

筋電位を用いた念力インタフェースによる協働体験の創出

笠原 佑二^{1,a)} 鈴木 亮太¹ 小林 貴訓¹

概要: VR/AR 技術の進展は続いているが、その操作方法には依然として身体感覚との乖離が存在する。従来のコントローラやカメラトラッキングといった技術ではユーザの力の込め具合や身体感覚が仮想空間内の挙動と一致せず、操作感や没入感を損なうという課題がある。本稿では、この課題を解決するために姿勢情報に筋電位 (EMG) を融合した「念力インタフェース」を提案する。本システムは EMG から連続的な力の大きさを、骨格情報から力の方向をリアルタイムに抽出し、念じるように物体を操作する新しい操作インタフェースである。2人のユーザが各自の力を用いて物体に念力を加えることで、非言語・非接触的に力を合わせて物体を共同で動かしている感覚を創出する。

1. はじめに

VR や AR の技術の進展に伴い、没入型の体験が身近になっているが、その操作方法は依然として物理的なデバイスや視覚的な動作に依存している。コントローラやカメラトラッキングといった技術では、ユーザが物体を操作する際の「力の込め具合」や「筋力的な負荷」といった身体の内部情報が仮想空間に反映されない。特に、超能力や念力といった非日常的な体験を仮想空間で実現しようとする場合、操作に現実の身体的な制約 (ボタンを押すなど) が伴うことで、体験の本質である「力を意のままに操る感覚」が損なわれてしまう。そのため、物理的な触覚提示や生体信号の活用といった多面的なアプローチにより、仮想空間における物体の操作感を向上させる研究が行われている。

まず、デバイスを用いた触覚提示として、Sun らは指輪型の小型ハブティックデバイスにより仮想物体との接触感や摩擦を提示する手法を提案している [1]。一方、物理的な装置を用いずに知覚を制御する手法として、Moosavi らは手の動きと画面内の動きの比率を操作する擬似力覚により、重量物の運動学的特徴を再現できることを示した [2]。

また、ユーザの「力の意図」を直接抽出する試みも進んでおり、Lee らは筋電位を用いて推定した握力を VR 内の物体変形に反映させるシステムを開発した [3]。さらに Zhang らは、ディープラーニングにより指先レベルの繊細な力を推定し、物理的な反力装置なしに VR 空間内で繊細な力加減が必要なタスクを可能にした [4]。加えて NTT の研究グループなどは、ユーザの筋電位を用いてメタバース上のアバターをわずかな筋動作でまるで自分の手のように操作す

ることができる技術を開発するなど、生体信号を用いた身体拡張の研究も盛んに行われている [5]。

しかし、これまでの触覚提示手法は、外部デバイスから与えられる振動や圧力といった付加的な演出に依拠しており、ユーザ自身の身体動作と直結した根源的な操作感の提供には至っていない。また、視覚操作による手法はデバイスへの依存はないものの受動的な錯覚のみに依拠しているため、ユーザ自身の「力を込める」という能動的な身体感覚との乖離が生じやすい。加えて、EMG を用いた既存研究の多くは個人の局所的な操作に焦点が当てられており、複数ユーザ間での「力の合成」や、非接触状態での協調操作における「共同で物体を動かしている感覚」の創出には至っていない。

そこで、本稿では、VR/AR 空間における操作のリアリティと協働体験の質という課題を解決するために、筋電位 (EMG) と姿勢情報を統合した「念力協調インタフェース」を提案する。本システムは EMG から抽出したユーザの「力の大きさ」と骨格情報から得た「力の方向」という2つの身体情報をリアルタイムに統合し、まるで自らの念じる力が直接仮想物体に作用しているかのような新しい操作感を実現する。本手法の独自性は外部デバイスによる振動や圧力といった「演出」としてのフィードバックに頼るのではなく、ユーザ自身の筋活動という身体内部情報を物理演算の根幹に据えることで擬似的な抵抗感と高い主体感を両立させた点にある。さらに、この身体的な内部情報を複数ユーザ間で物理演算を介して合成・共有することで、これまでの研究では扱われてこなかった、非言語・非接触的な環境において強固な実体感を伴う協働体験の創出を目指す (図 1)。

