

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2011～2015

課題番号：23220004

研究課題名(和文) 屍体足・人工筋骨格ハイブリッドロボットによる二足歩行の適応機能解明

研究課題名(英文) Understanding Human's Adaptive Bipedal Walking by Using a Cadaver Feet/ Artificial Muscular-Skeleton Hybrid Robot

研究代表者

細田 耕 (Hosoda, Koh)

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：10252610

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 166,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、脳やせき髄からの投射がない場合の、歩行状態における人間の足部の機械的特性を計測するために、歩行状態を再現するための歩行シミュレータを作成し、これに屍体の足部を取り付け、二方向エックス線透視撮影装置の中で歩行させることによって、足部内部の骨の動きを観察するためのプラットフォームを開発した。これに関連して、歩行状態を再現するための歩行シミュレータの制御や、透過画像から各骨の三次元運動を精密に再構成するための画像処理技術などを開発した。足部に存在する機械的特性のうち、中足骨関節に着目し、同等の機能の足部をもつ二足歩行ロボットを開発、実験によって中足骨関節の歩行安定性への寄与を調べた。

研究成果の概要(英文)：This project studies dynamic property of a human foot without any projection from the brain nor spinal cord. We have developed a platform to observe motions of bones inside the foot by biplanar X-ray fluoroscopy while a walking simulator applies proper ground reaction force/displacement to a cadaver foot. Design of the walking simulators and image processing to reconstruct 3D precise motion from fluoroscopy are developed. The project focuses on the mechanism of the mid-foot joint, and develops a humanoid robot for investigating the effect of the joint to walking stability. Experimental results demonstrate contribution of the joint for walking stability.

研究分野：ロボティクス

キーワード：ヒト二足歩行 足部機構 二方向エックス線透過装置 歩行解析 二足歩行ロボット

### 1. 研究開始当初の背景

ヒトは柔らかい足裏と非常に複雑な足骨格構造を持っている。ヒトの足部は地面と直接接触する部位であり、その挙動は二足歩行の適応性に大きく寄与しているはずだが、その機序は詳しくわかっていない。足部は多数の骨と筋、腱、皮膚からなる複雑な構造体である上に、その観察が容易でないことがその一因である。足部の解剖学的な構造はある程度明らかになっているが、歩行中に動的な振る舞いを観察することがきわめて難しく、歩行安定性にどのように寄与しているかは解明されていない。常習的二足歩行は、ヒトと他の動物を分けるもっとも基本的な特徴であり、その適応性を理解することがヒト固有の知能を理解するために極めて重要である。

一方、これまでに二足歩行可能なロボットが多数開発されているが、脚長の数パーセントといったわずかな地形の変化で容易に転倒してしまう。ロボットの足部は人間のそれに比較すると非常に硬く、これが適応性を損なっている原因の一つであると考えられるが、現状のロボット技術では、足部に柔らかさが存在すると、ロボットの脚と上体の状態を制御することが非常に難しくなるため、このような柔軟性はできるだけ存在しない方が、制御性能が向上するというのが常識である。ヒトが足部の柔軟性や構造をどのように利用して適応性を生み出しているかを解明することが、これまでの常識を覆す、ロボットの二足歩行制御に関する新しいパラダイムにつながることを期待される。

### 2. 研究の目的

本研究課題の目的は、歩行中にヒト足部の内部で骨などの機械的な構造がどのように動き、それが歩行全体の安定性にどのように寄与しているかを、屍体足を用いた観測実験と、二足歩行ロボットを使った構成論的アプローチから解明することである。屍体足を用いることによって、脳やせき髄からの投射がない状態での足部の機械的特性を観察することが可能となる。

### 3. 研究の方法

二足歩行における足部の適応機能解明のために、以下のような3つのアプローチをとる。

(1) 屍体の足部を、筋骨格構造を持つロボット脚部に取り付けたハイブリッド屍体・ロボットシステムを作り、ロボットの制御、人工筋による足部への介入を調整して、人間の歩行状態と同様の状態を再現、そのときの足部内部の骨の動きを、2方向エックス線透過装置を用いて観察する、

(2) 足部の詳細な観察より得られたデータに基づき、足部の動的な数値シミュレーションを行い、そこに存在する機序を明らかにする、

(3) 観察実験、数値シミュレーションによって得られた知見をもとに人工足を作成し、それを搭載した二足歩行ロボットを実現することによって、足部に関する仮説を検証する。

