

# ビジョンシステムを用いた非均一な形状の平面物体の認識に関する研究

## Recognition of Non-uniform Planar Objects Using Vision System

○下村尚道, 沓澤京, 林部充宏

○Naomichi Shimomura, Kyo Kutsuzawa, Mitsuhiro Hayashibe

東北大学

Tohoku University

**キーワード:** 画像処理 (Image processing), カメラキャリブレーション (Camera calibration), 産業の自動化 (Factory automation), ロボティクス (Robotics), 位置姿勢推定 (Pose estimation)

**連絡先:** 〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01 東北大学 青葉山キャンパス 機械系共同棟 312 下村尚道, Tel.: 022-795-6916 E-mail: shimomura.naomichi.q8@dc.tohoku.ac.jp

## 1. 緒言

近年先進国での少子高齢化が進んでおり<sup>1)2)</sup>、労働力の不足が深刻な問題となりつつある。そのため製品の生産ラインにおいて自動的に生産を行うシステムの需要が高まっている。このとき同じ規格のものを大量生産するだけでなく、多品種少量生産をするシステムの構築をすることで余剰を出さない生産が可能となり、環境負荷や生産コストの削減につながる。金属のような固い立体物への加工はすでに多くの研究がある<sup>3)4)5)</sup>が、紙や布といった柔らかく平面的な物体の加工に関する研究はまだ少ない。そこで柔軟な平面物体を対象にした加工のための研究を行った。

本研究ではカメラとマニピレータを組み合わせることで、加工対象がどのような位置姿勢で置かれていても精度高く適切に加工するシステムの構築を目指す。本研究の最終的な目的はマニピレータの手先に適切なエンドエフェク

タを取り付けることで、無造作に置かれた対象物を加工し均一な品質の生産品を量産することである。対象物は位置決めをせずに乱雑に置かれることを想定する。コンピュータビジョンを用いることで加工対象とマニピレータのそれぞれの位置姿勢を推定した。そしてペンで対象物上の目標線をなぞることで、推定の精度を確認した。

また実際の生産現場においては加工対象となる物体の形状が製造のムラによりひとつづつ僅かに異なることが考えられる。このような非均一な形状の平面物体に対して加工を施し、均一な製品を量産する手法を提案する。

## 2. 手法

### 2.1 座標系の定義

加工する平面物体として紙を用いる。マニピレータの根本に固定された base 座標系、カメ



Fig. 1 座標系の定義. Definition of coordinates.

ラに固定された cam 座標系、マニピレータの手先に固定された gripper 座標系、紙に固定された paper 座標系の 4 つの座標系を Fig.1 のように定義する。

## 2.2 実験の概要

対象物がどのような位置姿勢にあっても適切な加工を行うためには paper 座標系から base 座標系への同次変換行列  ${}^{base}T_{paper}$  を推定する必要がある。そのため cam 座標系から base 座標系への同次変換行列  ${}^{base}T_{cam}$  と、paper 座標系から cam 座標系への同次変換行列  ${}^{cam}T_{paper}$  を求める実験をそれぞれ行う。2 つのデータを組み合わせることにより式 (1) のように計算して  ${}^{base}T_{paper}$  が求まる。

$${}^{base}T_{paper} = {}^{base}T_{cam} {}^{cam}T_{paper} \quad (1)$$

## 2.3 実験に使用するハードウェア・ソフトウェア

実験で使うカメラは Intel 製の RealSense Depth Camera D435 を用いる。また、マニピレータは DENSO 製の VS068 を用いる。画像解析及び



Fig. 2 ハンドアイキャリブレーション. Hand-eye calibration.

点群処理には python の OpenCV と Open3D ライブラリを用いる。

## 2.4 ハンドアイキャリブレーション

cam 座標系から base 座標系への位置姿勢関係を表す同次変換行列  ${}^{base}T_{cam}$  を推定するためのハンドアイキャリブレーションを行う。キャリブレーションには Shah の提案する手法<sup>6)</sup>を用いた。

キャリブレーションでは 1.6cm の正方形を  $7 \times 8$  個配置したチェッカーボードを手先に取り付けて行った。チェッカーボードがカメラの画角の中心に映る場所を基準として x, y 方向にそれぞれ -60mm, 0mm, +60mm、x, y, z 軸回りにそれぞれ -25 度, 0 度, +25 度回転させた計  $3 \times 3 \times 3 \times 3 = 243$  通りの位置姿勢で撮影し解析することで  ${}^{base}T_{cam}$  を求めた。

## 2.5 紙の位置姿勢推定

paper 座標系から cam 座標系への位置姿勢関係を表す同次変換行列  ${}^{cam}T_{paper}$  を推定する。

カメラ直下の黒く塗った作業台上にチェッカーボードを置き、Madsen の提案する手法<sup>7)</sup>を用

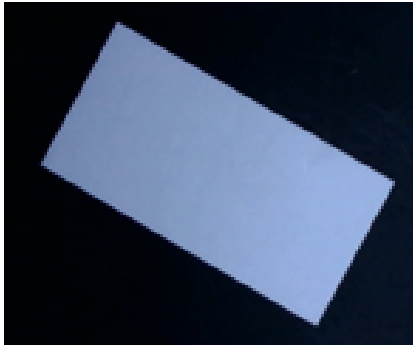


Fig. 3 カメラで撮影した紙. Paper taken by the camera.

