

# リアルタイムシミュレータを用いる 産業用ロボットと三次元計測センサのキャリブレーション

○二宮 悠二, 田中 良道, 有田 裕太, 西田 健 (九州工業大学)

## Calibration of industrial robot and 3D measurement sensor using real time simulator

○ Yuji Ninomiya, Ryodo Tanaka, Yuta Arita, and Takeshi Nishida (Kyushu Institute of Technology)

**Abstract:** We propose a calibration method of 3D measurement sensor using real-time simulator. Moreover we show the results of applying the method to the real system and verifying its effectiveness. In this method, the relative posture of the real sensor is estimated by obtaining the rigid body coordinate transformation that associates the virtual and the real sensor in real time.

### 1. はじめに

産業用ロボットの自律化において、作業領域における空間及び作業対象物体の認識は重要である。その計測するセンサとして、カメラやLiDAR、光学測距機器などが用いられ、それらのキャリブレーションは主として特定の校正環境における手作業により実行される。従来のキャリブレーション手法としては、チェッカーボードを用いる手法<sup>[1,2]</sup>や三次元反射マーカを利用する手法<sup>[3]</sup>が一般的であり、特殊な部品やマーカを環境に配置する必要がある。また、センサの位置ずれに対する再調整の手間も問題となる<sup>[4]</sup>。そこで本研究では、特殊なマーカを利用することなく、センサの位置ずれにも対応できる自動キャリブレーション手法を提案する。具体的には、まず、産業用ロボットの姿勢を逐次的かつ高精度に計測可能であることを利用して、仮想の産業用ロボットをリアルタイムシミュレータで再現する。また、リアルタイムシミュレータ内に仮想の計測センサを生成し、仮想ロボットの表面形状の計測データを発生させ、これを「仮想計測データ」と呼ぶ。そして仮想計測データと実際の計測データを関連付ける剛体座標変換を推定することで、計測センサの真の位置と姿勢を推定しキャリブレーションを行う。以下では、提案手法の詳細と、それを実際のシステムに適用した場合の精度と効果について検証した結果を述べる。

### 2. システム

#### 2.1 システムの構成

本研究で構築したシステムの概要を Fig.1 に示す。産業用ロボット (MOTOMAN-SIA5) と作業台があり、その周辺に設置された RGB-D カメラ (Kinect V2) によって、ロボットを含めた作業領域を計測する。ここでは、ロボットにより、指定された対象物を指定された搬送用の箱に分別する物品の箱詰め作業を想定する。

次に、システムの信号の流れを Fig.2 に示す。RGB-D

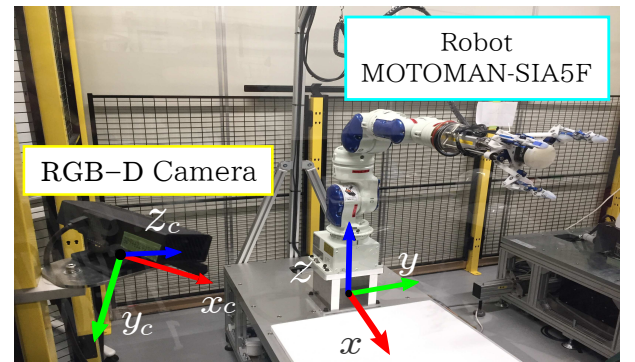


Fig. 1: System Overview and coordinate systems of MOTOMAN-SIA5F and Kinect V2.

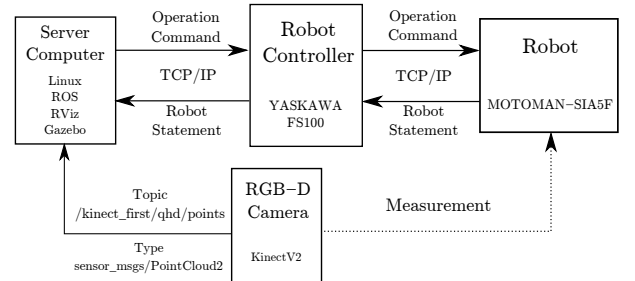


Fig. 2: Signal flow in the system.

カメラによる三次元計測データとロボットの姿勢がサーバに伝送される。またサーバは、制御信号をロボットに送信することができる。さらに、サーバ内部では、それらの信号を利用して、リアルタイムシミュレータに実機と連動したロボットやセンサを再現し、その動作の確認や操作ができる。本システムの構築には ROS (Robot Operating System) を利用した。

#### 2.2 座標系とセンサデータ

本研究で用いるロボットおよびセンサの座標系の関係を Fig.1 に示す。まず、ロボットに固定された座標系と世界座標系を一致させ  $\Sigma_W$  とする。また、RGB-D カメラの

座標系を  $\Sigma_C$ , 仮想センサの座標系を  $\Sigma_{\hat{C}}$  とする. RGB-D カメラの計測データは, ユークリッド空間の三次元点の集合であるポイントクラウドデータ (PCD: point cloud data) として得られる.

