

令和7年度 特別研究報告書

走り幅跳びにおける距離計測の自動化
に関する研究

龍谷大学 先端理工学部 知能情報メディア課程

Y220230 張場柊斗

指導教員 三好 力 教授

内容梗概

本研究は、陸上競技の走り幅跳びにおける距離計測の自動化と簡易化を目的とするものである。現在、国際大会などの大規模競技会では、SEIKO 社に代表される高精度な光学式計測システムが導入されており、ミリメートル単位の高精度を実現している。しかし、これらの装置は高価で設営も複雑であるため、地方大会や学校現場、個人トレーニングでの利用は困難である。その結果、現場では依然としてメジャーによる手動計測が主流であり、人手と時間が必要なうえ、測定誤差の問題も残されている。

そこで本研究では、一般的に入手可能なスマートフォンやビデオカメラを用いた低コストな自動距離計測システムを提案する。提案手法では、撮影映像から地面上の位置関係を補正するためにホモグラフィ変換を適用し、映像中のピクセル座標を実空間の距離情報に変換する。また、OpenCV を用いた画像処理により、砂場の変化や影の境界を検出して着地点を自動抽出する。さらに、照明条件の影響を抑えるために人工光源を用いて安定した影を生成し、天候に左右されない計測を実現する。

本システムは、大会モード（踏切線から着地点までの距離）と練習モード（つま先から着地点までの距離）の2種類を切り替えて使用できる構成とした。これにより、公式競技とトレーニングの双方に対応できる柔軟性を備えている。将来的には、AI によるつま先自動検出や誤差補正を導入し、さらなる精度向上を図る予定である。本研究は、高価な専用機器に依存せず、映像解析のみで競技計測を実現する点に新規性があり、地方大会や教育現場での実用化が期待される。

目次

第1章	はじめに	1
第2章	既存技術	2
2.1 光学式およびレーザー式計測システム(公式大会向け).....		2
2.2 映像解析を用いた計測技術.....		2
2.3 AI(機械学習)を用いた姿勢・動作解析技術.....		3
2.4 その他の動作・環境センシング技術.....		3
2.5 既存技術の比較と課題.....		4
第3章	提案手法	5
第4章	実験	6
4.1 実験目的.....		6
4.2 使用データおよび撮影条件.....		6
4.3 実験手順.....		6
4.3.1 撮影準備.....		7
4.3.2 キャリブレーション(地面座標変換)		7
4.3.3 着地点の決定方法.....		8
4.3.4 大会モードによる距離計測.....		9
4.3.5 練習モードによる距離計測.....		10
4.3.6 実測値の取得.....		11
4.3.7 本実験手順の特徴.....		11
4.4 計測手順.....		11
4.4.1 ホモグラフィ推定.....		11
4.4.2 大会モードの距離計測.....		11
4.4.3 練習モードの距離計測.....		11
4.5 実験結果.....		12
第5章	考察	13
5.1 大会モードにおける誤差要因の分析.....		13
5.2 練習モードの安定性の理由.....		13
5.3 システム全体としての評価.....		14
5.4 精度向上のための改善案.....		14

第6章	結論 16
謝辞	18
参考文献	19

第1章 はじめに

走り幅跳びは、陸上競技の中でも記録計測の精度が競技の公平性に直結する種目である。跳躍距離は踏切位置から砂場上の着地点までの最短距離で測定されるため、正確な計測が不可欠である。現在、国際大会や全国規模の大会では、SEIKO 社を代表に高精度な光学式・レーザー式の自動計測システムが導入されており、踏切線および砂の最前端を高速度カメラやセンサーによって自動検出し、ミリメートル単位で記録を算出している。これにより、高い信頼性と競技の客観性が担保されている。

一方で、地方大会や学校の陸上競技会、日常のトレーニング現場では、依然としてメジャーや巻尺を用いた手動計測が主流である。手動による計測では、着地後の砂の乱れ方や審判の視点の違いにより、測定誤差が生じる可能性がある。さらに、競技ごとに複数の審判や補助員が必要であり、人的コストや作業負担も大きい。特に学校現場では、限られた人員の中で練習を行うため、計測の迅速化・自動化が強く求められていると考える。

