

Mixed Reality 環境によるスポーツ連続写真の等身大可視化の検討とその評価

武藤 駿嗣[†] 井尻 敬[†](正会員)

[†] 芝浦工業大学

Sports Motion Visualization by Life-size Sequential Photography in Mixed Reality Environments and Its Evaluation

Shunji MUTO[†], Takashi IJIRI[†] (*Member*)

[†] Shibaura Institute of Technology

〈あらまし〉 一連の動作を一枚の静止画に集約できる連続写真は、スポーツ動作の可視化に広く利用されている。しかし、一般的に連続写真は紙やモニタにより可視化されるため、動作の大きさを把握しにくいという課題がある。そこで本論文では、大きさを把握しやすいスポーツ可視化法の実現を目的とし、Mixed Reality (MR) 技術を利用した連続写真の等身大可視化法を提案する。提案手法は、撮影した一連のスポーツ動作を、連続写真・動画・残像付き動画としてMR空間に等身大の大きさで提示する。これにより、ユーザは連続写真を好みの角度から等身大で観察できるため、動作中の姿勢のみでなく、歩幅やジャンプの高さなど、動作の実際の大きさを把握できる。提案手法の動作の大きさ把握に対する効果を確認するため、本研究では、27インチモニタによる縮小表示、プロジェクタによる等身大表示、MRによる等身大表示を比較するユーザスタディを実施した。その結果、等身大表示（プロジェクタ・提案手法）はモニタで連続写真を表示するよりも動作の大きさを高い確信度で正確に把握できることが示唆された。
キーワード：複合現実、仮想現実、スポーツ動作、等身大可視化、連続写真

<Summary> Sequential photography is widely used for sports visualizations because it illustrates one motion with a single static image. However, because sequential photographs are usually displayed on paper or monitor and their sizes are smaller than life-size, observers cannot easily recognize the actual size of the motion. In this paper, we propose a life-size visualization method of sequential photography by using mixed reality (MR) technology. With our method, the observer wears a video-see-through head-mounted display and captures a motion of a player by using a hand-held camera. Our method synthesizes sequential photography from the video and visualizes it in life-size in MR space. To confirm the effectiveness of the proposed method, we conducted a user study where we compared a smaller visualization with a monitor display, a life-size visualization with a projector, and a life-sized visualization with our method. The results suggest that the life-size visualizations with a projector and our method allow observers to recognize scales of motions accurately and confidently.

Keywords: mixed reality, virtual reality, sports motion, life-size visualization, sequential photography

1. はじめに

連続写真とは、動きのある被写体を一定の間隔で複数回撮影し、被写体を切り出して一枚の写真に合成する表現方法である。連続写真には一連の動作を一枚の静止画で可視化できるという利点があり、この表現法は、ゴルフや野球のスイング中の姿勢や、走り幅跳びの空中姿勢など、多様なスポーツの可視化に用いられている^{1),2)}。また、手軽に連続写真を合成できるよう、手持ちしたスマートフォンにより撮影された

写真群から連続写真を合成する手法³⁾も発表されている。しかし、通常、連続写真は、紙媒体やモニタを用いた可視化される。このため、動作の実際の大きさを把握しづらいという課題がある。

新たな観戦方法確立やスポーツの動作可視化のため、Virtual Reality (VR) 技術を用いたスポーツ可視化に関する研究がなされている。単眼映像や多視点映像から自由視点映像を合成する手法^{4)~7)}や、サッカーの試合を自由視点映像化し、テーブルトップ上に可視化する試み^{8),9)}が行われている。しか

し、これらの手法では、モニタやテーブルトップ上にスポーツ動作が収縮されて表示されるため、動作の大きさを把握することが難しい。また、スポーツ動作を可視化するためのスマートミラーシステムも提案されている^{10)~14)}。しかし、多くのスマートミラーシステムでは練習者の動作がほぼ等身大で可視化されるものの、自由に近づいたり回り込んだりしながら対象を観察することが難しい。これらの関連研究について、詳細は2章にて紹介する。

そこで本研究では、実際の大きさを把握できるスポーツ動作の可視化法の実現を目的とし、Mixed Reality (MR) 技術を用いた連続写真の等身大可視化法を提案する。(図1)に立ち幅跳びの可視化例を示す。提案システムにおいて、ユーザはビデオスルー型の Head Mounted Display (HMD) を装着し、トラッキングマーカー付きのカメラにより競技者のスポーツ動作を動画として撮影する(図1(a))。提案システムは、動画像から競技者の領域を切り出し、これをMR空間に等身大で可視化する(図1(b))。提案システムでは、連続写真表示、動画表示、残像付き動画表示といった3種の可視化法を提供する。撮影後の観察時には、ユーザはこの3種の可視化法を切り替えながら、好きな視点や距離から動作の様子を観察できる。この可視化方法を利用するとスポーツ動作を等身大でかつ自由な位置・距離から観察できるため、動作中の姿勢のみならず動作の大きさを容易に把握することが可能となる。

