

# 機械加工に向けた深層学習によるドリル加工部の検出に関する研究

## Detection drilling parts for machining based on deep learning

○福本 健人\*1, 古庄 玄樹\*2, 加戸 啓太\*3, 平沢 岳人\*4  
Kento Fukumoto \*1, Genki Furusho \*2, Keita Kado \*3 and Gakuhiro Hirasawa \*4

\*1 千葉大学大学院 融合理工学府 博士前期課程

Graduate Student, Graduate School of Sci. and Eng., Chiba University.

\*2 千葉大学大学院 融合理工学府 博士後期課程 修士 (工学)、日本学術振興会 特別研究員 DC2

Graduate Student, Graduate School of Sci. and Eng., Chiba University, JSPS Research Fellow.

\*3 千葉大学大学院 助教 博士 (工学)

Assistant Professor, Graduate School of Engineering, Chiba University.

\*4 千葉大学大学院 教授 博士 (工学)

Professor, Graduate School of Engineering, Chiba University.

キーワード：深層学習; 点群; 加工パス生成; 多軸加工機

Keywords: Deep learning; Point cloud; Processing path deriving; Multi-axis machine.

### 1. はじめに

昨今では、木材の加工はプレカット工場で行われることが一般的となっている。プレカット工法では、従来の大工職人による墨付け・刻みといった手作業による木材の加工と比較して、工期の短縮や安定した品質が実現可能である。他方、近年では設計デザインの手法としてコンピュータシミュレーションを取り入れることが増えており、この手法により設計された部材形状は多様化する傾向にある。規格化された部材の加工の効率化を追求したプレカット工法では、新しいデザインに向けた形状の加工は困難であり、未だ職人による手作業を必要とする部分も多い。

部材設計とその制作に関するフローは、大まかに図1に示すCAD/CAMによるフローと、図2に示すCADとCAMを分けるフローに整理できる。前者では、加工パス生成には加工機専用のCAD/CAMソフトを用いる必要があり、設計した基本モデルをもとに、専用CADソフトで部品加工のための詳細モデルを再度モデリングしなおす作業を要する。このフローのなかでは、基本モデルと詳細モデルは別のものとして作成されるため、情報の一元管理や整合性の確保の上で問題を生じる可能性も大きい。

後者は、三次元プリンタのようなファブリケーション機器において、CADで設計を行い、そこから出力した汎用三次元モデルファイル(例えばSTL形式)をCAMに入力することで造形を行うといったフローである。この方法では三次元モデリングを行うCADソフトが制限されず、また造形も比較的自由であるという特徴が挙げられる。一方で、CAMにおいては三次元モデルファイルから加工パスを導出する必要がある。三次元プリンタでは自動的に制御を導出する手法が成熟しており手間は掛からないが、木材の加

工においては人の手で求める必要があり新たなボトルネックとなる。合理的に加工パスを導出する仕組みが求められる。

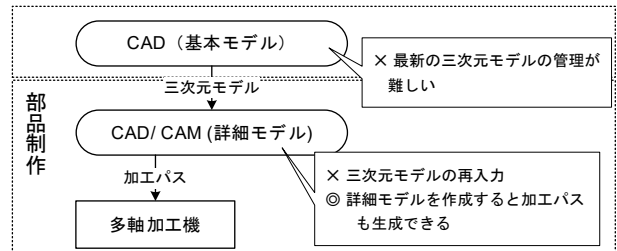


図1 CAD/CAMによるフロー

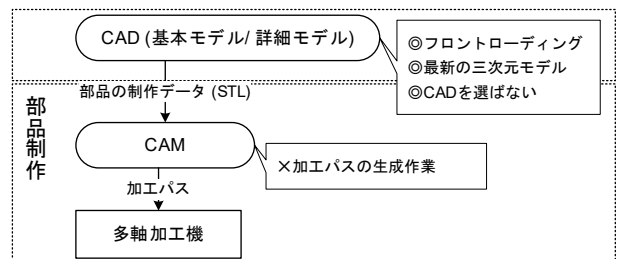


図2 CADとCAMを分けるフロー

#### 1.1. 既往研究との位置づけ

以上の背景のもと、前報<sup>1), 2)</sup>では、汎用三次元モデルから加工パスを自動生成することを目的に、深層学習を用いた三次元モデルの形状認識に取り組んだ。丸ノコで可能な加工パターンの溝切り加工、切り落とし加工、腰掛加工と、ミリング加工、ドリル加工、以上5種の加工パターンから制作可能な仕口の形状11種(図3)を分類し、加工パターンの推定を行うことをした。共に概ね良好に推定が行えたが、

