

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

新野 大輔^{1,a)} 井尻 敬^{1,b)}

概要: 本研究では、スポーツにおける反復練習の様子を可視化することを目的としたスマートミラーシステムを提案する。提案システムは、webカメラ・高速度カメラ・プロジェクタより構成され、webカメラにてユーザを撮影しその映像や姿勢をプロジェクタによりリアルタイムに提示する。さらに提案システムは、ユーザが指定した姿勢を検出することで、反復練習の重要部分のみを高速度撮影し、後からスロー再生できる枠組みを提供する。提案システムはカメラ・プロジェクタシステムではあるものの、実際の鏡と似た感覚で練習に利用でき、かつ、現実の鏡では実現できないスロー再生や姿勢確認が行なえる。提案システムの姿勢検出法の精度を評価するため、4名の実験協力者による評価実験を行った。結果、提案システムは、実験協力者の素振り動作全131回のうち91.6%を正しく検出することができ、練習支援目的として十分な精度が得られることを確認した。また、提案システムの有用性を確認するためにユーザスタディを行い、そのユーザビリティについて調査した。

1. はじめに

スポーツの技術向上には反復練習が重要である。例えば、野球・テニス・ゴルフにおいて、その技術向上のために素振り練習を行うことが多い。反復練習をコーチとともに行なう場合は、練習の様子を第三者視点から確認し、正しいフォーム習得のためのアドバイスなどが行なわれる。一方、反復練習は一人でやることも多く、その場合には自身の姿勢を確認するために鏡が利用されることも少なくない。

スポーツやダンスにおける理想的な動作を習得するため、ユーザに自身の動きや付加情報を提示するシステムが開発されている。これらには、練習動作を撮影しプロジェクタにて大画面表示をするもの [1] や、Kinect や MoCap を用いて練習動作をキャプチャし、手本との違いなどを提示するもの [2-6] が存在する。しかし、既存手法のうち一般的なカメラや Kinect を利用するものは、取得できる映像のフレームレートに限界があり野球の素振り練習のような高速な動きを詳細に観察するには不向きである。また、MoCap を利用する手法は、体の各部位の高速な動きを3次元的に取得できるという利点はあるが、マーカを装着する必要がある・RGB映像は取得できない・計測機器が高価である、といった課題がある。

そこで本研究では、スポーツにおける反復練習の様子を

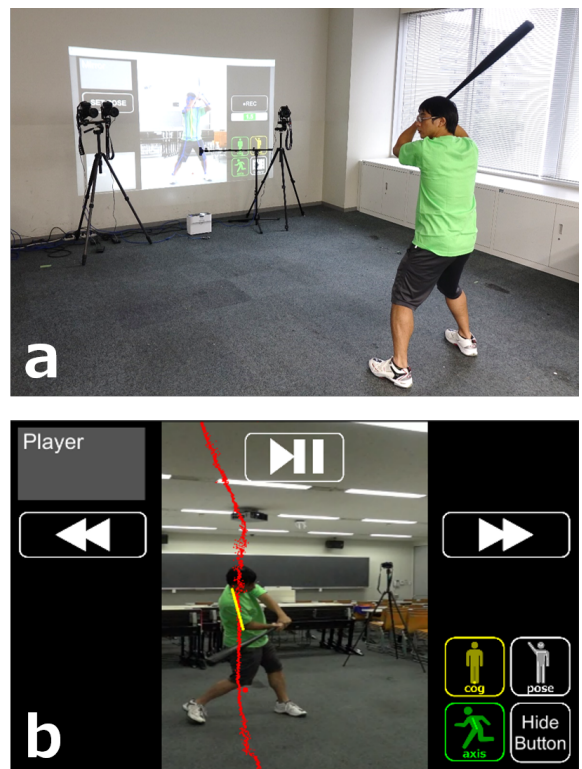


図1 提案システムを用いた練習の様子。提案システムはwebカメラ・高速度カメラ・プロジェクタから構成され、ユーザは、自身の姿勢を確認しながら反復練習を行なう (a)。後から自身の動きや姿勢情報をスロー動画として再生できる (b)。

