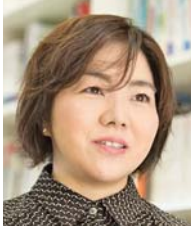


[研究助成 (A)]

ロボットアーム錯覚は可能か

2241033



研究代表者

東京科学大学

准教授

葭 田 貴 子

[研究の目的]

来る将来の人手不足への対策の一つとして、日本では産業場面や日常生活へのロボットの導入が求められている。しかし、実際のロボットの適用可能領域はまだ限られている。ロボットが環境を認識する自律制御にも様々な限界が見えてきており、想定外の状況などへの対応のために、人間が遠隔制御でロボットができない作業を補完することが有効なのではないかと期待されている。遠隔地からこのような対応を実施するには、既存の情報通信を介した対応も望まれている。そこで、インターネットで遅延や変動が発生する状況において、ユーザである人間が感じる遅延・変動の影響を抑え、安定したリアルタイム遠隔操作を可能とする通信システムの研究開発が始まっており、本研究室も名古屋や神戸との遠隔通信によるロボット操作の実証実験を始めている。このようにロボット・通信領域に加え、心理学や脳科学者といったエンドユーザ側の人間に関する研究者を交えて、より科学的・客観的に使いやすい遠隔制御のシステムを提供する研究開発体制は極めて限られている。本研究はこのようなロボットの社会展開に伴う問題に、脳科学/心理学者の立場から答えることを大目的とした。

[研究の内容、成果]

ゴム（ラバー）の手のように自分自身の身体ではないものを、自分の手と同様に触覚刺激を与えられながら見たり、自分の手指と同期するゴムの手を見たりすると、やがて自分自身の手腕のように感じられる錯覚を「ラバーハンド錯視」と呼ぶ。この錯覚は、CGのアバターやロボットの義手など、生身の身体ではないものを、あたかも生身の身体の一部であるかのように錯覚させながら操作する技術の基盤とみなされ、脳科学の見地からは広く研究されている。しかし、実物のロボットアームや義手を用いた実証研究は多くはない。ここではインターネット越しに遠隔操作される産業用ロボットアームをゴムの手の代わりとし、これをバーチャルリアリティ技術によってロボットの一人称視点で観察しつつ、ロボットが接触するのと同様の触覚フィードバックをユーザの手に与えた場合に、ロボットアームがユーザの身体の一部のように感じられ（身体所有感, Ownership, 図1）、ユーザ自身がそれを操作しておりロボットが勝手に動いているわけではない感覚（操作主体感, Agency, 図1）が発生するか検証した。これら一連の研究により、ロボットアーム遠隔操作時に機械の手腕が「自分の身体の一部になる」ような操作感を生成すると同時に、最小限の練習や教示で誰でも直感的に自分自身の四肢のように使える遠隔ロボットアームの操作・設計方法の確立に寄与することを小目的とした。

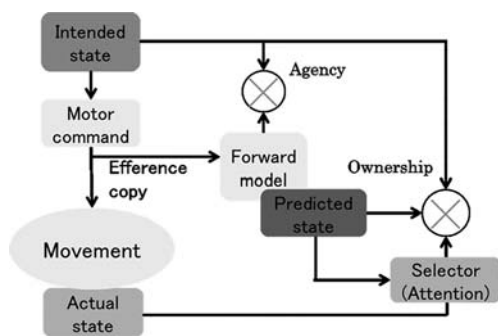


図1 Gallagher (2000) の哲学的考察による2種類の自己身体感覚に関するブロック線図

本研究提案で用いるような産業用ロボットは、図2左に示すようなティーチングペンダントと呼ばれる一種のキーボードで操作されるのが一般的である。しかし、ただでさえ初心者や一般人に3次元空間内でロボットを思うように動かすことは難しい作業であるのに、このように直感的ではないインターフェースを用いてロボットを操作することが今後も続くことは、ロボットの一般市場への普及への妨げとなりかねないと思えるのが、心理学や脳科学の立場である。また、身体所有感や操作主体感覚を伴いながらロボットを操作するとどのような利益が市場にもたらされるのかは謎のままである。最終的にはロボットの手腕が自分自身の手腕のように感じられたとして、その時市場にとって何が良いのか、操作精度が上がるのか、疲労感が軽減されるのか、達成感が上がるのか、等々といった副次的な問題にも取り組んだ。このような検証を大規模に試みた研究は前例をみない。

