

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289065

研究課題名(和文) イナーシャマッチングに基づく階段歩行スキルの解明と大腿義足制御への応用

研究課題名(英文) Analysis of Walking Skill in Stair Ascent based on Inertia Matching and Its Application to Control of Transfemoral Prosthesis

研究代表者

和田 隆広 (Wada, Takahiro)

立命館大学・情報理工学部・教授

研究者番号：30322564

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、義足歩行、階段昇段における歩行スキルの評価手法を開発すると共に、慣性運動を活用したより歩きやすい義足の制御手法および階段昇段を可能とする義足膝継手を開発することであった。まず全身運動の慣性運動への近さを評価する指標を導入し、歩行や階段昇段時の歩行評価を行い、慣性運動の視点からその特徴付けを行った。次いで、遊脚期において積極的に慣性運動を活用する義足制御のための運動生成手法を提案した。さらに、上記の階段昇段動作の解析結果に基づき、義足慣性運動を活用した、階段昇段が可能なパッシブ型大腿義足を3種類開発した。その結果平地から階段昇段までをスムーズに実現する義足の開発に成功した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this project was to develop an evaluation method of walking skill in level walking and stair ascending with a transfemoral prosthesis, and to develop passive prostheses that allow amputees to climb up stairs smoothly. Firstly, evaluation indices to quantify closeness between a given whole body motion and its inertial motion, which means no external torque or force. Skills related to the level walking and stair ascending with the prosthesis were characterized based on the effective use of inertial motion. Then, knee motion generation method of the prosthesis was proposed for its control that leveraging the inertial motion. Furthermore, three types of passive transfemoral prostheses that allow the amputee climb up stairs were developed based on the above results. Experimental results demonstrated that our proposed prostheses smoothly achieved from level walking and ascending stairs.

研究分野：知能機械システム

キーワード：大腿義足 慣性特性 運動制御 バイオメカニクス 動作解析

## 1. 研究開始当初の背景

大腿義足は膝より上部で切断された方が利用する義足である。義足立脚期の安定性は義足膝継手の機構開発などによって向上しており、特にコンピュータ制御型の義足膝継手の登場により、その安定性は飛躍的に向上した。一方、快適な歩行の実現には義足の遊脚期が重要である。コンピュータ制御型義足は遊脚期の歩容を制御できるため快適な歩行の実現にも貢献してきた。このような工夫により、平地歩行については十分な性能を発揮する義足が確立されている。しかしながら階段を昇る動作（以下、階段昇段）については、日常生活でニーズが高いにもかかわらず、大腿義足ではほとんど実現されていない。個人で購入できないほど非常に高価な義足の一部では、階段昇段を可能とする機能が試作されつつあるが(Power Knee)、大型のアクチュエータを搭載しているために大重量となり、使用者の負担が大きいため、平均的な健康男性でも使用が困難である。

これまで、歩容の乱れが筋負担などに大きな影響を及ぼすのを防ぐため、軽い義足が良いとされてきた。しかしながら、義足慣性特性を変化させて歩きやすさの主観の評価を問うた結果、中程度の慣性特性で主観評価がピークを迎え、適切な慣性特性の存在性を示唆する結果を得た[1]。また、全身慣性運動の活用度を評価する、慣性運動メジャーを用いて歩行データを解析したところ、主観評価の高い義足慣性特性では、慣性誘発度が高い、つまり、慣性誘発運動に近い運動であることを示唆する結果を得た[1]。また、同一被験者に対し、義足装着時から15ヶ月間の慣性誘発度の遷移を調査したところ、数ヶ月の義足使用により一度慣性誘発度が低下するが、その後ダイナミックな歩容獲得により、歩行周期の初期では外力を利用するなど、特徴的なパターンを得た[2]。この結果から、慣性誘発度メジャーにより、慣性適合性の評価および、義足歩行スキルの定量化の可能性を示唆する結果を得た。本研究の成果から慣性特性適合性の重要性が指摘されたが、平地を対象とした検証であり、階段等への適用は不可能であるという課題が残されていた。

一方、義足による階段歩行はニーズが高いにもかかわらず、困難であることが、近年ようやく指摘されてきた。一方、我々の先行研究において、足による階段昇段の困難さは、1) 義足足部の階段への衝突、2) 義足立脚期の義足膝折れの2点であることを明らかにした。その対策として、衝突防止と膝折れ防止を実現する運動制限機構とそれを利用した下腿部の運動制御手法を着想し、簡易試作機が試作されている[3][4]が、歩きやすさの向上が課題であった。

