



遠隔ロボットアームシステムにおける 動作特徴に基づく可変制御

筒井 秀斗, 渡辺 圭貴, 浦野 健太, 米澤 拓郎, 河口 信夫

名古屋大学 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)

{tsutsui,yoshiki}@ucl.nuee.nagoya-u.ac.jp

{urano,takuro,kawaguti}@nagoya-u.jp

概要: これまでに VR 空間を通じた遠隔ロボットアーム操作システムは数多く研究されており, コントローラの姿勢をロボットアーム先端の姿勢に連動させる操作手法が提案されている. しかし, VR 遠隔操作システムは依然として一般に普及しておらず, 実用化にはより直感的な操作が可能な仕組みが求められている. 本研究では, 姿勢差分入力の変位距離や回転角度といった特徴に着目したロボットアームの先端姿勢の可変制御により, ユーザビリティ向上を目指す.

キーワード: ロボット, 複合現実

1. はじめに

現在, 遠隔ロボット操作技術は建設現場での重機制御や医療分野における遠隔手術などの分野で実用化が進んでいる. しかし, 既存の遠隔操作システムの大部分は専用のコックピットや専門の操作技能を必要としている. 2022 年 11 月に実施されたテレプレゼンスロボットのコンテストである Avatar XPrize[1] においても, 815 チーム中の決勝進出 17 チームの多くが専用操作環境を採用していた. 遠隔ロボティクス技術の社会普及を促進するために, 我々は汎用性の高いデバイスで動作する操作システムの開発が不可欠であると考えている.

直感的な操作の実現を目標として, VR ヘッドセットを活用した遠隔ロボットアーム操作に関する研究が行われてきた[2,3]. これらの研究では, 作業者が VR 環境に没入し, VR コントローラの姿勢とロボットアーム先端の姿勢を連動させる操作手法が提案されている. 我々はこれまでに汎用 VR デバイスによる直感的な遠隔ロボットアーム操作システムの開発に取り組んできた. 新たな労働形態である「メタワーク [4]」の実現に向け, 第 29 回 VR 学会 [5] や UbiComp[6] でのデモンストレーションを通じて 150 名以上の被験者から得られたフィードバックを基にシステム改良を重ねている. これらのデモでの操作システムでは VR コントローラのボタン押下中に限定して位置と回転差分が実寸で反映される差分入力方式を採用している. VR コントローラの姿勢差分入力によって直感的な操作を実現するには, 以下の課題がある. 第一に操作の正確性と動作距離の長さにトレードオフが存在する点である. 差分入力の反映量が小さいと繊細な操作は可能になるが, 腕の可動域だけでは十分な距離を一度に入力できず, 腕を伸ばしきった後に一度差分入力を解除して手元に戻すクラッチ操作が必要となる. このクラッチ操作中はロボットを操作できないため作業効率が

低下し, 繰り返しによって疲労が蓄積する可能性がある. 第二に意図通りのコントローラ入力が必要な軌跡がある点である. ロボットアームを操作する際, 先端位置または向きを固定した操作が求められる場合があるが, コントローラの位置または向きを固定したまま操作するには, 手首を大きくひねったり, 肘を持ち上げたりするなどユーザが不自然な姿勢を取らざるを得ず, 疲労の増加につながる可能性がある. また, 初心者の場合は無意識に自然な姿勢を取り, 意図しない移動入力や回転入力が発生する恐れもある.

これらの課題を解決するために, 本研究では入力動作特徴に基づいた目標先端姿勢の可変制御手法を提案する. 特に入力差分姿勢の変位距離や回転角度といった特徴に着目し, その大きさに応じて反映スケールを非線形に変化させる制御を実現する. この手法により, 繊細な操作とダイナミックな操作を両立するために入力差分の大きさに応じて反映スケールを変化させる動作増幅フィルタと, 位置と回転のそれぞれを固定して独立操作しやすくするために, 互いの入力差分の大きさに応じて反映スケールを変化させる位置干渉抑制フィルタと回転干渉抑制フィルタを提案する. また, 我々が以前に実装した VR 遠隔ロボットアーム操作システム [7] に提案手法を実装した.

本研究の貢献は以下のとおりである.