¹ 芝浦工業大学

^{a)} daisuke.niino0808@gmail.com

^{b)} takashi.ijiri80@gmail.com

可視化することを目的としたスマートミラーシステムを提案する。特に本研究では、素振りのような高速な動きを詳細に計測・可視化するために民生用高速度カメラを利用する。提案システムは、webカメラ・高速度カメラ・プロジェクタより構成され、ユーザはプロジェクタスクリーンの前で反復練習を行なう(図1a)。練習中、ユーザの姿勢はPoseNet [7]によりリアルタイムに追跡され、姿勢情報は必要に応じてスクリーン上に可視化される。

一般的に、反復練習では似た動きが繰り返され、練習時の関心はその繰り返し動作であることが多い。そこで提案システムでは、繰り返し動作の開始時の姿勢を登録し、その姿勢が現れてから1秒程度のユーザの動きを自動的に高速度撮影する機能を提供する。例えば、素振り開始時点の姿勢を登録した後、素振りを数十回繰り返すと、素振り動作が高速度動画として撮影・記録される。この高速度動画はあとから再生するができ、自身の動きをスロー動画で確認することや、複数のスロー動画を比較することが可能である(図1b)。

2. 関連研究

2.1 動作の自己学習を支援

人物の動作をカメラ等で取得し、得られた映像を用いて動作の自己学習を支援する手法が研究されている。Hämäläinen [1]は、一般的なカメラを用いて人物の反復動作を自動撮影し、プロジェクタで大画面再生を行なうシステムを提案した。また、Kinectとプロジェクタを用いて、一般的な動作 [2]、バレエ [3]、slackline [4]の自己学習を支援するシステムも提案されている。しかし、これらの一般的なカメラやKinectを用いた手法は、取得できる映像のフレームレートに限界があり、野球の素振りなどの高速な動作を捉えるのは困難である。

一方、高速な動きを正確に捉えられるMotion Capture (MoCap)が練習支援に利用されている。Chanら [5]は、MoCapとプロジェクタを用いてダンスの練習を支援するシステムを提案した。また、Oshitaら [6]は、MoCapにより動きを計測し、理想的な動きとの差を提示するテニスのフォアハンドショットの練習支援システムを提案した。これらのMoCapを用いた手法は、体の各部位の高速な動作を3次元的に取得できるという利点がある。しかし、その一方で、RGB映像が取得できない、特殊な機材を要するという問題がある。

2.2 高速度カメラを用いた動作解析

スポーツ競技者の評価・解析・練習支援のため高速度カメラを利用したスポーツ解析に関する研究がなされている。Shumら [8]やIjiriら [9]は、高速度カメラを用いて野球の投球シーンを撮影し、ボールの回転軸や回転数を解析する手法を提案した。菊池ら [10]や酒井ら [11]は、野

球の守備動作を高速度カメラにより撮影し、ゴロ処理における歩数の解析を行った。また、我々研究グループは、高速度カメラにより撮影した打撃動作から精度やバット姿勢を推定する手法を提案した [12]。

この通り、高速度カメラは、スポーツの解析・練習に広く利用されている。しかし、現在利用可能な民生用高速度カメラは、高速撮影可能な時間が数秒程度と短いため、練習者とは別の撮影者がタイミングをみて録画を開始・終了する必要があった。また、長時間撮影可能な高速度カメラも存在するが、このような高速度カメラで反復練習を長時間撮影すると、練習の間のインターバルも撮影されてしまい動画が冗長になる・動画サイズが膨大になるという問題がある。提案システムでは特定動作のみが高速度動画として自動的に記録されるため、撮影者が不要かつ特定動作のみが高速度動画として記録されるという利点がある。

2.3 人物姿勢推定手法

提案システムの実現には、RGB映像から人物姿勢を推定する必要がある。Caoら [13]は、深層学習を用いて画像内の複数人の姿勢を推定する手法を提案した。また、Papandreouら [14]は、画像内の複数人の姿勢とセグメンテーションマスクを推定する手法を提案した。Danらは、文献 [14]の手法を応用し、比較的高速に姿勢推定が可能なPoseNet [7]を提案した。提案システムは、ユーザの姿勢情報をリアルタイムに可視化し、また、ユーザの特定の姿勢を検出して自動撮影を行うため、高速に姿勢推定を行う必要がある。そのため、本研究では、このPoseNet [7]を応用する。