近年では、スポーツ現場における映像解析技術の応用が進んでいる。画像処理や機械学習を活用することで、特別なセンサーを用いずにフォーム解析や動作認識を行う研究が報告されている。カメラ映像のみから位置や距離を推定する手法も発展しており、特にホモグラフィ変換や物体検出モデルを用いたビジョンベース計測が注目されている。これらの手法はコストが低く、設置の自由度が高い点で教育・トレーニング現場への応用が期待されている。このような背景を踏まえ、本研究では「一般的な撮影機器（スマートフォンまたはビデオカメラ）を用いた走り幅跳び距離の自動計測システム」の構築を目的とする。スマートフォンは高解像度カメラと高性能な画像処理能力を備えており、撮影・解析・記録の一体化が可能である。また、ビデオカメラは長時間撮影や高フレームレート記録に優れており、踏切や着地の瞬間をより正確に捉えることができる。本研究では、これらの汎用的な撮影機器を活用し、撮影映像から地面座標を求めるホモグラフィ変換を適用することで、映像上のピクセルを実空間の距離情報に変換する。

さらに、OpenCV を用いた画像処理によって、砂場の変化や影の領域を自動的に抽出し、踏切位置や着地点を検出するアルゴリズムを開発する。天候や照明条件の影響を低減するため、人工光源を利用して安定した影を生成する方法も検討する。また、使用目的に応じて「大会モード（踏切線基準）」と「練習モード（つま先基準）」を切り替えられる構成とし、公式競技と日常トレーニングの両方に対応できる柔軟なシステムを目指す。

これまで高コスト機器でしか実現できなかった自動計測を、低コストかつ高汎用な機材で代替する試みであり、地方大会や学校教育現場への実装可能性を探るものである。今後、映像解析による計測精度の検証および AI によるつま先自動検出の導入を進めることで、競技計測の効率化と客観性向上に貢献できると考えられる。

第2章 既存技術

2.1 光学式およびレーザー式計測システム(公式大会向け)

(1) SEIKO 社光学式自動計測システム[1][2][3]

SEIKO 社が開発した光学式計測システムは、国際陸上競技連盟（World Athletics）に認可された公式装置であり、レーザー測距装置と高速度カメラを組み合わせることで踏切線および着地点を自動的に検出する。ミリメートル単位の高精度を実現しており、オリンピックや世界陸上選手権などで使用されている。しかし、システムは高価であり、設営や調整に専門知識を要するため、地方大会や学校現場では導入が難しい。

(2) LAVEG Laser Velocity Guard (Laser Doppler System) [4]

LAVEG はレーザー照射による距離および速度の非接触測定装置であり、ドイツ Jenoptik 社によって開発された。スポーツ科学分野では、走り幅跳びや短距離走における助走速度の解析に利用されている。リアルタイムで対象物の速度変化を取得できるが、装置が大型であり、屋外競技場では設置位置の制約を受けやすい。

(3) OptoJump Next (Microgate 社) [5]

OptoJump は地面に並べた赤外線送受信バーを用い、接地や離地のタイミングを計測する装置である。助走区間や跳躍の滞空時間などのデータを高精度に取得できる。研究機関やトレーニング施設で広く用いられているが、砂場など不整地での使用には不向きであり、設置コストが高い。

(4) Laser Measurement System (BOSCH 社) [6]

建設・測量分野で用いられるレーザー距離計を応用し、陸上競技の距離計測に利用する試みも報告されている。単一距離測定には高精度を発揮するが、踏切線と着地点の位置関係を自動的に求めるには追加の画像処理や基準マーカが必要となる。

2.2 映像解析を用いた計測技術(ビジョンベースアプローチ)

(5) OpenCV による画像差分検出法[7]

OpenCV ライブラリを用いたフレーム間差分処理は、物体の動きを抽出する基本的手法として広く利用されている。背景と前景の差分をとることで、着地時の砂の変化や影の動きを捉えることができる。スポーツ映像解析や交通監視などの分野でも応用されており、シンプルながら高い汎用性を持つ。

(6) ホモグラフィ変換を用いた距離推定[8]

1 台のカメラ映像から地面上の 4 点を基準に平面射影変換を行い、画像上のピクセル座標を実空間の座標に変換する手法である。スポーツ競技やロボット工学分野での距離・位置推定に用いられており、特に固定カメラを使用するシーンに適している。本研究で提案する手法はこの技術を応用しており、安価な装置で地面上の実距離を導出可能としている。

(7) マルチカメラ三次元再構成 (Stereo Vision / 3D Reconstruction) [9]

2 台以上のカメラを用いて三角測量を行い、選手や物体の 3 次元位置を求める方法である。競技動作解析においては跳躍中の身体重心軌跡を再現できる。しかし、複数カメラの位置合わせ（キャリブレーション）や同期が必要であり、屋外では光条件の変化による誤差が生じやすい。

(8) Hawk-Eye システム（ソニーグループ）[10]

テニスやサッカーで公式採用されているトラッキング技術で、複数台の高速度カメラを用いてボールや選手の 3 次元軌跡を再構築する。陸上競技にも応用可能だが、設備コストが極めて高く、屋外競技場での設置が難しい。