- VR コントローラでの動作特徴の強調を目的とした可変制御手法の提案
- VR コントローラでの位置・回転の一方を強調操作しやすくする可変制御手法の提案

2. 関連研究

入力デバイスの位置入力と表示の関係を扱う Control-Display と呼ばれる分野においては, マウスによる平面ディスプレイでのポインティング操作に対する動的スケール変

換が検討されてきた。Casiez ら [8] は、ポインティングタスクにおいて速度依存スケール変換を適用し、定数スケールと比較してタスク時間や動作距離の低減が報告されている。VR コントローラの入力姿勢を用いた仮想ハンドの三次元操作においても、身体所有感を維持しつつ到達可能範囲を拡張し、ユーザビリティの向上を目的とした動的スケール変換手法が提案されている [9]。

遠隔操作分野では、動作特徴に応じた動的スケール変換が提案されている。Yoon ら [10] はリンク機構を持つデバイスを用いて、リーダーーム先端の速度、累積変位、フォロアームの先端方向変化に基づき、動作を粗密に分類して動的にスケールを変換する手法を提案した。また、Lee ら [11] はアーム先端に取り付けたカメラ画像により接触タスクか否かを判別し、接触タスクではインピーダンススケールを、非接触タスクでは位置スケールを把持力に応じて動的に調整する手法を提案している。

このように空間姿勢に基づく操作デバイスにおいて動作特徴に基づいた入力スケール変換は研究されてきたものの、ロボットアーム操作を対象とした VR コントローラの入力姿勢変換手法は十分に検討されていない。本研究では、特に遠隔ロボットアーム操作を対象とした VR コントローラ操作の動作特徴に基づく動的な入力スケール変換手法を提案する。

3. 構成

本研究では我々が以前に実装した VR 遠隔ロボットアーム操作システム [7] に提案手法を追加実装した。コントローラ情報の取得から目標先端姿勢決定までの流れを図 1 に示す。本システムでは、VR コントローラから取得した位置情報およびクォータニオンで表現される回転情報をもとに、目標先端姿勢を逐次決定する。まず、現在の姿勢情報と前回の姿勢情報から、位置差分および回転差分を算出する。次に、これらの差分は座標変換処理により、コントローラ座標系からロボットアームの座標系へと変換される。この際、座標軸の変換に加えて入力スケールを縮小し、ユーザが繊細な操作を行いやすくしている。

続いて、変換後の差分には移動平均フィルタを適用し、手ブレやノイズの影響を抑制する。さらに、動作増幅フィルタによって俊敏な動作への感度を高め、入力動作が強調されるように調整する。加えて、位置干渉抑制フィルタ・回転干渉抑制フィルタを適用し、俊敏な動作において位置と回転の制御を独立しやすくし、操作意図を際立ちやすくする。最後に、これらのフィルタ処理を経た入力差分を現在の目標先端姿勢に加算し、ロボットアームの新たな目標先端姿勢を決定する。

4. 提案手法

本研究ではコントローラの姿勢差分入力における、動作特徴に基づいた反映スケールの可変制御手法として、入力動作の強調を目的とした動作増幅フィルタと位置と回転

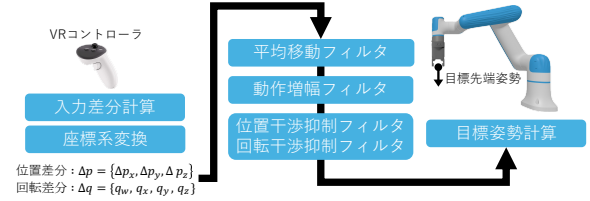


図 1: 目標先端姿勢計算の流れ

の独立した入力の支援を目的とした位置干渉抑制フィルタ・回転干渉抑制フィルタを提案する。それぞれのフィルタは微小時間間隔で取得される位置差分 $\Delta p = (\Delta p_x, \Delta p_y, \Delta p_z)$ とクォータニオンによる回転差分 $\Delta q = (q_w, q_x, q_y, q_z)$ を入力とし、スケールを変化させた後、入力と同じ形式の位置差分と回転差分を出力する。

