



身体部位間リターゲティングによる作業空間の拡張

星崇宏¹⁾, 佐々木智也^{1,2)}, 鮎澤光³⁾, 吉田英一¹⁾

1) 東京理科大学 先進工学部 (〒125-8585 東京都葛飾区新宿 6-3-1)

2) 東京大学 先端科学技術研究センター

3) 産業技術総合研究所 人間社会拡張研究部門

概要: 身体機能を拡張するアプローチとして, SuperLimbs が VR やロボティクスの分野で注目されており, その操作にはさまざまな手法が提案されている. その中でも, 下肢を用いて操作する手法では, 下肢とロボットアームの作業空間が異なるため, 下肢の操作で上肢と同等の動きを実現することは難しい. そこで本研究では, 異なる身体部位間で同等の作業空間を実現するためのモーションリターゲティング手法を提案し, VR 課題においてその評価を行う. その結果, 提案手法による作業空間の拡大を確認した.

キーワード: 作業支援・評価, 人間拡張, ロボティクス

1. はじめに

近年, 人間拡張研究のアプローチのひとつとして, Supernumerary Robotic Limbs や SuperLimbs の研究が注目されている [1]. SuperLimbs では, VR やロボティクスを用いて人に新たな身体部位を追加し, 作業の支援や拡張, 新たな身体部位の認知などのさまざまな研究が行われている. その中で, 新たな身体部位の操作手法についていくつか提案されている. 例えば, 人の腕を模したロボットアームを Brain-machine interface (BMI) を用いて操作しているもの [2] や, 足を用いてロボットアームを操作する手法 [3] が提案されている. 身体動作を用いて操作する手法は, 短期間の学習で習得できるという利点がある一方で, 操作する部位の構造と操作対象の構造との間に違いがある場合には, それぞれの作業空間の不一致により, 操作対象の能力を十分に引き出すことが困難となる可能性がある.

人間とロボット間などの可動域や構造が異なる動作を変換する手法として, モーションリターゲティングがある. 例えば, ロボティクスでは, モーションキャプチャーで計測した人間の動作をヒューマノイドロボットで再現することに使用される [4]. このような手法は上肢と下肢といった異なる身体部位間の動作変換への適用も期待できるが, ロボット操作を目的とした異なる部位間のリターゲティングはほとんど試みられていない. 下肢の動作を上肢の作業空間をカバーできるように変換することで, 従来, 手で行われていたロボット操作を足で直感的に行えることが期待できる.

そこで, 本研究では, 異なる身体部位間のモーションリターゲティング手法を提案する. 対象となる身体部位の作業空間の解析に基づいて写像関数を設計し, パラメータを最適化することで, 異なる身体部位間の動作変換を行う. 今回は, 上肢と下肢について, 関節角度に着目して, 写像関数を設計することで足の動作を手の動作に変換する. マッピング関数のパラメータを作業空間解析 [5] の結果に基づき最適化し, VR 上での課題により提案手法の有効性を検証する.

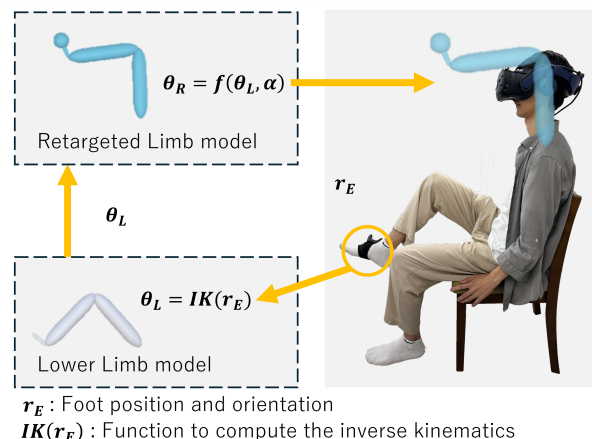


図 1: リターゲティングによる身体部位間の動作変換

2. 提案手法

構造が異なる身体部位間の動作を変換するモーションリターゲティングを提案する. 動作の変換を行う写像関数を考え, それぞれの身体部位が有する作業空間に基づいて写像関数のパラメータを最適化する.

