

観客の筋電信号を活用したプレイヤーの強化が可能な 協力型 VR アトラクション

杉江 鎌^{*1} 池田 滉成^{*1} 今井 蒼^{*1} 秋葉 直人^{*1}
森田 磨里絵^{*1} 橋口 哲志^{*2} 柴田 史久^{*1} 木村 朝子^{*1}

Cooperative VR Attraction That Can Be Enhanced by the Player Using the Audience's Myoelectric Signals

Ren Sugie^{*1}, Kosei Ikeda^{*1}, So Imai^{*1}, Naoto Akiba^{*1}

Marie M. Morita^{*1}, Satoshi Hashiguchi^{*1}, Fumihisa Shibata^{*1} and Asako Kimura^{*1}

Abstract - The integration of electromyography (EMG) measurements into user interfaces (UIs) holds significant potential. Utilizing EMG for input allows for interactions driven by human muscle activity, thereby minimizing the necessity for extensive physical movements. In this study, we present the development of a cooperative virtual reality (VR) attraction that leverages the myoelectric signals of the audience to enhance player experience. We propose an innovative audience-participation device that employs myoelectric potentials within a virtual environment, demonstrating a novel approach to interactive VR gaming.

Keywords : Electromyogram, Muscle user interface, Virtual reality, and Augmented human

1. はじめに

スポーツの魅力は、選手が優れた技能やチームワークによって試合結果を争うことだけでなく、観客が応援を通じて選手とコミュニケーションを取ることができる点にもある。選手と観客が一体となり競技を盛り上げることで、スポーツの価値が一層高まることが期待できる。近年では、コンピュータゲームを用いた対戦競技も e スポーツとして普及しており、実空間・仮想空間を問わず世界中から観客が集まり、盛況を博している。

スポーツ観戦中の応援は、観客が声を発することによる声援が一般的である。既存研究では、この音声による応援に着目し、観客の声援に応じて光るメガホン型デバイスが開発されている[1]。観客の声援を可視化し、会場の演出として取り入れることで、観客参加型の応援体験を提案している。また、ブラインドサッカーなど音声による応援が試合進行を妨げる可能性のあるスポーツを対象として、声援以外の方法での応援を選手に伝えるデバイスの提案もなされている[2]。観客は腕を振る動作で選手を応援し、手首に装着するデバイスで加速度を測定する。この入力を、選手が装着する骨伝導ヘッドフォンに送信し、選手は振動として応援を知覚することができる。これらの既存研究は、観客の新しい応援体験を提案する

ものであるが、観客から選手への応援という一方的な応援の仕方に着目している。応援が選手と観客とのコミュニケーションとしての側面を持つのであれば、双方がインタラクティブに関与できる応援手法を開発することで、応援体験をより向上させることができると考えられる。

本研究では、観客がインタラクティブかつ直接的に応援を表現できる手法を提案し、その応用事例として観客によりプレイヤーの強化が可能な VR アトラクションゲームを開発することを目的とする。観客の応援をプレイヤーに伝える方法として、本研究では観客の筋電位を採用する。選手への応援に熱中するほど、観客の身体に力が入ることが予想される。また、筋電位の大きさをロボット義手や電動車椅子の操作などユーザインタフェース (User Interface; UI) として活用する提案が数多くなされている[3][4]。本研究では、観客の筋電位に着目し、バーチャル空間でプレイヤーと観客がインタラクティブに関わることのできる UI 操作を提案する。

2. 「力み」入力の UI 操作

筋電位はこれまでに様々なシステムの入力として利用されており、例えばロボット義手や電動車椅子などの分野で応用されている[2][3]。一方で、著者等はこれまでに、筋電位をユーザインタフェース (User Interface; UI) として利用する際に、人がどの程度意図的に力の大きさをコントロールできるのかについて研究を行ってきた[4][5]。同研究では、力の大きさを一入力として利用する場合、3

