه‌ی کنترلی P

در نقطه‌ی P_p است به‌دست آورد. با همین شیوه برای سایر جهت‌های حرکت حول نقطه‌ی P می‌توان مقادیر مجاز نرخ پیشروی را محاسبه کرد. با اتصال نقاط H_{p1} و H_{p2} و... به یکدیگر یک منحنی بسته حول P حاصل می‌شود. نقاط روی این منحنی نشان‌دهنده‌ی حداکثر مقادیر مجاز نرخ پیشروی به‌ازای زوایای مختلف حرکتی هستند و نقاط درون آن محدوده‌ی مجاز نرخ پیشروی را مشخص می‌کنند. اگر این کار را برای سایر نقاط کنترلی روی سطح نیز انجام دهیم، نقشه‌ی نرخ پیشروی بیشینه برای سطح کنترلی مورد نظر به‌دست می‌آید.

شبیه‌سازی

شکل ۵ نمونه‌ی از سطح کنترلی را نشان می‌دهد که توسط معادلات اسپلاین و در محیط نرم‌افزار MATLAB ایجاد شده است. در این شبیه‌سازی فرض بر این است که می‌خواهیم سطح کنترلی مذکور را در یک مرحله خشن‌کاری کنیم که در این صورت عمق محوری برش ۱۵ در هر نقطه از سطح برابر با تفاضل ارتفاع قطعه‌ی خام و ارتفاع سطح در آن نقطه خواهد بود. تصویر سطح کنترلی نشان داده شده روی صفحه‌ی XY مربعی با طول ضلع ۶ سانتی‌متر است. در این شبیه‌سازی نقاط کنترلی روی این مربع را با فواصل ۰/۵ سانتی‌متر در امتداد محورهای X و Y در نظر گرفته‌ایم. مقدار $F_{GEO}(\phi)$ را با استفاده از روش جابه‌جایی مجازی برای نقاط پیرامون هر یک از نقاط کنترلی از رابطه‌ی ۱۹ محاسبه کرده و به کمک این مقدار نیروی نرمالیزه شده حداکثر مقدار مجاز نرخ پیشروی را از رابطه‌ی ۲۰ محاسبه می‌کنیم. نقشه‌ی نرخ پیشروی بیشینه به‌دست آمده برای قطعه‌ی شکل ۵ به همراه جهت حرکت بیشینه برای هر یک از نقاط کنترلی در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود نقاطی از صفحه‌ی XY که در شکل ۵ ارتفاع بیشتری دارند، مطابق شکل ۶ از نرخ پیشروی بیشینه بیشتری برخوردارند. همچنین می‌توان مشاهده کرد که جهت حرکت بیشینه به‌دست آمده در هر نقطه‌ی کنترلی در راستای بیشترین شیب سطح کنترلی در آن نقطه است.

پانوشتها

1. maximum feedrate map
2. rough machining
3. flat-end milling
4. spline equations
5. part programmer
6. ball-end milling
7. semi-finishing
8. finishing
9. instantaneous rigid force model
10. feed per tooth
11. flexible force model
12. iterative metod
13. control surface
14. control points
15. axial depth of cut

منابع

1. Johari-Majd, V., and Hasanzadegan, H., "A New Method for Tool-Path Generation and Adaptive Interpolation of a Three-Axis CNC Milling Machine", *9th Annual Mechanical Engineering Conference*, Rasht, Iran, pp. 569-576, (2001).
2. Lim, E.M., and Menq, C. H., "Integrated Planning for Precision Machining of Complex Surfaces. Part 1: Cutting Path and Feedrate Optimization", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **37** (1), pp. 61-76, (1997).
3. Lim, E. M., and Menq, C. H., "Integrated Planning for Precision Machining of Complex Surfaces. Part 1: Application to the Machining of a Turbine Blade Die" , *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **37** (1), pp. 77-91, (1997).
4. Sarma, R., and Dutta D., "Tool Path Generation for NC Grinding", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **38** (3), pp. 177-195, (1998).
5. Spence, A. D., and Altintas, Y., "A Solid Modeler Based Milling Process Simulation and Planning System", *Transactions of the ASME Journal of Engineering for Industry*, **116**, pp. 142-156, (1994).
6. Suresh, K., and Yang, D. C., "Constant Scallop-Height Machining of Free-form Surface", *Transactions of the ASME Journal of Engineering for Industry*, **116**, pp. 35-49, (1994).
7. Lim, E. M., et. al., "The Prediction of Dimensional Error For Sculptured Surface Productions Using the Ball-End Milling Process. Part 1: Chip Geometry Analysis and Cutting Force Prediction", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **35** (8), pp. 1149-1169, (1995).
8. Lim, E. M., et. al., "The Prediction of Dimensional Error for Sculptured Surface Productions Using the Ball-End Milling Process. Part 2: Surface Generation Model and Experimental Verification", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **35** (8), pp. 1171-1185, (1995).
9. Dong, Z., et. al., "Optimal Rough Machining of Sculptured Parts on a CNC Milling Machine", *Transactions of the ASME Journal of Engineering for Industry*, **115**, pp. 159-171, (1993).
10. Farouki, R. T., et. al., "G Codes for the specifications of Pythagorean-hodograph Tool Paths and Associated Feedrate Functions on Open-architecture CNC Machines", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **39** (1), pp. 123-142, (1999).