

令和 3 年 5 月 14 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04045

研究課題名（和文）SLAM統合機構キャリブレーション(SKCLAM)の提案とその産業機械への応用

研究課題名（英文）SLAM-integrated Kinematic Calibration (Simultaneous Kinematic Calibration, Localization and Mapping) for Industrial Machinery

研究代表者

前田 雄介 (Maeda, Yusuke)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：50313036

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、移動ロボットに用いられるSLAM技術（自己位置同定と地図作成の同時実行）を応用することで、ロボットマニピュレータの動作から周辺環境の地図作成と機構キャリブレーションを同時に行うことを可能とする、SKCLAM (Simultaneous Kinematic Calibration, Localization and Mapping) 技術の提案を行った。マニピュレータ手先に取り付けたRGB-Dカメラ等により、環境内の特徴点を観測して用いる手法とチェッカーパターンを用いる手法を開発し、それぞれの有効性をシミュレーションと実機実験にて示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、比較的安価なセンサを用いて、ロボットの機構キャリブレーションおよび環境地図作成を手軽に行うことが可能となった。この成果は、ロボットの動作精度の向上やロボットの動作自動生成につながるものであり、ものづくりの高度化・省力化に寄与するものと言える。

研究成果の概要（英文）：In this study, we proposed SKCLAM (Simultaneous Kinematic Calibration, Localization And Mapping) techniques, in which robot manipulators can perform environmental mapping and calibration of their kinematic parameters simultaneously. The original SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) techniques for mobile robots were extended and applied to robot manipulators. In our proposed methods, a robot manipulator equipped with an RGB-D camera observes features in the environment or checker patterns to achieve the SKCLAM. Their effectiveness was demonstrated in experiments in virtual and actual environments.

研究分野：ロボット工学

キーワード：マニピュレータ SLAM 機構キャリブレーション 地図作成

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

近年、カメラや深度センサの高性能化・低価格化、計算機パワーの増大、確率情報処理技術の発展を受けて、SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 技術の進展・普及が進んでいる。SLAM 技術は移動ロボットを主たる対象として開発されてきたが、観測情報に基づいて未知パラメータをオンラインで同定するとともに、環境情報を正確に把握することは、ロボットマニピュレータにとっても最適動作生成や安全確保などの点で有用であると考えられる。

そこで、新たに「SLAM とマニピュレータの運動学キャリブレーションを統合的に行う問題」を考えることとした。具体的には、ロボットマニピュレータに取り付けたセンサを用いて、動作中に環境地図を作成するとともに、運動学パラメータのキャリブレーションを同時に行うことが可能か、という問題を設定する。ここではこの問題を SKCLAM (Simultaneous Kinematic Calibration, Localization and Mapping) と称することとした。SKCLAM 問題を解くことができれば、ロボットマニピュレータの経年変化による精度低下を補償できるほか、自分の周囲の環境地図を随時更新して、障害物回避などに利用することができる。なお、移動マニピュレータではなく固定マニピュレータを対象とする場合は自己位置同定は必要ないが、環境地図を作成することは、環境に対して自らの相対的な設置位置を同定していると捉えることができるため、この呼称を用いることとした。

2. 研究の目的

本研究の学術的目的は、以下の三点にまとめられる。

- 上述の SKCLAM 問題を定式化する
- SKCLAM 問題の解法を与える
- SKCLAM 問題の解法を実装し、その有効性・有用性を実証する

まず、SKCLAM 問題の定式化に関しては、マニピュレータ先端リンクに取り付けたセンサを用いて、通常の SLAM 問題を解くと同時に、マニピュレータの運動学的パラメータの誤差を同定する問題として扱う。SLAM にさらに運動学キャリブレーション問題が統合されることとなるが、上述のように固定マニピュレータを扱う場合には自己位置同定が実質必要ないこと、また、累積誤差が生じないため loop closure の困難が回避できることから、問題の難易度が SLAM より大幅に高まることはないと思込める。

