

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24680067

研究課題名(和文) 高速計算を用いた力学的ストレスのリアルタイム評価に基づく下肢障害の予防と訓練

研究課題名(英文) Running training and injury prevention utilizing real time feedback of mechanical stress assessed with high performance computation

## 研究代表者

長野 明紀 (Nagano, Akinori)

立命館大学・スポーツ健康科学部・教授

研究者番号：30392054

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では下記の課題を達成し、走行動作中に下肢に作用する力学的ストレスに関する情報を利用したトレーニングを可能にした。

(1) 歩行・走行等の下肢動作を行っている際に筋骨格系に作用する力学的ストレスを、コンピュータシミュレーションの技術を用いてリアルタイムに評価することを可能にした。(2) 得られた結果に基づいてリアルタイムなバイオフィードバックを行い、使用者の身体に作用するストレスを呈示することを可能にした。(3) その認識に基づいて、バイオフィードバックを実施しながら走行動作のトレーニングを行い、よりストレスの小さい動作様式を身につけること可能にした。

研究成果の概要(英文)：I accomplished the following three projects in this research, and realized an intelligent training based on the mechanical stress loaded on the legs during running.

(1) To evaluate the mechanical stress on the musculoskeletal system during walking and running utilizing techniques of computer simulation. (2) To bio-feedback the obtained results so that the users can visually recognize the mechanical stress loaded on the legs real-time. (3) To perform training sessions with the bio-feedback and aid learning running motions with smaller mechanical stress.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：動作解析 コンピューターシミュレーション バイオフィードバック モーションキャプチャー

## 1. 研究開始当初の背景

近年我が国は世界一の高齢社会を迎えており、高齢者のみならず若齢者の間でもクオリティ・オブ・ライフに対する意識が高まっている。それに関連し、ウォーキングやランニング等の運動を通して健康増進を目指す動きが高まっている。

これらの傾向は好ましいものであるが、一方で歩行・走行時に下肢に作用する力学的ストレスが筋や関節に障害をもたらすケースも増えている。この問題は研究者の注目を集め、これまで多くの成果が報告されてきているが、特に著名な研究としてはハーバード大学のグループが Nature 誌上で発表したものが知られている (Lieberman et al., 2010. Nature 463(7280), 531-535)。この中では走行フォームに応じて下肢に作用する力学的ストレスが変化する事が報告された。具体的には、走行中に踵で接地する場合には着地時に床反力が鋭く立ち上がり、これが下肢筋・腱のランニング障害を引き起こす可能性が示唆された。一方で足部の中央付近や前足部で接地する場合には床反力が緩やかに立ち上がることが示された。

この様に歩行・走行のフォームは下肢に作用する力学的ストレス、ひいては下肢の障害に関係している。そのため歩行・走行のフォームと下肢に作用するストレスの間の関係を明確に理解し、よりストレスの小さなフォームを身に付けることが求められる。またそのためには歩行・走行等の動作中に、下肢に作用する力学的ストレスをリアルタイムにフィードバックすることが有効であると考えられる。

研究開発当初筋骨格系モデルを用いた動作解析やシミュレーションによって筋張力や関節面における反力を計算する手法が確立されていたが (Winter, 2009. Biomechanics and Motor Control of Human Movement (4th edition). John Wiley & Sons, Inc. USA.)、一般的な動作解析やシミュレーションではその処理に長い演算時間を要するため、情報のフィードバックが事後になってしまい、その効果が薄れてしまうことが予期された。この問題を解決するためには、筋骨格系モデルを用いた動作解析とシミュレーションを高速に実施する事が必要であると考えられた。

## 2. 研究の目的

本課題では大きく分けて3つの目標を設定し研究に取り組んだ。

(1) 歩行・走行等の下肢動作を行っている際に筋骨格系に作用する力学的ストレスを、動作解析とコンピュータシミュレーションの技術を用いてリアルタイムに評価すること。これにより動作中に身体に作用する力学的ストレスを定量的に評価・考察する事が可能

となる。

(2) そこで得られた結果に基づいてリアルタイムなバイオフィードバックを行い、使用者の身体に作用するストレスを視覚的に呈示すること。これによって使用者は、どの様な動作が身体のどの部位にストレスを掛けるのかを定量的に把握することができる。

