論文

スマートフォンにより撮影した動画を用いた三段跳びにおける 助走ストライド,速度およびピッチの高速自動抽出法の提案

High performance automatic analysis for the estimation of stride, velocity and pitch in the triple jump using a smartphone camera

伊藤陸1), 川上申之介2)

- 1) 近畿大学工業高等専門学校 専攻科電気電子工学専攻 2) 近畿大学工業高等専門学校 制御情報コース
 - (現所属: 関西女子短期大学 医療秘書学科)

キーワード: 助走ストライド, 速度自動抽出, 画像解析. Key words; triple jump, FFT, image analysis, OpenPose, OpenCV, DLT

【抄録】

本研究は、陸上男子三段跳びにおける助走動作をスマートフォンにより撮影した動画を用いて画像処理を行い、競技力向上に資するパラメータを高速に自動抽出する方法の提案を目的とする. 画像から姿勢を推定するために用いた OpenPose および OpenCV の背景差分法による解析では助走ストライドおよび速度を得た. 加えて本研究で提案するストライドカーブを、シンプルな信号処理問題として高速フーリエ変換(FFT)を用いることでストライドピッチ周波数を推定した. 提案手法は大規模なシステムの構築を必要とすることなく、スマートフォンと三脚があれば学校教育における練習現場で撮影と分析が速やかに行えるような高速処理を行う簡易アプリケーションの実現可能性を追求する. 分析対象はU20日本記録保持者である伊藤陸選手とし、跳躍踏切板の手前 9m 間の助走動作を、三脚に固定したスマートフォンで真横から撮影し、得られた動画に対して我々が提案する 2 通りの分析手法を用いて解析を行った. 分析項目は、助走時のストライド、速度、ストライドピッチ周波数の推定である. 本研究にて得られた知見は以下の通りである.

- 1. OpenPose での跳躍者の姿勢推定によるストライド及び速度の自動抽出
- 2. ストライド長[204.7±3.94cm, 209.69±2.14cm, 216.46±4.02cm, 239.12±9.69cm], 接地点間の平均速度[832.85±49.76cm/sec, 888.41±49.07cm/sec, 908.86±25.67cm/sec, 909.61±59.17cm/sec])
- 3. OpenCV の背景差分法での跳躍者の輪郭抽出によるストライド及び速度の自動抽出
- 4. 4ストライド長[226.0±12.76cm, 208.40±6.22cm, 213.47±10.14cm, 239.07±14.21cm], 接地点間の平均速度[811.33±100.85cm/sec, 892.93±17.98cm/sec, 934.53±18.81cm/sec, 957.6±48.99cm/sec])
- 5. ストライドの実距離を 2 次元 DLT 法により検証し誤差が許容範囲であること, 実距離を再現できていることを確認
- 6. 助走ストライドおよび速度の相関および回帰直線の推定(OpenPose による結果のみ相関有, (r=0.975, p<0.05)
- 7. ストライドカーブに対する FFT によるストライドピッチの抽出(4Hz)
- 8. 提案システムを用いた実証実験により想定する結果を再現(Kinovea による結果と誤差の範囲内で一致)

以上のことから、姿勢推定および輪郭抽出によりストライド、速度およびピッチというの助走時の動作パラメータが自動で高速に計算できることが示された.

スポーツ科学研究, 19, 139-157, 2022 年, 受付日: 2022 年7月17日, 受理日: 2023 年2月25日 連絡先: 川上申之介 関西女子短期大学医療秘書学科

shinnosuke.kawakami2010@gmail.com

I. 緒言

三段跳びおよび走り幅跳びでは、跳躍に入る 踏切前においてどのような一歩の幅(以下ストラ イド)で,何ストライドで走るか,特に4ストライド で跳躍に入る場合の各ストライドと1ストライドの 速度を分析しそれらの適切なバランスを指導に 役立てる考え方があり(柴田・小山, 2017), 適切 な速度を保ちながら跳躍者の体格や跳躍力に 見合ったストライドを保つことで記録に結び付く 跳躍へとつながると考えられている. 実際の試 合または練習における踏切板直前,特に約 9m における速度とストライドを記録するための方法 としては、陸上トラック上にマーカーを置き、ハイ スピードカメラで撮影した動画をデジタル化した 上で手動によってつま先の座標を得てから位置 を抽出する方法(柴田・小山, 2017)がある. 試 合の動画からストライドを自動抽出することは考 案されており (Einfalt et al., 2019; Yagi et al., 2018)試合後の検証に非常に有用である. 踏切 板から先のホップ, ステップ, ジャンプに対して ハイスピードカメラで撮影を行い, 姿勢や離地角 度までを目視で推定することも行われている (Omar, 2015). これらは分析にかかる時間と労 力の観点から高コストであり設置から分析まで手 順が多いが,詳細な画像が得られ有用である. ジャンプについては,ホップ,ステップ,ジャンプ の比率をシミュレーションで探る(Allen et al., 2016), 国際陸上競技連盟(以下, IAAF)が公式 試合において収集しているデータを入手,分析 し,パラメータ抽出を行うことで,ホップ,ステッ プ,ジャンプの最適比率を求めるもの (Mohammed et al., 2015a, 2015b, 2015c, 2015d), 垂直および水平跳躍能力の相関関係 についての研究(Aoki et al., 2020), sagital 平 面での運動学的動作解析(Jasminan et al.,

2021) などが行われている. 速度についてはレ ーザーを用いた速度抽出および分析や,物理 的な光学センサ等の装置を陸上トラックに設置 して床反力データ等を取得し分析しているもの (小山他, 2007; Liu et al., 2015; Strazak et al., 2016; Mehmet et al., 2009; Wilson et al., 2009)など、いずれも三段跳びにおける記録向 上に結び付けるための最適パラメータの抽出を 行っている. これらの手法は, 大会側が収集し たオープン・ビッグデータを利用できる事を前提 とし,かつ指導者が短時間で分析しコーチング に反映する事ができる場合においては, 記録の 向上に資する指導につながり、普及にもつなが ると考えられる. 日本陸連では主要な大会にお いて国内の選手のデータを取得しているが、地 域や学校スポーツ選手一般において個人レベ ルで取得し個別に分析し, 試合に活かすことは 容易であるとは考えにくい. 目視・手動で分析す るのは客観性, 再現性が必ずしもなく, 得られた パラメータと監督、コーチ、選手の感覚とを関連 付けて指導に繋げるのは熟練の経験に基づく 指導力が必要となる(Durai et al.,2018; Nigussie, 2019; Pardilla et al., 2019).

本研究では目視・手動での分析ではなく、動画から自動的にパラメータを取得するため、人間の先入観や経験則などが入り込む余地のない客観性、再現性の確保を試みている。また、跳躍者へのマーカーの装着など、測定系に影響を及ぼす物などの追加を必要としない。本研究の目的は、(I)可用性の高い安価な機材としてのスマートフォンにより跳躍動作を撮影するだけで、数分程度の短時間において高速にストライド、速度およびピッチという記録向上に資すると考えられるパラメータを抽出できるシステムを開発すること、(II)画像処理による高速自動抽出

によって得られたパラメータの傾向を見出す事, (III)構築したシステムを用いた再現実験による 実用性の検討を目的とした.

