

パンチフォームの自主練習を目的とした AR ボクシングシステム

石橋賢¹⁾ (正会員) 藤川司¹⁾

1) 熊本県立大学総合管理学部

AR boxing system for solo training of punching form

Ken Ishibashi¹⁾(Member) Tsukasa Fujikawa¹⁾

1) Department of Administrative Studies, Prefectural University of Kumamoto

kishibashi @ pu-kumamoto.ac.jp

アブストラクト

ボクシング初学者にとって、第一に正しいパンチフォームを身につけることが重要である。しかしながら、指導者からの直接指導なしに、初学者が自主トレーニングで正しいフォームを習得することは難しい。また、フォームの善し悪しに関する判断基準を持ち合わせていないため、誤ったフォームを身につけてしまう可能性もある。本課題に対して本研究では、AR 技術を用いたリアルタイムフィードバックによる解決策を提案する。提案手法に基づき開発したシステムでは、MagicLeap1 による目標動作の AR 表示、学習者動作との比較、および、機械学習と KinectTMV2 を併用した正誤判定や関節ごとの改善フィードバックといった機能を実装した。本機能を使ったトレーニングによる実証実験をとおして、初学者のフォーム改善が認められ、開発したシステムの有効性が確認できた。

Abstract

Acquisition of correct punching form is the most important training for beginning boxers. However, it is difficult for them to acquire basic punches with correct forms without direct instruction from an instructor. In addition, they may acquire basic punches with wrong form because of the less-judgment knowledge for punching forms' qualities. The aim of this study is to solve the above problem by our proposed solo boxing training system with AR. We developed some functions such as AR display of the target motion, comparison with the user's motion, correct/incorrect judgement and positive feedback for each joint of the user by using MagicLeap1 and KinectTMV2 with machine learning. We confirmed that the effectiveness of our system via experimental evaluations through these functions.

1. はじめに

スポーツトレーニングへの情報技術の導入は、テニス、野球・ソフトボールをはじめ幅広く活用されてきている[1,2]。それらは、バーチャルリアリティ (VR) や拡張現実感 (AR) 技術を導入しており、イメージトレーニングや可視化によるフィードバックなどに利用している。また、骨格情報を用いてゴルフやダンスの正しいフォームを学ぶシステムも提案されており[3, 4, 5, 6, 7]、フォーム学習は多くのスポーツにおいて、重要な学習項目に位置づけられる。ボクシング競技も同様であり、最初に指導者から正しいパンチフォームを教わることとなるが、地方での指導者不足やボクシングジムの少ない地域があり、直接指導が難しい場合もある。そのようなケースでは、ボクシング競技の初学者が自主練習を行う場合、動画や教本を参考にすることとなるが、学習者への正しいフィードバックがないため、誤ったフォームを習得する可能性がある。これは、ゴルフのスイングフォームの実証実験でも指摘されている[3]。

近年の健康志向の高まりに伴い、フィットネスの分野でもゲーミフィケーションが注目されており、ボクシングを題材としたFit Boxing¹やThe Thrill of the Fight²などのデジタルコンテンツがリリースされている。これらは、効果的なインターバルトレーニングを可能にするため、運動効果に関するレビューが多くある一方、正しいパンチフォームでなくとも、パンチの方向がある程度一致していれば良い仕組みとなっている。ボクシングのトレーニングがフィットネス目的であったとしても、正しいパンチフォームを身につけた上でのトレーニングは、運動効果を高めつつ、身体への負担を軽減する効果があり、怪我の予防にも繋がる。すなわち、競技目的でなくとも、正しいパンチフォームを習得するメリットは大きい。

以上の背景より、本研究ではパンチフォームを正しく習得するためのARボクシングシステムを提案し、初学者の自主練習においてシステムの利用により、正しいパンチフォームを習得できるか、実証実験をとおしてその有効性を検証する。

2. 関連研究

2.1 ボクシングを題材としたシステム開発

ボクシングを題材としたシステム開発の事例は、エクササイズやエンタテインメント利用といったゲーム用途、および、能力向上を目的とするトレーニング用途に大別される。

ゲーム用途の事例として、CAVEによるボクシングゲーム[8]や没入型ヘッドマウントディスプレイ (HMD) による高強度インターバルトレーニング目的のウィルス撃退ボクシングゲーム[9]などが報告されている。他方、トレーニング用途の事例として、ロボットを活用したシステムが開発されている。ZwaanとBarakova[10]は、ドローンを超リング相手に見立てたボクシ

ングトレーニングシステムを提案している。このシステムは、対戦相手との距離感やパンチのタイミングに関するトレーニングが主目的である。また、BotBoxer³と呼ばれるロボティクスシミュレーターも開発されており、ロボットアームが学習者のパンチに応じて移動する実践型のシミュレーターとなっている。さらに、ARデバイスと連動させる仕組みも導入している。いずれの事例においても、パンチフォームを正しく習得する仕組みは、導入されていない。

2.2 AR・VRによるスポーツ研究

スポーツ研究においては、VRやARを導入した先行研究が報告されている。本荘ら[3]は、ゴルフスイングを対象に、HMDを用いた骨格情報の提示に関するトレーニング効果を報告している。この報告では、A) 素振り、B) 熟練者がイメージしたとおりのフォーム (以下、目標動作) の提示、C) B)に学習者の全体像を骨格情報の誤差情報と併せて提示、D) 膝→腰→肩→全身の順にCと同様の情報を提示するといった4パターンでのトレーニング効果を検証した。その結果、Cが目標動作との誤差が最も小さく、Bが最大の誤差となり、本荘らの総評として、「フィードバック情報なしの学習では誤った動作を獲得する可能性が大きいため、従来のような学習本に頼った方法でのトレーニングは誤った動作を習得する危険性があることがわかった」[3]と述べている。

他のゴルフを対象とした研究には、佐野ら[4]が身体位置感覚の較正によるVRパッチングトレーニングシステムを、Ikedaら[5]がバーチャル影とノイズ音を用いることで、位置や回転の誤差を提示するゴルフスイングトレーニングシステムをそれぞれ提案している。これらのフォームトレーニングは、打ち分けによるフォームの変化は対象としておらず、目標動作は一つの模範ケースを利用している。

ダンスを対象とした研究には、Chanら[6]がモーションキャプチャによるVRダンストレーニングシステムを提案し、動画によるトレーニングとの比較においてその有効性を報告している。また、Kyanら[7]はCAVEによるバレエダンスのVRトレーニングシステムを提案し、目標動作のアバタと学習者のアバタを重畳した映像を提示することによる効果を報告している。

