

ロボットアームの模倣学習のための VR ハンドトラッキングによる動作教示

日大生産工(院) ○竹内 紘 日大生産工 風間 恵介
日大生産工 丸茂 喜高

1. 緒言

近年、製造業では製品ライフサイクルの短期化や需要の多様化により、多品種少量生産への柔軟な対応が求められている。従来の産業用ロボットは反復作業に優れる一方で、新しい作業や対象の変化に対応するには熟練者による煩雑なティーチング作業が必要であり、生産現場における大きな負担となっていた¹⁾。こうした課題に対し、環境との相互作用を通じて最適な行動を自律的に獲得できる強化学習が注目されている。特に Proximal Policy Optimization (PPO) に代表される深層強化学習手法は連続動作制御に有効である。しかし問題点として、学習初期の無駄な探索が多く効率的ではない²⁾という問題がある。

そこで有効とされるのが模倣学習である。模倣学習は、人間の動作データを活用して初期ポリシーを与えることで探索空間を限定し、学習の効率化と安定化を実現できる³⁾。人間の動作データの取得には従来、モーションキャプチャなどが用いられてきた。しかしモーションキャプチャは高価な機材や広い撮影空間を必要とし、誤計測の問題もあった⁴⁾。これに対し近年は、仮想現実 (Virtual Reality : VR)、拡張現実 (Augmented Reality : AR) デバイスの進展により、低コストかつ非接触で高精度に人間の手動作を取得する技術（ハンドトラッキング）が実用化されている。ハンドトラッキング機能は外部センサーヤマーカーを必要とせず、開発環境との容易な連携により得られたデータを模倣学習やロボット制御に直接利用できる。

そこで本研究では、VRハンドトラッキングによる直感的な動作データ取得を活用し、強化学習と模倣学習を組み合わせ、ロボットが自律的にピッキングタスクを習得するシステムの実現を目的とする。本稿ではピッキングタスクの骨子となるアームの軌道やエンドエフェクタの開閉タイミングを人間の直感的な手本動作により習得させるため、人間の右手の人差し指、親指の開閉動作と指先の軌道をロボットアームにリアルタイム追従させることを説明する。

2. 研究方法

本研究では、VRヘッドセット「Meta Quest 3⁵⁾」を入力デバイスとして使用し、Unity⁶⁾エンジンとリアルタイムで同期するシミュレーションシステムを構築する。VRヘッドセットとVR操作者の視界をFig.1に示す。本システムは、VRヘッドセットのハンドトラッキング機能で取得した操作者の右手モデルの指先の三次元座標を、シミュレーション空間上のロボットアーム先端の目標位置に設定することで、リアルタイムな追従動作を実現する。なお、本システム内で使用されるロボットアームは、実機のmyCobot 280 M5⁷⁾を再現したモデルである。シミュレーション空間上のロボットアームをFig.2に示す。また、親指と人差し指の先端間距離がしきい値を下回る「ピンチ動作」を検知し、これを開閉指令に変換することで、エンドエフェクタによる把持動作を可能にする。