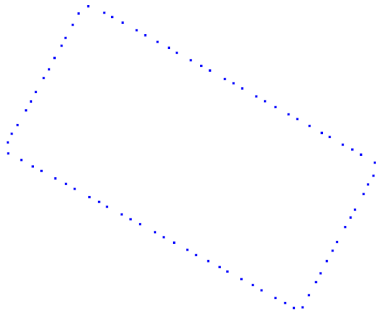


Fig. 4 紙の縁の点群 (ターゲット点群). Point cloud of paper's edge (Target point cloud).

いて作業台の位置姿勢を求める。次に  $15\text{cm} \times 7.5\text{cm}$  の長方形の紙を作業台上に置きカメラで撮影する (Fig. 3)。その画像を二値化して縁の部分のみを抽出し、作業台上にあるという想定の下で紙の縁を3次元点群化してターゲット点群を作成する (Fig. 4)。その後同じく  $15\text{cm} \times 7.5\text{cm}$  の長方形のソース点群を作成しカメラに正対する姿勢でターゲット点群付近に置く (Fig. 5)。

両点群の位置合わせには ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズム<sup>8)</sup>を用いる。これはソース点群の各点において最も近いターゲット点群の点に対応付け、対応付けた点間距離の総和が最小になる変換の計算を閾値以下になるまで繰り返す手法である。ICP アルゴリズムを用いてソース点群を移動して2つの点群を重ね合わせ (Fig. 6)、ソース点群移動量を調べることで paper 座標系と cam 座標系の位置姿勢関係を推定する。

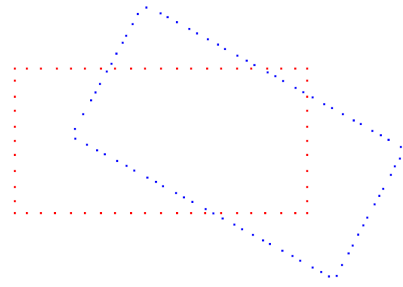


Fig. 5 ターゲット点群とソース点群. Source point cloud and target point cloud

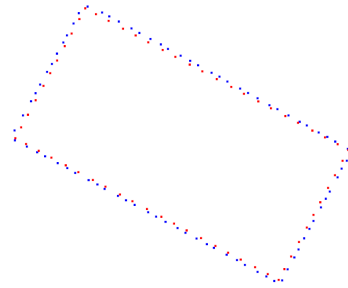


Fig. 6 ICP アルゴリズムにより重ね合わせたターゲット点群とソース点群. Target point cloud overlaps on source point cloud.

## 2.6 推定精度の検証

2つの推定により求めた  ${}^{base}T_{paper}$  の精度を検証するために、紙上の目標線をなぞる実験を行った。Fig. 7のように紙面上に paper 座標系の原点を通り、x 軸に平行になるように  $80\text{mm}$  の目標線を描き、マニピレータに持たせたペンがどの程度精度よくこの線をなぞれるかを確かめた (Fig. 8)。(注：紙の位置推定に用いているのは目標線ではなく紙の輪郭である)

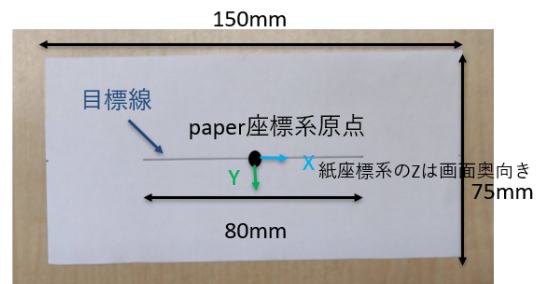


Fig. 7 実験で使う紙. Paper used for experiment



Fig. 8 紙に線を描く実験. Experiment that machine write a line on paper

## 2.7 不均一な形状の物体の位置推定

加工したい平面物体が製造のムラなどにより想定よりわずかに大きい場合を考える。このとき、折りつけや裁断などの加工を物体に施し作りたい形状にするには、加工済みの辺を基準に次の加工する線を決めるのが有効である。そうすることで製造のムラは折りしろまたは切りしろに吸収され、均一な製品の生産が可能になる。そこで不均一な平面物体の一边を加工したものとして、Fig. 9の紙を用いて実験を行う。