3. 研究の方法

まず、SLAM 問題を拡張する形で、マニピュレータ先端リンクに取り付けたセンサ (カメラ) を用いる SKCLAM 問題を数学的に定式化した。そして、カメラ内部パラメータのキャリブレーションは済んでいるものとし、マニピュレータのリンクパラメータおよび先端リンク上でのカメラ取付位置・姿勢をキャリブレーションの対象とした。マニピュレータの局所的な運動は関節のエンコーダから比較的正確に得ることができるため、カメラからの情報はその大域的な補正に用いることとし、人工マーカ (チェッカーパターン) を用いるアルゴリズムと用いないアルゴリズムを開発した。

また、検証用仮想環境を構築し、リンクパラメータや周辺地図の真値がわかっている状態での SKCLAM アルゴリズムの検証ができるようにした。この仮想環境では、理想的な環境から、外乱や雑音のある環境まで、さまざまな条件下でアルゴリズムを検証することで、そのロバスト性の評価とそれに基づく改善が可能となる。さらに、開発した SKCLAM アルゴリズムを検証するための実機環境を準備した。固定マニピュレータを対象とし、現有設備である産業用 6 軸マニピュレータを用い、その先端リンクに RGB-D カメラなどのセンサを取り付けられるようにした。ロボット制御およびセンサ情報獲得・処理を行うコンピュータとともに、システム全体を整備した。仮想環境でテストとデバッグがなされた SKCLAM アルゴリズムを実環境で検証し、キャリブレーション結果や地図作成結果を検証した。

4. 研究成果

(1) SKCLAM 問題の定式化

本研究においては、SKCLAM 問題を、マニピュレータ手先に取り付けた

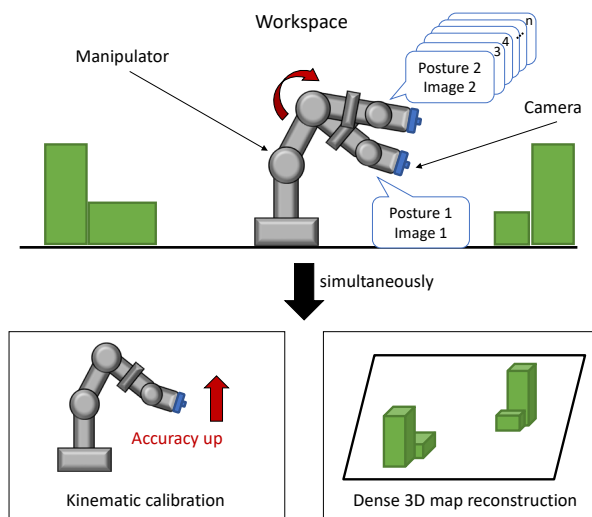


図 1 SKCLAM 問題の概要

カメラなどのセンサを用いて、運動学パラメータのキャリブレーションと三次元点群としての環境地図作成を行う手法と定義した。具体的には、まずマニピュレータの様々な姿勢で周辺環境の情報およびそのときの関節情報を蓄積する。そして、同一の特徴点の異なる姿勢での見え方から誤差関数を定義し、それを最小化することで運動学パラメータのキャリブレーションを行う。さらに、キャリブレーションされた運動学パラメータを用いて、センサ情報から環境地図を三次元点群として求める。

この手法は、RGB-D カメラなどの比較的安価なセンサを用いて、手軽に SKCLAM を行うことができ、それによってマニピュレータの精度を向上するとともに、密な三次元地図を獲得できることに特徴がある (図1)。

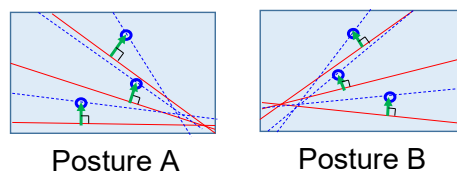


図2 エピポーラ幾何に基づく誤差

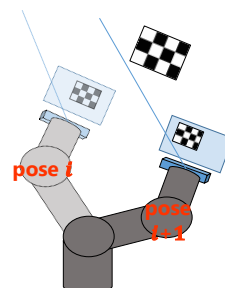


図3 チェッカーボードを用いた SKCLAM

(2) 人工マーカを用いない SKCLAM

センサとして RGB-D カメラを用い、マニピュレータの周囲にある特徴点を観測する手法を開発した (文献①)。人工的にマーカを設置する必要がないので手軽である。具体的な手順は以下のようになる。