¹ 埼玉大学

^{a)} kasahara.y.941@ms.saitama-u.ac.jp

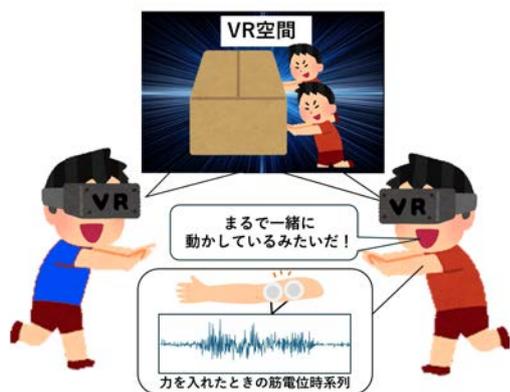


図 1 2人のユーザがメタバース上で共同作業している様子

2. 提案手法

本システムは、ユーザの身体の内部状態（力の込め具合）と外部状態（腕の方向）を統合し、非言語・非接触的な協調操作を通じて、高いリアリティで非日常的な念力体験を創出する。システムは、プロジェクタを用いた実空間への仮想環境投影、筋電位（EMG）センサ、および Kinect による骨格取得から構成される。システムの中核は、2人のユーザがそれぞれ狙った方向に、力を入れる強さに応じて、共通の仮想物体に作用する力が決定され、その力が物理シミュレーションに基づき合成される点にある。これにより、1人では困難な重さの物体を、2人で協力して回転・移動させるという協調体験を可能にする。

2.1 システムの構成とデータフロー

本システムは、3D アプリケーション開発プラットフォームである Unity 上で仮想空間と制御ロジックを実装し、プロジェクタを用いて実空間に投影することで、ユーザが物理的に存在する環境内で仮想空間を体験できるようにしている。センサは筋電情報を取得するための筋電位センサと骨格情報を取得するための Kinect を用いている（図 2）。

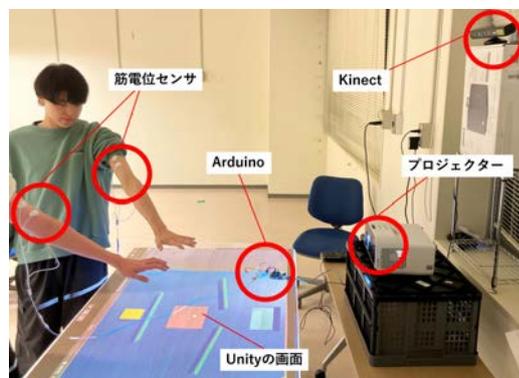


図 2 ハードウェア構成

また、本システムは、実空間統合モジュール、身体情報取得モジュール、および念力制御・物理合成モジュールの

3つで構成される。まず実空間統合モジュールが Kinect から取得した骨格情報の座標系から、プロジェクタの投影範囲と仮想空間の座標を同期させて操作環境を構築する。次に、身体情報取得モジュールでは、筋電位センサがユーザの腕の筋電位の値から力の連続的な大きさを計測し、同時に Kinect がユーザの左手と左肘の骨格点から手の位置と腕の方向をリアルタイムで取得する。そして最後に、これらの身体情報を統合する念力制御・物理合成モジュールが、各ユーザから送られた力と方向の情報に基づいて、共通の仮想物体に作用させるベクトルと力の大きさを計算して物理シミュレーションによって物体を制御する。

2.2 筋電位による力の連続推定

本システムで用いる筋電位センサは、ユーザの筋肉が収縮する際に発生する微弱な電気信号を皮膚表面から非侵襲的に取得するものである。この信号は時間とともに変動する波形として観測され、この振幅が筋肉の運動強度に比例することから、筋電の情報からユーザがどれだけの力を入れているかを連続的に推定することができる（図 3）。

