

# 単眼カメラを用いたボルダリング完登判定システムの提案

桂大地<sup>†1</sup> 坂本大介<sup>†1</sup> 小野哲雄<sup>†1</sup>

競技人口が増加しているボルダリングは競技の規則や判定が初心者にとって理解が難しく、完登することができたかどうかの判断を初心者が自力で行うことは困難であった。そこで、本研究では手足の静止を条件に用いた完登判定システムを実装した。また、参加者実験により精度とユーザビリティを調査した結果、熟練の経験者による判定と遜色がないことが示され、ユーザビリティも十分に高いことが示された。

## 1. はじめに

情報技術の発展により様々な競技においてコンピュータビジョン技術を利用したビデオ判定や競技記録の自動化といったシステムが導入されてきている。例えば、2018 FIFA (Fédération Internationale de Football Association) ワールドカップ ロシア大会では初めて VAR (Video Assistant Referee) システムが導入された。マラソンや自転車のレースでは選手の識別やタイム計測のために RFID (Radio Frequency Identifier) が一般的に利用されている。これらは主に競技の公平性を高める目的で用いられているが、これは競技のルールが明確であり、十分な競技人口と観客、さらには収益があるためシステム化が可能となっている。一方で、ボルダリングはまだ十分な競技人口がいるとは言えず、また完登の判定基準が明確ではなくレフェリーに委ねられており、言い換えれば人による主観的な判定に頼っている。ボルダリングはロープを使用したクライミング (以下、ロープクライミング) のトレーニングという位置付けから始まった競技であり、比較的歴史は浅いこともその要因の1つである。しかし、日本国内におけるボルダリングジム (ボルダリングを行うための施設) の数は過去10年間でおよそ5倍に増加[1]<sup>1</sup> し、ボルダリングを含むスポーツクライミングが2020年の東京オリンピックに追加種目として採用されることが決定している。このように競技としての注目度が高まっている一方で、競技のルールや判定が初心者にとって単純明快なものであるとは言えない。

室内で行うボルダリングは、クライミングウォールに設置されたホールド (登るための突起物) を掴んで登ることが基本である。どのホールドを掴むのかはコースとして決まっている。さらに日本においてはコースの難易度毎に段級が設定されていることが多い。競技者はコースごとに指定されているホールドを、スタートからゴールまで指定されたもののみを使って登る必要がある。ゴールのホールドを掴むことで完登 (コースを登り切ったこと) を判定するが、この判定の詳細な規定について、IFSC (International

Federation of Sport Climbing) や日本フリークライミング協会が発表している2018年のレギュレーション<sup>2</sup> では、“マールキングされた終了ホールドを両手で保持 (control) する”とされている。これは終了ホールドを触るだけではなく、しっかりと両手で掴み、安定した姿勢を取ることを示しているが、経験が浅い競技者は理解が困難である。スタートの体勢や登っている最中についての規定も存在するが、完登判定と同様に理解が難しく、個人の主観に依存しない定量的な判定手法が望まれる。

そこで、本研究では完登状態を判定するシステムの提案を行う。具体的には単眼カメラから取得した動画を入力とし、深層学習を使った骨格検出アルゴリズムのライブラリである OpenPose[2] を用いて手足の座標とホールドの重なりから登っている体勢を推定するシステムの実装を行う。また、システムについてユーザ実験で評価を行い、提示方法やインタフェースについて議論する。

## 2. 関連研究

### 2.1 スポーツにおける競技の自動判定システム

スポーツにおける判定システムの開発は盛んに行われている。特にカメラを用いてコンピュータビジョン技術を活用した自動判定システムや、判定の補助システムの開発が行われてきている。カメラ判定が初めてオリンピックで用いられたのは1948年ロンドンオリンピックであり、それ以来、機械的な判定システムは様々な競技に用いられるようになった[3]。HAWK-EYE<sup>3</sup> が2006年にはテニスの全米オープンでコート上に1ボールが接地した位置とラインの関係を判定するシステムとして導入され、2012年にはFIFAが高度なゴール判定補助システムを導入した[4]。実際の競技の判定システムの導入と同様に学術的な研究も積極的に行われている。サッカーにおいては Hashimoto らのオフサイドを判定する研究[5]が存在する。これは固定された複数台のカメラを用いてプレイヤーを識別し、ユニフォームの分類とボールの軌道の計算によってオフサイドの

<sup>†1</sup> 北海道大学  
Hokkaido University

<sup>1</sup> <http://bouldering-log.com>

<sup>2</sup> [https://freeclimb.jp/compe/comp\\_dl.htm](https://freeclimb.jp/compe/comp_dl.htm)

<sup>3</sup> <https://www.hawkeyeinnovations.com/>

判定が行われる。また、体操競技の採点を自動化する辛らの研究[6]も存在する。これは体操の鉄棒競技における動画を解析することで、ポーズのデータベースを作成しマッチングを行うことで実現している。渡辺の解説[7]によると OpenPose の出現により、今後は映像のみから動作検出を行うさまざまなアプリケーションの出現が想定されると述べられている。これは OpenPose で深度情報やマーカーを用いずに骨格推定が可能なためである。また、同様に姿勢の推定を行うことが可能な DensePose[8]や Web ブラウザでリアルタイムに人間の姿勢推定を可能にする TensorFlow.js<sup>4</sup> のような運動解析が無償で公開されており、スポーツにおける機械判定はより一般的に行われるようになってきている。

