

# 福岡工業大学 学術機関リポジトリ

## A Direct Teaching Method for Offline Robot Programming

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2021-12-14 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 榎田, 諭, 浦川, 竜裕 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/11478/00001701">http://hdl.handle.net/11478/00001701</a>

# ロボットのオフライン・ティーチングにおける直接教示手法

榎田 諭 (工学部知能機械工学科)

浦川 竜裕 (佐世保工業高等専門学校電子制御工学科)

## A Direct Teaching Method for Offline Robot Programming

MAKITA Satoshi (Dept. of Intelligent Mechanical Engineering, Faculty of Engineering)

URAKAWA Tatsuhiro (Dept. of Control Engineering, National Institute of Technology, Sasebo College)

### Abstract

This paper summarizes several robot programming approaches and presents a direct teaching method for robot programming of manipulators. A human operator wearing a head-mounted display and hand-held controllers manipulates a spherical marker in the computational space to determine a desired position of the manipulator. A depth camera attached to the manipulator acquires a point cloud of the surroundings of the manipulator to construct the scanned map in the computational space. The desired posture of the manipulator can be found by solving an inverse kinematics problem.

**Keywords** : Robot programming, Teaching, Direct teaching

## 1. 序論

ロボットに作業をさせるときにはその動作を与える教示(ティーチング)をする必要がある。ロボットの動作はその各関節に内蔵されるアクチュエータの駆動によって実現されるので、例えば電磁モータでいえば回転角度や回転速度が動作を決定するパラメータとなる。そのため、ロボット教示では目標動作を達成するために必要なこれらのパラメータをシーケンシャルにまたは時系列に与えることが目的となる。なお、教示はロボット・プログラミングとも呼ばれる。ここで、ロボットの動作における経路点を結ぶ軌跡を経路と呼び、ロボットの動作速度を含む経路情報を軌道と呼ぶ。つまり、ロボット教示では動作時間を拘束せず経路のみを与える場合と、時間的拘束も含めて動作を与える場合とがある。本稿では前者の経路教示について議論する。また、本稿では一般的な作業用ロボットとして、垂直多関節マニピュレータ(ロボット・アームとも言う)を対象とする。マニピュレータは各関節のアクチュエータを駆動することで、その手先の位置・姿勢を変更し、所望の作業を達成することを目的とする。

### 1.1 オンライン・ティーチングとオフライン・ティーチング

ロボットの経路点の教示方法については大きく分けてオンライン・ティーチングとオフライン・ティーチングとがある<sup>(1)</sup>。オンライン・ティーチングとはロボット本体を実空間内で実際に動かすことで、そのときの各関節の角度情報を

エンコーダ等によって取得し、記録する。これによりロボットはその目標となる動作を達成するために必要な関節の運動が与えられ、それを逐次実行することで教示時の動作を再現できる。これをティーチング・プレイバックといい、多くの場面で用いられる教示手法の一つである。

オンライン・ティーチングにおいてロボットを動かす手段として、コントローラによる操作とロボット本体を直接に手で動かす操作とが挙げられる<sup>(2)</sup>。前者はリモート・ティーチングと呼ばれ、専用のコントローラとしてティーチング・ペンダントを使用することが多い。ティーチング・ペンダントはロボットのメーカーによって仕様が異なるが一般に、関節ごとに動作量を与える機能と、手先の位置・姿勢の運動を指定して、逆運動学を解くことで各関節の動作量を与える機能とがある。教示者はコントローラを用いてロボットを動作させる際、各関節の動作によってロボットの姿勢がどのように変化するのか、またその逆を意識しながらロボットを操作することが要求される。そのため、ロボットを目標の位置・姿勢へ到達させるためには相応の熟練度が期待される。

一方、上述のオンライン・ティーチングのうち後者である、ロボット本体に力を加えてその姿勢を変化させ、所望の動作または位置を教示する手法を直接教示(ダイレクト・ティーチング)と呼ぶ<sup>(3)(4)</sup>。ロボットに加わる力を受け流すようにしてロボットを動作させることで、コントローラによるリモート操作に比べて、教示者はロボットの機構を意識

