

ランナーの怪我リスク要因の Foot Strike Pattern 計測と無拘束推定システム

神戸彩矢果^{1,a)} 鏑木崇史¹

概要：ランナーの怪我のリスクについて分析する方法の1つとして、着地時の接地パターン（Foot Strike Pattern, FSP）に注目した研究が行われている。これらの研究では足が地面に接地する部位による衝撃の大きさについて検証が行われ、後足部接地は前足部接地より着地時にかかる最大の衝撃が大きくなることから、怪我の発生率を高めているとされている。しかしながら、着地時の衝撃の大きさを正しく測定するためには、測定機材を身につける必要があり、日常的な使用には向かない。そこで本研究では無拘束な状態でFSPを推定することを提案する。具体的にはカメラを利用し、測定可能で汎用性の高い膝関節の角度に注目してFSPを推定する。この方式はスポーツ選手に限らず健康のために体を動かす高齢者の怪我予防などにも活用できることが期待できる。

キーワード：Foot Strike Pattern, FSP, 無拘束計測, OpenPose, スポーツ怪我リスク, 高齢者の怪我予防

Foot Strike Pattern Measurement and Unconstrained Estimation System for Injury Risk Factors in Runners

KAMBE SAYAKA^{1,a)} KABURAGI TAKASHI¹

Abstract: There are several studies that focus on the foot strike pattern (FSP) as a method of analyzing the risk of injury in runners. These studies have examined the magnitude of impact depending on the area where the foot touches the ground, and it has been suggested that the maximum impact of the rearfoot landing is greater than that of the forefoot landing, which increases the incidence of injury. However, in order to correctly measure the magnitude of the impact during landing, it is necessary to wear a measuring device, which is not suitable for daily use. In this study, we propose to estimate FSP in an unconstrained state. Specifically, we use a camera to estimate FSP by focusing on the angle of the knee joint, which is highly measurable and versatile. This method is expected to be used not only for athletes but also for elderly people who exercise for their health to prevent injuries.

Keywords: Foot Strike Pattern, FSP, Unconstrained Measurement, OpenPose, Sports Injuries, Injury Prevention for Elderly

1. はじめに

毎年1月2日と3日の2日間わたり開催される東京箱根間往復大学駅伝競走（箱根駅伝）は多くの日本人の関心を集める大会であり、一度は画面越しに応援したことがあるの

ではないだろうか。そこには、憧れの箱根駅伝の舞台上で走る選手の他にも、足の怪我を乗り越えることができず裏方として駅伝をサポートする選手の物語も紹介されることは少なくない。かつて長距離ランナーだった私自身も、足の怪我で苦しんだ時期があったことから、怪我を患いやすいラン

¹ 国際基督教大学
International Christian University, Mitaka, Tokyo 181-8585,
Japan

a) c221154k@icu.ac.jp

ナーとそうでないランナーの違いについて興味があった。

ランナーの怪我のリスクについて分析する方法の 1 つとして、着地時の接地パターン (Foot Strike Pattern, FSP) に注目した研究が行われている。例えば、Adam Daoud らの研究[4]では、大学のクロスカントリーチームに所属する中長距離ランナーの FSP の測定とそれぞれの選手が経験した怪我についての調査を行い、後足部接地を習慣としている選手の方が前足部接地を習慣としている選手より約 2 倍の反復性運動過多損傷のリスクがあったと述べている。さらに、Daniel Lieberman らの研究[1]では、足が地面に接地する際の衝撃の大きさにも注目し、後足部接地でのランニングは前足部接地によるランニングより着地時にかかる最大の衝撃が大きくなることから、怪我の発生率を高めているとしている。これらの研究により、着地時の衝撃を減少させることができるランニングフォームの推奨がランナーの怪我のリスクを下げるができる。しかしながら、Daniel Lieberman らの研究[1]や Sobhan Sobhani らの研究[3]では着地時の衝撃を測定するために圧力測定インソールやフォースプレートといった機材を使用しており、日常のトレーニングで手軽に測定することは難しい。また、FSP の推定においても Daniel Lieberman らの研究[1]や Adam Daoud らの研究[4]では、録画したランナーの動画を目視で確認して行っている。