1. マニピュレータを動かし、複数の姿勢で RGB-D 画像および関節変数を取得する。
2. RGB 画像から AKAZE 特徴点を抽出し、異なる視点からの 2 画像でマッチングを行う。
3. マッチングした特徴点について、エピポーラ幾何に基づき誤差関数 (図 2) を定義する。
4. 誤差関数を最小化する運動学パラメータを求める。
5. 求まった運動学パラメータに基づいて深度データを合成し、カラー 3 次元点群として環境地図を作成する。

(3) 人工マーカを用いる SKCLAM

センサとして RGB-D カメラを用い、人工マーカとしてチェッカーボードをマニピュレータ周りに配置し、観測する手法を開発した (文献②)。環境内の特徴点を抽出するのに比べ、精度を高めることができる。チェッカーボードを用意する手間は必要だが、設置位置は正確である必要はないので負担はそれほど大きくないと考えられる。具体的な手順は以下のようになる。

1. マニピュレータを動かし、複数の姿勢でチェッカーボードの写った RGB-D 画像および関節変数を取得する (図 3)。
2. チェッカーボード交点を RGB 画像から抽出する。
3. RGB-D カメラの深度データは雑音が多いため、チェッカーボード交点の深度を、既知であるチェッカーボードサイズの情報を使って最適化により推定する。
4. 異なる視点から見たチェッカーボード交点の三次元位置のずれから誤差関数を定義する。
5. 誤差関数を最小化する運動学パラメータを求める。
6. 求まった運動学パラメータに基づいて深度データを合成し、カラー 3 次元点群として環境地図を作成する。

(4) 全天球カメラを用いる SKCLAM

RGB-D カメラの代わりに全天球カメラを用いることを考える (文献③)。全天球カメラでは、特徴点がほぼ常時映っていると考えられ、視野の制限によってキャリブレーション時のマニピュレータの運動が制約されることがないと期待される。全天球画像を正像変換することで、RGB-D カメラの場合と同様に、人工マーカを用いない手法で運動学的キャリブレーションを行うことができる。ただし、実質的な解像度が低くなる欠点がある。地図作成は原理的には 1 台の全天球カメラで三次元測量を行って実現可能だが、対応点探索が複雑になる。このためステレオ全天球カメラを使うことが考えられる。

(5) RGB ステレオカメラを用いる SKCLAM

RGB-D カメラの代わりに RGB ステレオカメラを用いることを考える (文献④)。テクスチャに乏しい環境では深度情報が得にくくなる恐れはあるが、高解像度のセンシングを実現しやすいメリットがある。また RGB-D カメラと違って、RGB カメラと深度センサの位置ずれを考慮する必要がない。RGB-D カメラの場合と同様に、人工マーカを用いない手法で運動学的キャリブレーションを行うことができる。

