

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K10747

研究課題名(和文) ロッカーファンクションにより構築した筋骨格型ロボット歩行シミュレータの開発

研究課題名(英文) Musculoskeletal robotic walking simulator by rocker function

研究代表者

坂井 伸朗 (Sakai, Nobuo)

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：60346814

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はいわゆる2足歩行ロボットの研究に主眼をおくのではなく、ヒト下肢筋骨格構成とその機能発現メカニズムを探ることを目的とする。本研究ではロッカーファンクションの説明の最初に記載される初期荷重応答という、最初の踵接地から膝関節を曲げている歩行様式をとる。各筋はばねにより構成され、現時点でもモデルではそのばねに直列に配置した腱牽引モータを片脚あたり3個持つ。初期荷重応答から連続的に各筋が機能発現し、2次元歩行においてヒト歩行同様の歩容を得た。これにより、ロッカーファンクションとヒト下肢筋骨格構成の密接な関係性が深まった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

もし、機能が本当に理解されているならば、それを人工系で再現できるはずである。本研究では下がりハビリテーションにおいて一つの指標とされるロッカーファンクション理論を用いて、下肢筋骨格構成を再現した、筋骨格型ロボット歩行シミュレータを実歩行させることに成功した。これにより、ロッカーファンクションを念頭とした歩行リハビリが力学的にも十分に説明がつくこと実証された。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to analyse the functional mechanism of the lower limbs, more than the development of pure robotic bipedal walking. The robotic walking simulator firstly started the functional reproduction of the loading response phase according to the explanation of the rocker function, in which the knee joint is initially in bending position at the heel contact. Muscles in lower limbs were represented by springs with serially connected tendons. At present state, 3 motors were arranged in the one limb, and pulled the tendons in an adequate trajectories. From the loading response, each muscle spring sequentially functions to reproduce the walking phase of the rocker function theory. The musculoskeletal walking simulator successfully reproduced the human walking trajectory in a 2 dimensional walking pathway. The results of this study proved the relationship between the rocker function theory and the musculoskeletal construction of the lower limb of Human.

研究分野：生体機能設計学

キーワード：Musculoskeletal system Human walking Walking robot Biomimetics

1. 研究開始当初の背景

ヒト歩行に対し、Perry は各筋とそれにより生成される一連の運動により図1に示すロッカーファンクションと呼ばれる歩行相の解釈を示した。現在、この解釈は臨床歩行解析において重要な役割を果たしているが、横断的立場で見た申請者からその興味を述べると、ロッカーファンクションの機能の一部分のみを抜き出した場合に一見非合理的に見える運動が見られる。しかしヒト歩行は、サイクリックな全体運動として捉えると、合理的な運動である可能性が高いかもしれない。つまり、迂回やブレーキという一見負の効果により、結果として歩行全体の高効率化が得られていると考えられる。これらはスムーズに運動を行なうためとの表現もあるかもしれないが、スムーズとは何であろうか、工学的視点からも発想の転換を迫られるものである。もし、このロッカーファンクションの考え方が真に有効であれば、同じ機能が人工物で再現できるはずである。工学分野における自律2足歩行ロボットの研究は、歩行とは何かを考えさせるツールとして様々な成果を挙げてきたが、ロボットと生体はエネルギー変換原理や材料が異なる。ロボットが2足歩行と比較しヒト歩行は生体としての多くの制約の元実現されている可能性がある。この場面での「最適」とは何であるかについて考えさせられる問題である。

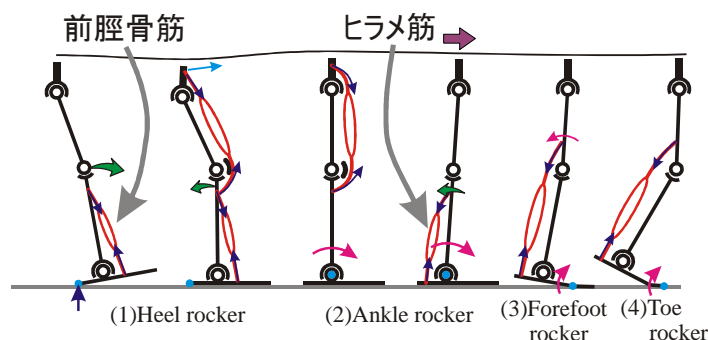


図1 ロッカーファンクションによる歩行解釈の概略図

2. 研究の目的

本研究の目的は、ロッカーファンクションにより構築した実歩行可能な筋骨格型ロボット歩行シミュレータを開発することである。本研究はいわゆるロボットの研究でなく、あくまで、ヒト歩行という実機能を有したヒト下肢筋骨格構成の研究およびその応用を行なうものである。本研究で提案するヒト下肢筋骨格構成を再現した物理シミュレータを実歩行させる試みは、数値シミュレーション以上に、実機である故に機能に対し妥協が許されず、それゆえ歩行機能の解明に寄与すると考えられる。これは装着可能な故に下肢装具の機能向上や、人工関節シミュレータ、さらに異常歩行の解析など、様々な応用が期待される。本研究では、現在ヒト歩行と同様の歩様が再現されつつある申請らの実機シミュレータを、より生体筋に近い俊敏な駆動原等を導入することで完成させ、ヒト歩行のバイオメカニズムに迫る筋骨格型ロボット歩行シミュレータを提案することを目的とする。