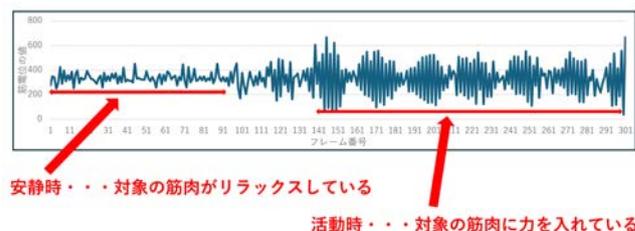


図 3 筋電位の波形と閾値設定

本システムではユーザの「力を入れている意図」を、この筋電位波形の振幅の大きさから連続的な力の大きさとして抽出する。まず最初にユーザにリラックス時と収縮時（力を入れている状態）の2パターンの筋電位データをそれぞれ200個収集し、これらのデータを用いて閾値を決定する。具体的には、リラックス時に収縮した200個のデータから平均値と各データの平均からの絶対差を算出してその平均値をリラックス時の活動レベルとし、収縮時の200個のデータからも同様に平均値と各データの平均からの絶対差を算出してその平均値に一定の係数を乗算したものを収縮時の活動レベルの閾値とする。ユーザの連続的な力の大きさは閾値を超過した活動レベルの分が仮想物体に加わる大きさに連続的かつ比例的に反映される。これにより力を入れれば入れるほどより強い力が加わるという現実世界と同様の挙動が再現され、操作のリアリティが向上する。

2.3 骨格取得による方向決定と実空間統合

本システムで用いる Kinect は深度情報を用いてユーザの身体を非接触で計測し、主要な関節の位置をリアルタイ

ムで3次元座標で取得することができる。本システムではユーザの左手と左肘の関節位置を追跡し、二つの骨格点座標の差分からユーザが力を加えようとしている向きの方方向ベクトルと左手のカーソルを生成する(図4)。

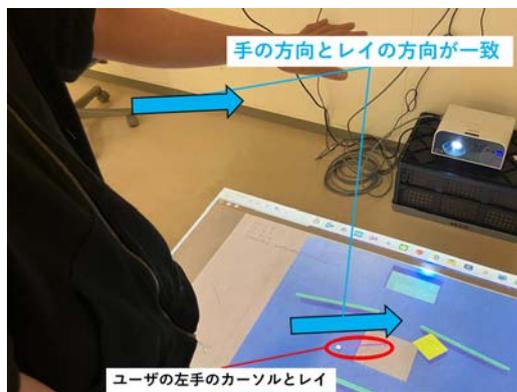


図4 骨格取得で方向ベクトルを生成している様子

また、左手の関節位置をプロジェクタの投影範囲の四隅に合わせて座標取得することによって、実空間と仮想空間の座標系を同期させる実空間統合を行っている。これにより、ユーザは実空間上で自分の手を動かすことで、仮想空間上の対応する位置にある物体を直感的に操作することが可能になる。

2.4 協調操作と物理ベースの合成ロジック

本システムの核となるのは、ユーザの身体情報から決定された力を合成し、現実の物理法則をシミュレートすることで高いリアリティを持つ協調体験を創出するロジックである。仮想物体に力が作用する条件は、ユーザが腕の筋肉に力を込めることで筋電位の活動レベルが設定された閾値を超えていて、骨格情報から生成された左手のカーソルから伸びる方向ベクトルの延長線上に仮想物体が存在し交差していることである。作用条件が満たされると、仮想物体と方向ベクトルの延長線上の交点が力点となり、筋電位から抽出された力の大きさに比例した力がその力点に対して方向ベクトルに沿って加えられる。さらに、複数のユーザが同じ仮想物体に対してそれぞれ力を加える場合、各ユーザから送られた力と方向の情報に基づいて、各力点に作用する力を計算し、物理シミュレーションによってこれらの力を合成する。これにより2人で同じ方向に力を合わせると、1人では動かせない物体を動かすことができるという協力感覚が生まれる。