そこで、本研究では無拘束な状態で測定可能であり汎用性の高い膝関節の角度に注目し、着地時の衝撃との関係を調査することで FSP を定量的に推定する方法を提案する。

この研究を通して幅広い選手に適用可能な着地時の衝撃を和らげるランニングフォーム、つまり足の怪我のリスクを低減することができるランニングフォームの指導に繋げることができれば、怪我で普段の練習に参加することができずに苦しむ選手に少しでも貢献できるのではないかと考えている。そして、ランニングはスポーツの基礎となる運動であることから、幅広いスポーツ選手に適用できる可能性がある。さらには、スポーツ選手に限らず健康のために体を動かす高齢者の怪我予防などにも活用できるのではないだろうか。

2. 提案手法

2.1 概要

提案手法ではランニングフォームを横から撮影した動画を利用し、体の部位を特徴点として抽出し、膝の角度とともに着磁時刻を求め、足裏にかかる衝撃を推定するものである。提案手法の概要を図 1 に示す。

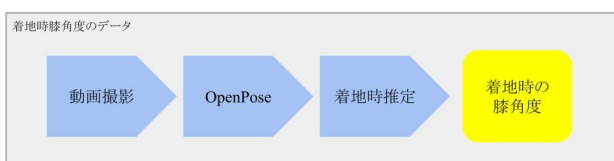


図 1 システム概要

2.2 膝関節データの取得方法

ランニング中の動作をカメラで撮影し、得られた動画から膝を中心とした角度を計測する目的で姿勢推定を行う。本研究では姿勢推定アルゴリズムに OpenPose を用いた。OpenPose は Zhe Cao ら[2]が論文で発表したモデルで画像や動画からリアルタイムで複数人の体、顔、手、足の特徴点とそれらの関係を検出し骨格を推定することができる技術である。OpenPose で検出できる特徴点は図 2 に示す通りである。時刻 t のフレーム上で特徴点の座標をそれぞれ右腰 ($x_{RHip}(t)$, $y_{RHip}(t)$), 右膝 ($x_{RKnee}(t)$, $y_{RKnee}(t)$), 右足首 ($x_{RAnkle}(t)$, $y_{RAnkle}(t)$), としたとき、膝角度 $\theta(t)$ は、