## 2.2 ボルダリング中の姿勢の推定

ボルダリングは壁に取り付けられたホールドのうち、指定されたホールドのみからなるコースを登る競技である。具体的なルールは主に以下の4つである<sup>2</sup>。

- 1) 指定されたスタートホールドを掴み、身体のだの部分も指定外のホールドや床面から離れている状態を取ること
- 2) 指定されたゴールホールドを両手で保持すること
- 3) 1)から2)までの間、指定外のホールドに触れないこと
- 4) 1)から2)までの間、身体のだの部分も床面に触れないこと

これらの条件の判定をするために、遷移していくボルダリング中の姿勢の推定を行う必要がある。

完登判定を目的としていないが、ボルダリングをしている際の姿勢に注目した研究についてはいくつか行われてきており、Aladdin らは圧力センサをホールドに取り付け、センサからの情報とモーションキャプチャにより高い精度での姿勢を推定する研究[9]を行った。Kalyanaraman らは腕に取り付けた筋電位センサ (Myo<sup>5</sup>) を含む複数のセンサと GPS の信号を用いることで、ロッククライミング中の動きを追跡し、壁のどの位置を掴み、どの位置で落ちたかを推定する研究[10]を行った。また、Naderi らのホールドの位置座標が与えられた際に最適な登り方のアニメーションを示す研究[11]では、アルゴリズムによるボルダリング中の姿勢の推定から最適な登り方の提案が行われた。このシステムを利用したスポーツ分野への Computer-Aided Imagery の応用として、登る前に電子端末上で登り方を組み立てる研究[12]も行われた。この研究では、競技者がボルダリング中の自分が取る姿勢をあらかじめ確認することにより、技術の向上が確認できた。以上のように、ボルダリング中の姿勢の推定は多く研究されており、多くの場合、クライミングウォールやボルダリングジムに大掛かりな装置を設置して行われている。

## 2.3 本研究の立ち位置

従来研究ではボルダリングのホールドの認識や競技中の姿勢の推定に関する研究が行われてきている。上記のように、ボルダリングに関する研究は盛んにされており、運動技術の向上[12]やより分かりやすく楽しい体験[13]に高めようという試みも多い。しかし、前節で述べたように、ボルダリングジムやクライミングウォールの改築が必要であったり、実際のボルダリングのルールに則ったシステムではないため、完登の判定については触れられてきていない。Kajastila らの The Augmented Climbing Wall[13]では、利用者が登っている様子を撮影し、クライミングウォールにプロジェクターによって映像を照射するシステムで、利用者が登ったかどうかを示しているが、その判断は登った人間の自己申告になっており、ボルダリングの完登の判定に用いられる地面との接触や指定されていないホールドの使用については考慮されていない。

近年は深層学習の発展により、単眼のカメラで人間の骨格の推定を行うことが可能になったため、より実現性の高い、小規模な判定システムの実現が可能となってきた。本研究ではボルダリングにおける完登判定システムを提案する。単眼カメラで取得した動画を入力として OpenPose から手足の座標を出力し、ホールドの座標との一致しているフレーム数から姿勢や状態の判定を行うことで上記の問題を解決する。さらに完登を判定するシステムを開発し、システムの有用性をユーザ評価により検証する。

## 3. 提案手法

本システムでは、ユーザがボルダリングをしている様子を単眼カメラで撮影し、その動画を入力として完登の判定を行う。従来の姿勢の推定を行うシステムでは Kinect<sup>6</sup> のような深度センサが内蔵されたカメラを複数台用いたり[12][13]、圧力センサを壁に取り付けたり[9]、ボルダリング施設の大きな改修が必要であった。本システムでは、単眼カメラ一台を固定された位置に設置しノート PC に接続するだけで姿勢の推定や遷移を認識し、完登の判定を行うことを目標とする。

本システムは従来のボルダリングジムに設置し、競技者が簡単に使用できるよう、タブレット端末上で動作するアプリケーションとして実現する。具体的にはユーザがタブレット端末上で録画の操作をした後にボルダリングを行う。その後、アプリケーション上で録画停止の操作を行い、ほどなく判定結果がタブレット端末上に表示される。また、完登の判定で必要となるホールドの認識についてはネットワークを経由してクラウド上に物体認識を行うシステムやホールドのデータベースを用意しておくことでそれぞれ解

4 <https://medium.com/tensorflow/real-time-human-pose-estimation-in-the-browser-with-tensorflow-js-7dd0bc881cd5>

5 <https://support.getmyo.com/hc/en-us>

6 <https://developer.microsoft.com/ja-jp/windows/kinect>

析を行い、この結果をタブレット端末上に表示することが可能である[14]. しかし、本システムでは完登判定に重点を置くため、簡単な実装として予めクライミングウォール上のホルドの大きさや位置を保持しているものとした。