(3) その認識に基づいて、バイオフィードバックを実施しながら走行動作のトレーニングを行い、よりストレスの小さい動作様式を身につけさせること。短期的な効果と、中期的なトレーニング効果の両方を検討すること。

## 3. 研究の方法

### (1) 2012 年度

この年度は、走行動作中に脚に作用する力・トルク等の力学量の詳細な定量評価を行った。機材としては力センサを内蔵したスプリット・ベルト型のトレッドミル、ならびに小型・軽量・ワイヤレスな加速度センサを用いた。

トレッドミルを用いた研究では、異なる速度で走行をしている際の力データ、ならびにモーションキャプチャーシステムを用いて取得した動作データに基づいて、床反力、関節反力、関節発揮トルク・パワー・仕事などを定量しこれらをデータベース化した。

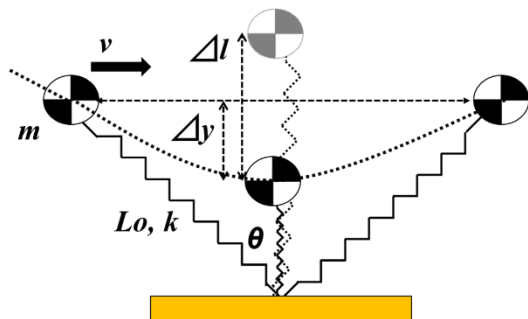
加速度センサを用いた研究では、歩行動作中に身体各部に作用する加速度を同時計測し、その変動性を明らかにした。変動性が低い場合には毎歩ほぼ同じ力学的なストレスがその身体部位に作用する事が示唆される。一方で変動性が高い場合には、突発的に大きな力学的ストレスが作用する可能性がある事が示唆される。変動性の大きさを客観評価するための計算手法も考案した。



### (2) 2013 年度

走行動作中に脚部に作用する力学的ストレスを定量評価し、フィードバックするシステムを構築した。プラットフォームとなる機材としては2012年度に引き続き、スプリット・ベルト型の力センサ内蔵のトレッドミルを

用いた。走行動作実施中の床反力情報をリアルタイムに取得・解析処理し、フィードバックに利用した。時々刻々に取得する床反力データから床反力の初期ピーク値、並びに脚部のスティフネス（ばね定数の値）を計算した。計算した床反力の初期ピーク値と脚部のスティフネス値を被験者の前に設置したモニタまたはスクリーン上に表示した。床反力の初期ピーク値は床反力垂直成分波形の微分値に基づいて同定した。初期ピークは接地期間の初期に現れ、接地期間の中央付近に現れる第2ピークとは区別できる。脚部のスティフネスについては、本研究では質量ばねモデルを用いた解析を実施し、リアルタイムな計算を行った。水平方向の速度は一定と仮定して計算を行った。ここで計算した脚部のスティフネスは走行や跳躍といった体を弾ませる動作における脚の機能を表す重要なパラメータである。先行研究ではこの脚部のスティフネスがある程度の大きさの範囲内にあることが効率良い運動をする上で必要であると報告されている。



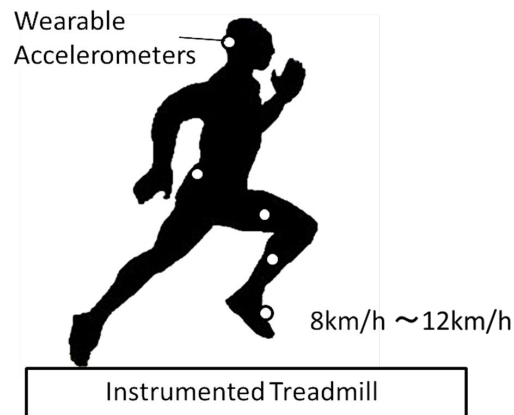
### (3) 2014 年度

筋骨格系シミュレーションの技術を用いて、走行動作の様式が変化した場合に、その変化をもたらした筋力・関節トルクの発揮パターンを明らかにすることを可能とした。また小型・軽量・ウェアラブルな加速度センサを用い、走行動作中に身体に作用する衝撃力が、足部から頭部にかけて徐々に緩和されていく様相を明らかにした。