AR技術を活用したスポーツ研究には、第三者視点から学習者の動きを確認する取り組みが進められおり、永井ら[11]は骨格情報を合成した多視点映像の提示手法を、中川ら[12]はスキー滑走動作をAR技術でリアルタイム提示する手法をそれぞれ報告している。AR技術の利用では、リアルタイムに学習者へフィードバックすることによる学習効果に主眼が置かれている。

3. AR ボクシングシステム

関連研究で挙げたスポーツ研究では、①目標動作の提示、②

¹ <https://fitboxing.net/> (2021.5 閲覧)

² <https://www.oculus.com/experiences/quest/3008315795852749/> (2021.5 閲覧)

³ <https://botboxer.com/> (2021.5 閲覧)

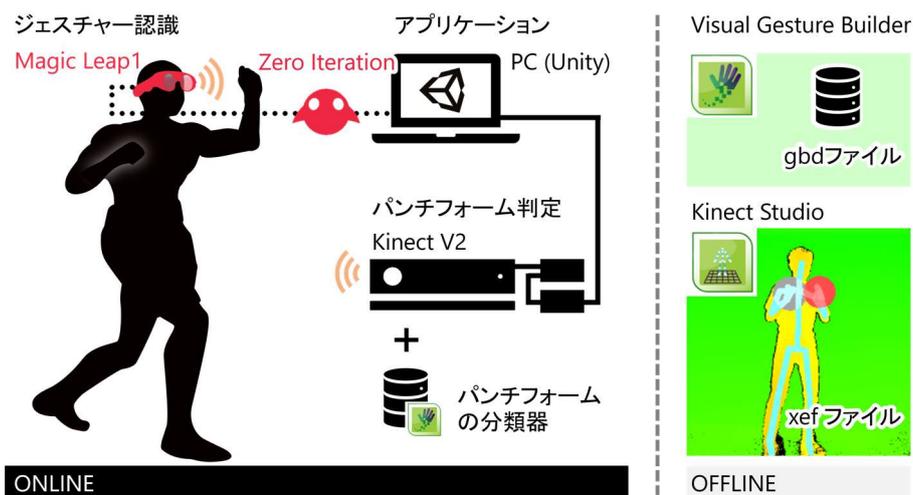


図1. システム構成図

学習者動作との比較, ③改善のためのフィードバックが共通している. 文献[13]によると, 運動技能の学習では, 認知, 連合, 自律の3段階に分類される. 各段階において, 認知の段階で①により正しい知識を得て, 連合の段階では②と③を活用した練習を繰り返すことで, 動作の遂行の誤りを減らし到達に繋がれると考えられる. 特に, “結果の知識”と呼ばれる目標行動と学習者の行動との違いに関する情報は, 技能学習に重要な役割を持つため, 適切なフィードバック情報が必要となる. 最後の自律段階では, 一連の動作がまとまって遂行され, 動作の遂行が円滑化する. パンチフォームの場合, 手や腕だけでなく腰や足が連動して, 滑らかで誤りのない動作を遂行できる. 本システムでは, これらの点に注目して主要な機能を導入し, AR技術の特徴を活用した新たなパンチフォーム学習を促進するトレーニングシステムを実現する.

VR技術の導入も検討したが, OculusやHTCViveなどの没入型HMDの利用では, 現実空間の状況が確認しづらくなることで, 他者や物体に損害を与える危険性があること, CAVEといった大型装置の利用では, 個人の初学者トレーニング向けとして, 物理的スペース占有率が非常に高いことを理由に, AR技術の導入に至った. さらにAR技術は, 実際のサンドバッグやパンチングボールの併用など高い拡張性と親和性を有する. ARデバイスの選定では, 透過型とビデオスルー型のうち, 物理空間の視覚情報の誤差や遅延のない, 透過型ARデバイスを採用することにした. ただし, 本研究では各種トレーニング器具との連携はなく, グローブ未着用での練習を想定している.

3.1 システム構成

本システムの構成図を図1に示す. 図1左のMagic Leap 1 (以下, ML1), PC, Kinect™ V2 (以下, Kv2) で構成され, PCのテスト環境を直接ML1で実行できるZero Iteration⁴を介して, ML1によるジェスチャー認識, ならびに, Kv2によるパンチフォーム判定を併用する. ML1のハンドトラッキングによるジェスチャー

認識では, 3種のジェスチャーパターンでシステム利用時の各種操作を実行する. Kv2を用いたパンチフォーム判定では, 分類器による比較と, 各関節の角度の差異による比較がある.

分類器による比較では, 事前処理としてKinect Studioで取得したxefファイル (Kv2で取得可能な時系列データ) を用いて, Visual Gesture Builder (VGB) によりパンチフォームの分類器 (gbdファイル) を構築する. 分類器とKv2による学習者の骨格データを用いて, パンチフォームの正しさを毎フレーム⁵判定する. ここでは, ボクシング経験者⁶から取得したデータを利用し, 判定時には連続的な値として[0, 1]の範囲で信頼度が算出される. 本研究の目的は各パンチの正確な分類ではなく, 指定パンチのフォームをスコアリング表示する点にある. その観点では, VGBが視覚的に信頼度を確認できる仕組みを持つため, ボクシング経験者が直観的にパンチフォームの正誤と算出される信頼度が一致しているのか判断しやすい. その他, 多様な機械学習や深層学習などが提案されているが, 本研究では経験者の判断基準をもとに, xefファイルにタグ付けし, 短い時間での動作分類に有効なAdaboost⁷にて分類器を構築した. 信頼度は, ユーザのパンチ動作時に毎フレーム算出されるため, ユーザへは常にフィードバックが与えられる.

各関節の角度の差異による比較では, 9箇所の関節の角度について目標動作との誤差を算出することでパンチフォームの修正に対する詳細なアドバイスを提示する. 一方で, ユーザがパンチ動作を目標動作のタイミングに合わせる必要があるため, ユーザがアドバイスを求める際のみ利用する機能となる. 関節ごとの誤差の総和により, パンチフォームの正しさを総合的に判定することも考えられるが, 毎回目標動作を提示してタイミングを合わせる機能を連続的に繰り返すと, 練習効率が低下する⁸と考え, 即時応答性の高い信頼度を総合評価に, 本比較を部分評価に用いる. なお, 学習対象のパンチは, 基本の6種類 (ジャブ, ストレート, 左右フック, 左右アッパー) とした.

⁴ レイテンシー24.46ms (ML1の実測値平均)

⁵ 30.24ms/フレーム (Kv2の実測値平均)

⁶ 1年以上ボクシング競技者としての経験を有する者.