*1: 立命館大学 情報理工学部

*1: Faculty of Engineering, Information, and Systems, Ritsumeikan University

*2: 立命館大学 立命館グローバル・イノベーション研究機構

*2: Ritsumeikan Global Innovation Research Organization

段階程度であればユーザが大きさを区別して入力できること、逆に力の大きさを連続的な入力として利用し、随時入力値を変更する場合、小さめの力であればユーザはかなり安定して力の大きさを変更・維持することが可能であると分かっている。

そこで、本研究では、これらの2種類の入力方法を観客の「力み」として採用する。本稿では、前者を閾値モード、後者を連続値モードと呼ぶ。閾値モードでは、観客の握りこむ力が閾値を超えたタイミングと、プレイヤーが攻撃するタイミングの一致度に応じて攻撃の強度を変更する。一方、連続値モードでは、観客の握りこむ力の強さに応じて、防御時に使用する盾の種類を変更できるよう設定する。

3. 応用事例「Element Magic Genesis」

3.1 概要

「Element Magic Genesis」は、今回我々が応用事例として開発したアクションゲームで、筋電位をアクションの入力操作に利用し、プレイヤーと観客が協力する要素を導入したVRアトラクションである。プレイヤーは、VR空間内に出現する敵への攻撃や敵からの攻撃を盾で防御するために身体を動かす。攻撃の性能と防御時の盾の出力を、観客の筋電位の計測により得た値に基づき変更することで、プレイヤーと観客とのインタラクションを実現する。本アトラクションを体験している様子を図1に示す。

3.2 システム構成

システム構成を図2に示す。本システムでは、プレイヤーは頭部にビデオシースルー型のHMD（Meta Quest 3, Meta社開発）を装着し、コントローラを両手に把持した状態でVR空間内の敵と戦う。Unityを用いて、Meta Quest 3のコントローラの位置を検出し、Unity上でコントローラの位置が自身の顔より1.5m離れた時に、コントローラのレイ方向に攻撃が出力される。また、防御時（観客における連続値モード）はコントローラに追従する盾を用いて敵から飛んでくる攻撃を防ぐ。

観客は、図3に示す筋電位計測装置を右腕の前腕部に装着し、プレイヤーより広い視野角でプレイヤーを観察しながら本アトラクションを体験する。センサデータの受信や仮想物体の描画には、Unity 2023.2.8f1を使用している。本システムのフレームレートは約120fpsである。

3.3 体験の流れ

本アトラクションの体験の流れを以下に示す。なお、体験時間はデバイスの着脱を含めて5分程度である。

- (1) プレイヤーにHMD、観客の利き腕に筋電位計測装置を装着する。プレイヤーは直立姿勢、観客は座位姿勢で体験する。
- (2) VR空間内にアトラクションの開始画面が表示される。



