

協働ロボットによる検査作業省力化の研究（第2報）

Research to save labor in visual inspection by a collaborative robot (2nd)

電子・機械技術部 ロボット・制御科 近野裕太 菅野雄大 根本大輝 菊地悠介

本研究では、製造現場へのロボット導入及び協働ロボットの活用による作業省力化を目的として、検査工程の自動化に取り組んでいる。今年度は、少量多品種生産の現場において課題となっている品種変更のたびに必要となるティーチング作業の負担の大きさに着目し、画像認識及び姿勢推定技術等を活用したティーチングレス制御により、事前教示を行わずにピッキング動作が実行可能なロボット制御システムを構築した。実機による把持実験により、提案手法の有効性と実用可能性を検証した。

Key words: 協働ロボット、省力化、ティーチングレス、機械学習、セグメンテーション、三次元位置姿勢推定、逆運動学

1. 緒言

近年、少子高齢化や生産年齢人口の減少に伴う人手不足が進行している。この課題の解決策として、製造現場へのロボット導入による作業の自動化・省力化を進める動きが活発になっており、当所でも県内企業へのロボット導入や活用に関する技術支援を行っている。本研究では、製造現場へのロボット導入及びロボットによる作業省力化を目的として、検査工程の自動化に取り組んでいる。

検査対象部品表面の傷の有無を判定する外観検査等では、形状が一定である大量生産品においては自動機や協働ロボット等を活用した検査自動化が比較的容易に実現されている。これは、ロボットに対して作業位置や検査対象物の姿勢、動作順序などを設定・登録するティーチング作業を事前に一度だけ実施すれば、以降は同一条件であるため、同様の動作をロボットが繰り返すことで実現が可能である。一方、少量多品種生産の現場では、品種変更毎にこのティーチング作業を実施する必要があり、その負担の大きさがロボットによる自動化推進の阻害要因の一つとなっている。さらに、検査工程に付随するワークの搬送・入れ替え作業についても同様の課題を抱えている。

昨年度は、外観検査に用いる画像処理装置等を導入し、外観検査作業の自動化に係る実験環境を整えるとともに、ワーク表面の傷の欠陥検出の可否等について検証した。本年度は、画像認識及び姿勢推定技術等を活用した、協働ロボットに搭載したカメラ画像等から検査対象部品の位置姿勢を自律的に認識し、事前教示の必要がないティーチングレス制御によるピッキング動作が可能なロボット制御システムを構築した。また実機把持実験を通じて、提案手法の有効性及び現場適用可能性を検証した。

2. ティーチングレスロボット制御システム

2. 1. 構築したシステムの全体像

構築したティーチングレスロボット制御システム

(以下、「本システム」という。)のイメージを図1に示す。本システムは大きく分けて、①ロボットアームに取り付けた RGB-D (カラー+深度) カメラから得られる RGB-D 画像中の検査対象部品を認識する処理システム、②認識した検査対象部品の三次元位置姿勢 (6DoF: 6 degree-of-freedom) を推定する処理システム、③三次元位置姿勢推定結果を用いたロボットアーム動作生成システムの3つのシステムにより構成される。本システムへ RGB-D 画像及び検査対象部品の 3D-CAD データ (メッシュデータ) を入力することにより、協働ロボットが検査対象部品を認識し、把持位置まで自律的に移動してピッキングを行うことが可能である。なお、本研究においては、自動化を行う検査対象部品は金属製の工業製品であると仮定し、また工業製品の設計、加工等に用いられる 3D-CAD データは保有していることを前提とした。