3.2 主要な機能

本システムでは、前述した①目標動作の提示、②学習者動作との比較、③改善のためのフィードバックの3点に注目して主要な機能を決定した。一般的には、①では教材（動画や書籍）で情報を提示するが、立体的な情報（位置や角度など）を把握するのが難しい。本システムでは、学習者正面に目標動作を行う3DモデルをAR表示することで、より情報量豊富な知識を提供する。②では自己の体の動きと教材を見比べることで比較するが、①の課題と同様に細かな位置や角度の調整が容易ではない。そこで、自動的に比較する機能を設けることで、学習者の負担を軽減する。③は指導者や経験者からの直接指導により成り立ち、自主練習では学習者自身の判断基準にのみ頼ることとなる。以上のフィードバックを本システムで支援するため、3Dモデルによる各関節の角度誤差情報、パンチフォームの正誤指標（信頼度）、3Dモデルやテキストによる具体的な指示情報を学習者へ提供する。次に、各機能の詳細について述べる。

3.2.1 目標動作表示機能（①目標動作の提示）

教材における目標動作の提示は、正面と横からの写真が用いられる[14, 15]。AR表示の場合、学習者が移動することで多視点から目標動作を確認できる。さらに、目標動作の3Dモデルを透過することで、背面からでもパンチフォームを確認でき、より学習者の身体位置に近い状態での情報提示が可能となる。背面からの目標動作の確認例を図2に示す。なお、目標動作のアニメーションを作成では、事前にボクシング経験者から目標動作のモーションデータを取得し、それらを3Dモデルに適用した。

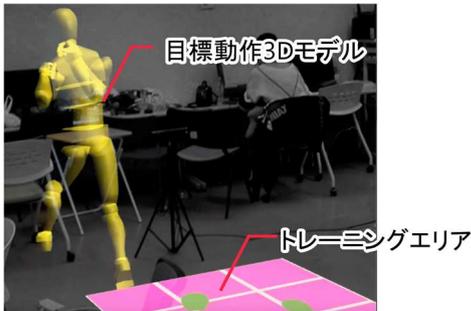


図2. 目標動作の表示例

3.2.2 比較機能（②学習者動作との比較）

本システムでは、パンチフォームの分類器による比較と、各関節の角度の差異による比較機能がある。パンチフォームの分類器構築のためのデータは、右利きのボクシング経験者2名（経験年数3年と6年）から6種類のパンチデータを各10回分、計120回分のデータをxfファイルとして取得した。すなわち、一つのパンチフォームは、20回分のデータで学習される。分類器は、各パンチフォームの信頼度を[0, 1]の範囲で算出する。これは、パンチ動作において連続的に算出され、1に近いほど学習データに近いと判定される。構築した分類器をVGAに使用し、毎フレーム信頼度を表示しながら、ボクシング経験者にパンチフォー

ムの正しさと信頼度の関係性を確認してもらったところ、パンチ動作時の信頼度のピーク値がパンチフォームの正しさと一致していたため、各パンチ動作での最大信頼度を採用することにした。なお、以降の本文における信頼度は、最大信頼度を指す。

関節の角度による比較は、角度が重要となる肘、肩、腰、膝の左右と背骨の計9箇所で行う。各箇所での誤差判定は、式(1)に従い誤差判定行列 B^{Error} として算出される。

$$B^{Error} = \{b_1, b_2, \dots, b_8, b_9\},$$

$$b_i = \begin{cases} 0 & \text{if } n(\{x|x = 0, x \in R^i\}) = 3, \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases},$$

$$R^i = \{r_1^i, r_2^i, r_3^i\},$$

$$r_j = \begin{cases} 0 & \text{if } \Delta\theta_j < \varphi, \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

$$\Delta\theta = \begin{cases} \frac{1}{t} \sum_{k=1}^t |\theta_k^{xtarget} - \theta_k^{xuser}|, \\ \frac{1}{t} \sum_{k=1}^t |\theta_k^{ytarget} - \theta_k^{yuser}|, \\ \frac{1}{t} \sum_{k=1}^t |\theta_k^{ztarget} - \theta_k^{zuser}| \end{cases}.$$

ここで、 $\theta_k^{xtarget}$ はkフレーム目の目標動作におけるx方向の各関節の角度、 θ^{user} は学習者の各関節の角度を示す。一回のパンチ動作は1秒ほどで、システムは30fpsで動作することから $t = 30$ となり、1秒間あたりの平均誤差が閾値 φ 以上で判定し、x, y, z方向のいずれかで判定があった場合、対象となるi番目の関節に誤差があると判断する。なお、目標動作と学習者との時間軸のズレを軽減するため、図3左に示すカウントダウンUIを表示して対応する。学習者が3秒後に学習対象のパンチを行うと、 B^{Error} が更新される。例えば、 b_i が1の場合、対応するi番目関節部が図3右のように赤色となる。本システムでは、ボクシング経験者の回転誤差に関する意見を参考に $\varphi = 60^\circ$ に設定している。

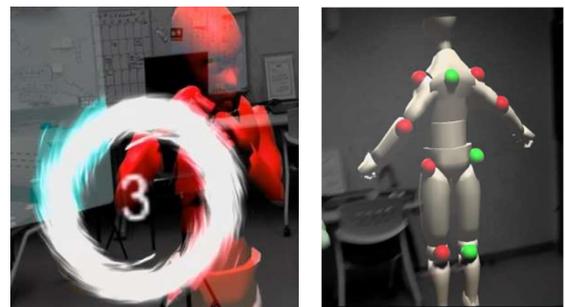


図3. カウントダウンUIと誤差表示の例

3.2.3 フィードバック機能（③比較による情報提示）

本システムでの、各パンチフォームへのフィードバックは、パンチに対する総合評価の定量化、ならびに、関節ごとの誤差の視覚とテキストによる情報提示によって実現する。総合評価は、3.2.2節の信頼度をパンチ動作終了時に確認することで、リアルタイムに学習者のパンチフォームの正しさに対するフィードバックを行う。関節ごとの誤差は、同3.2.2節の関節角度による比較結果に基づき行う。誤差情報は、図3右に示す3Dモデルを用いた色の変化により提示し、誤差の小さな関節は緑色、

7 信頼度の更新速度は、最大 55ms (Kv2 : 30ms+ML1 : 25ms) である。ただし、信頼度のピーク値から基本姿勢に戻

るまで 100~200ms ほど要するため、信頼度確認時には最大信頼度が表示されており、体感的にはリアルタイムといえる。

誤差の大きな関節は赤色でそれぞれ明示する。加えて、各関節に対応したパンチフォームの改善のための文章を、誤差判定行列に基づきテキスト情報として提示する。表1は、各関節の誤差判定時におけるフィードバック文章の対応表である。各文章は、文献[14]に基づき作成し、学習者の右側面に表示する。

