

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：24402

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K19948

研究課題名（和文）ウェアラブルセンサおよびディープラーニングによる跳躍動作評価システムの開発

研究課題名（英文）Development of jump motion evaluation system using wearable sensors and a deep learning technique

研究代表者

鈴木 雄太（Suzuki, Yuta）

大阪市立大学・都市健康・スポーツ研究センター・講師

研究者番号：90747825

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、ウェアラブルセンサから得られる身体各部の運動データとディープラーニングを用いて跳躍動作を評価するシステムを開発することであった。学生12名を対象に垂直跳および立幅跳を行わせ、その時の動作と地面反力を測定するとともに、腰部、大腿、下腿、足部に貼付した慣性センサを用いて各部の加速度および角速度を測定した。慣性センサデータを入力、跳躍動作中の地面反力と下肢関節トルクを出力とするニューラルネットワークを構築した。本研究の結果から、慣性センサデータとニューラルネットワークにより跳躍動作中の地面反力と関節トルクを精度良く推定できることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の結果から、慣性センサとディープラーニングにより跳躍動作中の地面反力や関節トルクを精度良く推定できることがわかった。したがって、従来は専門的な分析が必要だった跳躍動作の詳細な評価を、慣性センサを用いることで簡便に行うことが可能となった。今後は継続的な動作評価をもとにしたコンディションやスポーツ障害のモニタリング、本システムを応用した他のスポーツ動作の評価システムの開発などが期待される。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to develop a system to estimate ground reaction forces and lower limb joint moments during vertical and horizontal jumping using inertial measurement units (IMUs) and artificial neural networks. Twelve university students participated in this study. Jump motions and ground reaction forces were measured during vertical and horizontal jumps. In addition, triaxial accelerations and angular velocities of the pelvis, thigh, shank, and foot of right leg were measured using four IMUs. A neural network was developed to estimate the ground reaction forces and joint moments from the data of IMUs. The results of the present study showed the potential of estimating the ground reaction forces and joint moments during both vertical and horizontal jumping using IMUs and artificial neural networks.

研究分野：スポーツ科学

キーワード：慣性センサ 動作分析 関節トルク 地面反力 ニューラルネットワーク 長・短期記憶 カルマンフィルタ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

跳躍動作は、人間が身につけておくべき基礎的動作の1つであり(日本体育協会, 2008), 同時に身体運動のパフォーマンスの評価指標としても重要な動作の1つである。従来, 跳躍動作のパフォーマンス評価には, ビデオカメラやモーションキャプチャシステムと地面反力計を用いた動作分析が用いられてきた。これらの装置を用いることは, 身体運動や身体に作用する力を正確に測定できるという利点がある一方で, 専門的な知識や高価な装置が必要であり, 測定を実験室で行わなければならないといった制約も多い。このような欠点を補うために, マットスイッチにより踏切時間(跳躍動作開始から踏切までの時間)や跳躍時間(踏切から着地までの時間)を測定し, 跳躍高や発揮されたパワー(力と速度の積)を推定する方法が開発された(図子ら, 1993)。この方法では, マットスイッチで動作に関する時間を測定すれば良いので, どこでも簡単に跳躍動作を評価できるという大きな利点がある。その一方で, 求められるパワーは脚全体で発揮されたものであり, 下肢の各関節で発揮されたパワーや仕事(パワーの積分値)を知ることができない, マットスイッチ上で運動を完結させねばならず立幅跳やバウンディングのような水平移動をともなう跳躍動作を評価できないといった限界もある。多くのスポーツでは, 水平方向の重心速度の変化をともなう跳躍も多いため, 単純な垂直跳のみならず水平移動をともなう跳躍動作も評価できることが求められる。さらに, そのようなシステムを実際の指導現場で利用するには, 動作データの収集をいかに簡便に行うことができるかが極めて重要である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は, ウェアラブルセンサから得られる身体各部の運動データとディープラーニングを用いて跳躍動作を評価するシステムを開発することであった。

### 3. 研究の方法

#### (1) データ収集

被験者は, 日常的にスポーツを行なっている学生12名(男子8名, 女子4名)とした。被験者には地面反力計の上で静止立位の状態から反動をともなう垂直跳および立幅跳を全力で各10試技, 計20試技行わせた。この時, 腕振りの影響を無くすために, 被験者には両手を腰にあてた状態で跳躍させた。跳躍動作を1台の高速度ビデオカメラ(120Hz)で撮影し, 地面反力(1000Hz)を測定するとともに, 腰部, 大腿, 下腿, 足部に貼付した慣性センサを用いて各部の加速度および角速度を測定した(200Hz)。ビデオカメラとアナログデータは, LEDランプの光と同時に発せられる信号をもとに時間同期した後, サンプリング周波数を120 Hzに統一した。