現時点の到達目標としてはオンボード型 GPU 搭載 B5 または A4 サイズのノート型パソコン 1 台に動画を転送し、数分以内で終えることができ る OpenCV 分析環境を構築することを目的とし、 構築した. 検証用に OpenPose が動作し得る電 力消費の大きい GPU 搭載デスクトップ型 PC で の処理を行った. さらにこれら2つの手法と比較 するために検証実験として,一般的な動作解析 ソフトウェアである Kinovea を用いたトラッキング の結果との比較検討を行った. 跳躍者及び指導 者が,このシステムを用いて低コストに撮影及び 分析ができ、それらを基に選手に即時的なフィ ードバックを行うというサイクルを実践し、従来の 経験や感覚での指導を数値化し客観性および 再現性を持たせ得る手法を提案,検証し,ここ に報告する.

II. 方法

1. 分析対象者

本研究では,近畿大学工業高等専門学校専攻科電気電子専攻1年,2021年度の陸上男子三段跳び U20 日本記録保持者の伊藤陸選手(以下,跳躍者)を分析対象者(2021年10月時に於いて,記録16.35m,年齢20歳,身長1.87m,体重70kg)とした.撮影については近畿大学工業高等専門学校陸上競技部監督で総合システム工学科専任教員の松尾大介氏(以下,チーム責任者)の許可の元,跳躍者の大会競技への影響や体への負荷の無い時期と時間帯,

天候条件等を見極め,近畿大学工業高等専門学校内陸上競技用トラックにおいて 2021 年度専攻科特別研究Iの正規授業・研究時間での実施とした.映像の収集および分析共に,チーム責任者および跳躍者と研究の目的及び分析手法を随時情報共有しながら実施した.

2. 映像収集

本研究における実験概念図を Figure 1 に示 す. 実験時期は 2021 年 10 月の 20℃の快晴か つ無風の日を選び,動画に写り込む跳躍者の 影の影響を最小限とするため午前 11 時~12 時 の時間帯の実施とした. 撮影にはスマートフォン 内臓カメラ(iPhoneXS, 4K, 60FPS)および三脚 (最高伸長 120 [cm])を用いた. 撮影範囲は, 踏 切板から手前 9m が収まる範囲となるよう, 陸上 トラックから 5m 離れた位置から草木等のバック グラウンドノイズの写り込みが無い方向へカメラ を向けた. 助走領域である踏切板手前 9m の範 囲を動画に捉えているかどうかを確認するため に,カメラの視野の両端に写り込む位置にコー ン(円錐形,直径 24cm,高さ10cm)を設置した. 跳躍者は体への負担を考慮し,数分程度の休 憩を行いながら踏切板までの 10 回の助走を行 い,動画を撮影した.本実験時,跳躍者は踏切 手前 9m を 4 歩で助走する事を想定し助走を行 うこととした. 撮影した動画には、トリミング等の 動画編集を行い,本研究と無関係な上半身部 分を切り取り、跳躍者の下半身のみが写るように し、精度と処理速度を考慮し720×128 画素の画 像サイズに変換し処理することとした.

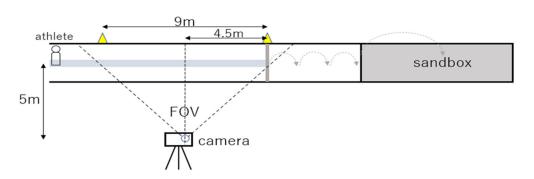


Figure 1. Alignment on a track for approach run, sand box, FOV of a smartphone camera, tripod.

3. 助走ストライドと速度の定義

本研究では、助走時における片方の足の接地からもう一方の足での次の接地までを 1 ストライドと定義するが、画像処理による自動抽出方法毎に異なる 2 つの定義を行う。まず OpenPoseによる場合については、Figure 2 のように推定された跳躍者の片足の先端のノードが地面に接地してから地面を離れるまでの時間 Δt の時刻 $\Delta t/2$ における座標から、次の一歩の片足が同様に接地してから離れるまでの時間 Δt の半分の時刻 $\Delta t/2$ における座標間の距離を、画像上における 1 ストライドとした。片足の先端は地面についてから即座に離れるわけではなく、接地から離地まで一定時間 Δt だけかかるために中間時間を推定する必要があるためである。一方、OpenCV による背景差分法の場合につい

では Figure 3 に示すように、跳躍者の輪郭を自動抽出した後に境界矩形で自動的に囲む. 1 ストライド中に足を開いている状況では体が空中に浮いているため、片足が接地している状況で最も両足が接近している状態における片足の踵の最後部から、次の一歩の後に再度両足を最も接近させた時の接地している足の踵の最後部までの距離を 1 ストライドとした. 速度v [pix/sec] については上記 2 つのいずれの方法についても、定義したストライドを挟む 2 つの地点間のフレーム数を N [frames]、ストライドを S [pix]、フレーム間の時間を 1/60 [sec] とし、下記のように定義した.

 $v = \frac{S[pix] * 60[sec]}{N[frames]}$

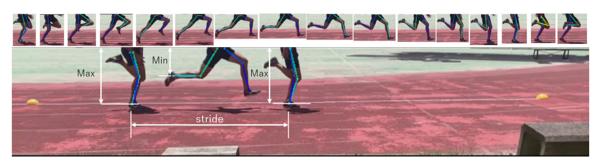


Figure 2. A stride with bone information(upper), a definition of a stride (lower) by OpenPose.

移動速度の定義については, OpenPose の場合 は足の先端ノードが接地している時の画像中に おける移動速度を, OpenCV による背景差分法 の場合は両足が最も接近し片足が接地している 状態での矩形の左上端の一点の速度とした. 本 実験を行う前までの予備実験及び練習時のデ ータを用いて実時間への変換を行うと, v [pix /sec] * 0.75 により実時間における秒速 [cm/sec] に近似ができることがわかっている.こ れは画像中央部における跳躍者のシューズの サイズ 21[pix]と実際のサイズ(28cm)とが一致 するよう求めた換算パラメータが 0.75 であること による。実験を行った陸上トラック上には石灰な どの物理的な方法による足跡抽出は望ましくな いため、またマーカー装着などは本来の跳躍に 影響があるため, あらかじめ跳躍者が過去に測 定等により得たおよその実ストライド長に近いか

等の即時性を考慮した。本研究では画像内に おける相対的速度を得ることが目的であるため, 実空間における実速度測定は不要である. 画像 中の距離の単位は画素 [pix] であるが, 助走区 間に設置したコーンの間の距離が9mであり,画 像中の画素単位での距離を 0.75 で除する事に よって cm 単位での距離の換算ができることが予 備実験により分かっているため実空間での速度 を得るためにはそのように処理を行うものとした. ただし検証時にはコーンの実測位置を用いて 2 次元 DLT 方により得た値を用いて検証を行う. カメラのキャリブレーションについては OpenCV 標準の方法を用い、レンズ歪みパラメータ (Distortion coefficients) \sharp (0.058, -2.072, -0.027, -0.018, 4.872), 内部パラメータ (Intrinsic parameters)については焦点距離 (focal length)が(1.14×10³, 1.135×10³), 光学

中 心(optical centers)が $(4.726 \times 10^2, 3.773 \times 10^2)$ であったため、これらの値を用いて動画の歪み補正を行った.

4. 分析項目

4.1 OpenPose による足の先端位置の推定

Linux(Ubuntu 18.04, 64bit), python2.7 環境を構築した GPU(QuadroK4000)搭載デスクトップ型 PC を 1 台準備し,動画を読み込み跳躍者の関節推定を行う(Figure 2). 地面から数 cm高い(低い,前後にずれる)位置が足の踵またはつま先となる. ストライドを自動抽出するためには地面に片足が接地している Δt 秒間の $\Delta t/2$ 時刻における点同士の距離を計算すればストライドを抽出できる.