### 3. キャリブレーション手法

#### 3.1 手法の流れ

提案するキャリブレーション手法の流れを Fig.3 に示す. これらの一連の処理はすべてのサーバで実行される.

まず, ロボットの姿勢を受信し, リアルタイムシミュレータで構成した仮想空間に仮想ロボットを再現する. 次に, 仮想の RGB-D センサ (仮想センサ) を任意の初期位置と姿勢で仮想空間に生成する. 初期姿勢が既知であれば, 後述の処理を高速化することができる. この仮想空間では, 仮想センサにより仮想ロボットの三次元計測を行い, 「仮想計測データ」を生成することができる. また, この処理と並行して, 現実の RGB-D センサ (実センサ) からの「実計測データ」を取得する.

続いて, 仮想計測データと実計測データから, ロボット周囲の PCD を切り出す. この処理は, PCD に含まれる点群から平坦な作業台面などを除き, 複雑な表面形状を持つロボットの計測データのみを利用することで, 位置合わせの精度を向上させるための工夫である. またこの時, 必要に応じて計算量の削減のために, ダウンサンプリングにより PCD に含まれる点数を減ずる. これらの前処理の後に, ICP アルゴリズムを適用して, 仮想計測データと実計測データを関連付ける剛体座標変換を推定し, キャリブレーションを終了する.

#### 3.2 仮想ロボットの仮想計測データの生成

仮想センサで計測される仮想ロボットの PCD を生成するために, PCL (Point Cloud Library) のリファレンスファイル「mesh\_sampling」に含まれる「uniform\_sampling 関数」を用いた. この関数により, 産業用ロボットの CAD データの表面形状に沿って PCD を生成した.

#### 3.3 剛体座標変換の推定

ロボット周辺の実計測データを  $A = \{a_i\}_{i=1}^N$  と表す. ここで,  $a_i \in \mathbb{R}^3$  は三次元点を表し,  $i$  は点のインデク

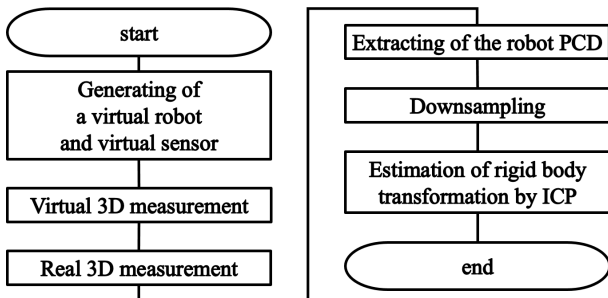


Fig. 3: Calibration flow of proposed method.

ス,  $N$  は三次元点の総数を表す. また, 仮想計測データを  $B = \{b_j\}_{j=1}^M$  と表す.

実計測データ座標系  $\Sigma_C$  から仮想データ座標系  $\Sigma_{\hat{C}}$  を関連付ける回転行列  $R$  と並進ベクトル  $t$  を求めるために, ICP アルゴリズム<sup>[8]</sup>を採用した. この手法は, 所与の初期値から, 非線形な誤差関数の最適化を行う. 以下では本手法の概要を示す.

まず, 点  $a_i \in A$  から点集合  $B$  への距離を次のように定義する.

$$d(a_i, B) = \min_{b_j \in B} \|b_j - a_i\| \quad (1)$$

実計測データおよび仮想計測データの重心をそれぞれ  $u_a$ ,  $u_b$  とし, 以下の操作により, 各点集合の重心を  $0$  に一致させた  $A'$  と  $B'$  を生成する.

$$A' = \{a'_i = a_i - u_a\}, B' = \{b'_j = b_j - u_b\} \quad (2)$$

$A'$  の要素を並べて行列  $A' \in \mathbb{R}^{3 \times N}$  を生成する. さらに,  $A'$  の各要素点と式 (1) の距離が最短となる対応点  $b'_j$  を並べて行列  $B' \in \mathbb{R}^{3 \times N}$  を生成する. 回転行列  $R$  は次の特異値分解により得られる.

$$B' A'^T = U \Sigma V^T \quad (3)$$

$$R = V S U^T \quad (4)$$

$$S = \text{diag}(1 \ 1 \ |V U^T|) \quad (5)$$

である. さらに, 並進ベクトルは次のようにして求ることができる.

$$t = u_b - R u_a \quad (6)$$

剛体座標変換後の二つの点集合の距離は以下で表される.

$$E(R, t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d(a'_i, B') \quad (7)$$

この値が閾値を下回るまで, 対応点を更新しながら式 (3) から式 (5) を繰り返す.