運用の際の入力データを見込んで学習データを用意する難しさも確認された。学習用データは先述の 11 種についてそのバリエーションを自動生成するアルゴリズムを実装し用意したが、既報<sup>3)</sup>で制作した図 4 のようなレシプロカルタワーの構成部品を対象としたスタディケースにおいて、高精度で推定可能と思われたスカーフ継ぎとドリル穴の接合部は、分類可能であったが低精度であった。ドリル穴については、その位置や数、穴のある面に対する向きといったパラメータがあるが、この接合部においては、面が細く、また面に対する穴の向きが学習データとして用いたセットと乖離していたことが原因であると考えられる。

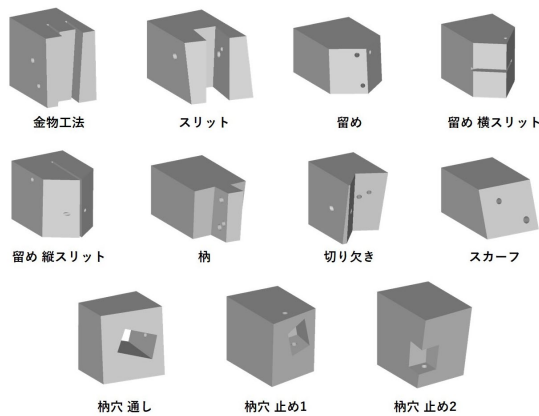


図 3 学習対象の 11 種の接合部形状

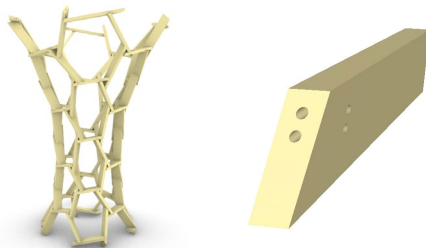


図 4 レシプロカルタワーの構成部品

## 2. 研究の目的

上述のようにドリル穴に関連するパラメータは多く、学習すべきバリエーションを増加させている。分類とセグメンテーションの前にドリル穴を検出し、それを除いておくことを考えた。

ところで、部品加工用の三次元モデルからドリル穴を検出する、という点においては、CAD/CAM によるフロー、例えば Rhinoceros (+ Grasshopper) でプロジェクト専用の CAD/CAM を構築するようなフローでは、モデリングの際に用いた穴の情報を記録しておくことができ、これを加工に用いることができる。CAD と CAM を分けるフローにおいても、(機械系汎用) CAM への入力に用いられる STEP 形式などでは、形状データにおいて穴の属性が保持されており、加工パスの導出に用いられている。このようにドリル穴の検出はフローや形状データの形式で解決するように見えるが、建築の生産プロセ

スを見ると、多主体・多ソフトウェアが用いられその過程で作成される三次元モデルも多目的である。機械加工による多品種少量生産が広く普及すれば、加工向けのフィーチャーを保持するワークフローやファイル形式が標準化される可能性もあるが、現段階では形状のみを保持する単純な形式が、受け皿も広く使いやすい。また、本研究で提案する手法で形状のみから求めた加工パスとモデリング時の情報やフィーチャーによる加工パスとで、ダブルチェックするなどといった利用も可能である。

## 3. ドリル穴の検出

汎用三次元モデルからのドリル穴の検出を行う。形状の認識には、前報<sup>1)</sup>と同様に PointNet<sup>4)</sup> 注<sup>1</sup> を用いる。PointNet は、深層学習によって点群の識別を行うライブラリであり、三次元点群が何であるか分類すること、また点群を構成している点がどの要素を構成しているかを識別することが可能である。汎用三次元モデルからドリル穴の検出する流れは以下のとおりである。