4.2 OpenPose におけるストライドと速度自動抽 出の原理

Figure2に示すように、片足が接地している時の足の先端ノードの座標間の距離を1ストライドとするため、画像原点である最も左上の端点から下向きを正とすると、画像の最上部から片足の先端の点までの距離が最も長いときが接地状態となる。そのためストライドを跨いでいるときは両足が空中に浮いており片足の先端の点の画像最上部からの距離は最小となる。両足が接近し片足が地面に接地しているときが画像最上部からの距離が最大となる。9mの間の4ストライドとはすなわち4回跨ぐことであり、その間に5回の片足の接地が発生する。横軸をフレーム番号、縦軸を画像最上部から片足の先端の点までの距離とすると、サインカーブのような曲線(以下、

ストライドカーブと呼ぶ)を得ることができ、5回の 片足の接地に相当する5つの極大値が得られる. ストライドカーブに Gaussian モデルをフィッティ ングすることで極大点のフレーム番号がわかる ため、その時の画像左端からの画素上での距離 の差分を得られればその間隔をストライドとして 速度と共に自動抽出ができる.速度については ストライドカーブを Gaussian でフィットして得ら れたピーク位置[pix]間の距離をフレーム数で 除することにより1ストライドを跳躍者が通過する 平均速度として計算する。

4.3 OpenCV による背景差分法における足の先端位置の推定

OpenCV による背景差分法は OpenPose のよ うに消費電力の大きい GPU を必要とせずに動 作する. 汎用オンボード GPU 搭載の B5 サイズ (HDD: 250GB, RAM: 2GB, CPU: Atom 2GHz, GPU: インテル グラフィックス・メディア・アクセラ レータ3150, OS: Ubuntu16 32bit)およびA4サ イズ(SSD:128GB, RAM:8GB, CPU:AMD Dual 1.6GHz, GPU: AMD Radeon HD7310, OS: Ubuntu18 64bit)の小型で低消費電力のノ ート型 PC に python2.7 環境を準備し, 高速に 処理させている. OpenCV に標準装備されてい る背景差分法アルゴリズムのうち, バックグラウ ンドノイズを拾わず最も跳躍者の輪郭をよく抽出 するアルゴリズムを選択し、人物の輪郭抽出お よびそのバウンディングボックス(以下,境界矩 形)を自動表示させる. 輪郭および境界矩形は 跳躍者の両足の接近状況をよく抽出できている ことがわかる(Figure 3).

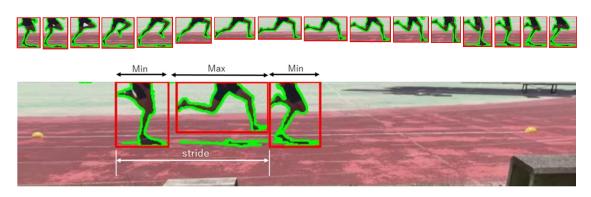


Figure 3. A stride with contour and bounding rectangle (upper), a definition of a stride (lower) by OpenCV background subtraction.

4.4 OpenCV による背景差分法におけるストライドと速度自動抽出の原理

両足を最も接近させた状態での境界矩形の幅 は助走中極小となり、9mの間に5回出現する. その間の4つの部分がストライドを跨いでいる状 態となり, 境界矩形の幅が極大となる. 横軸をフ レーム番号,縦軸を境界矩形の幅とすると,4 つの山と 5 つの谷からなるストライドカーブが得 られる. 5 つの谷は端部が途切れているため, 極大値である 4 つの山に Gaussian フィッティン グすることによりピークを求め、ピークに対応す る極小値を求める. これらの極小値におけるフ レームの番号およびそれに一致する画像左端 からの画素距離が得られると,極小値間隔を1 ストライドとして 自動抽出 することができ Gaussian でフィットして得られたピーク位置 [pix] 間の距離をフレーム数で除することにより、 平均速度が得られる. OpenCV による背景差分 法および OpenPose による姿勢推定ともに, Python 標準である lmfit ライブラリを用いてそれ ぞれの山または谷に対応した複数の Gaussian および底部ベースライン除去のための Exponential モデルを用いて危険率 5%未満と してカイ二乗フィッティングを行い, reduced chi-square を一致度の評価指標とした.

III 結果

1. OpenPose による関節推定で得られたストライドカーブへの Gaussian フィッティング 結果

Figure 4 に示すとおり、縦軸を Figure 2 の最上部からの距離 [pix]、横軸をフレーム番号としてストライドカーブを表示すると 5 つの山を持つため、5 つの Gaussian と 1 つの Exponential で

フィッティングを行った. 接地している足の先端 部分は、もう一方の足が次のストライドを跨ぐま では離地できないため, その間に上下に微小振 動する波として殆ど全ての山のピーク部分に現 れている. Gaussian でのフィッティングにより真 のピークに近い値を最尤推定できていることが わかる. カーブによっては、No.4のように画像最 上部から足先のノードまでの画素距離が長めに なっているものがある. 横軸のフレーム番号につ いては,10回の助走の動画の中に跳躍者が写 り込み始めるフレームが異なるため 0~90 フレ ームの間でばらつきが有る. 全体として足先のノ ードを推定できているため, ストライドカーブの 山と谷がはっきりと得られており、それぞれに対 する Gaussian モデルが高い適合度である事が わかる. フィッティングパラメータ及び適合度を 見ると、Table1 に示すように No.6 のフィッティン グでは reduced chi-square が大きく, その他は 3以上7未満となっており危険率 0.05, 自由度 (60-17=43) のカイ二乗分布に従うとすると、 棄却域(>59.30)であるため非常に高い適合度 でフィッティングできていることがわかる. Variables については Gaussian が 3, Exponential が 2 パラメータで 5 つの山へのフィ ッティングのため全 17 パラメータとなっている. Datapoints については 9m を約 60 フレームで 通過しているため概ね 60 となっている. フィッ ティングの評価回数である function evals につ いては適合度が低い No.6 等では試行回数 (function evals)が多く, No2 等の chi-square の小さい適合しやすいカーブにおいて試行回 数は概ね少なくなっている.

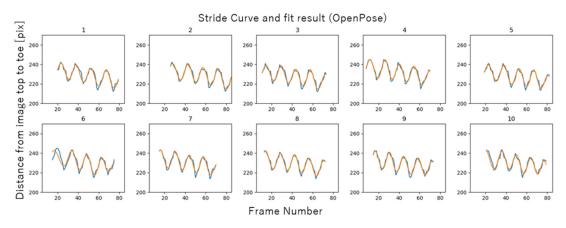


Figure 4. The stride curve (blue) and fitted curve (orange) by OpenPose.

Table 1. The reduced chi-square of the Gaussian fitting result for the stride-curve by OpenPose.