提案手法の動作の大きさ把握に関する効果を確認するため、ユーザスタディを実施した。このユーザスタディでは、複数の立ち幅跳びの連続写真を、(i) 27インチモニタによる縮小表示、(ii) プロジェクターによる等身大表示、(iii) 提案手法による等身大表示、という3種の可視化方法で提示し、実験参加者に立ち幅跳びの距離・高さを質問した。これに加えて、自身の回答に関する確信度などについても質問した。結果、プロジェクタ-提案手法-モニタの順に回答の精度が高く、提案手法はモニタ表示に比べて高い確信度で動作の大きさを回答できたことを確認した。提案手法の有用性を示すため、本論文では、提案手法を用いたバドミントン・テニスなどの可視化例を見せる。

本論文にて提案する手法の基礎的アイデアは、情報処理学会エンターテインメントコンピューティング2019¹⁵⁾及びACM VRST 2020¹⁶⁾において発表済みである。本論文では、提案システムをより詳しく述べるとともに、実施したユーザスタディの内容と結果、考察を報告する。

2. 関連研究

VR技術を用いたスポーツ練習支援やスポーツ可視化に関する試みがなされている。ここでは本研究と関連の深い、可視化に関するものを紹介する。



図1: 立ち幅跳びの可視化例

Fig. 1 Visualization examples of a standing long jump

2.1 自由視点映像

新たなスポーツの観戦法確立のため、単眼または複数カメラから取得した映像を入力とし、ユーザが自由に視点を変更できる、自由視点映像合成に関する研究が発表されている。例えば、単一のサッカー中継映像から自由視点映像を合成する試み⁴⁾や、テニス・バドミントン中継映像から自由視点映像を合成する手法⁵⁾が発表されている。一方、高品質な自由視点映像を高速に合成するため、多視点映像に視体積交差法を適用する手法も提案されている⁶⁾。また、Dayritら⁷⁾は、人間の動作の3次元的理解の支援を目的とし、演者の動きを実空間に表示できるAugmented Reality (AR) システムを提案した。このシステムでは、RGB-Dカメラにより演者を撮影し、その3次元的な動きはモバイルディスプレイを通じてAR技術により実空間に重ねて表示される。

自由視点映像の新たな可視化方法として、MR技術を用いて、テーブル上にコート全体を表示する試みが発表されている。Inamotoら⁸⁾はサッカーの試合の複数視点映像から、また、Rematasら⁹⁾は単眼点映像から、自由視点映像を合成しサッカーグラウンド全体をテーブル上へ可視化する手法を提案した。これらの手法により、広いグラウンドで行われる競技を全体を俯瞰しながらテーブルトップ上で観戦することが可能になる。

しかし、自由視点映像に関する既存研究では、自由な位置や視点からスポーツ映像を3次元的に観察できるという利点があるものの、自由視点映像自体はモニタやテーブルトップ上で可視化されている。そのため、スポーツ動作の実際の大

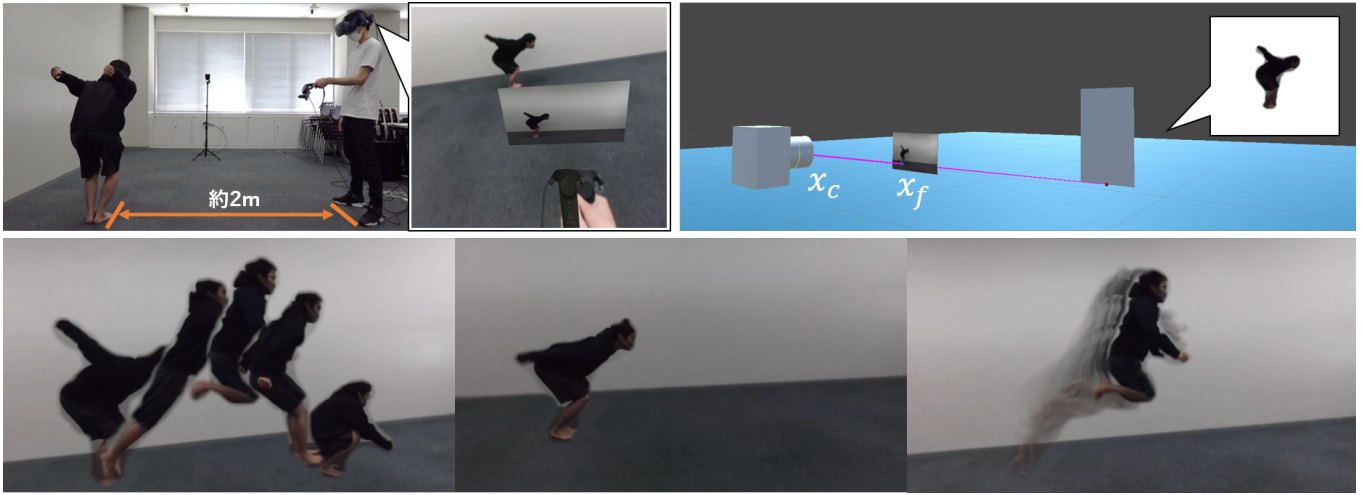


図2 提案システムの全体像
Fig. 2 The overview of our system

きを把握することは難しい。

2.2 スマートミラー

ユーザの動作に情報を付与して可視化することでスポーツ練習を支援するスマートミラーシステムが研究されている。スマートミラーとは、カメラによりユーザを撮影し、得られる映像に情報を付与して提示する、鏡を模したシステムのことである。これまで、手本となる理想姿勢やユーザの姿勢と理想との差分を提示することで、スポーツの練習を支援するシステムが発表されている。例えば、ダンス¹⁰⁾、バレエ¹¹⁾、テニス¹²⁾、スラックライン¹³⁾の練習のためのスマートミラーシステムが挙げられる。また、スポーツにおけるフォームの詳細な確認のため、事前に登録した素早い動きを自動検出し高速度撮影することで、後でリプレイ可能なスマートミラーシステムも発表されている¹⁴⁾。スマートミラーとは多少異なるが、ボルダリングの練習支援のため、指導者や自身の動きを等身大でクライミングウォール上に提示するシステムも提案されている¹⁷⁾。