- ① 汎用三次元モデル(STL 形式)から、バウンディングボックスを用いて加工面を抽出
- ② 抽出した加工面を点群化
- ③ PointNet による点群の形状認識
- ④ ドリル穴の検出

### 3.1. 加工面の抽出・点群化

汎用三次元モデルファイルである STL 形式のデータは、右ねじの法則によって並んだ 3 つの単純な頂点座標により定義される三角形ポリゴンの集合により表現される。これを、バウンディングボックスを用いて加工によって生じる面のみを抽出する。次に、抽出した加工面から粗密が均一となるように各ポリゴンの面積に応じた数の点をポリゴン上に生成することで加工形状の点群データを得る。この点群を用いて形状の認識を行う(図 5)。

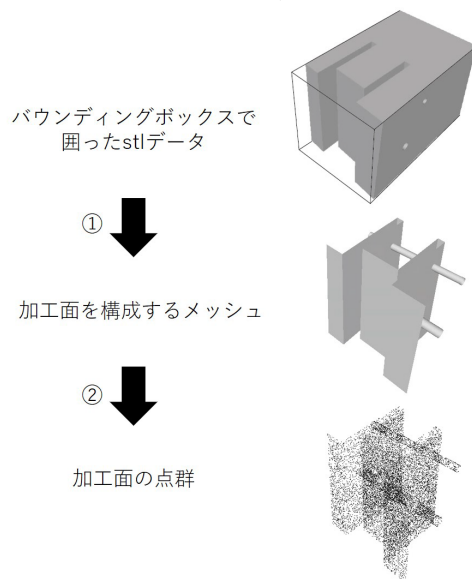


図 5 加工面の抽出・点群化

### 3.2. 点群の形状認識

ドリル加工による加工面を取り除くことを目的に、深層学習によって点群の形状認識を行う。加工形状を自動生成するアルゴリズム<sup>註2</sup>を用いて加工形状のメッシュの生成、および点群化を行い、穴を構成している点と、それ以外の部分を構成している点との2種でラベリングしたものを教師データとして学習させ、その識別モデルによって分類を行うという方法が考えられる。しかし、このモデルでは同じ生成アルゴリズムを元に作成した加工形状に対しては精度よく識別可能であるが、1.1.で述べたような学習データにないドリル穴の形状を有する未知の加工形状が入力されたときに、推定精度が低下する。そこで加工形状を構成する点群全てを入力に用いるのではなく、図6のように全体から一部を切り取った点群を学習データとして用意し、識別モデルを作成することとする。この方法であれば、接合部全体の形状の特徴をつかむことなく学習が行われるため、仮に学習データの作成に用いた自動生成アルゴリズムから生成されることのない形状が入力されたとしても、切り取った一部分の点群におけるドリル穴か否かという判別に関しては精度良く推定できる。

なお、ドリル穴には底面を含むものもあるが、深層学習による形状認識では穴の側面のみを検出を行う。穴の底面の検出手法に関しては4.2.で述べる。



図6 一部を切り取った点群の例(青点)

### 3.3. モデルの作成

モデルは、PointNetのsegmentation taskをもとに作成した。入力する学習データは、前報で自動生成した5種の加工パターンから制作可能な11種の仕口の形状(図1)の中で、ドリル加工による穴を含んでいるものとした。その加工形状を4096点の点群へ変換し、その中からランダムに選択した点とその近傍255点の計256点の点群とした。右ねじの法則に従って定義された三角形ポリゴンを持つ加工形状からは法線情報を取得することができる。ドリル穴に関して、法線は円柱の中心軸方向を向いており特徴として捉えやすいため、法線情報を含めた点群を入力とし学習を行う。generator<sup>註3</sup>を作成し、batch size32、1epochあたり100stepで学習した結果、検証データに対する正解率は99.00%、損失0.0073で学習できた。

