مجله مهندسی مکانیک مدرس، دی 1394، دوره 15، شماره 10، ص‌ص 311-319

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی قواعد ماشین‌کاری هندسی و معرفی روشی بر پایه جایگشت برای تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها در قطعه‌های منشوری

داود منافی[1]، محمدجواد ناطق[2*]

1- کارشناسی‌ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت‌مدرس، تهران
2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت‌مدرس، تهران
* تهران، صندوق‌پستی 143-14115، nategh@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 20 اردیبهشت 1394
پذیرش: 15 مرداد 1394
ارائه در سایت: 31 شهریور 1394

کلید واژگان:
طرح‌ریزی فرایند به کمک رایانه
تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها
قواعد ماشین‌کاری هندسی
قواعد ماشین‌کاری تکنیکی
جایگشت

چکیده

طرح‌ریزی فرایند به کمک رایانه پلی برای یکپارچه‌سازی سامانه‌های طراحی و تولید به کمک رایانه است که تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها، یکی از وظایف اولیه آن است. توالی ماشین‌کاری فیچرها براساس قواعد ماشین‌کاری تکنیکی و هندسی تعیین می‌شود؛ بنابراین در این مقاله سعی شده است قواعد ماشین‌کاری تکنیکی و هندسی و همچنین روش تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها مورد مطالعه قرار گیرد. ابتدا به برخی از قواعد ماشین‌کاری تکنیکی اشاره و سپس تداخل‌های هندسی فیچرها بررسی می‌شود. دو قاعده جدید برای تداخل‌های هندسی بیان می‌شود تا توالی ماشین‌کاری فیچرهای تداخلی مشخص شود. ویژگی این قواعد جدید در استخراج نتایج واحد و شناسایی آسان‌تر آن‌ها توسط سامانه‌های رایانه است، همچنین الگوریتمی برای شناسایی خودکار این قواعد ماشین‌کاری هندسی بیان می‌شود. در برخی موارد ممکن است مغایرتی بین قواعد ماشین‌کاری تکنیکی و هندسی رخ دهد، که این مغایرت باید در تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها در نظر گرفته شود. در نهایت الگوریتمی بر پایه روش جایگشت برای تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها معرفی می‌شود. در این الگوریتم قواعد ماشین‌کاری تکنیکی و هندسی، جداگانه و مرحله به مرحله اعمال می‌شود و در صورت وجود مغایرت بیان شده، این مغایرت به‌طور خودکار شناسایی و رفع می‌شود. الگوریتم‌های بیان شده در برنامه پایتون اوسی‌سی پیاده‌سازی و آزمایش شده است.

Investigation of Geometrical Rules and Introducing a Method Based on Permutation for Sequencing of Machining Features for Prismatic Parts

Davood Manafi[1], Mohammad Javad Nategh[2*]

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
* P.O.B. 14115-143 Tehran, Iran, nategh@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 10 May 2015
Accepted 06 August 2015
Available Online 22 September 2015

Keywords:
Computer-Aided Process Planning
Feature Sequencing, Geometrical Rules
Technical Rules
Permutation

ABSTRACT

Computer-aided process planning (CAPP) is a bridge for integrating computer-aided design (CAD) and computer-aided manufacturing (CAM). One of the basic computer-aided process planning tasks is sequencing of machining features. Sequencing of machining features is determined based on technical and geometrical rules. In this paper, the technical rules, geometrical rules and sequencing of machining features method were discussed. At first, some of the technical rules were pointed. Then, the geometrical interactions were studied and two new geometrical rules were introduced for sequencing the machining features having geometrical interaction. These rules can yield unique results and they are identified easily by the computer systems. Also, an algorithm was introduced for automated application of these geometrical rules in computer systems. The conflict between the technical and geometrical rules that may occur in some cases was studied. This conflict must be considered in the sequencing of machining features methods. Finally, an algorithm was introduced for sequencing of machining features based on permutation. In this algorithm the technical and geometric rules were applied separately and step by step. Any conflict between technical and geometrical rules could be detected automatically in this algorithm. Algorithms were programmed and verified in PythonOCC.

1- مقدمه

طرح‌ریزی فرایند به کمک رایانه[1] پلی برای یکپارچه‌سازی طراحی[2] و تولید به کمک رایانه[3] است [1]. در طرح‌ریزی فرایند، اطلاعات طراحی به دستورالعمل‌های تولیدی تبدیل می‌شود [2]. یکی از وظایف اولیه طرح‌ریزی فرایند، تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرهاست. در تعیین توالی

1- Computer-Aided Process Planning (CAPP)
2- Computer-Aided Design (CAD)
3- Computer-Aided Manufacturing (CAM)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

D. Manafi, M. J. Nategh, Investigation of Geometrical Rules and Introducing a Method Based on Permutation for Sequencing of Machining Features for Prismatic Parts, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 15, No. 10, pp. 311-319, 2015 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.10.27.1]

ماشین‌کاری فیچرها، دو فاکتور حائز اهمیت است: رعایت قواعد ماشین‌کاری و بهینه بودن توالی ماشین‌کاری فیچرها [3].

در سامانه‌های طرح‌ریزی فرایند، قواعد ماشین‌کاری براساس تداخل‌های ایجاد شده بین فیچرها تعیین می‌شوند. تداخل‌های موجود بین فیچرها به دو دسته تکنیکی و هندسی تقسیم می‌شوند [4]. در تداخل‌های هندسی، فیچرها یک سری اطلاعات توپولوژی را به اشتراک می‌گذارند. درحالی‌که تداخل‌های تکنیکی، براساس دانش فنی تعیین می‌شوند و ممکن است هیچ اطلاعات توپولوژی بین این فیچرها مشترک نباشند.

پژوهش‌های انجام شده در زمینه تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها به دو دسته تقسیم می‌شوند. در دسته نخست به معرفی قواعد ماشین‌کاری حاکم بین فیچرها پرداخته شده است تا توالی ماشین‌کاری فیچرها و ستاپ‌ها تعیین شود. درباره روش‌های تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها در دسته دوم بحث شده است.

سورماز و خوشنویس [3] تداخل تکنیکی فیچرها را مورد مطالعه و بررسی قرار داده‌اند و سه الگوریتم برای به‌کارگیری تداخل تکنیکی فیچرها، جهت تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها پیشنهاد کرده‌اند. کیم و همکاران [5] از روش تجزیه حجمی برای شناسایی فیچرها استفاده کرده‌اند. آن‌ها قواعد هندسی بین فیچرها را هنگام شناسایی فیچرها، به روش مجموع متناوب حجم قسمت‌ها[1] تعیین کرده‌اند. وانگ و همکاران [6] پنج قاعده هندسی براساس حجم ماشین‌کاری فیچرها برای تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها معرفی کرده‌اند. آن‌ها از این قواعد هندسی برای تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها و ستاپ‌ها استفاده کرده‌اند. لی‌یو و وانگ [4] به بررسی تعیین توالی فیچرها و طرح‌ریزی ستاپ‌ها براساس قواعد ماشین‌کاری هندسی و تکنیکی پرداخته‌اند. روش آن‌ها شامل سه مرحله است: 1) توالی ماشین‌کاری بین فیچرها را براساس قواعد ماشین‌کاری تکنیکی تعیین کرده‌اند. 2) فیچرها را براساس جهت ابزار در یک ستاپ قرار داده‌اند. 3) پس از طرح‌ریزی ستاپ‌ها، توالی ماشین‌کاری فیچرهای هر ستاپ براساس قواعد ماشین‌کاری هندسی تعیین شده است. آن‌ها سه قاعده هندسی برای این کار تعریف کرده‌اند.