3. 実験

本稿で提案する骨格情報と筋電位(EMG)を融合した念力インタフェースが、操作の主体感および複数人による協調体験にどのような影響を与えるかを評価した。比較対象として、条件1:物理コントローラによる操作、条件2:

骨格情報のみを用いた操作、条件3:筋電位と骨格情報を統合した操作(提案手法)の3つの条件を設定した。

今回の実験のタスクである仮想物体の運搬操作においては、入力を簡略化したコントローラ条件やKinect条件(自動出力)が、操作の効率性や正確性を高めやすいと考えられる。一方で、本実験においては、提案システムのように筋電位(EMG)を用いて「力を込める」という能動的な身体動作を介在させることが、ユーザーの主体感や仮想物体に対する実在感、さらには複数人間での協調体験に対してどのような効果を示すかを検討する。

3.1 実験設定

実験は、2人1組で、3つの各条件について協力して共通の仮想物体を操作するタスクを実行した。参加者は大学生および大学院生の10名5組である。

参加者のタスクは、仮想空間内の床に置かれた立方体を、2人の力を合わせて特定のゴールまで運搬することである。本実験における操作対象の立方体は、単独のユーザーでも移動させることは可能であるが、単独では力のベクトルが一方向的になりやすく、意図した経路からの逸脱や回転の制御が困難になるように設定されている。2人のユーザーが異なる方向から力を合成し、相互にバランスを調整することで、初めて安定した運搬が可能となる。これにより、単独操作に対する協調操作の優位性と、パートナーとの非言語的な意思疎通(力の加減の読み合い)を評価する。実験参加者は3つの条件で順に実験を行った。条件1は汎用的な物理コントローラのスティックを用いて仮想物体へ加える力の方向を決定する設定である。条件2は骨格トラッキングのみを用い、手と腕の相対的な位置関係から力の方向を決定する設定である。条件3は条件2同様に骨格トラッキングで力の方向を決めた上で、ユーザの筋電の値が仮想物体に力を加えるトリガーになっている(図5)。条件1と

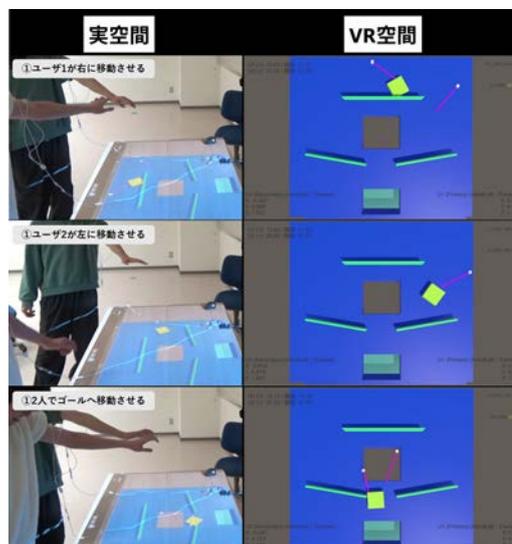


図5 実験の様子(条件3)

