

表面形状によりワークを分類するための3D CNNの構築と ソフトグリッパを持つ産業用ロボットへの実装

F123623 廣野 聖和

永田研究室

1. 目的

近年、市販の安価で小型高性能な3Dカメラの普及が進んでおり、深層学習により高精度に物体を認識しようとする技術開発が盛んになっている。深層学習には繊細かつ膨大な学習データが必要であるが、2Dカメラで物体の形状情報を取得する際、照明環境を入念に整える必要があり、長期的にデータを取得していく場合、照明環境をその都度調整することは困難である。例えば、RGBでデータを取得する2Dカメラで物体を真上から撮影すると、表面の起伏や勾配を認識することが困難であるが、3Dカメラを用いることで複雑な表面形状や色で見分けのつかない傷などを認識することができる。また、ワークの輪郭形状が同じ場合、カメラで撮影された画像情報のみでCNNモデルを構築するだけでは、ワークの表面形状の違いを識別することは困難である。本研究では、ワークの真上にカメラを設置した限定的な測定状況での物体認識を想定し、表面形状が異なるようなワークを高精度に分類できるシステムについて検討する。

2. 実験方法

本研究では、図1のような8カテゴリの表面形状を識別するための3D CNNを構築し、分類実験およびピック&プレースタスクによりその性能を評価する。実験では3Dカメラから取得した3次元点群データ(PCD)を扱うため、3次元データに対応したネットワークを構築する必要がある。PCDは大量の3次元情報が含まれているため、そのファイル数が増えると効率的な学習処理が困難となる。このため、PCDよりも簡素で規則的な構造を持つボクセルデータを3D CNNの入力データとして使用することで、計算コストの軽減、CNNなどの既存のネットワーク手法への拡張を可能とした。

まず、RGB-Dカメラ(RealSense)と準備実験用に作成した8個のワークを用いて、PCDとボクセルデータの拡張手法と、8カテゴリの表面形状分類タスクに対するボクセルベースの3D CNNの有効性についてそれぞれ評価する。次に、新たに作成した全80個のワークから同様にデータを生成させることにより汎化性能の向上を試みる。さらに、より高機能な3Dカメラ(CR-scan)を用い、取得するデータの質を改善することによって識別性能がどのように変化するのかを評価する。最後に、設計したボクセルベースの3D CNNを小型の多関節型ロボットに実装し、ワークの形状の違いにより仕分けを行うピック&プレースタスクに適用し、その有効性を評価する。

3. 結果

第1の実験では、RealSenseによりワークの表面の点群データ(PCD)を取得し、指定した角度でZ軸周りに回転させるようなデータ拡張処理を施し、回転角度を1度に設定することで、1つのPCDから360の拡張ファイルを生成させた。360の拡張ファイルを $32 \times 32 \times 32$ のボクセルデータに変換し、180個を訓練用データ、残りをテスト用データに分割した。提案するデータ拡張手法により効率的なデータ生成が可能であることが確認できた。その後、全12層で構成されたボクセルベースの3D CNNの学習と、テスト用データを用いた分類実験によりその有効性を評価した。その結果、低解像度のボクセルデータとシンプルな構造の3D CNNでも高い精度で分類できることが確認できたため、本研究を進める上での基本モデルとした。

第2の実験では、構築する3D CNNの汎化性能を高めるために1カテゴリに対してその特徴を持つワークを10個ずつ計80個作成した。各カテゴリの10個のワークは、表面の起伏の大きさや斜面の角度、凹凸の幅などの

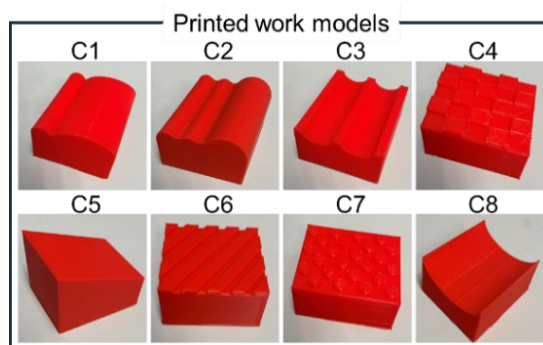


Fig. 1 Printed work models with eight categories of surface shapes for classification.