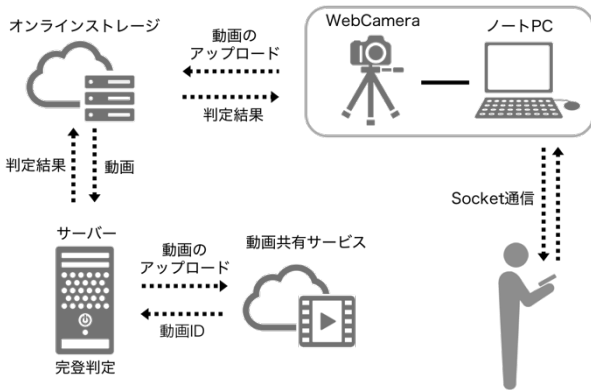


図1 システム構成

### 3.1 クライミングウォールの設置

本研究では、参加者実験のためにクライミングウォールを設置した。クライミングウォールは横幅 360 cm、高さ 240 cm で、角度を 45° から 75° まで変更可能である (90° で床面に対して垂直となる)。ボルダリングでは同じホルドを用いる限り、傾斜が緩い方がコースの難易度が易くなるため、初心者を対象とするユーザ観察と参加者実験では 75° の傾斜に設定した。また、クライミングウォールにボルトを用いて取り付けることのできるホルドの最大数は 333 であり、材質が木であるため、ネジで取り付けることのできる小さなサイズのホルドであれば任意の位置に取り付けが可能である。参加者実験では、設定するコース難易度にあわせて 37 個のホルドを取り付けた。実験環境を図 2 に示す。

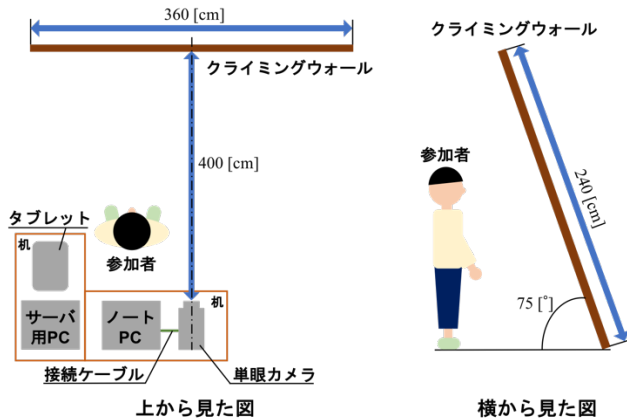


図2 実験環境

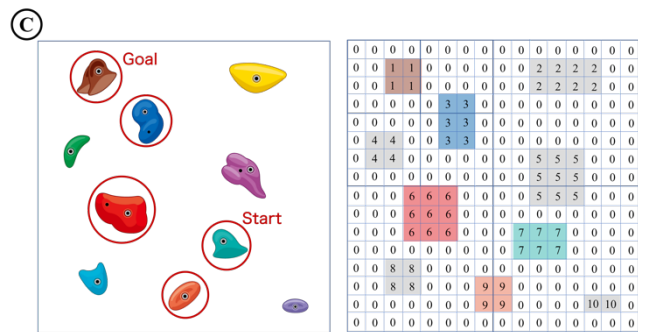
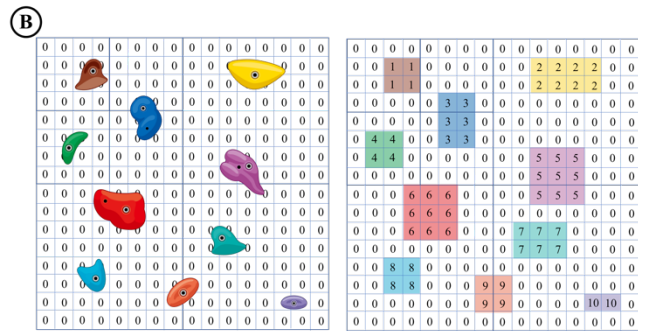
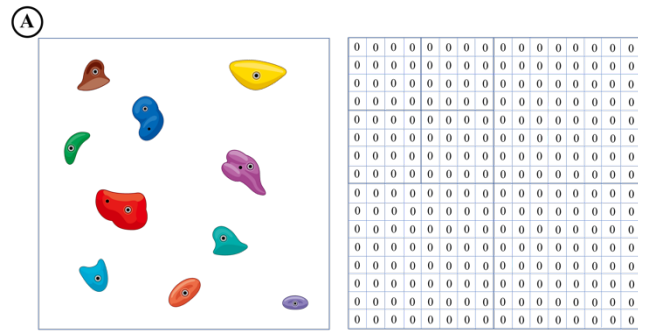


図3 完登判定の手法：(A) 動画サイズと同じサイズの配列の用意，(B) ホールドの登録，(C) コースが与えられた状態

### 3.2 完登の判定システム

完登を自動的に識別するためのシステムの開発を行う。本研究では単眼カメラ (型番:logicool - C922 PRO STREAMING WEBCAM<sup>7</sup>, 取得動画サイズ:1920×1440 pixel, フレームレート:30 fps) を用いて完登の判定を行う。その単眼カメラで撮影したボルダリングをしている様子の動画を OpenPose で解析し、各フレームにおける手と足の位置を取得する。なお、ボルダリングにおける有用性や使用頻度を考え、手の座標位置には手首を用い、足の座標位置には親指の付け根を用いた。クライミングウォール上のいずれかのホルドと OpenPose により出力された手足の座標が 50pixel 以内であれば、ユーザは一致した座標位置に存在するホルドを持っていると判断した。この時、ホルドを持った際の静止や OpenPose の認識誤差、ホルドを通過している瞬間を考慮して、連続したフレームでそれぞれの座標が 50pixel 以上離れている場合は、ホルドを持