3. 反復練習のためのスマートミラーシステム

本研究の目的は、スポーツにおける反復練習において、自身の姿勢を観察できる環境の実現である。このような練習環境を設計する際特に重要なのは、i) 普段と同じ状況で練習が出来ること、ii) 自身の動作を客観的に観察できること、iii) 自身の理想とする姿勢を保っているかどうかを確認できること、である。このため、我々は、練習の様子を自動的に記録できるスマートミラーシステムを提案する。提案システムは、ユーザの様子をカメラにて撮影し、その様子を大型プロジェクタによりリアルタイムに提示する。これにより鏡の前で行なう普段の練習と似た環境を実現できる。さらに、提案システムは、リアルタイムに体軸・重心位置を提示する機能や、自動的に高速度動画を蓄積し後から見直せる機能を提供する。これにより、自身の動きを客観視し、理想とする動きと自身の動きを比較することが可能になる。

3.1 ユーザインタフェース

ユーザは、図1aの通り、プロジェクタスクリーンの手

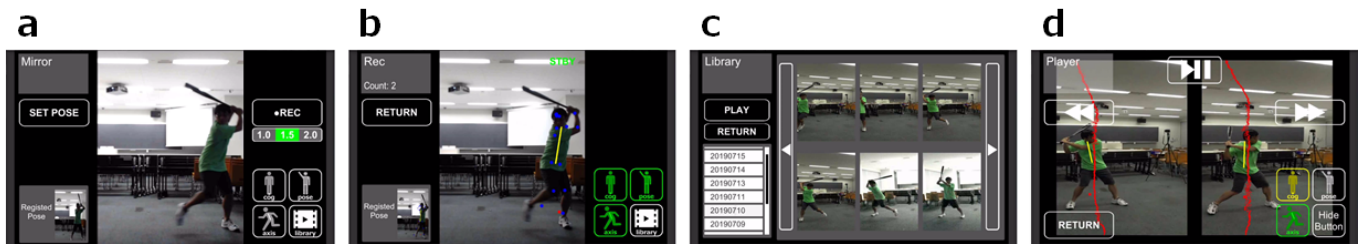


図 2 提案システムのユーザインタフェース。ユーザがカメラの前に立つとその様子が画面に表示される (a)。提案システムは予め登録された姿勢を検出しユーザの反復動作を自動で高速度撮影する (b)。ライブラリ画面にて撮影された動画を確認できる (c)。提案システムは軸や重心などの情報とともに複数動画を同時再生できる (d)。

前 4m 程度に立ち、反復練習を行なう。その様子は web カメラにより撮影されリアルタイムにスクリーン上に表示される (図 2a)。また、画面右下のボタン (図 3efg) を押すことで、キーポイント・重心・軸の情報を表示することができる。ここでキーポイントとは、PoseNet [7] により検出される 17 個の体のランドマーク位置である。キーポイントは青色の点と線分、重心は赤色の点、軸は黄色の点により可視化される。なお、提案システムのボタン操作はタブレット (iPad Pro 11 インチ) にて行なう。

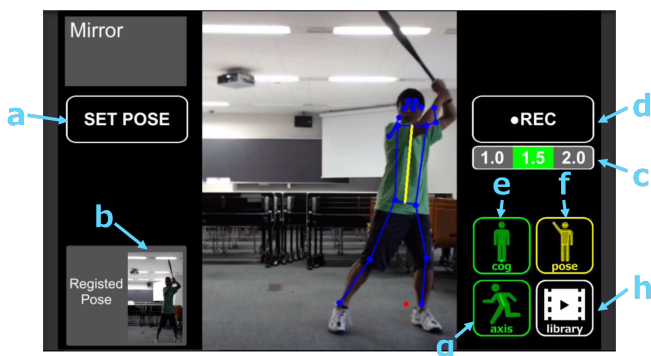


図 3 提案システムの操作方法。ユーザは、「SET POSE」ボタン (a) を押し、カウントに合わせて動作を行なうことでキーポーズを登録できる。登録されたキーポーズは画面左下 (b) に表示される。ユーザが、高速度撮影時間を設定し (c) 「● REC」ボタン (d) を押し、高速度撮影待機状態に移行する。提案システムの右下のボタンにより、姿勢・重心・軸の表示・非表示を切り替えられる。また「library」ボタン (h) により蓄積した高速度動画を視聴できる。