これらのシステムの多くでは、プロジェクタを用いることで、ユーザの姿勢はほぼ等身大で可視化される。しかし、スマートミラーシステムではスクリーンが固定されているため、観察可能な視点位置・視点方向が限定されており、自由に近づいたり方向を変えたりしながら動作を観察することは難しい。

3. 提案手法

3.1 提案システムの全体像

本研究では、大きさを把握しやすいスポーツ動作の可視化法の実現を目的とし、MR技術を用いた連続写真の等身大可視化法を提案する。図2に提案システムの全体像を示す。図2(a)に提案システムを利用したスポーツ動作撮影時の様子を示す。ユーザは、ビデオシースルー機能を持つHMD (HTC Vive Pro) を装着し、競技者の2m程度手前で撮影を行う。撮影は3次元トラッキング機能を持つVive Proのコントロー



図3: 人物画像を貼り付けられたビルボード
Fig. 3 A player's image on a billboard

ラーに装着したカメラ (ZED min) を利用して行う。将来的に3次元計測を行うためステレオ視機能を持つZEDminiを利用しているが、現在の提案システムでは深度情報は利用していない。ユーザはなるべく床と水平になるようにカメラを競技者方向へ向け、コントローラーのボタンを押すと動画が記録される。提案システムは、記録された動画から競技者部分を切り出しビルボードとして、MR空間内の実際に動作が行われた位置に配置する (図2(b))。その後、ユーザは、MR空間を移動し好きな視点より、3種の可視化方法を切り替えながらこのビルボードを観察できる (図2(c))。

3.2 ビルボード生成

図3に生成されたビルボードの例を示す。動画画が入力されると、提案システムは、各フレームから競技者領域を分割する。本研究では、RGB画像情報のみから人物領域を推定可能なMask R-CNN¹⁸⁾を利用する。さらに、分割された前景領域の周囲5画素の範囲で膨張処理を行い、透明度を線形に減衰させることでスムーズな人物画像を生成する (図3(a))。この境界の透明度指定により、背景になじむような境界を持つビルボードを生成できる (図3(b))。

続いて分割した画像を平面状のビルボードとしてMR空間内の動作が行われた位置に配置する。ここで、動画の最初と最後のフレームにおいて競技者の足は床面 $y = 0$ に接しており、フレーム内の競技者領域の最も低い画素位置 (競技者の足の位置) を (u, v) とする。動画内の最初のフレームについ

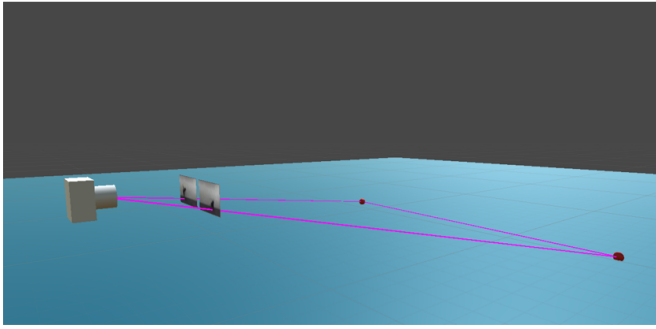


図 4: ビルボードの奥行き決定方法

Fig. 4 Determination method of the depth of the billboard

て、撮影時のカメラ位置を \mathbf{x}_c 、カメラの姿勢を表す回転行列を \mathbf{R}_c とし、利用したカメラを焦点距離 f のピンホールカメラであると仮定すると、画素 (u, v) の MR 空間における位置は、 $\mathbf{x}_f = \mathbf{R}_c(up_x f, vp_y f, f)^T + \mathbf{x}_c$ 、と表せる。ただし、 p_x と p_y は、事前のキャリブレーションにより得られる水平と垂直方向の画角に関する係数である。提案システムは、カメラ位置 \mathbf{x}_c から足位置 \mathbf{x}_f へ直線を生成し、その直線と床面 $y = 0$ との交点を求め、この交点を開始フレームにおける競技者の足位置とする。

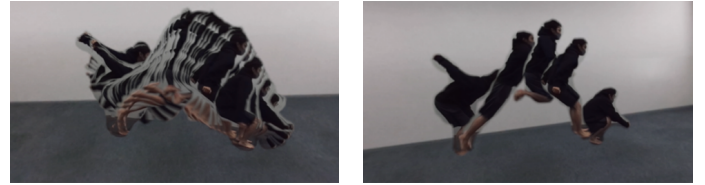
同様の処理を最後のフレームにも適用することで、最後のフレームにおける足位置を取得する。さらに、開始・終了フレームにおける深度値を線形補間することで中間フレームのビルボード位置を決定する (図 4)。最後に、各フレームを平面上のビルボードとして、撮影時のカメラの向きに垂直になるように、求めた 3 次元位置に配置する。

