

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 22 日現在

機関番号：32686

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K01677

研究課題名(和文)有限要素シミュレーションによる接地中の足部内で生じる力学現象の解明

研究課題名(英文)Finite element simulation for elucidation of mechanical phenomena in the foot during ground contact

研究代表者

石井 秀幸 (ISHII, Hideyuki)

立教大学・コミュニティ福祉学部・特任准教授

研究者番号：40534730

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、医用画像から抽出した足部表面、骨、アキレス腱の3次元形状データを用いて、足部の内部構造を考慮した有限要素モデルの作成を進めた。また、モーションキャプチャシステムを用いて着地および走行動作の接地中における足部の動きを計測し、有限要素モデルの妥当性検証に用いるための各変量を算出した。

今後は、有限要素モデルの作成をさらに進め、モデルの妥当性を確認する。その後、材料特性などを変化させて接地のシミュレーションを行い、骨の挙動とそこで生じる力学現象に及ぼす影響を明らかにする。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究を推進することで、着地および走行動作の接地中における足部の骨の挙動とそこで生じる力学現象を明らかにできる可能性がある。さらに材料特性などの変化が、着地衝撃応答や走行動作に影響を及ぼすメカニズムを検討することも可能である。

これらの結果は、外傷・障害発生予防、パフォーマンス向上、製品開発に寄与する可能性があるという点で意義のあるものと考えられる。また、日本のスポーツバイオメカニクス分野では工学的手法を用いた研究が非常に少ないため、本研究で作成される有限要素モデルおよび得られる結果は、足部の研究のみならず、スポーツバイオメカニクス分野の発展に貢献するものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we used three-dimensional geometries of the foot surface, bone, and Achilles tendon extracted from medical imaging to construct a finite element model accounting for the internal structure of the foot. Additionally, we used a motion capture system to measure the movement of the foot during ground contact while running and landing, and computed each variable used to validate the finite element model.

We will further pursue studies on the construction of the finite element model and confirm the validity of the model. Thereafter, a simulation with ground contact by altering the material properties and other factors will be conducted to identify the effects on bone behavior and the resultant mechanical phenomena.

研究分野：スポーツバイオメカニクス

キーワード：バイオメカニクス スポーツ工学 有限要素解析 接地 足部内挙動 医用画像 形状抽出 シミュレーション

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ヒトの足部は、他の身体部位と比較して数多くの骨、靭帯、筋および軟部組織によって構成されており、複雑な骨配列によって力学的に優れた構造をなしている。歩行、走行、着地、その他スポーツ動作において、足関節荷重や地面反力が作用する接地中に、骨配列構造に機能的な変形を生じさせ、足部はこれらの大きな力を受けながらも動作を遂行させていると言われている。

接地中における足部の骨の挙動およびその機能について検討するためには、動的状態かつ3次元での計測が必要である。近年、動作中の骨の挙動を計測する方法として、FluoroscopyなどのX線透視連続撮影が用いられている。同期した2台のFluoroscopyによって撮影した画像に、CTやMRIから抽出した骨モデルをマッチングさせて骨の3次元的な挙動を解析する手法も開発されている(Li et al., 2004)。Fluoroscopyで撮影できる最大のサンプリング周波数は100 Hz程度であるため、瞬間的な衝撃力が足部に作用する着地やスポーツ動作を動的に分析するために数100~1000 Hzで計測する必要がある場合には、最近工学系分野において電子機器や容器の内部の動きを高速撮影するために開発されたハイスピードX線装置の使用も有用であると考えられる。

動作の接地中における足部の骨の挙動を明らかにするだけでも新たな知見となるが、挙動の情報だけでは接地中に生じる力学現象を解明することはできない。研究代表者はこれまで、サッカーのキックのインパクト中に生じる現象について、科研費(平成23~24年度、若手研究(B))を受けて有限要素解析を用いた研究に取り組み、Scientific Reports(Nature Publishing Group発行)に論文掲載という研究成果を挙げた。また、接地中の足部内挙動についても、科研費(平成25~28年度、若手研究(B))を受けて有限要素解析を用いた研究に取り組み、足部有限要素モデルの作成に取り組んだ。本研究においても足部内部で生じる現象を力学的に検討するための方法として、有限要素解析が有用であると考えられる。先行研究では、有限要素解析を用いて静的な接地中の足底圧分布、足部の骨の応力分布などを検討した研究がみられる(Yu et al., 2013; Chen et al., 2015)。しかしながら動作の接地中における骨をはじめとした足部内部の挙動について、動的かつ3次元的な実測と比較して有限要素モデルの妥当性を検証した上で、解析した研究はみられない。よって、衝撃力が足部に作用する着地やスポーツ動作における接地中の足部内部で生じる力学現象については、未解明な部分が多い。