開始姿勢の登録と撮影。 ユーザは、反復動作の開始時の姿勢をキーポーズとして登録することで、練習中に行なう反復動作を自動高速度撮影しスロー再生することが可能である。キーポーズ登録の際、ユーザは、画面左側の「SET POSE」ボタン (図 3a) を押し、すると、3 秒のカウントダウンが行なわれ、カウントダウン後の 0.33 秒分の動画 (20 フレーム分) がキーポーズとして登録される。登録されたキーポーズは、画面左下のウィンドウ (図 3b) に表示される。キーポーズの登録後、ユーザは、画面右側の「1

秒・1.5 秒・2 秒」ボタン (図 3c) より高速度撮影時間を選択し、「● REC」ボタン (図 3d) を押す。するとシステムは、高速度撮影の待機状態に入る (図 2b)。この待機状態において、ユーザが反復練習を行ない登録したキーポーズと似た姿勢をとると、システムはそれを検出し自動的に高速度撮影を行なう。この機能により、例えば素振り等の反復練習の様子を、高速度動画として蓄積できる。

現在は、民生用高速度カメラを利用し提案システムを実現している。利用したカメラでは、高速度動画の記録に数十秒程時間を要し、この間撮影を行なうことが出来ない。そのため、高速度動画の記録中、提案システムは記録待ち状態へ切り替わり、キーポーズ検出と高速度動画撮影を中断する。

撮影高速度動画の確認。 一連の練習の後、ユーザは蓄積した高速度動画を視聴することが可能である。画面右下の library ボタン (図 3h) を押し撮影された動画の一覧が表示され (図 2c)、動画を選択し「PLAY」ボタンを押すことで再生できる (図 2d)。ユーザは複数の動画 (最大 6 個) の動画を選択し、それらを同時に再生できる。また、画面右下のボタンを押すことで、再生するスロー動画に対して姿勢・重心・軸を可視化することが可能である。これに加えて、重心・軸については、ボタンを 2 回押すことで、時間経過に伴う変化を表示することも出来る。

3.2 システム構成

提案システムの構成を図 4a に示す。スクリーン (白い壁) から約 0.4m 離れた位置に単焦点プロジェクタ (RICOH PJ WX4152, 図 4b) を設置し、その上部に web カメラ (Logicool HD Pro Webcam C920, 図 4c) を設置する。web カメラはせり出し型マウント (図 4d) 上に固定し、その高さがユーザの腰の高さと一致するように設定する。また、プロジェクタの左右 1.1m、高さ 1.35m の位置に高速度カメラ (Sony RX10M3, Sony RX10M4, 960fps, 図 4e) を縦に設置する。このカメラにはメインマシンと通信するための IR 受光センサが取り付けられており、メインマシンからのシャッター信号を受信して高速度動画を撮影する。

提案システムにて利用したカメラは高速度動画の記録に30~40秒程度時間を要し、この間撮影を行なうことが出来ない。一方、多くの反復動作は5秒程度の間隔で実施されることが多い。反復動作をなるべく漏れなく記録するため、我々は3台のカメラを設置し、これらを順番に切り替えて撮影する。撮影された動画は、Wifi対応SDカードを通じてメインマシンへ転送される。

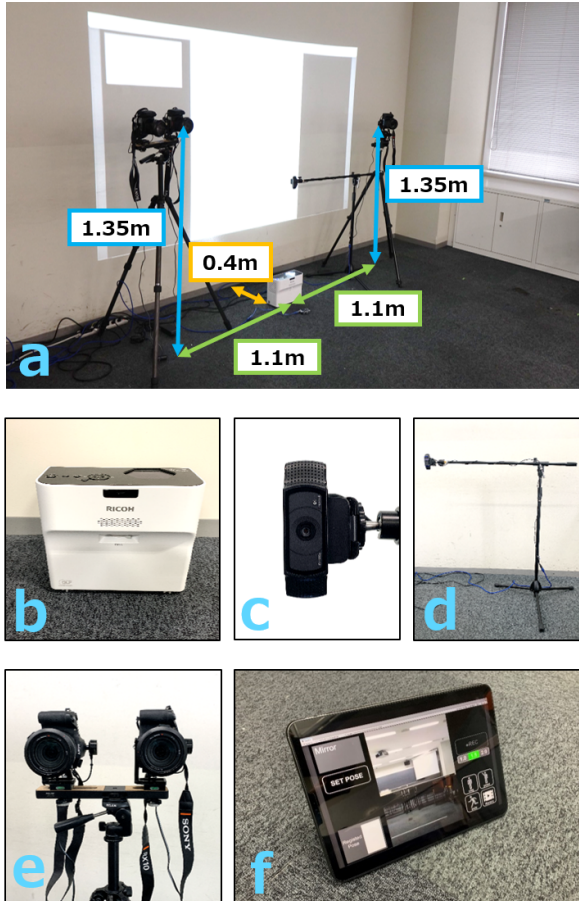


図4 システム構成 (a). 提案システムは、単焦点プロジェクタ (b) を用いて web カメラ (cd) の映像を大画面表示する。ユーザの反復練習シーンは高速度カメラ (e) を用いて撮影する。また、提案システムの操作はタブレット (f) にて行なう。

