

令和 5 年 5 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K21307

研究課題名（和文）求心性信号と中枢性信号に基づくリダイレクテッドハンドの研究

研究課題名（英文）A Study of Redirected Hand Based on Afferent and Central Signals

研究代表者

松本 啓吾（Matsumoto, Keigo）

東京大学・大学院情報理工学系研究科・助教

研究者番号：20909527

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、実験参加者に対し、視覚的・触覚的フィードバックを操作し、リダイレクテッドハンドの発生メカニズムとそれに関連する神経基盤を調査しました。得られたデータをもとに、求心性信号と中枢性信号の役割および相互作用を定量化し、現象の発生メカニズムを解明に取り組みました。この研究成果は、バーチャルリアリティやテレプレゼンス技術の発展に寄与するとともに、運動制御や知覚の基本原則に関する理解を深める上で重要な意義を持ちます。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義として、運動制御や知覚の基本原則に関する理解を深めることに貢献します。また、求心性信号と中枢性信号の相互作用の定量化は、神経科学や認知科学の分野において新たな知見をもたらすことが期待されます。

社会的意義としては、リダイレクテッドハンドのメカニズムを利用し、より自然で直感的なインタラクションを実現することで、ユーザーの没入感やリアリティを向上させることが可能になります。これにより、医療、訓練、教育などの分野でのシミュレーションやリモート操作の効果を高めることができ、広範な分野での応用が期待されます。

研究成果の概要（英文）：In this study, we manipulated visual and haptic feedback to the experimental participants to investigate the mechanisms of redirected hand generation and the neural basis associated with it. Based on the data obtained, we quantified the role and interaction between afferent and central signals, and worked to elucidate the mechanism of the phenomenon. The results of this research will contribute to the development of virtual reality and terrestrial resistance technologies, and are of great significance in furthering our understanding of the basic principles of motor control and perception.

研究分野：バーチャルリアリティ

キーワード：Haptic Retargeting Hand Redirection Visual Capture

1. 研究開始当初の背景

バーチャル環境においてバーチャル物体との触力覚インタラクションを行うためには実空間にバーチャル物体と同等の物体を用意する、または、任意の触力覚を再現可能な複雑な機構が必要とされる。このように任意のバーチャル物体を視覚提示できても触力覚提示する際は実環境の制約を受ける。この解決策として **Redirected Hand (RH)** が提案されている。RH とは、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を通して実際の手や物体の位置とはわずかに異なる位置にバーチャルハンドやバーチャル物体を提示することで、位置知覚や運動知覚を操作する技術である。先行研究では RH を用いることで、実際には 1 個しかないブロックを複数個あるかのように触力覚提示し、それらを移動したり積み上げたりすることを可能にしている (Azmandian et al. 2016)。研究開始当初の段階では、RH 研究においてユーザに悟られない範囲で RH を適用できる閾値の検証が行われていたが、実際の手や物体の位置とバーチャルハンドの位置は数 cm 程度しかずらせないことが報告されていた。このように、RH はバーチャルリアリティ (VR) における新たな触力覚提示手法として期待されていたが、その効果は未だ限定的であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、実空間とバーチャル空間における手技動作の対応関係をユーザに悟られない範囲で操作することでバーチャル空間における手技動作を実際に行っていると思わせることを可能にする RH 技術について求心性信号と中枢性信号の両面から検証することで RH の効果の向上を試みることである。近年、医療手術や機器のメンテナンスなどの手技動作を伴う VR トレーニングが普及しつつある。こうした手技動作においては触力覚が重要な要素となるが、触力覚を提示するためには実環境においてもバーチャル環境と同等の物体や複雑な機構が必要となり、大掛かりなシステムやコストがかかるなどの問題があった。本研究では、こうした問題の解決につながることを期待される RH に求心性信号と中枢性信号が与える影響について検証を行い、得られた知見をもとに RH 効果の向上を図る。