در پژوهش‌های دسته دوم، هوانگ و میلر [8,7] از مجموع قواعد ماشین‌کاری هندسی، تلرانسی و سطوح مرجع برای تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها استفاده کرده‌اند. آن‌ها از زنجیره‌های پیش‌رونده برای تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها، و از زنجیره‌های پس‌رونده برای اعمال قواعد ماشین‌کاری بین فیچرها استفاده کرده‌اند. الگوریتم پیشنهادی آن‌ها شامل 4 مرحله است: 1)گرفتن اطلاعات موردنیاز، 2) تعیین قواعد ماشین‌کاری بین فیچرها برای تعیین توالی ماشین‌کاری، 3) تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها و 4) افزودن عملیات ضروری به فیچرها. دجا و همکاران [9] به یافتن بهینه‌ترین حالت توالی ماشین‌کاری فیچرها با در نظر گرفتن قواعد ماشین‌کاری، ماشین‌ابزار و تابع هدف زمان تولیدی قطعه‌کار پرداخته‌اند. آن‌ها برای نشان دادن قواعد ماشین‌کاری بین فیچرها، ماتریس قواعد ماشین‌کاری فیچرها[2] را معرفی و الگوریتمی را برای پیدا کردن بهینه‌ترین حالت ماشین‌کاری فیچرها ارائه کرده‌اند. سریرامولو و همکاران [10] طرح‌ریزی فرایند را به‌عنوان مسئله بهینه‌سازی با درنظر گرفتن تعدادی قید مدل‌سازی کرده‌اند. سپس از روش بهینه‌سازی تجمع مورچگان به حل آن پرداخته‌اند. آن‌ها الگوریتم فراابتکاری را برای شناسایی سریع بهینه‌ترین توالی ماشین‌کاری فیچرها توسعه داده‌اند. لی‌یو و گیاو [11] از الگوریتم ژنتیک تکرارشونده برای تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها بهره برده‌اند. آن‌ها دو نوع ماتریس برای نشان دادن قواعد ماشین‌کاری حاکم بین فیچرها استفاده کرده‌اند. در روش‌ها آن‌ها، ابتدا همه توالی ماشین‌کاری فیچرها برپایه قواعد ماشین‌کاری فیچرها تعیین می‌شود. سپس از اطلاعات فیچرها مانند ماشین‌ابزار، ستاپ و ابزار برش جهت تعیین بهینه‌ترین توالی ماشین‌کاری فیچرها استفاده می‌شود، همچنین در پژوهش‌های دیگر از الگوریتم ژنتیک [12،14]، منطق فازی [15]، الگوریتم مورچگان [16] و روش‌های بهینه‌سازی ترکیبی [17] برای دستیابی به بهینه‌ترین توالی ماشین‌کاری فیچرها استفاده شده است.

در کل، می‌توان بیان داشت که روش‌های ارائه‌شده برای تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها قابل توسعه نیست. به عبارت دیگر نمی‌توان روش‌های گفته شده را برای طرح‌ریزی ستاپ‌ها و یکپارچه‌سازی طرح‌ریزی ستاپ‌ها با طراحی قیدوبند توسعه داد؛ بنابراین نیاز به روشی است که علاوه‌بر سادگی، قابل توسعه نیز باشد و بتوان آن روش را برای طرح‌ریزی ستاپ‌ها نیز توسعه داد، همچنین در پژوهش‌های دسته نخست، روش شناسایی قواعد ماشین‌کاری بیان نشده و در برخی موارد که فیچرها چندجهته است، از یک قاعده ماشین‌کاری هندسی می‌توان نتایج متفاوتی به‌دست آورد؛ بنابراین نیاز به قواعدی است که هم نتایج واحدی از آن‌ها استنباط شود و هم بتوان به آسانی آن‌ها را توسط سامانه‌های رایانه‌ای شناسایی کرد.

در این مقاله قواعد ماشین‌کاری هندسی و تکنیکی مطالعه و قواعد ماشین‌کاری هندسی جدیدی برای تداخل‌های هندسی بیان می‌شود تا علاوه‌بر گرفتن نتایج واحد، بتوان به آسانی و به‌صورت خودکار آن‌ها را توسط سامانه‌های رایانه‌ای شناسایی کرد، همچنین مغایرتی بین قواعد ماشین‌کاری تکنیکی و هندسی بیان می‌شود که ممکن است در برخی موارد بین قواعد ماشین‌کاری رخ دهد. روشی بر پایه جایگشت برای تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها معرفی می‌شود که علاوه‌بر سادگی قابل توسعه نیز باشد. در این روش مغایرت یادشده به‌طور خودکار شناسایی و رفع می‌شود. در بخش 2 طرح کلی از سامانه طرح‌ریزی فرایند بیان می‌شود. در بخش 3 اطلاعات فیچرهای ماشین‌کاری و روش شناسایی به‌کار گرفته شده معرفی می‌شود. در بخش 4 روی قواعد تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها بحث می‌شود که موضوع اصلی در این بخش، قواعد ماشین‌کاری هندسی است. روش تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها در بخش 5 آورده شده است. در بخش 6، روش تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها روی یک قطعه‌کار آزمایش شده است. در نهایت نتایج حاصل از پژوهش در بخش 7 آورده شده است.

2- طرح کلی از سامانه طرح‌ریزی فرایند

برای ایجاد سامانه‌های یکپارچه تولیدی[3]، ابتدا اطلاعات طراحی قطعه‌کار به اطلاعات تولیدی تبدیل می‌شوند. سپس براساس اطلاعات تولیدی، طرح فرایند مناسبی برای قطعه‌کار تنظیم می‌شود. در شکل 1 روند کلی سامانه از مرحله طراحی تا طرح‌ریزی فرایند نشان داده شده است. در این شکل، ابتدا قطعه‌کار در سامانه‌های طراحی به کمک رایانه مدل‌سازی و در فایل خنثی مانند اِستپ[4] ذخیره می‌شود. سپس فایل خنثی به همراه دیگر

1- Alternating Sum of Volumes with Partitioning
2- Feature Precedence Matrix (FPM)
3- CIM
4- STEP

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.10.27.1]

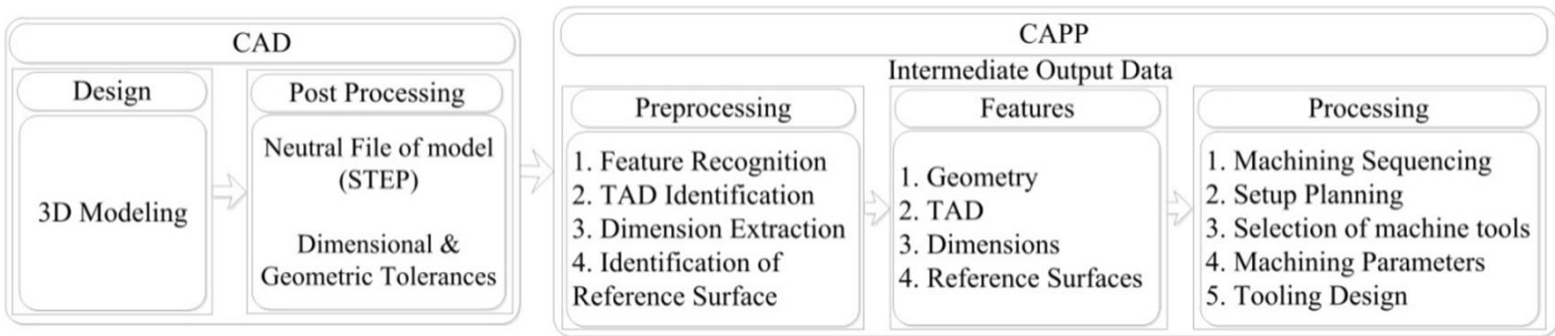


Fig.1 The workflow of an integrated CAD-CAPP system

شکل 1 روند کلی سامانه از یکپارچه‌سازی طراحی تا طرح‌ریزی فرایند

اطلاعات طراحی مانند تلرانس‌ها که فایل‌های خنثی آن‌ها را پشتیانی نمی‌کنند به سامانه طرح‌ریزی فرایند به کمک رایانه ارسال می‌شود. در بخش پیش‌پردازش، اطلاعات طراحی (ورودی سامانه‌های طرح‌ریزی فرایند به کمک رایانه) به اطلاعات تولیدی تبدیل می‌شوند. حاصل این پیش‌پردازش، اطلاعات خروجی میانی مانند اطلاعات توپولوژی، جهت ابزار، تلرانس‌ها و سطوح مرجع هر یک از فیچرهاست. این اطلاعات خروجی میانی به قسمت پردازش ارسال شده تا تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها، طرح‌ریزی ستاپ‌ها، انتخاب ماشین‌ابزار، پارامترهای ماشین‌کاری و... انجام شود.