#### (2) データ処理

撮影した画像をもとに動作分析ソフト(Frame-DIAS)を用いてデジタイズし, 実長換算することで身体分析点の2次元座標値を得た。得られた分析点の2次元座標値と地面反力から, 阿江(1996)の身体部分慣性係数を用いて身体各部の重心位置, 質量および慣性モーメントを算出するとともに, 垂直跳では跳躍高を立幅跳では跳躍距離を求める。さらに, 逆動力学演算により下肢の関節トルクを算出した。

慣性センサの加速度および角速度は, 慣性センサ座標系で測定するため, カルマンフィルタを用いて絶対座標系へ変換した(広瀬と近藤, 2014)。本研究では, 以下の状態方程式と観測方程式を用いた。

$$\mathbf{x}_{t+1} = \mathbf{A}_t \mathbf{x}_t + \mathbf{B}_t \mathbf{u}_t + \mathbf{w}_t,$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{t+1} \\ \theta_{t+1} \\ \phi_{t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_t \\ \theta_t \\ \phi_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dt & 0 & 0 \\ 0 & dt & 0 \\ 0 & 0 & dt \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \mathbf{w}_t,$$

$$\mathbf{y}_t = \mathbf{C}_t \mathbf{x}_t + \mathbf{v}_t,$$

$$\begin{bmatrix} \theta_t \\ \phi_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tan^{-1}\left(\frac{-a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}}\right) \\ \tan^{-1}\left(\frac{a_x}{a_z}\right) \end{bmatrix} + \mathbf{v}_t,$$

ここで  $\psi, \theta, \phi$  はオイラー角,  $dt$  は時間間隔,  $\mathbf{w}$  と  $\mathbf{v}$  はプロセスノイズと観測ノイズである。 $a_x, a_y, a_z$  は慣性センサ座標系における重力加速度の  $x, y, z$  成分であり, 以下の式から求めた。

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g \sin \theta_t \\ -g \cos \theta_t \sin \varphi_t \\ -g \cos \theta_t \cos \varphi_t \end{bmatrix},$$

ここで  $g$  は重力加速度である。カルマンフィルタを解くために、以下の式を繰り返し計算することで、時々刻々の状態方程式を求めた。

$$\begin{aligned} \hat{x}_{t+1} &= A_t x_t + B_t u_t, \\ \hat{P}_{t+1} &= A_t P_t A_t + Q_t, \\ K_t &= \hat{P}_t C_t^T (C_t \hat{P}_t C_t^T + R_t)^{-1}, \\ x_t &= \hat{x}_t + K_t (y_t - C_t \hat{x}_t), \\ P_{t+1} &= (I - K_{t+1} C_t) \hat{P}_{t+1}, \end{aligned}$$

ここで  $P$  は誤差共分散行列、 $K$  はカルマンゲイン、 $Q$  と  $R$  はプロセスノイズと観測ノイズの共分散行列である。

### (3) ニューラルネットワークの構築

本研究では、慣性センサデータとニューラルネットワークを用いて跳躍動作中の地面反力と関節トルクを推定したが、その処理を2段階に分けて行なった。第1段階では、座標変換した慣性センサデータから踏切離地時を推定した。なお、離地は地面反力の鉛直成分が 10 N を下回った時点とした。次に、推定された離地時間でトリミングした慣性センサデータを入力とし、地面反力や関節トルクを推定した。ニューラルネットワークは、どちらも長・短期記憶 (Long-short term memory, LSTM) を用いた。ある被験者のニューラルネットワークは、他の全ての被験者のデータを教師データとして利用することで学習させ、これを全被験者に対して行なった。離地時の推定には、出力を支持期は 0、滞空期は 1 と分類する LSTM を構築し、出力が 0 から 1 に切り替わる瞬間を離地時とした。地面反力と関節トルクの推定には、各時刻の慣性センサデータを入力、体重で規格化した地面反力と関節トルクを出力とする LSTM を構築した。推定した地面反力と関節トルクの精度を検討するために、測定した地面反力と逆動力学演算により算出した関節トルクの差の二乗平均平方根を求めた。また、地面反力と関節トルクの測定値と推定値の相関係数を  $z$  変換して平均することで、被験者ごとの相関係数の平均値を求めた (Corey et al., 1998)。

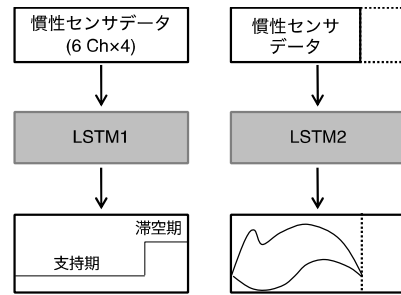


図1 本研究で構築したニューラルネットワークの概念図

## 4. 研究成果

### (1) 離地時間の推定

図2は、慣性センサデータと LSTM から推定した離地時間を典型例で示したものである。推定した離地時間と地面反力から算出した離地時間との差の二乗平均平方根は垂直跳で  $10 \pm 5$  ms、立幅跳で  $9 \pm 5$  ms であった。本研究では高速度カメラの 120 Hz に合わせて分析しており、推定した離地時間の誤差はどちらも 1 フレーム程度であった。