### 3.4. ドリルによる加工面の検出

以上の方法により作成した識別モデルに、穴か非穴かを

特定したい面の重心とその近傍255点を抽出した点群を入力しセグメンテーションを行う。点群をセグメンテーションしたのち、面の重心の推定結果をもって、その面がドリル穴であるか否か判断する。これを各面毎に行うことで、ドリルによる加工面の特定を行う。

### 3.5. 検証

以上の方法により面の特定を行い、正誤の精度検証を行う。点群化したテストデータを作成した識別モデルに入力し面の特定を行った結果、図7のように穴と非穴の分類をすることができた。約1000件のテストデータを用いて検証した結果、面の正解率は99.08%であった。この程度の誤差であれば、後の処理、具体的には穴と判定された面からドリル穴の始点、終点と径を求める処理、および他の面を再度点群に変換し加工形状の分類・加工パターンの特定を行う処理にもほとんど影響はないと考えられる。

未知な形状のデータの一例として、レシプロカルタワの構成部品に対してドリル穴の面の特定を行った(図8)。学習データにはこのような横長の切り落とし加工による面に穴が空いたような形状は含まれていないのにも拘らず、高い精度で分類できていることが確認できた。

本手法は、判定したい面の重心とその付近255点を抽出して判定し、全体の形状の違いの影響を受けにくくしているが、接合部全体を点群化する際の点群数については考察の余地がある。今回は一律4096点としたが、運用時に極めて複雑な接合部が入力されれば、近傍255点を抽出した点群も複雑になり、学習時のデータと乖離し、適切に判定が行えない可能性がある。これについては今後の研究の課題としたい。

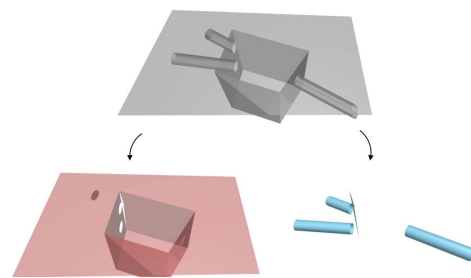


図7 テストデータ(上)とドリル面と特定した面(右)とそれ以外の面(左)

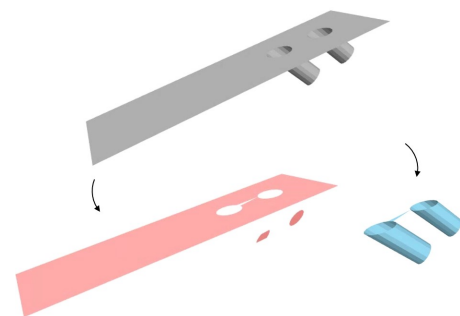


図8 レシプロカルタワの構成部品の加工面(上)を分類した結果(下)

#### 4. ドリル加工パスの生成

加工機に入力する加工パスは、複数の加工工程が組み合わされたものであり、それぞれの加工自体の情報を表す単位パスと、それらを繋ぐ迂回パスから構成される。ドリル加工の場合、単位パスはツール軸方向に沿った移動のみであり、加工開始点と加工終了点から生成できる。迂回パスは、それらの単位パスとワークの位置関係から、ツールとワークが接触しないような条件設定によって生成するものであり、部材形状のみから求めるものではない。したがって、ここでは、加工の開始点・終了点とドリル径からなる単位パスを求める手法について説明する。

##### 4.1. 単位パスの構成

ドリル穴が貫通穴である場合、穴のある面と穴の軸の交点がそれぞれ加工開始点、加工終了点となり、非貫通穴の場合穴のある面と穴の軸の交点が加工開始点、穴の底面の円中心が加工終了点となる。また、この加工開始点から次の単位パスの加工開始点へ移動するとワークと接触してしまうので、加工終了点から加工開始点側に延長したワークと接触しない位置に退避点を設け、退避点と加工終了点を結ぶ軌跡をそれぞれ進入パス、退避パスとして単位パスを構成する(図 9)。