		#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10
	# function evals	317	111	147	111	186	446	147	129	185	129
	# data points	60	59	61	59	63	60	55	59	56	57
OpenPose	# variables	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
	chi-square	238.5	168.24	230.71	185.85	195.65	586.68	239.74	133.82	192.55	263.7
	reduced chi-square	5.55	4.01	5.24	4.43	4.25	13.64	6.31	3.19	4.94	6.59

2. OpenCV による背景差分法で得られたストライドカーブへの Gaussian フィッティング結果

OpenCVによる背景差分法で得られた跳躍者 の輪郭から得た境界矩形の幅を縦軸にとり,横 軸にフレーム番号をとったストライドカーブ及び それに対する Gaussian モデルフィッティングの 結果を Figure 5 に示す. No.4 の 20 フレーム あたりにある 1 ストライド目については、風による 草などの揺らぎの影響がないにも関わらずバッ クグラウンドノイズが大きく, そのため 30pix 程度 境界矩形の幅が大きくなっている. また全てのス トライドカーブに高周波の微小振動が混在して いる. 全体的にストライドを跨ぐ動作に相当する 山と谷とがストライド数分だけ得られている事が わかる. それらに対するフィッティング結果につ いては概ね Gaussian モデルが正しくフィットで きている. これらのデータに対するフィッティング パラメータ及び適合度を Table 2 に示す. Variables については Gaussian を 4 つの山ヘフ ィッティングしているため全12パラメータであり, それに Exponential の 2 パラメータを加えた 14 パラメータとなっている. Datapoints については 概ね 60 となっている. reduced chi-square は No.4 以外はいずれも 25 から 60 程度となってい るが,これらはデータの谷部分への不一致およ び山に混在した微小振動が適合度を低くしてい ると考えられる. 危険率 0.05, 自由度(60-14 = 46) のカイ二乗分布に従うとすると,棄却域 (>62.83)であるため山のピークに Gaussian のピ ークが良く適合しており各山のピークに対応す るフレーム番号が推定できているため, No.4 で は棄却ではあるもののこれらの結果からストライ ドおよび速度を求めた. フレーム番号 0 を基準と し、フィッティングで求めた山のピークにおける フレーム番号を基に、山のピークとピークとの間 の最小値をとるフレーム番号を求めると, その時 が両足の最も近い, ストライドを跨ぐ前の状態で ある. こうすることで極小値にとどまることなく最 小値を得る. 以上 OpenPose, OpenCV いずれ の方法においても得るべき山のピークにおける フレーム番号と, それに対する跳躍者の画像上 における位置が得られている.

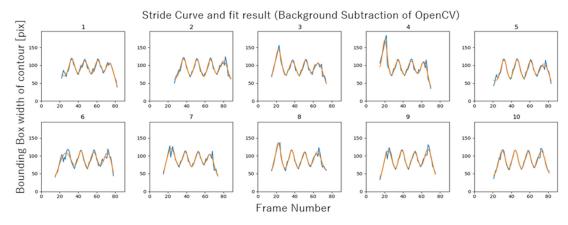


Figure 5. Stride Curve (blue) and fitted curve (orange) by OpenCV background subtraction.

Table 2. The reduced chi-square of the Gaussian fitting result for the stride-curve by OpenCV background subtraction.

		#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10
	# function evals	1808	263	528	371	451	9486	567	139	30016	215
	# data points	60	62	58	56	63	64	60	60	61	61
OpenCV	# variables	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
(Background Subtraction)	chi-square	1403.07	1857.77	1479.17	3758.5	1835.98	2974.99	2089.63	1496.33	1800.18	1183.42
	reduced chi-square	30.5	38.7	33.62	89.49	37.47	59.5	45.43	32.53	38.3	25.18

3.ストライドと速度の自動抽出

ストライドを挟む両端の間のフレーム数により 1 ストライドを跨ぐのにかかる時間が得られる.こ の時間でストライドの長さを除する事によって動 画内での跳躍者の速度 [pix/sec] を得る. 10 回の助走データについて,予備実験時に跳躍 者の実際のストライドが 9m を 4 歩, つまり 1 ストライドが平均 225cm 前後であることが分かっているため、単位を cm に換算した. OpenPose、OpenCV それぞれにより得られた 10 回の走行の第 $1\sim4$ ストライド[cm]およびそれを跨ぐ速度[cm/s]を Table 3 に示す.

Table 3. Average and standard deviation of the stride[cm] and the velocity[cm/s] for 10 runs.

		1	2	3	4
OpenPose	stride [cm]	204.70 ± 3.94	209.69 ± 2.14	216.46 ± 4.02	239.12 ± 9.69
	velocity [cm/s]	832.85 ± 49.76	888.41 ± 49.07	908.86 ± 25.67	909.61 ± 59.17
OpenCV	stride [cm]	226.00 ± 12.76	208.40 ± 6.22	213.47 ± 10.14	239.07 ± 14.21
	velocity [cm/s]	811.33 ± 100.85	892.93 ± 17.98	934.53 ± 18.81	957.60 ± 48.99

縦軸に換算後のストライド[cm] をとり横軸に速度[cm/sec] を、OpenPose、OpenCV それぞれの手法から得られたデータ毎にプロットしたものが Figure 6、Figure 7である. この図においては 1 ストライドが $220\sim230$ [cm] 程度であれば理想であると見ることができ、その場合はOpenPose、OpenCV いずれの手法においても 4 ストライド目が最も高速かつストライドが最大値程度取れていることが分かる. 跳躍者は 9m を約

60[Frame]で通過しているため、得られた値は 現実的な速度とみなすことができる。両手法の 違いについて見ると、OpenPose の場合では速 度、ストライド共にばらつきが少ない.これは跳 躍者の足の先端(踝近傍)をほぼ確実に抽出で きているため、その位置および移動速度に大き な変化が見られないためと考えられる.OpenCV の場合では速度、ストライド共に外れ値がありば らつきが大きくなっている.ストライドが極端に短 い,または速度が極端に速い外れ値(第 1 四分位及び第 3 四分位,四分位偏差を考慮)については除外する事とした.これらを考慮しても,速度が増すにつれてストライドが伸びているように

は見えず,ストライドが伸びていても速度が遅く なっている等,規則性が見いだせないように見 える.

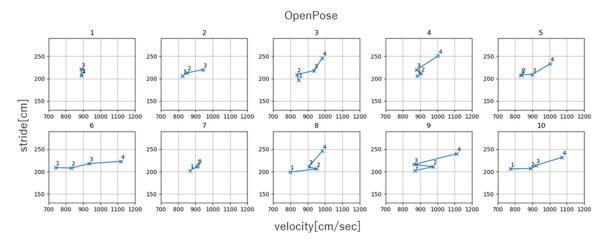


Figure 6. The relationships between the velocity and the stride (OpenPose).

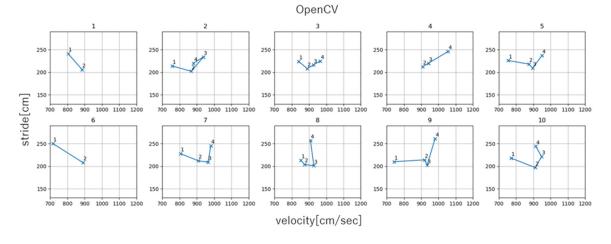


Figure 7. The relationships between the velocity and the stride (OpenCV background subtraction).

4. 2次元 DLT 法によるストライドとの比較

2次元 DLT 法(Walton, 1979)は実測値と 1 台のカメラにより得られた画像上での位置とを行列により換算できる方法である.本実験では助走距離の両端位置に置いたコーンおよび,カメラ設置時に助走距離の中点に置いたコーンの実測値から画像上でのコーンの位置とを求め,10 回の助走における跳躍者のシューズの中心点の画像上での位置から推定した実ストライドを求め,Table 4 のように平均とエラーバーを得,跳躍者のシューズサイズから換算したOpenPose およびOpenCV による値と比較した.

