

組み立て作業の自動化に向けた 小型金属部品の識別および姿勢推定

○野崎 恭斗（信州大学） 辻 徳生（金沢大学） 鈴木 陽介（金沢大学）
渡辺 哲陽（金沢大学） 山崎 公俊（信州大学）

1. 諸言

近年、産業用ロボットの普及によって、人が行っていた作業のロボットによる自動化が進んでいる。現状の組み立て工程でのピッキングシステムでは、作業員や整列機で物品を整列させてからピッキングを行っている。しかし、整列機で整列させる場合、多品種少量生産を行う場合では、導入にコストがかかるという問題がある。また、作業員により整列させる場合、今後の労働人口の減少による人手不足、コストの増加が懸念される。よって、組み立て対象の部品の位置を認識、姿勢推定をすることができれば、形状の異なる様々な部品に対してピッキング作業を自動化し、さらに多くの工程に対応できるようになると考えられる。

従来から、生産ラインでの自動化に向けて、部品の点群を3次元距離画像センサで取得して姿勢推定、把持を行うシステムを構築する研究が多く行われている。林らによる研究では、部品に対して3次元距離画像センサを用いて計測し、3D-CADモデルと照合することで姿勢推定を行っている[1]。しかし、実際にロボットのハンドがワークを把持したとき、ハンドとワークの接触によって生じる誤差を考慮していない。荒井らの研究では、ばら積みされたボルトを対象とし、姿勢推定から把持を行っている。ばら積みされたボルトの間にハンドを挿入した際にボルトが微小に移動する場合があり、この微小な誤差を修正するため、専用の治具を用いている[2]。しかし、この方法では対象部品の形状に依存した治具を用いているため、様々な形状の部品を対象とした際、把持する際に生じる姿勢誤差を修正することができない。

本研究の目的は、様々な形状の部品を対象としてピッキングを行った際、ハンドと対象の部品の接触によって、把持の前後で生じる姿勢の誤差を考慮した、部品の識別および姿勢推定を行うシステムを構築することである。

2. 問題設定とアプローチ

2.1 問題設定

机上に置かれた部品を把持するためには、部品の識別を行い、部品の姿勢を知る必要がある。ここで、姿勢とは対象の位置と方位を合わせた表現である。本研究では、これらの情報を取得し、机上に置かれた部品をロボットの手先に取り付けたハンドで把持する。また、部品のはめあいなど把持した状態での部品の姿勢が必要な作業の自動化につなげるため、部品の把持した状態での姿勢を正確に推定することを目的とする。

本研究では、図1に示す18の部品を対象に識別を行

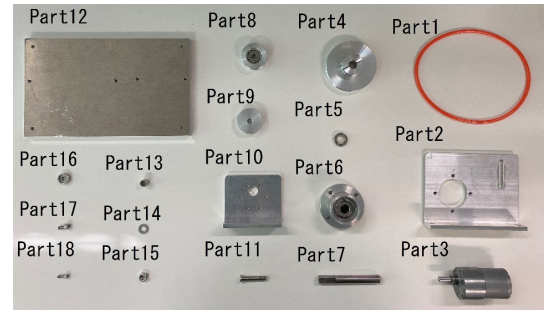


図1 対象部品

い、Part1を除く17の部品に対して姿勢推定と把持を行う。この中には軸とねじ、ワッシャとプーリなど小型で形状の近い部品があり、金属の光沢を持つものは角度によって見え方が異なることが、部品の検出、識別において課題となる。また、3次元距離画像センサで点群を取得した際には、金属の光沢によりノイズの点群が生じることあり、点群を用いた姿勢推定において課題となる。把持した状態の部品の姿勢は、把持する前の姿勢とマニピュレータによるハンドの姿勢の変化から推定することも可能だが、部品を把持する際に実際の部品の姿勢と誤差が生じることがある。さらに、ノイズの点群により把持する前の姿勢推定に誤差が入ると、想定通りに把持できないことも考えられる。認識している部品の姿勢と、実際の部品の姿勢に誤差がある場合、部品のはめあいなど高い精度を必要とする作業を自動化することが困難となる。そのため、把持後にも部品の姿勢を知ることが望ましいが、それをどう実現するかも課題である。