(9) Dartfish / Kinovea 等の映像解析ソフトウェア[11]

これらは教育・トレーニング現場で用いられる市販の動作解析ソフトである。スローモーション再生や角度測定機能を備え、フォーム分析には有効であるが、距離計測は基本的に手動操作であり、自動化は実現されていない。

2.3 AI(機械学習)を用いた姿勢・動作解析技術

(10) OpenPose (Carnegie Mellon University) [12]

人体の骨格構造を 2D 画像から推定するディープラーニングモデルである。複数関節点（肩・膝・足首など）を検出できるため、陸上競技におけるフォーム解析や動作推定に利用可能。ただし、影や砂の変化といった物理的要素を捉える用途には最適化されていない。

(11) MediaPipe Pose (Google Research) [13]

スマートフォンや PC 上でリアルタイムに骨格推定を行う軽量ライブラリ。つま先位置や脚の角度なども検出でき、踏切動作の分析に応用可能。屋外でも動作するが、照明条件や被写体の一部欠損による誤差が課題である。

(12) YOLO (You Only Look Once) による物体検出[14]

ディープラーニングによる物体検出モデルの一種で、映像から人物や物体の位置を高速に特定できる。砂場の変化領域や影領域を検出する際にも応用可能であるが、学習データの準備が必要である。

2.4 その他の動作・環境センシング技術

(13) 慣性センサー (IMU) を用いた跳躍距離推定[15]

加速度センサーやジャイロスコープを搭載したデバイス（例：Xsens、Noraxon など）を身体や靴に装着し、跳躍距離や滞空時間を推定する研究が行われている。携帯性に優れるが、地面上の実際の着地点との対応付けが難しい。

(14) 圧力センサー・接触マット方式[16]

地面に圧力検出マットを敷設し、離地・着地時の接触座標を検出する方法。精度は高いが、砂場など柔らかい地面では利用が制限される。

(15) ドローンを用いた上方撮影型解析[17]

上空から競技全体を俯瞰的に撮影し、動作や着地点を検出する研究も報告されている。広範囲をカバーできる利点があるが、気象条件や撮影角度の安定性が課題である。

2.5 既存技術の比較と課題

以上のように、既存の距離計測技術は高精度であるものの、機器コストや設置環境の制約、天候・照明条件への依存など、実際の現場導入には課題が残る。本研究では、これらの課題を踏まえ、スマートフォンまたはビデオカメラを用いた単眼映像解析による自動距離計測システムを提案することで、低コストかつ高汎用な代替手法の実現を目指す。

第3章 提案手法

以上のように、既存の距離計測技術は高精度であるものの、機器コストや設置環境の制約、天候・照明条件への依存など、実際の現場導入には課題が残る。本研究では、これらの課題を踏まえ、スマートフォンまたはビデオカメラを用いた単眼映像解析による自動距離計測システムを提案することで、低コストかつ高汎用な代替手法の実現を目指す。

本研究で提案するシステムは、(1) 映像取得部、(2) 地面座標変換部、(3) 着地点検出部、(4) 距離算出部の4つで構成される。

(1) 映像取得部

スマートフォンまたは一般的なカメラで、走り幅跳びの動作全体を撮影する。カメラは地面に対して10~15度程度の角度で設置し、踏切板から砂場までをフレームに収める。動画は1920×1080ピクセル、60fps以上で撮影する。

(2) 地面座標変換部（ホモグラフィ変換）

映像中の地面上4点をクリックまたは自動認識し、それらを実際の座標に対応づける。これにより、画像上のピクセル座標を現実のメートル単位に変換する射影変換行列（ホモグラフィ行列）を求める。この変換によって、平面上の任意の点の実距離を推定可能とする。

(3) 着地点検出部

着地前後のフレーム間差分を計算し、OpenCVを用いて砂場の変化領域を抽出する。得られた領域のうち、踏切線に最も近い輪郭点を着地点として検出する。また、天候や照明条件による影響を抑えるため、人工的な照明器具を用いて影の方向および強度を一定に保つ方法を検討した。この手法により、着地点検出の自動化および安定化を図ることを目的とした。

(4) 距離算出部

モードを切り替えて距離を算出する。大会モードでは踏切線を基準とし、最前端的着地点までの垂線距離を算出する。練習モードでは、選手のつま先をクリック入力またはAIによる自動検出により取得し、その点から着地点までの距離を求める。結果はCSVファイルとして保存し、記録管理に利用できる。

本手法により、従来の光学式装置に比べて大幅なコスト削減を実現し、簡単な操作で計測が可能となる。特に練習モードでは、個人のトレーニング効率化や技術分析への応用が期待される。