実際のコーンの3カ所の位置とDLTの値との誤差は0.1[cm]以下であった. 結果はFigure 8に示す通りDLTにより得られた10回の平均値に比べて第1,第4ストライドは誤差のほぼ範囲内ではあるが,第2,第3ストライドが誤差が大きくなっている. また,地上に置いたマーカーの画像上での位置を用いてカメラの回転角度を求めたところ,時計回りに0.81度回転していることがわかった. 三脚に付いている水準器により水平に設置した上でスマートフォンを載せているため,ほぼ水平に置けていた事を示している.

Table 4. Average and standard deviation of stride[cm] for 10 runs from 2 dimensional DLT.

		1	2	3	4
DLT	stride [cm]	215.10 ± 3.11	225.40 ± 3.31	233.30 ± 4.72	260.10 ± 7.37

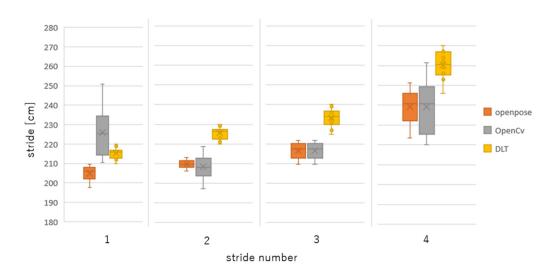


Figure 8. The stride length [cm] calculated by two proposal methods and 2 dimensional DLT.

5.ストライドと速度との関係

Figure 9 に示すように OpenPose, OpenCV それぞれの方法から得られた 10 回の助走すべてのデータのストライドと速度の相関については,

OpenPose の場合は両変数の間に有意な強い相関関係が見られ(r=0.975, p<0.05), . OpenCV の場合は両変数の間に有意な相関は見られなかった(r=0.109, p>0.05)

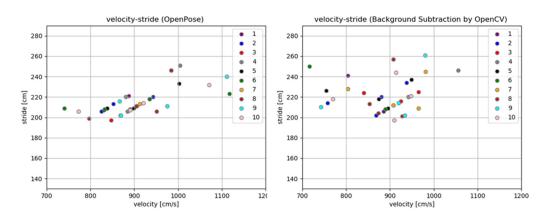


Figure 9. The relationships between the velocity and the stride.

6. 速度とストライドとの間の回帰分析

速度とストライドとの関係について回帰分析を 行った結果が Figure 10 である. OpenPose の 場合では独立変数の速度に対して明らかに従属変数のストライドが伸びていることがわかる (slope:0.225, intercept:10.06).

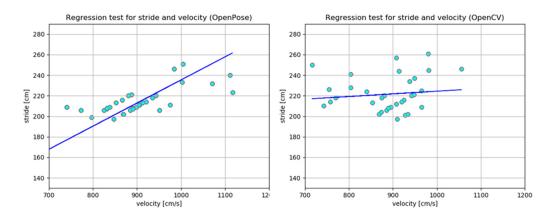


Figure 10. Regression line between the velocity and the stride.

7. FFT によるストライドカーブの周波数解析

Figure 4, Figure 5 に示す 10 回のストライドカーブに対して FFT を行った結果を Figure 11 に示す.

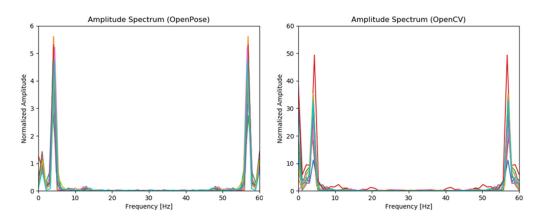


Figure 11. FFT result by stride curve from OpenPose and OpenCV background subtraction for all measurements.

センサを用いたステップそのものの周波数取得についてはすでに研究されているが(Hunter_et al., 2014), 我々が提案するストライドカーブからは容易に計算することができる. 両手法いずれもストライドカーブの周波数成分(例:1 周期を約15 [Frame]とすると15/60 [s], 約4[Hz])に高周波成分(約58[Hz])が混在していることが示された.

8.提案手法による検証実験

Figure 12(Left) に示すような実験環境にて、本研究と同じ高さの三脚(水準器付き)に本研究と同じ仕様のカメラを設置して検証実験を行った.検証には運動学的姿勢解析に用いられる一般的なアプリケーションである Kinovea を用

いることとした。コンクリートブロックが敷き詰められた私有地において 1m 間隔にマークをし,実験者の左足に●(直径 10cm),右足に○(外径 10cm, 内径 5cm)のマーカーを装着したうえで1m間隔にストライドを保つように小走りで左側から右側に向けて10回走行し撮影した.足につけたマーカーは Kinovea でのトラッキングにのみ必要であり,OpenPose,OpenCV では不要である.得られた動画は OpenCV 標準のカメラキャリブレーションによる歪み補正を行った.対象データはそれぞれの手法により抽出した足の先端位置[pix]およびそれを用いて計算したストライド[pix]とした.Figure 12 において,(a),(b)はKinovea を用いてマウスにより手動でマーカー選択し,ずれを手動で補正しながら得た足先の

抽出の様子である. (c), (d)は OpenPose による 足先ノードの抽出結果, (e), (f)は OpenCV によ る背景差分法による輪郭抽出結果であり、本研究の提案手法がよく再現できていることがわかる.

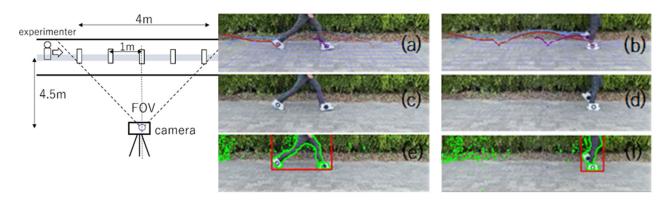


Figure 12. Alignment of experiment (Left) and verification result for Kinovea (a)(b), OpenPose (c)(d), OpenCV (e)(f).

Kinovea に対して, OpenPose および OpenCV で得た画像上における画像左端から の足先位置の平均値およびエラーバーとして標 準偏差を計算した結果が Table 5 であり, プロ ットしたものが Figure 13 である. Kinovea と OpenPose の結果とは誤差の範囲内ではあるが、 OpenCV による結果のみ画像左側に 30pix 程 度ずれていることがわかる. これは Figure 12(b)(d)と(f)とを比較すると読み取れるが, OpenCV では抽出する座標が矩形の左端, つま り接地していない方の踵の端であるため, およそ 一足分のシューズのサイズだけ後ろにずれてい るためである. そのため接地している足の中心 のマーカーの位置およびノードの位置からずれ ており, それを図中の足のサイズ 30[pix]だけ補 正した図が Figure 13 の赤色右向き矢印でシフ

トした位置である. 検証実験で用いた動画中央 部分では 100[pix] 100[cm]となっている. こ れから, OpenCV による足の中心位置の推定は 足のサイズさえわかれば Kinovea および OpenPoseと無矛盾な結果が得られることがわか る. これらの位置からストライドを計算し、10回分 のデータに対して boxplot を行ったのが Figure 14である. 第1ストライドは実験者が目視した地 面のマーカーに向けて静止状態から一歩を跨 いでいるが、第2ストライド以降は走行中に目視 しているため若干マーカーの手前に踏み込んだ 可能性がある.3 つの方法で得たストライドは第 1ストライドではデータの50%分布部分がわずか に重なっているだけであるが, 第 2 ストライド以 降についてはデータの 50%分布部分がほぼ重 なっていることがわかる.