4.1 動作増幅フィルタ

動作増幅フィルタは動作距離の短縮を目的とした入力動作が大きい際に反映スケールを増大させ、操作を強調するフィルタである。

処理手順

1. 位置差分から移動距離 $d_{pos} = \|\Delta p\|$ を計算
2. 回転差分から回転角度 $d_{rot} = 2 \arccos(|q_w|)$ を計算
3. 式 (1) により増幅係数 A を計算
4. 増幅係数を位置差分および回転角度に乗算
5. 回転角度をクォータニオンに再変換

$$A = \begin{cases} 1 + k_{acc} \cdot (d - d_{th})^{\alpha_{acc}} & \text{if } d \geq d_{th} \\ 1 & \text{if } d < d_{th} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 A は増幅係数、 d は入力差分量 (d_{pos} または d_{rot})、 d_{th} はスケール変換をする最小閾値、 k_{acc} および α_{acc} は曲線パラメータである。

4.2 位置干渉抑制フィルタ・回転干渉抑制フィルタ

位置干渉抑制フィルタ・回転干渉抑制フィルタは誤動作を抑制し、操作の独立性の強調を目的としたフィルタである。位置干渉抑制フィルタは回転角度が大きい際に位置入力を抑制し、回転干渉抑制フィルタは移動距離が大きい際に回転入力を抑制する。

処理手順

1. 位置差分から移動距離 $d_{pos} = \|\Delta p\|$ を計算
2. 回転差分から回転角度 $d_{rot} = 2 \arccos(|q_w|)$ を計算
3. 式 (2) によりそれぞれの抑制係数 S を計算
4. 抑制係数を位置差分および回転角度に乗算
5. 回転角度をクォータニオンに再変換

$$S = \begin{cases} 1 - k_{sup} \cdot (d - d_{th})^{\alpha_{sup}} & \text{if } d \geq d_{th} \\ 1 & \text{if } d < d_{th} \end{cases} \quad (2)$$

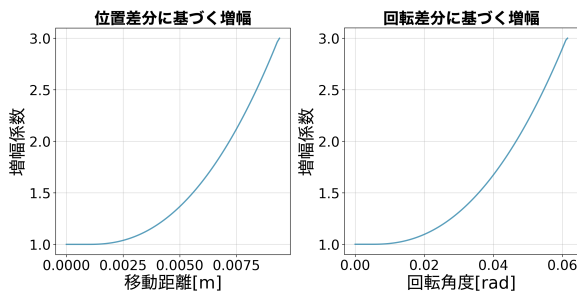


図 2: 入力差分への動作増幅フィルタの適用結果

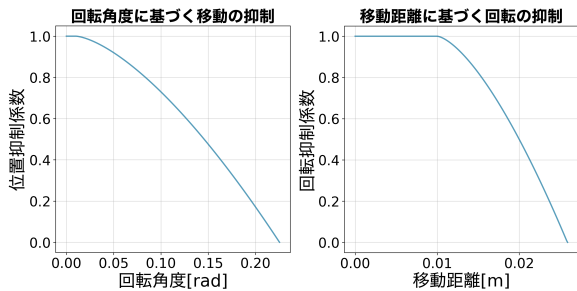


図 3: 入力差分への位置干渉抑制フィルタ (左) と回転干渉抑制フィルタ (右) の適用結果

ここで、 S は抑制係数、 d は入力差分量 (d_{pos} または d_{rot})、 d_{th} はスケール変換をする最小閾値、 k_{sup} 、 α_{sup} は曲線パラメータである。

5. 実装

提案手法は我々の遠隔ロボットアーム操作システムに追加実装した。本システムは WebXR を用いてブラウザ上で動作し、VR ヘッドセットとして Meta Quest 3 を使用している。本研究では以下のパラメータにより目標先端姿勢の計算を実装した。