$$\theta(t) = \tan^{-1} \frac{x_{\dots}}{y_{\dots}} \quad (1)$$

で求まる。

着地時のフレーム T_{land} は、右踵座標 ($x_{RHeel}(t)$, $y_{RHeel}(t)$) を用いて

$$T_{land} = \underset{t}{\operatorname{argmin}} y_{RHeel}(t) \quad (2)$$

として Y 軸座標を用いてピーク推定を行い、着地時の膝角度を取得した。

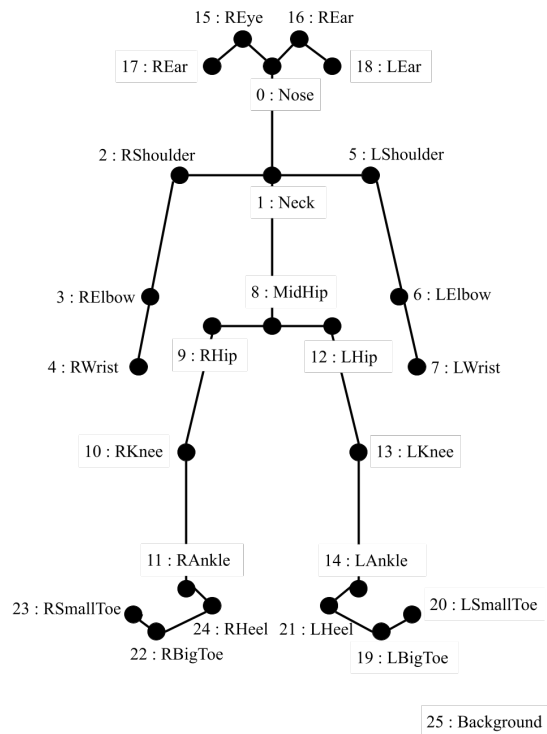


図 2 OpenPose で求まる特徴点

2.3 FSP 推定方法

着地時の衝撃を運動量として考えると、 $F = \frac{1}{2}mv^2$ なので、

図 3 のように足の長さ l と膝関節角度の時間差分を用いて

書き換えると,

$$v = l(\theta_t - \theta_{t-1})$$

となる. ここで, $(\theta_t - \theta_{t-1})$ 以外の l と $\frac{1}{2}m$ は一定となるため, 着地時の衝撃は膝関節角度の時間差分の2乗に比例することがいえる.

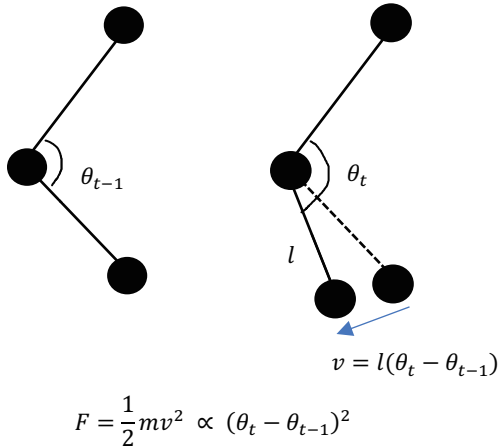


図3 膝関節の動きと運動量の関係

FSPの推定値 $\hat{z}(t)$ は, (1)式で求めた膝角度 $\theta(t)$ を用いて

$$\hat{z}(t) = w_1(\theta_t - \theta_{t-1})^2 + w_0 \quad (3)$$

として求まる. ただし w は事前に測定した値で調整する線形回帰の重みパラメタである.

3. 実験

3.1 実験概要

検証実験では比較のため足裏での圧力分布を同時に計測する. 本実験ではストレインゲージとRaspberryPiを用いた記録システムを開発し, 動画撮影と同時に計測することで提案手法の精度評価を行う. 評価実験の概要を図4に示す.

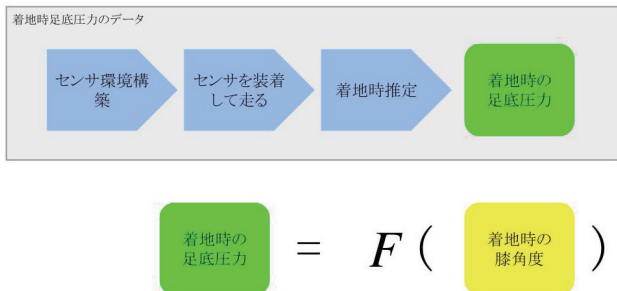


図4 評価実験の概要

3.2 膝関節データの取得方法

3.2.1 使用機材

iPhone XR (Apple Inc.) にタイムスタンプカメラというアプリケーションをインストールし, 動画撮影に使用した. このアプリケーションは自動で動画にタイムスタンプを追加することが可能であり, 着地時のデータと同期させる際に

参考にした. 動画の設定は1080p / 30fpsとして撮影した. これらのデータをOpenPoseで姿勢推定するために, クラウド上でJupyter notebook環境を無料提供しているGoogle Colaboratory (Google LLC)を使用した.

3.2.2 実験手順

国際基督教大学人工芝グラウンド南側の芝生にて図5に示すように撮影を行った. 撮影者はiPhone XRを胸の高さで持ち, 撮影者を中心として半径3mの円を描くように走る被験者を撮影した. 被験者は20代女性1名で行った.