自己身体感覚に関するモデルは幾つか提案さ



図2 左：従来産業用ロボットの操作に用いられてきたティーチングペンダント。右：今回用いる産業用ロボットと、それをバーチャルリアリティを介して遠隔操作する操作者の概念図。

れているが、現在議論の中心となっているのは、哲学領域から提案された Gallagher (2000) のモデルである (図1)。このモデルをバーチャルリアリティのCGの身体に拡張した研究は、数多くあり、Slater らによる多数の報告例が知られている (例えば、Slater, 2009)。触覚を備えた高機能な義手を対象とした研究はごく近年少数ある (e.g., Zbinden & Ortiz-Catalan, 2021)。「ロボットハンド錯視」と名付けられた論文は過去に存在するが (Ismail & Shimada, 2016)、厳密にはロボットではなくロボットを模したCGを使った研究であり、さらに本研究提案のように通信遅延にジッタがある実物のインターネットや、実物のロボットを用いた研究ではない。実際のロボットの手首部分を用いた研究は少数存在するが (Vu HuynhI, et al., 2019, Casper, et al., 2015)、本研究のように遠隔操作を想定した実験ではなく、ラバーハンド錯視のラバーハンド部分をよく似せたロボットハンドに置き換えただけのものであった。本研究提案ではバーチャルリアリティによる視覚情報提示や、インターネットを通じた視覚や触覚情報の転送に伴うアーチファクトを含んだ状態でアーム型の産業用ロボットを用いるもので、必ずしもサイズや機能、見た目が人間とは同じとは限らないものを用いている点において先行研究とは異なる。

実際には、研究は以下のような項目に沿って実施された。

1. 研究室保有の産業用ロボットアームのCGモデルを、ヘッドマウントディスプレイを用いて、バーチャルリアリティ内で一人称視点で操作できるようなものを作成する。また、触覚デバイスを用いてアームの触力覚がユーザの手腕にフィードバックされるようなシステムを組む。ヘッドマウントディスプレイには全天周カメラから取得していると想定した360度映像をリアルタイム提示することで、被検者の頭部運動に同期して視覚映像が上下左右に回転するよう

にする。

2. 1で作成したものを用いて、バーチャルリアリティ内で実時間操作されるロボットアームに対して、ユーザが身体所有感や操作主体感が感じられるかどうかを、心理物理学的測定方法や質問紙法、アイトラッキングや心拍計測を用いて、多角的に検証する。この際、この後実施する実験3のために、無線のインターネット越しにこれらのシステムを操作する状況を模して、視覚や触覚の提示情報にジターを伴う時間遅延を挿入する。
3. 2と並行して、無線のインターネット越しに実物の産業用ロボットアームを遠隔操作するための研究室保有のシステムを用いて、ユーザにとって1で製作されたものと極力同様に感じられるシステムを組む。即ち、1で利用したカメラ映像と類似した位置に全天周カメラを設置し、1でロボットアームが観察されたのと同じ位置、同じサイズでロボットアームが観察されるように視覚映像を提示する。触覚デバイスも極力1で利用したものと同様のものを用いる。
4. 製作した実世界のロボットアームを用いて、操作者がバーチャルリアリティの視覚画像越しに一人称視点から触覚デバイスを用いながら実時間操作する際に、身体所有感や操作主体感が感じられるかどうかを、心理物理学的測定方法や質問紙法、アイトラッキングや心拍計測を用いて、多角的に検証する。

1と2に関して、制作したバーチャルリアリティ内のロボット操作システムの操作中の1場面を図3に示す。

市販のバーチャルリアリティ用のヘッドマウントディスプレイを用い（Meta Quest 3ヘッドセット，Meta社），被験者は頭部を自由に動かせる状態で、画面内のロボットアームの先端部を手にしたTouch Plusコントローラーで操作した。事前に被験者は、ロボットのアーム