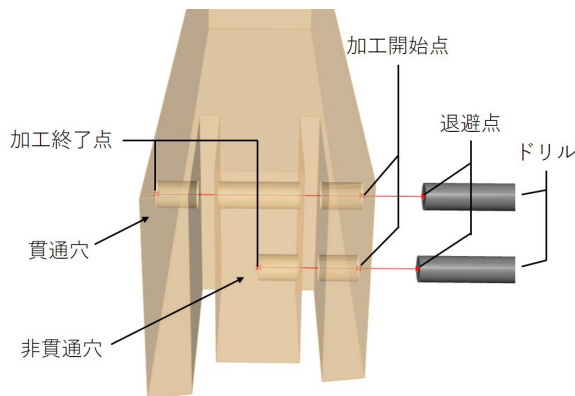


図 9 ドリル加工の単位パス

##### 4.2. 円柱推定による加工パスの導出

ここでは穴と判定された面を用いて加工開始点と加工終了点、ドリル径を計算する手法を示す。まず、取得した面を再度三次元点群へ変換する。この点群から RANSAC<sup>注4</sup>を用いた円柱推定により、円柱軸の端点、および円柱の径を推定する(図 10)。この計算には PCL<sup>注5</sup>を用いた。また、非貫通穴に関して円柱軸の端点を結んだ線分が交差する面を持つ時、交差する点を非貫通穴の加工終了点として定義することができる。以上の方法により単位パス(図 11)が求められ、ドリルによる加工パスの生成が可能となる。

hole radius	end point
0.0428339	[-0.17864779 0.31381273 0.26036679]
	[-0.00969646 -0.50803027 0.26280252]

図 10 始点・終点とドリル径を求めた例

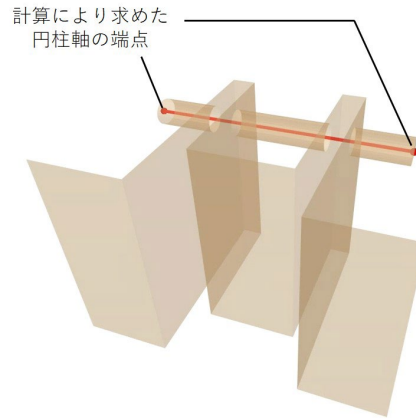


図 11 求めた単位パス

#### 5. まとめ

CAD/CAM によるパス生成フローにおける問題を背景に、汎用三次元ファイルからの様々なツールの加工パス生成の自動化に継続的に取り組んでいる。本稿では、三次元モデルの加工形状の特定を困難にしているドリル加工による穴を、深層学習を用いて検出する手法について報告した。また、同時に検出した面からドリルによる加工パスを自動生成できることも示した。

##### 【注釈】

- 注1. 本研究では Keras 実装の PointNet を用いた。  
<https://github.com/garyli1019/pointnet-keras>(2020-09-30)
- 注2. 学習用の加工形状のメッシュ操作にはオープンソースのライブラリである trimesh を用いた。  
<https://trimesh.org/>(2020-09-30)
- 注3. メモリの消費を防ぐために、ミニバッチごとに学習データを読み込みモデルの学習を行う generator を作成した。
- 注4. Random Sample Consensus の略。外れ値などを無視し、法則性を推定する手法。
- 注5. オープンソースのライブラリ。(Point Cloud Library)  
<https://pointclouds.org/>(2020-09-30)

##### 【参考文献】

- 1) 加戸 啓太, 中村 優介, 古庄 玄樹, 平沢 岳人, 深層学習による形状認識を用いた丸ノコの加工パスの生成支援, 日本建築学会技術報告集, 2020, 26 巻, 63 号, p. 798-801
- 2) Keita Kado, Genki Furusho, Yusuke Nakamura and Gakuhito Hirasawa, Process Path Derivation Method for Multi-Tool Processing Machines Using Deep Learning-Based Three-Dimensional Shape Recognition, RE: Anthropocene, Proceedings of the 25th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA) 2020, Volume 2, 611-620
- 3) 古庄 玄樹, 吉岡 直樹, RANDI HANTORO, 大谷 星輝, 中村 優介, 加戸 啓太, 平沢 岳人, 五軸加工機による木造レシプロカルタワーの制作, 第 42 回 情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, 2019.12
- 4) Charles R. Qi et.al., PointNet: Deep Learning on Point Sets for 3D Classification and Segmentation, Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2017