3.3 ビルボードの可視化

提案システムは、ビルボードの可視化法として連続写真表示・動画表示・残像付き動画表示の 3 つの可視化法を提供する (図 5)。ユーザはコントローラ操作により、3 つの表示モードを自由に切り替えることが可能である。撮影されたビルボードを全て表示したものを図 5(a) に示す。連続写真表示では、撮影された全てのビルボードから一定時間間隔で抽出したビルボードのみが表示される。これにより、既存の連続写真と同様のものが等身大で MR 空間に提示される (図 5(b))。動画表示では、一連のビルボードが順番に表示される。これにより、動作の様子を、MR 空間において等身大のスローモーション動画として観察可能になる (図 5(c))。残像付き動画表示は、動画表示と同様にビルボードを順に表示しつつ、一度表示したビルボードの透明度を徐々に減衰させることで、動作の残像を表示するものである。これにより、頭の上下動など、一連の動きの軌跡を観察しやすくなる (図 5(d))。

4. ユーザスタディ

提案手法による動作の大きさ把握に関する効果を調べるため、モニタ・プロジェクタ・提案手法により連続写真を観察



(a) 作成された全ビルボード
(a) All billboards

(b) 連続写真表示
(b) Sequential photography visualization



(c) 動画表示による表示例
(c) Example of display using video visualization



(d) 残像付き動画表示による表示例
(d) Example of display using video visualization with an afterimage effect

図 5: 作成された全ビルボードを表示する 3 種の可視化法

Fig. 5 Three types of visualization methods for the captured all billboards

した際の大きさ把握に関するユーザスタディを実施する。実験を設計するため、以下 3 件の仮説を立てる。

- 仮説 1: 連続写真を等身大表示した方が、紙やモニタによる縮小表示に比べ、動作の大きさを正確に把握できる。
- 仮説 2: 連続写真を等身大表示した方が、紙やモニタによる縮小表示に比べ、動作の大きさを実感できる。
- 仮説 3: 連続写真の等身大表示は、MR 空間で行った場合にも現実の等身大表示と同様の効果がある。

これらの仮説を検証するため、本研究では以下のようなユーザスタディを設計する。

ユーザスタディでは、実験参加者に異なる観察方法で立ち幅跳びの連続写真を観察してもらい、立ち幅跳びの距離と高さを回答してもらい、観察方法は、モニタによる縮小表示、プロジェクタによる等身大表示、提案手法による等身大表示である。一人の実験参加者は、各観察方法にて 4 枚の連続写真の観察と回答を行う。観察方法の順序は順序効果を考慮して参加者ごとに入れ替えることとする。各観察方法における回答後、自身の回答の確信度についてのアンケートを行う。最後に、全ての観察方法における回答が終わった後、実験参加者が観察した立ち幅跳びの連続写真と正しい距離・高さを提示し、その答えと聞いた際の納得度についてアンケートを



図 6: ユーザスタディに利用した立ち幅跳びの連続写真の例
 Fig. 6 Examples of sequential photographs of standing long jumps used for user study

取る。

4.1 立ち幅跳びの連続写真

実験では、身長異なる 4 名が 3 回ずつ異なる飛び方をした、計 12 枚の連続写真を用意しこれをランダムな順序で利用した。実験に使用した立ち幅跳びの連続写真の代表例を図 6 に示す。なお、各写真の下に拡大図を示す。図中に示すとおり、連続写真は踏切から着地まで 4 枚の姿勢を切り出し 1 枚の連続写真として合成した。また、回答すべき立ち幅跳びの距離と高さが明確になるよう、第 1 フレームのつま先、第 2 フレームの最下部、第 4 フレームのかかとに赤い直線を描画した。実験参加者には、つま先の赤線からかかとの赤線までを立ち幅跳びの距離として、床から第 2 フレームの赤線までを高さとして回答するように指示する。

各連続写真における立ち幅跳びの距離と高さの真値は、動画とメジャーを用いて計測した。まず、距離については、飛び出し時のつま先位置と着地時のかかをマークし、その距離を記録した。次に、高さについては、図 7 のとおり垂直方向にメジャーを配置し、ジャンプの様子を動画撮影する。なお、計測しやすいように、メジャーには 5cm 間隔で印をつけた。この下で、ジャンプ中の体の最下部とメジャーを比較することでジャンプの高さを取得した。

4.2 長さの回答方法

本研究では、観察した立ち幅跳びの距離・高さをひもを利用して回答する。具体的には、実験参加者はひもを手渡され、推定した距離または高さと同じ長さとなるようにひもの両端を指で摘み、長さを指定する。その後、実験者は指定された始点と終点をハサミで切りその長さを記録する。我々の過去



図 7: 立ち幅跳びの高さの真値の計測に利用した画像。
 Fig. 7 Measuring the true value of the height of the standing long jump.