することなくロボットを目的の方向へ移動させることができる。一方で、直接教示のみでロボットの姿勢を教示することは、教示者の操作スキルに大きく依存するため、例えば微調整などが容易でない。ロボットの関節ごとに微小量ずつ動作できるという点ではリモート・ティーチングが有利な場合がある。

以上のオンライン・ティーチングはロボットに動作を教示する際、実環境において実際にロボットを動作させて所望の関節角度データを記録するという点で直感的であり、かつ作業対象との接触状態なども確認できるという点で実应用到に適しているといえる。一方で、教示中はロボットの作業動作を停止する必要がある。

これに対してオフライン・ティーチングでは実機のロボットを操作せず、コンピュータ空間内でロボットの動作を教示する。代表的な方法はシミュレータを用いてコンピュータ空間内に実環境を再現し、ロボットの動作を検討するものである。オフライン・ティーチングではロボットの3D CADモデルを用いるなどしてロボットの運動を可視化し、コンピュータ空間内の障害物モデルを回避するような動作を提示する。このとき配置される障害物モデルは実空間中に存在する物体の三次元モデルや、周辺の三次元スキャンに基づく環境地図などが挙げられる。そのため、ロボットおよび障害物のコンピュータ空間と実空間との間における寸法・形状の差異や、空間中の位置・姿勢のずれが避けられず、コンピュータ空間内での教示結果を実機に反映する際、位置決め誤差を引き起こすことがある。また、ロボットモデルを動作させるとき、コンピュータの入力インターフェースであるキーボードやマウスを用いて動作を指定することがある。このユーザー・インターフェースはリモート・ティーチングにおけるコントローラとほぼ同等のものであると言え、教示者のスキルに大きく依存する側面がある。

また、人間のユーザによる直接的な動作指示である教示ではなく、与えられた条件からロボットの動作となる経路を生成する動作計画も、ロボット・プログラミングとして有用な手法である<sup>(6)</sup>。動作計画においてはコンピュータ空間内に配置される障害物等に干渉しないよう回避しながら、初期状態から目標状態へ遷移するための経路を、所定のアルゴリズムに基づいて探索する。つまり、オフライン・ティーチングの一種と位置付けることができるが、教示のように人為的なバイアスが加わりにくいことが特徴である。したがって、生成された経路が必ずしも最適であるとは限らないため、生成経路を滑らかにする処理や、最適化などが必要な場合がある。一方で、アルゴリズムによっては十分な探索時間をかけることで経路を生成できるという利点があり、障害物が多い場合、また高次元空間での探索問題の場合などに人為的な教示に対して優位性があるといえる。

**1.2 関連研究** ロボットティーチングは特に産業用ロボットに作業を遂行させるという観点から広く実施され、また多くの研究がなされてきた<sup>(1)(2)</sup>。オンライン・ティーチングの

一つであるリモート・ティーチングがロボット操作者のスキルに大きく依存するのに対して、ロボットを手で直接動かすことのできるダイレクト・ティーチング<sup>(3)(4)</sup>は、より直感的なロボット操作手法を提案したものである。人間の動作をもとにしてロボットの動作を与えるという手法は *teaching by demonstration* などと呼ばれ、複雑なロボット操作を必要としない教示手法として提案されている。人間の動作をカメラで観察してロボットの動作を与える手法<sup>(6)</sup>、モーションセンサを装着した教示者が目的の動作を行い、その身体運動を計測する手法<sup>(7)</sup>、モーションキャプチャ等を用いて人間の搬送動作を観察し、遠隔操作ロボットの動作に利用する手法<sup>(8)</sup>、カメラで操作対象物の軌道を観察し、その対象物の運動を実現するようにロボットを動作させる手法<sup>(9)(10)</sup>、人間の組立作業の実演の三次元撮影情報をもとに動作を生成する手法<sup>(11)</sup>、などが事例として挙げられる。これらは実機のロボットを動かさずにロボットの動作を生成するという点でオフライン・ティーチングに分類できる。