4. 撮影開始姿勢の検出アルゴリズム

姿勢推定手法. 提案システムの実現には、練習シーン映像から人物姿勢を推定する必要がある。本研究では、深層学習を用いて比較的高速に人物の姿勢推定が可能な PoseNet [7] を利用し、図5に示す17点のキーポイントと信頼度を得る。

ポーズ間距離の計算方法. 提案システムは、現在のユーザの姿勢が、予め登録されたキーポーズに近くなった時、撮影を行なう。本研究では、堅固な自動撮影を実現するため、反復動作における初めの T フレームの姿勢 (キーポーズ) を登録しておき、直近の T フレームの姿勢との姿勢間

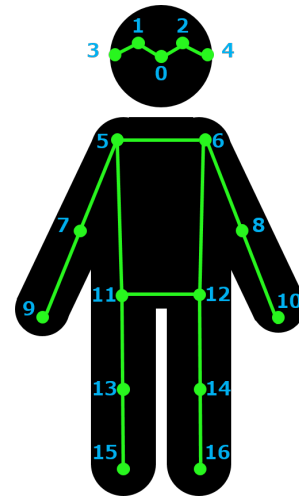


図5 PoseNet より得られる17点のキーポイント。

距離 D が $Threshold$ を下回ったときに撮影を行なう。姿勢間距離 D は以下の通り計算される、

$$D(\mathbf{x}_k^t, \mathbf{y}_k^t) = \sum_{t=1}^T \left(\frac{\sum_{k=1}^{17} w_k^t \|\mathbf{x}_k^t - \mathbf{y}_k^t\|}{\sum_{k=1}^{17} w_k^t} \right). \quad (1)$$

ただし、 t はフレーム番号、 k は17点のキーポイントのいずれか、 \mathbf{x}_k^t はキーポーズにおける t 番目フレーム・ k 番目キーポイントの座標、 \mathbf{y}_k^t は直近の T フレームの姿勢における t 番目フレーム・ k 番目キーポイントの座標、 w_k^t は直近の T フレームの姿勢における t 番目フレーム・ k 番目キーポイントの信頼度である。

また、PoseNet より得られる姿勢は、画像内のユーザの位置や大きさによってもその座標が異なるため、得られた姿勢を直接比較することは困難である。そのため、本研究では、PoseNet より得られた姿勢を、バウンディングボックスを用いて $[0, 1]$ に正規化し姿勢間距離の計算を行った。

本研究におけるすべての実験では、 $T = 20$, $Threshold = 0.04$ を利用した。

5. 結果と考察

提案システムの有用性を確認するためユーザスタディを行った。まず、実験協力者4名に提案システムの自動高速度撮影機能を利用した野球の素振りの撮影と、撮影された動画の観察を行ってもらった。その後、提案システムに関するアンケートへ回答してもらい、各項目に関してフリーディスカッション形式で意見をもらった。また、取得データを利用して撮影開始姿勢の検出精度評価を行った。

5.1 実験方法

まず実験協力者に、実験の目的と内容を説明し、実験参加同意書への署名を受けた。次に、提案システムの使い方を実演を交えて説明し、5分程度の間、キーポーズの登録や自動高速度撮影の練習をしてもらった。その後、実験協力者に提案システムを用いて30本の素振り動作を撮影し