2. 2. 各処理システムの概要

2. 2. 1 検査対象部品認識システム

対象物体の 3D-CAD データを多数の視点からレンダリングしたテンプレート画像を事前に作成し、入力する RGB 画像中の特徴と類似度を照合することで、RGB

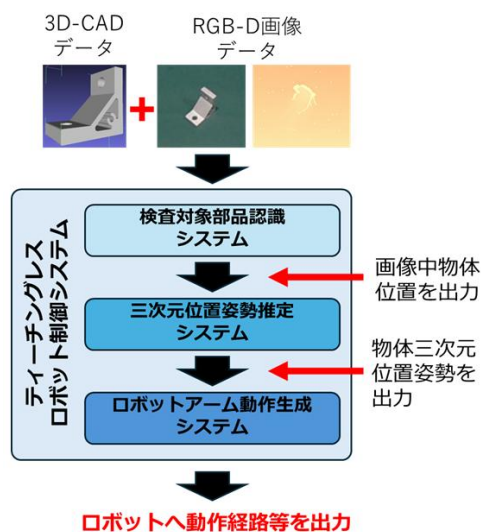


図1 システムのイメージ

画像中の対象物体を検出・セグメンテーションする手法である CNOS¹⁾ を用いた。CNOS では、まず SAM²⁾ 等により画像中の物体毎にセグメンテーションを行う。次に各セグメンテーション結果領域より得られる視覚特徴量と、事前に作成した多視点テンプレート画像が持つ視覚特徴量とをコサイン類似度により照合、比較する。類似度が高いセグメンテーション結果領域が画像中の対象物体であると推定する。未知環境下でも対象物体が画像中のどこにあるのかをロボットが自律的に認識することができる。なお、視覚特徴量は画像から抽出される形状・輪郭・質感などを数値化したものであり、本システムでは DINOv2³⁾ により抽出した。

2. 1. 2 三次元位置姿勢推定システム

三次元位置姿勢推定は、画像中の物体の位置姿勢を求める技術分野である。本研究では、対象物体の 3D-CAD データ、対象物体が写った RGB-D 動画像、対象物体の RGB-D 動画像の領域を示すマスク画像等を入力とし、対象物体の三次元位置姿勢を推定・追跡することが可能な手法である FoundationPose⁴⁾ を用いた。FoundationPose では、まず対象物体の初期三次元位置姿勢候補を生成し、3D-CAD データをレンダリングしたモデル画像とマスク画像により切り出された RGB-D 画像との整合性（特徴量や輪郭、深度のずれ等）を評価する。評価結果をもとにリファインメントネットワークにより反復的に最適化することで、対象物体の三次元位置姿勢推定結果を精緻化する。FoundationPose は大規模な合成データにより学習された機械学習モデルであるため、未学習な物体や金属製品などのテクスチャレスな物体であっても高精度かつロバストな三次元位置姿勢推定が可能である。

2. 1. 3 ロボットアーム動作生成システム

対象物体をロボットアームに取り付けたエンドエフェクタにより把持するため、三次元位置姿勢推定システムにより得られた対象物体の位置姿勢をもとに目標位置姿勢を生成し、エンドエフェクタが対象物体を把持可能な位置までロボットアームを動作させる。この動作を行うには、エンドエフェクタの目標位置姿勢に対応するロボットアームの関節角度を求める逆運動学計算と、現在位置姿勢から目標位置姿勢までのロボットアームの経路計画及び動作軌道の生成が必要である。

本研究では、ur_ikfast⁵⁾ を用いて目標位置姿勢に対応する関節角度を算出し、この関節角度から ROS2⁶⁾ の MoveIt2⁷⁾ で提供されている OMPL⁸⁾ を用いてロボットアームの経路計画を行い、動作軌道を生成した。