3- فیچرهای ماشین‌کاری

فیچرهای ماشین‌کاری از تبدیل اطلاعات هندسی تعریف‌شده توسط سامانه‌های طراحی به کمک رایانه (داده‌های سطح پایین مانند سطوح، لبه و...)، به اطلاعات تولیدی مورد نیاز در طرح‌ریزی فرایند و تولید به کمک رایانه (داده‌های سطح بالا مانند شیار، سوراخ و ...) حاصل می‌شوند [19,18]. هر فیچر از مجموعه‌ای از سطوح، لبه‌ها و رأس‌ها تشکیل شده است. برای هر فیچر می‌توان حجم ماشین‌کاری تعریف کرد. هر فیچر با توجه به نوعش، تعداد معینی سطح دارد که در این مقاله به این تعداد سطوح، «تعداد سطوح تشکیل‌دهنده فیچر» گفته می‌شود. ده نوع فیچر ماشین‌کاری به همراه جهت ابزارشان در جدول 1 نشان داده شده است. در این مقاله برای شناسایی فیچرهای ماشین‌کاری از روش گراف- مبنا استفاده شده است [20]. قابل توجه است که در این مقاله سطح استوانه به‌صورت دو نیم استوانه در نظر گرفته شده است.

4- قواعد ماشین‌کاری جهت تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها

برای آن‌که توالی ماشین‌کاری فیچرها به‌درستی تعیین شود، باید قواعد ماشین‌کاری بین فیچرها رعایت شود. همان‌طوری که بیان شد، قواعد ماشین‌کاری به دو نوع تکنیکی و هندسی تقسیم می‌شوند. رعایت قواعد ماشین‌کاری برای تولید محصول مطابق با نیازمندی‌های طراحی ضروری است.

4-1- قواعد ماشین‌کاری تکنیکی

تداخل‌های تکنیکی که بین فیچرها وجود دارد، سبب به‌وجودآمدن قواعد ماشین‌کاری تکنیکی می‌شوند. رعایت این نوع قواعد ماشین‌کاری ضروری است. در زیر برخی از این قواعد آورده شده است.

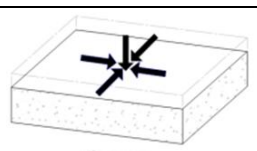
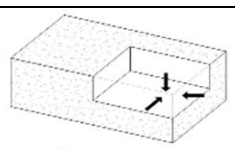
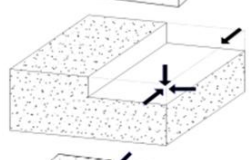
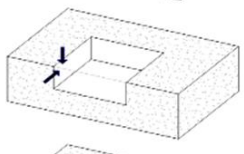
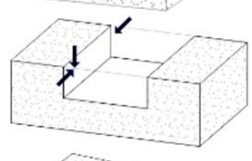
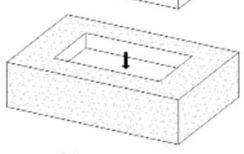
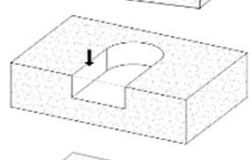
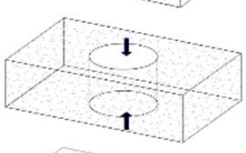
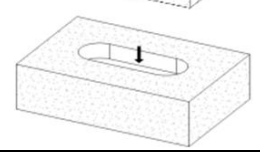
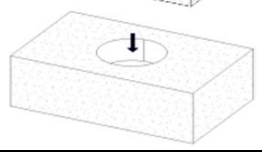
اگر سطوح تکیه‌گاه یا بست مورد نیاز برای ماشین‌کاری فیچر 1، با ماشین‌کاری فیچر 2 از بین برود؛ در این حالت فیچر 1 باید زودتر از فیچر 2 ماشین‌کاری شود [4].

اگر سطح مورد نیاز برای موقعیت‌دهی ابزار ماشین‌کاری فیچر 1 با ماشین‌کاری فیچر 2 از بین برود؛ در این حالت فیچر 1 باید زودتر از فیچر 2 ماشین‌کاری شود [21].

اگر سطوحی از فیچر 1، جزء سطوح مرجع فیچر 2 باشد؛ در این حالت فیچر 1 زودتر از فیچر 2 ماشین‌کاری می‌شود [22].

جدول 1 فیچرهای ماشین‌کاری

Table 1 Machining features

نوع فیچر	تعداد سطوح تشکیل‌دهنده فیچر	شکل فیچر	نوع فیچر	تعداد سطوح تشکیل‌دهنده فیچر	شکل فیچر
روتراشی	1		پاکت 2- طرفه	3	
پله	2		پاکت 3- طرفه	4	
شیار سرتاسری	3		پاکت 4- طرفه	5	
شیار نیمه‌کور	4		سوراخ سرتاسری	2	
شیار کور	5		سوراخ کور	3	

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.10.27.1]

4-2- قواعد ماشین‌کاری هندسی

تداخل‌های هندسی وقتی ایجاد می‌شوند که فیچرها در یک سری از مشخصات توپولوژی با یکدیگر مشترک باشند. در این حالت رعایت قواعد ماشین‌کاری هندسی برای خروج راحت‌تر براده و کاهش برش هوایی لازم است. تداخل‌های هندسی به دو دسته تقسیم می‌شوند: تداخل‌های سطحی و تداخل‌های حجمی. در تداخل‌های سطحی، دو فیچر تنها در سطح ماشین‌کاری اشتراک دارند، ولی در تداخل‌های حجمی، دو فیچر حجم ماشین‌کاری را به اشتراک می‌گذارند [4]. در شکل 2 تداخل‌های سطحی و تداخل حجمی نشان داده شده است.

در تداخل‌های سطحی، فیچر پایه فیچری است که همه لبه‌های مشترک در یک سطح آن قرار دارد. برای نمونه در شکل2- الف و شکل 2-ب فیچر پایه به‌ترتیب، فیچرهای شیار سرتاسری و پاکت چهار- طرفه است. در این حالت که فیچرها تداخل سطحی دارند، بهتر است قاعده ماشین‌کاری هندسی یک رعایت شود.

قاعده ماشین‌کاری هندسی یک: اگر فیچر F_1 و F_2 تداخل هندسی سطحی داشته باشند و F_1 فیچر پایه باشد؛ بنابراین باید فیچر F_1 زودتر از فیچر F_2 ماشین‌کاری شود.

در شکل 3- الف فیچرهای پاکت سه- طرفه و پله با هم تداخل حجمی دارند. اگر نخست پاکت سه- طرفه ماشین‌کاری شود هنگام ماشین‌کاری پله، دو حالت رخ می‌دهد: 1) اگر مسیر ابزار برای ماشین‌کاری پله به شکل 3- ب درنظر گرفته شود، برش هوایی رخ می‌دهد (مسیر سیاه رنگ). 2) اگر برای اجتناب از برش هوایی مسیر ابزار به شکل 3- ج باشد، در این صورت به دلیل فاصله‌ای که بین سطح پله ایجاد شده است (سطوح هاشورخورده)، ابزار پس از جدا شدن از سطح یک تا رسیدن به سطح دو مسیر بیشتری را طی می‌کند؛ بنابراین موقعیت سطح دوم نسبت به سطح نخست با خطای ماشین‌کاری بیشتری ماشین‌کاری می‌شود؛ به‌طوری که دیگر نمی‌توان گفت که سطح یک و دو در یک راستاست، ولی با ماشین‌کاری پله در مرحله اول و سپس پاکت سه- طرفه، هیچ یک از این مشکلات پدید نمی‌آید. پس در این حالت بهتر است پله پیش از پاکت سه- طرفه ماشین‌کاری شود.

برای تشخیص حق تقدم بین فیچرهای تداخلی حجمی، از تعداد سطوح تشکیل دهنده فیچر استفاده می‌شود. زمانی که تعداد سطوح یک فیچر بیشتر از تعداد سطوح تشکیل‌دهنده آن باشد، به این معناست که فاصله‌ای بین یکی از سطوح آن فیچر ایجاد شده است. تعداد سطوح تشکیل‌دهنده فیچر پله و پاکت سه- طرفه به‌ترتیب دو و سه سطح است. درحالی که در شکل 3- الف تعداد سطوح فیچر پله و پاکت سه- طرفه به ترتیب سه و سه سطح است، که تداخل حجمی سبب افزایش تعداد سطوح پله شده است. با توجه به دلایل گفته شده ابتدا باید فیچر پله ماشین‌کاری شود که تعداد سطح آن به دلیل تداخل حجمی افزایش یافته بود.

قاعده ماشین‌کاری هندسی 2: اگر فیچر F_1 و F_2 تداخل حجمی داشته باشند و تعداد سطوح فیچر F_1 بیشتر از تعداد سطوح تشکیل‌دهنده آن فیچر باشد؛ بنابراین باید فیچر F_1 زودتر از فیچر F_2 ماشین‌کاری شود.

