

# 加工評価を反映した機械学習に基づく金型加工の工程情報の推定に関する研究

東京農工大学 ○松本 和真, 東京農工大学大学院 ◎中本 圭一

## 要 旨

金型の多くは自由曲面を含む複雑形状を有しており、工程設計には知識や経験が必要とされている。また、基本的に少量生産である金型は、要求された精度を満たすことが優先されるため、実際の現場で用いられる工程情報には、加工コストの観点から改善の余地がある場合も存在する。そこで本研究では、加工評価を反映した加工事例から工程情報を推定する工程設計支援システムを開発し、その有用性を検証したので報告する。

## 1. 結 論

工業製品の生産に用いられる金型の多くは自由曲面を含む複雑形状を有している。このような金型加工の工程設計には知識や経験が必要とされているため、技能者の熟練度によって加工結果や加工コストにばらつきが生じている<sup>1)</sup>。このため、技能者の暗黙知である加工ノウハウが反映された、過去の加工事例を有効に活用することが期待されている。また、加工準備期間を短縮し、暗黙知である技能を伝承できる工程設計支援 (CAPP: Computer Aided Process Planning) システムの開発が求められる。

## 2. 研究目的

CAPP システムの開発に関わる研究では、円柱や直方体といった比較的単純な形状に対してルールベース推論で工程情報を決定するシステムが提案されている<sup>2)</sup>。しかし、複雑な曲面から成る金属意匠面では工程情報を決定するために考慮すべきパラメータが多く、一般化が困難である。一方、一般化が難しい複雑な問題には機械学習が有効であり、先行研究では、機械学習を用いて工具経路パターンを推定する CAPP システムが開発されている<sup>3)</sup>。しかし、基本的に少量生産である金型は、要求された精度を満たすことが最優先であり、加工時間の短縮などは優先順位が低い。そのため、実際の現場で用いられる工程情報には、加工コストの観点から改善の余地がある場合も存在する。そこで本研究では、加工評価を反映した加工事例から工程情報を推定する CAPP システムを開発し、現場で収集される加工事例を有効に活用した工程設計の実現を目的とする。

## 3. 機械学習に基づく工程設計支援システム

先行研究で開発された CAPP システムでは、畳込みニューラルネットワークをベースとした 3D u-net を用いて工程情報を推定している。工程情報を決定する CAD モデルの加工面へ要求される精度や使用する工具の情報を付与し、それに応じて着色したボクセルモデルへ変換する。このボクセルモデルに含まれるボクセルの工程情報を推定し、着色して出力する。このとき、CAD モデルの最大軸方向長さを基準として、一辺を 128 分割してボクセルモデルを生成する。なお、本研究では、推定する工程情報として工具経路パターンを想定し、等高線加工の場合には赤、走査線加工の場合には緑、面沿い加工の場合には青でボクセルを着色する。

## 4. 加工評価を反映した機械学習

本研究では、加工評価を反映して工程情報を推定するために工具経路パターンの 3 色に明暗を加えて表現する。先行研究では、各ボクセルに上記の 3 色に対応したフラグとして bool 型変数を用意し、それぞれ着色する場合には 1、着色しない場合 0 を代入

していた。これに対して本研究では、明暗を加えて着色するためにフラグを int 型変数へ変更した。また、加工評価を 0 から 15 の整数で表現し、良好であれば 15、逆に悪ければ 1 に近い値とした。図 1 には加工評価によって異なる着色の例を示す。括弧内は、左から赤、緑、青で表した工程情報での加工評価を示す変数の値である。同図(a)は加工評価が良好な場合であり、緑で着色されたボクセルの変数の値は 15 となっている。一方、(b)は加工評価が不良な場合であり、緑の変数の値が 1 となっている。このように、明暗を導入して加工評価を表現した加工事例を学習して工具経路パターンを推定する。