表1. 誤差判定におけるフィードバック文章の対応表

関節	パンチ	フィードバック文章
1 左肘	右手	左手のガードをしっかりあげましょう
	左手	お手本の左腕をよく見ましょう
2 右肘	右手	お手本の右腕をよく見ましょう
	左手	右手のガードをしっかりあげましょう
3 左肩	右手	右脇を締めて打ちましょう
	左手	もっと力を込めて打ちましょう
4 右肩	右手	もっと力を込めて打ちましょう
	左手	左脇を締めて打ちましょう
5 左腰	共通	前足を意識しましょう
6 右腰		後ろ足を意識しましょう
7 左膝	共通	左膝を意識しましょう
8 右膝		右膝を意識しましょう
9 背骨	共通	肩や腰を回して打ちましょう

さらに、トレーニングにおいては、AR表示で学習者自身の動作を3Dモデルで提示し、正面（ミラー表示）と背面からの学習者の動作を確認できる機能を導入した。これにより、目標動作の3Dモデルと並べて俯瞰的に動作の違いを比較できる。一般的なトレーニングでも、指導者の動きと学習者の動きを鏡越しに比較して、随時フィードバックを受けることから、本3Dモデルの比較機能も有用であることが期待できる。

3.3 システムによるトレーニング

前述の主要な3機能を導入したARシステムの利用方法について説明する。本システムの基本的なトレーニングの流れは、6種類のパンチで学習者が苦手とするパンチを信頼度により判定する（以下、苦手パンチの計測）。続けて、苦手なパンチを対象に信頼度、目標動作、自己動作、誤差情報を確認しながら、対象パンチフォームに対する適切な改善のためのフィードバックを与える（以下、実践練習）。終了条件は、0.85以上の信頼度を記録した時点とし、10分経過で強制的に1回の練習が終了する。一般的なボクシング練習は、1ラウンド3分休憩1分のインターバルを3ラウンド程度行う[14]。苦手パンチの計測に2分程度必要なため、実践練習の制限時間を10分に設定した。図4のフローは、1回のトレーニングの流れを示している。

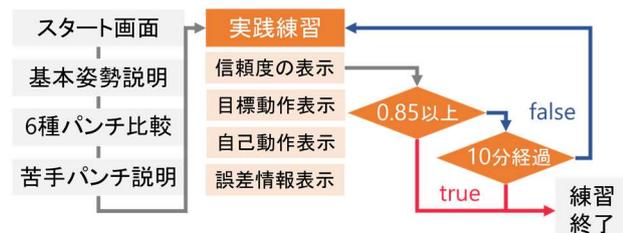


図4. 本ARシステムによるトレーニングの流れ

苦手パンチの計測では、親指と人差し指で輪を作るジェスチャー（OKサイン）操作でシステムを起動し、基本姿勢の説明を受けた後、6種類のパンチフォームの信頼度を比較する。ここで、信頼度の最低値を記録したパンチフォームを苦手なパンチと判

定する。苦手なパンチの説明を、目標動作となる黄色の3Dモデル（図2）を表示して行う。この際、人工音声を用いて説明する。

実践練習では、パンチを放つ方向を意識するため、対戦相手に見立てた赤色の3Dモデル（図3左）を表示する。学習者が苦手なパンチを打つと、3Dモデルとの当たり判定エフェクトが表示される。これにより、信頼度算出の差異の骨格情報の取得がより正確になるとともに、実践的な環境でのトレーニングを可能にする。また、学習者のパンチに対して信頼度がスコアとして表示される。スコアは信頼度を百分率表示したもので、パンチを繰り返す中での学習者のフォーム矯正用フィードバックとして利用する。手を開くジェスチャー（じゃんけんのパー）操作を行うと、目標動作の提示、および、関節ごとの比較が可能となる。ここでは、カウントUI（図3左）が表示され、カウントダウン後に目標動作が一度呼び出される。このとき、学習者が同時にパンチを打つと、関節ごとの比較結果（図3右）が表示される。その結果に基づき、学習者の右側に具体的なアドバイスが提示される。学習者自身の動作全体を確認したい場合、親指と人差し指でL字を作るジェスチャー操作を行うことで、学習者の動作を反映する緑色の3Dモデルが表示される。このモデルは、正面（ミラー表示）と背面から確認でき、左側に設置された3Dボックス型のUIに触れると向きを変更できる。手を開くジェスチャー操作と組み合わせることで、目標動作と学習者の動作を並べて表示できることから、フォームを俯瞰的に確認することを可能にし、適切なフォーム矯正用フィードバックを実現する。なお、一回のトレーニングでは、苦手なパンチと判定されたパンチのみ練習するため、ユーザはパンチの種類を指定できない。

4. 実証実験およびシステムの評価方法

4.1 実験および評価の概要

本システムの有効性を検証するため、図4に示すトレーニングの手順で実証実験を行なった。システム利用での効果を確認する目的で、1度の事前調査（以下、P1）、2度のトレーニングでの調査（以下、1回目をT1、2回目をT2）計3回の調査を実施した。P1では、ボクシング経験者による目標動作を動画（以下、模範動画）で提示した後、実験参加者に各種パンチを真似てもらい、その際の信頼度を計測した。T1・T2では、実験参加者にトレーニングを行ってもらい、練習終了後に各種パンチの信頼度を計測した。信頼度の測定では、負担の少ないパンチから順に左右交互で行うよう「ジャブ、ストレート、左フック、右フック、左アッパー、右アッパー」の順で行った。なお、すべての調査が終了後、主観評価用のアンケート調査を実施した。

システムの評価方法は、信頼度による2種類の評価（以下、信頼度評価1・2）、および、アンケート調査による2種類の主観評価（以下、主観評価1・2）計4種類を採用した。信頼度評価1では、システム利用前後での変化、信頼度評価2では、システム利用の有無による比較に注目する。主観評価1では、実験参加者を対象にトレーニングの効果に関する調査を、主観評価2では、ボクシング経験者（第三者）を対象に上達度合いの調査を行い、本システムの有効性を実証する。

4.2 実験の詳細

本実験では、システムを利用するグループと利用しないグループにおいて、各グループ10名（男女5名ずつの20代大学生）計20名の実験参加者を募った。参加条件は、右利きの（格闘技全般含む）ボクシング未経験者であることとした。以降、システム利用のグループを“システム群”，利用しないグループを“コントロール群”と表記する。実験の条件は以下のとおりである。

共通の実験条件：P1での信頼度計測では、6種類のパンチを模範動画により確認してもらった後、各種パンチを5回ずつ行ってもらい、計30回分の信頼度を計測する。T1・2では、5回トレーニングを繰り返してもらおう。また、T1ではトレーニング前に、T2ではトレーニング後に、それぞれ各パンチ1回分の動画を実験参加者ごとに撮影し、主観評価1のアンケート調査における比較用の動画（以下、比較動画）として記録する。なお、実験による疲労の影響を考慮し、各段階の実験は必ず別日に行う。