- **座標変換**：入力スケールを 1/4 に縮小した。
- **移動平均フィルタ**：ウィンドウサイズ 5 の移動平均を計算し、移動距離 0.1 mm 未満および回転角度 0.001 rad 未満の微小入力 は除去した。
- **動作増幅フィルタ**：動作増幅フィルタによって適用される入力差分に対する増幅係数を図 2 に示す。各パラメータは位置差分に対して $d_{th} = 0.001$ 、 $k_{acc} = 120000$ 、 $\alpha_{acc} = 2.3$ 、回転差分に対して $d_{th} = 0.005$ 、 $k_{acc} = 1500$ 、 $\alpha_{acc} = 2.3$ とした。増幅係数が発散しないために上限値 $A \leq 3$ を設定した。
- **位置干渉抑制フィルタ・回転干渉抑制フィルタ**：位置干渉抑制フィルタと回転干渉抑制フィルタによって適用される入力差分に対する抑制係数を図 3 に示す。位置干渉抑制フィルタのパラメータは、 $d_{th} = 0.01$ 、 $k_{sup} = 500$ 、 $\alpha_{sup} = 1.5$ と設定し、回転干渉抑制フィルタのパラメータは、 $d_{th} = 0.01$ 、 $k_{sup} = 10$ 、 $\alpha_{sup} = 1.5$ と設定した。抑制係数が負にならないよ

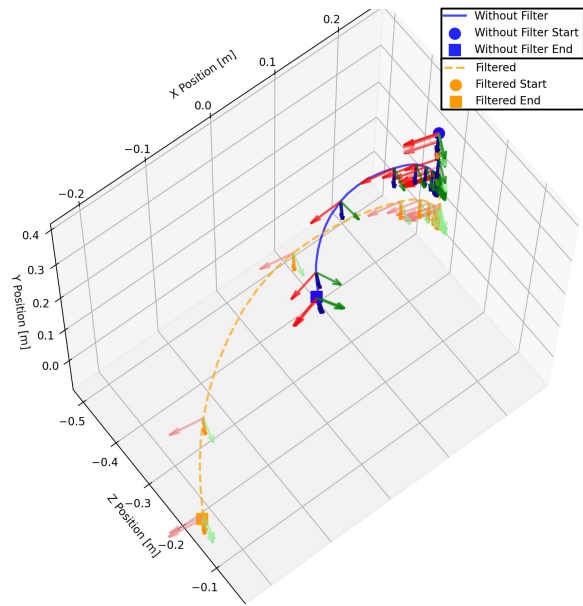


図 4: 提案手法の有無による軌跡比較

うに下限値 $S \geq 0$ を設定した。

6. 軌跡比較

提案手法である動作増幅フィルタ、位置干渉抑制フィルタ、回転干渉抑制フィルタの挙動を確認するために提案手法を適用した姿勢軌跡と未適用の姿勢軌跡を比較した。先端位置の操作を目的とする大きな移動動作の軌跡を図 4 に示す。黄色の点線が提案手法を適用した軌跡、青色の実線が提案手法を適用していない軌跡であり、いずれも同一の初期姿勢から入力を開始している。位置および回転情報は約 30ms ごとに更新されており、位置は全てのサンプルをプロットし、姿勢を示す座標軸は 7 サンプルに 1 回 (約 210ms ごと) 表示している。等時間間隔で表示される座標軸の間隔が広がっている箇所では、提案手法を適用した軌跡の移動距離が大きくなっており、動作増幅フィルタにより速い移動動作が強調されている様子が確認できる。また、軌跡の始点と終点の座標軸を比較すると、未適用の軌跡では姿勢の回転が生じているのに対し、提案手法を適用した軌跡では回転が抑えられている。これにより、回転干渉抑制フィルタによる移動操作中の不要な姿勢変化の低減が確認できる。

7. 今後の展望

本研究で用いたスケール変換のパラメータについては、今後さらなる調整の余地があると考えられる。腕の可動域や動作速度は軸方向ごとに異なり、タスクの種類に応じて動作変位が大きくなる軸方向も異なる。その特徴を活かす異方性スケール変換の導入によってより直感的な操作性を実現できる余地がある。また、提案手法を実用化の上では操作の習熟度をはじめとしたユーザ特性に応じてパラメータ調整が必要であるため、被験者実験を通じたフィードバックに基づいてパラメータ調整をする予定である。

また、提案手法におけるベクトルの方向成分の活用についても改善の余地がある。本研究では、位置差分については距離、回転差分については回転角度のみを用いてスケールを算出しているため、差分の向き情報は十分に活用されていない。例えば、位置差分ベクトルや回転差分の回転軸方向を一貫して維持できるような支援により、操作時の先端姿勢のぶれを抑制でき、動作意図を反映しやすい操作支援手法の実現が期待される。