図3 VR内で再現されたロボットアーム操作場面の一例

の位置が自分の肩から出ているような感覚になる位置に、自分の着座位置とバーチャル空間内の視覚映像位置をキャリブレーションした。アームを動かすと、3次元空間内に、線画が描画できる課題を用いて、様々な時間遅延の下で、操作者の操作感覚や身体感覚、操作精度等を検証した。結果は本報告書作成時においてまだ解析途中である。

遅延が最も短い条件、即ち、プログラム上では遅延ゼロの状態において、多くの体験者から、自分の腕がロボットそのものになっている臨場感があるという趣旨の主観報告が得られた。このことから、本研究で制作したバーチャルリアリティ用のシステムを用いて、操作者の身体の一部がロボットになったかのような身体感覚がある程度生成できていると考えられ、本研究の小目標である、ロボットアーム錯覚を検証するためのフィジビリティがある程度得られたと推察できる。

一方、いくつか技術的な問題が発覚したため、現在それらに対する対応を実施している。幾つかある問題の中で、大きなものの一つは、そもそも用いたバーチャルリアリティ用の視覚提示システムの画像描画に多少の遅延が備わっており、目視で確認した感触では、この種の身体感覚に関する研究の遅延量としては、看過できない量ありそうだという点である。これに関して、現在ハイスピードカメラを用いて、実際の遅延時間や、フレーム落ちの頻度などの細かい描画性能を計測している最中である。

他の大きな問題としては、被験者の肘の位置

とロボットの間接位置の位置合わせにインバースキネマティクス（IK: Inverse Kinematics）を用いたところ、被験者の姿勢によっては推定が安定しておらず、腕がびよこびよこと動きまわる不自然な映像が実験中にしばしば現れた点である。これを防ぐ目的で、現在被験者の肘位置に光学式のモーションキャプチャを設置し、インバースキネマティクスに頼らずに安定してロボットアームの映像が提示し続けられるよう、改変を行っている。

3に関して、この作業が完了していないため、4まで研究実施期間中に移行できていない。従来多くの類似研究の試みにおいて、カメラ位置が種々のシステムと干渉し、視覚提示画面がうまく一人称視点に合わない技術的な問題が認められてきたが、それに関しては本研究では天井から全天周カメラを固定することで回避できた。しかし、カメラから操作者への視覚情報の転送に、目視で明らかに操作性や操作感の支障となるとわかる大きな時間遅延が発生しており、これは様々なカメラやシステムを試したものの、いまだ解決に至っていない。今後、ドローンに設置されているカメラシステムを、これまで使用してきた全天周カメラに置き換えて、どの程度この問題が回避できるか検証する予定である。

なお、これらとは別途、研究室既存の設備や簡易的なロボット操作シミュレータを用い、操作主体感覚を伴いながらロボットを操作すると、操作精度や疲労感といった様々なヒューマンファクタに影響があるかどうかを、比較的大標本の被験者を対象に実験した。その際、眼球運動や心拍といった生理学的指標を同時記録したほか、被験者の疲労に関しては主観報告も採取した。結果はまだ解析途中であり、研究の途中経過を学会投稿して、採択結果待ちの状態である。途中経過としては、疲労に関する指標は、

主観報告、生理学的指標、どちらも操作主体感覚と目立った相関は認められなかった。一方、眼球運動は、操作主体感の強弱と、操作する対象の運動方向の先読みをする位置への固視の頻度に緩い相関が認められた、現在、このような結果が、操作主体感覚と、被験者が操作対象の将来の動きを予測する認知的過程の関係を示しているのかどうかという仮説に基づき、様々な追加解析と、追加実験を予定している。

このような研究を実施している期間中、本研究で使用したようなバーチャルリアリティ用のハンドヘルドデバイスで提示するための触覚情報の加工が飛躍的に容易になり、音の周波数を加工する感覚で触覚のデータを加工して提示できるようになった。今後はそのような技術を交えながら、ここで検討したような身体感覚の研究に様々な接触感覚を付加して、どのような触覚の付与が自分の身体のようなロボット操作に大きく寄与していくかも検証していきたいと考えている。



図4 VRのインターフェースを用いて、ロボットの操作をするために用いたモーションキャプチャシステムと、操作対象となった多関節ロボット

〔成果の発表、論文など〕

なし。