の予備実験¹⁶⁾では、壁に貼り付けたメジャーを指差すことで回答を行っていたが、この方法では、10cm 刻みや 5cm 刻みのきりの良い数値が回答されることが散見された。このようなきりのよい数値の影響を排除するため、本研究では、目盛りのついていないひもを利用した。

4.3 モニタの観察環境

連続写真の観察環境を図 8 に示す。図 8(a) は、モニタによる観察の様子である。実験参加者は 27 インチモニタより約 70 cm 離れた位置に着席し、画面いっぱいに表示された連続写真を観察し、距離・高さを回答する。ひもを用いた長さの回答時に机が邪魔になる事があるため、回答時は椅子から離れてよいものとする、

4.4 プロジェクタの観察環境

プロジェクタによる観察の様子を図 8(b) に示す。我々は、スクリーンを下辺が床と接地するように配置し、また、プロジェクタの位置を、画像最下部がスクリーン下辺と一致し連続写真が等身大となるよう調整する。さらに、提示する画像は、競技者の足が画像最下部となるようにトリミングする。ここで、提示される映像が正しく等身大であることを確かめるため、映像中の立ち幅跳びの距離をメジャーにて計測し、真値との誤差が 1cm 以内となることを確認した。この観察環境において、実験参加者はスクリーンから約 2m 離れた位置に着席した状態で観察を開始し、観察中はスクリーンより 50cm 離れていれば、自由に動いてよいものとする。

4.5 提案手法の観察環境

提案手法の観察環境を図 8(c) に示す。実験参加者は HMD を装着し、MR 空間内にて等身大の連続写真を観察する。図中の床面に垂直な四角は、MR 空間にてビルボードが表示されるおおよその位置である。実験参加者は、ビルボードより約 1.5m 離れた位置に着席した状態で観察を開始し、観察中はビルボードより 50cm 離れていれば自由に動いてよいものとする。また、観察後の距離と高さの回答は、HMD を着けた状態で実施する。この観察環境においても、連続写真が正しく等身大で表示されていることを確かめるため、可視化さ

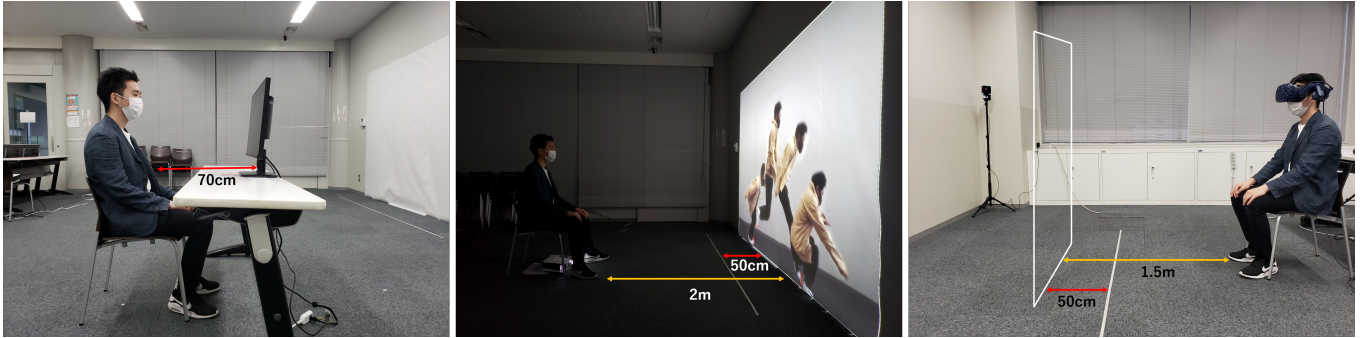


図 8: 連続写真の観察環境 (a) モニタを用いた観察環境, (b) プロジェクタを用いた観察環境, 及び, (c) 提案手法を用いた観察環境

Fig. 8 Observation environment for sequential photographs ((a) with a monitor, (b) with a projector, and (c) with the our method)

れた立ち幅跳びの距離をメジャーで計測し、その真値との誤差が 1cm 以内であることを確認した。

前述のとおり、本研究では、プロジェクタおよび提案手法を用いた観察において、対象から少なくとも 50cm 離れて観察することとした。これは、等身大表示であるプロジェクタ・提案手法環境において、対象に自由に近づくことを許可すると、背比べの要領で自身の体を定規として使用することで距離・高さを正確に測れてしまうためである。このような自身の体を利用した計測を行えず、かつ、自由に観察できる距離として今回は 50cm の距離制限を設けた。一方、モニタ環境では、このよう計測ができないため観察時の距離制限は設けなかった。

4.6 確信度と納得度に関するアンケート

前述の仮説 2 『連続写真を等身大表示した方が、紙やモニタによる縮小表示に比べ、動作の大きさを実感できる』を確認するため、アンケート調査を実施する。ここでは、回答に対する『確信度』及び正しい答えを聞いた際の『納得度』をアンケートにより調査する。モニタ・プロジェクタ・提案方法の各観察方法にて 4 回の観察と回答を実施した後、実験参加者は『○○による回答には確信がありましたか?』というアンケートに回答する。『○○』には、モニタ、プロジェクタ、または、VR のいずれかが入る。回答には、4 段階のリッカート尺度を用いる。