条件2ではあらかじめ設定しておいた一定の力の大きさが仮想物体に加えられるが、条件3では筋電位の活動レベルに応じて力の大きさが連続的に変化する。

各条件での実験の終了後、それぞれアンケートに回答してもらった。

3.2 実験に用いたアプリケーション

本実験のために二人のユーザが同時にアクセスし、共通の仮想物体を操作できる Unity アプリケーションを実装した。アプリケーションはプロジェクタにより机の上に投影され、実空間に仮想環境を統合している。シーンには、操作対象となる立方体、目的地を示すゴールエリア、および各ユーザの操作位置を示すカーソルと方向を示すレイ（光線）が表示される。シーンの様子を図6に示す。ユーザのタスクはスタート地点に配置された立方体をゴールエリアまで運搬することである。立方体には Unity の物理エンジンが適用されており、外力を加えると移動および回転の挙動を示す。本アプリケーションではユーザがカーソルとカーソルから出るレイを操作し、レイを仮想物体に当てることでその交点が力点となり力が加わる設定になっている。特に、物体の重心から外れた位置に力が作用すると立方体が不要に回転してしまうため、二人のユーザが互いの力のベクトルをリアルタイムに調整してバランスを保ちながら協力して押し進める必要がある。

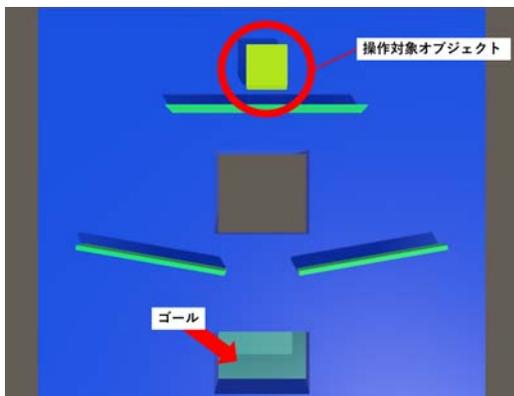


図6 実験中の VR 空間

このタスクにおいて、条件1および条件2ではレイが接触している間は一定の力が自動的に出力されるが、条件3では筋電位の値が閾値を超えた場合にのみ力が加わり、筋電位の強度に応じて力の大きさが連続的に変化する設定となっている。

3.3 実験手順

実験を開始する前に、参加者に対して実験の目的および各操作モード（条件1～3）の使用方法について説明を行った。また、条件3（念力条件）で使用される筋電位センサを上腕筋あたりに装着し、個人の筋活動量に合わせた閾値設

定（キャリブレーション）を行った。

3つの条件の各終了後、以下の3つの評価軸に基づいた計31問の設問について、7段階のリッカート尺度（1:「全くそう思わない」～7:「非常にそう思う」）によるアンケートを行い、自由記述にも任意で回答してもらった。紙面の都合上、評価軸ごとの主な設問を以下に示す。

評価軸1 操作の実在感・主体感（計11問）

設問1) オブジェクトの動きは、自分の筋肉の動きから直接生まれたと感じましたか？

設問2) 仮想物体を動かす際、現実の物体を押ししているような適切な抵抗を感じましたか？

評価軸2 協調体験と共同感（計10問）

設問3) パートナーと協力して一つの物体を動かしている感覚を持ちましたか？

設問4) 言葉を使わなくても、パートナーの意図や力の加減を理解できましたか？

評価軸3 システム評価・没入感（計10問）

設問5) 操作タスクに夢中になり、集中することができましたか？

設問6) この操作方法は、直感的で自然であると感じましたか？

3.4 実験結果

実験アンケートの結果、提案手法である条件（筋電位と骨格情報を統合した操作）においてほかの二つの条件と比較して、いくつかの顕著な優位性が確認された。図7, 8, 9に各評価軸ごとの主な設問の結果を示す。各図において、縦軸はリッカート尺度の平均値を表す。

操作の実在感・主体感に関する評価（評価軸1）の結果より、オブジェクト操作に筋電情報や骨格情報を加えることで、より高い実在感・主体感が得られることが分かった。特に、設問17,18の結果から物体を動かす際に筋電情報を用いることで、物理的な反力装置を用いずにユーザに重さや手応えを伴う疑似的な力覚を提示できることが示された（図7）。