システム群のT1・T2条件：実験参加者全員がML1を装着し、本ARシステムのすべての機能を使用する条件で、図4に示す流れでトレーニングを5回繰り返してもらおう。

コントロール群のT1・T2条件：一般的な自主練習を想定し、模範動画を繰り返し視聴してパンチフォームを矯正するトレーニング方法を採用する。その際、動画視聴とパンチ動作が円滑に行えるよう、49インチの大型モニタを利用する。図4の流れと同じく苦手なパンチを把握するため、各パンチを1回ずつ行う。続けて、実験参加者の申告で苦手なパンチを決定し、苦手なパンチのみの模範動画をループ再生する。動画を視聴しつつ、パンチフォームを矯正できたと実験参加者が申告するか、10分経過するまで練習を続けてもらおう。このトレーニング手順を5回繰り返してもらおう。そのため、システム群と比べて各回のトレーニングは異なる種類のパンチを練習する傾向にある。この傾向は、苦手なパンチを誤って認識して、真に苦手なパンチを練習しない状況を作り出す危険性を軽減できる。ただし、システム群と同様、複数回のトレーニングで同じ種類のパンチを苦手だと申告して練習することは禁止していない。

4.3 信頼度に対する定量的評価

本システムにおける信頼度は、3.2.2節のとおりボクシング経験者によりパンチフォームの正しさを定性的に確認してもらった評価指標である。すなわち、目標動作と実験参加者の動作との一致率の指標として、上達度合いを確認できると考えられる。一方で、信頼度評価1・2の指標として採用するにあたり、定性的評価のみでは不十分であるため、本システムの信頼度に対する定量的評価を追加で実施した。パンチデータの取得のため、本実験に参加していない格闘技経験のある男性1名に動画の使用承諾を事前に得た上でパンチ動作を行ってもらった。ここでは、6種類のパンチそれぞれ5回分、計30回分のパンチ動作を行ってもらった。ただし、信頼度の違いに注目するために、目標動作どおりにパンチ動作を行ってもらったあと、腰を使わない、足を使わない、腕を十分に上げない（胸元の位置）、腰と足を使わないという4つの制約条件を設けている。得られたパンチデータは、種類ごとに信頼度順に降順ソートした際の前後の信頼

度差分の平均が14.34（SD:8.94）となっており、信頼度の違いがあるパンチデータを得られている。

記録したパンチデータには、信頼度と3.2.2節で述べた誤差判定行列における0の個数（正しいと判定した数）が含まれており、その際動画も撮影している。経験者（第三者）による主観評価結果を得るために、撮影した動画が記載されたウェブアンケートフォームを用いて、ボクシング経験者4名（経験年数3～6年）にパンチフォームの正しさを5段階で評価してもらった。なお、パンチの種類ごとにセクションを設け、セクションごとでは回答項目の順序が毎回シャッフルされる設定にしており、回答番号もランダムに割り当てている。上記で得たデータからPearsonの積率相関係数を算出し、同時に無相関検定（ $\alpha=0.05$ ）を行ったところ、信頼度と正しいと判定した数間には0.73（ $P=5.E-06$ ）、信頼度と主観評価平均間には0.44（ $P=1.E-02$ ）となり、それぞれ統計的有意差が確認でき、統計的にも正の相関が認められた。

4.4 システム利用の前後による信頼度（信頼度評価1）

4.3節で主観評価と相関が認められた信頼度を、上達度合いの指標として採用し、システム利用前後の変化を確認する。具体的には、各パンチにおけるフォームの正誤変化を、信頼度の平均値と0.85以上の信頼度を記録した割合（以下、成功率）で分析する。特に、システム利用の前後で信頼度がどう変化したかに注目し、システム群で記録したデータから、パンチの種類ごとの信頼度の相加平均、ならびに、成功率をそれぞれ算出する。これらを各段階間で比較することによりシステムの効果を分析・考察する。

4.5 システム利用の有無による信頼度（信頼度評価2）

前節と同じく信頼度を用いた比較により、システム利用の有無に注目して分析・考察する。ここでは、コントロール群の信頼度平均と成功率を算出し、トレーニング前後の信頼度の変化をみる。さらに、システム群との比較により、システム利用の有無によるトレーニングへの影響を分析・考察する。

4.6 実験参加者による評価（主観評価1）

システムの効果について、実装された機能や使用感に関する評価のためのアンケート調査を実施した。実験参加者には、T2の終了後、T1とT2で記録した比較動画が記載されたウェブアンケートフォームを送付し、各質問項目への回答を求めた。

表2は、アンケートフォームに用いた10項目の質問項目である。

表2. 主観評価1の質問項目

質問項目	
1	モチベーションは維持できたか
2	システム使用前後を比べ、上達したと感ずるか
3	システムは簡単に使用できたか
4	苦手パンチ説明(3Dモデル+人工音声)は役に立ったか
5	目標動作の3Dモデル表示は役に立ったか
6	比較結果の3Dモデル表示は役に立ったか
7	自己動作の3Dモデル表示は役に立ったか
8	パンチ動作中に3Dモデルを視認できたか
9	ARデバイスの使用感に問題がなかったか
10	自由記述欄

自由記述以外の9項目に対しては、「当てはまる、やや当てはまる、どちらとも言えない、あまり当てはまらない、当てはまらない」の5段階で回答してもらった。ただし、コントロール群は、システム評価ができないため、項目1と2のみ回答してもらった。

4.7 経験者（第三者）による評価（主観評価2）

本システム利用前後における上達度合いを確認する方法として、ボクシング経験者による主観評価も有用だと考えられる。そこで、ボクシング経験者4名（経験年数3～6年）に対して、システム練習前後の上達度合いに関するアンケート調査を実施した。上達度合いの確認は、T1とT2で記録した比較動画を記載したウェブアンケートフォームにより実施した。比較動画は、システム群の中で比較動画の利用承諾を得た男女1名ずつ2名の動画とし、全24本の動画（参加者2名×パンチ6種×前後2本）を用いた。アンケートフォームには、総合的な評価項目、および、6種類のパンチの評価項目、そして、パンチフォームの上達に対する自由記述欄を設けた。なお、評価項目には「上達している、やや上達している、どちらとも言えない、あまり上達していない、上達していない」の5段階で回答してもらった。なお、システム群との比較のため、コントロール群も同様の条件でアンケート調査を実施した。

ここで、上達度合いの個別の特徴を表すために、各パンチにおけるP1とT2間でのStudentのt検定にて統計的有意差が認められた数を用いる。有意差が認められた中で、平均値の差がP1<T2の場合に加算、P1>T2の場合に減算した結果を表3に示す。