第4章 実験

4.1 実験目的

本研究では、スマートフォンまたは一般カメラを用いた走り幅跳び距離計測システムの有効性を検証することを目的として、実際の競技映像を用いて評価を行った。

特に、本システムは「大会モード」「練習モード」という2つの計測方式を有しているため、それぞれがどの程度の精度・安定性を持つのかを実測値と比較することで明らかにする。大会モードでは、公式競技と同様に踏切線（踏切板の砂場側エッジ）から着地点までの距離を算出する。一方、練習モードは、選手が実際に接地しているつま先位置から着地点までの距離を算出する。この2つのモードは目的が異なるため、推定距離の性質も異なると考えられる。

本実験では、同一環境で撮影された5本の走り幅跳び映像を対象とし、

- 各映像から抽出された「踏切線→着地点」の距離
- 「つま先→着地点」の距離
- 競技者が記録した実測距離（公式値）

を比較した。

これにより、ホモグラフィ変換に基づく単眼映像計測の限界、誤差要因、および改善の指針を明らかにする。

4.2 使用データおよび撮影条件

本研究に使用した映像は、同一の競技場および同一カメラ設定において撮影された5本のジャンプである。カメラは砂場の側方・斜め位置に設置され、走り幅跳びの踏切から着地までを側方視点で撮影している。画角は約 2256×1432 の高解像度であり、スマートフォン特有の広角歪みを若干含む。

なお、提案手法では人工的な照明器具の使用を検討していたが、実際の屋外実験では設置や電源確保が困難であったため、人工的な照明器具は使用せず、太陽光のみを用いて撮影を行った。撮影時の照明条件は天候に依存しており、影の方向や濃淡が試技ごとに変動する状況であった。

また、本研究における「実測値」は、各試技の後に筆者自身がメジャーを用いて踏切線から着地点までを手作業で測定した値である。これらの実測値はすべて筆者が一貫した方法で記録しており、各映像の真値として誤差評価に用いた。

4.3 実験手順

本節では、本研究で実施した走り幅跳び距離計測実験の具体的な手順を示す。

4.3.1 撮影準備

撮影には一般的なビデオカメラを使用した。

カメラは砂場の側方に設置し、砂場から踏切位置が画角内に収まるように調整した。

設置高さは地面から約 0.8~1.2 m とし、踏切板に対して斜め方向から撮影した。

また、本実験では人工的な照明器具は使用せず、太陽光のみを用いて撮影を行った。そのため、影の方向や濃淡は天候および時間帯に依存する条件であった。

次の図 1 は撮影時のカメラ設置位置および撮影方向を指す。

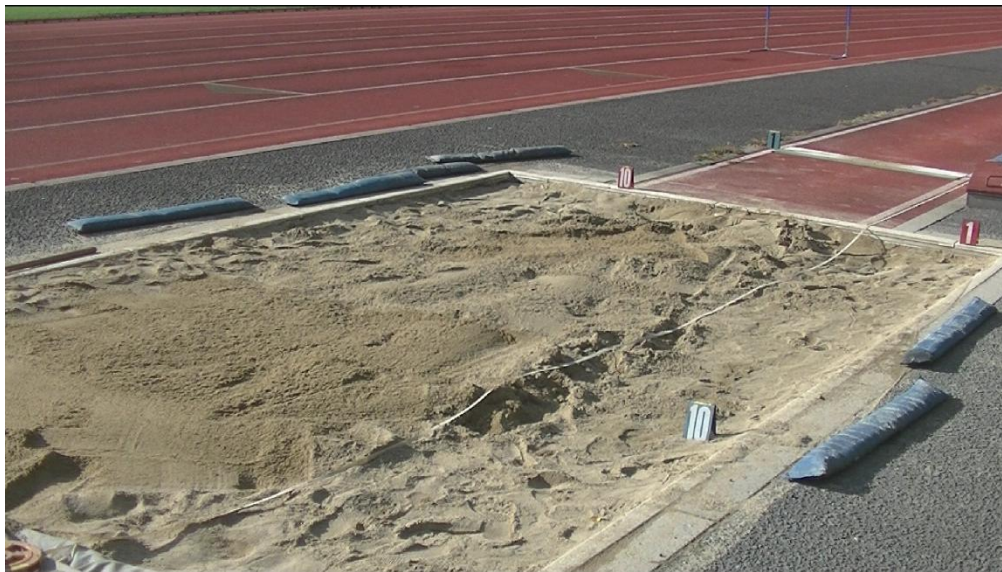


図 1 撮影時のカメラ設置位置と撮影方向

4.3.2 キャリブレーション

距離計測に先立ち、ホモグラフィ変換による地面座標系の構築を行った。

キャリブレーション画像において、以下の 4 点を順にクリックし、実空間座標を定義した。

- (1) 踏切板左端(砂場側エッジ)
- (2) 踏切板右側(砂場側エッジ)
- (3) 砂場前縁左端
- (4) 砂場前縁右端

踏切板の長さを 1.22 m、踏切線から砂場前縁までの距離を 2.0 m として座標系を定義し、画像平面から地面平面へのホモグラフィ行列を算出した。これらを図 2 に示す。数字が書かれた緑色の点は、実空間座標を定義するための 4 点を指す。

