

ニューラルネットワークを援用した金型加工の工具推定システムの開発

東京農工大学 ○井元 理愛, 東京農工大学大学院 ◎中本 圭一

要 旨

複雑な形状の金型を能率よく高品位に加工することが求められている。しかし、その加工準備となる工程設計は熟練技能者に依存しており、加工ノウハウは暗黙知となっている。そこで本研究では、この技能の伝承と工程設計の自動化による加工準備時間の短縮を目的として、金型の意匠面加工における各加工面の加工順序や加工条件を決定するために、過去の工程設計事例とニューラルネットワークを援用した工具推定システムを開発し、ケーススタディにより有用性を検証したので報告する。

1. 緒 論

多くの工業製品の生産には金型が用いられており、近年では複雑な形状を有する金型意匠面を高品位に加工することが求められている。しかし、加工結果に大きく関わる工程設計は熟練技能者に依存しており、属人的でかつ自動化の妨げとなっている。したがって、卓越した技能の伝承、自動化による加工準備時間の短縮に向け、複雑形状を有する金型意匠面を対象とした工程設計支援 (CAPP: Computer Aided Process Planning) システムの開発が望まれている。

2. CAPP システム

CAD ソフトウェアや CAM ソフトウェアなどのコンピュータ支援技術は、高効率な切削加工を実現するために不可欠である。しかし、市販の CAM ソフトウェアでは、NC プログラム生成のために様々な工程情報を用意する必要がある。また、一般に加工方法や加工箇所などを決定した後に手で工程情報を入力するため、加工開始までに長い時間を要する。さらに、高効率な切削加工を成し遂げるためには工程設計の標準化も重要である。このため、CAD モデルから CAM ソフトウェアに必要な工程情報を自動で決定する CAPP システムの開発により加工準備時間の短縮が強く望まれている。

これまでも、目標形状の特徴領域に着目したフィーチャ認識を基にしたルールベース型の CAPP システムは盛んに研究されてきたが、円柱や直方体などで構成される単純な目標形状を対象としていた¹⁾。しかし、複雑形状を有する金型は工程情報として決定するためのパラメータが極めて多いため、工程設計を一般化することは困難であった²⁾。一方、一般化が困難な問題に対し、妥当な値を推定できる手法としてニューラルネットワーク (NN: Neural Network) が知られている。先行研究では、金型の CAD モデルから抽出した加工面の各軸方向長さや曲率等の幾何学的情報を入力し、等高線加工、走査線加工、面沿い加工の 3 種類の工具経路パターンを出力する NN を用いた工程設計支援システムが開発されている³⁾。しかし、工具経路パターン以外の各加工面の加工順序や加工条件は作業者が決定する必要があった。そこで本研究では、加工順序と加工条件を自動で決定するための基礎として、過去の工程設計事例と NN に

加えて一般化された知識も組み込み、金型の意匠面加工で用いる工具を推定するシステムを開発する。

3. 工具推定システムの概要

金型の意匠面加工における加工面の加工順序や加工条件を自動で決定するために、使用される工具に着目した。一般に、金型の意匠面加工では加工時間を短縮するために大径の工具を最初に使用し、加工しきれないコーナ R は、小径の工具を用いて仕上げ加工している。したがって、コーナ R 加工に伴う工具交換前後を通じて加工面の加工順序を決定する必要がある。また、加工条件はワーク材質と使用工具によってある程度決められるものの、工具径は目標形状ごとに異なり、属人的に決定されることが多い。このため本研究では、金型の意匠面加工には主要工具とコーナ R 用工具の 2 種類のボールエンドミルを用いると仮定し、**図 1** に示すように主要工具は NN で、コーナ R 用工具は CAD モデルに基づいて推定するシステムを開発した。なお、本研究では CAD ソフトウェアとして SIEMENS 社の NX を採用している。また、システム開発では NX の API を使用し、プログラム言語に C# を用いた。

4. 主要工具径の推定

主要工具径の推定には 5 層の NN を用い、隣接する層の全てのニューロン間で結合がある全結合型 NN を採用した。ここでは、活性化関数には Tanh、損失関数には Categorical cross entropy、勾配降下法にはミニバッチ法、最適化手法には Adam を用いた。また、学習回数は最大で 100 回とした。

暗黙知である加工ノウハウを反映するために、過去の工程設計事例から熟練技能者により工程設計が施された同程度の寸法の 34 モデルを NN の学習に用いた。モデルと主要工具径の例を **図 2** に示す。教師データは CAD モデルの幾何学的情報と 4, 6, 8 mm のいずれかの主要工具径とした。用いた幾何学的情報は以下に示す通りであり、CAD モデルより抽出、あるいは算出して NN に入力した。