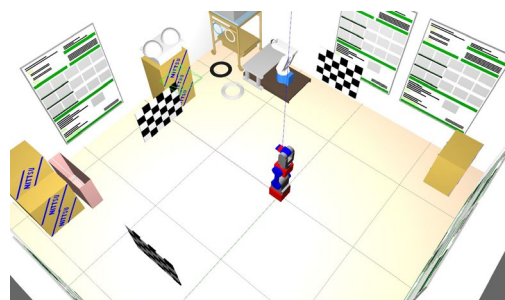


図4 仮想環境

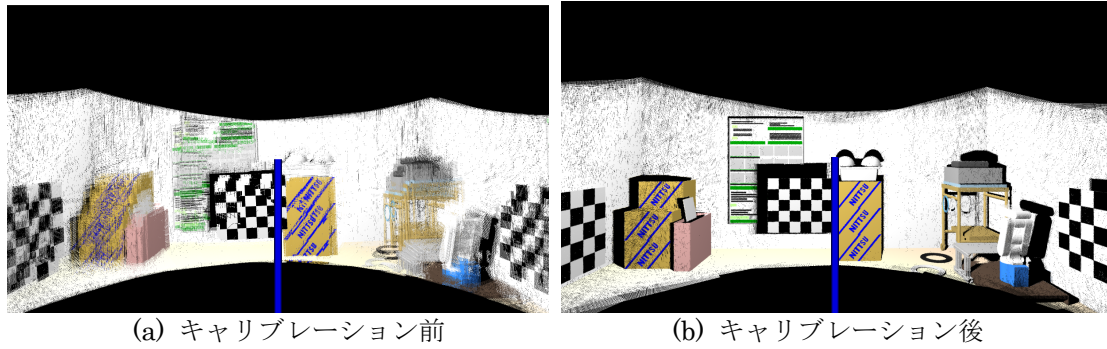


図 5 人工マーカを用いない SKCLAM による地図作成

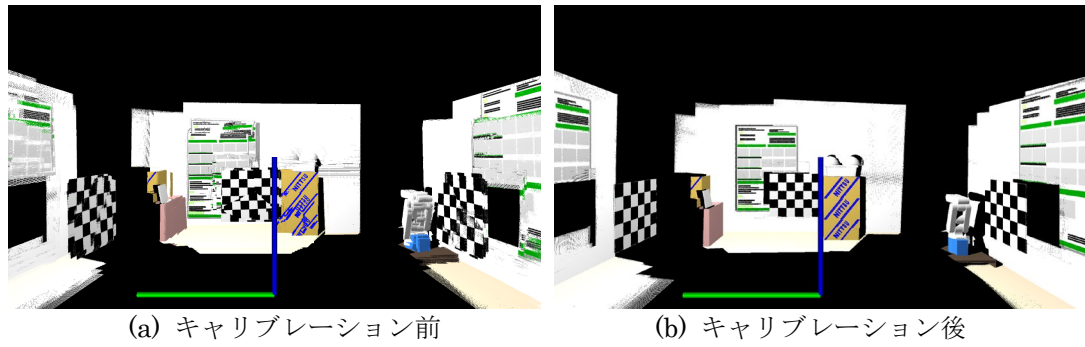


図 6 人工マーカを用いた SKCLAM による地図作成

(6) 仮想環境における検証

ROS (Robot Operating System) を利用してマニピュレータ，カメラ類を仮想環境内で実装し，Gazebo を用いてシミュレーションできるようにした (図 4)。

RGB-D カメラを使用し，人工マーカを用いない設定で SKCLAM を実行した結果の一例を図 5 に示す。DH パラメータのうち 10 パラメータをキャリブレーション対象とした場合，手先位置の誤差は 7mm 程度から 0.2mm 程度に改善できた。

また，RGB-D カメラを使用し，人工マーカを用いる設定で SKCLAM を実行した結果の一例を図 6 に示す。この例では，DH/Hayati パラメータおよびカメラ取付位置のうち 18 パラメータをキャリブレーション対象とし，手先位置の誤差は 12mm 程度から 0.1mm 程度に改善できた。

全天球カメラを用いて SKCLAM を実行した結果の一例を図 7 に示す。DH パラメータのうち 10 パラメータをキャリブレーション対象とした場合，手先位置の誤差は 7mm 程度から 0.3mm 程度に改善できた。

RGB ステレオカメラを用いて SKCLAM を実行した結果の一例を図 8 に示す。この例では，DH パラメータのうち 10 パラメータをキャリブレーション対象とし，手先位置の誤差は 7mm