2. 1. 4 座標系

一般に、ロボットアームへの目標位置姿勢の指令値はロボットアームのベース座標系で与えられる。一方、

三次元位置姿勢推定システムにより得られる対象物体の三次元位置姿勢は、ロボットアームに取り付けられた RGB-D カメラのカメラ座標系における値である。したがって、推定結果をロボットアーム制御に利用するためには、ベース座標系とカメラ座標系との間の相対位置・姿勢関係を表す同次変換行列により、推定結果の座標系の変換を行う必要がある。同次変換行列は、回転行列 \mathbf{R} と並進ベクトル \mathbf{t} を含む 4 次の正方行列である。ロボットアームのベース座標系 B 、エンドエフェクタ座標系を E 、カメラ座標系を C 、対象物体基準の座標系を O とする。またある座標系 A から座標系 B への変換を表す同時変換行列を \mathbf{T}_{BA} とすると、ベース座標系での検査対象部品の三次元位置姿勢を表す \mathbf{T}_{B0} は式 1 により求められる。

$$\mathbf{T}_{B0} = \mathbf{T}_{BE} \cdot \mathbf{T}_{EC} \cdot \mathbf{T}_{CO} \quad \dots \quad (式 1)$$

このとき、 \mathbf{T}_{BE} はロボットアームの順運動学により得られるエンドエフェクタ位置姿勢、 \mathbf{T}_{EC} はエンドエフェクタとカメラ間の外部パラメータ、 \mathbf{T}_{CO} は三次元位置姿勢推定により得られる対象物体位置姿勢を表す。さらに、エンドエフェクタにより対象物体を把持するためには、座標系 O においてあらかじめ定義された把持姿勢を考慮する必要があり、座標系 O において定義された把持姿勢を \mathbf{T}_{Og} とすると、ロボットアームのベース座標系における把持姿勢 \mathbf{T}_{Bg} は式 2 により求められる。

$$\mathbf{T}_{Bg} = \mathbf{T}_{B0} \cdot \mathbf{T}_{Og} \quad \dots \quad (式 2)$$

3. 実験

3. 1. 実験環境

構築した本システムを用いた検査対象部品の把持実験の様子を図 2 に示す。ロボットアームはユニバーサルロボット社製の協働ロボット UR10e、エンドエフェクタはロボティク社製の 2 指グリッパ 2F-85、RGB-D カメラはインテル社製の RealSense D455 を用いた。また検査対象部品のサンプルとして、本実験では MISUMI 社製の押出厚型ブラケットを用いた。この部品のハウジングボックス（部品を最小の直方体で囲んだ領域）の寸法は、幅 30mm、奥行き 51mm、高さ 51mm である。

3. 2. 検査対象部品の把持位置の設定

本実験では、エンドエフェクタによるサンプルの把持位置は事前に設定した。サンプルの 3D-CAD データをレンダリングした画像に把持位置を示したものを図 3 に示す。サンプルの Z 軸方向にエンドエフェクタが垂直にアプローチし、サンプルの Y 軸方向に 2 指グリッパを開閉して把持を行う構成とした。

把持動作に際しては、サンプル基準の座標系において定義された把持位置・姿勢を基準とし、その Z 軸の正方向に 200mm オフセットした位置をアプローチ開始姿勢として設定した。協働ロボットはこのアプローチ開始位置姿勢にまずエンドエフェクタを移動させ、次に Z 軸の負方向へ直線的にエンドエフェクタを移動させることでサンプルへアプローチし、把持動作を実行する。

4. 結果

4. 1. 検査対象部品認識システムの処理結果

サンプルの 3D-CAD データ及び図 4 に示す RGB 画像を検査対象部品認識システムに入力し出力されたサンプルのセグメンテーション結果を図 5 に示す。透過した青色が重ねて表示されている領域がサンプルと認識した領域を示している。RGB 画像中のサンプル領域は画角に対して比較的小さいものの、適切にサンプル領域を認識できていることが確認できた。

4. 2. 三次元位置姿勢推定システムの処理結果

図 5 により作成したマスク画像を図 6 に、深度画像を図 7 に示す。サンプルの 3D-CAD データと図 6、図 7 を三次元位置姿勢推定システムに入力し出力されたサンプルの三次元位置姿勢推定結果を図 8 に示す。サンプルに対してバウンディングボックス及びサンプル基準座標系での XYZ 軸が表示されており、カメラ座標系でのサンプル位置姿勢が推定できていることが確認できた。なお、深度画像は単チャネルの距離情報であり視認性が低いことから、視認性の向上を目的として、暗色ほど遠距離、明色ほど近距離を示すようカラー化して表示している。