さらに、3 種類の観察方法を利用した観察と回答が終わった後、答え合わせセッションを実施する。ここでは、実験参加者に、観察時と同じ順序・同じ方法で同じ連続写真を観察してもらい、さらに正しい立ち幅跳びの距離と高さを伝える。その後、『○○: 答えを聞き、再確認したときに答えに納得しましたか?』というアンケートに回答してもらう。『○○』には、モニタ、プロジェクタ、または、VR のいずれかが入る。回答には、4 段階のリッカート尺度を用いる。ここで、提案手法は、現実世界に情報を付与する MR 技術であるが、今回のアンケートでは、実験参加者の回答のしやすさを重視し、より認知度の高い VR という単語を利用した。

5. 結果と考察

前章にて説明したユーザスタディを実施した。実験参加者は、男性 6 名で平均年齢は 21.3 歳であった。実験参加者の内、1 人が VR の経験が無く、3 人が 1 度か 2 度の VR を使用した経験があり、2 人は頻繁に使用していた。

5.1 距離・高さの推定精度

立ち幅跳びの距離・高さについて、実験参加者の推定した値と真値との差の絶対値（推定誤差）の平均を図 9 に示す。図 9 において、各棒グラフは左から、幅跳びの高さ、幅跳びの距離、両者（高さ、距離）の平均を表す。エラーバーは標準偏差を表し、『**』は、有意差が認められたことを示している。この結果に対して、反復測定 2 元配置分散分析を、表示要因（モニタ・プロジェクタ・提案手法）と方向要因（距離・高さ）の 2 要因について実施した。有意水準は $p < 0.05$ とした。反復測定 2 元配置分散分析の結果、表示要因には有意な主効果が認められた ($F(2, 138) = 3.062, p = 1.023 \times 10^{-9}$)。一方、方向要因には有意な主効果 ($F(1, 138) = 3.910, p = 0.089$) は認められなかった。また、これら 2 要因の有意な交互作用 ($F(2, 138) = 3.910, p = 0.514$) は認められなかった。

表示要因に有意な主効果が認められたため、各表示要因の高さと距離の平均データに対して有意水準を $p < 0.05$ とした対応のある片側 t 検定を実施した。検定の多重性に伴う P 値の補正には Bonferroni 法を用いた。多重比較検定の結果、プロジェクタとモニタ ($p < 0.01$)、プロジェクタと提案手法 ($p < 0.01$)、及び、提案手法とモニタ ($p < 0.01$) の平均値に有意な差が認められた。

連続写真を縮小表示したモニタによる可視化に比べ、連続写真を等身大表示したプロジェクタ可視化と提案手法において、有意に高い回答精度が認められた。このことから、連続写真の等身大表示は縮小表示よりも動作の大きさを正確に把握しやすいことが示唆された。また、連続写真を等身大で表示した両手法では、実験参加者が、長さの回答をする際に、画像の足位置に目線を合わせ、ひもを両手で引っ張りながらその始点・終点と画像とを比べるような動作が見られた (図

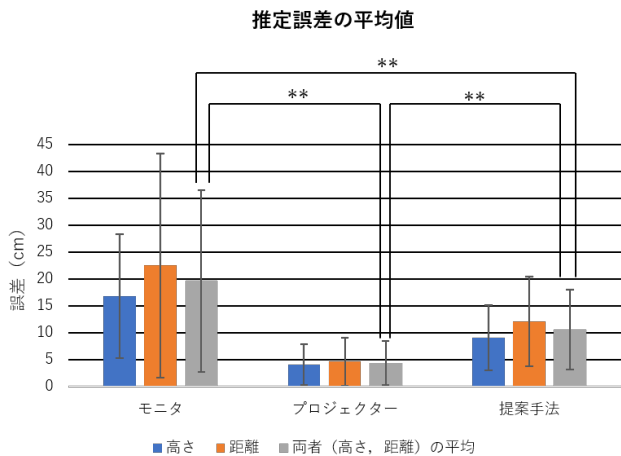


図 9: 3種の観察環境における実験参加者の推定誤差の平均
Fig. 9 The mean absolute errors between the estimations of participants and ground truths in three types of observation environments

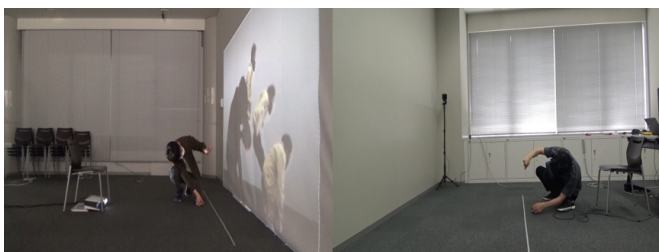


図 10: ユーザスタディ中の実験参加者
Fig. 10 Some participants in the user study

10) . また、ひもで大体の長さを決めた後、等身大表示全体を見渡し、長さを微調整する参加者もいた。このような、自身の手足と比較できることが等身大表示の大きな利点であり、これにより推定精度が上がったものと考えられる。

前述のとおり、等身大表示を行った2手法（プロジェクタ及び提案手法）の間にも有意な差が認められた。特に、提案手法による観察を行ったほうが、プロジェクタを用いた場合よりも推定誤差が大きかった。この要因の1つとして、提案システムの遮蔽の問題が挙げられる。現在の実装では、実世界の深度値などは利用せず、HMDのフロントカメラより得られる映像に連続写真ビルボードをオーバーレイする形で等身大表示を実現している。そのため、観察者が手を目の前にかざしても、その手より手前にビルボード描かれてしまう。これにより、手を使って画像の大きさを確認する作業が行えず、推定誤差が大きくなったと考えられる。