オフライン・ティーチングにおいては実環境の障害物等の形状・配置をコンピュータ内のシミュレーション環境中に再構築（マッピング）する必要がある。それぞれのCADモデルなどの三次元データが用意できればよいが、環境が複雑化するほど困難になる。この課題に対して原らはRGB-Dカメラから取得できる距離情報を用いたシミュレーション環境の構築を提案している<sup>(12)</sup>。また、実環境とシミュレーション環境との間でのロボットや障害物の位置ずれも課題の一つである。須山らはロボットの手先に取り付けたRGB-Dカメラの距離情報からシミュレーション環境をマッピングすることでロボットの設置誤差の影響を排除している<sup>(13)</sup>。このように測距センサを用いて周辺環境をマッピングすると同時に、環境中でのカメラの自己位置・姿勢を推定する手法は *Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)*<sup>(14)</sup>として知られ、移動ロボットのみならず、産業用ロボットのキャリブレーションなどにも応用されている<sup>(15)</sup>。

なお、このような対処をしてもロボット本体のたわみなどによって手先の位置・姿勢が所望の状態に到達できないことがあることも教示の課題の一つである。この課題については、ロボットの実機のリンク・パラメータなどを正確に同定するキャリブレーションや、実環境でのロボットの最終的な手先位置の補正などが求められる<sup>(13)</sup>。

オフライン・ティーチングにおいてより操作性を高める方策として、視覚情報のみならず力覚提示も検討されている。川崎らは多指ハンドの教示のために教示者がコンピュータ画面内の物体を操作するとき、手指に力覚フィードバックを与えるなどして、作業を仮想的に行うことのできるシステムを提案した<sup>(16)(17)</sup>。Hoshinoらも力覚と視覚のフィードバックに注目して、ヘッドマウントディスプレイで全天周映像が提示されるバーチャルリアリティ（VR）空間における脚ロボットの操作を行っている<sup>(18)</sup>。Jenらもバーチャルリアリティ空間における複雑なコマンド等を用いないロ

ボット・プログラミング・システムを提案した<sup>(19)</sup>.

また近年では拡張現実感 (Augmented Reality)、複合現実感 (Mixed Reality) を用いた教示手法が提案されている。拡張現実または複合現実感、半透過型ディスプレイやカメラ映像にコンピュータ・グラフィックを重畳して表示することで、実空間の視覚情報とコンピュータ情報とを同時に提示する技術である。特に、オフライン・ティーチングに必要なコンピュータ・グラフィックなどが実空間中で三次元的に視認できる点は、シミュレーション環境の再構築が不要であるという利点がある。Gadre らは複合現実用ヘッドマウントディスプレイを用いてハンド・ジェスチャでロボットの動作点を教示する手法を提案し、従来の二次元映像を用いた手法との比較をしている<sup>(20)</sup>。Rosen らも拡張現実デバイスを用いて計画された動作経路を視覚的に提示し、ハンド・トラッキングにより経路を補正するシステムを提案した<sup>(21)</sup>。また、佐々木らは複合現実デバイスを用いて実空間中に提示されるロボットのコンピュータ・グラフィックをハンド・ジェスチャで直接教示のように操作する手法を提案した<sup>(22)</sup>。実空間でロボットに近づけないような場合には他の手法と同様に、実空間の距離情報をもとにシミュレーション環境を再構築し、その中でコンピュータ・グラフィックの直接教示をしている<sup>(23)</sup>。また Kato らは移動ロボットの遠隔操作において、力覚フィードバックと半透過ディスプレイによる複合現実の情報提示をしている<sup>(24)</sup>。

以上のように、オンライン・ティーチングであれば実機を実環境に合わせて動作させるためにロボットの手先位置のずれを解消した動作教示が可能であるが、教示中にロボットの稼働を停止させる必要のあることから、オフライン・ティーチングの研究が広くなされている。オフライン・ティーチングでは、シミュレーション環境と実環境との間の物体の形状誤差、教示時の視覚情報以外の提示、教示インターフェースの改善などが主題となっている。本稿では筆者らが提案する、シミュレーション空間における直接教示手法<sup>(23)</sup>を紹介する。