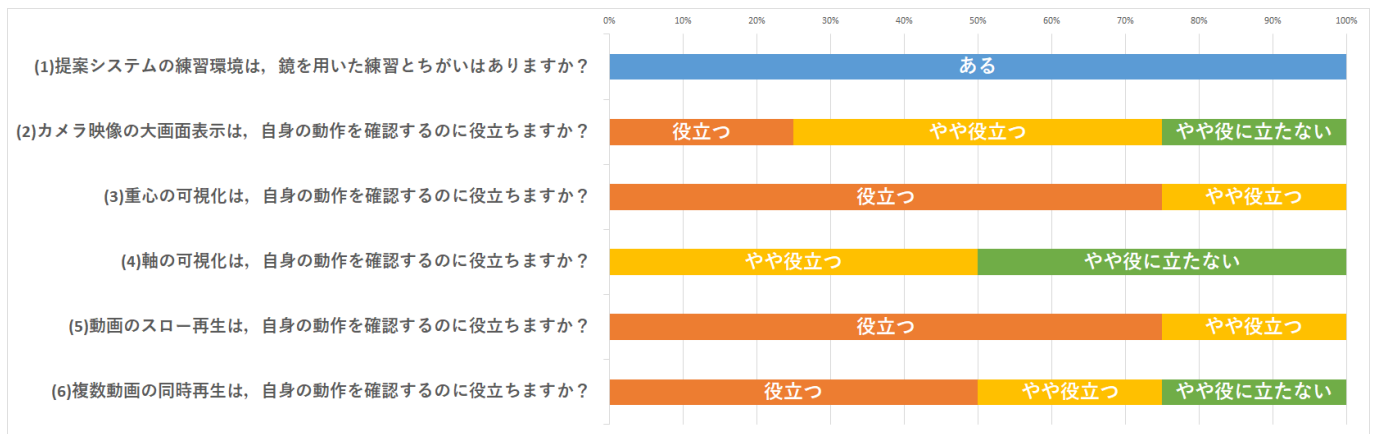


図 6 アンケート結果. 実験協力者には、システムに関する上記 6 つの項目について 4 段階のリッカート尺度で回答してもらった。

てもらった。撮影ミスや対象シーン以外の撮影はカウントせず、素振り動作を 30 本撮影できるまで行ってもらった。このとき、素振り動作は、スクリーンから 4m 程度の距離をとり、壁に対して体が正面を向くような姿勢で行うこととした。また、撮影の途中でフォームを大きく変更すると、撮影開始姿勢検出が正常に動作しないことがある。そのため、本実験では、実験協力者が必要と感じた場合、自由にキーポーズの再設定をしてもらうこととした。30 本の素振り動作の撮影が終わると、実験協力者には提案システムを用いて撮影された素振り動作を自由に観察してもらった。その後、提案システムに関するアンケートへ回答してもらい、各項目に関してフリーディスカッション形式で意見をもらった。

5.2 提案システムの有用性に関する考察

提案システムの有用性に関する考察を行なうため、システムに関する以下の 6 つの項目について 4 段階のリッカート尺度で回答してもらい、その後、各項目についてフリーディスカッション形式で意見を聞いた。

- (1) 提案システムの練習環境は、鏡を用いた練習とちがいはありますか？
- (2) カメラ映像の大画面表示は、自身の動作を観察するのに役立ちますか？
- (3) 重心の可視化は、自身の動作を観察するのに役立ちますか？
- (4) 軸の可視化は、自身の動作を観察するのに役立ちますか？
- (5) 動画のスロー再生は、自身の動作を観察するのに役立ちますか？
- (6) 複数動画の同時再生は、自身の動作を観察するのに役立ちますか？

各項目への回答結果を図 6 に示す。また、フリーディスカッションにおけるコメントについて以下にまとめる。

鏡を用いた練習環境と提案システムの練習環境の違いについて。この項目については、4 名全員が「ある」と回答した。提案システムでは、カメラのレンズやスクリーンの映像を意識してしまうため、通常の練習より視線がブレてしまうとの意見が得られた。実験時、プロジェクタ映像を鮮明にするため、室内の明るさを抑えていた。この点について、特に野球などの屋外スポーツの練習効果に影響を及ぼす可能性があるのではないかと意見が得られた。

提案システムはカメラプロジェクタシステムによるスマートミラーシステムであるため、実物の鏡と異なり、映像提示に多少の遅延が生じる。この遅延が気になったかと質問をしたところ、すべての協力者が気にならなかったと回答した。

提案システムの大画面表示について。大画面表示は自身の姿勢を確認しやすく、特に動作を行いながら姿勢を確認するのに役立つとの意見が得られた。一方、素振り練習では視線も重要であるため、素振りを行いながら画面を見るのは困難であるという意見も得られた。