### 4. 研究成果

(1) 屍体足・歩行シミュレータを用いた歩行状態の再現。歩行中に足部にかかる外力や強制変位などを、屍体足に再現し、その時の機械的な特性を計測するために、歩行シミュレータ(歩行状態を再現するシミュレータ)を開発する必要がある。もっとも単純な方法は、人間のような歩行をする二足ヒューマノイドロボットを用いることだが、足部観察のために用いる二方向エックス線透過撮影装置の放射線遮蔽のためのスペースの制限、観察のためのエックス線がもう一方の脚にさえぎられるといった問題点を回避するために、人間型でない歩行シミュレータを開発する必要があった。

本研究課題では、数種類の歩行シミュレータを試作し、その性能を評価した。歩行シミュレータに要求される仕様は、二方向エックス線透過撮影装置内での動作ができること、機械的剛性が十分でヒトと同等の負荷を与えることができること、ひざや足部の外来筋を外部のアクチュエータから制御することができ、結果的に床反力をヒトのそれに近くすることができること、である。これらの要

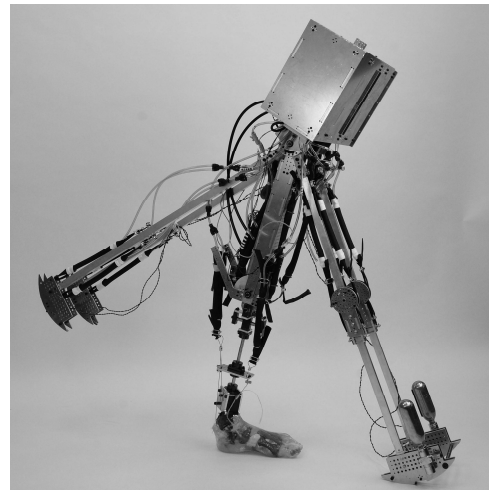


図1 歩行シミュレータ

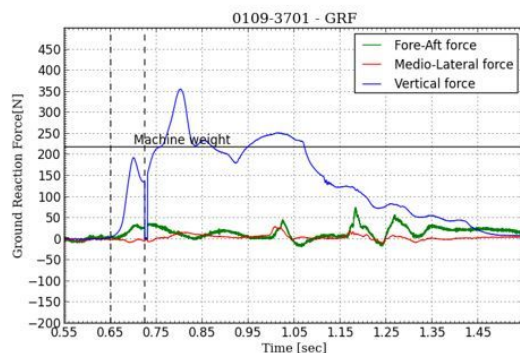


図2 実現された床反力データ

求仕様を満たす歩行シミュレータの一例を図1に、このシミュレータの歩行時の床反力を図2に示す。二方向エックス線によって、足部の観察が可能となるように、3本脚の特殊な形態を持つ。屍体足部の脛骨と腓骨が、3次元プリンタによって作成されたクランプによって強固にロボット本体に固定される。屍体足部をあらかじめ処理することにより、アキレス腱と、前脛骨筋、後脛骨筋、長腓骨筋によって駆動される腱が取り出され、超高分子ポリエチレン繊維によって、空気圧シリンダ、および空気圧人工筋に固定される。これらのアクチュエータの駆動タイミングは、実際にヒトの歩行中の筋電のデータを参考に決められている。

また、実験を重ねることで、歩行中の膝の動き、先につく脚の蹴り出しなどが、床反力に大きな影響を与えていることが分かったため、これらの動きを調整することによって、屍体足が生じる床反力が、できるだけヒトが発生するそれに形が近くなるように調整した。これらの調整の結果、ヒトが示すような特徴的な二峰性の床反力を、歩行シミュレータによっても再現可能であることが分かった(図2)。

この項目について、特筆すべき点は、このように二方向エックス線透過装置で観測可能な、屍体足に力学的な介入をする実験装置を立ち上げ、継続的な実験を行うための設備的、倫理的、時間的プロトコルを整備した点にもある。国内外で、このようなロボットによる屍体足への介入と観察実験を恒常的、継続的に行うことができる環境は、他に例を見ず(われわれの知る限り唯一)、さらに実験を進めるためにも、非常に重要な環境の立ち上げに成功したことは、注目すべき点である。

(2) 二方向エックス線透過装置による足部内部骨の運動の観察。足部内部の骨の運動が歩行にどのような影響を及ぼすかを調べるためには、歩行中のそれらの運動を詳細に観察する必要があるが、その観察自体が、技術的に非常に困難である。本研究課題では、二方向エックス線装置によって撮影された足部の動画から、各骨の変位を測定する技術を開発した。