## 2. シミュレーション空間内のロボットモデルに対する直接教示

### 2.1 ロボットの周辺環境のスキャンマップの生成と直接教示手法

シミュレーション空間内のロボットモデルに対して教示を行う場合、実環境におけるロボット周辺の障害物などの幾何情報を構築する必要がある。本稿では文献<sup>(12)(13)</sup>などと同様に、RGB-D カメラによる空間スキャンと、その距離情報のマッピングを実施する。このとき、あらかじめシミュレーション空間中にロボットを配置し、ロボットの手先に装着した RGB-D カメラから、周辺物体への距離を計測する。図 1 に本研究で教示対象とする 6 軸マニピュレータ (UR3, Universal Robots 社) を示す。環境マップの構築は以下の手順である。

Step 1. ロボットに取り付けた RGB-D カメラで周辺の距離

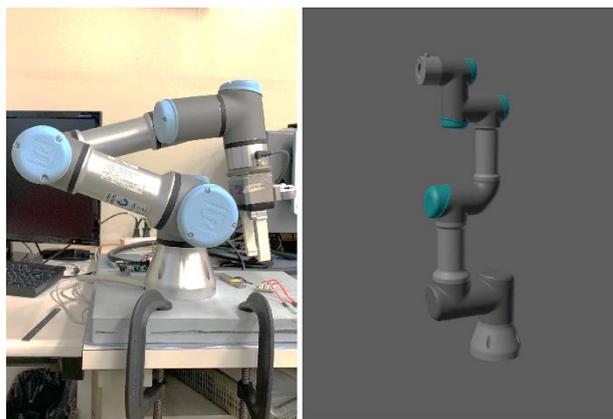


図 1 教示対象の 6 軸マニピュレータ (UR3, Universal Robots 社) (左) とその三次元コンピュータモデル (右)。

Fig. 1. A target robotic manipulator for teaching (UR3, Universal Robots, inc.) (Left) and its computer graphic model (Right).

画像およびカラー画像を取得し、点群データとして記録する。

Step 2. 教示者は位置・姿勢をトラッキングできるコントローラを手先に装着し、シミュレーション空間中のマーカを操作できる。このマーカはロボットの手先の目標位置を表し、ロボットの逆運動学を解いて、ロボットの関節変数を決定する。変更された姿勢からの RGB-D カメラの計測データを逐次記録して、より広範囲のスキャンをする。このとき教示者はヘッドマウントディスプレイを装着し、全天周映像を視認できる。

Step 3. 得られたすべての点群データは情報量が膨大になるので、OctoMap<sup>(25)</sup>を用いてデータを圧縮する。

Step 4. 構築された環境マップ内において、ロボットの手先の目標位置となるマーカをコントローラで操作し、ロボットの経由点を教示する。

ロボットの逆運動学の解法には解析的解法や数値的解法があるが、本稿では The Open Motion Planning Library (OMPL)<sup>(26)</sup>に含まれる確率的探索による解法を適用している。OMPLに含まれる代表的なアルゴリズムには、Probabilistic Roadmap Method<sup>(27)</sup>、Rapidly-exploring Random Trees (RRT)<sup>(28)</sup>、またそれらの派生アルゴリズムがある。

**2.2 教示実験結果** 図 2 に実験環境におけるロボットと操作対象物体、および RGB-D カメラにそのスキャンされたデータに基づく環境マップを示す。環境マップは RGB-D カメラから得られた点群データを圧縮し、ボクセル群で近似して構築している。この対象物の位置をロボットの手先の目標位置となるように、教示者はコントローラを用いてマーカを移動させる。その後、マーカ位置にロボットの手先が到達するように逆運動学を解き、ロボットの姿勢を決定する (図 3)。ここで求まるロボットの各関節変数を用いて実機のロボットを動作させ、教示結果を検証したところ、手先を