3. 研究の方法

(A) 求心性信号と中枢性信号と RH の関係性

(A-1) 末梢感覚器からの求心性信号に関する RH の検証

振動刺激などの末梢感覚器からの求心性信号が RH に与える影響について検証する。具体的には、実際の手や物体の位置とはわずかに異なる位置にバーチャルハンドを表示する RH システムを体験中のユーザの上腕に腱電気刺激を与えて求心性信号を操作することで、求心性信号が RH に与える影響について検証した (図 1)。

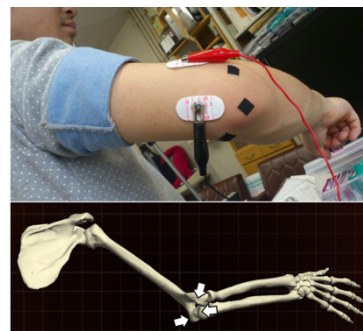


図 1 腱電気刺激

(A-2) 運動指令に関する中枢性信号を用いた RH の検証

前頭前野などの「信念」に係る部位や運動指令に関する中枢性信号が RH に影響を与える影響について検証する。具体的には、前頭前野に経頭蓋直流電気刺激 (tDCS) を印加することで抑制性信号を操作し、それに伴う運動指令に関する中枢性信号の変化が RH に与える影響について検証した (図 2)。

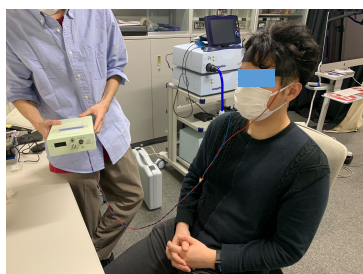


図 2 前頭前野への tDCS

(B) RH の閾値と脳活動との関係

RH の閾値と脳活動との関係を解明するため、RH を体験中のユーザの脳機能を機能的近赤外線分光法 (fNIRS) を用いて計測した (図 3)。

(C) RH の応用

RH の知見を応用した新たなインタラクション手法「Warm Hole」、「Hitchhiking Hand」を提案し、ユーザスタディを通してこれらの手法の効果を検証した。

4. 研究成果

(A-1) 末梢感覚器からの求心性信号に関する RH

腱電気刺激によって求心性信号を操作した結果、RH の効果が増幅され、RH の閾値が拡大される傾向が見られた (図 4)。これは、求心性信号の操作が RH の効果を高めることを示す重要な結果である。(学会投稿準備中)



図 3 fNIRS を用いた計測

(A-2) 運動指令に関する中枢性信号を用いた RH 前頭前野への tDCS による中枢性信号の操作もまた、RH の閾値を一定程度拡大する傾向が示された。また、通常は見られる RH に対する馴化が tDCS により無効化される可能性が示唆された。(論文投稿準備中)

(B) RH の閾値と脳活動との関係

fNIRS を用いた脳機能の計測結果から、RH の閾値と左背側前頭前野の活動とに個人間で相関が見られることが観察された。左背側前頭前野は注意や抑制に係る部位であるため、注意や抑制といった機能と RH の閾値との関係性が示唆された。(論文投稿準備中)

(C) RH の応用

"Warm Hole"は、バーチャル空間内でユーザの手を別の場所に瞬時に移動するような感覚を提供する新たなインタラクション手法である (図 5)。ユーザがバーチャル空間上に表示された「穴」に手を入れることで、その手が遠くに配置された「穴」から出てくることにより、バーチャルオブジェクトに瞬時に到達したかのように感じさせることができる。この手法を用いたユーザスタディでは、多くの参加者がバーチャル空間内での手の移動を自然に感じ、"Warm Hole"がバーチャル空間におけるインタラクションを豊かにする可能性を示した。(発表 1)