قواعد ماشین‌کاری موجود در یک قطعه‌کار در ماتریس قواعد ماشین‌کاری فیچرها (FMP) خلاصه می‌شود [9]. تعداد ستون‌های این ماتریس برابر با تعداد فیچرهای ماشین‌کاری قطعه‌کار است. تعداد سطرهای آن براساس قواعد ماشین‌کاری تنظیم می‌شود. اعداد ستون j متعلق به فیچر F_j است ($j = 1, \dots, n$ و n تعداد فیچرها است). اعداد این ماتریس می‌تواند 0، 1− و شماره فیچرها (1 تا n) باشد. عدد 0 در سطر اول ستون j بدین معناست که فیچر F_j آماده ماشین‌کاری است. عدد 1− هنگامی که در سطر اول قرار می‌گیرد به این معناست که فیچر F_j ماشین‌کاری شده است و در سطرهای پایین معنای خاصی ندارد و برای پرشدن ماتریس به‌کار رفته است. اعداد موجود در ستون j نشان می‌دهند که برای ماشین‌کاری فیچر F_j، باید فیچرهای F_i زودتر ماشین‌کاری شوند که i اعداد مربوط به ستون j است. دقت شود که در این مقاله دو ماتریس یکی برای نمایش قواعد ماشین‌کاری تکنیکی و دیگری برای نمایش قواعد ماشین‌کاری هندسی موجود بین فیچرها استفاده شده است که در بخش 4-4 دلیل این کار بیان خواهد شد. برای نمونه در ماتریس رابطه (1)، عدد ستون یک، 0؛ یعنی فیچر F_1 اکنون آماده ماشین‌کاری و عدد ستون پنج، 1−؛ یعنی فیچر F_5 ماشین‌کاری شده و اعداد ستون دو، 1، 3 و 4 است؛ یعنی برای ماشین‌کاری فیچر F_2 ابتدا باید فیچرهای F_1، F_3 و F_4 ماشین‌کاری شوند.

$$\mathrm{FPM} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & -1 \\ -1 & 3 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 4 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

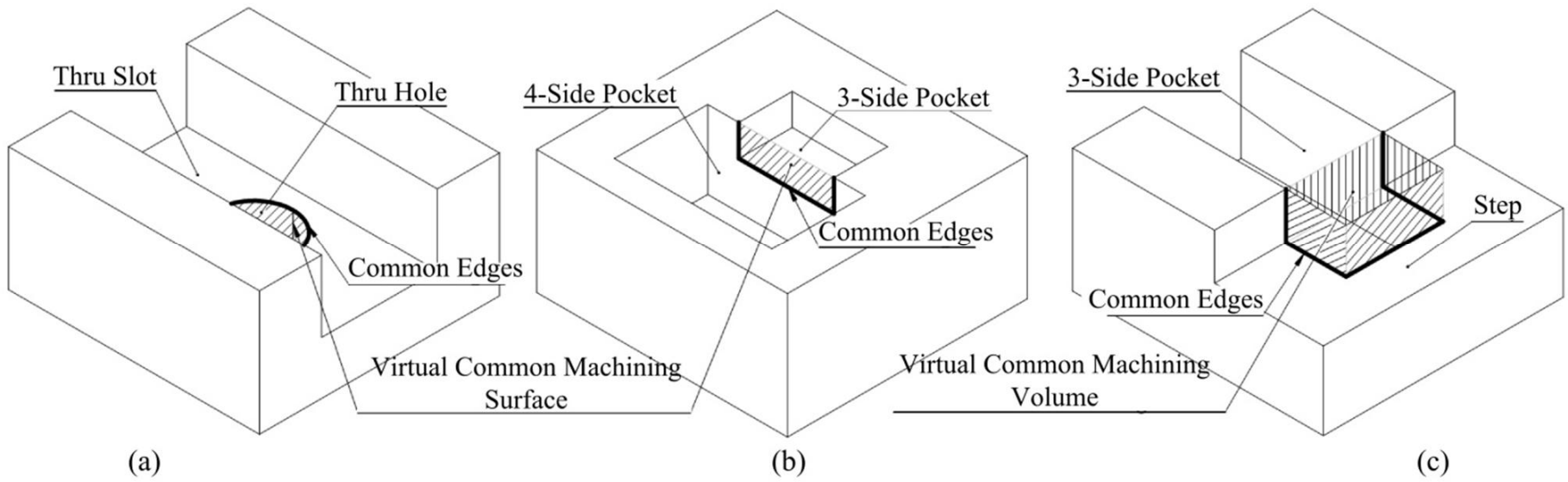


Fig. 2 Geometrical interaction (a) surface interaction between slot and hole (b) surface interaction between two pockets (c) volumetric interaction between pocket and step

شکل 2 تداخل‌های هندسی الف- تداخل سطحی بین شیار و سوراخ ب- تداخل سطحی بین دو پاکت ج- تداخل حجمی بین پاکت و پله

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.10.27.1]

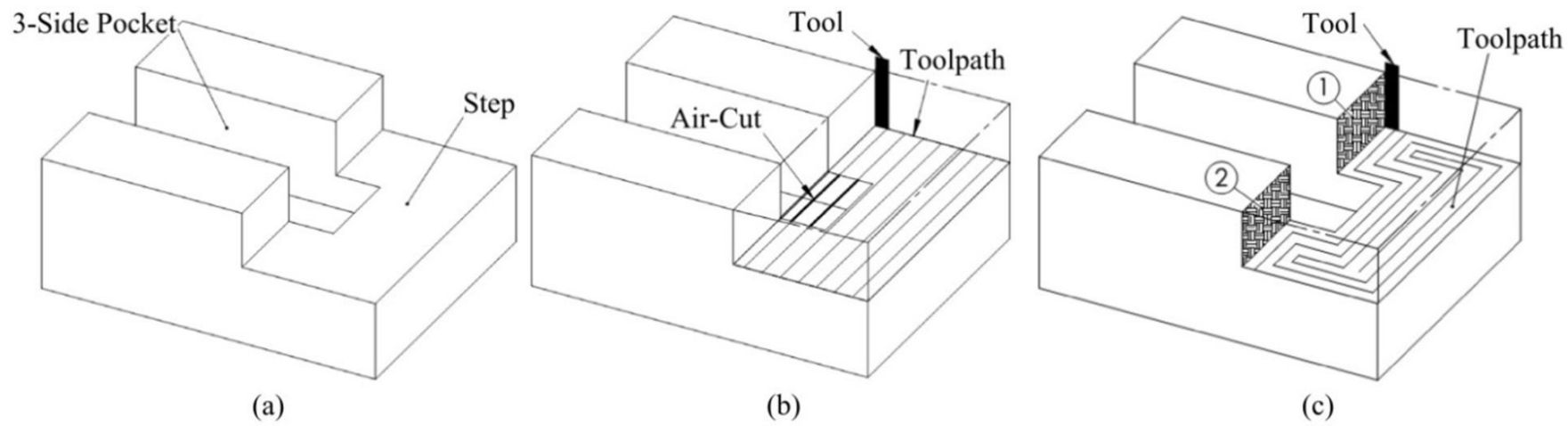


Fig. 3 Volumetric interaction (a) machined features (b) air cut (c) increase of error in alignment between surfaces 1 and 2

شکل 3 تداخل حجمی الف- فیچرهای ماشین‌کاری ب- ایجاد برش هوایی ج- افزایش خطای ماشین‌کاری در سطح 1 و 2

4-3- شناسایی خودکار قواعد ماشین‌کاری هندسی

در این بخش الگوریتمی برای شناسایی خودکار قواعد ماشین‌کاری هندسی بیان شده در بخش 4-2 معرفی می‌شود. نتایج حاصل از قواعد ماشین‌کاری تکنیکی نیز توسط کاربر وارد برنامه می‌شود.

در شکل 4 هر دو نوع تداخل حجمی و سطحی نشان داده شده است. وجه اشتراک بین دو فیچر تداخلی هندسی در این است که آن‌ها لبه‌های مشترک دارند (خطوط پر رنگ در شکل 4). همان‌طور که گفته شد در تداخل‌های هندسی از نوع سطحی، وجه اشتراک بین فیچرها یک سطح ماشین‌کاری است؛ بنابراین انتظار می‌رود که همه لبه‌های مشترک این نوع تداخل، در یک سطح قرار داشته باشند. در شکل 4- الف) تداخل سطحی و لبه‌های مشترک نشان داده شده است. همه لبه‌های مشترک در سطح هاشور خورده قرار دارند. فیچری که سطح هاشورخورده را دارد همان فیچر پایه است که باید اول ماشین‌کاری شود. برای نمونه در شکل 4- الف) سطح هاشورخورده متعلق به فیچر F_1 است؛ بنابراین F_1 فیچر پایه است و طبق قاعده ماشین‌کاری هندسی 1، فیچر F_1 زودتر از فیچر F_2 ماشین‌کاری می‌شود.