協調体験と共同感に関する評価（評価軸2）の結果より、お互いの身体情報を用いてタスクを行うことでパートナーとの協調感や相手の実体感が高まることがわかる。特に設問11, 12の結果から、筋電情報を介して「互いに力を込め合っている」という身体的な努力を共有することが、非言語的な意思疎通を助け、物理的な接触がない環境においても相手を単なる映像ではなく一つの「実体」として強く認識させる効果があることが示された（図8）。

システム評価・没入感に関する評価（評価軸3）の結果より、提案手法は条件1・条件2と比較して極めて高い没入感と楽しさを提供できることがわかる。特に設問2, 3の結果から、筋電位を用いた能動的な操作がユーザーの集中力を引き出し、タスクへの深い没入を促したことが示さ

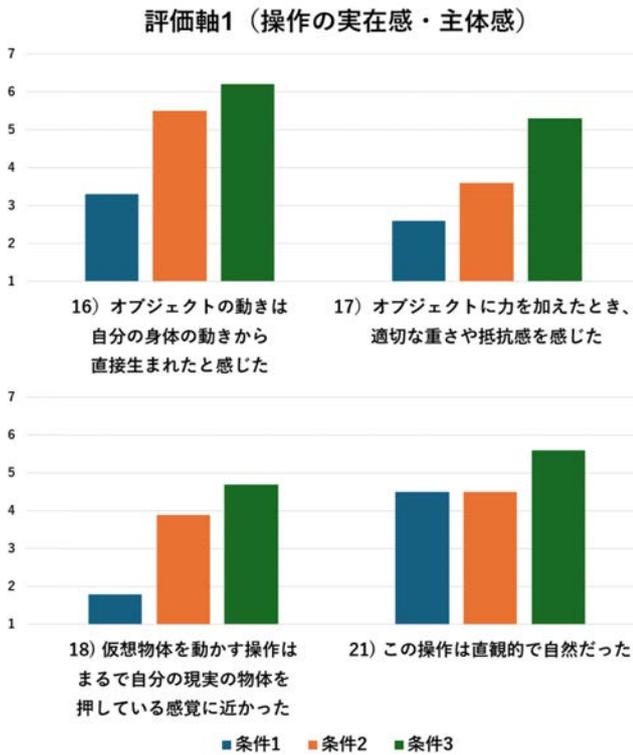


図 7 アンケート結果 (評価軸 1)

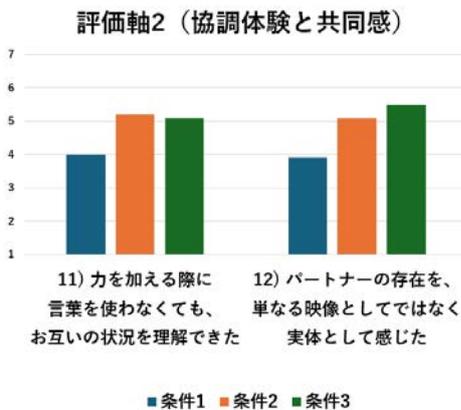


図 8 アンケート結果 (評価軸 2)

れた (図 9)。

4. 考察

アンケートの結果より複数人での協調操作において、身体情報を用いること従来の手法と比較して、実在感、主体感、およびパートナーとの共同感を大きく向上させることが示された。

特に「抵抗感」や「物体を押す感覚」において、反力装置を用いないシステムでありながらコントローラ条件を大幅に上回る評価が得られた点は重要である。これは、指先だけの記号的な入力であるコントローラとは異なり、腕全体の筋肉を収縮させるという身体的な「努力」が仮想物体の挙動と視覚的に同期したことで、脳内において強力な擬