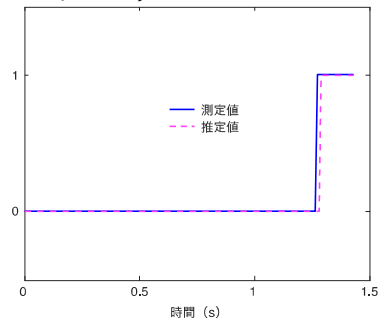


図2 垂直跳における慣性センサデータとニューラルネットワークを離地時間の推定 (典型例)。

### (2) 地面反力の推定

図3は、垂直跳と立幅跳における慣性センサデータと LSTM から推定した地面反力を測定した地面反力とともに典型例で示したものである。垂直跳と立幅跳ともに地面反力のパターンは鉛直成分と水平成分のどちらにおいても測定値と推定値で類似しており、その大きさもほぼ一致していた。

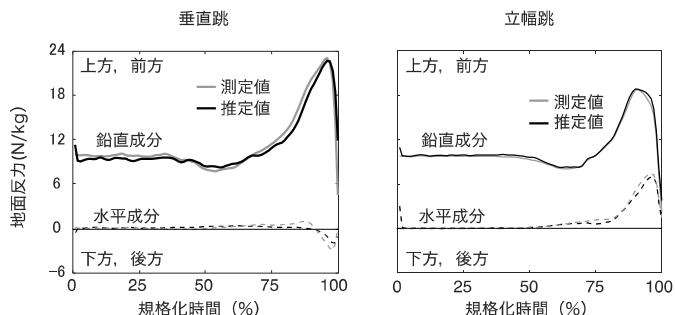


図3 垂直跳と立幅跳における慣性センサデータとニューラルネットワークを用いた地面反力の推定 (典型例)。実線は鉛直成分、破線は水平成分を示す。

図4は、垂直跳における地面反力の推定値と測定値との関係を典型例で示したものである。水平成分では相関係数が 0.861、回帰直線

の傾きが 1.20 であったのに対して、鉛直成分では相関係数が 0.954、回帰直線の傾きが 1.05 であり、推定精度は鉛直成分の方が高い傾向がみられた。全被験者における地面反力の推定値と測定値との相関係数は、垂直跳の水平成分で 0.619、鉛直成分で 0.970、立幅跳の水平成分で 0.929、鉛直成分で 0.930 あった。垂直跳における水平成分の相関係数が小さかったが、これは垂直跳において地面反力の水平成分がほぼ 0 N となる時間が長いことが影響したと考えられる。地面反力の推定値と測定値の回帰直線の傾きは、垂直跳の水平成分で 0.82、鉛直成分で 0.98、立幅跳の水平成分で 1.10、鉛直成分で 1.00 であった。

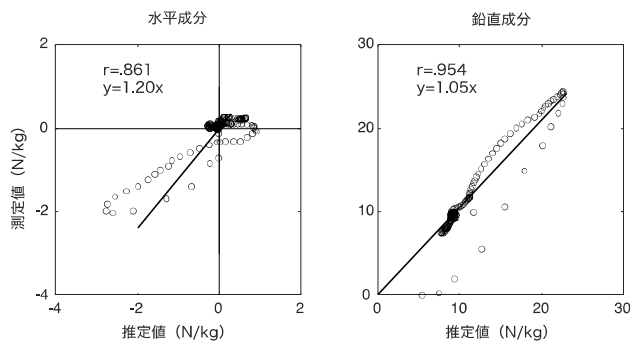


図4 垂直跳における地面反力の推定値と測定値との関係。

### (3) 関節トルクの推定

図5は、垂直跳と立幅跳における慣性センサデータと LSTM から推定した関節トルクを動作分析により算出した関節トルクとともに典型例で示したものである。垂直跳と立幅跳とも関節トルクの発揮パターンはいずれの関節においても測定値と推定値で類似しており、その大きさもおおよそ一致していた。

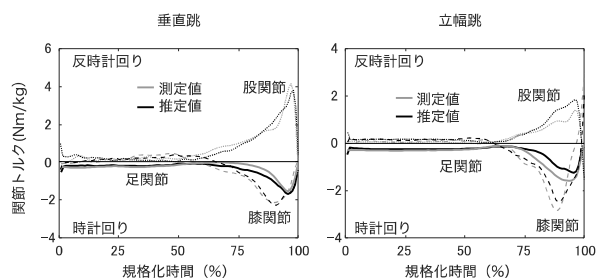


図5 垂直跳と立幅跳における慣性センサデータとニューラルネットワークを用いた関節トルクの推定 (典型例)。実線は足関節トルク (正:背屈, 負:底屈), 破線は膝関節トルク (正:伸展, 負:屈曲), 点線は股関節トルク (正:屈曲, 負:伸展) を示す。