همان‌طور که گفته شد تداخل حجمی زمانی رخ می‌دهد که دو فیچر حجم ماشین‌کاری را به اشتراک گذاشته باشند. پس در این حالت همه لبه‌های مشترک دو فیچر در یک صفحه قرار ندارند (شکل 4- ب)؛ بنابراین می‌توان گفت که اگر دو فیچر لبه‌های مشترک داشته باشند تداخل هندسی دارند. تداخل هندسی از نوع تداخل سطحی است اگر همه لبه‌های مشترک در یک سطح باشند در غیر این صورت تداخل هندسی از نوع حجمی است. در تداخل هندسی حجمی، فیچری اول ماشین‌کاری می‌شود که تعداد سطوح کنونی آن بیشتر از تعداد سطوح تشکیل دهنده باشد. برای نمونه در شکل 4- ب تعداد سطوح فیچر پله (F_1) بیشتر از تعداد سطوح استاندارد پله است؛ بنابراین براساس قاعده ماشین‌کاری هندسی 2، فیچر F_1 زودتر از فیچر F_2 ماشین‌کاری می‌شود.

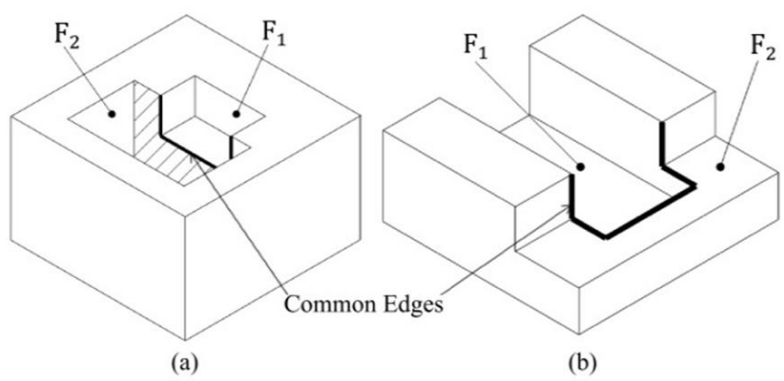


Fig. 4 The common edges in geometrical interactions (a) surface interaction (b) volumetric interaction

شکل 4 لبه‌های مشترک در تداخل‌های هندسی الف- تداخل سطحی ب- تداخل حجمی

با توجه به مطالب بالا، الگوریتم پیشنهادی برای شناسایی خودکار قواعد هندسی به صورت زیر است.

1. آغاز.
2. دریافت فیچرها و اطلاعات توپولوژی آن‌ها
3. ایجاد ماتریس FPM را با ستونی برابر با تعداد فیچرها و سطر قابل تغییر
4. شناسایی و ذخیره دو فیچر F_i و F_j که لبه‌های مشترک دارند.
5. اگر لبه‌های مشترک فیچرهای F_i و F_j در یک سطح باشند تداخل از نوع سطحی است، آن‌گاه گام برداشتن برای مرحله 7
6. اگر لبه‌های مشترک فیچرهای F_i و F_j در یک سطح نباشند تداخل از نوع حجمی است، آن‌گاه گام برداشتن برای مرحله 8
7. انجام مراحل 7- الف تا 7- ج (تداخل سطحی).

الف. پیدا کردن سطحی که همه لبه‌های مشترک را دارد.

ب. پیدا کردن فیچری که سطح لبه‌های مشترک دارد و ذخیره این فیچر به‌عنوان فیچر. برای نمونه فرض می‌شود که F_i فیچر پایه است.

ج. اضافه کردن F_i به ستون j در ماتریس FPM

8. انجام مراحل 8-الف تا 8-ج (تداخل حجمی)

الف. مقایسه تعداد سطوح تشکیل دهنده هر یک از فیچرها با تعداد سطوح کنونی فیچرها

ب. ذخیره فیچری که تعداد سطح بیشتری نسبت به تعداد سطوح تشکیل‌دهنده خود دارد. برای نمونه فرض می‌شود که فیچر F_i تعداد سطوح بیشتری دارد.

ج. اضافه کردن F_i به ستون j در ماتریس FPM

9. گام برداشتن به مرحله 1، چنان‌چه فیچرهای تداخلی تمام نشده باشد
10. قرار دادن عدد صفر به سطر اول ستون‌هایی از ماتریس FPM که عددی(شماره فیچر) به آن‌ها نسبت داده نشده است.
11. تکمیل کردن باقی درایه‌های خالی ماتریس با عدد 1-
12. پایان

4-4- مغایرت بین قواعد تکنیکی و هندسی

در برخی موارد مغایرتی بین قواعد تکنیکی و هندسی قطعه‌کار به وجود می‌آید. در شکل 5 نمونه‌ای از این نوع مغایرت نشان داده شده است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.10.27.1]

براساس قواعد ماشین‌کاری تکنیکی تداخل ابزار (بخش 4-1)، فیچر F_1 باید زودتر از فیچر F_2 ماشین‌کاری شود. درحالی‌که براساس قاعده ماشین‌کاری هندسی 1، فیچر F_2 باید زودتر از فیچر F_1 ماشین‌کاری شود. در این‌گونه موارد باید قاعده هندسی نادیده گرفته شود؛ به دلیل این‌که قاعده هندسی جهت خروج راحت‌تر براده و کاهش برش هوایی است. درحالی‌که رعایت نکردن قواعد ماشین‌کاری تکنیکی، احتمال معیوب شدن قطعه‌کار یا آسیب رساندن به تجهیزات را به همراه دارند.

با توجه به مطالب بالا، رعایت قواعد ماشین‌کاری هندسی لازم است، ولی ضروری نیست. پس باید در روش تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها این موضوع در نظر گرفته شود و تا جایی که امکان دارد قواعد ماشین‌کاری هندسی رعایت شود و درصورت وجود مغایرت بین قواعد هندسی و تکنیکی از رعایت قواعد ماشین‌کاری هندسی اجتناب شود. دلیل استفاده از ماتریس‌های FPM جداگانه برای نمایش قواعد ماشین‌کاری هندسی و تکنیکی نیز همین امر است تا بتوان در مواقع لازم از قواعد ماشین‌کاری هندسی عدول کرد.

4-5- توالی ماشین‌کاری فیچرهای بدون تداخل

برای تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرهایی که تداخل‌های هندسی یا تکنیکی ندارند، از قواعد ماشین‌کاری دیگری استفاده می‌شود که رعایت آن‌ها سبب تولید محصول با کیفیت بهتر و زمان تولیدی کم می‌شود. یکی از قواعدی که بین فیچرهای بدون تداخل رعایت می‌شود این است که فیچر با حجم ماشین‌کاری بیشتر، زودتر ماشین‌کاری شود؛ زیرا حجم ماشین‌کاری بیشتر نیروی برشی و حرارتی بیشتری ایجاد کرده و سبب تغییر شکل بیشتر و صافی سطح پایین قطعه‌کار می‌شود [6].

قاعده دیگری که بین فیچرهای بدون تداخل در نظر گرفته می‌شود این است که فیچرهای دارای ابزار برش مشترک، کنار یکدیگر قرار داده می‌شوند تا تعداد تعویض ابزار برش کاهش یابد. در این مقاله به دلیل این‌که ابزار برش درنظر گرفته نشده است، این قاعده هنگام تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها درنظر گرفته نمی‌شود [6].

5- تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها بر پایه جایگشت

توالی ماشین‌کاری فیچرها براساس قواعد ماشین‌کاری تعیین می‌شود. هدف از این مرحله، تعیین بهینه‌ترین توالی ماشین‌کاری فیچرهاست؛ به‌طوری‌که در این توالی تمام قواعد ماشین‌کاری رعایت شود. تعیین توالی

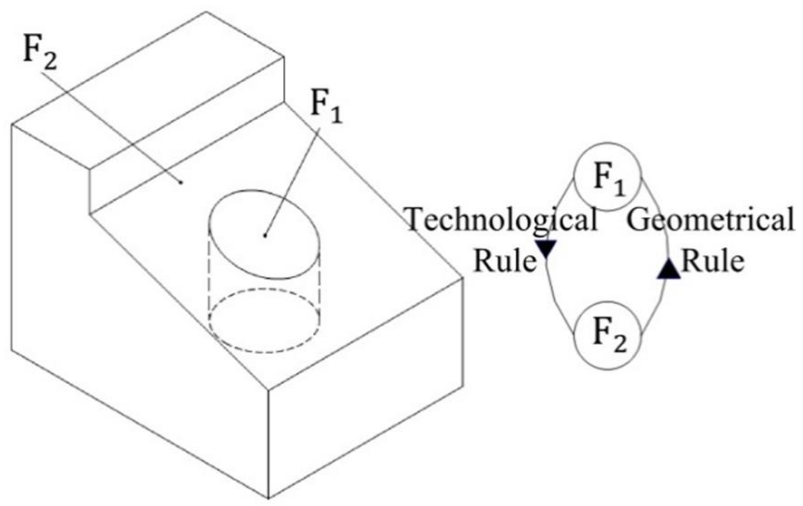


Fig. 5 An example of the conflict between the technological and geometrical rules

شکل 5 نمونه‌ایی از مغایرت بین قواعد ماشین‌کاری تکنیکی و هندسی

ماشین‌کاری فیچرها، مشابه مسائل جایگشت است که در آن حالت‌هایی تعیین می‌شود که فیچرها بدون تکرار کنار هم قرار گرفته و در آن‌ها قواعد ماشین‌کاری رعایت شده باشند.

تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها براساس روش جایگشت این گونه است که توالی ماشین‌کاری فیچرها مرحله به مرحله تعیین و در هر مرحله قواعد ماشین‌کاری اعمال می‌شوند. در شکل 6- ب شیوه کار این روش برای تعیین توالی ماشین‌کاری پنج فیچر فرض شده، نشان داده شده است. اطلاعات تولیدی پنج فیچر در شکل 6- الف آورده شده است. در هر مرحله، ابتدا فیچرهایی که نیاز به ماشین‌کاری دارند تعیین می‌شوند. سپس بین این فیچرها قواعد ماشین‌کاری تکنیکی (FPM_{TR}) اعمال می‌شوند تا فیچرهایی در گام بعدی مورد بررسی قرار گیرند که از نظر قواعد ماشین‌کاری تکنیکی، آماده ماشین‌کاری است. سپس بین فیچرهای آماده از نظر قواعد ماشین‌کاری تکنیکی، قواعد ماشین‌کاری هندسی (FPM_{GR}) اعمال می‌شود. در صورت وجود مغایرت بین قواعد ماشین‌کاری تکنیکی و هندسی، قواعد هندسی به‌طور خودکار نادیده گرفته می‌شوند؛ زیرا قواعد ماشین‌کاری هندسی بین فیچرهایی اعمال می‌شود که از نظر قواعد ماشین‌کاری تکنیکی آماده ماشین‌کاری هستند. درنهایت بین فیچرهایی که از نظر قواعد ماشین‌کاری تکنیکی و هندسی آماده ماشین‌کاری هستند، فیچری که بیشترین حجم ماشین‌کاری را دارد، در مرحله m در توالی ماشین‌کاری فیچرها قرار می‌گیرد. برای نمونه در مرحله نخست هر 5 فیچر نیاز به ماشین‌کاری دارند. در گام نخست براساس ماتریس FPM_{TR}، فیچرهای F_2، F_3، F_4 و F_5 آماده ماشین‌کاری است. پس از اعمال قواعد هندسی (مطابق ماتریس FPM_{GR}) بین این فیچرها، تنها فیچر F_2 باقی می‌ماند؛ بنابراین فیچر F_2 در مرحله 1 ماشین‌کاری می‌شود. سپس ماتریس‌های FPM به‌روزرسانی شده (چون فیچر F_2 ماشین‌کاری شده و باید این موضوع در ماتریس‌ها لحاظ شود) و مرحله دوم مانند مرحله اول روی فیچرهای باقی‌مانده اجرا می‌شود. در مرحله آخر توالی ماشین‌کاری فیچرها تعیین می‌شود.

درصورتی‌که در هر مرحله، قاعده ماشین‌کاری فیچر با حجم بیشتر بین فیچرها اعمال شود، فقط یک حالت برای توالی ماشین‌کاری به‌دست می‌آید. برای تعیین همه حالت‌های توالی ماشین‌کاری، ابتدا باید شرط اعمال حجم ماشین‌کاری حذف شده و در هر مرحله که پس از اعمال قواعد ماشین‌کاری تکنیکی و هندسی چند فیچر باقی می‌ماند، یکی را انتخاب کرده و تا مرحله آخر پیش رفت. سپس به این مرحله بازگشته و فیچر آماده دیگر را انتخاب و دوباره تا مرحله آخر، تعیین توالی را ادامه داد. همان‌طور که یاد شد در این روش، در صورت وجود مغایرت بین قواعد هندسی و تکنیکی، این مغایرت به‌طور خودکار شناسایی و از قواعد ماشین‌کاری هندسی عدول می‌شود.

با توجه به مطالب بالا، الگوریتم تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها بر پایه روش جایگشت بدین‌صورت است.

1. آغاز
2. دریافت اطلاعات فیچرها، قواعد ماشین‌کاری تکنیکی، قواعد ماشین‌کاری هندسی، حجم ماشین‌کاری فیچرها
3. $i \leftarrow 1$ (i نشان‌دهنده مرحله ماشین‌کاری)
4. ذخیره در X فیچرهایی که نیاز به ماشین‌کاری دارند
5. اگر $X=\phi$ آن‌گاه پایان

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.10.27.1]

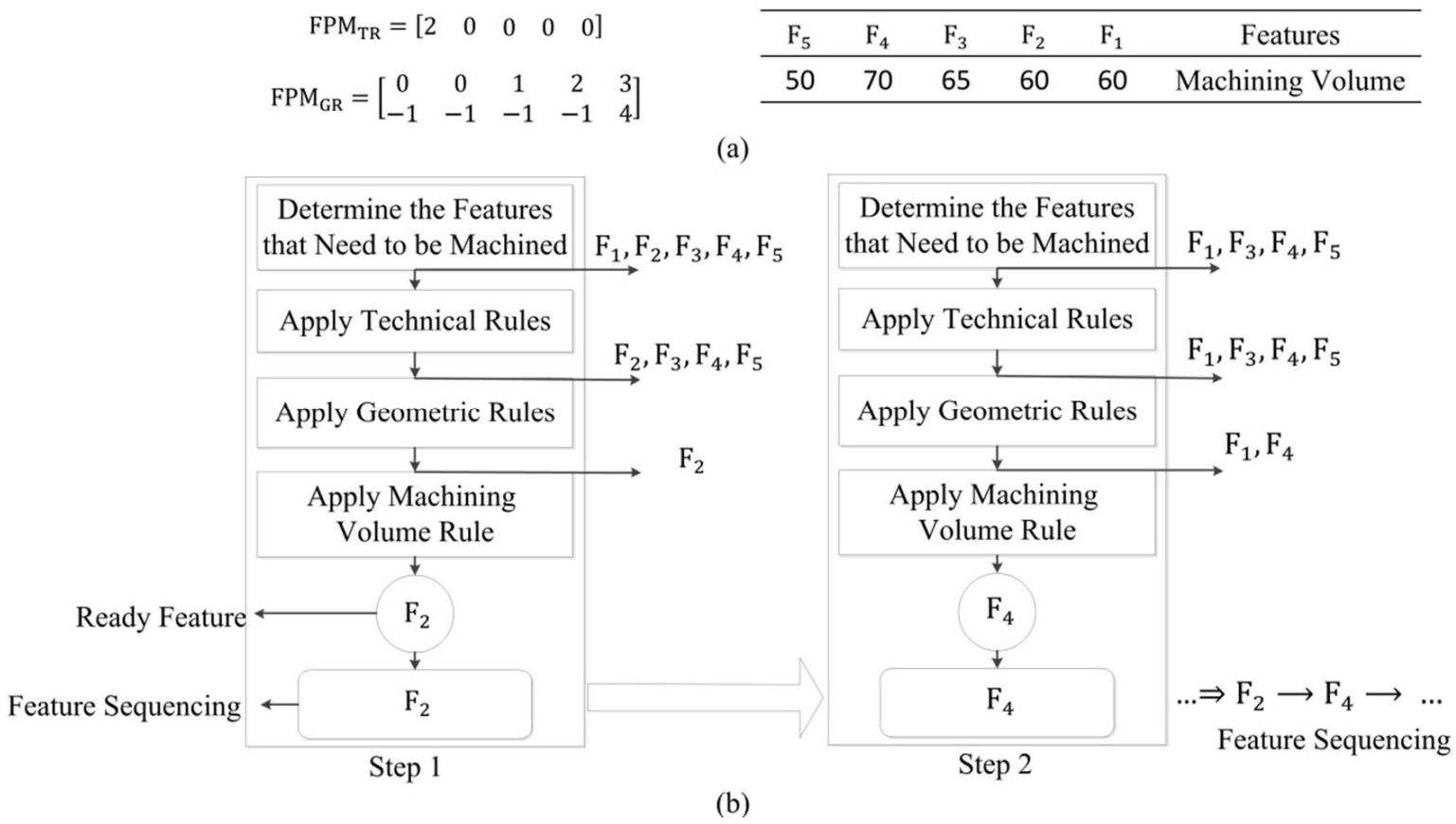


Fig.6 Determining of machining sequence (a) Manufacturing information (b) Permutation method for sequencing of machining features