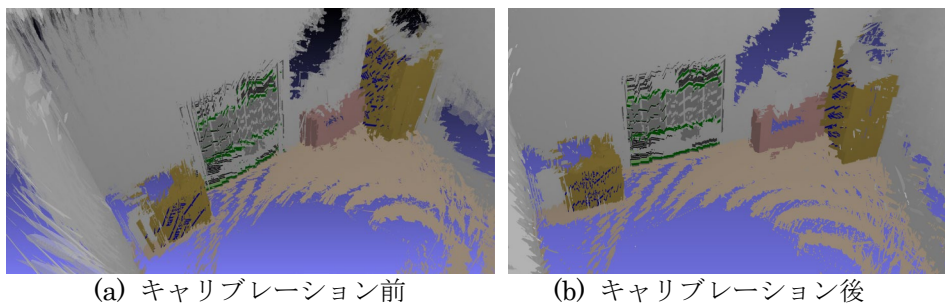


図 7 全天球カメラを用いた SKCLAM による地図作成

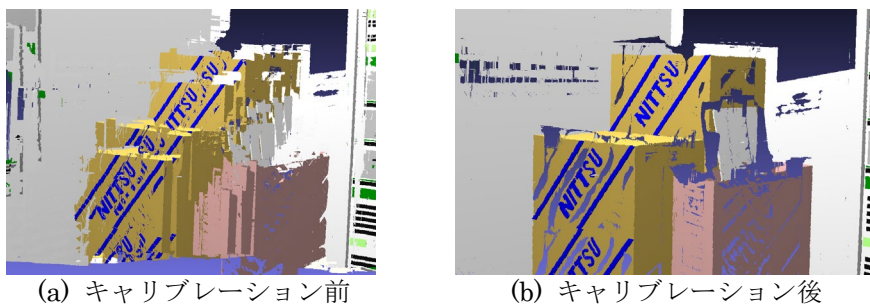


図 8 ステレオカメラを用いた SKCLAM による地図作成

程度から 0.25mm 程度に改善できた。

以上の結果からは、人工マーカ（チェッカーボード）を用いる方法が、より多くの運動学的パラメータをキャリブレーションでき、精度面で有利であることを確認できた。また、全天球カメラでは、カメラ解像度をかなり高くしないとキャリブレーションが難しいことも確認できた。



図 9 実環境

(7) 実環境における検証

6 軸産業用ロボット（図 9）を用いて SKCLAM 手法の検証を行った。

手先に RGB-D カメラ（Intel RealSense R200）を装着して、SKCLAM を適用した一例を図 10 に示す。実環境では位置精度の直接的評価が難しいため、逆運動学を用いて同一手先姿勢になるはずの 8 つのコンフィギュレーションにおいてその位置のばらつきをレーザ変位センサで評価した。その結果、座標軸方向の標準偏差が、キャリブレーション前の 6~8mm 程度から 2~4mm 程度（人工マーカを用いない場合）、2~3mm 程度（人工マーカを用いる場合）に低減された。

また、手先に RGB ステレオカメラ（StereoLabs ZED）を装着して SKCLAM を実行した結果の一例を図 11 に示す。同様に同一手先姿勢になるはずのコンフィギュレーションで位置のばらつきを測定したところ、座標軸方向の標準偏差が、キャリブレーション前の 6~10mm 程度から 3~6mm 程度に低減された。

以上の結果から、実環境においても提案した SKCLAM 手法は有効であることが確認できた。一方で、キャリブレーションや地図作成の精度についてはさらなる改善の余地がある。

<引用文献>

- ① Jinghui Li, Akitoshi Ito, Hiroyuki Yaguchi and Yusuke Maeda: Simultaneous kinematic calibration, localization, and mapping (SKCLAM) for industrial robot manipulators, *Advanced Robotics*, Vol. 33, No. 23, pp. 1225–1234, 2019.
- ② 伊藤 聡利, 李 景輝, 前田 雄介: 産業用マニピュレータのための SLAM 統合機構キャリブレーション(SKCLAM)におけるチェッカーボードを用いた高精度化, *日本機械学会論文集*, Vol. 86, No. 891, 20-00028, 2020.
- ③ 田中 靖章, 李 景輝, 伊藤 聡利, 前田雄介: 産業用マニピュレータのための全天球カメラを用いた SLAM 統合機構キャリブレーション, *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020 (ROBOMECH 2020) 講演論文集*, 2P2-B05, 2020.
- ④ 長友 雄太郎, 李 景輝, 田中 靖章, 前田 雄介: 産業用ロボットのためのステレオカメラを用いた SLAM 統合機構キャリブレーション, *日本機械学会生産システム部門研究発表講演会 2021 講演論文集*, pp. 77–78, 2021.