表3. 改善パンチ数-改善パンチ数の結果

	A	B	C	D	E
システム群・男性	6	4	4	3	3
コントロール群・男性	a	b	c	d	e
	1	0	0	-1	-1
システム群・女性	F	G	H	I	J
	6	5	4	4	3
コントロール群・女性	f	g	h	i	j
	5	2	2	1	-1

表3は各群男女別で降順ソートした結果である。赤字は、主観評価2で利用承諾を得た男女4名を示す。大文字のアルファベット表記はシステム群、小文字はコントロール群を示し、システム群の男性は向上したパンチの種類が下から2番目、その他は各群男女別で最も改善したパンチの種類が多い実験参加者の比較動画を評価してもらった。

5. システムの評価結果および考察

5.1 信頼度評価1の結果および考察

本節では、システム群の信頼度データを利用して議論する。図5は、パンチ別でのP1、T1、T2の各段階における信頼度平均と95%信頼区間（以下、95%CI）を示す。

図5よりすべてのパンチにおいて、段階が進むごとに信頼度平均が増加していることがわかる。他のパンチに比べて左右のアップターの信頼度平均がT2段階でも70以下となっている。これは、アップターのパンチフォームにおいて上下の動作が大き

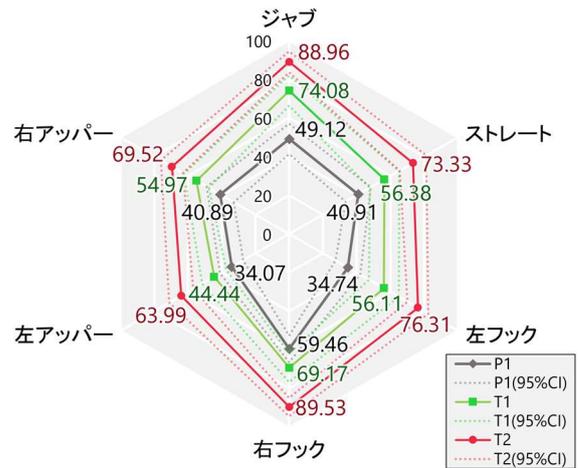


図5. 各段階の信頼度平均と95%CI（システム群）

く、足や腰を意識してパンチする必要があるためだと考えられる。また、パンチ別での各段階における平均値の差異を確認するため、有意水準 $\alpha=0.05$ にて統計処理を実施した。統計処理は、パンチ別で各段階の信頼度に対してBartlett検定を実施することで等分散性を確認した。等分散性が認められた「ストレート、左アッパー、右アッパー」では、分散分析を行い統計的有意差が認められたため、Holm法による多重比較検定を行なったところ、すべての群間にて統計的有意差が確認できた。不等分散であった「ジャブ、左フック、右フック」では、Friedman検定を行い統計的有意差が認められたため、Holm法によるWilcoxonの符号付順位和検定を行なったところ、右フックのP1-T1間を除くすべての群間にて統計的有意差が確認できた。よって、複数回システムを利用することですべてのパンチフォームの改善が見込まれることが確かめられた。

図6は、各段階で0.85以上を記録した信頼度の割合である成功率平均とその95%CI（エラーバー）を示す。なお、アスタリスクの組み合わせは、信頼度平均の比較と同じ手法で統計処理した際に有意差が認められた組み合わせである。

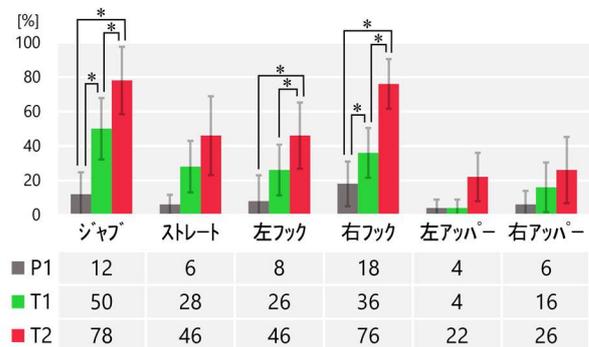


図6. 各段階の成功率平均と95%CI（システム群）

「ジャブ、左フック、右フック」において、安定して信頼度の高いパンチが打てるようになっており、特にジャブと右フックはT2の段階では8割近い成功率を示している。

5.2 信頼度評価 2 の結果および考察

本節では、コントロール群の信頼度データを利用して議論する。図7は、パンチ別での各段階における信頼度平均と95%CIを示す。

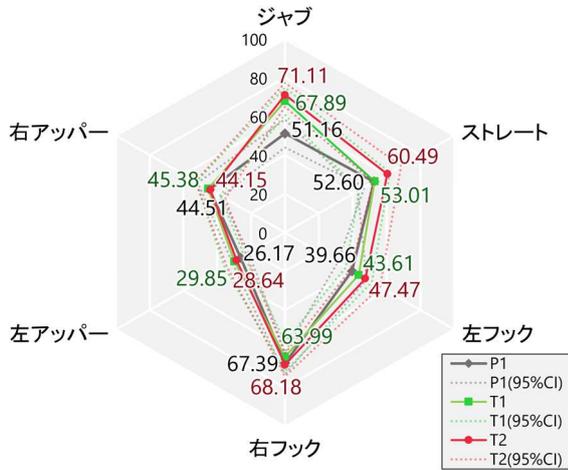


図7. 各段階の信頼度平均と95%CI (コントロール群)

図7より、ジャブ以外のパンチについては、信頼度平均にあまり変化が見られないことがわかる。5.1節と同様の統計処理を行ったところ、ジャブのP1-T1, P1-T2間のみ統計的有意差が認められた。続けて、各段階における成功率平均と95%CIを図8に示す。

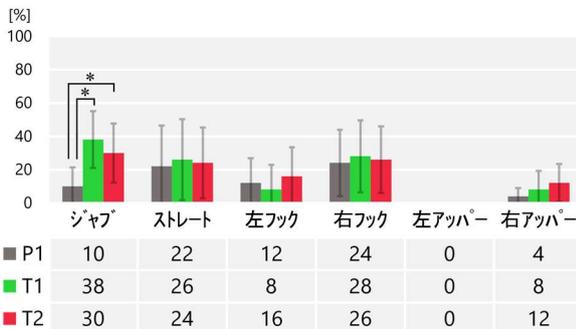


図8. 各段階の成功率平均と95%CI (コントロール群)

P1, T1, T2の段階的な平均値の変化に着目すると、システム群の結果とは異なり、ジャブ以外はほとんど増加していない。ここで、システム群の結果と比較するため、コントロール群とシステム群の信頼度と成功率について、同一段階でパンチ別でのStudentのt検定を行った。その結果を表4に示す。