Table 5. Calculated distance[pix] and error(σ) from the left edge of image for four strides.

	1		2		3		4	
Kinovea	138.61 ±	3.88	242.36 ±	3.80	339.50 ±	3.24	437.89 ±	5.26
OpenPose	137.40 ±	4.48	236.62 ±	4.51	333.50 ±	2.55	428.73 ±	3.04
OpenCV	118.90 ±	8.69	218.40 ±	8.45	316.10 ±	7.45	410.10 ±	12.43

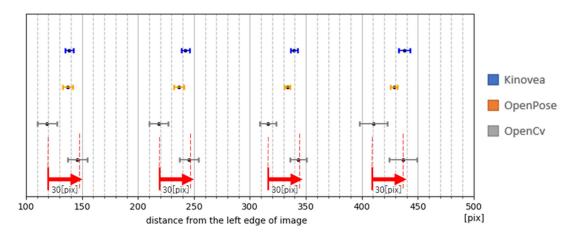


Figure 13. Calculated distance[pix] and error(σ) from the left edge of the image for four strides and 30[pix] shifted OpenCV data (Red arrow).

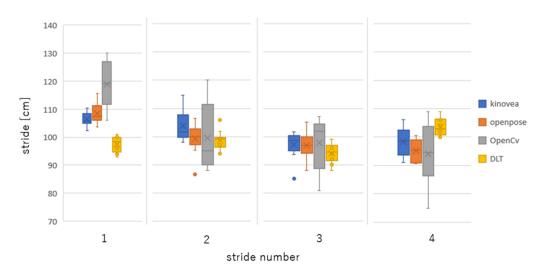


Figure 14. The stride length [cm] calculated by three methods for 10 experimental running and 2 dimensional DLT.

本実験と同様に 2 次元 DLT 法を用いて, あらかじめ 1m 間隔に置いたマーカーの実測値から画像上でのマーカーの位置を求め, 10 回の試行におけるマーカーの中心点の画像上での位置から推定した実ストライドを求めた. Figure 14に示すように, 第 1 ストライドのみ DLT に比べて10cm 程度大きくなっているが, 第 2~4 ストライドについては誤差の範囲内である事がわかる.また, 画像上のマーカーを用いてカメラの回転角度を求めたところ, 反時計回りに 0.55 度回転していることがわかった.

IV 考察

1.ストライドカーブ自動生成に関する考察

本研究では2種類の方法からストライドカーブを抽出する方法を提案した.1ストライドの両端

点において、OpenPose では接地している方の 足の先端(踝近傍)位置の推定による距離推定, OpenCV では片足が接地している時に後ろに曲 げたもう片足の踵の位置の推定による距離推定 である. OpenCV では背景差分法による輪郭抽 出の精度によって境界矩形の最小値および最 大値に影響がある. Figure 3 に示すように, 1ス トライドを跨いでいる間は跳躍者の足が接地して いないため、影の影響がないが、片足が接地し ている時は影の影響がある.このため実験段階 では影が真下に来る時間帯を選ぶ必要がある が, 正午過ぎまたは室内での照明下における処 理では影の影響を受ける. これを回避するため には輪郭抽出の範囲を閾値として影の部分を排 除するようにパラメータを調整する必要がある. OpenCV による背景差分法のメリットとしては動

画の再生実時間で処理が可能であることである. 一方、OpenPoseではハイスペックな GPU を必要とするために処理環境の構築に制限があり、処理に要する時間も1動画について3~5分程度かかり、容易に構築し即処理することが可能であるとは言い難い.いずれの手法についても、スマートフォンで撮影した動画の解像度のままでは処理が非常に重く実現性がないため、本研究で行った低解像度にトリミングした上での高速処理が必要となり、精度を犠牲にすることになる.可用性と精度とのトレードオフを考慮し自動化を行う必要がある.

いずれの方法についても、跳躍者がストライドを跨ぐ動作およびその前後に両足が閉じている動作を、二つの方法を用いてそれぞれ独立な手順によって定量的なカーブとして自動生成可能であること、またこのカーブを一つの信号として処理すれば跳躍動作の修正等に資するパラメータを得られることが示唆された.

2. カメラと助走区間の中点とを結ぶ軸から離れた位置におけるストライドの見え方に関する考察

DLT の結果との誤差の要因を考えるため、Figure 15 のように助走区間の中点とカメラを設置している点とを結ぶ軸から左右に遠ざかるにつれてカメラ位置からストライドがどのように見えるかについて、単純な平面幾何モデルを用いて考察した. これから、点 C に置いたカメラから見えるストライドは、カメラと助走区間の中点 Oを結

ぶ軸から遠いほど、つまりDが大きく(>d)、 θ_0 が 大きくなるほど縮んで見えることがわかる.これ により, 跳躍者による 9m の助走区間におけるス トライド[cm]のうち, D=4.5[m], d=5[m]として収 縮率を計算した結果,第1,第4ストライドは 0.75, 第 2, 第 3 ストライドは 0.92 で除すること により画像上における収縮を基に戻せると考え ると Figure 16 のように第 2, 第 3 ストライドにつ いては Figure 8と比べて DLT との誤差がほぼ なくなるが、第 1、第 4 ストライドは大きく外れて しまうことがわかる. 同様に検証実験により得ら れた値については、D=2[m]、d=4.5[m]として収 縮率を計算すると第 1, 第 4 ストライドは 0.92, 第2, 第3ストライドは0.98で除することにより画 像上における収縮を基に戻せるが、Figure 17 に示す通り第 4 ストライドでは誤差が小さくなる が, 第 2, 第 3 ストライドについてはほぼ Figure 14 に比べて DLT との誤差に変化はないが第 1 ストライドについては大きく外れてしまうことがわ かる. これらの議論から, 単純な平面幾何モデ ルを用いた補正は条件付きで機能しており,計 測誤差の要因としてカメラと被写体との位置関 係, つまりカメラの位置と被写体に対する角度が 誤差要因として混入していることがわかる. カメ ラの光軸周りの回転ついては,水準器を使用し ているため殆ど無く, D=4.5m として余弦成分で の収縮を考慮しても 1mm 未満となるため無視で きると考えられる.

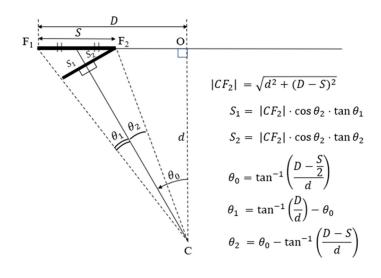


Figure 15. The stride length(S) appears to shrinks(S1 + S2) as it moves away from the axis connecting the camera(C) and the origin(O).

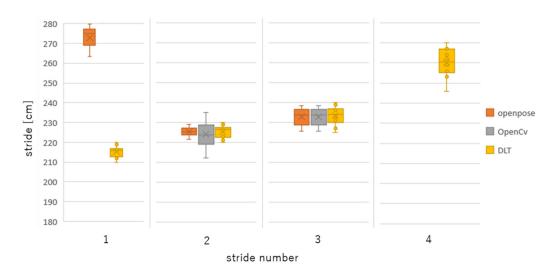


Figure 16. Calibrated stride length [cm] calculated by two proposal methods and 2 dimensional DLT for 9m 10 runs by an athlete.