5.2 アンケート結果

確信度と納得度に関するアンケートの結果を図 11 に示す。図 11 において、各項目における4段階のリッカート尺度の平均値を右に示す。確信度に関する回答の平均値は、提案手法で3.8、プロジェクタで3.5、モニタで1.5であった。納得度に関する回答の平均値は、提案手法で3.5、プロジェクタで3.8、モニタで3.0であった。

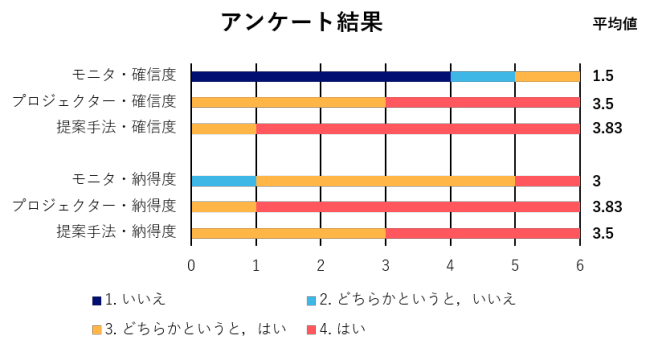


図 11: 確信度と納得度に関する実験参加者6名のアンケート結果

Fig. 11 Results of questionnaires from six participants in the experiment on the level of confidence and conviction.

確信度に関するアンケートについて、モニタによる観察を行った際の確信度が著しく低い結果であった。これは、モニタによる観察では、動作を行っている対象が縮小されているため、動作の大きさの推測が困難であったためだと考えられる。一方、プロジェクタや提案手法による観察では高い確信度が認められた。これらの観察法では、写真を実際の大きさに観察でき、さらに等身大の写真を見ながらひもの長さを調節することも可能であったことが要因だと考えられる。また、プロジェクタと提案手法では同様に高い確信度が認められた。つまり、等身大の連続写真を、実世界の壁に表示した場合と、MR空間に表示した場合で、観察者は同様の確信度をもって動作の大きさを推測できたことが示唆されている。大きな動きを実世界で等身大表示する場合には、大きな壁や大型プロジェクタが必要となる一方で、提案手法は、HMDのみで等身大連続写真を表現できるという利点を持つ。ここで、確信度はあくまで主観的なものなので、確信があっても推定誤差が大ききことがあり得ることに注意してほしい。

最後に、納得度に関するアンケートの結果は、3手法とも比較的高い値となり、手法間で大きな差は認められなかった。モニタによる観察を行った場合の納得度が3手法の中では最も低かったものの、実験参加者6人中5人が、『4. はい』または『3. どちらかというど、はい』と回答しており、比較的高い納得度となった。この納得度は、確信を持って回答した回答値と真値が大きく異なる場合に低くなるものだと考えられる。今回の実験では、確信度が高いプロジェクタ・提案手法では回答精度も高く、確信度の低いモニタでは回答精度も低い傾向があったため、納得度は全体的に高くなったのだと考えられる。

6. 多様なスポーツ動作の可視化例

提案手法の有用性を示すため、複数のスポーツ（ランニング、バドミントン、テニス、ピッチング）の等身大可視化を行った例を図 12 に示す。図 12(a) は、ランニングの例である。残像付き動画表示を行うことで、競技者の腰位置が大きく上



図 12: 可視化例 (a) ランニング, (b) バドミントン, (c) テニススイング, (d) ピッチング)

Fig. 12 Visualization examples; (a)Running, (b)Badminton swing, (c)Tennis swing, and (d)Baseball pitching

下に動いているのがわかる。例えば、長距離走者の場合、腰位置の大きな上下動はあまり好ましくないとされており、提案システムを利用するとこのような上下動を等身大で確認することができる。図 12(b) はバドミントンのロブを、図 12(c) はテニスのフォアハンドスイングを、図 12(d) はピッチングの動作を、それぞれ提案手法で可視化した例である。このとおり、提案手法を利用すると多様なスポーツの動作を等身大の連続写真や残像付き動画として観察することが可能となる。

7. ま と め

本研究では、実際の大きさを把握しやすいスポーツ動作の可視化法の実現を目的とし、MR 技術を用いた連続写真の等身大可視化法を提案した。提案システムにおいて、観察者が手持ちのカメラで競技者を撮影すると、動画像から人物領域が切り出され、これが平面的なビルボードとして MR 空間に等身大で配置される。また、我々は、多様な観察法を支援するため、連続写真表示、動画表示、残像付き動画表示といった 3 種の表示方法を提供した。提案手法の効果を検証するため、動作の大きさ把握に関するユーザスタディを実施した。具体的には、立ち幅跳び連続写真を 3 種の異なる条件（モニタによる縮小表示、プロジェクタによる等身大表示、提案手法による等身大表示）で可視化し、距離・高さに関する実験参加者の推定精度を調査した。結果、プロジェクタ及び提案手法による等身大表示を行った場合に、高い確信度で正確に動作の大きさを把握できることが示唆された。