2.2 アプローチ

図2に本研究において構築したシステムを示す。カラー画像センサ、3次元距離画像センサが机の上方に設置されていて、カラー画像センサのカラー画像から部品の識別を行い、3次元距離画像センサから得た部品の点群から部品の姿勢推定を行う。また、ロボットの手先に取り付けられたハンドによって部品の把持を行う。対象とする部品には小型、類似した形状を持つものがあり、金属の光沢により角度によって見え方が異なるため、カラー画像からの部品の識別には、これに対応できる手法を用いる。3次元距離画像センサから得た点群に対しては、金属の光沢によって生じるノイズの点群を除去するため、外れ値除去を行う。また、把持した部品の姿勢推定における課題に対応するため、部品を把持した後、再度、部品を把持した状態での姿勢を推定する。把持した状態での部品の点群を取得する

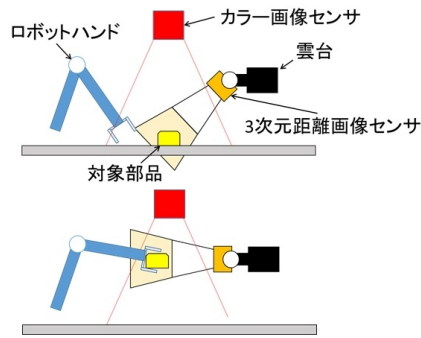


図2 構築したシステム

ため、3次元距離画像センサを雲台に取り付け、角度を変更できるシステムを構築した。雲台によって角度を変更した3次元距離画像センサの前に、ハンドによって把持した部品を移動させ、そこで再度、部品の点群を取得し、姿勢推定を行うことで部品の把持した状態での姿勢を推定する。

机上に置かれた部品の検出と識別、姿勢推定および把持した部品の姿勢推定の流れを以下に示す。

- (1) カラー画像センサから得たカラー画像から、対象の部品の検出と識別をする。
- (2) 上記(1)の結果に基づいて、3次元距離画像センサから得た点群から、対象の部品の点群を取得する。
- (3) 上記(1),(2)の結果に基づいて、対象の部品の姿勢を推定する。
- (4) 上記(3)の結果に基づいて、対象部品を把持する。
- (5) 雲台を用いて3次元距離画像センサの角度を変更し、ロボットハンドで把持した部品の点群を3次元距離画像センサで取得する。
- (6) 上記(5)の結果に基づいて、把持した部品の姿勢を推定する。

3. 小型部品の識別および姿勢推定

3.1 机上に置かれた部品の識別

本研究では、3次元距離画像センサから得た対象の部品の点群と、あらかじめ部品のCADデータから作成した点群をマッチングすることで、部品の姿勢推定を行う。3次元距離画像センサで得た机上の全体の点群から、対象の部品の点群を抽出するため、机上に置かれた部品を識別する必要がある。

机上に置かれた部品の検出と識別を行うためにYOLO[3]を使用した。YOLOは、ニューラルネットワークを用いて、入力した画像から、あらかじめ学習した物体の検出と識別を行う手法の1つである。図1に示した18種類の部品について様々な角度から撮影を行い、各部品ごとに200~500枚の画像データを収集し、識別結果の正解をあらかじめ与えるアノテーションを行った。このデータを、コントラスト調整、平滑化、Salt & Pepper ノイズ、モノクロ化、上下反転を組み合わせて、各部品ごとに13600~34000枚のデータに水増しを行い、学習に用いた。YOLOを用いて対象とした部品を検出した結果を図3に示す。YOLOを用いた部品の識別では、対象部品の中でも比較的大きな部品では、ある程度高い精度で識別を行えることが確認

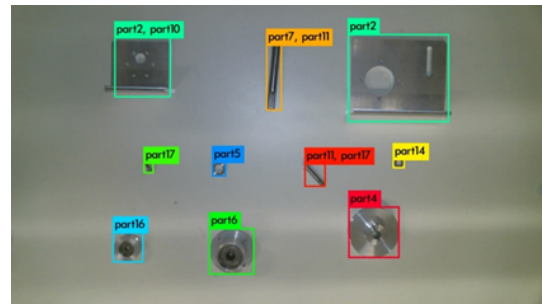


図3 YOLOの検出結果

できた。また、対象とした部品の中でも、ねじなどの小型の部品では検出と識別の精度が低い結果となった。

3.2 部品の姿勢推定

前節で述べた通り、本研究では、3次元距離画像センサから得た対象の部品の点群と、あらかじめ作成した部品の点群をマッチングすることで姿勢推定を行う。このマッチングによる姿勢推定に、Super4PCS[4]を使用する。Super4PCSは、入力した2つの点群同士の位置合わせを行い、変換行列を得る手法の1つである。以下に、姿勢推定の手順を示す。