## 2. 研究の目的

そこで本研究の目的は、義足歩行、階段昇段における歩行スキルの評価手法を開発すると共に、慣性運動を活用したより歩きやすい義足の制御手法を開発すること、さらには平地および階段昇段を共に可能とする大腿義足を開発することである。

## 3. 研究の方法

本研究では上記目的を達成するために、以下のサブテーマを設けて研究を実施した。

- (1) 慣性運動評価手法の開発と義足歩行スキル評価：
  - 全身運動の慣性運動への近さを評価する指標を提案すると共に、慣性運動の観点を主として、歩行や階段昇段時の歩行評価を行う。
- (2) 慣性運動に基づく義足膝継手の制御手法：
  - 歩きやすい義足を目指し、慣性運動を活用した義足制御のための運動生成手法を開発する。
- (3) 受動式大腿義足の開発と評価：
  - 受動機構のみを用いて、階段昇段可能な義足を開発すると共に、その評価を行う。

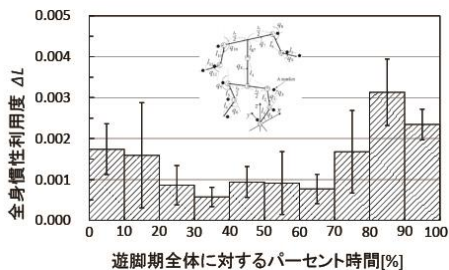
## 4. 研究成果

- (1) 慣性運動評価手法の開発と義足歩行スキル評価
  - ① 全身慣性使用度計測のための動力学モデルの確立と階段昇段スキル定量化への応用

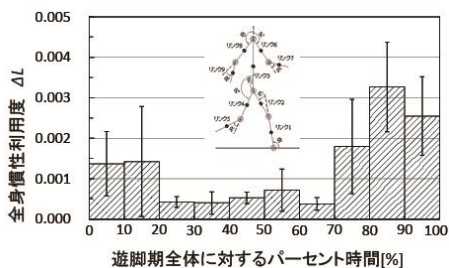
多関節運動の任意区間動作を全身の慣性運動との近さで定量化する手法（以下、全身慣性使用度計測と呼ぶ。）において、人の歩行運動を的確に捉える動力学モデルを調査した。平面9関節全身モデルを基本に、立脚膝関節、上肢肩肘関節、肩腰回旋関節（3次元動作モデル）の有無により、健常者の同一平地歩行データの解析を行った。立脚膝関節の有無では計測値に3倍近くの違いがあったのに対し、上肢肩肘関節、肩腰回旋関節では計測値に有意な違いは見られなかった。これらの結果から、歩行運動の全身慣性使用度計測において、立脚膝関節動作の関与は大きいのに対し、腕の振り、肩腰の捻り動作の関与は小さいことを明らかにした（図1）。また、健常者の平地歩行では、遊脚期20~70%区間において全身動作が慣性運動に近くなる結果を得た。

動力学モデルの検証結果を踏まえ、平面9関節モデルにより、健常者階段昇段歩行の全身慣性使用度を計測した。遊脚つま先が立脚接地段（中段）の高さを越える付近（遊脚期20%）において、使用度が極大となる結果を

得た(図2). また, その後の20~80%区間において, 使用度の減少と人が受ける重力の増加に高い関係性が見られた. これらの結果は, 健常者の階段昇段歩行では全身の慣性を巧みに使い, かつ, 遊脚期序盤で昇段のために生み出した関節速度を重力により制動していることを示唆する. 遊脚期20%付近に全身慣性使用度の極大を持つことが, こうした効果的な階段昇段実現の鍵になるとと思われる.