Fig.1 VR ヘッドセットと操作者の VR 内での視界

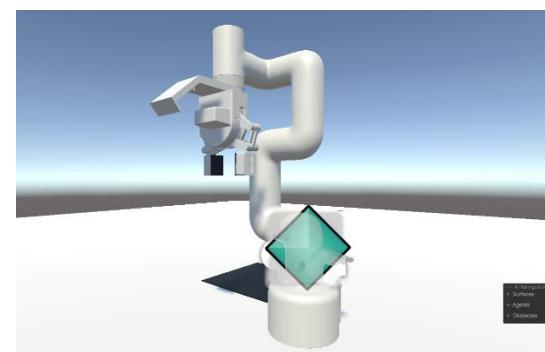


Fig.2 シミュレーション空間上のロボットアーム

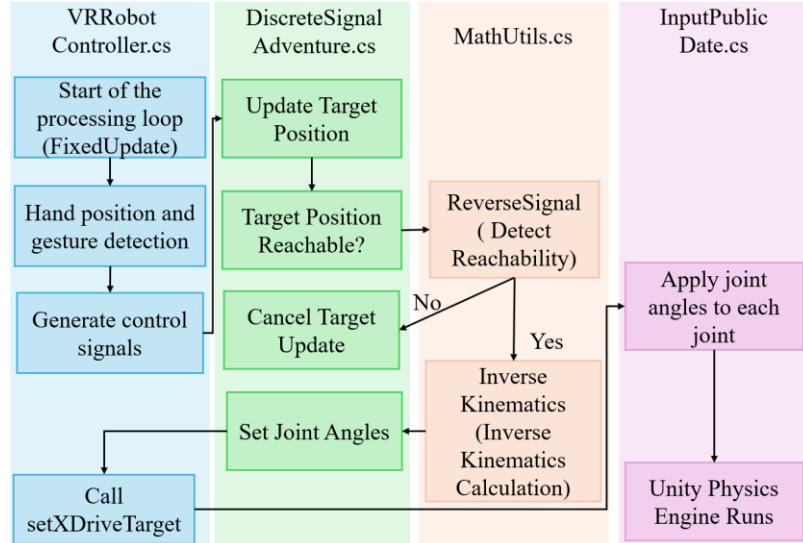


Fig.3 システム構成

右手の追従には役割の異なる4つの主要なC#スクリプトが機能している。システム全体の構成をFig.3に示す。これらはそれぞれ、ロボット操作の中心制御、信号変換、運動学計算、関節角度の反映を担当しており、連携することで人間の手の動作をロボットがリアルタイムに追従できるようになっている。

1. VRRobotController (操作の受付)
2. DiscreteSignalAdventure (中間処理)
3. MathUtils (計算ライブラリ)
4. InputPublicData (司令塔)

このシステムでは、まずメイン制御を担う“VRRobotController”が、VR内の手の目標位置とピンチジェスチャーなどの複合的な把持信号を取得し、それに応じた方向指示を離散信号として“DiscreteSignalAdventure”に渡す。“DiscreteSignalAdventure”は、その信号を基にロボットを滑らかに動かすための一歩となる微小な移動目標を算出する。次に、運動学計算を担う“MathUtils”が、その微小移動後の目標位置がロボットの物理的な可動範囲内にあるか安全性を検証した上で、逆運動学計算を実行し各関節に必要な目標角度を算出する。最終的に、“InputPublicData”が算出された関節角度をUnityの物理エンジンの目標値として設定することで、ロボットが操作にリアルタイムで追従する動作が実現される。

3. 追從性能の定量的評価

本研究で実装したリアルタイム追従システムの性能を評価するため、把持動作の同期性と右手とロボットアーム先端の軌道の一致度について定量的な検証を行った。

初めに、エンドエフェクタの開閉動作が、操作者のピンチ動作に正しく同期するかを検証した。具体的には、右手の人差し指と親指の間隔が、開閉のしきい値である5cmを下回った際にエンドエフェクタが閉じるかを評価した。その結果、100回の試行において97%の成功率で、ピンチ動作を正確に検知し開閉指令が実行されることを確認した。

続いて、システムの空間的な追従精度を評価するため、手を動かしたときの実際の右手の先端の描く軌道と、ロボットアームの先端の描く軌道の一致度を検証した。検証にあたって、実空間に物理的な下向きのコの字型の木枠を設置し、著者自身が操作者として、右手で持った立方体の面を木枠の面に沿わせて、輪郭をなぞることで正確な手本軌道を作成した。下向きのコの字型の木枠と検証の様子をFig.4に示す。検証は、高さ方向と奥行き方向について個別に行った。なお、本研究で使用するUnityシミュレーション空間の座標系においては、高さ方向がY軸、奥行き方向がZ軸として定義されている。また、ロボットアームの可動域の制約を考慮し、高さ方向には0.3m×0.3mの木枠を、奥行き方向には0.12m×0.12mの木枠を用いて検証を行った。

まず、高さ方向(XY平面)の精度評価として、XY平面上に設置した0.3m×0.3mの木枠の輪郭をなぞる操作を行った。Fig.5に、ロボットアーム先端の軌道(青実線)と木枠の理想軌道(赤破線)を比較して示す。両者のRoot Mean Square (RMS) 誤差は0.0175mであり、良好な追従性が確認された。

次に、奥行き方向(XZ平面)の精度評価として、XZ平面上における0.12m×0.12mの木枠を用

いて同様の検証を行った。Fig.6に示す軌道から算出したRMS誤差は0.0085mであった。

高さ方向(XY平面)と奥行き方向(XZ平面)の2つの条件で検証した結果、RMS誤差は総移動距離の短い奥行き方向で小さい値を示した。しかし、全体のスケールに対する精度の指標として総移動距離に対する相対誤差率を算出し比較すると、高さ方向(XY平面)は1.94%、奥行き方向(XZ平面)で2.36%と、より長い距離を移動した高さ方向のほうが優れた値を示した。これは、動作の終了時や方向転換時に生じるわずかな誤差が、総移動距離の短い軌道において相対的に大きな影響を与えたためと考えられる。