表4において、 ΔC はシステム群の信頼度平均からコントロール群の信頼度平均を差し引いたもの、 ΔSR は同様に成功率の差分を示す。各差分は正の値の場合、システム群の結果が優れていることを示す。なお、 P^C と P^{SR} はそれぞれ信頼度と成功率におけるt検定で算出されたP値であり、赤字は統計的有意差 ($\alpha=0.05$) が確認できた項目を示している。

コントロール群は、システム群と初期状態の信頼度がすべてのパンチにおいて同程度であり、P1における信頼度と成功率の各P値はすべて統計的有意差が認められない。2回目のトレーニングを終えたT2に注目すると、全パンチで ΔC と ΔSR が正

表4. 信頼度平均差分 (ΔC) と成功率平均差分 (ΔSR) および、t検定の結果 (P値)

種類	ジャブ			ストレート			左フック		
	P1	T1	T2	P1	T1	T2	P1	T1	T2
ΔC	-2.0	6.2	17.8	-11.7	3.4	12.8	-4.9	12.5	28.8
P^C	7E-01	4E-01	3E-05	6E-02	6E-01	3E-02	4E-01	3E-02	6E-07
ΔSR	2	12	48	-16	2	22	-4	18	30
P^{SR}	8E-01	3E-01	1E-03	2E-01	9E-01	2E-01	7E-01	9E-02	3E-02

種類	右フック			左アッパー			右アッパー		
	P1	T1	T2	P1	T1	T2	P1	T1	P1
ΔC	-7.9	5.2	21.4	7.9	14.6	35.4	-3.6	9.6	25.4
P^C	8E-02	3E-01	2E-07	6E-02	2E-03	9E-12	5E-01	6E-02	1E-05
ΔSR	-6	8	50	4	4	22	2	8	14
P^{SR}	6E-01	5E-01	5E-04	1E-01	1E-01	4E-03	7E-01	4E-01	2E-01

の値を示している。 P^C ではすべてのパンチにおいて、 P^{SR} ではストレートと右アッパーを除く4種のパンチにおいてそれぞれ統計的有意差が認められる。すなわち、2度のトレーニングでは、「ジャブ、左フック、右フック、左アッパー」でシステムを用いる方がより上達するといえる。また、ストレートと右フックは、 P^C では統計的有意差が確認できるため、システム群の方が、上達している傾向にあることが確かめられる。

5.3 主観評価 1 の結果および考察

図9に、T2後に実施した実験参加者におけるアンケート調査結果を示す。ここで、●と○は比較対象の項目ペアを表す。

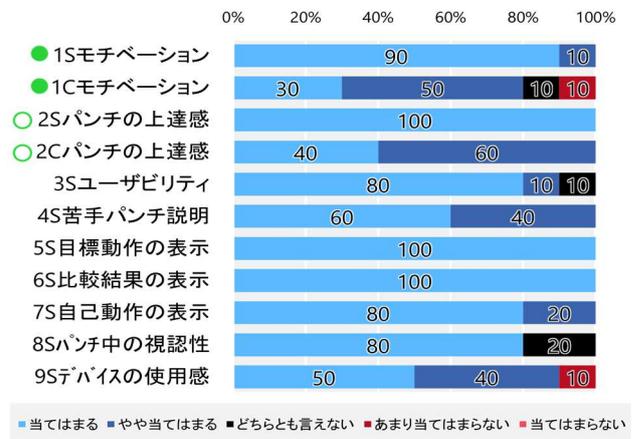


図9. 主観評価 1 の結果

図9の項目番号にSが付く項目はシステム群の回答結果、Cが付く項目はコントロール群の回答結果である。まず、9Sを除くすべてのSの項目において否定的な評価は得られず、特に、5S目標動作と6S比較結果の表示が役に立ったとすべての実験参加者が回答している。また、すべての実験参加者がパンチの上達感を得ており、モチベーションやユーザビリティ面でも、8割以上が「当てはまる」と評価している。これにより、本システムが使いやすく、モチベーションを保ちながら、高い上達感が得られることが確かめられる。

ARデバイスに関する質問では、8Sの視認性に8割が「当てはまる」と評価しており、パンチ動作を伴うトレーニングでも

問題なく3Dモデルを視認できている。一方で、9Sの使用感では肯定的な評価が9割に達しているものの、「当てはまる」の回答は5割にとどまっている。女性の回答に注目すると、使用感に対して「当てはまる」が1名、「やや当てはまる」が3名、「あまり当てはまらない」が1名であった。本結果では、平均的に体重が軽く頭部も小さい女性の実験参加者の方が、使用感の評価が低い傾向がみられた。

1Sと1C (●のペア) , および、2Sと2C (○のペア) をそれぞれ比較すると、項目1のモチベーションでは、システム利用の方が肯定的な回答が多い。「当てはまる」の回答結果に対して χ^2 検定を行ったところ、 $P=6E-03$ と統計的有意差が認められた。項目2のパンチの上達感では、両群肯定的な回答が多いが、同様に χ^2 検定を行った結果では、 $P=3E-03$ と統計的有意差が認められ、システム群の方がより上達感が得られている。すなわち、主観評価の観点でも、システムを利用した方が学習者の上達感を向上させる効果が高いことが示された。

5.4 主観評価2の結果および考察

図10に、トレーニング前後 (P1とT2) におけるパンチフォームの上達度合いに関する調査結果を示す。

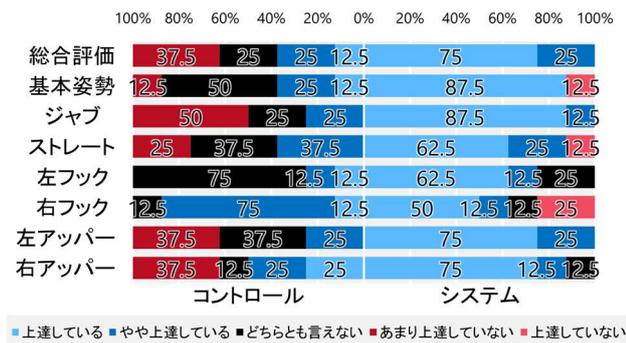


図 10. 主観評価2の結果

図10の左側はコントロール群、右側はシステム群の動画に対する結果を対比させている。総合評価では、「上達している、やや上達している」の回答は、コントロール群が37.5%に対し、システム群はすべて肯定的な評価が得られた。各項目別では、右フックのみ両群の結果が拮抗している。「上達している」の回答結果に対して χ^2 検定を行ったところ、表5の赤字で示すとおり右フックを除く全パンチで統計的有意差が認められた。