筋骨格系シミュレーションを用いた研究では、被験者に床反力の初期ピーク値が小さくなる様な走行動作、及び脚部のスティフネスが小さくなる様な走行動作、を実施して頂き、その際に筋力や関節発揮トルクのパターンがどの様に変化しているかを明らかにした。手法としては全身のモーションキャプチャーを実施して得られたデータを、逆ダイナミクス解析で処理するアプローチを用いた。これによりまず関節発揮トルクが求まり、次にこれを関節に作用する筋に配分する事で各々の筋張力を求める事ができる。

加速度センサを用いた研究では、頭部・骨盤・大腿部・下腿部・足部に小型・軽量・ウェアラブルな加速度センサを装着し、各部位に作用する加速度の大きさ及び変動性を評価した。時速 8km/h から 12km/h までの速

度についてこれらの評価を実施した。



## 4. 研究成果

### (1) 2012 年度

異なる速度で走行動作及び歩行動作を実施している際の床反力について、その力波形のパターンを詳細に定量評価した。その結果床反力の推進成分・ブレーキ成分の力積、立脚時間、遊脚時間等と走行速度・歩行速度の間に明確な関係が存在する事が明らかとなった。またこれらの変数を用いて、被験者の意図する走行速度・歩行速度を推定する事が可能である事が明らかとなった。

歩行動作を実施している際の身体各部位の加速度の変動性について、その変化の様相を明らかにした。複数の速度において評価を実施したところ、その被験者にとって快適な速度で歩行する際には変動性が比較的小さく、一方で速度が遅すぎたり速すぎたりする場合には変動性が比較的大きくなる事が明らかとなった。また頭部における変動性は小さく抑えられており、視覚・平衡感覚を司る部位の近傍の変動性を小さくする機構が存在する事が示唆された。

### (2) 2013 年度

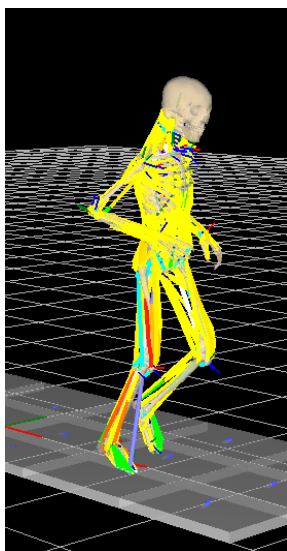
床反力の初期ピーク値については、機材に固有の振動に由来するノイズをフィルタリングして除去し、微分計算により初期ピーク値をリアルタイム評価しフィードバックすることを可能にした。計算は非常に短時間で実施可能であり、遊脚期の初期に完了し、即座にフィードバックする事が可能である。これによりリアルタイムな視覚的提示を可能にした。またこれを用いた検証実験の結果、全ての被験者が初期ピーク値を小さくする（或いは消失させる）歩行動作を容易に実施出来る事が確認できた。

脚部のスティフネスについては、質量・ばねモデルに基づいてリアルタイムに評価を行う事を可能にした。脚部を線形ばねとしてモデル化する、身体の質量をひとつの質量中

心点に代表させる、床反力を三角関数でモデル化する、といった仮定をおく事で、非常に短い時間の間に計算を完了させた。この場合も遊脚期の初期に計算を完了させフィードバックする事が可能となった。検証実験の結果、全ての被験者が容易に脚部のスティフネスをターゲットとする範囲(高いスティフネス~低いスティフネス)に調整できる事が明らかとなった。

### (3) 2014 年度

前年度の成果を受け、床反力の初期ピーク値を小さく抑える走行様式、並びに脚部のスティフネスを大きく・または小さく調整する走行様式をトレーニングした際に、筋の発揮する張力や関節が発揮するトルクにどのような変化が生じるかを評価した。その結果、床反力の初期ピーク値を小さく抑える動作をトレーニングした際には、爪先付近で地面に接地する動作様式を取っており、それに伴い接地直前に足部を底屈させる筋張力・関節トルクの発揮がみられる事が明らかとなった。また脚部のスティフネスの調整には身体重心の軌道が大きく関与しており、スティフネスが低い場合には身体重心が低い位置を通り、スティフネスが高い場合には身体重心が高い位置を通る事が示された。