本研究は、有限要素モデルを用いて、動作の接地中における足部の骨の挙動とともに、足部内部で生じる力学現象を明らかにしようとするものである。有限要素解析においては、実現象を表現することが重要であると考えられるが、有限要素モデルの妥当性検証が不十分と思われる研究も多くみられるのが現状である。本研究では、動作の接地中における骨をはじめとした足部内部の挙動について、動的かつ3次元的な実測と比較して有限要素モデルの妥当性を検証した上で、着地および走行動作における接地のシミュレーションを行うという点も特長の一つである。

2. 研究の目的

本研究では、着地および走行動作における接地中の足部内部で生じる力学現象を再現できる有限要素モデルを作成する。妥当性を検証した有限要素モデルを用いて、着地および走行動作における接地のシミュレーションを行い、腱の牽引や腱などの材料特性の違いが足部の骨の挙動とそこで生じる力学現象に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

これにより、腱を牽引する筋の収縮力や加齢による腱の材料特性の変化が、着地衝撃応答や走行動作に影響を及ぼすメカニズムを検討することができる可能性があると考えられる。

3. 研究の方法

(1) 医用画像撮影および形状データ抽出

被験者は下肢に重篤な外傷・障害の既往歴のない健康な成人男性1名とし、静的仰臥位での足部をCTおよびMRIで撮影した。3次元画像データ変換ソフトウェアSimpleware(Simpleware社)を用い、CT画像から足部表面、骨の3次元形状データを抽出した。また、MRI画像からアキレス腱の3次元形状データを抽出した。

(2) 着地および走行動作の計測

医用画像撮影と同一の被験者の足部の解剖学的特徴点に直径4 mmの反射マーカを貼付し、台上から裸足での片脚着地および走行を行わせた。各動作の接地局面における足部の動きを、8台のカメラで構成される光学式モーションキャプチャシステム(Vicon社)を用いて、サンプリング周波数200 Hzで撮影した。接地中の地面反力データをフォースプレート(Kistler社)を用いて1000 Hzで計測した。

モーションキャプチャシステムで取得した着地および走行動作の接地局面における足部各点の位置座標から、有限要素モデルの配置、初期条件、荷重データ、妥当性確認などに用いるための足部の運動学および運動力学データを算出した。

申請時には、ハイスピードX線装置を使用して動作計測をする計画であったが、研究倫理上の制約などにより使用が困難であったことに加え、X線画像では重なって映る中足部などの骨の形状判別が困難であるため、モーションキャプチャシステムを用いた動作計測に変更した。動

作計測手法を変更しても、当初の研究目的を概ね達成できると考えた。

(3) 有限要素モデルの作成

医用画像から抽出した足部表面、骨、アキレス腱の 3 次元形状データを有限要素ソフトウェア Abaqus/CAE(ダツソー・システムズ社 / 本研究費で年間ライセンスを延長購入) にインポートした。軟骨と軟組織の形状を作成し、地面をモデル化した。骨、アキレス腱、軟骨、軟組織、地面にソリッド要素でメッシュ生成した。さらに靭帯、腱、足底腱膜、皮膚をモデル化した。有限要素モデルの各部位に個別の材料特性を割り当てるとともに、摩擦の定義、荷重の定義などを行った。

研究期間中に実施した研究内容はここまでであったが、試しに解析を実行して有限要素モデルの問題点を洗い出す作業に取り組んでおり、材料特性の値、荷重の定義は最終年度末においても試行錯誤の状態であった。

(4) 今後の研究推進方策

最終年度末において試行錯誤の状態であった材料特性の値、荷重の定義などを修正し、有限要素モデルの作成をさらに進める。

着地および走行動作の実験の接地直前における足部の位置・姿勢に足部モデルを配置し、初期条件を与えて、接地局面の有限要素解析を行う。なお、解析ソルバーには、Abaqus を使用する。