4. 3. 把持実験の結果

本システムを用いて、1 回の把持毎にサンプル位置を移動させるようにする 10 回の把持実験を行ったところ、9 回の試行においてサンプルの把持に成功した。図 9 に把持成功結果の例を示す。失敗した 1 回の試行では、本システムがエラーにより中断し、エンドエフェクタが位置まで移動しなかった。また、図 9 に示すように、把持は成功しているがサンプルの軸中心から X 軸方向に 7[mm]程度ずれた位置を把持していることを確認した。

5. 考察

5. 1. 把持失敗原因について

エラーによる処理中断の原因について確認した結果、検査対象部品認識システムの処理実行中にプログラムが停止しているためであることが分かった。サンプル

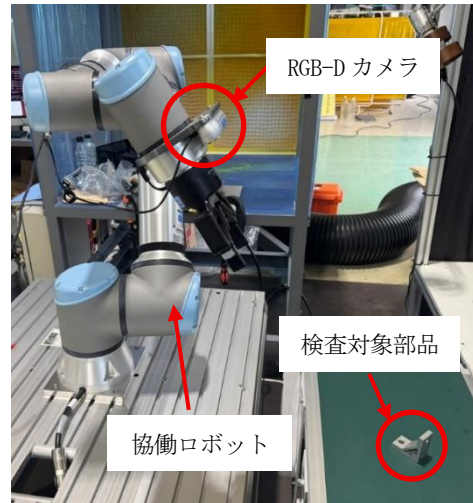


図 2 実験環境

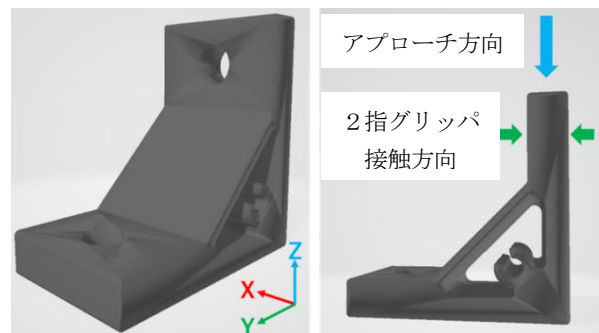


図 3 レンダリングした 3D-CAD データと把持動作の概要



図 4 RGB 画像



図 5 セグメンテーション画像

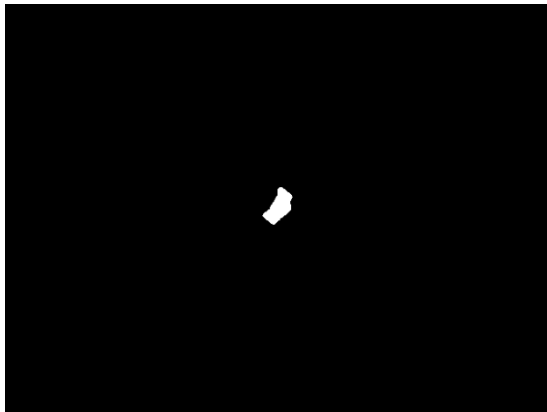


図6 マスク画像



図7 深度画像

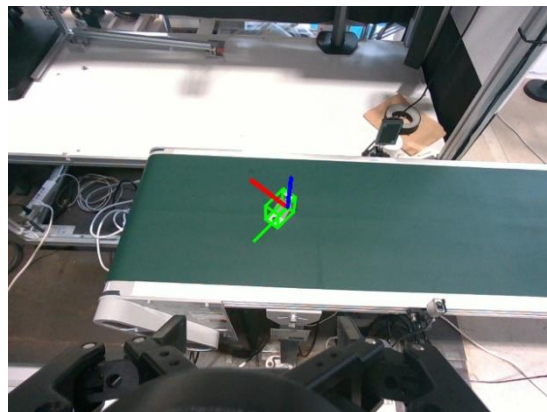


図8 三次元位置姿勢推定結果



図9 把持成功結果の例

領域のセグメンテーションに失敗しており、RGB 画像中からサンプル領域を特定できず、その後の三次元位置姿勢推定システムへの入力に必要なマスク画像が作成できないためであった。本研究で検査対象部品として用いたサンプルは金属製である。また実験時は特別な照明条件・設備は設けず RGB-D カメラにより撮影を行っていた。これより、セグメンテーションに失敗した原因としては、照明条件により太陽光の反射等が発生し、画像からサンプル形状の画像特徴量を適切に取得できなかったことが考えられる。この問題を解決する方法として、エラーが発生した場合には反射が発生しないように、サンプルを別視野から撮影するよう協働ロボットが動作をする機能を開発することが考えられる。

5. 2. サンプル把持位置の誤差について

サンプルの X 軸方向の把持位置に誤差が生じている一方、エンドエフェクタがアプローチする方向の姿勢については明らかな誤差は確認されていないことから、サンプルの位置姿勢推定結果をベース座標系に変換する同時変換行列のうち、エンドエフェクタとカメラ間の外部パラメータを表す T_{EC} の並進ベクトル t に誤差が生じていると考えられる。実験時はエンドエフェクタとカメラ間の回転は考慮せず、回転行列 R を単位行列 I とし、エンドエフェクタに対する RGB-D カメラ取付位置のオフセット距離を t とした T_{EC} を用いていたため、RGB-D カメラ筐体内の撮像素子の位置のずれ等を考慮していない。今後、チェッカーボードパターンを用いたハンドアイキャリブレーション (Hand-Eye Calibration) により導出した T_{EC} を用いて把持実験を行い、原因の確認を行う。