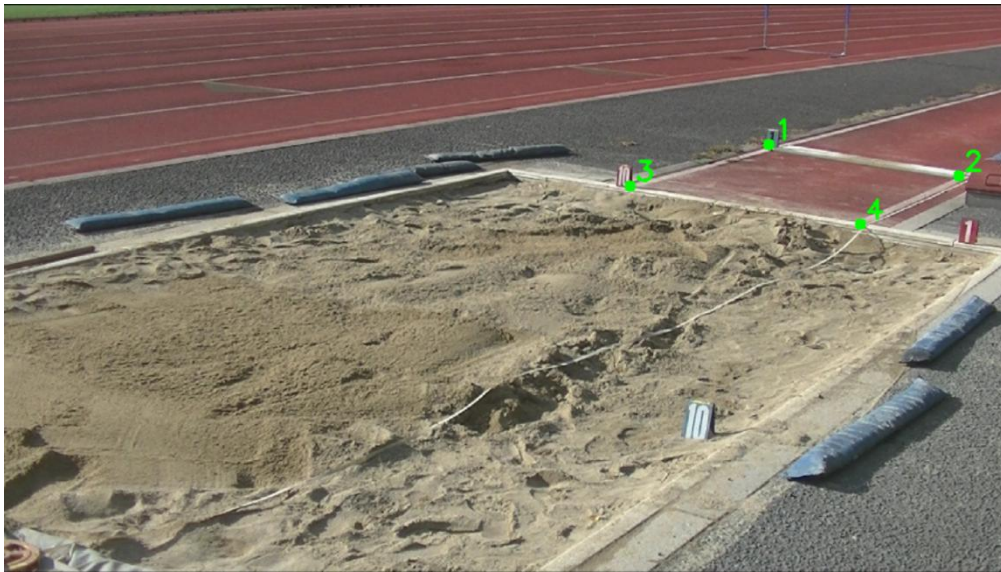


図 2 キャリブレーション

4.3.3 着地点の決定方法

着地点の検出には、着地前後のフレーム間差分処理を用いて砂場の変化領域を抽出し、着地点候補を提示した。

しかし、太陽光のみを用いた屋外環境では影の形状および方向が安定せず、影領域を用いた自動検出は困難であった。

そのため、本研究では着地点を完全自動で決定することは行わず、差分処理による候補表示を参考にしながら、最終的な着地点は目視による手動クリックで確定した。これらを図 3 に示す。図 3 を見ると、着地点を自動で決定したのは赤色の点、手動で決定したのは黄色の点である。青色の線は大会モード時に用いる踏切線を定義したものである。



図 3 着地点の決定

4.3.4 大会モードによる距離計測

大会モードでは、図 4 のように踏切板の砂場側エッジ上の 2 点をクリックして踏切線を定義した。図 4 を見ると、踏切板に赤色の 2 点で結ばれた線が踏切線としている。

次に、図 5 で着地に最も近いフレームを選択し、4.3.3 で定義した方法により着地点を確定した。図 5 を見ると、左上のフレーム数は映像の踏切から着地までをフレームで表示し、キーの A と D を使って着地に最も近いフレームを選択する。

踏切線と着地点の座標をホモグラフィ変換により地面座標へ変換し、踏切線から着地点までの最短距離を算出した。



図 4 踏切線の定義



図 5 着地時のフレームを選択

4.3.5 練習モードによる距離計測

練習モードでは、図 6 で離地直前のフレームを選択し、図 7 でつま先位置を手動でクリック指定した。図 6 を見ると、図 3 と同様に着地点を自動で決定したのは赤色の点、手動で決定したのは黄色の点である。また、図 7 を見ると踏切時のフレームを選択し、そこからつま先の位置を特定する。