本研究で使用するネットワーク構造 3D u-net を図 2 に示す。右向きの三角形の Convolution で局所的な特徴量を抽出し、下向きの三角形の Max Pooling でデータを圧縮し特徴量の位置情報をぼかす。上向きの三角形の Up Sampling で局所的な特徴を保持したままデータを拡大する。右向きの矢印の Concatenate で全体的な位置情報を有する Max Pooling 前のデータと、局所的な特徴を保持している Up Sampling 後のデータを結合し、全体的な位置情報を復元する。これにより、全体的な位置情報と局所の特徴を統合して学習できる<sup>4)</sup>。なお、Convolution のフィルタサイズは  $3 \times 3 \times 3$  で、最終パスのみ  $1 \times 1 \times 1$  とし、Max Pooling, Up Sampling のフィルタサイズはそれぞれ  $2 \times 2 \times 2$  とした。また、畳込み後に Batch Normalization と Activation Function を使用した。Batch Normalization により値を平滑化することで学習を促進した。Activation Function には Rectified Linear Unit (ReLU) を使用し、関

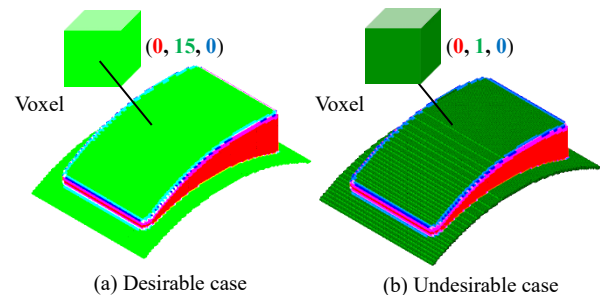


Fig. 1 Examples of colored voxel model based on evaluations

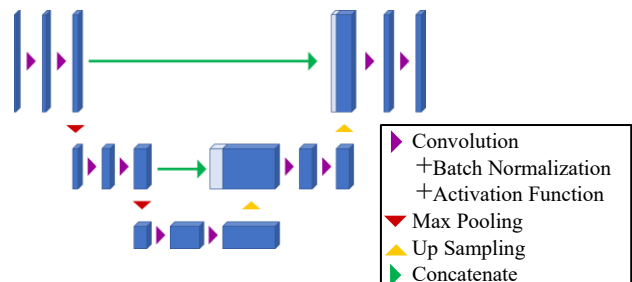


Fig. 2 3D u-net architecture

数の出力の上限は中間層はなし、出力層のみ最大値を15とした。なお、損失関数にはダイス係数損失関数、最適化手法にはAdamを用いた。

## 5. ケーススタディ

### 5.1 1つの工程情報の加工評価が良い場合

int型変数で加工評価を表現した加工事例を学習して工程情報を推定するケーススタディを実施した。学習に使用するCADモデルの例を図3に示す。このCADモデルは、4個の円筒を頂点とした四角形のポケット形状で、円筒の1つを平面上で移動させて派生したモデルを複数生成する。また、ポケットの底面及び円筒上面は走査線加工、立壁面は等高線加工、フィレット部分は面沿い加工という人為的なルールで工具経路パターンを決定している。このCADモデルの一边を128分割してボクセルモデルに変換して使用した。訓練データにおいて、着色するボクセルの変数の値を全て15にし、訓練データは1つの円筒の位置が異なる220個、検証データとテストデータとして訓練データには含まれないものをそれぞれ1つずつ用意した。学習回数は500回、バッチ数は4とした。図4に工程情報を推定した結果を示す。ここで、テストデータと推定結果の一致率は99.8%であり、高い精度で工程情報が推定できたことが分かる。

### 5.2 複数の工程情報の加工評価が異なる場合

次に、同一形状で異なる工程情報が割り当てられ、さらにそれらの加工評価が異なる場合を想定した。一般に、金型を大量生産することは少なく、数回しか加工しないために工程情報を最適化することはない。そのため、技能者によって設定する工具経路パターンが異なる、もしくはどちらの工具経路パターンでも問題ないことは多い。すなわち、同一形状であっても工具経路パターンなどの工程情報や加工評価が異なる場合がある、そこで、訓練データに同一形状で着色が異なるモデルが混在する加工事例を学習して工程情報を推定するケーススタディを実施した。