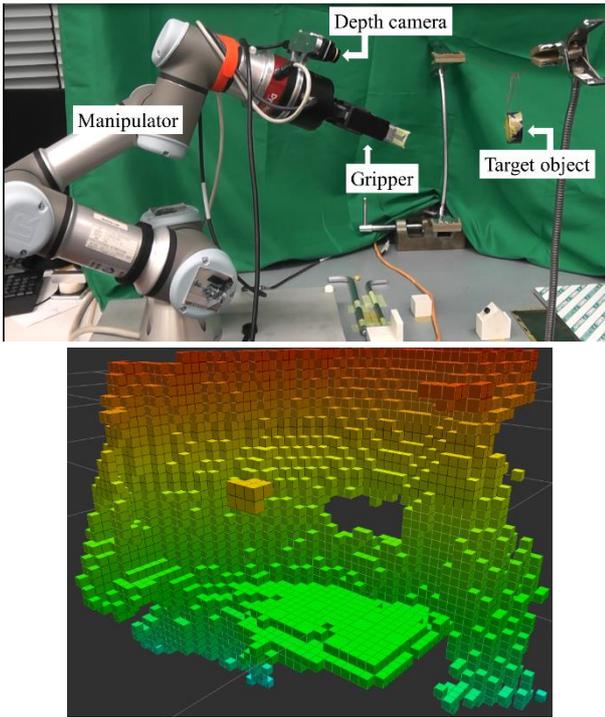


図2 実環境中のロボットと対象物体 (上) とそのスキャンした環境マッピングの結果 (下). スキャンデータの点群は OctoMap によってボクセル群に近似している.

Fig. 2. Experimental setup of the robot and the target object (upper) and their scanned map approximated by the voxels using OctoMap.

ターゲットの対象物の位置に運ぶことができ、シミュレーション空間における教示の有効性を示すことができた (図4).

ここで、図2における対象物の三次元空間での目標位置の推定結果は(0, 0.378, 0.5) [m]であったのに対して、ロボットの手先の到達位置は(0.005, 0.3779, 0.4949) [m]であった. この結果より、コントローラによってマーカを操作して与えた目標位置に対して、逆運動学解法アルゴリズムによる探索結果の精度が十分に高いことがいえる. ただし、OctoMapによる環境マップデータの圧縮の影響で、実際の対象物の体積が $3.02 \times 10^{-5}$  [m<sup>3</sup>]であるのに対して、ボクセル表現では $6.4 \times 10^{-5}$  [m<sup>3</sup>]となり、膨張している. これによる位置決め精度の低下は考慮すべきものであるので、より小さなボクセルでの近似や、点群を圧縮せずに取り扱う手法などの検討が必要である.

### 3. 結論

本稿では垂直多関節マニピュレータの動作教示について、各種の手法を解説し、シミュレーション空間中で行うオフライン・ティーチングにおいて筆者らが提案する直接教示手法<sup>(23)</sup>の概要を示した. 提案手法においてはRGB-Dカメ

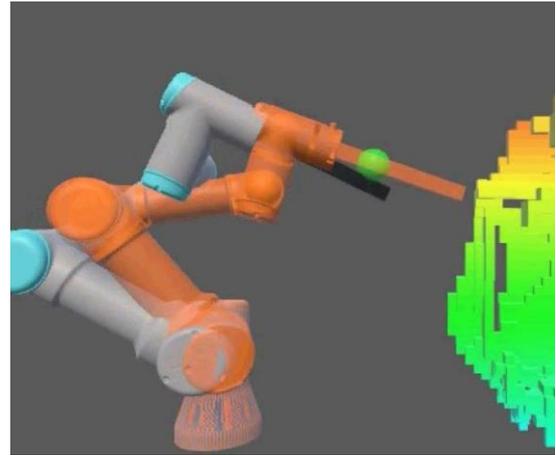


図3 教示結果をシミュレーション空間で表示したもの. 緑色の球形マーカを見ながらコントローラで操作して目標位置を決定し、逆運動学を解くことでロボットの目標姿勢 (橙色) を生成する.