有限要素モデルの妥当性を検討するために、有限要素解析において、接地中の地面反力データおよび骨や足部内関節の運動学データを求める。有限要素解析結果を実験結果と比較することによって、有限要素モデルの妥当性を確認する。

妥当性が検証されたモデルを用いて、腱の牽引、腱などの材料特性を変化させて着地および走行動作における接地のシミュレーションを行うことにより、これらの要因が足部の骨の挙動とそこで生じる力学現象に及ぼす影響を明らかにする。

4. 研究成果

静的状態での足部の CT 画像から足部表面と骨の 3 次元形状データを抽出し、MRI 画像からアキレス腱の 3 次元形状データを抽出した。モーションキャプチャシステムを用いて着地および走行動作の接地局面における足部の動きを計測し、位置座標や地面反力データから有限要素モデルの配置、初期条件、荷重データ、妥当性確認などに用いるための足部の運動学および運動力学データを算出した。具体的には、接地直前における足部位置・姿勢、足部質量中心速度、足部角速度、さらに動作中における足部位置、地面反力、圧力中心、足関節角度、前足部-後足部間角度、足関節の関節間力、関節トルクを算出した。これにより、着地および走行動作の接地局面における足部の動きを理解する上で有用なデータを得ることができた。

医用画像から抽出した足部表面、骨、アキレス腱の 3 次元形状データを用いるとともに、靭帯、腱、足底腱膜、皮膚をモデル化し、足部の内部構造を考慮した有限要素モデルの作成を進めた(図 1)。試しに解析を実行し、有限要素モデルの問題点を洗い出す作業に取り組む段階まで研究を推進することができた(図 2)。



図 1 足部の内部構造を考慮した有限要素モデル

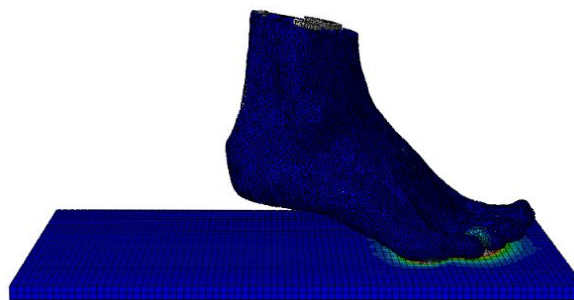


図 2 接地の有限要素解析の例

足部の有限要素モデルの作成は難易度が高く、有限要素モデル作成の各工程において、試行錯誤しながら適当な方法を検討する必要があった。申請時の研究計画より進捗は遅れたが、いずれの工程も本研究課題の成否に関わる重要な部分であり、研究期間全体で研究を進展させることができたと考える。

今後は、有限要素モデルの作成をさらに進め、モデルの妥当性を確認する。その後、材料特性などを変化させて接地のシミュレーションを行い、骨の挙動とそこで生じる力学現象に及ぼす影響を明らかにする。

本研究を推進することで、着地および走行動作の接地中における足部の骨の 3 次元的な挙動とそこで生じる力学現象を明らかにできる可能性がある。さらにシミュレーションによって、材料特性などの変化が、着地衝撃応答や走行動作に影響を及ぼすメカニズムを検討することも可能である。これらの結果は、外傷・障害発生予防、パフォーマンス向上、製品開発に寄与する可能性があるという点で意義のあるものと考えられる。

<引用文献>

Li G. et al.: Feasibility of using orthogonal fluoroscopic images to measure in vivo joint kinematics. *Journal of Biomechanical Engineering* 126(2):314-318, 2004

Yu J. et al.: Biomechanical simulation of high-heeled shoe donning and walking. *Journal of Biomechanics* 46(12):2067-2074, 2013

Chen W.-M. et al.: Plantar pressure relief under the metatarsal heads: therapeutic insole design using three-dimensional finite element model of the foot. *Journal of Biomechanics* 48(4):659-665, 2015

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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 |
|-------|---|---|----|
| 研究協力者 | 丸山 剛生 (MARUYAMA Takeo) (90181833) | 東京工業大学・大学院環境社会理工学院・准教授 (12608) | |