3. 研究の方法

ヒト筋骨格構成を考えたとき、筋は等尺性収縮から遠心性収縮において高効率であり、その特性を利用して歩行を行なっていると考えられる。筋力発生においてTitinがアンカ位置変更可能な受動ばね機構であることが分かり、高速な遠心性収縮時に必要であることが報告された。筋腱複合体の弾性反跳は、弾性によるエネルギー回収という点で、高エネルギー効率での歩行に寄与していると考えられる。よって、本研究では各筋をばねとして表現することを基本とした。ばねは内骨格に相当するフレームへケーブルを介して取付け、圧縮方向へは力を出さない構成とした。能動的に駆動する場合は、ばねに取付けられたケーブルをモータで牽引するばね—モータ直列構成を筋の基本要素とすることとした。

ロッカーファンクションの説明は初期荷重応答と引き続くヒールロッカーから開始され、トゥロッカーへと説明される。著者らの筋骨格モデルはその説明順に従い機構を構成していったが、足趾構造とその機能は見かけのサイズが小さいうえ歩行説明の最後にあたる部位であった事も影響し、著者らの筋骨格歩行モデルでは、足部はロッカー機能を有する部分に円弧形状は設けるものの、一体のブロックによりモデル化されていた。そこで、本研究では、アーチ構造と並び、足趾構造を有する足部構造の構成を行なった。ゆえに本研究では、片脚あたり、大腿直筋(単関節筋)・腓腹筋(二関節筋)・大腿二頭筋短頭(単関節筋)・長母趾屈筋(二関節筋)の4筋における腱をモータにより牽引する構成とした。図2に装置全体図、図3に足趾構造の拡大図を示す。

4. 研究成果

図2に製作したロボット物理歩行シミュレータの3モータモデルの写真を示す。全高800mm, 股関節幅200mm, 重量は両足合計6個のモータと歩様向上のための320gの腰部おもりを併せ5.7kgとなった。特徴寸法はヒト骨格の代表的寸法をスケールリングすることで構成したが, 各筋のモーメントアームは1.5倍程度を確保している。本構成は一般的な2関節筋を含む9筋モデル6)である。駆動モータはブラシ付きDCモータ(maxon, DCX-22L)を用い, フルベアリングにより力制御可能な専用減速機を開発した。減速機出力軸には樹脂製プーリを配置し, ばねに直列につないだケーブルを牽引する構成とした。図3に足部構造と足趾部を拡大した写真を示す。どの筋に対し能動駆動を作用させ, どの筋を単純なばねのまま歩行が可能になるかは非常に興味深いテーマである。これまでに著者らは前面筋群の2ヶ所を能動駆動し歩行可能であったが, 本研究では股関節後面二関節筋, 足関節後面二関節筋, 膝関節屈曲単関節筋の三ヶ所を能動駆動させた。足趾は現段階では外力推定オブザーバによる力計測である。図5に足趾のトゥロッカーを有する歩容を示す。①は図4⑥に相当する歩行相であり, 右脚は踵部接地とともに初期荷重応答が起る直前である。ここでの着目点は反対側では図中白抜矢印に見られる腓腹筋により体全体を持ち上げるモーションに入っていることである。②では左脚踵が地面から離れる動作とともに, 右脚は初期荷重応答により, 右膝が曲がる姿勢を作りつつ右脚前脛骨筋の牽引により腰部まで前方に牽引することとなる。このとき左脚はフォアフットロッカーを開始している。③ではフォアフットロッカーとともに腓腹筋により左膝が屈曲しながら前方へ移動する。もし足指が無い場合はより左脚を持ち上げなければならず非効率である。そして, ④が左脚がトゥロッカーで地面を蹴りつつ, その力が遊脚を前方へ振出すエネルギーに使用される瞬間である。その後, ⑤では左膝単関節筋収縮の解除で前方へ左脚を投げつつ腰部を前方へ牽引している状態であり, 左脚は適度に腓腹筋駆動することで足部を地面と平行に保っている。そして, ⑥で左右脚が入れ替わった状態の①と同等の位相となる。