加工済みの一边の点群のみを用いてICPアルゴリズムで位置合わせをした場合、その辺を軸にして回転する自由度を持ってしまい、ソース点群がターゲット点群の平面上に乗るとは限らない。そこで加工済みの辺の点群に重み付けをして位置合わせをすることで、加工済みでない辺も位置姿勢推定に使われるようにした。重み付けICPは確立されたアルゴリズムがないため、ソース点群のうち加工済みの辺に対応する点群を同じ座標に5つ重ねて複製することで他の辺より5倍重みづけし、加工済みの辺に合わせて位置推定できるようにした。

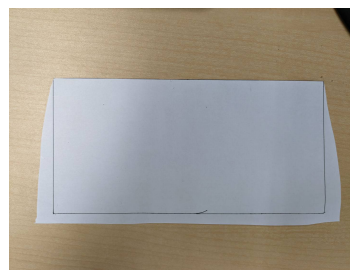


Fig. 9 上辺が加工済みの不均一な平面物体. Paper processed only on the top edge.

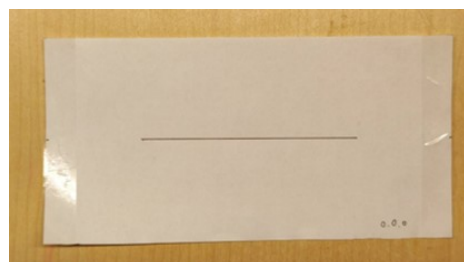


Fig. 10 赤いペンで目標線をなぞる実験の結果. Result of experiment tracing the target line with a red pen.

## 3. 実験結果

### 3.1 目標線をなぞる実験の結果

推定により求めた  ${}^{base}T_{paper}$  を使って紙上の目標線をなぞる実験の結果を Fig. 10 に示す。ペンは目標線上を正確になぞることができた。ペンの太さは0.5mmなので0.5mm以下の精度で  ${}^{base}T_{paper}$  を推定していることがわかった

### 3.2 不均一な平面物体の位置推定の結果

一边のみ加工済みの不均一な平面物体のターゲット点群と、一边のみに重み付けをしたソース点群をICP位置合わせをした結果を Fig. 11 に示す。上辺に合わせて位置姿勢推定ができていたことが確認できた。

## 4. 結言

ここまでの研究により、高い精度で平面物体の位置姿勢を推定することができた。また、工場などで想定されるような不均一な材料を用い

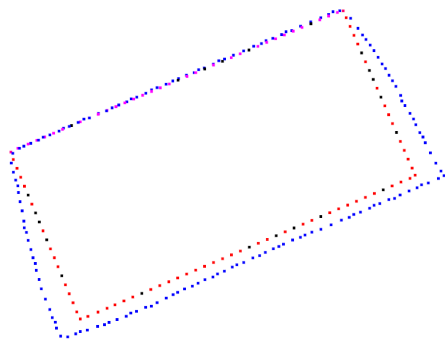


Fig. 11 一辺のみ加工した不均一な平面物体のICP位置合わせによる位置姿勢推定. Position and pose estimation by ICP registration of inhomogeneous planar object processed on one side.

て均一な製品を量産するための位置姿勢の推定法を提案し、有効であることが確認された。今後はこのシステムを用いてマニピレータに適切なエンドエフェクタを装着することで、平面物体を折りつけや裁断する研究を続けていく。

## 参考文献

- 1) Statistics Bureau, Ministry of Internal Affairs and Communication, Chapter 2: Population and Households, Japan Statistical Yearbook 2022, [Retrieved 6 January 2022]
- 2) W. He, D. Goodkind, P. Kowal: An Aging World: 2015 International Population Reports, (2016)
- 3) Michelle L. Griffith, Lane D. Harwell, 1. Tony Romero, Eric Schlienger, Clint L. Atwood, and John E. Smugeresky: MULTI-MATERIAL PROCESSING BY LENS
- 4) Malinauskas, Mangirdas: Ultrafast laser processing of materials: From science to industry: Light: Science & Applications (2016) 5
- 5) Dharani Sowdari, Pradip Majumdar: Finite element analysis of laser irradiated metal heating and melting processes, Optics & Laser Technology 42 (2010)
- 6) Mili Shah: Solving the robot-world/hand-eye calibration problem using the kronecker product: Journal of Mechanisms and Robotics, (2013), 5(3)
- 7) K. Madsen, H. B. Nielsen, and O. Tingleff. Methods for non-linear least squares problems (2nd ed.), 2004.
- 8) Arun, Somani; Thomas S. Huang; Steven D. Blostein (1987). "Least-square fitting of two 3-D point sets". IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence. 9 (5): 698–700.