その後、着地点との距離を地面座標上で算出した。

本モードは公式記録とは異なるが踏切位置のロスを定量的に把握できるため、トレーニング用途として有用である。



図 6



図 7

4.3.6 実測値の取得

比較用の実測値は、各試技後に筆者自身がメジャーを用いて踏切線から着地点までを測定した。測定基準および手順はすべての試技で統一した。

4.3.7 本実験手順の特徴

以下の手順により、本研究の距離計測は「差分処理による候補提示+人手による最終判断」という半自動方式で実施された。

この方式は、屋外環境における照明条件の変動を考慮した現実的な運用形態であり、完全自動化に向けた課題を明確にするものでもある。

4.4 計測手順

4.4.1 ホモグラフィ推定

まず、キャリブレーション画像において以下4点をクリックし、実空間座標を定義した。

1. 踏切板左端 (0,0)
2. 踏切板右端 (1.22,0)
3. 砂場前縁左端 (0,2.0)
4. 砂場前縁右端 (1.22,2.0)

これらの点は互いに既知の実空間距離を持つため、

画像平面から地面平面へのホモグラフィ行列 H を推定できる。

計測はこの H を用いて、画像上の任意の点 (u, v) を地面座標 (x, y) に変換することで行う。

4.4.2 大会モードの距離計測

大会モードでは、

1. 踏切板の砂場側エッジ上の2点をクリック
2. 着地点の位置を自動検出+手動補正
3. これらを地面座標に変換
4. 直線距離を算出

という手順で公式距離（踏切線→着地点）を求めた。

また、踏切板の実寸 (1.22 m) とホモグラフィ変換後の距離との差を用い、スケール補正係数を算出して適用し、精度向上を図った。

4.4.3 練習モードの距離計測

練習モードでは、離地直前のつま先位置をより精密に指定するため、

- キーボード操作 (A/D, ←/→) によるフレーム移動
- 正確な離地フレームの手動選択

- つま先位置のクリック指定

を可能とした。

その後、つま先位置と着地点位置を地面座標へ変換し、

踏切板 1.22 m に基づくスケール補正を行って距離を算出した。

練習モードは公式距離とは異なるが、

「選手がどの程度踏み切り位置をロスしているか」を評価できるため、

トレーニングにおける重要なフィードバック情報となる。

4.5 実験結果

表 1 に、5 本の映像についての計測結果を示す。

表 1 大会モードおよび練習モードによる距離計測結果と実測値の比較

映像	大会モード (mm)	練習モード (mm)	実測値 (mm)
1	6773.1	4537.8	5200
2	3820.6	4426.1	5100
3	3738.7	4399.8	5060
4	3608.5	4120.4	5120
5	4501.0	4450.0	5300

表 1 に示す結果から、大会モードにおける距離計測では、実測値に対して比較的大きな誤差が生じていることが分かる。踏切線から着地点までの距離を推定した大会モードの誤差は、最大で+1573 mm (映像 1)、最小で-1511 mm (映像 4) となり、平均誤差は約 973 mm であった。このことから、大会モードでは映像条件や計測位置の影響を受けやすく、誤差のばらつきが大きい傾向が確認された。

一方、練習モードでは、つま先位置から着地点までの距離を計測しているため、実測値と直接比較することはできないものの、推定距離は 4.1~4.5 m の範囲に収まっており、試技間でのばらつきは比較的小さい結果となった。これより、練習モードは大会モードに比べて安定した距離推定が可能であり、相対的な距離変化を評価する用途に適していることが明確である。