- (1) YOLOの結果から得た、机上に置かれた部品の識別の結果を用いて、3次元距離画像センサから得た机上の点群から対象とする部品の点群のみを切り取る。
- (2) 上記(1)で切り取った点群に対して、ダウンサンプリング、机の点群を取り除くための平面除去、ノイズの点群を除去するためのフィルタリングを行う。
- (3) 上記(2)で得た点群と、あらかじめCADデータから作成したリファレンス点群の間でSuper4PCSを用いて位置合わせを行い、変換行列を得る。
- (4) 上記(3)で得た変換行列を用いてリファレンス点群の姿勢を変換し、再度(2)で得た点群との間でSuper4PCSを用いて位置合わせを行い、変換行列を得る。

この手順で変換行列を得ることで、机上に置かれた対象の部品の姿勢を推定する。

3.3 把持計画

本研究では、2指ハンドを用いて机上に置かれた対象の部品の把持を行う。ハンドで対象の部品を把持するためには以下の二つの情報が必要となる。

- ハンドを移動させる座標。
- ハンドの手先角度。

ハンドを移動させる座標については、姿勢推定から得た変換行列を用いて変換を行ったリファレンス点群の重心座標を、ハンドを移動させる座標とする。ハンドの手先角度については、姿勢推定から得た変換行列を用いて変換を行ったリファレンス点群を、図4に示すように $\Delta\theta$ ごと回転させ、 x 軸方向の範囲が最も小さくなる θ を求める。図4に示すように $-\theta$ を、ハンド手先の角度とする。本研究では、以上の方法でハンドを移動させる座標、ハンドの手先角度を決定することで対象の部品を把持する。

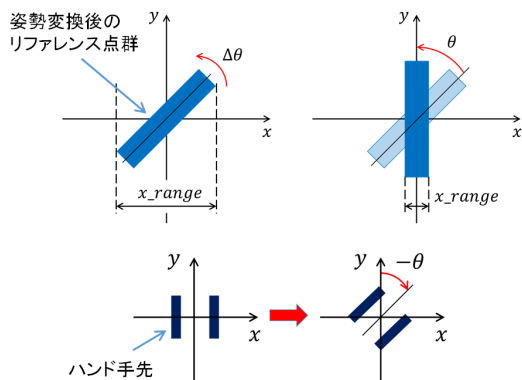


図4 把持計画



図5 ハンドを含む点群

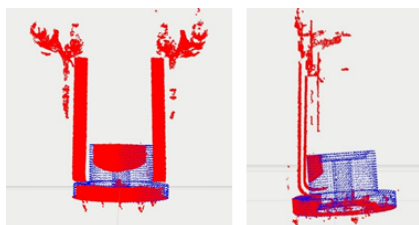


図6 姿勢変換後の点群を重ねた点群

3.4 把持した部品の姿勢推定

把持計画により得た座標にロボットの手先を移動させ、ハンドの手先角度を把持計画で得たハンド手先の回転角にし、把持を行う。さらに、図2に示した通り、ハンドで把持した状態の部品の点群を3次元距離画像センサによって取得する。この取得した点群の例を図5に示す。この点群から、あらかじめ得たハンドの開き幅、ハンドの座標を用いてハンドの点群を切り取る。この点群をSuper4PCSに入力し、把持した部品の姿勢推定を行う。これにより得た変換行列を用いて姿勢変換を行ったリファレンス点群と、3次元距離画像センサから得た点群を重ねて表示したものを図6に示す。これより、把持した部品についても姿勢推定が行えていることがわかる。

また、図7に小型の部品で把持した状態での姿勢推定を行った結果を示す。この図から、対象部品の中で、比較的小型なワッシャやプーリ、ねじなどの部品でも把持した状態で姿勢推定が行えていることがわかる。