<sup>7</sup> <https://www.logicool.co.jp/ja-jp/product/c922-pro-stream-webcam>

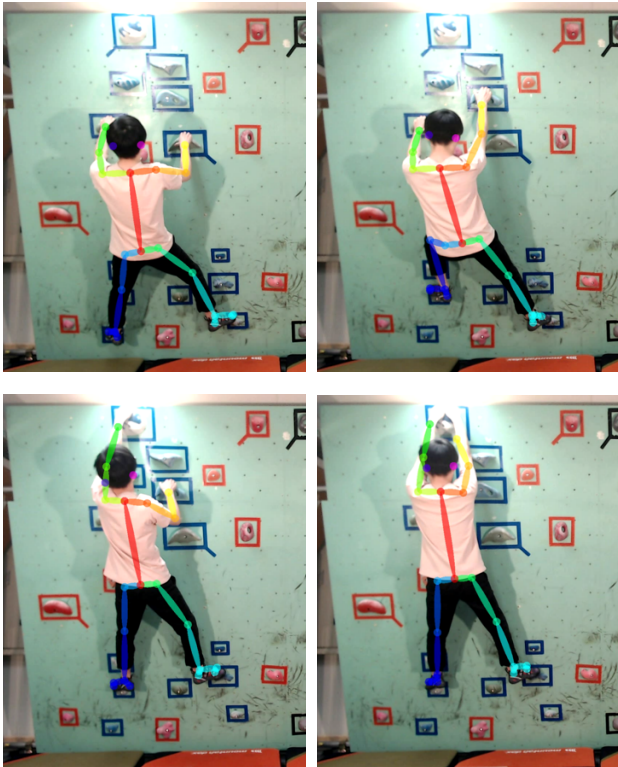


図4 青コースを登る実験参加者（参加者 ID:4）：(左上) スタートの姿勢，(右上)(左下) 中間の姿勢，(右下) ゴールの姿勢



図5 黄コースを登る実験参加者（参加者 ID:2）：(左上) スタートの姿勢，(右上)(左下) 中間の姿勢，(右下) ゴールの姿勢

っていない状態だと判断されるようにした。毎フレームごとに使用ホールドの判定を行い、開始ホールドから、終了ホールドを掴むまでの間、ユーザがコースで指定されていないホールドや、床として設定された領域に手と足が触れなければ、システムで登れたと判定が下されるように設定した。具体的には単眼カメラで取得する動画サイズと同じサイズ（1920×1440）の Integer 型の配列を用意（図 3-A）し、画像の左上のホールドから順にホールドの座標位置と同じ配列の index にホールドの番号の登録を行う（図 3-B）。例えば、図 3-C の左側の赤丸で囲まれたコースが与えられた際は指定されていないホールドは使用してはいけないホールドとなり、システムにより掴んだと判断された場合は登れなかったと判定される。

参加者実験のために設置したクライミングウォールで競技者が登っている様子を撮影し、OpenPose による骨格推定を行なった状態を図 4 と 5 に示す。それぞれの左上がスタートの姿勢，右上および左下がゴールへと移動している中間の状態，右下がゴールの姿勢を示す。図 5 左上および図 5 右下では片足がホールドに乗っていないが、ボルダリング競技中は指定されているホールド以外を使わなければ許容される規則<sup>2</sup>であるため、完登失敗の判定の対象ではない。完登失敗の判定には規則通り他のホールドや地面に触れたことを条件とした。

### 3.3 実装するシステムとアプリケーション

本システムは従来のボルダリングジムに設置し、競技者が簡単に使用できるようタブレット端末上で動作するアプリケーションとして開発する。ユーザはまずタブレット端末上のアプリケーションで環境内に設置された PC と接続する。次に、ユーザは競技開始前にアプリケーション上で録画を開始し、環境内に設置された PC に接続された単眼カメラからの映像を取得する。ユーザはその後、与えられたコースにトライし、完登できたかどうかにかかわらずトライ後に録画を停止する。画像処理が終了するのを待ってアプリケーション上に撮影された映像が表示される。その後、完登判定処理が終了した段階で完登判定結果がアプリケーション上に表示される。

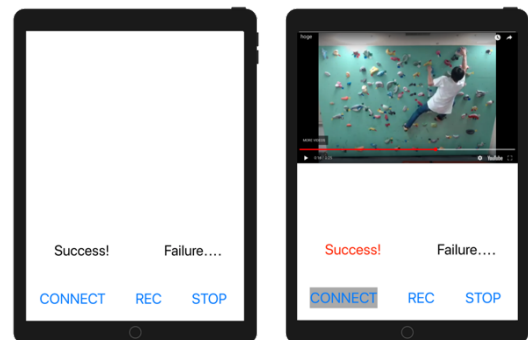


図6 実験で用いたアプリケーション（左：PC に接続する前の画面、右：トライ後、完登と判定された画面）

## 4. 評価実験

システムの妥当性と有用性を調査するための実験を行い、熟達者による完登判定との比較を行う。またアプリケーションの可用性を確認するためにアンケートによるユーザビリティ調査を行う。さらに参加者に対してインタビューを実施し、提案手法全般に関するフィードバック収集を行う。なお、ボルダリングをしている様子は単眼カメラにより撮影されているが、実験の様子は実験参加者の承諾が得られた場合にのみ、撮影し記録した。