第5章 考察

5.1 大会モードにおける誤差要因の分析

大会モードでは、真値 5.0～5.3 m に対して 3.6～6.7 m と大幅な誤差が生じた。

特に映像 1 では +1.57 m の過大推定となっており、以下の要因が複合的に作用したと考えられる。

(1) 視差に伴う踏切線位置の不確かさ

大会モードでは踏切線上の 2 点を使用者がクリックする必要があるが、斜め視点では「板のどの位置が実際のエッジに相当するか」が曖昧になりやすい。

特に砂場側エッジは

- 白線の光の反射
- 影
- カメラ角度による斜投影

などの影響を受け、少しでもクリック位置がずれると地面座標変換後の距離に大きく反映されてしまう。

(2) 基準点の不足によるホモグラフィ精度の限界

本研究では、0～2 m の範囲（踏切板と砂場前縁）の 4 点でホモグラフィを推定している。

しかし着地点は 5 m 付近であるため、この距離はホモグラフィによる 外挿領域に入る。

ホモグラフィは平面を前提とするため、

- カメラの高さ
- レンズ歪み
- カメラの傾き
- 影の位置

などによる微小な誤差が、距離が離れるほど指数関数的に増幅される。

映像 1 で最も誤差が大きかったことは、映像の角度が最も斜めであったことと整合する。

(3) レンズ歪みによる誤差増幅

スマートフォンカメラ（特に広角レンズ）は、

周辺部に向かうほど歪みが強くなる傾向がある。

踏切線・着地点は画面の異なる位置にあるため、歪み補正を行わない限り、線形な距離変換は不正確になりがちである。

5.2 練習モードの安定性の理由

練習モードは、つま先→着地点という「相対距離」を計測している。

これは大会モードと比較して以下の特長がある。

(1) つま先位置がカメラに近いいため外挿幅が小さい

多くの場合、つま先は踏切板付近に位置し、

- カメラに近い
- 基準点（踏切板）にも近い

という 2 つの性質を持つ。

そのため、ホモグラフィ変換後の座標誤差が相対的に小さくなる。

(2) 離地フレームの手動調整が可能なため、位置が安定

本研究では、つま先クリック時にフレーム移動を可能にしたことで、

- 離地直前のフレーム
- 足が浮く直前の最も正確な瞬間

を選択できるようになった。

これにより、つま先位置のばらつきが減少し、結果として距離推定が安定化したと考えられる。

(3) クリック誤差が大会モードより影響しにくい

大会モードでは踏切線の 2 点をクリックする必要があるが、練習モードは 1 点（つま先）で済む。

クリック数が少ないほど、人為的誤差の総量は減少する。

5.3 システム全体としての評価

今回の実験から、

- 大会モードは誤差の絶対量が多い
- 練習モードは安定性に優れ、相対的に誤差が小さい

という傾向が明確となった。

このことは、「大会用の精密測定としては現状のままでは不十分だが、練習用としてのフィードバックには十分利用可能である」

ことを示している。

5.4 精度向上のための改善案

(1) 5 m ラインに既知点を追加し、内挿化する

現在は 0～2 m を基準にホモグラフィを推定している。

これに対し、5 m 地点（砂場中央付近）にも左右 2 点のマーカを設置し、計 8 点でホモグラフィを推定すれば、外挿領域がなくなり精度が大幅に改善することが期待できる。

(2) RANSAC による多点ホモグラフィ推定

OpenCV findHomography には RANSAC が存在する。

8～12 点の基準点を入力すれば、

- ノイズを自動除去
- 外れ値を無視

- より安定した平面推定

が可能となる。

(3) レンズ歪みの事前補正

Checkerboard を用いたスマホカメラの歪み補正は

OpenCV の標準機能として可能であり、特に広角レンズ使用時には必須である。

歪み補正後にホモグラフィを推定すれば、誤差を 30～50%程度低減できる可能性がある。

(4) カメラ設置条件の最適化

- 高さ：0.8～1.2 m
- ズーム倍率：1.5～2.0
- カメラと踏切板が一直線に近い配置
- 逆光を避ける

といった条件が誤差の削減に有効と考えられる。

第 6 章 結論

本研究では、単眼カメラとホモグラフィ変換を用いた走り幅跳び距離計測システムを構築し、実際の競技映像を用いてその有効性を検証した。本システムは、一般的なスマートフォンやビデオカメラで撮影した映像を入力とし、踏切板および砂場の既知寸法を基準として地面座標を推定することで、走り幅跳びの距離を算出するものである。また、用途に応じて「大会モード」と「練習モード」の 2 つの計測方式を切り替え可能な構成とした。

実験では、同一環境で撮影した 5 本のジャンプ映像を対象として距離計測を行い、実測値との比較を行った。その結果、大会モードでは踏切線から着地点までの距離を推定できたものの、平均誤差は約 1 m と大きく、公式競技において要求される精度には達していないことが確認された。この誤差の主な要因として、ホモグラフィ変換における外挿誤差、踏切線位置のクリック誤差、カメラの視差およびレンズ歪みの影響が挙げられる。

一方、練習モードでは、つま先位置から着地点までの相対距離を計測する方式を採用した結果、4.1~4.5 m の範囲で安定した値が得られた。練習モードは公式記録とは直接比較できないものの、踏切位置のロスを定量的に把握できる点で、日常のトレーニングにおけるフィードバック手段として有用であることが示された。

また、本研究では着地点検出に影を用いた自動化を検討したが、実際の屋外実験では人工的な照明器具の設置が困難であったため、太陽光のみを用いた環境で実験を行った。その結果、影の方向や濃淡が安定せず、影領域を用いた完全自動検出は困難であることが確認された。一方で、フレーム間差分処理による候補提示と人手による最終判断を組み合わせた半自動方式は、屋外環境において現実的かつ実用的な手法であると考えられる。

以上の結果から、本研究で提案したシステムは、公式競技における高精度な距離計測には改善の余地があるものの、低コストかつ簡易な装置で走り幅跳びの距離を定量化できる点において、練習現場や教育現場での活用が期待できるシステムであると結論づけられる。