走行動作中に身体各部に作用する加速度について、その大きさは足部から頭部にかけて緩和されていく事が明らかとなった。また加速度の変動性についても、足部から頭部にかけて小さくなっていく事が明らかとなった。床反力の垂直成分の大きさは速度が変化してもあまり変わらず、変動性も非常に小さく抑えられる事も明らかとなった。これらの傾向は安定な動作の生成のために有益なものである事が考察された。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 27 件)

1. Toda, H., Nagano, A., Luo, Z., 2015. Age and gender difference in the control of

vertical ground reaction force by hip, knee and ankle joints by 3D-motion analysis. Journal of Physical Therapy Science (in press). (査読有)

2. 長野明紀, 2014. 筋骨格系シミュレーションを用いた A. afarensis (A.L. 288-1) による歩行動作の考察. パイオメカニズム学会誌 38 (3), pp. 201-206. (査読無)

3. Honjo, T., Nagano, A., Luo, Z., 2013. Parametrically excited inverted double pendulum and efficient bipedal waking with an upper body. Robotica 31 (6), pp. 875-886. DOI:

<http://dx.doi.org/10.1017/S0263574713000088> (査読有)

4. Arakawa, H., Nagano, A., Hay, D.C., Kanehisa, H., 2013. The effects of ankle restriction on the multi-joint coordination of vertical jumping. Journal of Applied Biomechanics 29 (4), pp. 468-473. (査読有)

5. 巖和隆, 長野明紀, 羅志偉, 2013. 視覚フィードバックを用いたランニング障害の予防に関する研究. パイオメカニズム学会誌 37 (4), 249-256. (査読有)

6. 長野明紀, 吉岡伸輔, 2013. 筋骨格系シミュレーションで探る跳躍動作のダイナミクス. システム/制御/情報 57 (11), 444-450. (査読無)

7. 長野明紀, 羅志偉, 2013. 歩行・走行機能の評価と訓練のためのインテリジェント・トレッドミル. パイオメカニクス研究 17 (1), pp. 62-67. (査読無)

8. 長野明紀, 吉岡伸輔, 2012. コンピュータシミュレーションでみた反動. 体育の科学 62 (1), 10-19. (査読無)

〔学会発表〕(計 49 件)

1. 長野明紀. 筋骨格系シミュレーションの精度について. 第 23 回日本パイオメカニクス学会大会. 2014 年 9 月 13 日. 国立スポーツ科学センター(東京都).

2. Nagano, A., Fujimoto, M., Otsuka, M., Isaka, T. Impact loading on body segments as a function of running speed. Proceedings of: International Calgary Running Symposium. 2014 年 8 月 15 日. カルガリー(カナダ).

3. 長野明紀. 人類の祖先アウストラロピテクス・アファレンシスによる歩行動作のシミュレーション研究. 第 18 回日本ウォーキング学会大会. 2014 年 5 月 31 日. 立命館大学(滋賀県).

4. Nagano, A., Iwao, K., Luo, Z. Realtime biofeedback of the mechanical stress on the legs during running. Proceedings of: 24th Congress of the International Society of Biomechanics. 2013 年 8 月 6 日. ナタール(ブラジル).

5. Nagano, A., Kato, S., Iwao, K., Luo, Z.

An intelligent treadmill system for running training: control of belt speed and biofeedback. Proceedings of: 31st Conference of the International Society of Biomechanics in Sports. 2013年7月8日. 台北(台湾).

6. **長野明紀**, 巖和隆, 羅志偉, 2012. 力学情報のリアルタイムバイオフィードバックを用いたランニング動作訓練システムの開発. 第25回日本トレーニング科学会大会. 2012年12月2日. 立命館大学(滋賀県).

7. **長野明紀**, 加藤翔一, 羅志偉, 2012. 使用者の意図する歩行・走行速度を実現するインテリジェント・トレッドミルの研究開発. 第22回日本バイオメカニクス学会. 2012年9月11日. 北翔大学(北海道).

〔その他〕

オンライン講座「ランニングのスポーツ健康科学」をJM00Cに開講

[https://lms.gacco.org/courses/gacco/ga040/2015\\_06/about](https://lms.gacco.org/courses/gacco/ga040/2015_06/about)

立命館大学研究者学術情報データベース

<http://research-db.ritsumeai.ac.jp/Profiles/112/0011156/profile.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

長野 明紀 (NAGANO AKINORI)

立命館大学・スポーツ健康科学部・教授

研究者番号: 30392054