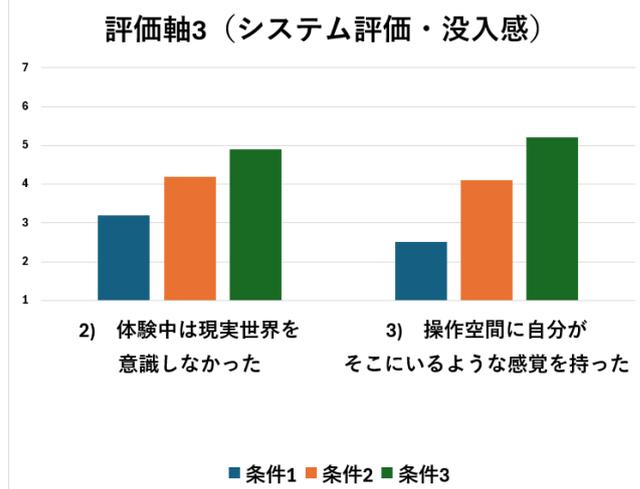


図 9 アンケート結果 (評価軸 3)

似力覚が誘発されたためと考えられる。この結果は、非日常的な「念力」という設定が、単なるエンターテインメントに留まらず、VR 空間における物理的な実在感を補完する有効なアプローチであることを示唆している。

また、協調体験と共同感に関する評価においても、身体情報を用いることでパートナーの意図や力の加減を非言語的に理解できたという評価が大きく向上した。これは、互いに筋肉の収縮という身体的な努力を共有することで、物理的な接触がない環境においても相手を単なる映像ではなく一つの「実体」として強く認識させる効果があるためと考えられる。この結果は、VR/AR 空間における非言語・非接触的な協調操作の設計において、身体情報の活用が重要な役割を果たすことを示している。

一方で、操作の習熟度や身体的ストレスに関してはコントローラ条件に課題を残した。しかし、没入感や楽しさの項目で極めて高い評価が得られたことから、操作の簡便性よりも身体性を伴う能動的な介入こそが、仮想空間における主体感を高め、体験の質を本質的に向上させる重要な要素であると結論付けられる。

5. おわりに

本稿では VR/AR 空間の複数人タスクにおける操作のリアリティ向上と協調体験の創出を目的として、骨格情報と筋電位を融合した念力インタフェースを提案した。本システムの有効性を検証する実験を行った結果、提案手法は従来の物理コントローラや骨格情報のみを用いた手法と比較して、操作の実在感・主体感、および協調体験において顕著な優位性を示した。このことから、身体情報を統合したインタフェースが、VR/AR 空間における高いリアリティの操作体験と非言語・非接触的な協調体験の創出に有効であることが示された。

今後は、複数の筋肉部位の情報を組み合わせることで、より多様な力の表現や複雑な操作を可能にすることを目指

す。また、提案手法を応用した新たな協働タスクやゲームデザインの開発を進め、VR/AR空間における身体情報を活用したインタラクションの可能性をさらに探求していく予定である。

参考文献

- [1] Sun, Z., Zhu, M., Shan, X. and Lee, C.: Augmented tactile-perception and haptic-feedback rings as human-machine interfaces aiming for immersive interactions, *Nature Communications*, Vol. 14, p. 2675 (online), DOI: 10.1038/s41467-023-38114-1 (2023).
- [2] Moosavi, M. S., Raimbaud, P., Guillet, C. and Mérienne, F.: Enhancing weight perception in virtual reality: an analysis of kinematic features, *Virtual Reality*, Vol. 28, No. 1, pp. 1–15 (2024).
- [3] Shin, Y. and Lee, M.: Development of Sensory Virtual Reality Interface Using EMG Signal-Based Grip Strength Reflection System, Vol. 11, No. 13, p. 6152 (online), DOI: 10.3390/app11136152 (2021).
- [4] Zhang, Y., Liang, B., Chen, B., Torrens, P., Atashzar, S. F., Lin, D. and Sun, Q.: Force-Aware Interface via Electromyography for Natural VR/AR Interaction, *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH Asia 2022)*, Vol. 41, No. 6, pp. 1–18 (online), DOI: 10.1145/3550454.3555461 (2022).
- [5] NTT 研究グループ: 筋電に基づくアバタ操作インタフェース技術, NTT 技術ジャーナル (2025).