被験者は大きく5回, つま先でジャンプをしてから走り始めることで, 3.3節の足底圧力データとの同期を取ることができるようにした. 走り始める前の5回目のジャンプ着地時点から60秒の長さにトリミングしたものを分析に使用した.

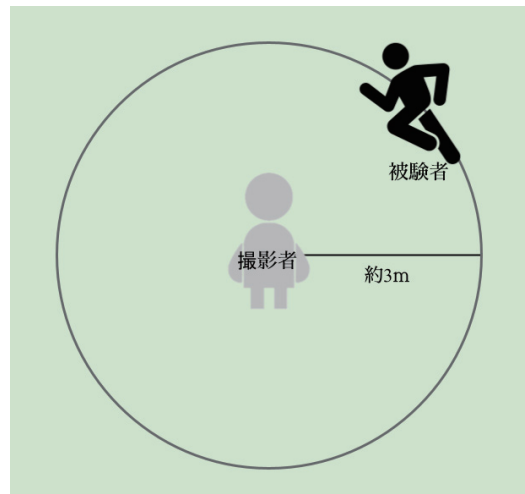


図5 実験状況

3.3 着地時足底圧力のレファレンスデータ取得方法

Raspberry Pi4 ModelB 8GB, Raspberry Pi用AD/DA拡張ボード, リボンケーブル, ブレッドボード, 抵抗膜式右足足圧インソールセンサ (ViaGasaFamido), 910抵抗器を図6のように接続した. また, AD/DA拡張ボードのピン番号と対応する, 圧力インソールセンサの8つのセンサには図7のようにピン番号と同じ番号を設定し, センサ毎に数値を判別しやすいように整えた.

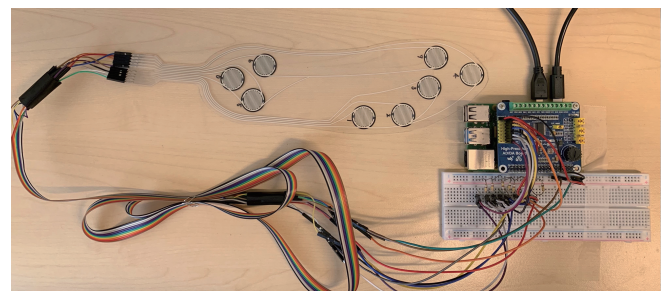


図6 接続構成全体図

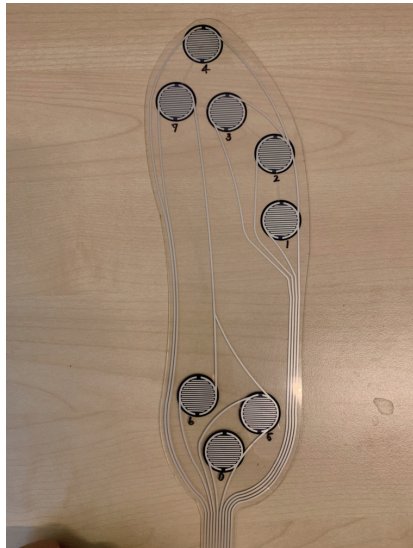


図 7 右足圧力センサ番号

センサから取得したデータ $\mathbf{z}(t) := (z_0(t), z_1(t), \dots, z_7(t))$ は SPI 通信で 1 分毎に 1 つのファイルに出力されるように設定し Raspberry Pi に保存した. このときファイル名に時刻を設定することで, 2.2 節の膝関節角度のデータと同期を取る際に使用した. また, 保存されたセンサ番号 0 から 7 のデータ平均を $\bar{z}(t) = \sum \mathbf{z}(t)$ 足底圧力データとし, そのデータのピーク推定を行い, ピークとなっている部分 $\tau_{land} = \operatorname{argmax}_t \bar{z}(t)$ を着地時の足底圧力データとして抽出した.

3.4 重みパラメタ推定方法

線形回帰の重みパラメタ w_i は 3.3 節で得られたレファレンスデータを利用して Python の scikit-learn パッケージで推定した.