図1 「Element Magic Genesis」の体験風景

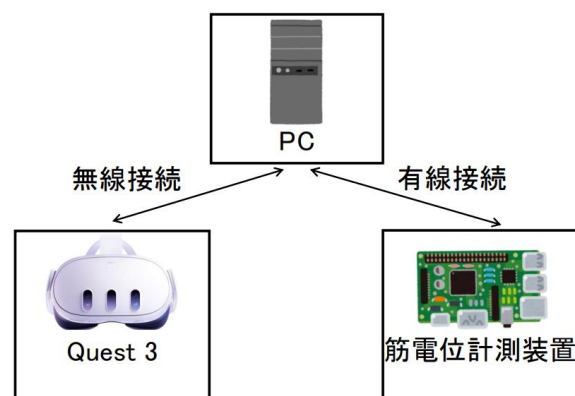


図2 システム構成

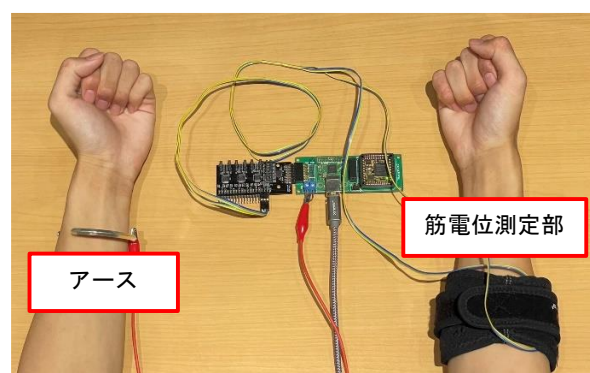


図3 筋電位計測装置を装着している様子

- (3) プレイヤーは開始画面で攻撃の練習を行う。観客は筋電位のキャリブレーションを行い、体験者の筋電位の最大値と最小値を計測する。
- (4) 攻撃の練習とキャリブレーションが終わるとアトラクションが開始される。
- (5) 攻撃フェーズが開始され、プレイヤーと観客が協力して敵にダメージを与える。
- (6) 一定時間経過または、一定のダメージを与えると防御フェーズに移行する。
- (7) 防御フェーズでは、敵から放たれる2種類の色の攻撃

を同じ色の盾で防御する。一定時間が経過すると、最終フェーズに移行する。

- (8) 最終フェーズでは、一定時間内に攻撃を敵に当てる。観客は全力で力を込め続ける。敵への攻撃回数や筋電位の値がクリア後のスコアに反映される。
- (9) スコア画面に移動し、スコアが提示される。
- (10) 体験終了。

3.4 筋電位計測

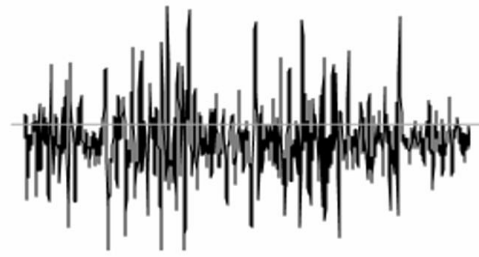
3.4.1 信号計測部

本システムで使用した筋電位計測装置の外観を図3に示す。この装置は、皮膚表面において -1.25mV 以上 1.25mV 以下の電圧の範囲に対応しており、この微弱な皮膚表面での電圧を増幅したアンプ出力をAD変換し、 -8192 以上 8192 以下の範囲でPCに送信する。増幅率は500倍、1000倍、5000倍の中から設定可能であるが、本システムでは、ノイズの影響を考慮したうえで、1000倍を採用している。サンプリング周波数は 1kHz である。電位の基準を決めるためのアースは、図3のように電極とは別に導体をユーザが握ることで決定する。電極は双極誘導方式であり、電極の対は 20mm の間隔で肘の腕橈骨筋上の2点に貼りつけることで、EMG(Electromyography)を計測することができる。計測後、A/D変換したEMG信号はシリアル通信を介して信号処理部に送信される。

3.4.2 信号処理部

信号処理部では、EMGから取得した筋電位データを信号利用部のシステムで利用できるように信号処理を行う。EMGを入力に用いる時に有効だとされている周波数帯域は $5\sim 500\text{Hz}$ であるが、本研究で使用している筋電位計測装置では、 $0\sim 500\text{Hz}$ の周波数帯域の信号が存在するため、計測信号の 5Hz 以下をカットするハイパスフィルタを適用する。さらに、約 $55\sim 66\text{Hz}$ における周波数帯域に対してもバンドストップフィルタによるフィルタリングを行っている。これは、この帯域に存在する電源、電化製品からの 60Hz 周辺のノイズを減衰させるためである[5]。

EMG信号は、複数の筋肉から別々の時間に発生した電位が加算された筋全体の総合的な状態を測定しているため、非線形かつ非定常な信号である。また筋肉の状態は常に変化しているので非定常な信号でもある。そのままの状態の信号を入力に利用するのは困難なため、信号の平滑化を行う必要がある(図4)。本研究では、RMS(二乗平均平方根)を利用して信号の平滑化を行う。RMSはEMG信号から力の強さを認識するのに有効な信号処理方法である[6]。本システムでは約 300ms を窓区間として設定し、当該区間内のRMSを算出することで、信号を平滑化することとした(図4)。本研究では、オーバーラップを 299ms としているため、毎 1ms のフレームレートで新たなRMSが算出される。EMG信号の平滑化に用いた



