勇

匠の知見を継承する機械加工の自動工程設計システムの実現

Automated process planning system for end-milling operation considering experienced knowledge

2191024



研究代表者 神戸大学大学院 工学研究科 助 教 西 田

[研究の目的]

本研究は、機械加工における熟練者の判断基準(匠の知見)を学習データとして蓄積し、蓄積した学習データに従う自動工程設計システムを実現する。わが国の製造業は少子高齢化による熟練者の減少という問題に直面している。日本の優れた匠の技を継承することは、日本の金属工業の世界的競争力を維持する上で喫緊の課題である。しかしながら、人的資源の不足から、熟練者は現場の作業に集中し、属人的な匠の知見は継承されずに熟練者の退職とともに喪失してしまっているのが現状である。本研究では、熟練者の現場の作業を自動化すると同時に、匠の知見を学習することで、人の知恵を最大限に活用したものづくりを実現する。

機械加工に必要な加工用プログラム(NCプログラム)の生成を自動化する自動工程設計システムの実現には、「加工除去領域に対する加工順序の自動決定」および「加工除去領域に対する加工条件の自動決定」が必要である。加工順序は加工効率に影響を及ぼし、加工条件は加工精度に影響を及ぼすため、現状では熟練者の判断に従わざるを得ない。本研究では、これら2つの課題に対して取り組む。加工順序の決定においては、熟練者が無意識的に判断に利用している加工除去領域の特徴(例えば、大きさ、位置、形状)を特定して、その判断基準をデジ

タル情報として保存することが必要となる。加 工除去領域の特徴は人が見て判断する場合は容 易に特定できるが、目を持たないコンピュータ がそれらの特徴を認識して、熟練者が選択した 加工順序の判断基準を得るためには技術的課題 がある。また、加工条件の決定においても、加 工除去領域の特徴(例えば,工具進入面形状, 壁面形状)を認識して、熟練者が決定した加工 条件から熟練者の判断基準を得るためには技術 的課題がある。本研究ではまず、加工除去領域 の幾何学的な特徴を認識し、対話形式によって 熟練者が意図する加工順序および加工条件を入 力して NC プログラムの自動生成を行う支援 ツールを開発し、その際対話形式によって入力 された情報を匠の知見として学習して蓄積する システムを開発する。

[研究の内容. 成果]

機械加工に必要なNCプログラムの作成を支援するソフトウェアは従来から存在するが、現状では加工領域の選択や加工条件の決定など膨大な作業が使用者に求められている。機械加工の自動化のためには、これらの段取り作業を自動化する必要がある。しかしながら、特に加工優先度や加工条件は加工する対象物の材質や形状に応じて変更しなければならないことや、加工トラブルが発生せずに加工効率を向上する必

要があることから、熟練した加工ノウハウが必要となり自動化が困難である。本研究では、以降に示す手順により、熟練者の加工ノウハウに基づいて決定される加工優先度および加工条件の傾向を抽出してデジタル情報として蓄積し、蓄積した情報を用いることで熟練者の意図を反映した個性的な NC プログラムを自動で生成するシステムを構築する。

1. 加工除去領域の抽出およびその幾何学的特 徴の抽出

加工する領域の幾何学的な特徴とその領域の加工に使用する加工条件は密接に関連している。例えば、大きな領域を加工する際は、工具径の大きなものを使用するはずであり、比較的直径の小さい円柱形状の領域を加工する際は、エンドミル加工ではなくドリル加工を選択するはずである。そこで、所望の製品形状に対して、加工除去領域を決定することは非常に重要である。ここでは、まず加工除去領域を自動で抽出することを実現している。

加工除去領域は図1に示すように製品形状と被削材形状から抽出できる。これは製品形状と被削材形状の3次元CADモデルの差分を取ることで容易に抽出することができる。しかし、所望の製品形状が複雑な形状である場合、差分を取ることで抽出される加工除去領域のままでは形状が複雑であるため、そのまま解析することは難しい。そこで、抽出した加工除去領域をXY平面で分割して単純な形状として扱う。ここで、XY平面で分割する理由としては、切削加工の場合、工具進入方向をZ軸正方向とすると、工具進入の幾何学的な制約下では、一般

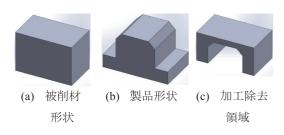


図1 加工除去領域の抽出

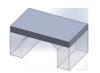






図2 単純な形状を抽出するための加工除去領域の分割

的には Z 軸正方向に位置する領域から順に加工を行うためである。また、XY 平面で分割することによって、図 2 のように分割前では複雑な形状であっても、分割後は比較的単純な形状で扱うことができる。分割した加工除去領域に対する加工条件は、その領域の幾何学的な特徴と密接に関連しているため、分割した加工除去領域の幾何学的な特徴を抽出する。ここで幾何学的特徴とは下記のように定義した。