3.5 実験条件

本実験における実験条件は表 1 に示す. 提案手法の有効性を検証する目的で運動量に基づく推定 (条件 1) とともに, 膝角度を用いた推定方法 (条件 1~6) の比較を行う. 着地時の膝角度のみに注目した実験は条件 2. 時系列性を考慮し着地時とその前や後にも注目して重回帰分析を行った実験は条件 4, 6. ノイズ除去の目的で着地時とその前や後を平均して単回帰分析を行った実験は条件 3, 5 とした.

表 1 実験条件

条件	特徴量
1	運動量 $(\theta_t - \theta_{t-1})^2$
2	着地時の膝角度 $\theta(T_{land})$
3	着地時とその前の計 10 フレームの膝角度の平均
4	着地時とその前の計 10 フレームの膝角度
5	着地時とその前後の計 20 フレームの膝角度の平均
6	着地時とその前後の計 20 フレームの膝角度

3.6 評価

実験の評価は平均平方二乗誤差 (Root Mean Squared Error, RMSE) を用いて評価した.

4. 結果

4.1 取得したデータ

OpenPose を用いて検出した特徴点を図 8 に示し, 出力結果から計算した膝角度 $\theta(t)$ の一部を図 9 に示す. また, 右踵座標 $y_{RHeel}(t)$ (青線) と着地時点の推定した T_{land} (赤プロット) が図 10 である.



図 8 検出した特徴点

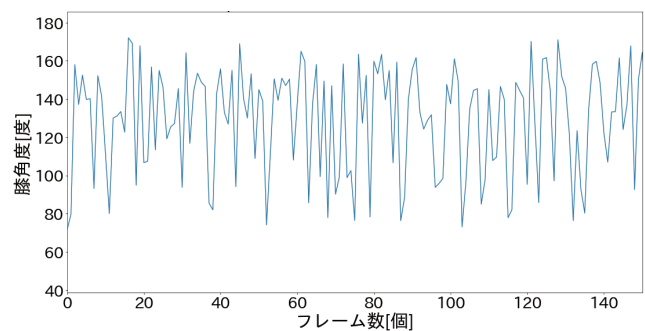


図 9 計測された膝角度 (一部)

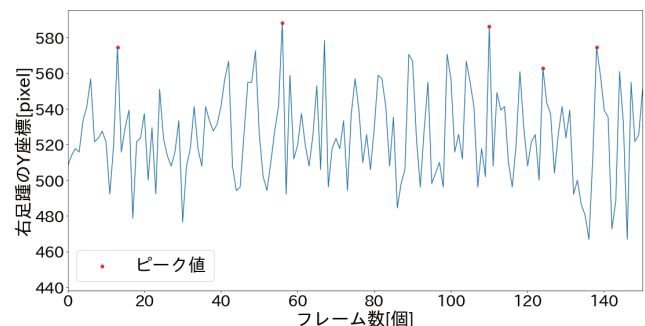


図 10 着地時のフレーム取得 (一部)

また, センサを用いて取得した足底圧力 $\bar{z}(t)$ (青線) と推定した着地時刻 τ_{land} (赤プロット) を図 11 に示す.

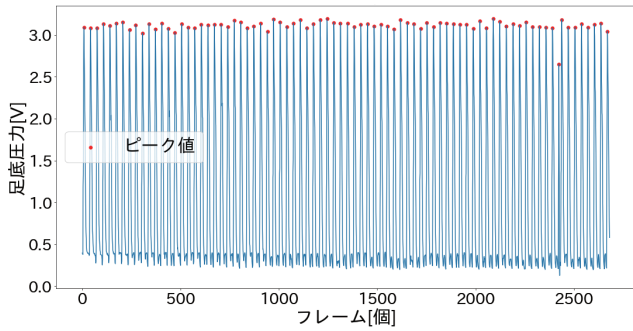


図 11 足底圧力データ (レファレンス)

4.2 分析結果

実験条件に沿って分析した結果を示す. 条件 1 から 6 の結果を図 12 から図 17 に示す. また, それぞれの結果における RMSE を図 18 に示す.