(a) 計測時の EMG 波形



(b) 平滑化後の EMG 波形

図4 EMGデータの平滑化



図5 筋電位の大きさを表すゲージ

RMSの式を式(1)に示す。

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i)^2}$$

3.4.3 信号利用部

信号利用部では、3.3.2で平滑化処理を行ったEMG信号を用いて、手を握る際の力の大きさを決定する。

「Element Magic Genesis」では、プレイヤーが攻撃する際の攻撃力や防御する際の盾の種類の切り替えに筋電位を使用しており、筋電位の大きさの利用方法として、2章で述べた閾値モードと連続値モードの2種類を用意している。アトラクションの開始に先立ち、観客には最大の力で腕に力を込めてもらうことでキャリブレーションを行い、観客ごとの力の強さの最大値を決定する。2つのモードにおける攻撃の強さおよび縦の切り替えの閾値は、キャリブレーションの値に基づき個人ごとに決定する。

閾値モードでは、観客のEMG信号の入力閾値を50%と設定した。EMG信号の入力値が50%以上となったタイミングとプレイヤーが攻撃を行ったタイミングが一致した際に攻撃力が上昇するよう設定した。連続値モードでは、力が20%以上50%未満で込められている間はプレイ



図6 観客の視点

ヤーの左のコントローラの延長線上に青色の盾が、50%以上で込められた場合は、プレイヤーの右のコントローラの延長線上に赤色の盾が出力されるよう設定した。また、どの入力モードの際にも図5に示すようなゲージを、プレイヤー及び観客の視野内に提示することで、常に自身の手の筋電位の大きさを確認可能とした。ゲージは、観客の EMG 信号の大きさに基づき、100%（最大の力）の入力の際は赤色、0%（力が全く入っていない）の入力の際は緑色となるよう連続的に色を変化させて表示している。

3.5 3つの協力フェーズ

本アトラクションでは、3つのフェーズを通じて、プレイヤーと観客が協力して敵と対戦する。

(1) 攻撃フェーズ

プレイヤーは拳を前に突き出す動作で敵に対して攻撃を行う。観客と協力して、攻撃を行うタイミングと観客が力を込めるタイミングを一致させることで、大幅に攻撃力を向上させることができる。

(2) 防御フェーズ

敵から放たれる2色の攻撃に対して、プレイヤーが同じ色の盾を用いることで防御する。盾はそれぞれ右と左のコントローラに追従して表示され、どちらの色の盾がどちら側の手に表示されるかは観客の力の込め方に依存する。

(3) 最終フェーズ

プレイヤーは攻撃フェーズと同様の方法で敵に攻撃を与え続ける。観客はフェーズが終了するまで常に最大の力で腕に力を込め続ける。プレイヤーが攻撃した回数と観客が力を込め続けた時間によってスコアが増加する。

最後に、防御フェーズでの被弾数、最終フェーズでの結果をもとにスコアが導出される。

3.6 協力プレイの促進

本アトラクションでは、プレイヤーと観客が協力することで高いスコアを達成できるように設計されている。具体的には、両者の協力を促進するために、視覚的表示と音声コミュニケーションの2つの手段を用いている。

まず、視覚的表示として、観客の筋電位の状態を示す

ゲージを活用している。このゲージは観客の画面だけでなくプレイヤーの画面にも表示されるため、プレイヤーは観客の状況を確認しながら自身の動作を調整することができ、プレイヤーと観客の連携が深まる。

さらに、プレイヤーと観客それぞれに攻撃に必要な異なる情報を映像提示することで、情報の交換を必須とし、両者の連携を強化している。例えば、防御フェーズではプレイヤーの視点からは敵がどちらから攻撃してくるのか確認できない。これに対して、観客側には客観視点の映像（図6）が提示され、この映像を基に、観客がプレイヤーにどの方向から敵が攻撃してくるかを口頭で伝え、プレイヤーは敵からの攻撃を上手く防御することが可能となる。