4. 実験

前章までに述べた手法を検証するため、以下に示す実験を行った。実験を行うため、図2に示すシステムにおいて、ROBOTIQ社製の2指ハンド、2F-140 Adaptive Gripperをハンドとして用いた。さらに、3次元距離画

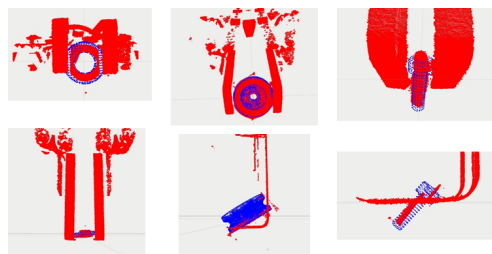


図7 小型部品での把持した状態での姿勢推定

像センサとして、Photoneo社製、PhoXi 3D Scannerを用いた。マニピュレータは、ユニバーサルロボット社製のUR5eを用いた。

4.1 実験方法

4.1.1 姿勢推定、把持実験

実験における把持対象を、図1に示した対象部品の中のモータ、ねじ、軸の3つの部品とした。姿勢推定の成否は、姿勢推定の結果で得た変換行列によって姿勢変換したリファレンス点群と、3次元距離画像センサから得た部品の点群を重ねて表示し、目視で確認して判定することとした。モータでは出力シャフト、ねじでは頭の向きが一致していること、軸においては本手法でDカットの位置を判定することは困難であったため、Dカットの向きに関わらず、軸の方向が一致していることを成功の条件とした。また、把持の成功条件は、ハンドの開き幅を対象の部品の直径の1.5倍として把持対象の直径方向を把持できていることとした。

- (1) 把持対象を机上に置く。
- (2) YOLO, Super4PCSを用いた姿勢推定を行う。
- (3) ハンドによる把持。
- (4) 36度回転させ、10回繰り返す。

4.1.2 姿勢推定結果の比較実験

部品の姿勢推定を行う際、ねじや軸を対象とした際に、端面が3次元距離画像センサを向き、得られる点群が少ない場合に姿勢推定が失敗することがある。また、対象とする部品は光沢をもつため、3次元距離画像センサと対象部品のなす角度によってはノイズの点群が生じ、同じく姿勢推定が失敗することがある。

この対策として把持した部品の姿勢推定を行う際、複数の角度で姿勢推定を行い、上に示した理由などで複数回のうち1回で姿勢推定が失敗しても、姿勢推定の結果が一致したほかの結果から正しい姿勢を推定する方法を考案した。

この方法では、姿勢変換後のリファレンス点群同士でICPを用いて位置合わせを行う。この結果を比較することで、3つの姿勢推定の結果で2つが正しければ、1つがノイズ、端面などの影響で姿勢推定が失敗していても、正しい姿勢を推定する。実験の手順を以下に示す。

- (1) 対象部品をハンドによって把持する。
- (2) 雲台により3次元距離画像センサの角度を変更する。
- (3) 3次元距離画像センサに対するハンドの角度を、90[deg], 60[deg], 30[deg]に変更し、それぞれで3

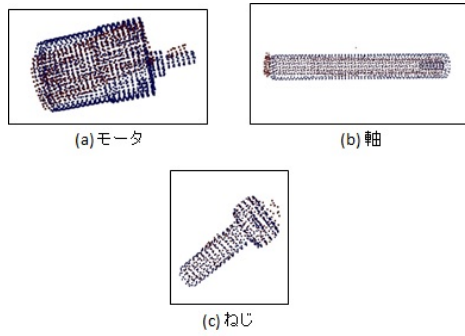


図8 位置合わせ後の点群

次元距離画像センサにより点群を取得する。

- (4) 取得したそれぞれの点群に対し姿勢推定を行う。
- (5) 姿勢推定の結果から得られた変換行列を用いて、姿勢変換したリファレンス点群同士で、位置合わせを行う。

3次元距離画像センサに対して90[deg]で部品を見せたとき、軸の端面の点群のみが3次元距離画像センサで取得されるため、姿勢推定は失敗する。それに対し、60[deg]、30[deg]で見せたときには軸の側面の点群を取得できるため、姿勢推定は成功する。この失敗した姿勢推定の結果と、成功した姿勢推定で得られた変換行列を用いて姿勢変換を行った後の部品の点群の間で位置合わせを行う。