"Hitchhiking Hand"は、バーチャル空間内で手が他のバーチャルハンドに乗り移るような操作性を提供する新たなインタラクション手法である。具体的には、ユーザが特定のバーチャルハンドを視線等によって選択すると、そのバーチャルハンドを操作することができるようになり、手を乗り移ってバーチャルオブジェクトを自由に操作することが可能になる。この手法を用いたユーザスタディでは、参加者は直感的にこの新たなインタラクションを理解しバーチャルオブジェクトとインタラクションできることが示された。(学会投稿中)

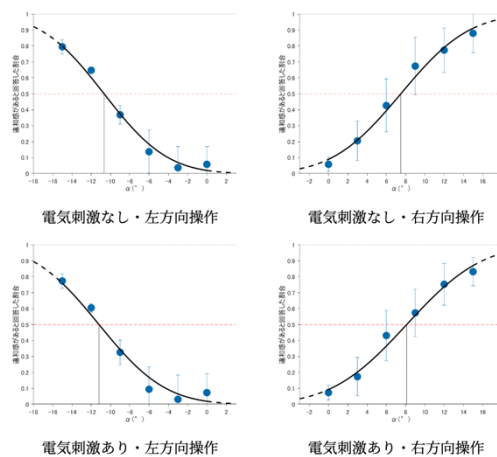


図 4 腱電気刺激の有無と RH の閾値

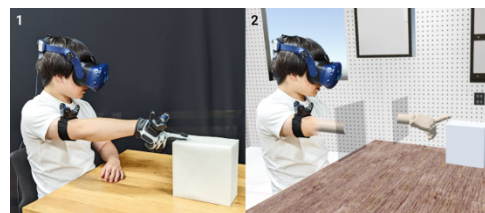


図 5 Warm Hole の概念図



図 6 Hitchhiking Hand の概念図

今後は、求心性信号と中枢性信号の操作による RH の効果増幅をさらに詳細に解析するために、より多くの参加者を対象に実験を行う予定である。また、具体的な応用シナリオ、例えば遠隔リハビリや VR トレーニングなどにおける RH の効果の評価も重要である。さらに、RH が脳のどの部位を活性化するかについての理解を深めるために、磁気共鳴機能画像法 (fMRI) といったより高解像度の脳機能イメージング技術の使用も検討している。これらの研究が進展すれば、RH 技術は VR における触覚体験の質を大きく向上させるとともに感覚統合の機序の解明に繋がる可能性がある。

発表 1 : R. Ban, K. Matsumoto, T. Narumi and H. Kuzuoka, "Wormholes in VR: Teleporting Hands for Flexible Passive Haptics," 2022 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), Singapore, Singapore, 2022, pp. 748-757, doi: 10.1109/ISMAR55827.2022.00093.

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 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Sakono Hiroaki, Matsumoto Keigo, Narumi Takuji, Kuzuoka Hideaki	4. 巻 27
2. 論文標題 Redirected Walking using Continuous Curvature Manipulation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics	6. 最初と最後の頁 4278 ~ 4288
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TVCG.2021.3106501	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 Chang Yuchen, Matsumoto Keigo, Narumi Takuji, Tanikawa Tomohiro, Hirose Michitaka	4. 巻 9
2. 論文標題 Redirection Controller Using Reinforcement Learning	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 145083 ~ 145097
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2021.3118056	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 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Keigo Matsumoto, Kazuma Aoyama, Takuji Narumi, and Hideaki Kuzuoka
2. 発表標題 Redirected Walking using Noisy Galvanic Vestibular Stimulation
3. 学会等名 IEEE ISMAR 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Reigo Ban, Keigo Matsumoto, Takuji Narumi, and Hideaki Kuzuoka
2. 発表標題 Wormholes in VR: Teleporting Hands for Flexible Passive Haptics
3. 学会等名 IEEE ISMAR 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Keigo Matsumoto
<https://keigomatsumoto.net/>
葛岡・雨宮・鳴海研究室
<https://www.cyber.t.u-tokyo.ac.jp/>

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------