### 4.1 実験参加者

本実験には過去にボルダリングを1回以上行ったことがある23歳から28歳（平均年齢24.25、標準偏差2.22）の計8名（男性6人、女性2人）が参加した。参加者のうち5名がボルダリングの経験の指標[20]であるオンサイトグレード（初見で完登できたコースの最高難易度）が7級から5級（平均6、標準偏差0.63）、レッドポイントグレード（過去に完登できたコースの最高難易度）が6級から4級（平均5.2、標準偏差0.75）であり、2名はオンサイトグレード、レッドポイントグレードともに「分からない」と回答し、1名はオンサイトグレード、レッドポイントグレードともに「覚えていない」と回答した。実験参加者8名のうち7名がボルダリングシューズを着用して実験に参加した。残りの1名は裸足で参加した。なお、レッドポイントグレードは数が多いほど下の級となっており、一般的にレッドポイントグレード4級までのコースを完登できる競技者が初級とされている[16]。さらに1級を完登した後は1段、2段と段が上がっていくシステムになっている。

### 4.2 実験手順

最初に実験の目的について説明を行い、その後参加者に事前アンケートへの回答を求めた。事前アンケート終了後、システムとその操作方法についての説明を行った。参加者には準備運動を行った後にタスクに取り組みさせた。

タスクでは4つのコースを用意し、実験参加者にシステムを使用させながら、それぞれのコースを登らせた。実験で使用した4つのコースを設定したクライミングウォールを図7に示す。コースは青・赤・黄・黒の四角の枠で囲まれたホールドから構成され、各コースを登る際に用いることが可能であるのは同色の四角の枠で囲まれたホールドのみである。枠の右下に斜めのテープが貼ってあるホールドが開始ホールドであり、枠の左下に斜めのテープが貼ってあるホールドが終了ホールドである。

実験参加者がコースを登る順番は、怪我の危険性を考慮し、実際のボルダリング競技の実施順序にならない、難易度が簡単なコースから難しいコースの順番になるように提示した。具体的には、青枠で囲まれた7級程度のコース（以下、青

コース）、赤枠で囲まれた6級程度のコース（以下、赤コース）、黄枠で囲まれた5級程度のコース（以下、黄コース）、黒枠で囲まれた4級程度のコース（以下、黒コース）の順番で登るように指示した。各コースを登る回数（以下、トライ数）は最大で3回とし、本人が完登できたと判断した場合はトライ数が3回未満でも次のコースを登るように指示した。なお、怪我の危険性を考慮し、トライ数が1回以上で完登が不可能だと参加者が自分で判断した場合も、同様にトライ数が3回未満でも次のコースを登るように指示した。また、参加者のボルダリングのパフォーマンスの低下の影響を軽減するためにコースを登る間には休憩時間を設け、登るコースが変更になった場合は3分以上、同じコースにもう一度登る場合には1分以上休憩するように指示を行った。

実験参加者には、この休憩時間の間と準備運動後に次のタスクで登るコースを提示し、そのコースのオブザベーション（コースの下見）を行うことを推奨した。IFSC競技クライミングルールに則り、オブザベーションの間、参加者は両足が地面から離れていない状態で開始ホールドにのみ触ることを許可した。

タスクの終了後、事後アンケートとして System Usability Scale（以下、SUS とする）[17]に基づくアンケートと、実装システムに関するインタビューへの回答を求めた。



図7 実験で用いたクライミングウォール

### 4.3 実験タスク

本実験では参加者はアプリケーションの操作をすべて参加者自身で行った。具体的には、トライ開始前にアプリケーション上で「REC」ボタンを押し、その後実際に壁を登る。完登したかどうかに関わらず、トライ終了後には「STOP」ボタンを押し、一つのトライを終了する。動画がクラウド上にアップロードされるまでに時間があるが、ほどなくして動画が表示される。参加者はこの動画を見て直前のトライの確認を行うことができる。その後、システムによる完登の判定結果がアプリケーション上に表示され、参加者は



図8 タブレット端末を操作し、単眼カメラを起動する実験参加者



図9 実験タスクの青コースを登る実験参加者

完登できたのかどうかを知ることができる。この「STOP」ボタンを押したあと、判定結果が返ってくるまでの時間は概ね1分から1分半程度であった。以上が一つのタスクの流れであり、参加者はこれを繰り返す。

実験参加者がシステムを使用している様子とクライミングウォールを登っている様子をそれぞれ図8、図9に示す。

#### 4.4 システムによる判定とライセンス所有審判員による判定の比較

本研究でのシステムが「国際ルールである IFSC 競技クライミングルールに従った完登結果であるかどうか」および「初心者が理解している完登とどの程度異なっているのかどうか」の2点を調べるための比較を行う。本実験では参加者がタスク実施中に終了ホールドを両手で掴んだ後、自分で登れたと判断した場合はトライが終了する。しかし、実験参加者による判断と IFSC 競技クライミングルールに従った完登結果、およびシステムによる完登判定が全てのタスクにおいて一致するとは限らないため、参加者が完登していたかどうかの判定を単眼カメラで取得した動画を用いて熟練のボルダリング経験者（スポーツクライミング競技 C 級審判員資格保有者<sup>8)</sup> 1名が行った（以下、規定に従った判定とする）。この結果を IFSC 競技クライミングルールに従った完登結果として用いる。