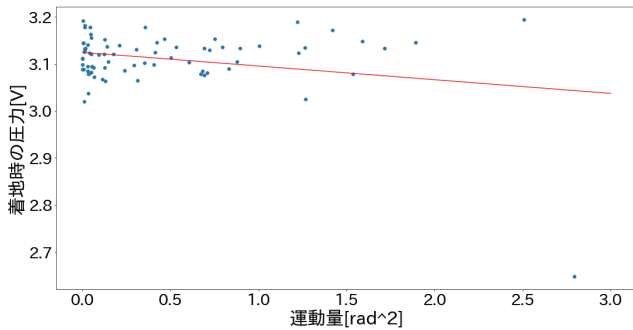


図 12 運動量に基づく推定 (条件 1)

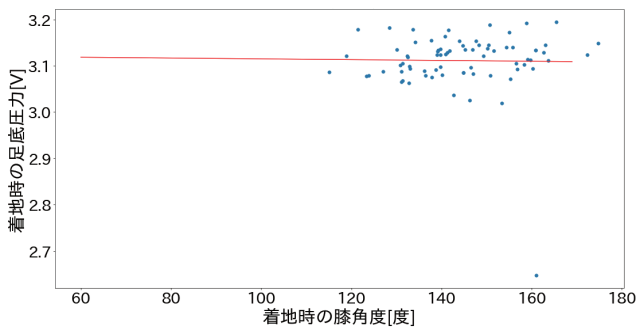


図 13 着地時の膝角度に基づく推定 (条件 2)

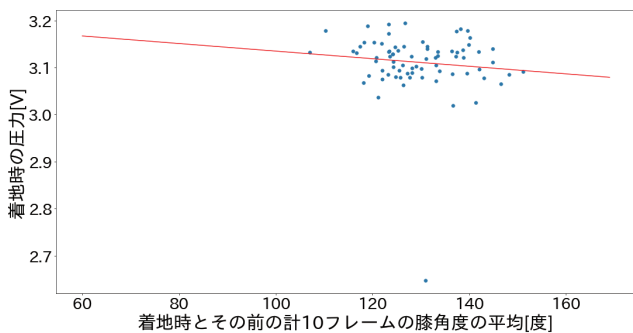


図 14 着地時とその前の計 10 フレームの膝角度の平均による推定 (条件 3)

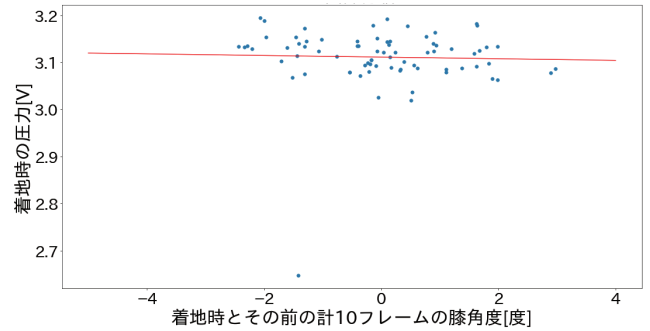


図 15 着地時とその前の計 10 フレームの膝角度による推定 (条件 4)

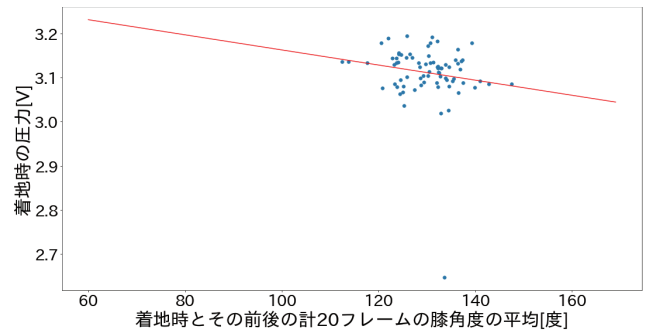


図 16 着地時とその前後の計 20 フレームの膝角度の平均による推定 (条件 5)