Fig. 3. A Result of robot teaching in the simulation space. The player manipulates the green spherical marker as the desired position of the end point of the manipulator. The desired posture of the manipulator represented with orange color can be acquired by solving the inverse kinematics problem.

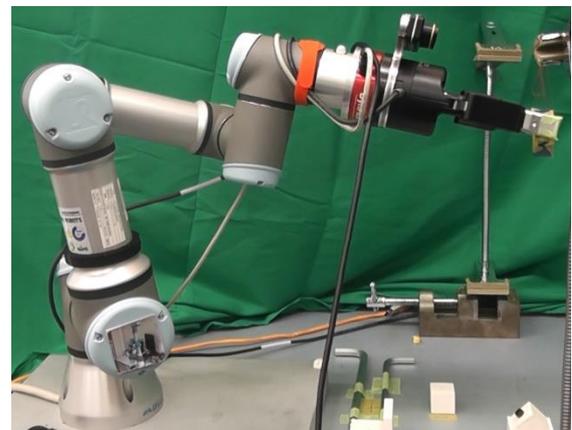


図4 シミュレーション空間での教示結果を実空間のロボットで再現したもの.

Fig. 4. Verification of programmed motion for the manipulator in the real space.

ラを用いて取得した距離データに基づいてシミュレーション空間中に環境マップを構築した. ロボットの到達目標姿勢は、手先の到達目標位置を、教示者の手に装着したコントローラを用いて決定し、それを満たすロボットの姿勢を逆運動学の解法により求めた.

現在のロボット教示において普及している手法は、信頼性の観点から実機を実環境で操作するオンライン・ティーチングが主力であるが、教示の手間の削減や、生産ラインを停止させない要求から、今後ますますオフライン・ティーチ

ングの期待が高まるものと推察する。オフライン・ティーチングにおいてはシミュレーション環境中での障害物等の配置に関わる環境マッピングの手間の削減と制度の向上、指示操作におけるユーザー・インターフェースの改善、実環境で指示動作を再現する際の位置決め誤差の低減など多くの研究課題が残されている。これらの課題に対して多角的に取り組み、実装することが期待される。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP17H04699, 本学情報科学研究所 2020 年度研究スタートアップ支援制度の助成を受けたものです。