2.1 写像関数

本研究では, 足先 (下肢) の動作の入力で, 手先 (上肢) の作業空間を包含するように変換する写像関数 f を考え, 次のように定式化する.

$$\theta_R = f(\theta_L, \alpha) \quad (1)$$

ここで, θ_R は, 動作変換後の Retargeted Limb (RL) モデルの関節角度であり, θ_L は, 入力に用いる下肢モデルの関節角度である. α は, 拡大率のパラメータであり, 部位の作業空間に基づいて設計する. 上肢, 下肢ともに 7 自由度のモデルを採用する. 下肢モデルの軸配置には文献 [6] で用いられたものを採用する. 関節の可動域には, 文献 [7] に示された値を用い, セグメントの長さについては, 文献 [8, 9] の値を用いる. Zacharias ら [5] の reachability map を用い

て腕と脚の作業空間の解析を行い、その結果を基に写像関数を決定する。本実験では、各関節角度に定数係数を乗じることにより、作業空間の拡張を行う。そのため、RLは、軸配置とセグメントの長さは、下肢モデルと同様だが、関節の可動域は拡大率パラメータ α 分拡大されたものとなる。提案手法の概要を図1に示す。

2.2 最適化

上肢の作業空間をカバーし、かつ拡大率 α の各要素の和が最小となるように最適化を行う。この際、上肢全体の作業空間ではなく、「腰より上」「頭より下」「身体の正面」といった制約条件に基づいて定義された範囲で最適化を行った。さらに、拡大率が過度に大きくなり操作性を損なうことを防ぐため、拡大率の各要素の上限を3に設定した。最適化の結果 α は、[1.94, 1.42, 2.97, 2.21, 3.00, 3.00, 3.00] となった。

3. 実験設計

提案手法の効果をVRを用いたユーザー実験で検証する。実験で用いるリーチング課題、実験条件および装置について述べる。なお、ユーザー実験を行うにあたりモデルの関節数を7個から6個に減らした。これは以下に述べるリーチング課題ではモデルの冗長性が不要であると考えたためである。

3.1 リーチング課題

VR空間内に表示された球を制限時間内に触るリーチング課題を設定し、課題の成否および達成時間によるパフォーマンス評価と主観的負荷を計測する。

リーチング課題の様子を図2に示す。課題では、実験参加者の前に、ターゲットとなる白い球をランダムな位置に1つ配置し、参加者は表示された球になるべく早く触れるようにする。参加者が操作するエンドエフェクタの中心が球に触れると、目標の球の色が緑色に変化する。ターゲットは接触の可否によらず3秒間表示されて消える、その後、2秒のインターバルを設ける。これを1試行として、1条件あたり100試行する。球を表示される位置は、参加者の水平面と前額面に対して並行に一定の距離ずらした2種類の平面（水平面と垂直面）を設定し、それぞれの平面上に正方形範囲を設定しその中でランダムに表示する。この正方形の1辺の長さは、文献[8, 9]に記載されている身長に対

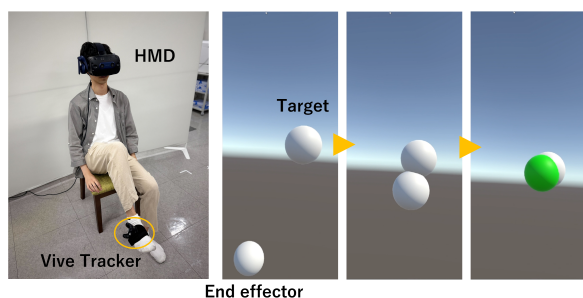


図2: リーチング課題実施中の様子

する肩から手先までの相対的な長さに実験参加者それぞれの身長を乗じて算出する。100試行中、前半の50回を水平面、後半の50回を垂直面で課題を行う。また、ターゲットの見逃しによる失敗を避けるため、表示時にブザー音を用いて通知する。

3.2 実験条件と実験手順

リーチング課題について、上肢、下肢、提案手法の3条件で行う。上肢条件(UL)は、VRトラッカーを手につけて、腕を動かして行う課題である。下肢条件(LL)は、VRトラッカーを足につけて、脚を動かして行う課題である。提案手法条件(RL)は、VRトラッカーを足につけて、2節で示したリターゲットによる動作変換を介しながら脚を動かして行う課題である。課題時の実験条件の順番は、実験参加者ごとに入れ替えてカウンターバランスをとる。

実験では、実験実施者が課題について参加者に説明したあと、各条件でリーチング課題を行う。各条件では、練習時間の後、本番課題に進む。1つの条件で課題を行った後、主観的負荷を計測するためにボルグスケール[10]およびNASA-TLX[11]に回答する。