ICP アルゴリズムの初期値には, 大まかな実計測によって得た値を利用する. これらの剛体変換の対応を Fig.4 に示す. ICP アルゴリズムによって, 計測した点群  $A$  とモデル点群  $B$  を与えると, それらを関連づける剛体座標変換パラメータ  $(R, t)$  が推定される.

#### 3.4 キャリブレーションのための座標変換推定

以下の順に座標変換の推定を行う.

1. 前処理された仮想計測三次元点群  $A \in \Sigma_{\hat{C}}$  と実計測点群  $B \in \Sigma_C$  が与えられる.
2.  $\Sigma_{\hat{C}}$  と  $\Sigma_W$  は仮想空間にあるので, それらを関連付ける座標変換  $({}^W_C R, {}^W_C t)$  は既知.
3.  $A$  を  $B$  に一致させる座標変換  $({}^C_C R, {}^C_C t)$  を推定する.

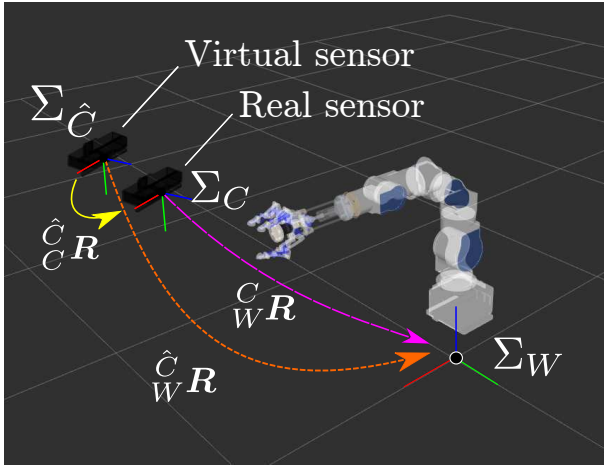


Fig. 4: Relationship of each coordinate system.

Table 1: Comparison of parameters accuracy of the installation position of the RGB-D camera

Parameter	Estimation	Grand truth	Error
$x$ [m]	0.714	0.714	0.000
$y$ [m]	-0.634	-0.638	0.004
$z$ [m]	0.547	0.532	0.015
$\phi$ [rad]	-0.062	-0.036	-0.026
$\theta$ [rad]	0.319	0.309	0.009
$\psi$ [rad]	2.046	2.046	0.000

4. キャリブレーション結果として,

$${}^W_C \mathbf{R} = {}^W_C \mathbf{R} \cdot {}^C_C \mathbf{R}^T \quad (8)$$

$${}^W_C \mathbf{t} = {}^W_C \mathbf{t} - {}^C_C \mathbf{t} \quad (9)$$

を得る.

#### 4. 実験

提案手法を Fig.1 に示したシステムに適用し, キャリブレーションを行った. その精度を検証した結果を Table 1 に示す. この結果より, 位置の推定誤差は最大約 16 mm, 姿勢の推定誤差は最大で約 0.026 deg であった. また, キャリブレーションの概要を視覚化した図を Fig.5 に示す. 図中には, 実物のロボットから得られた関節角度情報をモデルの各関節角度と一致させることで, シミュレータ内に仮想の産業用ロボットを再現している. 同図のオレンジ色で示された点群は, キャリブレーション後の仮想センサにより仮想ロボットを計測した仮想計測点群を示している. 仮想センサの座標系が, 初期位置から実センサの座標系にほぼ一致する位置に修正されたことがわかる.

次に, キャリブレーションによって修正された実センサの計測の様子を Fig.6 に示す, 同図 (a) は, 実センサの座標系をある初期値で仮定したときの実計測データと, 真の位置関係にある仮想ロボットを重ねて表示している. キャ