شکل 6 تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها الف- اطلاعات تولیدی فیچرها ب- تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها براساس روش جایگشت

6. اعمال قواعد ماشین‌کاری تکنیکی روی اعضای X کن و ذخیره فیچرهایی از X که طبق این قواعد آماده ماشین‌کاری در Y هستند
7. اعمال قواعد ماشین‌کاری هندسی را اعضای Y و ذخیره فیچرهایی از Y که طبق این قواعد آماده ماشین‌کاری در Z هستند
8. ذخیره فیچری در F که بیشترین حجم ماشین‌کاری را بین اعضای Z دارد
9. ماشین‌کاری F در مرحله i
10. نمایش فیچر F و i
11. $i \leftarrow i + 1$
12. گام به مرحله 4
13. پایان

از این روش می‌توان توالی ماشین‌کاری فیچرهای قطعات غیرمنشوری را نیز تعیین کرد، همچنین تنها حجم و قواعد ماشین‌کاری فیچرها مورد نیاز است؛ بنابراین در صورتی می‌توان از این روش برای تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرهای استفاده کرد که بتوان فیچرهای قطعات غیرمنشوری و اطلاعات تولیدی آن را به‌طور خودکار شناسایی کرد.

6- آزمایش مدل

الگوریتم تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها در محیط برنامه‌نویسی پایتون اوسی‌سی مدل‌سازی شده است. برای آزمایش الگوریتم پیشنهادی برای تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها، از قطعه‌کار شکل 7 استفاده شده، همچنین شماره فیچرها نیز آورده شده است. برای این قطعه‌کار فرض شده است که فیچرهای روتراشی F_{15}، F_{16}، F_{18} و F_{19} نیازی به ماشین‌کاری ندارند.

این مدل، سه قاعده ماشین‌کاری تکنیکی زیر را داراست. نتایج حاصل از قواعد تکنیکی که توالی ماشین‌کاری بین فیچرهای تداخلی را نشان می‌دهد، در ماتریس FPM خلاصه شده است. ماتریس FPM این قواعد در شکل 8- الف آورده شده است.

1. فیچر روتراشی F_{14} زودتر از فیچر F_{17} باید ماشین‌کاری شود، چرا که سطح فیچر روتراشی F_{14} سطح مرجع فیچر F_{17} است.
2. چون قطر سوراخ بزرگ و ضخامت قطعه‌کار در ناحیه سوراخ کم است، پس احتمال خم‌شدگی هنگام سوراخ‌کاری وجود دارد؛ بنابراین فیچر سوراخ F_{13} پیش از شیار F_3 ماشین‌کاری می‌شود.
3. جهت سهولت در طراحی قیدوبند، فیچرهای پله F_1 ، F_2 پس از فیچر شیار F_3 زده می‌شود تا بست فیچر شیار سبب خم‌شدن قطعه‌کار در نواحی پله نشود.

ماتریس FPM قواعد ماشین‌کاری هندسی در شکل 8- ب آورده شده که از الگوریتم قواعد ماشین‌کاری هندسی بیان شده در بخش 4-3 به‌دست آمده است. مغایرتی بین قواعد ماشین‌کاری تکنیکی و هندسی بین دو فیچر شیار سرتاسری F_3 و سوراخ سرتاسری بزرگ F_{13} وجود دارد. براساس قاعده ماشین‌کاری تکنیکی 2 یادشده در بالا، فیچر F_{13} پیش از فیچر F_3 باید ماشین‌کاری شود. این در حالی است که مطابق قاعده ماشین‌کاری هندسی 1 بیان‌شده در بخش 4-2، فیچر F_{13} باید پس از فیچر F_3 ماشین‌کاری شود. در این هنگام باید قواعد ماشین‌کاری تکنیکی اعمال و از قواعد ماشین‌کاری هندسی عدول کرد. این مغایرت در الگوریتم پیشنهادی برای تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها، به‌طور خودکار شناسایی و از قواعد هندسی عدول می‌شود. شناسایی و حل مغایرت جزء ویژگی روش پیشنهادی است و بدون هیچ‌گونه الگوریتم جانبی انجام می‌شود.

توالی ماشین‌کاری فیچرها در شکل 9 آورده شده و این توالی از روش پیشنهادی حاصل شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این توالی، فیچر F_{13} پیش از فیچر F_3 ماشین‌کاری می‌شود. به عبارت دیگر قاعده ماشین‌کاری تکنیکی 2 اعمال و از قاعده ماشین‌کاری هندسی موجود بین فیچر F_{13} و F_3 عدول شده است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.10.27.1]

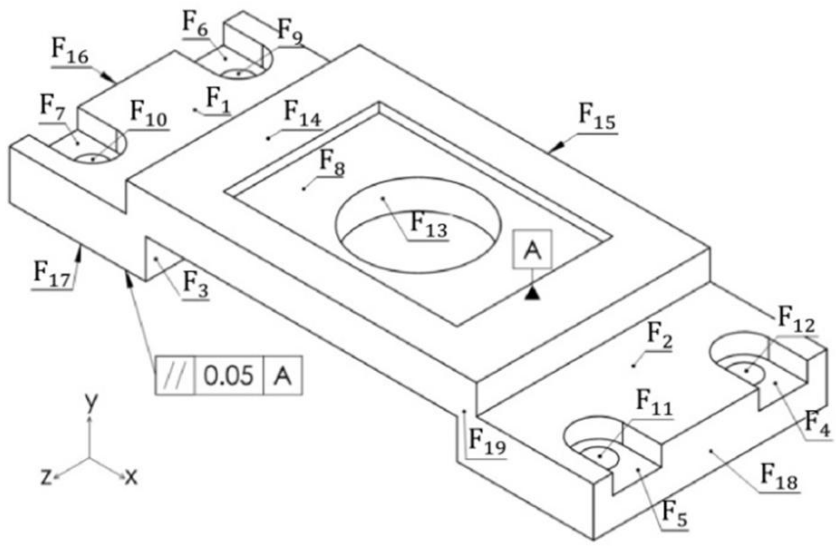


Fig. 7 A work-piece for testing the procedure

شکل 7 قطعه‌کار آزمایش‌شده

7- نتیجه‌گیری

تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها یکی از وظایف نخستین سامانه‌های طرح‌ریزی فرایند است که براساس قواعد ماشین‌کاری و بهینه‌بودن تعیین می‌شود. قواعد ماشین‌کاری به دو دسته تکنیکی و هندسی تقسیم می‌شوند که در این مقاله قواعد ماشین‌کاری هندسی مورد مطالعه قرار گرفت و دو قاعده جدید برای تداخل‌های هندسی بیان شد. این قواعد جدید براساس ویژگی توپولوژی فیچرهای تداخلی بیان شده‌اند؛ به همین دلیل به راحتی می‌توان آن‌ها را خودکار شناسایی کرد، زیرا تمام اطلاعات توپولوژی قطعه‌کار در فایل خنثی قطعه‌کار موجود و قابل فراخوانی است. جهت اثبات قابلیت شناسایی آسان و خودکار قواعد هندسی بیان شده، الگوریتمی برای شناسایی خودکار آن‌ها در سامانه‌های رایانه معرفی و آزمایش شده است. مزیت دیگر قواعد بیان شده نسبت به قواعد هندسی موجود، به‌دست آوردن نتایج واحد از آن‌هاست. این در صورتی است که از برخی قواعد بیان شده در مقالات پیشین، می‌توان نتایج متفاوتی به‌دست آورد، همچنین مغایرتی بین قواعد ماشین‌کاری تکنیکی و هندسی معرفی شد که این مغایرت باید در روش تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها و طرح‌ریزی ستاپ‌ها در نظر گرفته شود.