- 領域の境界ボックス (Bounding box) の各辺の長さ
- ・工具アプローチ面の形状
- ・領域の体積
- ・領域を構成する面の数

2. 加工優先度の教示および加工順序の自動決定

ここでは、熟練者の加工ノウハウを学習する ために、使用者がシステムと対話形式で操作を 行う際に教示する情報から加工優先度を決定す る特徴を収集.解析および蓄積する方法につい て述べる。前節の図2に示した分割領域に対し て,加工優先度を決定することで,加工順序を 導出することできる。機械加工においては, 工 具がアプローチ可能な領域から順に加工する必 要があるため、被削材の天面に近い領域が優先 的に加工される。つまり、図2では、図2左に 示した領域が先に加工される。しかし、図2中 と図2右に示す領域は被削材の天面からの距離 はどちらも同じため、他の判断基準によって加 工優先度が決められる。本研究では、その判断 基準を加工領域の幾何学的な特徴に基づく表1 に示す5項目を定義した。

定義した5つの項目は体積 (Volume), CAD 座標系での位置 (Position),加工深さ

裏 1	加工化	惠集度じ	お郷す	ス継	何学的特徵

Category		Geometrical property		
Volume		Large	Small	
Position	X-coordinate	High	Low	
	Y-coordinate	High	Low	
	Z-coordinate	High	Low	
Depth		Deep	Shallow	
Distance		Far	Near	
Inside and outside		Inside	Outside	

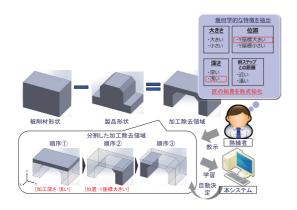


図3 熟練者の意図を反映した加工順序の自動決定

(Depth). 前工程との距離 (Distance). 加工 対象の中心からの相対位置 (Inside and outside) である。それぞれの項目には相対情報を 示す属性を設けている。ここでは、CAD モデ ルから加工除去領域の導出時に幾何情報を取得 するため、CAD 座標系での情報を用いている。 使用者が加工順序を対話形式でシステムに入力 するたびに、加工可能な除去領域の幾何情報を 計算して相対的な比較を行い、加工順位が高い 除去領域に該当する幾何情報の属性のスコアに 加算する。本システムを使用していく中で使用 者からの教示が十分行われると、図3に示すよ うに加工領域の幾何情報として定義したそれぞ れの項目において、どちらの加工を優先する傾 向があるかを取得することができ、熟練者の意 図を反映した加工順序を自動で決定することが できる。

3. 加工条件の教示および加工条件の自動決定

前節の方法にて抽出できる各加工除去領域に 対して、使用する工具および切込み量などの加 工条件が決定できれば、幾何学的に工具経路を

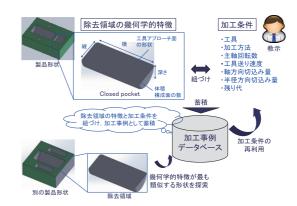


図4 加工事例データベースの蓄積と加工条件の自動決定

導出して NC プログラムを生成することができ るが、加工条件は仕上げ面精度や加工効率に大 きく影響するため、使用する材料や対象の形状 を十分に考慮して慎重に決定する必要があるた め、現状では熟練者の判断を要する。本システ ムでは、初めは使用者に対話形式により加工除 去領域に対して加工条件を入力してもらうが, その際に加工除去領域の幾何学的特徴と加工条 件を紐づけて加工事例として蓄積する。図4に 示すように加工除去領域の材料および領域の境 界ボックスの各辺の長さ、工具アプローチ面の 形状,加工深さ、体積といった幾何学的特徴と、 その領域の加工に使用した加工条件を紐づけて 加工事例データベースに蓄積する。十分にデー タが蓄積された際に、別の全く異なる製品形状 を加工する場合でも, 前節の方法で加工除去領 域を抽出することで、加工除去領域は単純な形 状として扱えるため、抽出される領域の幾何学 的特徴が最も類似する加工事例をデータベース から探索する。探索された加工事例に紐づいて いる加工条件を再利用することで熟練者が過去 に適切に決定した加工条件を自動で決定するこ とができる。データベースに存在している幾何 学的特徴が最も類似する形状を探索する際には. 加工除去領域の幾何学的な特徴として定義した 項目を条件として順に加工事例データを排他し ていくことにより、最も類似度の高いものを抽 出する。図5に最も類似度の高いデータを抽出 する処理の流れを示す。