8. まとめ

本研究ではVRコントローラを用いた直感的な遠隔ロボットアーム操作の実現に向けて、動作特徴に基づく目標先端姿勢の可変制御手法を提案した。可変制御手法として、入力動作を強調する動作増幅フィルタと、位置差分の独立した入力を支援する回転干渉抑制フィルタ、回転差分の独立した入力を支援する位置干渉抑制フィルタを示した。今後は被験者実験を通じて、スケール変換パラメータを調整し、その有用性を検証する予定である。

謝辞

本研究の一部は、内閣府 SIP3 JPJ012495, NEDO 委託研究 JPNP23003, NICT 委託研究 22609, JST CREST JP-MJCR22M4 に支援されています。

参考文献

- [1] XPRIIZE. Avatar xprize.
<https://www.xprize.org/prizes/avatar>, 2025.
Accessed: 2025-07-15.
- [2] Yun-Peng Su, Xiao-Qi Chen, Tony Zhou, Christopher Pretty, and Geoffrey Chase. Mixed-reality-enhanced human-robot interaction with an imitation-based mapping approach for intuitive teleoperation of a robotic arm-hand system. *Applied Sciences*, Vol. 12, No. 9, 2022.
- [3] Abdeldjalil Naceri, Dario Mazzanti, Joao Bimbo, Yonas T. Tefera, Domenico Prattichizzo, Darwin G. Caldwell, Leonardo S. Mattos, and Nikhil Deshpande. The vicarios virtual reality interface for remote robotic teleoperation. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 101, No. 4, p. 80, 2021.
- [4] 名古屋大学大学院工学研究科河口研究室, 産総研. sip3 meta work. <https://sip3-metawork.com/>.
Accessed: 2025-07-15.
- [5] 宇佐美龍斗, 渡邊企章, 具志祐希, 筒井秀斗, 渡辺圭貴, 加納一馬, 相川雄也, 志村魁哉, 林田望海, 浦野健太, 米澤拓郎, 河口信夫. 遠隔 MR ロボットアーム制御によるスマートな 3D スキャンシステム. 日本バーチャルリアリティ学会第 29 回大会論文集, 2024.
- [6] Ryuto Usami, Kisho Watanabe, Yuki Gushi, Shuto Tsutsui, Yoshiaki Watanabe, Kazuma Kano, Yuya Aikawa, Kaiya Shimura, Nozomi Hayashida, Kenta Urano, Takuro Yonezawa, and Nobuo Kawaguchi. Demonstration:remote 3d scanning with vr and robotic arm. In *Companion of the 2024 on ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, UbiComp '24, p. 201–204, New York, NY, USA, 2024. Association for Computing Machinery.
- [7] 筒井秀斗, 渡邊企章, 宇佐美龍斗, 具志祐希, 渡辺圭貴, 林田望海, 志村魁哉, 浦野健太, 米澤拓郎, 河口信夫. VR180 遠隔ロボットアームシステムにおける操作支援のための情報提示手法の検討. 研究報告ユビキタスコンピューティングシステム (UBI), 第 2025-UBI-85 巻. 情報処理学会, 2025. 第 85 回 UBI 研究会.
- [8] Géry Casiez, Daniel Vogel, Ravin Balakrishnan, and Andy Cockburn. The impact of control-display gain on user performance in pointing tasks. *Human-Computer Interaction*, Vol. 23, No. 3, pp. 215–250, 2008.
- [9] Johann Wentzel, Greg d'Eon, and Daniel Vogel. Improving virtual reality ergonomics through reach-bounded non-linear input amplification. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, p. 1–12, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [10] Jeonghyeon Yoon, Sanghyeok Park, Hyojae Park, Cholin Kim, Sihyeoung Park, and Minho Hwang. A single scale doesn't fit all: Adaptive motion scaling for efficient and precise teleoperation, 2025.
- [11] Hunjo Lee, Jiwoong Han, and Gi-Hun Yang. Development of variable scaling teleoperation framework for improving teleoperation performance. *International Journal of Control, Automation and Systems*, Vol. 22, pp. 936–945, 03 2024.