提案システムの現在の課題として以下の 5 つが挙げられる。(i) 可視化対象動作を横方向に動くもの（カメラの視線方向と垂直に動くもの）に限定している、(ii) 動作を平面的なビルボードで表現している、(iii) 競技者がカメラから離れすぎると人物領域の画像が荒くなってしまふ、(iv) 高速な動作で

は画像にモーションブラーが発生してしまう、(v) スポーツの道具を含めて領域分割できない。この (i) から (iii) に関しては、RGB-D 計測が可能なデバイスを複数利用することで競技者の 3 次元的な動きを再現可能と考えている。上記 (iv) に関しては、提案システムに高速度カメラを組み合わせることで、高速な動作も再現可能になると考えている。最後に、(v) については人物だけでなくスポーツの道具も分割できる領域分割手法を組み込むことで解決できると考えている。このようなデバイス・手法の統合による提案システムの改良は重要な将来課題である。また、本研究の将来課題のひとつは、より多様な実験参加者に対するユーザスタディである。今回は、工学部の学生の協力の下実験を行った。今後、VR 経験の有無、性別、年齢など幅広いユーザに対して同様の知見が得られるか確認するため実験を行いたい。

謝 辞

ユーザスタディに協力してくださった方々に心より感謝の意を表す。本研究は、日本学術振興会科学研究費助成金基盤 C(18K11606) の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 吉田孝久, 跳躍《第 2 版》(陸上競技入門ブック), ベースボール・マガジン社 (2021).
- 2) ワグネル編集部, 丸ごと 1 冊 ザ・連続写真～国内、海外男子プロ編～, 実業之日本社 (2017).
- 3) K. Hasegawa, H. Saito: "Synthesis of a stroboscopic image from a hand-held camera sequence for a sports analysis", Computational Visual Media, Vol. 2, No. 3, pp.277-289 (2016).
- 4) K. Matsui, M. Iwase, M. Agata, T. T. Tanaka, N. Ohnishi: "Soccer image sequence computed by a virtual camera", Proc. of the 1998 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (Cat. No. 98CB36231), pp.860-865 (1998).
- 5) J. Han, D. Farin, P. H. de With: "A real-time augmented-

- reality system for sports broadcast video enhancement”, Proc. of the 15th ACM international conference on Multimedia, pp.337-340 (2007).
- 6) J. Chen, R. Watanabe, K. Nonaka, T. Konno, H. Sankoh, S. Naito: “A Fast Free-viewpoint Video Synthesis Algorithm for Sports Scenes”, arXiv preprint arXiv:1903.11785, (2019).
 - 7) F. L. Dayrit, Y. Nakashima, T. Sato, N. Yokoya: “Increasing pose comprehension through augmented reality reenactment”, Multimedia Tools and Applications, Vol. 76, No. 1, pp.1291-1312 (2017).
 - 8) N. Inamoto, H. Saito: “Free viewpoint video synthesis and presentation of sporting events for mixed reality entertainment”, Proc. of the 2004 ACM SIGCHI International Conference on Advances in computer entertainment technology, pp.42-50 (2004).
 - 9) K. Rematas, I. Kemelmacher-Shlizerman, B. Curless, S. Seitz: “Soccer on your tabletop”, Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.4738-4747 (2018).
 - 10) J. C. Chan, H. Leung, J. K. Tang, T. Komura: “A virtual reality dance training system using motion capture technology” IEEE Trans. on learning technologies, Vol. 4, No. 2, pp.187-195 (2010).
 - 11) F. Anderson, T. Grossman, J. Matejka, G. Fitzmaurice: “YouMove: enhancing movement training with an augmented reality mirror”, Proc. of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology, pp.311-320 (2013).
 - 12) M. Oshita, T. Inao, T. Mukai, S. Kuriyama: “Self-training system for tennis shots with motion feature assessment and visualization”, 2018 International Conference on Cyberworlds (CW), pp.82-89 (2018).
 - 13) F. Kosmalla, C. Murlowski, F. Daiber, A. Krüger: “Slackliner-An Interactive Slackline Training Assistant”, Proc. of the 26th ACM international conference on Multimedia, pp.154-162 (2018).
 - 14) 新野大輔, 井尻敬: “姿勢検出法を活用したスポーツ反復練習のためのスマートミラーシステム” エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2019 論文集, pp.138-144 (2019).
 - 15) 武藤駿嗣, 新野大輔, 井尻敬: “スポーツ連続写真の等身大可視化”, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2019 論文集, pp.154-157 (2019).
 - 16) S. Muto, T. Ijiri: “Life-size Sequential Photography in a Mixed Reality Environment”, 26th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, pp.1-2 (2020).
 - 17) F. Kosmalla, F. Daiber, F. Wiehr, A. Krüger: “Climbvis: Investigating in-situ visualizations for understanding climbing movements by demonstration”, Proc. of the 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces, pp.270-279 (2017).
 - 18) K. He, G. Gkioxari, P. Dollár, R. Girshick: “Mask R-CNN”, Proc. of the IEEE international conference on computer vision, pp.2961-2969 (2017).

(2021年5月30日受付) (2021年10月17日再受付)