図6は、垂直跳における足関節、膝関節、股関節トルクの推定値と測定値との関係を典型例で示したものである。相関係数はいずれの関節においても高かったが、回帰直線の傾きをみると、足関節では 1.09 であったのに対して、膝関節で 0.77、股関節で 0.74 であり、対象の試技では膝関節と股関節では関節トルクの大きさを過大評価していた傾向がみられた。全被験者における関節トルクの推定値と測定値との相関係数は、垂直跳の足関節で 0.901、膝関節で 0.914、股関節で 0.882、立幅跳の足関節で 0.861、膝関節で 0.894、股関節で 0.864 であり、相関係数はいずれも大きかった。関節トルクの推定値と測定値の回帰直線の傾きは、垂直跳の足関節で 1.00、膝関節で 1.03、股関節で 0.95、立幅跳の足関節で 1.02、膝関節で 1.03、股関節で 1.01 であった。

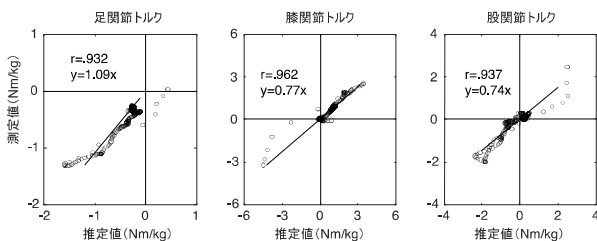


図6 垂直跳における足関節、膝関節、股関節トルクの推定値と測定値との関係。

本研究では、慣性センサデータと LSTM を用いて跳躍動作中の地面反力と関節トルクを推定するシステムを構築した。本研究の結果から、慣性センサデータと LSTM により跳躍動作中の地面反力と関節トルクを精度良く推定できることがわかった。したがって、従来は専門的な動作分析が必要だった跳躍動作の詳細な評価を、慣性センサを用いることで簡便に行うことが可能となった。今後は継続的な動作評価をもとにしたコンディションやスポーツ障害のモニタリング、本システムの他のスポーツ動作への応用などが期待される。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 鈴木 雄太, 村田 宗紀, 増村 雅尚	4. 巻 65
2. 論文標題 畳み込みニューラルネットワークを用いたバレーボールサーブ軌道の自動取得システムの開発	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 体育学研究	6. 最初と最後の頁 273-279
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5432/jjpehss.19096	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Suzuki Yuta, Murata Munenori	4. 巻 18
2. 論文標題 Comparison of Translational Momentum and Mechanical Energy Produced by Lower Limb Muscles between Horizontal and Vertical Jumps ? A Computer Simulation Study	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Sport and Health Science	6. 最初と最後の頁 207 ~ 214
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5432/ijshs.202006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Enomoto Yasushi, Suzuki Yuta, Hahn Michael, Aibara Takehiro, Yahata Takashi	4. 巻 38
2. 論文標題 Change in shock attenuation during marathon running	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of 38th Conference of the International Society of Biomechanics in Sports	6. 最初と最後の頁 824-827
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Suzuki Yuta, Enomoto Yasushi, Hahn Michael, Yahata Takashi, Aibara Takehiro	4. 巻 38
2. 論文標題 Estimation of ground reaction forces during running using inertial measurement units and artificial neural networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of 38th Conference of the International Society of Biomechanics in Sports	6. 最初と最後の頁 544-547
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Suzuki Y., Murata M.
2. 発表標題 Produced Momenta and Work Outputs of Lower Limb Muscles during Horizontal and Vertical Jumps
3. 学会等名 The 27th Congress of International Society of Biomechanics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Enomoto Yasushi, Suzuki Yuta, Hahn Michael, Aibara Takehiro, Yahata Takashi
2. 発表標題 Change in shock attenuation during marathon running
3. 学会等名 38th Conference of the International Society of Biomechanics in Sports (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Suzuki Yuta, Enomoto Yasushi, Hahn Michael, Yahata Takashi, Aibara Takehiro
2. 発表標題 Estimation of ground reaction forces during running using inertial measurement units and artificial neural networks
3. 学会等名 38th Conference of the International Society of Biomechanics in Sports (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Donahue Seth, Suzuki Yuta, Hahn Michael
2. 発表標題 Estimation of Normal Ground Reaction Forces in a Real-World Environment Using Machine Learning
3. 学会等名 44th Meeting of the American Society of Biomechanics (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------