なお、金型意匠面において輪郭線に囲まれた領域を 1 つの加工面とし、全加工面の面積を総加工面積、曲率半径の 2 倍が 8 mm 以下で、かつ加工する側が凹面の場合、 $D \leq 8$ mm の凹面と記している。

- (1) 総加工面積に対する $D \leq 8$ mm の凹面合計面積の比率
- (2) 総加工面積に対する $D \leq 6$ mm の凹面合計面積の比率

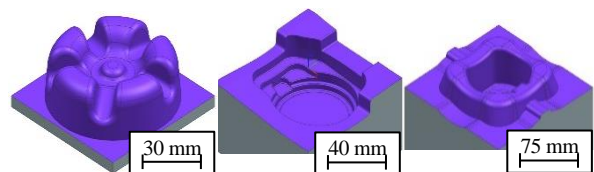


Fig. 2 Examples of CAD model and main tool diameter of past cases

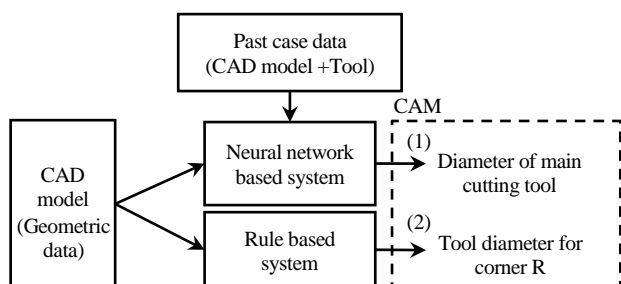
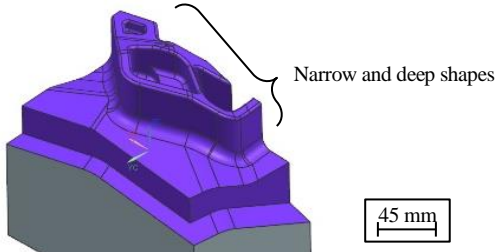


Fig. 1 Overview of developed system for tool inference

Table. 1 Inference evaluation of diameter of main cutting tool

		Inference result		
		D=4 mm	D=6 mm	D=8 mm
Past case data	D=4 mm	8	0	0
	D=6 mm	0	16	0
	D=8 mm	0	1	9

**Fig. 3** CAD model failed to infer the same tool diameter by NN

- (3) 総加工面積に対する $D \leq 4$ mm の凹面合計面積の比率
- (4) 総加工面積に対する $D \leq 8$ mm の凸面合計面積の比率
- (5) 総加工面積に対する $D \leq 6$ mm の凸面合計面積の比率
- (6) 総加工面積に対する $D \leq 4$ mm の凸面合計面積の比率
- (7) 加工面積の合計
- (8) 凹面の曲率半径の最小値
- (9) 凸面の曲率半径の最小値

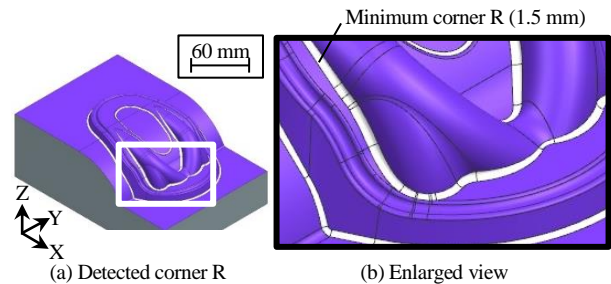
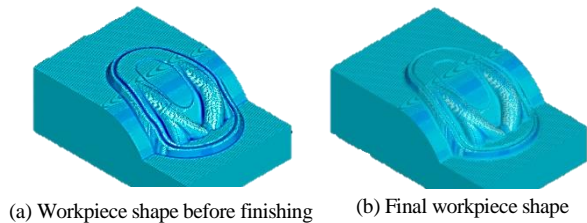
上記の NN を用いて、適切な主要工具径を推定できるか検証するためにケーススタディ 1 を実施した。ここで、Leave-One-Out 法を用いて NN を性能評価した。Leave-One-Out 法とは全データのうち、1 データのみを評価用データとし、残りのデータにより学習させた NN の性能を検証する方法である。これをデータの数だけ繰り返すことで、NN の汎化性能を検証できる⁹⁾。NN の推定結果と過去の工程設計事例を表 1 に示す。表のセルで着色した箇所は、過去の工程設計事例と同様の推定結果となったデータ数を示している。正解率は約 97.1% であり、主要工具径の推定結果が概ね熟練技能者の判断と一致していることが確認できた。