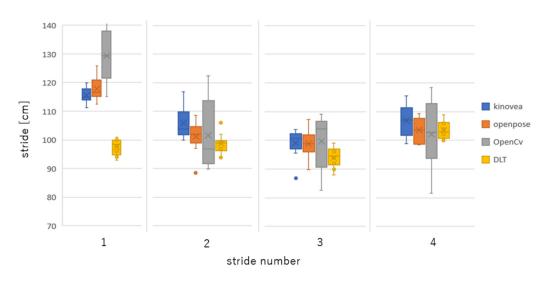


Figure 17. Calibrated stride length [cm] calculated by kinovea and two proposal methods and 2 dimensional DLT for 4m experimental 10 runs by an experimenter.

3. ストライドと速度の自動抽出に関する考察

ストライドカーブに対して複数の Gaussian および1つの Exponential によるフィッティングによってピークを推定することによりストライドおよび速度を自動計算する. したがって得られるパラメータが手法毎に異なるため,自動計算の手順が異なる. まず OpenPose による場合は 5 つのピークを得,接地しているのが足の先端(踝近傍)として画素距離を算出し,フレーム数から速度を計算する. この場合はフィッティングの適合度が良く, Table1 に示す通り reduced chi square が全て棄却域を外れており概ねデータをモデルに

よって再現できている. 問題としては足の先端 (踝近傍)の推定に失敗する場合があるため 10 回のデータへの関節推定では 3 回のデータに おいて欠測値が確認された事であるが,モデルフィッティングによる推定によりピーク位置の推定に影響はないといえる. 一方, OpenCV による背景差分法で得られたデータに対しては,ストライドカーブにフィッティングした Gaussian の最小値に対応する 5 つの極小値を得,それらの間の画素距離を算出し,フレーム数から速度を計算する. これは画面の左右の端に山が存在しないためである. 極小値を推定するために Gaussian

および Exponential により極大値を得,極大値 間の極小値を求めることになる.このため第1ス トライドおよび第4ストライドについては助走し始 めの部分とホップに入る踏切部分を確実に撮影 し,トリミング時にも確実に取り込むよう注意を要 する. Table 2 に示すフィッティング結果につい て, chi-square の値は全 10 回のデータへのフィ ッティングについて高く, No.4 については棄却 域に含まれている. 原因としては画角端点で輪 郭の抽出ができていないため第1および第4ス トライドが乱れていると考えられる. しかしストライ ドカーブの山のピークは概ね推定できており、い ずれの手法によっても得られた速度およびストラ イドは, 陸上トラックでの物理的な測定無しに実 際の値とみなせる値を抽出できていることが示 唆された.

4. ストライドと速度の関係に関する考察

Figure 6, Figure7に示す各手法による全 10 回の助走時における4つのストライドおよび速度 の値から、OpenPose により得られたデータに関 しては概ね第1ストライドから第4ストライドに至 るまでに速度が増してストライドが長くなってい ることがわかる. OpenCV による背景差分法によ り得られたデータに関しては、ストライドは第4ス トライドが最も長くはなっているが, 速度が有意 に増しているようには見えない. 手法毎に全 10 回の助走から得られたデータをプロットした Figure 9 のデータに対する相関分析の結果, OpenPoseにより得られたストライドと速度の関係 については有意な強い相関(r=0.975, p<0.05) があることがわかった.回帰分析の結果,速度を 独立変数とすればストライドは従属変数となり (slope:0.225, intercept:10.06), 速度によって ストライドを制御できる可能性を示唆している.

OpenCV による背景差分法により得られたデータについては Figure 7 で現れた傾向のように有意な相関は見られなかった. これら 2 つの方法の結果からは助走区間を一定のストライドで通過する方針を立てる場合, 必ずしも単に速度を増せばよいという判断ができないことを示唆している. Figure 6, Figure 7 では, 助走し, 次第

に速度を増しているが、4つのストライド数を維持しており、跳躍者の感覚による「良い記録」に結び付いた、または結び付くと考えられる時の助走速度とストライドとの関係は、9mを4ストライドで次第に速く、であったため、無矛盾な結果が得られたといえる.

5.検証実験に関する考察

検証結果から,運動学的姿勢解析に用いら れる一般的なアプリケーションであるKinoveaの 結果に対して、本研究で提案する2つの手法の うち, OpenPose では足先の位置が Kinovea に よる結果と比べて誤差の範囲内に収まっており, 自動的に Kinovea と同様の結果が得られること が示された.一方で OpenCV による背景差分法 では誤差が大きい.これは輪郭抽出を高速に行 うために低解像度の画像を用いている事が原因 で輪郭に幅ができてしまっており、また接地時の 跳躍者の影が影響していると考えられる. 換算 値に対して実測値を用いた DLT の結果と比較 すると Figure 14 のように第 1 ストライド以外に ついては誤差の範囲で無矛盾な結果が得られ ていることがわかる. なお Kinovea では跳躍者 の足にマーカーを付けなければトラッキングが できないが、OpenPose、OpenCV いずれの提 案方法においてもマーカーは不要であるため, 跳躍動作に何ら測定系が影響を与えることはな い. 今後計画しているスマートフォンでの OpenCV を用いた高速ストライド抽出のために は、精度と処理速度とのトレードオフを考慮し開 発する必要があると考えられる.

6. 本研究の問題点と今後の課題

本研究で行った撮影方法については練習時には可能であるが、試合時には跳躍者とカメラとの距離や角度、高さを考慮する必要がある。OpenCVでは跳躍者の影が特に輪郭抽出に影響を及ぼし、周辺に物体等の写り込みがあるとバックグラウンドノイズとなり、輪郭抽出が正しく行われず、OpenPoseでは処理対象が増えて処理に多大な時間を要する。また陸上競技においては競技者の重心を推定しその動きを基に記録

向上に資するか否かの指針とすることが行われている(Coh et al., 2011). 重心の推定は 3 次元動作解析装置などのように大規模かつ高価であるが視覚的評価に必須である(久保他, 2006)が, OpenCVで得られた矩形の幾何学的重心の利用方法を含めて検討すべきである. 本研究では低コストかつスマートフォンで撮影したデータの即応性を重視しているため OpenCV による高速推定の精度を OpenPose 等と比較検討しながら構築していく必要がある. これらを考慮できたとして、最終的にスマートフォン単体のみで自己完結的に処理を完遂できるアプリケーションとしての開発が今後の課題である.

V 結論

本研究の目的は、高価で設置に時間を要する機材等やマーカーを使用することなく、目視や手動によることなく跳躍者の真横方向からスマートフォンで撮影した動画のみから助走時のストライド、速度およびピッチを高速に自動抽出する方法を提案することであった。本研究では、以下の結果を得た.