<sup>8)</sup> <https://www.jma-sangaku.or.jp>

## 5. 実験結果

### 5.1 完登の判定精度

各タスクにおいて青コース（7 級程度のコース難易度）は参加者 8 人中 8 人、赤コース（6 級程度のコース難易度）は 8 人中 7 人、黄コース（5 級程度のコース難易度）は 8 人中 3 人、黒コース（4 級程度のコース難易度）は 8 人中 1 人が規定に従った判定（熟練したボルダリング経験者による判定）において完登と判定された。このとき、全てのコースにおいて参加者自身による完登の判定（全トライ数 42）と、規定に従った判定が一致した。すなわち、初心者による完登の判定と熟練者による完登の判定は初心者向けのコースにおいては完全に一致した。図 10 に判定の成功割合の結果を示す。また、全コースでの判定結果を、表 1 に示す。ここでの判定成功とは以下の 2 つの場合である。

- 1) 規定に従った判定で完登と判断され、システムも完登と判断した場合
- 2) 規定に従った判定で完登できなかったと判断され、システムも完登できなかったと判断した場合

1)の場合における各コースの判定成功は青コース 8 回中 7 回、赤コース 7 回中 6 回、黄コース 3 回中 2 回、黒コース 1 回中 1 回という結果（すなわち一致率が 84.2%）になった。また、2)の場合における各コースの判定成功は赤コース 1 回中 1 回、黄コース 11 回中 11 回、黒コース 10 回中 10 回（すなわち一致率は 100%）となった。青コースはタスクにおいて全ての参加者が 1 回目で登れたため 2)における判定は行われていない。

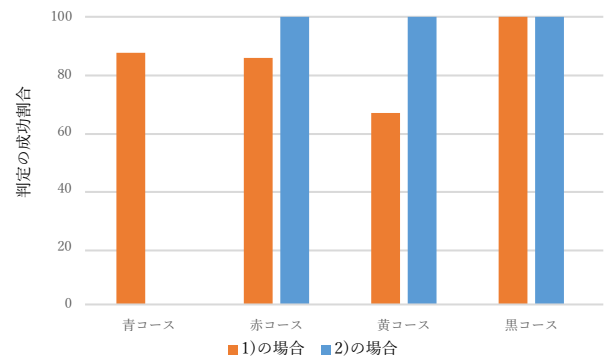


図 10 各コースにおけるシステムの成功判定率

表 1 全コースでの判定結果

		システムの判定	
		成功	失敗
規定に従った判定	成功	16/19 (84.2%)	3/19 (15.8%)
	失敗	0/23 (0%)	23/23 (100%)

## 5.2 ユーザビリティに関する評価

提案システムとアプリケーションは実際のボルダリングジムでの使用を想定しており、このためアプリケーションはユーザ自身のみで使うことができることが期待される。これを確認するために、実験後に SUS によるアンケートを行い、ユーザビリティの評価を行った。本実験で用いた SUS アンケートは 5 段階のリッカート尺度の質問 10 項目で構成されており、100 点満点のスコアを得ることが可能である。この結果、全参加者の SUS スコアの平均値と標準偏差は  $82.81 \pm 1.95$  点となった。このスコアは SUS スコアの解釈の研究[18]によれば Excellent に対応する。SUS の各質問項目とそれぞれの平均スコアは表 2 のとおりである。

表 2 SUS の質問項目と結果

番号	質問	平均	標準偏差
1	このシステムをしばしば利用したいと思う	4.00	0.35
2	このシステムを利用するには説明が必要となるほど複雑であると感じた	2.13	0.33
3	このシステムは容易に使いこなすことができると思った	4.63	0.17
4	このシステムを利用するのに専門家のサポートが必要だと感じる	1.75	0.23
5	このシステムでは様々な機能がよくまとまっていると感じた	4.25	0.23
6	このシステムの手順には一貫性のないところが多々あったと感じた	1.00	0.00
7	たいいてい人は、このシステムの利用方法をすぐに理解すると思う	4.75	0.15
8	このシステムはとても操作しづらいと感じた	1.63	0.25
9	このシステムを利用できる自信がある	4.88	0.12
10	このシステムを利用し始める前に知っておくべきことが多くあると感じた	2.88	0.12

## 6. 考察

### 6.1 完登判定に関する考察

実験で得られた結果について、まず完登判定のエラーについて考察する。実験では青コース・赤コース・黄コースで規定に従った判定で完登できたと判定されたにも関わらずシステムが失敗と判定した状況(以下、判定エラーとする)がそれぞれ一度ずつ生じた。実験後の動画の観察からは青コースで生じた判定エラーについては参加者のホールドの握り方と手の大きさが影響していると考えられる。本システムでは OpenPose によって算出された手首の座標位置を

手の座標位置として扱っている。青コースは全ての実験参加者が完登できることを想定して設定したため、持つことが容易な初心者向けのホールドを用いた。ボルダリングでは、一般的に持ちやすいホールドは指を引っ掛けるようにして持つことが推奨されている。そのため、指が伸びて手首の位置が下がったことで判定エラーが生じたと予想できる(図 11)。また、青コースは真っ直ぐ上に登るコースを設計した。そのため、手首の位置が手の真下にきて、座標位置として低かったことも原因として挙げられる。赤コース、青コースの判定エラーについてはスタートホールドを保持した際の体勢、すなわちスタート体勢における片足の遮蔽が関係あると考えられる。赤コース、黄コース共にクライミングウォールの端の辺りからスタートを行うコースであり、腰や背中によって足が隠れていることが撮影した動画から確認された(図 12)。この 3 つの判定エラーから手の座標位置の取り方や遮蔽が生じた際の動画の扱いについて慎重に検討する必要があると考えられる。