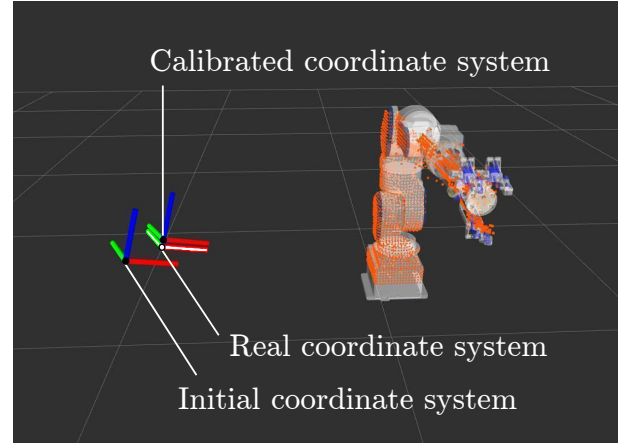
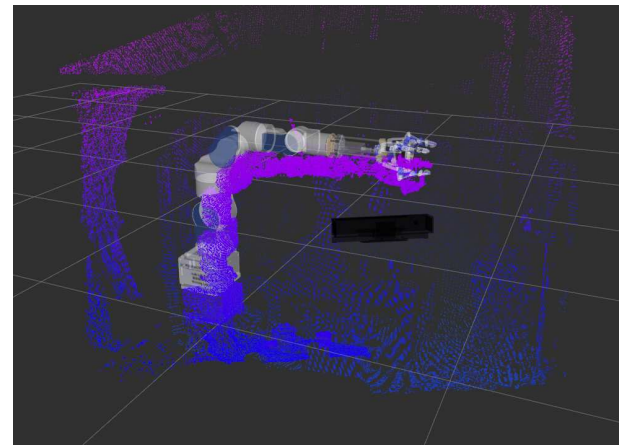
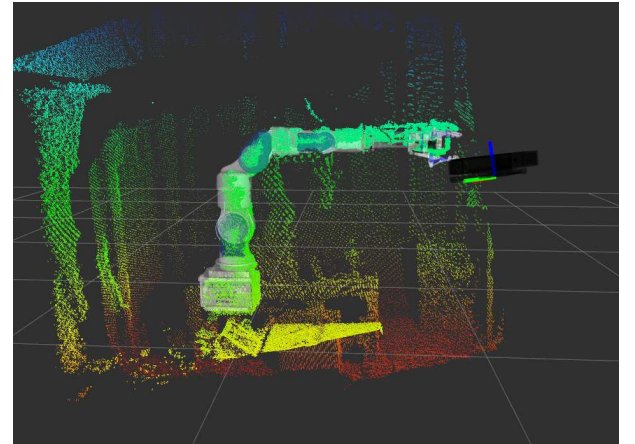


Fig. 5: Comparison of the estimated accuracy of on the simulator



(a) Initial position.



(b) After calibration.

Fig. 6: Example of the calibration.

リブレーション後には, 同図 (b) のようにロボットを含めた周囲の計測が適切に行われていることがわかる.

#### 5. まとめ

リアルタイム物理シミュレータを利用することで, 特殊なマーカを必要としないセンサの自動キャリブレーション

ン手法を提案した。本手法は、ROS によって仮想の産業用ロボットをリアルタイムシミュレータで再現し、仮想計測センサと実計測データを関連付ける剛体座標変換を推定することでキャリブレーションを行う。また、産業用ロボットと RGB-D カメラから成る実システムに提案手法を適用し、その有用性を検証した。その結果、位置誤差は 16 mm 以下、姿勢角誤差は 0.026 deg 以下でキャリブレーションが行われることが確かめられた。また、本手法は逐次実行することが可能であり、機械振動などによるセンサの位置ずれに即座に対応可能であるという特長を有する。

## 参考文献

- [1] R. Kabutan, R. Tanaka, S. Oomori, M. Morita, E. Inohira, K. Yoshida, H. Ohtake, T. Nishida, “Development of Robotic Intelligent Space Using Multiple RGB-D Cameras for Industrial Robots”, Proc. of ICT-ROBOT, ThBT3.2, 2016.
- [2] Zhengyou Zhang, “A Flexible New Technique for Camera Calibration”, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 22, No. 11, pp. 1330–1334, 2000.
- [3] R. Tanaka, R. Kabutan, S. Oomori, M. Morita, T. Nishida, “Development of Industrial Picking System”, 4th International Symposium on Applied Engineering and Science, Kyushu Institute of Technology, 17, 2016.
- [4] R. Tanaka, R. Kabutan, S. Oomori, M. Morita, T. Nishida, “Development of Autonomous Picking System with Industrial Robot”, 計測自動制御学会九州支部学術講演会, pp.41–42, 2016.
- [5] 玉木, “姿勢推定と回転行列”, 信学技報, vol. 109, no. 203, SIS-2009-23, pp.59–64, 2009.
- [6] 西田, 黒木, “対応関係が不明な三次元集合体の回転行列推定”, 日本ロボット学会誌, vol. 31, No. 6, pp. 624–627, 2013.
- [7] Besl, P.J. and Mckay, N.D. : A Method for Registration of 3-D Shapes, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 14, No. 2, pp. 239–256, 1992.
- [8] 増田 健, “ICP アルゴリズム”, 電子情報通信学会パターン認識・メディア理解研究会, Vol. 109, No. 182, 2009.
- [9] Hao Men, Biruk Gebre, Kishore Pochiraju, “Color Point Cloud Registration with 4D ICP Algorithm”, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1511–1516, 2011.
- [10] A. Makadia, E. P. Iv, K. Daniilidis, “Fully Automatic Registration of 3D Point Clouds”, Proceedings of the 2006 Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern recognition, pp.1297-1304, 2006.