島津製作所(株)と共同で、フラットパネルディテクタ二枚を装備した二方向エックス線透過装置を開発し、慶応義塾大学医学部に設置した(図3)。フラットパネルは、II管のような画像のひずみが少なく、透過画像を実時間で精度よく観察できる。屍体足はあらかじめCTを用いて断面データを収集し、そこから各骨のサーフェスデータを構築する。得られた二方向からの画像から、骨の三次元運動を推定するために、サーフェスデータを仮想的な撮動面に投影し、投影画像をエックス線画像にマッチングする技術を開発した。特に足部の場合、多数の骨から構成されているので、透過画像には骨の重複が多く

含まれており、これまでに提案されている方法では精度よく自動的にマッチングすることが難しい。本研究課題では、仮想投影画像と輪郭両方の特徴量に関するマッチングを連立させ、初期値がある程度正しければ自動的にレジストレーションし、骨の三次元位



図3 二方向エックス線透過装置。内部には二つの線源と、フラットパネルディテクタ二枚が装備されている。

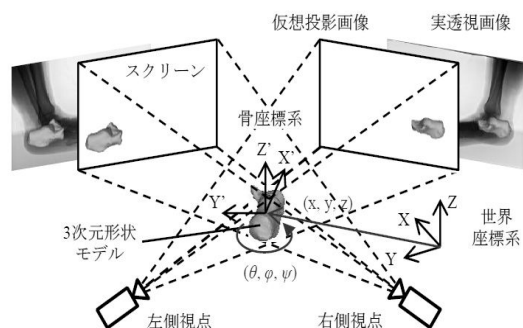


図4 骨のサーフェスデータをあらかじめCT画像から構成し、仮想面に投影して投影画像を作る。

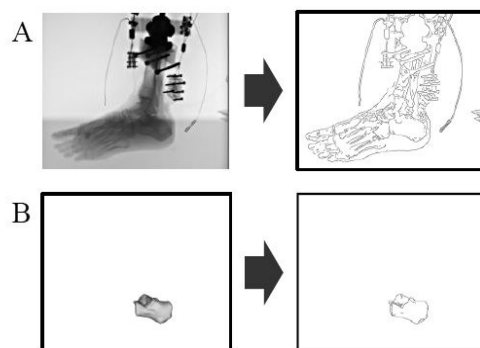
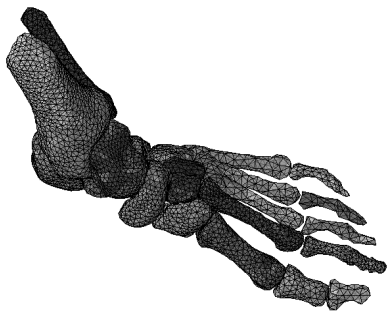


図5 エックス線透過装置より得られたエッジデータと仮想投影画像および輪郭とのマッチングによってレジストレーションする。

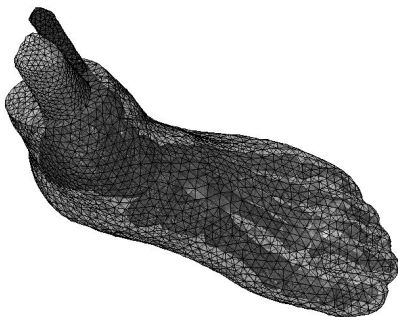
置・姿勢についての正確なデータを得ることができるアルゴリズムを提案(図4),実際の動画像から,距骨,踵骨,立方骨,舟状骨の動きを自動的に得られることを示した(図5),

(3) 足部に関する詳細な動的モデルに基づくシミュレーション.歩行シミュレータを二方向エックス線透過撮影装置に入れ,屍体足の挙動を観察することによって,骨の詳細な運動データを得ることができる.しかし一方で,撮動画像のみからは,骨が相互に作用しあう力を計測することはできない.このような骨間の作用力などの見積もりのために,有限要素モデルを用いた足部の動力学的モデルを構築した.

これまでも,足部の挙動を調べるための有限要素シミュレーションについて,いくつかの報告はあるが,準静的な解析であったり,動的な解析でも骨間の詳細な相互作用を扱えなかったりと,歩行時の足部の挙動観察のためには不十分であった.そこで,動的な足部の挙動を解析するための有限要素シミュレータを,実際にCTスキャンで計測した足部のジオメトリ情報を基に構築した(図6).足部モデルには,剛体としての骨と,それを囲む超弾性体としてモデル化された皮膚,および解剖学で知られている主要な腱が含まれている.このモデルに,強制変位と外在筋の駆動を加え,歩行時の床反力を再現できる



(a) 骨の有限要素モデル



(b) 皮膚,腱を含めた足部有限要素モデル

図6 足部有限要素モデルの構成

かのシミュレーションを行った.強制変位は,実際に被験者が歩行している際の,距骨の動きをモデル化し,これを与えた.外在筋の駆動を変化させることによって,ヒトのような二峰性の床反力を得られることを確認している.現在,ここまで紹介した,屍体足歩行シミュレータ,二方向エックス線透過撮影装置,および有限要素シミュレーションにより,足部の骨の観察実験を進めている.人間の足部は,当然のことではあるが,非常にばらつきが大きい.観察実験を通して,このようなばらつきの中から,骨の相互作用が果たす役割を見つけ出すことが,今後期待される.