提案システムの重心可視化について。提案システムによる重心可視化は、新しい練習の指標になるという意見が得られた。特に撮影された高速度動画における重心位置の連続表示からは、自身の素振り動作にはためがあることや、重心が前にかかっていることが確認でき、自身の動作を確認するのに役立つという意見が得られた。

提案システムの軸可視化について。提案システムの軸可視化について、そもそも理想の軸が定まっていないため、自身の軸の状態を知ってもどのように活かして良いかわからないという意見が得られた。また、提案システムによって可視化される軸は小刻みに振動しているため、可視化された軸が本当に正確であるのか疑問だとの意見も得られた。

提案システムのスロー再生について。撮影された高速度動画をスロー再生することで、スイング時のバットの高さ・視線・動作の癖を確認できたという意見が得られた。一方、

表 1 撮影開始姿勢の検出精度評価結果.

	実際の素振り回数	正常検出数	対象シーン以外の誤検出数
実験協力者 A	37 回	30 回	4 回
実験協力者 B	31 回	30 回	13 回
実験協力者 C	32 回	30 回	6 回
実験協力者 D	31 回	30 回	1 回

見たいタイミングまで早送りするのが手間である、もう少しフレームレートが低くても良いのではないかと、という意見が得られた。

提案システムの複数動画同時再生について、複数の動画を同時に再生することで、フォーム変更前後の様子を詳細に確認することができたという意見が得られた。一方、各動画の動作開始のタイミングが揃っていないため比較するのが困難である、動画を見ながらフォームを確認するために今の自身の姿も横に表示してほしい、という意見が得られた。

5.3 撮影開始姿勢の検出精度評価

前述の方法で撮影を行った際の撮影開始姿勢の検出精度を評価した。結果を表 1 に示す。提案システムは、実験協力者の素振り動作全 131 回のうち 91.6 % を正しく検出・撮影することができた。主な撮影ミスは、キーポーズ登録の際に上手く開始姿勢を登録できなかったときや、ユーザが大きくフォームを変更したときに発生していた。キーポーズ登録ユーザインタフェースや姿勢間距離の計算方法などを改善し、より使いやすく高精度に開始姿勢検出を行えるシステムの実現が今後の課題である。一方で、30 本の素振り動作を撮影する間に、対象シーン以外（素振りでない動作）を平均 6 回撮影してしまうことも確認された。特に実験協力者 B は、素振り動作を行わない際にもキーポーズに近い姿勢を取ってしまう癖があり、対象シーン以外を 13 回も撮影してしまった。また、実験協力者の一部は、記録待ち状態にフォームの確認を行っており、高速度撮影の待機状態に切り替わったことに気づかずにこれを続けていた場合にも、対象シーン以外の撮影が発生した。今後、“開始姿勢”ではなく、一連の“動作”を検出して撮影を行うことで、対象シーン以外の撮影を減らすことを検討する必要がある。

6. まとめ

本研究では、スポーツの反復練習の様子を可視化することを目的としたスマートミラーシステムを提案した。反復動作の開始姿勢を検出し、自動で高速度撮影を行なう手法を提案した。提案システムの撮影開始姿勢の検出精度評価を行い、練習支援目的としては十分な精度が得られていることを確認した。また、提案システムの有用性を確認するためにユーザスタディを行い、提案システムはカメラ・プ

ロジェクタシステムではあるものの、実際の鏡と同じような感覚で練習でき、かつ、スロー再生や姿勢情報表示を用いることで、自身の動作の特徴をある程度確認できる可能性が示唆された。このため、提案システムは、反復練習の効率的な練習に寄与することが期待できる。

提案システムを用いた高速度動画撮影では、対象シーン以外を撮影してしまうことがあることが分かった。これは、ユーザがフォーム確認やユーザ自身の動きの癖などで、反復動作を行わない時にキーポーズに近い姿勢を取った時に発生している。今後、“開始姿勢”ではなく、一連の“動作”を検出して撮影を行うことで、対象シーン以外の誤検出を減らしたいと考えている。また、ユーザの対象動作に対する知識や熟練度が低い場合、理想のフォームが明確に定まっていないことが多く、提案システムによる重心や軸などの情報を確認しても具体的にどのように改善してよいか分からないことが多いことが確認された。今後、手本となる動作を予め登録しておき、手本となる動作との差の情報などから、ユーザに対し具体的に何をどのように改善したら良いのかを提示する機能を実装し、対象動作の初心者に対しても有用性の高いシステムを実現したいと考えている。