3.3 操作方法と実験装置

上肢条件では、手先のVRトラッカーの位置にエンドエフェクタを表示する。そのエンドエフェクタを操作して、目標に触れる。下肢条件では、あらかじめ測定した脚の長さをもとに足先にエンドエフェクタをつけた下肢モデルを作成する。そのモデルの股関節の位置が実験参加者の肩の位置と一致するように配置する。この下肢モデルは、実験参加者の実際の脚と同じ動きをするため、エンドエフェクタの位置が股から肩の高さ分上方向にオフセットされて動く。提案手法条件でも、下肢条件と同様に下肢モデルを作成し、そのモデルを肩の位置に配置する(図1)。提案手法条件では、2節で述べたように下肢モデルの各関節の値に拡大率 α の各要素を掛けたものを用いてリターゲットを行い、エンドエフェクタを操作する。なお、下肢モデルの逆運動学計算にはBio IK¹を用いる。

VR課題を行うためのHMDにはHTC Vive Pro 2を用いた。実験プログラムはUnityで実装し、CPU: Intel Core i7-12700H, GPU: NVIDIA GeForce RTX 3060 Laptop GPU, OS: Windows 11のラップトップPCで実行した。

4. 実験結果と考察

4.1 実験参加者

参加者は健康な男性6名、平均年齢22.00歳(標準偏差: 1.15)、平均身長176.8 cm(標準偏差: 5.6 cm)であり、全員右利きであった。

4.2 実験結果

各実験条件におけるリーチング課題の結果を図3に示す。図3の横軸は実験条件、図3aの縦軸は成功率、図3bの縦軸はターゲットに触れるまでの反応時間である。なお、図3a