(4) 複雑な足部を持つ二足歩行ロボットによる歩行安定化実験.複雑な足部の力学的構造が,二足歩行全体に与える影響を構成論的に調べるため,足部の中でも特徴的な中足根関節を有するロボット足部を開発し,その力学的な構造が二足歩行にどのような影響を与えるかを実験的に調べた.

中足根関節は,距骨・踵骨と,舟状骨,立方骨の間にある構造的な関節であるが,その角度は,足部の進行方向に対して垂直ではなく,ある程度の角度を持っていることが知られている.また,中足根の骨の幾何学的構造や運動を解析すると,舟状骨と母指から中指までが一つのグループ,立方骨から薬指,小指がもう一つのグループとして運動していることがわかる.このような構造が,二足歩行の安定性に寄与しているのではないかとこの仮説を立て,二足歩行ロボットの歩行実験によって検証する.



図7 試作された,傾いた中足骨関節の回転軸を持つ足部

試作されたロボット足部は,図7に示すように舟状骨のグループと,立方骨のグループの二つに分かれ,それぞれに進行方向に対してある一定の角度を持った回転関節を持つ.このロボット足部に上部から力をかけると,ヒトの足部に力をかけたのと同様の,足首部の内旋や,指先端部の外旋運動が確認された(図8).このロボット足部を,二足歩行ロ

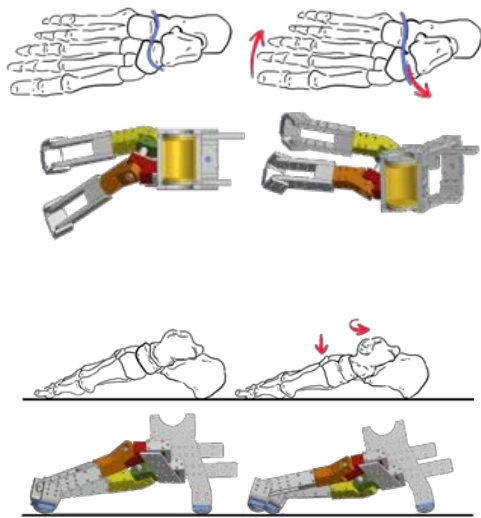


図 8 傾いた中足骨関節の回転軸を持つロボット足部の運動

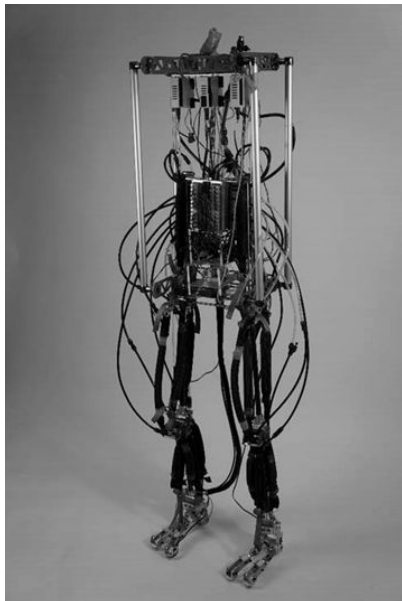


図 9 傾いた中足骨関節回転軸を持つロボット足部と二足ロボット

ポットに取り付け(図9), 歩行実験を行った。実験結果を図10に示す。舟状骨・立方骨の回転関節が角度を持たない場合の、状態のロール軸周りの回転を図10(上), ヒトと同じような角度を持つ場合の回転を図10(下)に示している。ヒトと同じような回転軸を持つ場合の方が, ロール軸周りの回転運動が抑えられていることが見てとれる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計10件)

伊藤幸太, 藤原育海, 細田耕, 名倉武雄, 荻原直道, デジタル画像相関法を用いた

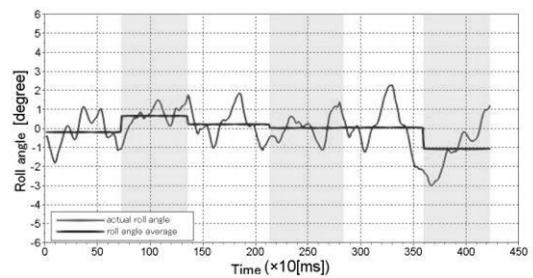
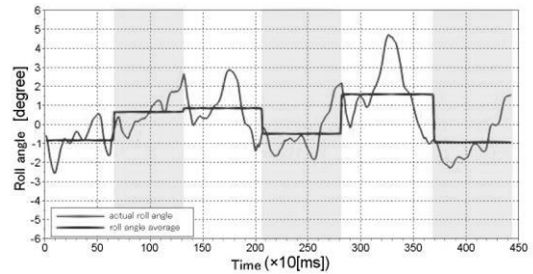