図 10 RGB-D カメラを用いた SKCLAM による地図作成

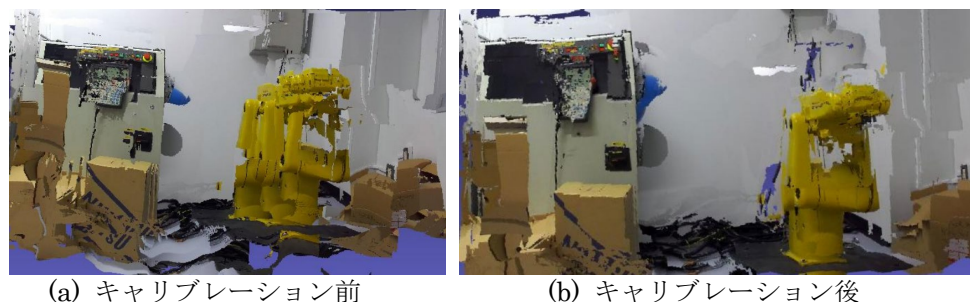


図 11 ステレオカメラを用いた SKCLAM による地図作成

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Li Jinghui, Ito Akitoshi, Yaguchi Hiroyuki, Maeda Yusuke	4. 巻 33
2. 論文標題 Simultaneous kinematic calibration, localization, and mapping (SKCLAM) for industrial robot manipulators	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 1225 ~ 1234
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/01691864.2019.1689166	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 ITO Akitoshi, LI Jinghui, MAEDA Yusuke	4. 巻 86
2. 論文標題 Accuracy improvement with checkerboards in SLAM-integrated kinematic calibration (SKCLAM) for industrial manipulators	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.20-00028	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 伊藤 聡利, 李 景輝, 前田 雄介
2. 発表標題 産業用マニピュレータのためのチェッカーボードを用いたSLAM統合機構キャリブレーション (SKCLAM)
3. 学会等名 第25回ロボティクスシンポジア
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ito Akitoshi, Li Jinghui Li, Maeda Yusuke
2. 発表標題 SLAM-Integrated Kinematic Calibration Using Checkerboard Patterns
3. 学会等名 2020 IEEE/SICE Int. Symp. on Sysem Integration (SII 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Li Jinghui, Ito Akitoshi, Maeda Yusuke
2. 発表標題 A SLAM-Integrated Kinematic Calibration Method for Industrial Manipulators with RGB-D Cameras
3. 学会等名 2019 19th Int. Conf. on Control, Automation and Systems (ICCAS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤 聡利, 李 景輝, 前田 雄介
2. 発表標題 マニピュレータのためのSLAM統合機構キャリブレーションにおけるチェッカーパターンの利用
3. 学会等名 第37回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Li Jinghui, Ito Akitoshi, Maeda Yusuke
2. 発表標題 SKCLAM: A Method of Simultaneous Kinematic Calibration and 3D Reconstruction for Industrial Manipulators
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019 (ROBOMECH 2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤 聡利, 矢口 皓之, 前田 雄介
2. 発表標題 ロボットマニピュレータのためのSLAM統合機構キャリブレーション (SKCLAM)
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 李 景輝, 伊藤 聡利, 前田 雄介
2. 発表標題 六自由度産業用ロボットマニピュレータのためのSLAM統合機構キャリブレーション (SKCLAM)
3. 学会等名 第24回ロボティクスシンポジア
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中 靖章, 李 景輝, 伊藤 聡利, 前田雄介
2. 発表標題 産業用マニピュレータのための全天球カメラを用いたSLAM統合機構キャリブレーション
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長友 雄太郎, 李 景輝, 田中 靖章, 前田 雄介
2. 発表標題 産業用ロボットのためのステレオカメラを用いた SLAM 統合機構キャリブレーション
3. 学会等名 日本機械学会生産システム部門研究発表講演会2021
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

横浜国立大学大学院工学研究院前田研究室ホームページ
<https://iir.ynu.ac.jp/index-j.html>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	李 景輝 (Li Jinghui)		
研究協力者	伊藤 聡利 (Ito Akitoshi)		
研究協力者	田中 靖章 (Tanaka Yasuaki)		
研究協力者	長友 雄太郎 (Nagatomo Yutaro)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関