¹<https://assetstore.unity.com/packages/tools/animation/bio-ik-67819>

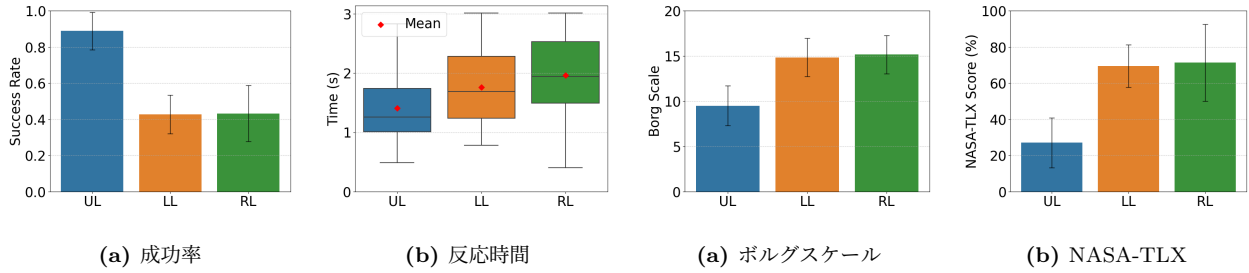


図 3: 課題成績

図 4: 主観的作業負荷

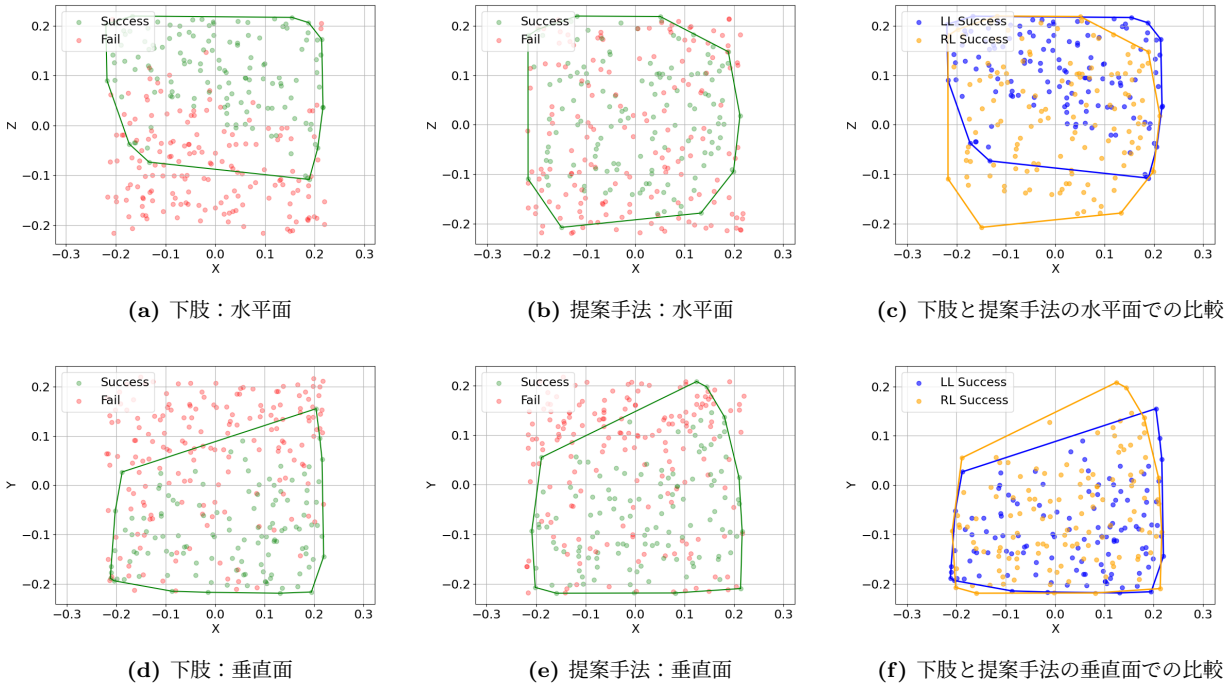


図 5: LL と RL における表示されたターゲットの位置と成否の比較

のエラーバーは、実験参加者ごとの平均値に対する標準偏差を示している。成功率は、高い順に UL, RL, LL となった。UL と他の 2 条件との間には、成功率に 2 倍以上の差がみられた。一方、RL と LL の平均値の差は、0.005 と非常に小さいものであった。反応時間の平均値は、UL, LL, RL の順で短くなっており、UL では、他の 2 条件と比較してよりばらつきが小さい。

図 5 に LL および RL の課題において表示されたターゲットの位置とその成否結果を示す。なお、図の各軸は正規化されており、この値と実験参加者の身長が、実際に表示されたターゲットのとなる。図中の線は、触れることができた点の凸包を表している。図 5c,f は成功した点の条件比較を示している。RL において触れることができた点の分布は、LL と比較して、水平面上ではより手前側に広がり、垂直面ではより上方に広がっている傾向がみられる。それぞれの凸包の面積を比較すると、提案手法により垂直面では 12.4%、水平面では 21.7%領域が拡大した。

4.3 主観的負荷

主観的負荷に関するボルグスケールおよび NASA-TLX の結果を図 4 に示す。エラーバーは標準偏差を示している。いずれの指標においても UL が最も負荷が軽く、次いで LL、最も負荷が高かったのは RL となった。また、UL と LL との負荷の差が LL と RL との差より大きい傾向が見られた。

4.4 考察

図 5 より、提案手法によってリーチングできる範囲が拡大されていることが確認できた。これは、提案手法によって下肢の持つ作業空間が拡大されたことを示している。しかしながら、図 3a から、成功率の上昇は凸包の面積の拡大と比べて小さかった。この原因として、RL を十分に操作できていない、もしくは、下肢による操作精度に限界があり、作業空間を拡大すると、精度の低下が免れないといったことが考えられる。一方で、実験参加者の中には図 6 に示すように、提案手法によって成功率が大きく上昇した者もいた。このことから、本手法の有効性には個人差があることと考えられる。この個人差の要因の一つとして、提案手法の理解度の違いが挙げられる。本提案手法は、VR トラッカーの

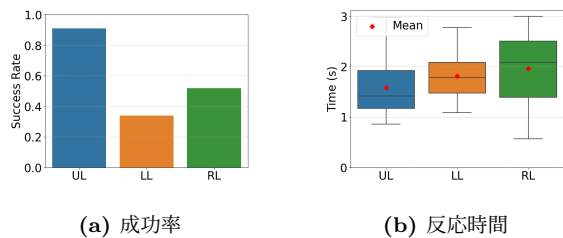


図 6: 提案手法により成功率が上昇している実験参加者のリーチング成績

位置座標の変化と操作対象となるエンドエフェクターの位置座標の変化を下肢モデルの関節角度の拡大というリターゲティングによって変換している。そのため、変換に適した動作をする必要があり、操作方法の習熟が必要となる可能性がある。実際に、実験終了後の感想として、「球がどのように動くかわからなかった。」と回答した実験参加者もいた。提案手法の説明および動作原理の理解、練習時間が参加者によっては不十分であったことが成功率の差に表れたと思われる。よって、提案手法の動作変換についての理解や操作の習熟が進めばより高い成功率となることが期待される。