- 1) OpenPose での跳躍者の姿勢推定によるストライド及び速度の自動抽出
- 2) 4 ストライド長 [204.7±3.94cm,209.69±2.14cm, 216.46±4.02cm, 239.12 ± 9.69cm], 接地点間の平均速度 [832.85±49.76cm/sec,888.41±49.07cm/se c,908.86±25.67cm/sec,909.61 ± 59.17cm/sec])
- 3) OpenCV の背景差分法での跳躍者の輪郭抽 出によるストライド及び速度の自動抽出
- 4) 4ストライド長 [226.0±12.76cm,208.40±6.22cm, 213.47±10.14cm, 239.07 ± 14.21cm], 接地点間の平均速度 [811.33±100.85cm/sec,892.93±17.98cm/s ec,934.53±18.81cm/sec,957.6 ± 48.99cm/sec])

- 5) ストライドの実距離を 2 次元 DLT 法により検証し誤差が許容範囲であること, 実距離を再現できていることを確認
- 6) 助走ストライドおよび速度の相関および回帰直線の推定(OpenPose による結果のみ相関有, (r=0.975, p<0.05)
- 7) ストライドカーブに対する FFT によるストライドピッチの抽出(4Hz)
- 8) 提案システムを用いた実証実験により想定する結果を再現(Kinovea による結果と誤差の範囲内で一致)

従来の目視や手動による動画分析や、大規模なハイスピードカメラ等を用いた環境構築を必要とせずとも学生個人や地域クラブ、学校クラブにおいてスマートフォンと三脚と低スペックノート型 PC が準備できれば本研究で開発したOpenCV 背景差分プログラムであれば数秒間で分析が可能となり、ストライドと速度についてはOpenPoseでの結果と差異の無い結果が得られ、OpenPose、OpenCVともにKinoveaの結果とも差異のない結果が得られることが示唆された.

文献

- Allen, Sam. J., King, Mark.A., Yeadon, M.
 R. (2016) Optimisation of phase ratio in the triple jump using computer simulation.,
 Human Movement Science., 46, 167-176
- Aoki, K., Katsumata, K., Hirose, K., Kohmura, Y. (2020) Relationship between competitive and jumping abilities in university track and field athletes., Journal of Physical Education and Sport., 20, 1423-1429
- Cao, Zhe., Hidalgo, Gines., Simon, Tomas.,
 Wei, Shih-En., Sheikh, Yaser. (2019)
 OpenPose: Realtime Multi-Person 2D Pose
 Estimation Using Part Affinity Fields.,
 IEEE Transactions on Pattern Analysis and
 Machine Intelligence., 43, 172-186
- · Cao, Zhe., Hidalgo, Gines., Simon, Tomas., Wei, Shih-En., Sheikh, Yaser. (2017)

- OpenPose: Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation Using Part Affinity Fields., IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)., 43, 7291-7299
- Coh, Milan., Stuhec, Stanko., Vetric, Rok.
 (2011) Consistency and Variability of Kinematic Parameters in the Triple Jump.,
 IAAF study., 26, 63-71
- Durai, C., Anantharaj, G. (2018) Influence of video modelling with video feedback on hang technique in triple jump., International Journal of Yogic, Human Movement and Sports Sciences., 3, 270-272
- · Einfalt, Morits., Dampeyrou, Charles., Zecha, Dan., Lienhart, Rainer. (2019) Frame-Level Event Detection in Athletics Videos with Pose-Based Convolutional Sequence Networks., Proceedings of the 2nd International Workshop on Multimedia Content Analysis in Sport., 42-50
- Hunter, Joseph. P., Marshall, Robert. N., McNair, Peter. J. (2004) Interaction of Step Length and Step Rate during Sprint Running., Medicine & Science in Sports & Exercise., 36, 261-71
- Jasminan, V., Chandana, A.W.S. (2021)
 Sagittal plane kinematics of triple jump: A review., Journal of Sports and Physical Education., 8, 53-60
- ・小山宏之,村木有也,武田理,大島雄治,阿江 通(2007) 競技会における一流男女棒高跳, 走幅跳および三段跳選手の助走速度分析., 日本陸上競技連盟 陸上競技研究紀要, 3, 104-122
- ・久保祐子,山口光國,大野範夫,福井勉. (2006)姿勢・動作分析における身体重心点 の視覚的評価の検討.,理学療法学,33,112-117
- · Liu, Hui., Mao, Dewei., Yu, Bing. (2015) Effect of approach run velocity on the optimal performance of the triple jump.,

- Journal of Sport and Health Science, 4, 347-352
- Mehmet, Kale., Alper, Asci., Coskun, Bayrak., Caner, Acikada. (2009)
 Relationships Among Jumping Performances and Sprint Parameters
 During Maximum Speed Phase in Sprinters., Journal of Strength and Conditioning
 Research., 23, 2272-2279
- Mohammed, Zerf., Idris, Mokkedes.
 Moulay., Ali, Bengoua., Nasreddin,
 Bendahmane. Med. (2015a) Which Causal
 Relationships Can Reject or Accept the
 Significant Optimum Distribution Ratios
 Phases in the Triple Jump., American
 Journal of Sports Science., 3, 73-78
- · Mohammed, Zerf. (2015b) The Impact of the Three Pushes Takeoffs Angel's Phases and their Distributions Strides Lengths On the Performance in Triple Jump., Internatinal Jounal of Modern Trends in Engineering and Research., 2, 317-323
- Mohammed, Zerf. (2015c) Influence Technique VS Ideal Model on Credibility Theory Distributions Ratios: A Case Study of Triple Jump Jump., European Scientific Journal July 2015 edition., 11, 334-346
- · Mohammed, Zerf., Idris, Mokkedes. Moulay., Ali, Bengoua., Nasreddin, Bendahmane. Med., and Abd-el-Kader, Guebli. (2015d) The Impact of the Techniques and Tactics Appropriate by the Athletes in Phase Triple Jump and Their Relationships with the Finale Results., Journal of Sports Science., 3, 179-185
- Nigussie, Yared. Tegegne. (2019) Teaching Long Jump for Higher Level., International Journal of Multidisciplinary Educational Research., 8, 170-177
- · Ognyan, Miladinovj., Bonov, Peter. (2004) Individual approach in improving the technique of triple jump for women., New

- Studies in Athletics IAAF quarterly magazine., 19, 27-36
- · Omar, Hussein. Mardan., (2015) A World Bio-Kinematic Model to Evaluate Achievements of Triple Jump Players for The Advanced Iraqi., The Swedish Journal of Scientific Research., 2, 6-12
- Pardilla, Herli., Hanif, Achmad. Sofyan.,
 Humaid, Hidayat., Dlis, Firmansyah.,
 Henjilito, Raffly., Jufrianis. (2019) Effect
 of Motor Ability and Self-Conficence on
 Triple Jump Skills in Youth Aged 18-20:
 Path Analysis Study Among Students at
 University College., Physical Education
 Theory and Methodology., 19, 69-75
- ・柴田篤志,小山宏之. (2017) 男子走幅跳選手 の助走における踏切4歩前からの設置位置お よび助走スピードの分析-日本ランキング上位 選手の事例-.,公益財団法人日本陸上競技連 盟陸上競技研究紀要,13,214-219
- · Starzak, Marcin., Makaruk, Hubert. (2016) The Differences in Step Length Adjustment

- between Long Jump and Triple Jump., Coordination Abilities in Physical Education, Sports and Rehabilitation., 39, 261-268
- · Walton, J.S. (1979) Close-Range cinephotogrammetry: Another approach to motion analysis., Science in Biomechanics Cinematography., Academic Publishers., 69-97
- · Wilson, Cassie., Simpson, Scott., and Hamill, Joseph. (2009) Movement coordination patterns in triple jump training drills., Journal of Sports Sciences., 27, 277-282
- Yagi, Kentaro., Hasegawa, Kunihiro.,
 Sugiura, Yuta., and Saito, Hideo. (2018)
 36th Conference of the International
 Society of Biomechanics in Sports,
 Auckland, New Zealand Proceedings, 36