次に規定に従った判定で完登できたと判断され、システムも成功であると判断した場合(以下、成功状況での判定成功とする)と規定に従った判定で完登できなかったと判断されシステムもできなかったと判断した場合(以下、失敗状況での判定成功とする)について述べる。成功状況での判定成功では上記の原因以外での判定エラーはなかった。また、インタビューでの成功判定が適切であったかという質問についても判定エラーが起こっていない参加者は全員(5人中5人)が適切であったと言及した。判定エラーが起きた参加者に関しても、判定エラーではない場合の判定について否定的な言及はなかった。同様に失敗状況での判定成功についても、全ての失敗状況に関して 100%の精度で判定が行えており、インタビューで全ての参加者から肯定的な回答を受けた。そのため、本実験における完登システムの設定は適切であったと考えられる。

### 6.2 ユーザビリティに関する考察

ユーザビリティの評価指標である SUS スコアに関して、全実験参加者の平均スコアは 82.81 点であり、SUS の平均的な値である 68 点[17]を超えていた。そのため、SUS による基準としては本システムのユーザビリティは優れていると考えられる。SUS の 10 項目の質問で全てが中間値よりもポジティブな値であったが、項目 1「このシステムをしばしば利用したいと思う」と項目 10「このシステムを利用し始める前に知っておくべきことが多くあると感じた」が比較的低いスコアであった理由について考察する。本システムではカメラで得られた動画を入力として判定結果を示している。そのため、動画のアップロードや OpenPose の実行処理に通信が必要になり、シンプルなカメラの起動と停止だけではないことが原因として考えられる。

また、インタビューでは「待ち時間が長かったので、できればリアルタイム判定をして欲しい」という意見が得られ

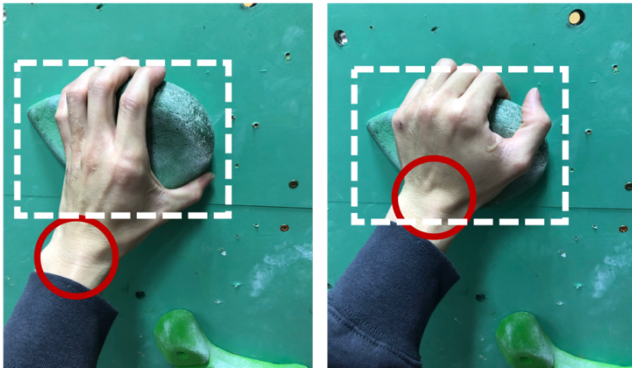


図 11 手首の位置による判定エラー



図 12 片足が遮蔽されることによる判定エラー

た。判定結果が表示されるまでユーザは待つ必要があり、その間タブレット端末に触れずに待機する分りにくさがあった。さらに、判定エラーによるシステムに対するユーザの不信感もインタビューでは確認された。「成功だと思ったにも関わらず、失敗していた際にシステムに不信感を感じた」や成功判定が適切であるかという質問に対して「自分では成功だと思ったにも関わらず、失敗だと判定されたため適切だとは思えない」といった意見があった。一度でも、判定エラーが生じた参加者はインタビューでシステムに対してネガティブな感情を持ったことについて言及している。

このように撮影された動画を入力として判定結果を示すことによる問題点は幾つか存在し、使用する状況がある程度限られていることも知見として得られた。一方でポジティブな意見として、「ギリギリ登れた時に成功だと判定してもらえて、通常登れた時よりも嬉しかった」、「登れたか不安だった状況で成功判定が出て安心した」という意見が得られた。これらの意見から、完登判定システムは競技としての曖昧さの解消だけではなく、ボルダリングの持つ競技としての魅力を向上させることができると考えられる。

### 6.3 本研究の制限

本研究では、ユーザ観察を基にシステムのパラメータの設定を行った部分が多数ある。インタビューでは判定は適切であったという回答が多くを占めていたが、今回得られ

た動画から検証を行い、他のクライミングウォールへの適応を目指すことがシステムの広い応用のためには必要となる。クライミングウォールはボルダリングジムごとに大きさや傾斜、形状、取り付けることのできるホールドの数が異なる。そのため、本研究のシステムが他のボルダリングジムでも使用可能かどうかの検証を行う必要がある。同様にコース毎に競技者の動きも大きく変わるため、現在の手足の座標位置を用いた完登の判定が正しいかどうかについてもさらに検証を行う必要がある。

また、本研究では単眼カメラ一台での完登判定を行ったが、一方でボルダリングジムでは高さが 5m に近いものも多く、単眼カメラ一台では対応ができない場面も存在することが考えられる。特に、カメラに映る映像の縁は競技者の遮蔽が起りやすくなることから、複数のカメラを使用して安定したホールドや競技者の認識をする必要があることが考えられる。将来的にはドローンを用いた移動式のカメラによってホールドと競技者の動的な認識ができるようになれば理想的である。

本システムでは単眼カメラを固定して用いた。ホールドの情報を動画内の座標位置から取得している。このため、カメラにズレが生じた際にホールドの情報を取り直す必要があり、システムとして堅牢ではない。これに対しては AR マーカー等で設定した四隅と位置を合わせるようなアプローチの仕方が考えられる。

実験参加者からのフィードバックには「リアルタイムで完登の判定を行うと良いのではないか」というものがあった。本研究では、撮影された動画の入力をもとに完登判定を行っている。しかし、判定エラーが起きたのは多くがスタートの状態に関わっており、例えば参加者がスタートの体勢をとった時点で、システムでスタートの体勢を取ることができたかの結果を示していれば、より判定精度が向上することが予想できる。AR マーカーを用いて、手足の座標を取得することで実装を行うことができるだろう。