6. 結言

本研究では、画像認識及び姿勢推定技術等を活用した、煩雑なティーチング作業の必要無く協働ロボットのピッキング動作を可能とする本システムを構築し、実機把持実験を通じて本システムの有効性を確認した。

一方で、検査対象部品の把持位置に誤差が発生している等の課題も確認した。また現状のシステムには、生産現場の自動化でニーズの高いバラ積み部品のピッキングに必要な他部品との接触・干渉を考慮した経路計画及び動作軌道生成、検査対象部品の安定把持位置を自動推定する機能等が不足している。今後、追加実験の実施や機能の拡張を行い、本システムの高度化を図っていく。

参考文献

- 1) Nguyen, V. N.; et al. CNOS: A Strong Baseline for CAD-based Novel Object Segmentation. arXiv. 2023. <https://arxiv.org/abs/2307.11067>, (参照 2026-03-2).
- 2) Kirillov, A.; et al. Segment Anything. arXiv. 2023. <https://arxiv.org/abs/2304.02643>. (参照 2026-03-2).
- 3) Oquab, M.; et al. DINOv2: Learning Robust Visual Features without Supervision. arXiv. 2023. <https://arxiv.org/abs/2304.07193>. (参照 2026-03-2)
- 4) Wen, B.; et al. FoundationPose: Unified 6D Pose Estimation and Tracking of Novel Objects. arXiv. 2023. <https://arxiv.org/abs/2312.08344>. (参照 2026-03-2).
- 5) ur_ikfast. https://github.com/cambel/ur_ikfast.
- 6) Macenski, S.; et al. Robot Operating System 2: Design, Architecture, and Uses In The Wild. arXiv. 2022. <https://arxiv.org/abs/2211.07752>. (参照 2026-03-2).
- 7) MoveIt2. <https://moveit.picknik.ai/main/index.html>. (参照 2026-03-2).
- 8) OMPL. <https://ompl.kavrakilab.org/>. (参照 2026-03-2).