4.2 実験結果

4.2.1 姿勢推定、把持実験-結果

表1にモータ、軸、ねじを対象とした際の実験結果を示す。また、図8に、成功時の位置合わせ後の点群、図9にモータ、ねじを対象とした際の失敗時の位置合わせ後の点群を示す。

表に示す通り、3つの部品を対象としたとき、姿勢推定、把持ともに約90%で成功した。また、位置合わせ後の点群の図から、リファレンス点群と、3次元距離画像センサから取得した点群は概ね一致していることがわかる。

図9より、姿勢推定が失敗したときは、成功したときに比べて取得した点群にノイズが多く生じていることがわかる。Super4PCSにより変換行列を求める前に、ダウンサンプリング、外れ値除去などの前処理でノイズの点群を除去する処理を行ってはいいるが、外れ値除去で除去しきれない密度でノイズの点群が生じていると考えられる。また、今回、3次元距離画像センサとして用いたPhoXi 3D Scannerでも、光沢のある対象物から点群を取得する際に、光沢のある面とセンサのなす角度によってはノイズの点群が多く生じていることがわかっていて、このことから、姿勢推定の対象とする部品の置かれた角度によっては、3次元距離画像センサから取得した点群にノイズが生じ、姿勢推定に失敗することがあると考えられる。

4.2.2 姿勢推定結果の比較実験-結果

表2に、姿勢推定結果の比較実験の結果を示す。姿勢推定が成功した30[deg]、60[deg]での点群をそれぞれ成功点群1、成功点群2とする。また、端面の影響で

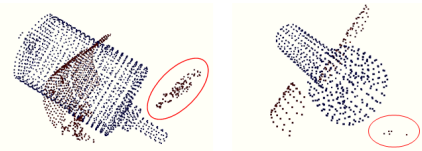


図9 姿勢推定 失敗

表1 姿勢推定、把持実験-実験結果

対象部品	姿勢推定にかかった時間 (平均) [s]		姿勢推定成功率 [%]	把持成功率 [%]
	1回目	2回目		
モータ	18.3	17.3	80	90
軸	6.91	6.68	90	90
ねじ	23.9	17.1	90	90

表2 変換行列から求めた最大のオイラー角

参照点群 入力点群	成功点群1 (30[deg])	成功点群2 (60[deg])	失敗点群 (90[deg])
成功点群1 (30[deg])		3.15 [deg]	67.6 [deg]
成功点群2 (60[deg])			69.9 [deg]

姿勢推定が失敗した90[deg]での点群を失敗点群とする。これより、成功した点群と失敗した点群で位置合わせを行った結果から得た最大のオイラー角が、成功した点群同士で位置合わせを行った結果よりも、大きな値となっていることがわかる。よって、3つの姿勢推定の結果の中で1つで姿勢推定が失敗していても、成功した2回の結果と比較することで、正しい姿勢を推定することができることがわかる。

5. 結言

本研究では、机上に置かれた部品の検出、識別、姿勢推定およびロボットの先端に取り付けたハンドによる把持を行った。さらに、部品を把持した後、再度、部品を把持した状態での姿勢を推定することで、部品を把持する際に生じる姿勢の誤差を考慮した姿勢推定を行った。今後は、部品の穴位置などを高精度に取得する方法についても検討する予定である。

参考文献

- [1] 林俊寛, 曾根原光治, 井之上智洋, 島輝行, 河野幸弘: “三次元物体認識技術に応用したパラ積みピッキングシステムの開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演, 1A1-G06, 2008.
- [2] 荒井翔悟: “ピンピッキング&キッティングのためのロボットシステム”, 日本ロボット学会誌, vol.37, no.10, pp.938-942, 2019.
- [3] Joseph Redmon, Santosh Divvala, Ross Girshick, Ali Farhadi: “You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection”, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp.779-788, 2016.
- [4] Nicolas Mellado, Niloy Mitra, Dror Aiger: “Super 4PCS Fast Global Pointcloud Registration via Smart Indexing”, Computer Graphics Forum, vol. 33, pp.205-215, 2014.