Kosmalla らのクライミング中の通知に関する調査研究[19]では、ウェアラブルデバイスの装着は手首が望ましいとされている。下半身へのデバイスの装着は好ましくないとアンケートの結果は示しているが、対象がロープを用いたクライミングであるためボルダリングにおいては検証をする必要がある。

## 7. まとめ

本研究では、単眼カメラを用いた完登判定システムを提案した。実験においては難易度の異なる 4 つのコースをクライミングウォール上に用意し、それぞれについて完登判定の精度の検討を行った。あわせてアプリケーションのユーザビリティの調査も行った。結果としては、完登判定システムの失敗状況での失敗判定の精度は 100%であったが、



成功状況での成功判定は4コース中3コースで、1回の判定エラーが生じた。これは先行研究[9][13]でも言及されている身体による手足やホルドの遮蔽が生じたことと、手首の位置を判定に用いたことによる座標のズレが生じたことが原因であった。しかし、ユーザビリティの評価として行った SUS のスコアではシステムの判定エラーが生じた実験参加者も含めて、全ての実験参加者が定義されている平均値の68点を超えていた。このことから、完登判定の精度とあわせて、提案システムと実装したアプリケーションについては一定の評価を得られたと考える。

## 謝辞

本研究の一部は、情報処理推進機構 (IPA) の 2018 年度未踏 IT 人材発掘・育成事業の支援を受けて実施されたものである。

## 参考文献

- 1) 水村 信二, 羽鎌田 直人, 西谷 善子, スポーツクライミング競技における公共施設の重要性, 明治大学教養論集刊行会, 509, pp.91-116, 2015
- 2) Cao, Z., Simon, T., Wei, S.E., and Sheikh, Y.: Realtime multi-person 2D pose estimation using part affinity fields, *Computer Vision and Pattern Recognition*, arXiv:1611.08050.
- 3) 安達 光三, 石黒 実, スポーツ計時の歴史と役割, 日本時計学会誌, 150 巻, pp.43-56, 1994
- 4) 柏原 全孝, 判定者について: 審判と判定テクノロジーをめぐる社会学的考察, 追手門学院大学社会学部紀要, 第9号, pp.1-15, 2015
- 5) Sadatsugu Hashimoto, Shinji Ozawa, A system for Automatic Judgement of Offsides in Soccer Games, In *IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, pp. 1889-1892. 2006
- 6) 辛 貞殷, 小沢 慎治, 動画処理によるスポーツ運動解析の研究, 精密工学会誌, 75 巻, 5 号, pp. 669-673. 2009
- 7) 渡辺 裕, スポーツ情報処理の研究開発動向, 映像情報メディア学会誌, Vol. 72, No. 6, pp.905-908. 2018
- 8) Rıza Alp Güler, Natalia Neverova, Iasonas Kokkinos, DensePose: Dense Human Pose Estimation In The Wild, arXiv: 1802.00434
- 9) Rami Aladdin, Paul Kry. Static pose reconstruction with an instrumented bouldering wall. In *Proceedings of the 18th ACM symposium on Virtual reality software and technology (VRST '12)*. ACM, pp.177-184. 2012
- 10) Avinash Kalyanaraman, Juhi Ranjan, Kamin Whitehouse. Automatic rock climbing route inference using wearables. In *Adjunct Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2015 ACM International Symposium on Wearable Computers (UbiComp/ISWC'15 Adjunct)*. ACM, pp.41-44. 2015
- 11) Kourosh Naderi, JooSeo Rajamäki, Perttu Hämäläinen. Discovering and synthesizing humanoid climbing movements. ACM, Article 43, 11 pages. 2017
- 12) Anton Fedosov, Eleonora Mencarini, Paweł Woźniak, Krisitna Knaving, and Marc Langheinrich. Towards understanding digital sharing practices in outdoor sports. In *Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct (UbiComp '16)*. ACM, pp.861-866.
- 13) Raine Kajastila, Leo Holsti, Perttu Hämäläinen. The Augmented Climbing Wall: High-Exertion Proximity Interaction on a Wall-Sized Interactive Surface. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '16)*. ACM, pp.758-769. 2016
- 14) Florian Daiber, Felix Kosmalla, Antonio Krüger. BoulderAR: using augmented reality to support collaborative boulder training. In *CHI '13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '13)*. ACM, pp.949-954. 2013
- 15) Yuta Sugiura, Calista Lee, Masayasu Ogata, Anusha Withana, Yasutoshi Makino, Daisuke Sakamoto, Masahiko Inami, Takeo Igarashi. PINOKY: a ring that animates your plush toys. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '12)*. ACM, pp.725-734. 2012.
- 16) 川崎 深雪: インドアボルダリング練習帖, 2014
- 17) John Brooke. SUS- A quick and dirty usability scale. *Usability evaluation in industry*, pp.189-194, 1996.
- 18) Aaron Bangor, Philip Kortum, and James Miller. 2009. Determining what individual SUS scores mean: adding an adjective rating scale. *J. Usability Studies* 4, 3 (May 2009), 114-123.
- 19) Felix Kosmalla, Frederik Wiehr, Florian Daiber, Antonio Krüger, Markus Löchtefeld. ClimbAware: Investigating Perception and Acceptance of Wearables in Rock Climbing. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '16)*. ACM, pp.1097-1108. 2016.