本研究では筋をばねに置換えた下肢筋骨格物理シミュレータを製作し, ばねに直列配置されたケーブルを駆動することで歩行させた。本稿の結果ではまず, 実験者等の外部補助無しで歩行を開始させることを試みた。その結果重心の移動を足底内で行なうのみで安定した歩行開始が可能となった。また, 2関節筋による足趾屈曲を備えた足部構造を筋骨格型ロボット歩行シミュレータに組み込み, その機能を実機を歩行させることで検証した。その結果, 足趾ばねの強度を変化させると, 歩幅が大きく変化する様子が観察された。



図2 開発された実歩行可能な筋骨格型
ロボット歩行シミュレータ

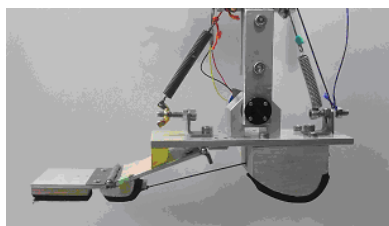


図3 ロボット歩行シミュレータの足部構造

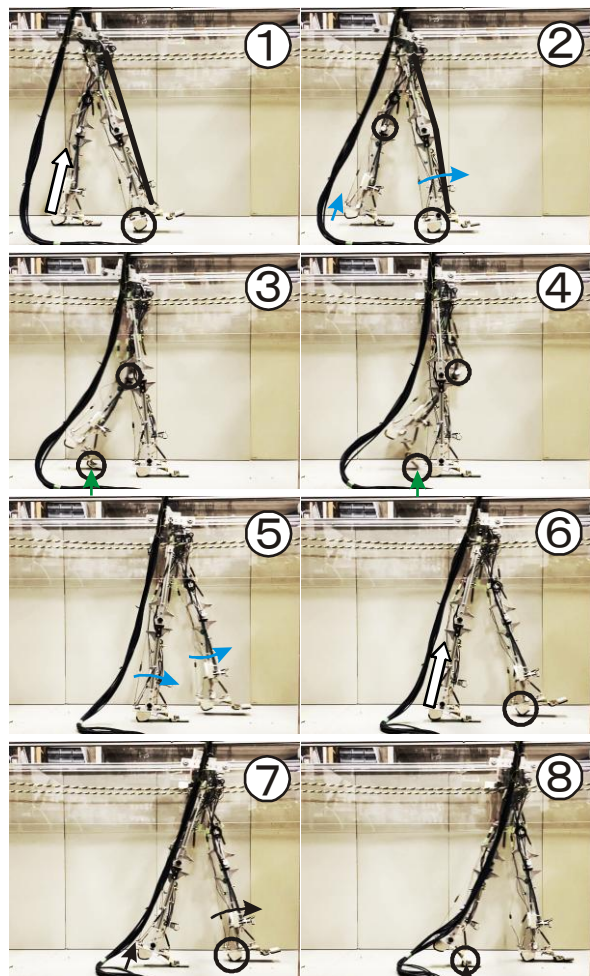


図4 足趾を有するロボット歩行シミュレータの歩行
時の連続写真

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 坂井伸朗, 野口純平, 淵雅子, 林克樹, 小森望充, 村上輝夫	4. 巻 6-2
2. 論文標題 ロッカーファンクションにより構成した筋骨格型ロボット歩行シミュレータの開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 臨床歩行分析研究会誌	6. 最初と最後の頁 17-25
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 -

1. 著者名 坂井伸朗, 林克樹, 古場友貴, 淵雅子, 小森望充, 村上輝夫	4. 巻 55
2. 論文標題 脳卒中リハビリテーション支援のためのメカトロシステムの開発	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本設計工学会誌	6. 最初と最後の頁 591-600
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 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 坂井伸朗, 淵雅子, 林克樹, 小森望充, 村上輝夫
2. 発表標題 ロッカーファンクションにより構築した筋骨格型ロボット歩行シミュレータの開発
3. 学会等名 第40回臨床歩行分析研究会定例会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野口純平, 坂井伸朗, 淵雅子, 林克樹, 小森望充, 村上輝夫
2. 発表標題 ロボット歩行シミュレータの足部機構の開発
3. 学会等名 第39回バイオメカニズム学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 龍幸穂, 坂井伸朗, 野口純平, 淵雅子, 林克樹, 小森望充
2. 発表標題 歩行可能なヒト下肢筋骨格シミュレータの開発
3. 学会等名 Robomech2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂井伸朗, 龍幸穂, 淵雅子, 林克樹, 小森望充
2. 発表標題 筋骨格型ロボット歩行シミュレータの足趾構造の検証
3. 学会等名 第41回バイオメカニズム学術講演会
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
研究協力者	村上 輝夫 (Murakami Teruo) (90091347)	帝京大学・福岡医療技術学部・教授 (32643)	
研究協力者	林 克樹 (Hayashi Katsuki)	誠愛リハビリテーション病院・リハビリテーション部・特任 副院長	
研究協力者	淵 雅子 (Fuchi Masako)	九州栄養福祉大学・作業療法学科・教授 (37122)	

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
---------	---------