音声コミュニケーションも重要な要素である。プレイヤーと観客はアトラクション体験中に発話が可能であるため、攻撃フェーズではプレイヤーの攻撃タイミングと観客が力を込めるタイミングを掛け声で合わせることで、攻撃力を大幅に向上させることができる。この協力操作では、観客が力を込めた1秒以内にプレイヤーが攻撃を行うことで攻撃力が増加するように設定している。

このように、視覚的表示と音声コミュニケーションを組み合わせることで、協力プレイの質を高めることができる。

4. まとめと今後の展望

本研究では、観客の筋力の大きさをユーザインタフェース操作に導入したVRアトラクション「Element Magic Genesis」を試作した。HMDを装着してコントローラを用いるプレイヤーと、筋電位計測を用いる観客が協力することで、バーチャル空間で観客がインタラクティブに関われるUI操作の提案およびその応用事例を提示した。

今後の展望として、現在は観客側の操作が1人に限定されているため、多数の観客がいる本来の観戦シナリオを想定し、筋電位計測が可能な人数を増やす必要がある。筋電位計測では大量のデータが連続的に処理されるため、デバイスへの負担が大きく、現在の性能では複数の筋電位計測を同時に活用することが困難である。そこで、一つあたりの筋電位計測値を離散的に取得し、複数の筋電位計測値を順番に取得することで、疑似的に連続データとして扱い、大量データの連続的処理を回避する手法が考えられる。

現状では、攻撃フェーズでプレイヤーと観客のタイミングが一致した場合に攻撃力が上昇し、それ以外の時の攻撃の強さが1種類のみとなっており、バリエーションが少ない。今後は、閾値モードにおける閾値をさらに増やし、攻撃の強弱の段階をより細分化することで、アトラクションの満足度と協力性の向上が期待される。

謝辞

本システムの原形の開発において協力していただいた立命館大学情報理工学部情報理工学科所属の大谷翔生，東原賢信，濱崎健人，山田一輝の諸君らに感謝します．木村研究室，柴田研究室の皆様には，本システムの開発にあたり多大な助言，ご協力いただきました．ここに感謝の意を表します．

参考文献

- [1] 川元留輝，小室千晶，串山久美子：スポーツ観戦における観客参加型演出デバイス，情報処理学会インタラクシヨン 2019, IPSJ Interaction 2019, 2B-38 (2012).
- [2] 吉田成朗，鳴海拓志，橋本直，谷川智洋，稲見昌彦，五十 嵐健夫，廣瀬通孝：ジェスチャ操作型飛行ロボットによる 身体性の拡張，情報処理学会インタラクシヨン 2012, IPSJ Interaction 2012, pp. 403 - 408 (2012).
- [3] G. N. Saridis and T. P. Gootee: EMG pattern analysis and classification for a prosthetic arm, IEEE Trans. on Biomedical Engineering, Vol. BME-29, No. 6, pp. 403 - 412 (1982).
- [4] Nozaki, H., Kataoka, Y., Arzate Cruz, C., Shibata, F., Kimura, A.: Analysis and considerations of the controllability of EMG-based force input, Proc. Of Human-Computer Interaction (HCI 2023), Vol. 14011, pp. 563 - 572 (2023).
- [5] 東森拓磨，片岡佑太，柴田史久，木村朝子：対話型 UI 操 作への手腕随意筋の電位計測利用の基礎的検討，情報処理 学会研究報告，Vol. 2022 -HCI-197, No. 37, pp. 1 - 4 (2022)
- [6] Benko, H., Saponas, T. S., Morris, D., Tan, D.: Enhancing input on and above the interactive surface with muscle sensing. Proc. of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces (ITS 2009). 2009, p. 93-100 (2009).