謝辞 本研究のユーザスタディに参加していただいた実験協力者の皆様に感謝の意を表す。本研究は、日本学術振興会科学研究費助成金基盤 C(18K11606) の支援を受けて行われたものである。

参考文献

- [1] Hämmäläinen, P.: Interactive Video Mirrors for Sports Training, *Proceedings of the Third Nordic Conference on Human-computer Interaction*, NordiCHI '04, New York, NY, USA, ACM, pp. 199–202 (online), DOI: 10.1145/1028014.1028044 (2004).
- [2] Anderson, F., Grossman, T., Matejka, J. and Fitzmaurice, G.: YouMove: Enhancing Movement Training with an Augmented Reality Mirror, *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, New York, NY, USA, ACM, pp. 311–320 (online), DOI: 10.1145/2501988.2502045 (2013).
- [3] Kyan, M. J., Sun, G., Li, H., Zhong, L., Muneesawang, P., Dong, N., Elder, B. and Guan, L.: An Approach to Ballet Dance Training through MS Kinect and Visualization in a CAVE Virtual Reality Environment., *ACM TIST*, Vol. 6, No. 2, pp. 23:1–23:37 (online), available from <http://dblp.uni-trier.de/db/journals/tist/tist6.htmlKyanSLZMDEG15> (2015).
- [4] Kosmalla, F., Murlowski, C., Daiber, F. and Krüger, A.: Slackliner - An Interactive Slackline Training Assistant, *Proceedings of the 26th ACM International Conference on Multimedia*, MM '18, New York, NY, USA, ACM, pp. 154–162 (online), DOI: 10.1145/3240508.3240537 (2018).
- [5] Chan, J., Leung, H., Tang, J. and Komura, T.: A virtual reality dance training system using motion cap-

- ture technology, *IEEE Transactions on Learning Technologies*, Vol. 4, No. 2, pp. 187–195 (online), DOI: 10.1109/TLT.2010.27 (2011).
- [6] Oshita, M., Inao, T., Mukai, T. and Kuriyama, S.: Self-training system for tennis shots with motion feature assessment and visualization, *2018 International Conference on Cyberworlds (CW)*, IEEE, pp. 82–89 (2018).
- [7] Dan, O. and Irene, A.: Real-time Human Pose Estimation in the Browser with TensorFlow.js, Google Creative Lab (online), available from <https://medium.com/tensorflow/real-time-human-pose-estimation-in-the-browser-with-tensorflow-js-7dd0bc881cd5> (accessed 2019-07-22).
- [8] Shum, H. and Komura, T.: Tracking the translational and rotational movement of the ball using high-speed camera movies, Vol. 3, pp. III – 1084 (online), DOI: 10.1109/ICIP.2005.1530584 (2005).
- [9] Ijiri, T., Nakamura, A., Hirabayashi, A., Sakai, W., Miyazaki, T. and Himeno, R.: Automatic spin measurements for pitched Baseballs via consumer-grade high-speed cameras, *Signal, Image and Video Processing*, pp. 1–8 (online), DOI: 10.1007/s11760-017-1075-x (2017).
- [10] 菊池諒, 金城岳野, 西純平 and 岡本直輝: 野球選手における守備の能力評価の検討, *日本体育学会大会予稿集 第 67 回 (2016)*, 一般社団法人日本体育学会, pp. 257.2–257.2 (2016).
- [11] 酒井美喜雄, 新野大輔 and 井尻敬: 高速度カメラを用いた内野手の守備動作解析, *映情学技報*, Vol. 43, No. 9, pp. 295–298 (2019).
- [12] 新野大輔, 木坂綺花, 平林晃 and 井尻敬: 民生用高速度カメラを用いた素振り練習の精度可視化, *エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2017 論文集*, Vol. 2017, pp. 38–45 (2017).
- [13] Cao, Z., Simon, T., Wei, S.-E. and Sheikh, Y.: Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation using Part Affinity Fields, *CVPR* (2017).
- [14] Papandreou, G., Zhu, T., Chen, L.-C., Gidaris, S., Tompson, J. and Murphy, K.: PersonLab: Person Pose Estimation and Instance Segmentation with a Bottom-Up, Part-Based, Geometric Embedding Model, *The European Conference on Computer Vision (ECCV)* (2018).