図 10 まっすぐな中足骨関節回転軸を持つ場合(上図)と, 傾いた回転軸を持つ場合(下図)の実験結果。縦軸はロボット全体のロール軸周りの回転角をあらわす。

ヒト二足歩行中の足部3次元動態計測, バイオメカニズム, 査読有, 23巻, 2016年, ページ数未定(掲載決定)。

細田耕, 荻原直道, 池本周平, 屍体足を用いた足部機構の機能解明, システム/制御/情報, 査読有, 59巻10号, 2015年, pp. 387-393。

K.Ito, K.Hosoda, M.Shimizu, S.Ikemoto, S.Kume, T.Nagura, N.Imanishi, S.Aiso, M.Jinzaki, and N.Ogihara, Direct Assessment of 3D Foot Bone Kinematics using Biplanar X-ray Fluoroscopy and an Automatic Model Registration Method, Journal of Foot and Ankle Research, 査読有, Vol. 8(1), 2015, pp.1-10.  
DOI:10.1186/s13047-015-0079-4

〔学会発表〕(計101件)

T.Kawakami, Bipedal Walking with Oblique Mid-foot Join in Foot, 2015 IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, 2015/12/7, Zhuhai (China).

K.Hosoda, Function of the Foot Complex for Walking, 7th Int. Symp. on Adaptive Motion of Animals and

Machines, 2015/6/24, Cambridge (USA).

K.Ito, Three dimensional kinematic analysis of human cadaver foot using a biplane X-ray fluoroscopy system, 7th World Congress of Biomechanics, 2014/7/7, Boston (USA).

K.Ito, Direct assessment of foot kinematics during human gait using a dynamic cadaver simulator and a biplane X-ray fluoroscopy, 4th Congress of the International Foot & Ankle Biomechanics community, 2014/4/8, 釜山 (韓国).

T.Kobayashi, Anatomically detailed three dimensional dynamical finite element analysis of the human foot, 6th Int. Symp. on Adaptive Motion of Animals and Machines, 2013/3/12, Darmstadt (Germany).

〔図書〕(計 2件)

細田耕, 化学同人, 柔らかヒューマノイド, 2016年, 208ページ.

K.Hosoda 他, Springer, Cognitive Neuroscience Robotics, 2016年(出版確定).

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

(1) 報道関連

日経新聞「愛され育て 柔らか関節 阪大の触れ合いロボ(ここに技あり)」, 2016年4月14日.

日経サイエンス「ヒューマノイドで探る人間の運動機能の巧みさ」, 2011年8月号.

日経サイエンス編集部, 挑戦する科学者, ヒューマノイドで探る人間の運動機能の巧みさ, 2014年6月出版.

(2) アウトリーチ活動情報

学会・研究科での招待講演 20件

13th Int. Conf. on Intelligent Autonomous System, 基調講演, Padva (Italy), 2014.7.17.

IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, 基調講演, Guangzhou (China), 2012.12.13.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

細田 耕 (HOSODA, Koh)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授  
研究者番号: 10252610

(2) 研究分担者

荻原 直道 (OGIHARA, Naomichi)  
慶應義塾大学・理工学部・教授  
研究者番号: 70324605

今西 宣晶 (IMANISHI, Nobuaki)  
慶應義塾大学・医学部・准教授  
研究者番号: 00184820

名倉 武雄 (NAGURA, Takeo)  
慶應義塾大学・医学部・准教授  
研究者番号: 90306746

清水 正宏 (SHIMIZU, Masahiro)  
大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授  
研究者番号: 50447140

池本 周平 (IKEMOTO, Shuhei)  
大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教  
研究者番号: 00588353

菅本 一臣 (SUGAMOTO, Kazuomi)  
大阪大学・医学系研究科・寄付講座教授  
研究者番号: 40294061

成岡 健一 (NARIOKA, Kenichi)  
大阪大学・大学院情報科学研究科・研究員(当時)  
研究者番号: 30588356

(3) 研究協力者

MACEDO ROSENDO, Andre, Luis  
伊藤 幸太 (ITO, Kohta)