唯一、図 3 に示した CAD モデルでは推定された工具径が異なっており、正解が工具径 8 mm であるのに対し、6 mm と推定された。このモデルには、他モデルと比較して狭くて深い窪みが存在し、このような複雑形状の加工では、ホルダの干渉を避けるため工具突出し長さを大きく設定する必要がある。一方、工具の剛性を維持するためには、通常よりも工具径を大きくすることが多い。しかし、今回構築した NN では、工具突出し長さに関わる幾何学的情報が十分には入力されておらず、熟練技能者が決定した工具径よりも小さく推定されたと考えられる。

5. コーナ R 用工具径の決定および加工シミュレーション

金型の意匠面加工においては、大径の主要工具で加工時間を短縮し、残されたコーナ R 部を小径工具で取り除く。このコーナ R 用工具の径は、CAD モデルの最小コーナ R を基に決定することができる。ここで最小コーナ R とは、CAD モデルの全加工面に含まれる中の最小の曲率半径である。そこで、CAD モデルから各加工面の曲率半径を抽出して比較することで、最小コーナ R を含む加工面を検知して着色するようにした。また、工具径が最小コーナ R の 2 倍よりも小さければ加工可能とし、条件を満たす中で最大の工具をコーナ R 用工具とする。なお、条件を満たす工具が予め用意した工具リストに存在しない場合は、使用できる最大の工具径を出力する。

最小コーナ R を含む加工面を検出し、その曲率半径からコーナ R 用工具径を決定できるか検証するために、ケーススタディ 2 を実施

**Fig. 4** Determination of tool diameter for corner R**Fig. 5** Results of cutting simulation

した。なお、工具リストには工具径 2, 4, 6, 8 mm のボールエンドミルがあることを想定している。図 4 (a) は入力した CAD モデルであり、同図 (b) に示すように、このモデルの最小コーナ R は 1.5 mm であった。したがって、最小コーナ R の 2 倍以下で、最大の工具径 2 mm の工具が選択され、これは熟練技能者が用いたコーナ R 用工具と一致することを確認した。

推定された主要工具径と上記のコーナ R 用工具径を基に、自動で決定した加工順序と加工条件で金型加工が実現可能かを、図 4 のモデルを目標形状として FFCAM (牧野フライス製作所) を用いた加工シミュレーションで検証した。それぞれの工具径は 6 mm, 2 mm であり、どちらも超硬ボールエンドミルとした。また、加工面の加工順序はワーク座標系の Z 座標が大きい順に割り当て、ワーク材質には S55C を想定して FFCAM で予め設定された加工条件を用いた。工具交換前の加工形状を図 5 (a) に、コーナ R 用工具による仕上げ加工後の最終形状を図 5 (b) に示す。加工面が濃い青色である程、削り残しが大きいことを示しており、工具交換後に削り残されていたコーナ R が除去されていることが分かる。以上より、開発したシステムで選定された工具で加工順序や加工条件まで決定し、金型の意匠面加工が実現できることから本システムの有用性が確認できた。

6. 結 論

NN と過去の工程設計事例を用いて金型意匠面加工における主要工具径を推定し、また一般化された知識に基づきコーナ R 用工具径を決定する金型の意匠面加工に向けた工具推定システムを開発した。ケーススタディの結果より、熟練技能者の加工ノウハウを活用して主要工具径を高い正解率で推定でき、コーナ R 用工具径も決定できることから、開発した工具推定システムの有用性を確認した。

参考文献

- 1) 井上友貴, 中本圭一, 複雑部品の切削加工に向けた工程設計支援システムのための加工フィーチャ認識手法の提案, 日本機械学会論文集, Vol. 83, No. 850, (2017), DOI:10.1299/transjsme.16-00574.
- 2) Sheen, B. T., and You, C. F., Manufacturing Feature recognition and Tool-Path Generation for 3-Axis CNC Milling, Computer-Aided Design, Vol. 38, (2006), pp. 553-562.
- 3) Hashimoto, M., Nakamoto, K., A Neural Network Based Process Planning System to Infer Tool Path Pattern for Complicated Surface Machining, International Journal of Automation Technology, Vol. 13, No. 1, (2019), pp.67-73.
- 4) Kohavi, R., A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection, IJCAI'95 Proceedings of the 14th international joint conference on Artificial intelligence, Vol. 2, (1995), pp.1137-1143.