以上の結果から、本システムは操作者の手の軌道とピンチ動作を、いずれの方向においても少ない誤差で追従できることが確認できた。

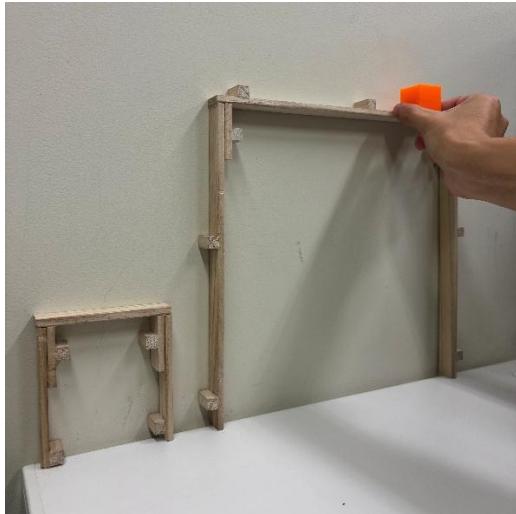


Fig.4 下向きのコの字型の木枠と検証の様子

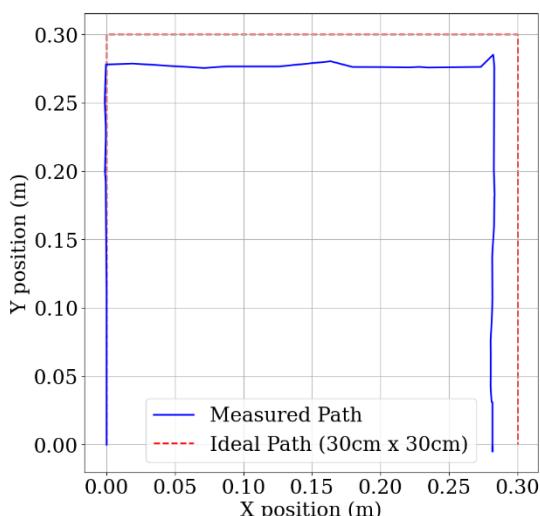


Fig.5 ロボットアームの先端の軌道と高さ方向(XY平面)の木枠の理想軌道

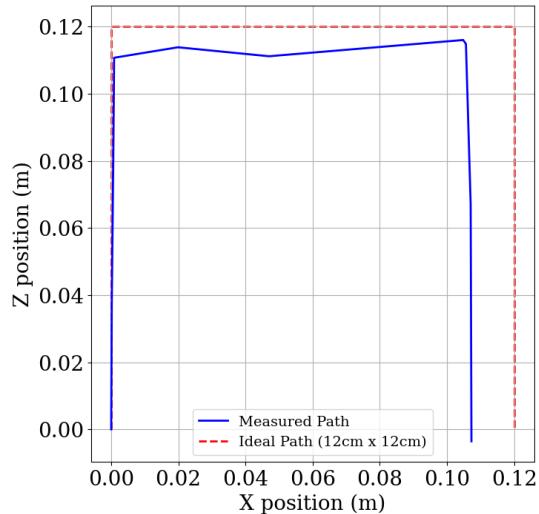


Fig.6 ロボットアームの先端の軌道と奥行き方向(XZ平面)の木枠の理想軌道

4. 結語

本研究では、VRヘッドセットのハンドトラッキング機能を用いて、シミュレーション空間上で操作者の直感的な手の動きにロボットアームをリアルタイムで追従させるシステムを実装した。定量的評価の結果、本システムは操作者の手の軌道とピンチ動作を高い精度で追従できることを確認できた。

今後は、この開発したシステムを基盤として用い、人間の操作データを収集し、模倣学習によってロボットアームの初期ポリシーを構築する。その後、PPOアルゴリズムを用いた強化学習を適用し、試行錯誤を通じてピッキングタスクの成功率と効率を自律的に最適化させる予定である。

参考文献

- 1) 土井正好, 竹平哲也, “人協働型ダイレクトティーチング方式ロボットアームへの作業教示法”, 生産管理, Vol.30, No.1, (2023) pp.123-129.
- 2) Sooyoung Jang, Hyung-II Kim, "Entropy-Aware Model Initialization for Effective Exploration in Deep Reinforcement Learning", Sensors, Vol. 22, No. 15, (2022) p. 5845.
- 3) 田渕一真, 谷口忠大, 樋木哲夫, “模倣学習と強化学習の調和による効率的行動獲得”, 人工知能学会全国大会, (2006) 3C1-2.
- 4) 桐山善守, 名倉武雄, Andriacchi P. Thomas, “人間工学のための計測手法”, 人間工学, Vol.50, No.4, (2014) pp.172-181.

- 5) Meta, Meta Quest 3, (2025),
<https://www.meta.com/jp/quest/quest-3/>, (参照 2025-10-15)
- 6) Unity Technologies, Unity Real-Time Development Platform, (2025),
<https://unity.com/ja>, (参照 2025-10-15)
- 7) Elephant Robotics, myCobot 280 M5, (2025) ,
<https://www.elephantrobotics.com/en/mycobot-280-m5/>, (参照 2025-10-15)