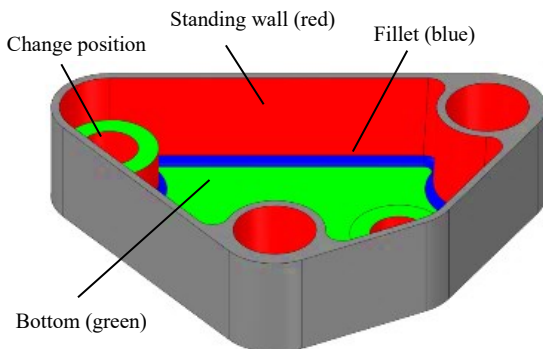


Fig. 3 Examples of CAD model for training data

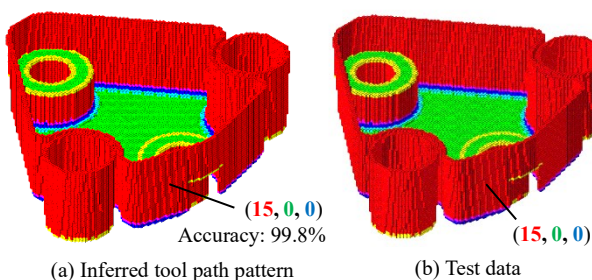


Fig. 4 Verification of inferred tool path pattern

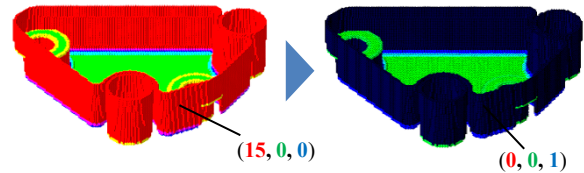


Fig. 5 Training data after change of tool path pattern

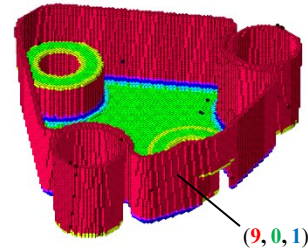


Fig. 6 Inferred tool path pattern with different evaluation

図5に示すように、先に使用したモデルにおいて立壁面が赤色、つまり等高線加工の工具経路パターンを、青色に変更して面沿い加工とした。また、加工評価が悪いことを意味するようにそのボクセルの変数の値を1とし、先に使用した赤色の立壁面に含まれるボクセルの変数の値が15のボクセルモデルと合わせて440個の訓練データを用いた。検証用データとテスト用データとして訓練データには含まれないものを使用し、検証用データには赤色と青色の立壁面のボクセルモデルを用意した。学習回数は500回、バッチ数は4とした。図6に工程情報を推定した結果を示す。ここで、立壁面に注目すると、赤と青の2色が混在しており、同一形状で異なる着色の訓練データを用いた場合、2つの色が反映された推定結果となることが分かる。また、変数の値が大きい工程情報を優先すれば、加工評価が良い赤色の等高線加工を立壁面の工具経路パターンとして推定できることも分かる。結果として、加工評価が良い工程情報の変数の値を大きくすることで、相対的に加工評価の良い工程情報を推定できることが確認できた。

## 6. 結論

加工評価を反映した機械学習に基づく工程情報の推定に向けて、色の明暗を用いて加工評価を表現するネットワーク構造を構築した。また、人為的なルールに基づいて生成したCADモデルを用い、同一形状において工具経路パターンが異なり、かつ加工評価が異なる場合に工程情報を推定するケーススタディを実施した。この結果、加工評価の良い工程情報を優先して推定できることを確認した。

## 文献

- 1) 青山英樹, “金型製作を支える CAD/CAM/CAE 連携 (携) 技術”, 精密工学会誌, Vol. 77, No. 7, (2011), pp. 636-639.
- 2) 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), 16-00574.
- 3) Mayu Hashimoto, Keiichi Nakamoto, “A Neural Network Based Process Planning System to Infer Tool Path Pattern for Complicated Surface Machining”, Int. J. of Automation Technology, Vol. 13, No. 1, (2019), pp. 67-73.
- 4) O. Cicek, A. Abdulkadir, S. S. Lienkamp, T. Brox, O. Ronneberger, 3D U-Net: Learning Dense Volumetric Segmentation from Sparse Annotation, arXiv:1606.06650, (2016), pp. 1-8