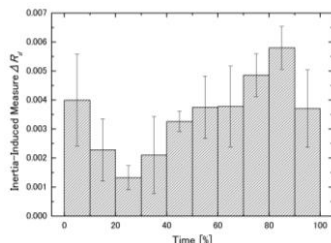


(a) 肩腰回旋関節を含めたモデル

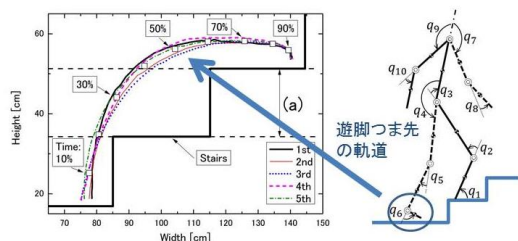


(b) 肩腰回旋関節を含めないモデル

図1 関節自由度の異なる動力学モデルによる全身慣性使用度の計測結果



(a) 全身慣性使用度



(b) 遊脚つま先の軌道

図2 健常者の階段昇段歩行における遊脚期の全身慣性使用度と遊脚つま先の応答

② 慣性運動指標の構築と義足遊脚期の解析  
①で導入された全身慣性誘発度は, 重力を外力として扱う. 筋力による関節トルクが零

であることを, 多リンク構造体の慣性運動を定義し直した場合における, 与えられた運動の慣性運動への近さを表す指標として, 慣性運動指標を提案した. この手法では時々刻々の運動データを初期値として時間発展する慣性運動を数値計算によって求め, 各時刻においてこの慣性運動と計測された姿勢の近さを, ①の手法で導入されたリーマン距離によって求めるものである[5].

義足熟練者に単軸膝継手を装着し, 0.14kgの錘を, 位置を変えて取り付けて歩行する実験を行った. 錘の位置によって歩きやすさ主観評価は異なるが, 主観評価が高い錘位置設定の場合において, 遊脚期中盤での慣性運動指標の値が小さくなった, つまり慣性運動に近い結果という結果を得た.

### ③SAIによる階段昇段スキルの解析

大腿義足ユーザにおける階段昇降スキルの評価スケールにSAI (Stair Assessment Index)がある.これは13段階の評価スケールから構成されており, 健常者のような手すりを使わずに一足一段法で昇段する場合を13点とするものである.本研究では日本国内に在住する大腿切断者10名(男性7名,女性3名)をSAIの高低から2群に分け, 身体・運動特性(年齢, 切断歴, 使用義足, 義足使用歴, 運動頻度および平地歩行速度)を横断的に比較した.平地歩行速度に関しては全身57点マーカー位置情報を三次元動作解析装置によって撮像し, 重心位置の並進速度によって解析した.その結果, すべての項目に統計的な有意差は見られなかった.これらの結果は大腿義足ユーザにおける昇段能力は従来の歩行評価指標では予測不可能であり, 昇段動作特有の評価指標が必要であることを示唆している.

### (2) 慣性運動に基づく義足膝継手の制御手法

上記(1)では, 義足遊脚期中盤で慣性運動を効果的に活用していることが見出された.そこで, まずは平地歩行を対象とし, 慣性運動を活用する膝運動生成手法を提案する.

#### ① 慣性運動生成手法

規範となる運動パターン(ここでは健常者の歩行運動)に近い運動を, 慣性運動によって近似する手法を提案した[IROS2014].規範運動パターン上のある点Qから時間発展する慣性運動と, 逆時間発展していく運動をつなぎ合わせて, 慣性運動を生成する.点Qの位置を規範運動上で変化させ, 最も規範運動に近いものを作用する.この手法を用いれば, 平地歩行中の健常者膝運動を, 義足慣性特性を有する下肢の慣性運動によって精度高く実現できることがわかった.

#### ② 運動学シナジー解析に基づく膝運動生成手法

多関節で構成される人間の巧緻運動(例えば

歩行)においては、各関節は協調して運動していることが知られている(運動学シナジー)。本研究では先の方法で求められた膝慣性運動と、残存肢関節運動を合わせた運動においても、同程度の低次元化が可能な程度に運動学シナジーが成立していることを明らかにした。この結果、時々刻々の慣性膝運動を、残存肢情報の一次式で表現する手法を提案した。さらに、その係数が歩行速度および、ToeOff直後の残存肢情報の一次式で表現できることをつきとめた。

### ③ 制御結果

②で提案した手法を用いて生成した膝運動を図3に示す。提案手法によって生成された軌道は、慣性運動に程近いものであった。また、速度が変化した場合でも慣性運動に近い軌道が得られた(図示せず)。