روشی بر پایه جایگشت برای تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها معرفی شد که در آن قواعد ماشین‌کاری تکنیکی و هندسی به‌طور جداگانه و مرحله به مرحله اعمال می‌شود. این روش در حین سادگی، انعطاف‌پذیر و قابل توسعه است. در این روش مغایرت بین قواعد ماشین‌کاری هندسی و تکنیکی به‌طور خودکار شناسایی می‌شود، زیرا این قواعد جداگانه اعمال می‌گردد. همچنین در صورت وجود مغایرت بیان‌شده، به‌طور خودکار از قواعد ماشین‌کاری هندسی عدول می‌شود، زیرا قواعد ماشین‌کاری هندسی بین فیچرهایی اعمال می‌شود که از نظر قواعد ماشین‌کاری تکنیکی آماده ماشین‌کاری هستند. جهت نشان دادن قابلیت توسعه دادن روش جایگشت بیان‌شده، در پژوهش آتی به توسعه روش بیان‌شده برای طرح‌ریزی ستاپ‌ها پرداخته خواهد شد.

$$\begin{array}{lcccccccccccccccccccc} \text{Features ID} & F_1 & F_2 & F_3 & F_4 & F_5 & F_6 & F_7 & F_8 & F_9 & F_{10} & F_{11} & F_{12} & F_{13} & F_{14} & F_{15} & F_{16} & F_{17} & F_{18} & F_{19} \\ FPM_{TR} = [& 3 & 3 & 13 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 14 & 0 & 0] \end{array}$$

(a)

$$\begin{array}{lcccccccccccccccccccc} \text{Features ID} & F_1 & F_2 & F_3 & F_4 & F_5 & F_6 & F_7 & F_8 & F_9 & F_{10} & F_{11} & F_{12} & F_{13} & F_{14} & F_{15} & F_{16} & F_{17} & F_{18} & F_{19} \\ FPM_{GR} = & 14 & 14 & 15 & 2 & 2 & 1 & 1 & 14 & 6 & 7 & 5 & 4 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 15 & 15 & 17 & 18 & 18 & 16 & 16 & -1 & 17 & 17 & 17 & 17 & 8 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ & 16 & 18 & 19 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ & 19 & 19 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{array}$$

(b)

Fig.8 Feature precedence matrices (a) technological rules (b) geometrical rules

شکل 8 ماتریس قواعد ماشین‌کاری الف- قواعد ماشین‌کاری تکنیکی ب- قواعد ماشین‌کاری هندسی

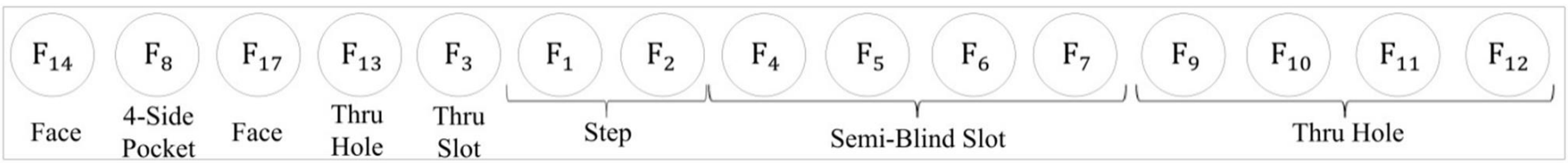


Fig.9 Sequence of machining the features on the basis of the permutation-based procedure

شکل 9 تعیین توالی ماشین‌کاری فیچرها بر پایه روش جایگشت

8- مراجع

[1] N. Xu, S. H. Huang, Y. K. Rong, Automatic setup planning: current state-of-the-art and future perspective, *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, Vol. 11, No. 2, pp. 193-208, 2007.

[2] I. T. Kim, H. W. Suh, Optimal operation grouping and sequencing technique for multistage machining systems, *International Journal of Production Research*, Vol. 36, No. 8, pp. 2061-2081, 1998.

[3] D. N. Sormaz, B. Khoshnevis, Modeling of manufacturing feature interactions for automated process planning, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 19, No. 1, pp. 28-45, 2000.

[4] Z. Liu, L. Wang, Sequencing of interacting prismatic machining features for process planning, *Computers in Industry*, Vol. 58, No. 4, pp. 295-303, 2007.

[5] Y. S. Kim, E. Wang, H. M. Rho, Geometry-based machining precedence reasoning for feature-based process planning, *International Journal of Production Research*, Vol. 39, No. 10, pp. 2077-2103, 2001.

[6] L. Wang, N. Cai, H. Y. Feng, Z. Liu, Enriched machining feature-based reasoning for generic machining process sequencing, *International Journal of Production Research*, Vol. 44, No. 8, pp. 1479-1501, 2006.

[7] J.-S. Hwang, W. A. Miller, Hybrid blackboard model for feature interactions in process planning, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 29, No. 1–4, pp. 613-617, 1995.

[8] J.-S. Hwang, W. Miller, Using mixed-type reasoning in computer-aided process planning for feature interactions, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 8, No. 4, pp. 297-306, 1997. English

[9] M. Deja, M. Siemiatkowski, Feature-based generation of machining process plans for optimised parts manufacture, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 24, No. 4, pp. 831-846, 2013. English

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.10.27.1]

[10] D. Sreeramulu, S. K. Singh, C. S. P. Rao, Generation of optimum sequence of operations using ant colony algorithm, *International Journal of Advanced Operations Management*, Vol. 4, No. 4, pp. 253-271, 2012.
[11] L. Liu, L. H. Qiao, Operation sequencing using genetic algorithm, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 163, pp. 57-61, 2012.
[12] J. M. Usher, R. O. Bowden, The application of genetic algorithms to operation sequencing for use in computer-aided process planning, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 30, No. 4, pp. 999-1013, 1996.
[13] L. Qiao, X. Y. Wang, S. C. Wang, A GA-based approach to machining operation sequencing for prismatic parts, *International Journal of Production Research*, Vol. 38, No. 14, pp. 3283-3303, 2000.
[14] C. KUMAR, S. DEB, GENERATION OF OPTIMAL SEQUENCE OF MACHINING OPERATIONS IN SETUP PLANNING BY GENETIC ALGORITHMS, *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, Vol. 11, No. 01, pp. 67-80, 2012.
[15] T. N. Wong, L. C. F. Chan, H. C. W. Lau, Machining process sequencing with fuzzy expert system and genetic algorithms, *Engineering with Computers*, Vol. 19, No. 2-3, pp. 191-202, 2003. English
[16] A. Gopala Krishna, K. Mallikarjuna Rao, Optimisation of operations sequence in CAPP using an ant colony algorithm, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 29, No. 1-2, pp. 159-164, 2006. English
[17] R. S. Joshi, N. kumar, A. Sharma, Setup Planning and Operation Sequencing Using Neural Network and Genetic Algorithm, *Information Technology: New Generations, 2008. ITNG 2008. Fifth International Conference on*, [2008, 2008].
[18] B. Babic, N. Nesic, Z. Miljkovic, A review of automated feature recognition with rule-based pattern recognition, *Computers in Industry*, Vol. 59, No. 4, pp. 321-337, 2008.
[19] H. Parvaz, M. J. Nategh, A Multi-TAD Framework for Recognizing Machining Features Using Hint Based Recognition Algorithm, *Advanced Materials Research*, Vol. 445, pp. 905-910, 2012.
[20] S. Joshi, T.-C. Chang, Graph-based heuristics for recognition of machined features from a 3D solid model, *Computer-Aided Design*, Vol. 20, No. 2, pp. 58-66, 1988.
[21] A. C. Lin, S.-Y. Lin, D. Diganta, W. F. Lu, An integrated approach to determining the sequence of machining operations for prismatic parts with interacting features, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 73, No. 1–3, pp. 234-250, 1998.
[22] Y. F. Zhang, A. Y. C. Nee, S. K. Ong, A hybrid approach for set-up planning, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 10, No. 3, pp. 183-190, 1995. English

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.10.27.1]