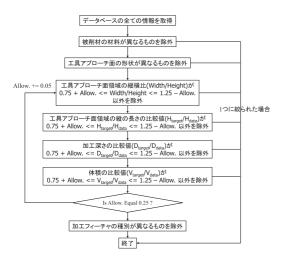


図5 類似する幾何学的特徴を探索する処理

4. ケーススタディ

本研究で提案した3次元CADモデルから加工領域を自動で抽出して工具経路を算出する方法の妥当性を検証するため、図6に示すような3次元形状に対して、工具経路を生成し、実加工による検証を行った。表2に加工条件の決定に必要な工具のリストを示す。表3に本研究で提案した方法により決定された工具を示す。また、被削材をアルミニウム合金A2017と仮定したときの各工程の加工条件を表4に示し、そ

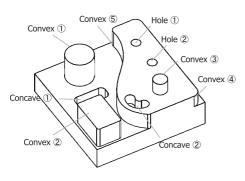


図6 ケーススタディに用いた CAD モデル

表2 ケーススタディに用いた工具リスト

No.	Diameter	Tool Type	
1	2 mm	Square end mill	
2	4 mm	Square end mill	
3	6 mm	Square end mill	
4	4 mm	Drill	
5	6 mm	Drill	

れらの加工条件から算出した工具経路を図7に示す。生成した工具経路で実際に加工した結果を図8に示す。図8に示した加工結果から、CADモデルから自動で生成された工具経路は、加工トラブルなく、加工精度も著しく低下することなく加工を実施できることが確認できた。

表3 抽出された加工領域と決定された工具

Region	Tool No.	Region	Tool No.
Concave ①	3	Hole ①	4
Concave 2	2	Hole ②	4
Concave ③	3	Concave ①	1
Concave 4	2	Concave 2	1
Concave ⑤	2		

表 4 各工具の加工条件

No.	D [mm]	Rd [mm]	Ad [mm]	Spindle [min-1]	Feed [mm/min]
1	2	0.5	0.25	10000	300
2	4	1.0	0.5	10000	300
3	6	2.0	0.5	10000	300
4	4	_	_	5000	100
5	6	_	_	5000	100

(D:工具径, Rd:半径方向切込量, Ad:軸方向切込量, Spindle:主軸回転数, Feed:送り速度)

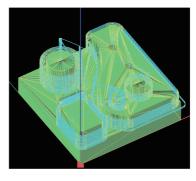


図7 自動で生成された工具経路



図8 実加工結果

[今後の研究の方向, 課題]

現状の加工現場では NC プログラムの作成に 熟練者の判断を要しているため、予め使用する 機械を一意に決めてから段取り作業を行ってい るため、柔軟性に富んだ生産システムが実現さ れているとは言い難い。本研究において NCプ ログラムの作成を自動化することにより、加工 したい製品は予め決められた機械で加工する必 要がなくなり、図9に示すように加工可能なす べての機械の候補の中から機械の稼働状況など を考慮して最適な機械に割り当てることができ る。このような柔軟性に富んだ生産スケジュー リングを実現することで、ユーザの求める製品 の加工をその多様なニーズに合った企業もしく は機械で加工することが可能となると考える。 しかしながら、選択できる機械の候補が多く存 在している状況で、各機械に割り当てられてい

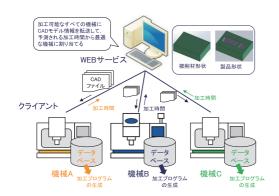


図9 加工可能なすべての機械における加工時間の予測 結果に基づく加工の割り当て

る仕事を考慮して最適な生産スケジューリングを行うには、多くの組み合わせ問題を解く必要があり、計算量が膨大となる。また、現実のものづくりでは複数の企業が連携して一つの製品の加工を行っていることが多く、実用化には企業の垣根を越えた生産スケジューリングが必要となる。これらの課題を克服して、柔軟性に富んだ次世代の生産システムを実現する予定である。

[成果の発表, 論文等]

- [1] Isamu Nishida, Shogo Adachi, Keiichi Shirase, Automated process planning system for end-milling operation considering geometric dimensioning and tolerancing (GD&T), International Journal of Automation Technology, Vol. 13, No. 6, pp. 825-833 (2019)
- [2] Isamu Nishida, Keiichi Shirase, Machine tool assignment realized by automated NC program generation and machining time prediction, International Journal of Automation Technology, Vol. 13, No. 5, pp. 700-707 (2019)
- [3] Isamu Nishida, Keiichi Shirase, Machining time reduction by tool path modification to eliminate air cutting motion for end milling operation, International Journal of Automation Technology, Vol. 14, No. 3, pp. 459–466 (2020)
- [4] Isamu Nishida, Hidenori Nakatsuji, Keiichi Shirase, Automated tool path generation for roughing with a flat drill, International Journal of Automation Technology, Vol. 14, No. 6 (2020)