表5. 主観評価2における χ^2 検定の結果

項目	総合評価	基本姿勢	ジャブ	ストレート
P	1E-02	3E-03	4E-04	7E-03
項目	左フック	右フック	左アッパー	右アッパー
P	4E-02	1E-01	2E-03	5E-02

この結果より、右フック以外では本システムによる効果が見込まれることが実証された。さらに、自由記述欄では、システム群に対する評価において、基本姿勢と下半身の使い方に対する肯定的な意見が多く挙げられた。一方、コントロール群は、それらの意見が少なかった。本ARシステムが3Dモデル

で学習者の動作や目標動作を提示することにより、基本姿勢を正しく意識づけることができたものと考えられ、さらに、関節ごとのフィードバック情報によって下半身への意識が高まり、結果として正しいパンチフォームの矯正に繋がったと推察される。そのため、基本姿勢の評価にも統計的有意差が認められたものと考えられる。

6. まとめ

本研究では、3Dモデルと骨格情報による信頼度を導入した、パンチフォームの自主練習を可能にするARボクシングシステムを提案した。本ARシステムには、目標動作と学習者動作を3DモデルとしてAR表示する機能、Kv2と機械学習による6種類のパンチフォームを識別する分類器により、リアルタイムにパンチの正誤を判定する信頼度を表示する機能、関節の角度比較による関節ごとのフィードバック機能が実装されている。実証実験では、トレーニングを含む調査を3回実施し、システムを利用することで各パンチフォームが上達することが確認できた。また、ボクシング経験者がトレーニング前後の比較動画を確認したところ、システム群の動画の方が上達しているという評価が多く得られた。主観評価による自由記述でも、基本姿勢、腰や足の使い方など一般的な自主練習では意識しづらい点での改善が認められた。

以上の結果は、AR表示で位置情報を確認しながら繰り返し練習することが可能な本システムのメリットが、トレーニング効果として実証実験にて現れた結果だと考えられる。さらに、各評価では統計的有意差も確認できており、本ARシステムの有効性が実証された。

今後の展望として、UIやフィードバック機能のビジュアル面での改善や、BotBoxerやサンドバッグといった別のトレーニング用品との併用による効果を確かめることなど、より実践的かつ効果的な支援システムづくりを進める予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたって、学習データ作成、および、アンケート評価に協力頂いた熊本大学体育会ボクシング部の方々に深く感謝する。

参考文献

[1] 三上弾, 西條直樹, 高橋康輔, 五十川麻理子, 藪下浩子, 柏野牧夫, 草地良規, VR技術を活用したスポーツトレーニングの試み, 日本画像学会誌, Vol. 58, No. 3, pp.316-323, 2019.

[2] 木村聡貴, スポーツテック: 招待論文: 3. バーチャルリアリティでスポーツ脳を理解し鍛える, 情報処理, Vol.61, No. 11, 2020.

[3] 本荘直樹, 伊坂忠夫, 満田隆, 川村貞夫, HMDを用いたスポーツスキルの学習方法の提案, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 10, No. 1, pp.63-70, 2005.

[4] 佐野高也, 依田淳也, 中村壮亮, 橋本秀紀, VR技術を用いた身体位置感覚の較正によるパッチングトレーニングシステムに関する研究, 日本機械学会論文集, Vol. 83, No. 848, pp. 1–12, 2017.

[5] Atsuki Ikeda, Yuka Tanaka, Dong-Hyun Hwang, Homare Kon, and Hideki Koike, Golf Training System using Sonification and Virtual Shadow, In ACM SIGGRAPH 2019 Emerging Technologies (SIGGRAPH '19), New York, NY, USA, Article 14, 2pages, 2019.

[6] Jacky C. P. Chan, Howard Leung, Jeff K. T. Tang, and Taku Komura, A Virtual Reality Dance Training System using Motion Capture Technology, IEEE Trans. Learn. Technol. Vol. 4, No. 2, pp.187–195, 2011.

[7] Matthew Kyan, Guoyu Sun, Haiyan Li, Ling Zhong, Paisarn Muneesawang, Nan Dong, Bruce Elder, and Ling Guan, An Approach to Ballet Dance Training through MS Kinect and Visualization in a CAVE Virtual Reality Environment, ACM Trans. Intell. Syst. Technol. Vol. 6, No. 2, Article 23, 37 pages, 2015.

[8] Sidharta Ronald and Cruz-Neira Carolin, Cyclone Uppercut, a Boxing Game for an Immersive Environment, In Proceedings of the 2005 ACM SIGCHI International Conference on Advances in computer entertainment technology (ACE '05), New York, NY, USA, pp.363–364, 2005.

[9] Wenge Xu, Hai-Ning Liang, Xiaoyue Ma, and Xiang Li, VirusBoxing: A HIIT-based VR Boxing Game. In Extended Abstracts of the 2020 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play (CHI PLAY '20), New York, NY, USA, pp.98–102, 2020.

[10] Sergej G. Zwaan and Emilia I. Barakova, Boxing Against Drones: Drones in Sports Education, In Proceedings of the The 15th International Conference on Interaction Design and Children (IDC '16), New York, NY, USA, pp.607–612, 2016.

[11] 永井隆昌, 宍戸英彦, 亀田能成, 北原格, 多視点映像コンテンツによるオンサイト視覚フィードバック方式, 映像情報メディア学会誌, Vol. 72, No. 9, pp. J119–J124, 2018.

[12] 中川剣人, 三浦智, 廣岡和真, 梅沢侑実, 神庭弘行, 後藤悠太, 藤本浩志, 藤江正克, 彼末一之, スキー滑走動作における拡張現実技術を用いた第三者視点からのリアルタイムフィードバックシステムの有効性の予備的検討, スキー研究, 1349-449X, Vol. 15, No. 1, pp.77–82, 2018.

[13] 小堀聡, 人間の知覚と運動の相互作用--知覚と運動から人間の情報処理過程を考える, 龍谷理工ジャーナル, Vo. 23, No.1, pp.24-31, 2011.

[14] 大橋秀行, はじめよう! ボクシング, ベースボールマガジン社, 2015.

[15] 野木丈司, まったく新しいボクシングの教科書 《誰でも、パンチ力が2倍・3倍になる!》, ベースボールマガジン社, 2010.

石橋 賢



2011 年北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科博士前期課程修了。2014 年同大学同研究科博士後期課程修了。博士（知識科学）。同年日本学術振興会特別研究員PD。2015 年熊本県立大学総合管理学部講師。2018 年准教授，現在に至る。感性情報メディアの創出およびグラフィックデザインの支援に関する研究に従事。芸術科学会，ACM，感性工学会など各会員。

藤川 司



2021 年熊本県立大学総合管理学部総合管理学科卒業。同年，NTT コミュニケーションズ（株）に入社。在籍時は，VR や AR などのシステム開発研究に従事。