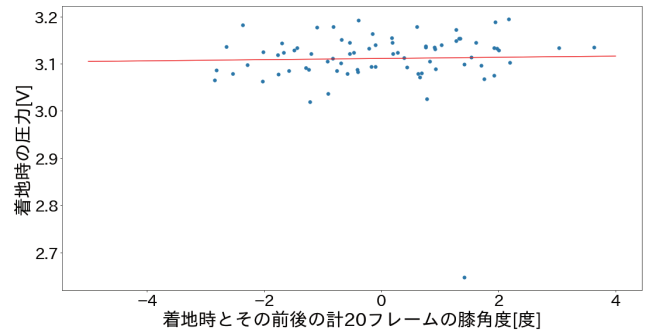


図 17 着地時とその前後の計 20 フレームの膝角度による推定 (条件 6)

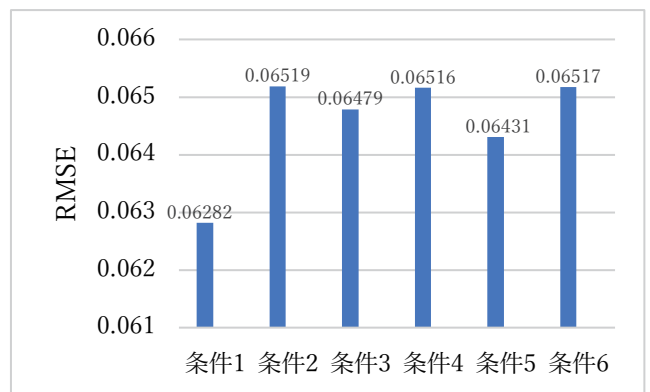


図 18 RMSE による性能評価

5. 考察

図 18 の結果から今回の実験の中では RMSE が最小となったので、提案手法が適切であるとわかった。これは着地時の足底にかかる衝撃を無拘束で推定するためには、着地時やその前後の膝角度に注目するより、膝の角速度から運動量を考慮して衝撃を推定する方が精度が高くなるということを示している。

6. むすび

今回の実験では、FSP 推定のためにまず図 7 のセンサ番号 0 から 7 までの平均を着地時の足底圧力とし、足底圧力の推定には OpenPose を用いて膝の角速度の運動量から推定した衝撃 (条件 6) を用いることが有効な方法であることがわかった。そのため今後は正確な FSP 推定のために、この条件を用いて、センサ番号毎の圧力分布について求めていきたい。

また、今後は現役のランナーから高齢者など幅広い被験者を対象として実験を行うことでより精度の高い FSP 推定を行い、スポーツ選手から高齢者といった幅広いランナーの怪我のリスク低減につなげられるフォームの提案に繋げたい。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 19K20386 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1]M. Venkadesan *et al.*, “Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners,” vol. 463, no. 7280, pp. 531–535, Jan. 2010, doi: 10.1038/nature08723.
- [2]Z. Cao, G. Hidalgo, T. Simon, S.-E. Wei, and Y. Sheikh, “OpenPose: Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation Using Part Affinity Fields,” vol. 43, no. 1, pp. 172–186, Jan. 2021, doi: 10.1109/TPAMI.2019.2929257.
- [3]S. Sobhani *et al.*, “Biomechanics of running with rocker shoes,” vol. 20, no. 1, pp. 38–44, 2016, doi: 10.1016/j.jsams.2016.04.008.
- [4]A. I. Daoud, G. J. Geissler, F. Wang, J. Saretsky, Y. A. Daoud, and D. E. LIEBerman, “Foot Strike and Injury Rates in Endurance Runners: A Retrospective Study,” vol. 44, no. 7, pp. 1325–1334, 2012, doi: 10.1249/MSS.0b013e3182465115.