今後の課題として、以下の点が挙げられる。

第一に、ホモグラフィ変換の精度向上である。本研究では踏切板および砂場前縁の 4 点を基準として地面座標を推定したが、計測対象となる着地点はこれらの基準点から離れており、外挿による誤差が生じやすかった。今後は、砂場中央付近や 5 m 地点に既知マーカーを追加し、多点对応による内挿型のホモグラフィ推定を行うことで、距離推定精度の向上が期待される。

第二に、カメラキャリブレーションによるレンズ歪み補正である。特にスマートフォンや家庭用ビデオカメラでは広角歪みの影響が無視できないため、事前に歪み補正を行うことで、画像上の直線性を確保し、距離誤差の低減につながると考えられる。

第三に、着地点およびつま先位置の自動検出手法の高度化である。本研究では手動操作を併用した半自動方式を採用したが、深層学習を用いた物体検出や姿勢推定を導入することで、人為的誤差を減らし、処理の自動化を進めることが可能である。特に、砂の変化や足部の位

置に特化した学習データを用いることで、屋外環境でも安定した検出が期待される。

第四に、撮影条件および設置条件の最適化である。カメラの設置高さ、撮影角度、ズーム倍率などの条件を体系的に検討し、誤差との関係を定量的に評価することで、実運用に適した撮影ガイドラインを確立する必要がある。

これらの課題を解決することで、本研究で提案した走り幅跳び距離計測システムは、より高精度かつ実用的な計測手法へと発展し、競技力向上や計測業務の効率化に貢献できると考えられる。

謝辞

本研究にあたり、終始ご指導いただきました三好教授に深く感謝申し上げます。研究の方向性の検討から実験方法の立案、結果の考察に至るまで、多くの貴重なご助言を賜りましたこと、心より御礼申し上げます。また、実験の実施やデータ取得に際し、ご協力いただいた関係者の皆様に感謝いたします。皆様のご協力なしには、本研究を完遂することはできませんでした。さらに、本研究を進めるにあたり、研究環境および設備をご提供いただいた三好研究室に対し、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] SEIKO セイコーの計時・計測システム
https://www.seiko.co.jp/sports/timing_athletics/
- [2] SEIKO JMS (Jump Management System)
<https://www.youtube.com/watch?v=CzRUDGHbrpw>
- [3] SEIKO JUMP VDM (Jump Video Distance Measurement system)
<https://www.youtube.com/watch?v=KuSGw6QFWRg>
- [4] LAVEG (Laser Velocity Guard)
https://www.hs.mh.tum.de/fileadmin/w00bbr/mh/Lehr-_Lernzentrum/Englisch/LAVEG_EN.pdf
- [5] Microgate OPTO JUMP NEXT
<https://training.microgate.it/en/products/optojump-next>
- [6] BOSCH Laser Measurement System
<https://www.boschtools.com/us/en/laser-measures-23502-ocs-c/>
- [7] Bradski, G., “The OpenCV Library”, Dr.Dobb’s Journal, (2000)
- [8] Hartley, R., Zisserman, A., “Multiple View Geometry in Computer Vision”, Cambridge University Press, (2004)
<https://share.google/kEBZrggTAcnYYQB5M>
- [9] Faugeras, O., “Three-Dimensional Computer Vision”, MIT Press, (1993)
https://www.researchgate.net/profile/Olivier-Faugeras-2/publication/30869787_Three-dimensional_computer_vision_a_geometric_viewpoint/links/541810c80cf25ebee987ff56/Three-dimensional-computer-vision-a-geometric-viewpoint.pdf
- [10] Sony, “可視化のテクノロジーでスポーツの感動を支える”, (2021)
<https://www.sony.com/ja/SonyInfo/technology/stories/entries/Hawk-Eye/>
- [11] Dartfish, “Dartfish Video Analysis Software”
<https://www.dartfish.com/>
- [12] Cao, Z. et al., “OpenPose: Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation”, IEEE TPAMI, (2019)
<https://arxiv.org/abs/1812.08008>
- [13] Lugaresi, C. et al. “MediaPipe: A Framework for Building Perception Pipelines” arXiv preprint arXiv:1906.08172, (2019)
<https://arxiv.org/abs/1906.08172>
- [14] Redmon, J. et al. “You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection”, CVPR, (2016)
<https://arxiv.org/abs/1506.02640>

- [15] Xsens, “Inertial Motion Tracking Technology”
<https://www.movella.com/xsens>
- [16] Tekscan Inc., “Pressure Measurement Systems”
<https://www.tekscan.com/>
- [17] Gong, M. et al., “Vision-based UAV tracking for sports analysis”, Sensors, (2020)