主観的負荷において、RLの負荷がLLと同程度であった。理由として、下肢の可動域全体を使用して、上肢の作業空間をカバーしていることが要因であると考えられる。表示されたすべてのターゲットにリーチングを行うためには、下肢の可動域全体を使用する。このことにより、LLと同程度の負荷がかかっていたと推察される。提案手法の負荷をULの負荷と同程度に抑えるためには、拡大率 α を大きく設定し、少ない動きでULの作業空間をカバーできるようにすることが考えられる。一方で、拡大率を大きくすると操作性が大きく損なわれる可能性があるため、作業空間の広さと操作性の間にはトレードオフの関係があると思われる。このような制約を超えるには個人の特性に応じたパラメータ設定や動的な拡大率の変化なども検討する必要がある。

5. むすび

本稿では、SuperLimbsを身体部位で操作する際に生じる作業空間の制約解消を目的として、異なる構造をもつ身体部位間の作業空間に着目したリターゲティング手法を提案した。具体例として下肢の作業空間を上肢の作業空間に拡大する状況を想定して写像関数とパラメータを決定し、提案手法についてユーザー実験を行った。VRを用いたリーチング課題の比較結果から、提案手法によって、脚と比較して、作業空間が拡大されていることを確認し、手法の有用性を示した。今後は、実験の結果を踏まえた提案手法の改良や課題および実験手順の調整等を行い、より詳細な実験の実施およびロボットアームの操作への適用とその際の有効性について検証を行う。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 基盤研究 (S) 22H05002, JST SICORP JPMJSC2309 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] D. Prattichizzo, M. Pozzi, T. L. Baldi, M. Malvezzi, I. Hussain, S. Rossi, and G. Salvietti. Human augmentation by wearable supernumerary robotic limbs: review and perspectives. *Prog. Biomed. Eng.*, Vol. 3, No. 4, p. 042005, September 2021.
- [2] C. Penaloza, D. Hernandez-Carmona, and S. Nishio. Towards intelligent brain-controlled body augmentation robotic limbs. In *2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, pp. 1011–1015. IEEE, 2018.
- [3] T. Sasaki, MHD Y. Saraiji, C. L. Fernando, K. Minamizawa, and M. Inami. MetaLimbs: multiple arms interaction metamorphism. In *ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies*, No. Article 16 in SIGGRAPH '17, pp. 1–2, New York, NY, USA, July 2017. Association for Computing Machinery.
- [4] K. Ayusawa and E. Yoshida. Motion retargeting for humanoid robots based on simultaneous morphing parameter identification and motion optimization. *IEEE Trans. Rob.*, Vol. 33, No. 6, pp. 1343–1357, December 2017.
- [5] F. Zacharias, C. Borst, and G. Hirzinger. Capturing robot workspace structure: representing robot capabilities. In *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3229–3236. IEEE, October 2007.
- [6] Y. Asano, H. Mizoguchi, T. Kozuki, Y. Motegi, M. Osada, J. Urata, Y. Nakanishi, K. Okada, and M. Inaba. Lower thigh design of detailed musculoskeletal humanoid “kenshiro”. In *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4367–4372. IEEE, October 2012.
- [7] J. Barter, I. Emanuel, and B. Truett. A statistical evaluation of joint range data. August 1957.
- [8] I. P. Herman. *Physics of the human body*. Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering. Springer International Publishing, Cham, Switzerland, March 2018.
- [9] R. Drillis, R. Contini, and M. Bluestein. Body segment parameters; a survey of measurement techniques. *Artif. Limbs*, Vol. 8, pp. 44–66, 1964.
- [10] G. A. Borg. Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine and science in sports and exercise*, Vol. 14, No. 5, pp. 377–381, 1982.
- [11] S. G. Hart and L. E. Staveland. Development of NASA-TLX (task load index): Results of empirical and theoretical research. In P. A. Hancock and N. Meshkati, editors, *Advances in Psychology*, Vol. 52, pp. 139–183. North-Holland, January 1988.