## 文 献

- (1) Z. Pan, J. Polden, N. Larkin, S. V. Duin, and J. Norrish: "Recent progress on programming methods for industrial robots," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol.28, No.2, pp.87-94 (2012)
- (2) 水川真, 小山俊彦: 「産業用ロボットの教示方法の現状と展望」, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.2, pp.180-185 (1999)
- (3) H. Asada and H. Izumi: "Direct teaching and automatic program generation for the hybrid control of robot manipulators," *IEEE Int. Conf on Robotics and Automation*, pp.1401-1406 (1987)
- (4) H. Asada and Y. Asari: "The direct teaching of tool manipulation skills via the impedance identification of human motions," *IEEE Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.1269-1274 (1988)
- (5) J.-C. Latombe, "Motion Planning: A Journey of Robots, Molecules, Digital Actors, and Other Artifacts," *Int. J. of Robotics Research*, Vol.18, No.11, pp.1119-1128 (1999)
- (6) R. Dillmann: "Teaching and learning of robot tasks via observation of human performance," *Robotics and Autonomous System*, Vol.47, pp.109-116 (2004)
- (7) S. Calinon and A. Billard: "Active Teaching in Robot Programming by Demonstration," *Proc. of the IEEE Int. Symp. on Robot and Human Interactive Communication*, pp.702-707 (2007)
- (8) K. Hoshino, N. Igo, M. Tomida, and H. Kotani: "Teleoperating System for Manipulating a Moon Exploring Robot on the Earth," *Int. J. Automation Technology*, Vol.11, No.3, pp.433-441 (2017)
- (9) 森山, 前田: 「産業用ロボットによるマニピュレーションのためのビューベースト教示再生」, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.79, No.806, pp.3597-3608 (2013)
- (10) Y. Maeda and T. Nakamura: "View-based teaching/playback for robotic manipulation," *Robomech Journal*, Vol.2, 2, (2015)
- (11) W. Wan, F. Lu, Z. Wu and K. Harada: "Teaching robots to do object assembly using multi-modal 3D vision," *Neurocomputing*, Vol.259, No.11, pp.85-93 (2017)
- (12) 原, 安部, 佐藤, 神谷: 「KINECT を用いた 3 次元復元の産業用ロボット教示への応用」, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.111, No.279, pp.329-333 (2012)
- (13) 須山, 相山: 「視覚を用いた産業用ロボットの新たな動作教示手法の開発」, 日本機械学会論文集, Vol.84, No.865, pp.18-00153 (2018)
- (14) H. Durrant-Whyte and T. Bailey: "Simultaneous localization and mapping: part I," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Vol.13, No.2, pp.99-110 (2006)
- (15) Jinghui Li, Akitoshi Ito, Hiroyuki Yaguchi, Yusuke Maeda: "Simultaneous kinematic calibration, localization, and mapping (SKCLAM) for industrial robot manipulators," *Advanced Robotics*, Vol.33, No.23, pp.1225-1234 (2019)
- (16) 川崎, 中山, パーカー: 「VR 環境内での人間の動作意図に基づくロボット教示」, バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.5, No.2, pp.899-906 (2000)
- (17) H. Kawasaki, T. Mouri, and S. Ueki: "Virtual Robot Teaching for Humanoid Both-Hands Robots Using Multi-Fingered Haptic Interface," C. S. Lanyi (Ed.), "The Thousand Faces of Virtual Reality," pp.107-128 (2014)
- (18) K. Hoshino, M. Kitani, R. Asami, N. Sato, Y. Morita, T. Fujiwara, T. Endo, and F. Matsuno: "Improvement of operability of teleoperation system for legged rescue robot," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligence and Safety for Robotics*, pp. 134-139 (2018)
- (19) Y. H. Jen and Z. Taha and L. J. Vui: "VR-Based robot programming and simulation system for an industrial robot," *Int. J. of Industrial Engineering*, Vol.15, No.3, pp. 314-322 (2008)
- (20) S. Y. Gadre, E. Rosen, G. Chien, E. Phillips, S. Tellex and G. Konidaris: "End-user robot programming using mixed reality," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.2707-2713 (2019)
- (21) E. Rosen, D. Whitney, E. Phillips, G. Chien, J. Tompkin, G. Konidaris, and S. Tellex: "Communicating and controlling robot arm motion intent through mixed-reality head-mounted displays," *Int. J. of Robotics Research*, Vol.38, No.12-13, pp.1513-1526 (2019)
- (22) 佐々木, 横田: 「複合現実感を利用するオフラインティーチングの基本設計」, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1A1-R02 (2019)
- (23) S. Makita, T. Sasaki and T. Urakawa: "Offline Direct Teaching for a Robotic Manipulator in the Computational Space," *Int. J. Automation Technology*, Vol.15, No.2, pp.197-205 (2021)
- (24) K. Kato, N. Sato, and Y. Morita, "Development of direct operation system for mobile robot by using 3D CG diorama," *Proc. of the Int. Conf. on Control, Automation and Systems*, pp.1486-1490 (2012)
- (25) A. Hornung, K. M. Wurm, M. Bennewitz, C. Stachniss and W. Burgard: "OctoMap: An Efficient Probabilistic 3D Mapping FrameworkBased on Octrees," *Autonomous Robots*, Vol.34, pp.189-206 (2013)
- (26) I. A. Sucan, M. Moll and L. E. Kavraki: "The Open Motion Planning Library," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol.19, No.4, pp.72-82 (2012)
- (27) L. E. Kavraki, P. Svestka, J. Latombe and M. H. Overmars: "Probabilistic Roadmaps for Path Planning in High-Dimensional Configuration Spaces," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol.12, No.4, pp.566-580 (1996)
- (28) S. M. LaValle: "Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning," *Technical Report 98-11, Computer Science Dept., Iowa State University* (1998)