寸法を変更している．1 カテゴリにつき9 ワーク分のボクセルデータ 3240 個から成る訓練用データセットと，1 ワーク分のボクセルデータ 360 個から成るテスト用データセットをそれぞれ作成した．なお，このデータ分割方法ではテストデータの組み合わせが全部で 10^8 通りであるが，本実験ではそのうちの 10 通りの訓練用データセットとテスト用データセットの組み合わせを用いて学習後の 3D CNN の分類性能を評価した．その結果，訓練に用いていない未知のワークに対する識別については各ワークによって識別精度にばらつきが生じていたため十分な汎化性能は確認できなかった．原因として，RealSense から取得した PCD ではワーク表面の形状情報を十分にデータ化できておらず，学習時の特徴抽出が困難であったためと思われる．

第3の実験では，スキャナ性能に特化したカメラ (CR-scan) を導入し，STL データ → PCD → ボクセルデータのような流れで変換した同様の 10 通りのデータセットを作成し，学習および分類実験により性能を評価した．その結果，10 個中 8 個のテストデータセットで分類精度の向上が確認できた．これはワーク表面から取得可能な測定点の数を増やすことで表面形状を詳細に表現することができ，学習時に各カテゴリの特徴が捉えやすくなり，分類精度が向上したものと思われる．

第4の実験では，これまでに構築してきた 3D CNN を小型の産業用ロボットに実装し，表面形状を認識しながらのピック&プレースタスクに適用し，その有効性について評価した．ロボットには MG400 を使用し，アームの先端には図2のようなソフトグリッパを接続した．RealSense により取得した PCD を自動でボクセルデータに変換し，学習済みの 3D CNN を搭載した PC によりリアルタイムで分類できるロボットシステムを構築した．ピックアップしたワークを分類結果に応じて指定した場所にプレースするというタスクを安定的に実行することができた．

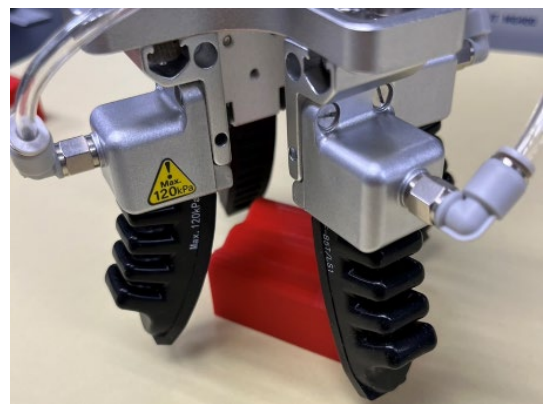


Fig. 2 Soft gripper attached to the MG400 for picking work models.

4. 学会発表

- 1) 廣野，永田，米原ら，金属の火花試験の自動評価システムー3D CNN と 2D CNN の分類性能の比較評価ー，第 23 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集，pp. 325-328，2022.
- 2) 廣野，永田，大塚ら，3D CNN を応用したボクセルデータに基づくワークの分類実験と評価，産業応用工学会全国大会 2023 講演論文集，pp. 65-66，2023.
- 3) 廣野，永田，金沖ら，表面形状によりワークを分類するための 3D CNN の設計と評価，第 24 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集，pp. 1327-1330，2023.
- 4) 廣野，永田，金沖ら，ボクセルデータに基づきワークの表面形状を識別するための 3D CNN の設計と評価，第 30 回画像センシングシンポジウム (SSII2024)，IS1-10，pp. 4，2024.
- 5) M. Hirono, F. Nagata, T. Kaneoki, Y. Shiba, A. Otsuka, K. Watanabe, Classification and Evaluation of Workpieces Using 3D CNN Built Based on Voxel Data, *Procs. of The 29th International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 29th 2024)*, pp. 947-950, 2024.
- 6) M. Hirono, F. Nagata, M. K. Habib, et al., 3D CNNs for Smart Manufacturing Voxel-Based Classification of Industrial Workpieces, *AI-Driven Smart Industrial Technologies*, IGI Global, 2025.

Abstract

In recent years, the estimation of object positions, orientations, and shapes has become feasible using 3D cameras capable of capturing depth information. The widespread availability of compact, affordable, and high-performance 3D cameras has further accelerated research on object recognition based on 3D imaging. A 3D camera, such as RealSense, measures object distances by emitting infrared rays and capturing point cloud data (PCD), so that it is effective to measure an object's shape without being affected by lighting conditions. In this study, voxel data are generated from PCD captured by a 3D camera. A compact 3D CNN model is developed using the authors' developed MATLAB application to classify workpieces based on voxel data into several categories. The model's effectiveness and generalization ability are evaluated through surface shape classification experiments involving eight categories of 3D-printed objects.