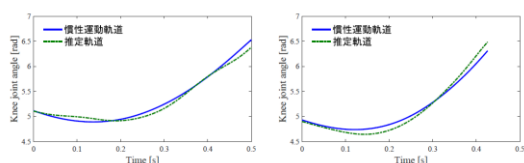


図3 生成された膝関節運動

### (3) 受動式大腿義足の開発と評価

上記の階段昇段動作の解析結果に基づき、義足慣性運動を活用した、階段昇段が可能なパッシブ型大腿義足を3種類開発した。

開発した受動機構のみで構成された階段昇段用義足

#### ① 回転制限方向制御型の膝継手の開発

膝関節にラチェットギアを内蔵したパッシブ膝継手の開発を行った。申請者が本研究以前に開発していたラチェットギアの回転方向の制限モード(屈曲ロック・伸展ロック)を切替える手法に加えて、膝関節の回転に制限を設けない完全フリー状態のモードを設けた。

健常者の歩行分析から、義足側大腿部角度のみをモニタするだけで上記3モードの切替え制御を実現する制御則を提案した。このとき、平地歩行では義足遊脚期前半に完全フリー状態を設けることで、遊脚期の義足下腿部の慣性運動を可能にした。また、階段昇段では義足遊脚期後半に完全フリー状態を設けることで、確実な足部接地を可能にした。歩行の状態から平地歩行と階段歩行を区別すると共に、回転制限の方向を制御する手法を提案した。

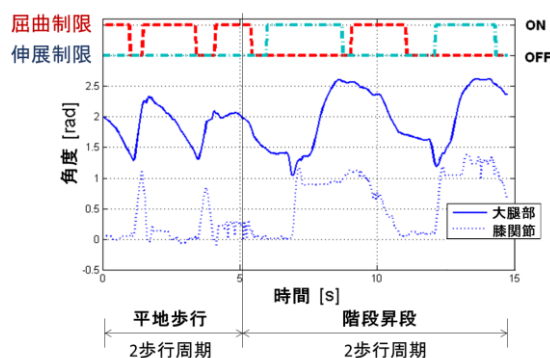


図4 平地-階段移行時のラチェット式パッシブ膝継手制限モードと大腿部・膝関節角度の変化

提案制御システムを実装したパッシブ膝継手の試作機を用いた歩行実験では、平地歩行、階段昇段、および、それらの連続的な移行に成功した。このとき、提案した制御則は設計通りに3モードを自動で切替えた(図4)。

さらに、提案制御則を歩行データベースを用いて評価した結果、自然歩行を行う健常者のほぼ全てに適用可能であることが示された。このことから、提案制御システムは多数の義足ユーザにも適用可能であると示唆された。

#### ② 平地歩行から連続的に階段昇段できる受動式膝継手の開発

安全な階段昇段を行うためには、階段へのアプローチ(平地歩行)時に義足立脚期における膝継手の安全性も必要であった。本研究以前に我々は階段昇段可能な膝継手を開発していたが、それは階段用に特化していた。そのため、義足の第一義である平地歩行の安全性が十分ではなかった。そこで、平地歩行機能と階段昇段機能を兼ね備えた、完全にパッシブな膝継手の開発を行った。

平地歩行における義足立脚期の安定性が高い市販のパッシブ膝継手に用いられている4節リンク機構に、上記の階段昇段可能な機構を組み込んだ。義足接地時の膝継手の屈曲角度によって、膝継手が異なる機能を発揮するように設計した(図5)。

試作機を用いた昇段実験では、平地から階段昇段への連続的な歩行に成功した(図6)。このとき、膝継手を手で操作することなしに、二つの機能は自動的に切替わった。これにより、従来独立して存在していた平地歩行用と階段昇段用の機構を、一つの機構に統合することに成功した。

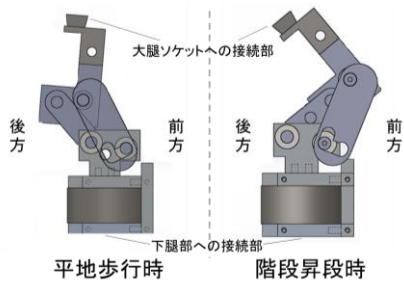


図5 平地-階段歩行が可能なパッシブ膝継手



図6 平地歩行から階段昇段への連続的な歩行

### ③二関節連動型の大腿義足の開発

我々はこれまでに、階段昇段を可能とする、受動機構のみで構成される膝継手を開発した。しかしながら義足に体重を掛ける際に、ある種のコツが必要であり、使用感が低いという課題があった。バイオメカニクス解析の結果、義足の膝伸展機能を発現するために義足に掛ける力方向には制限があり、それが狭いことが問題であることがわかった。

そこで本研究では膝部の運動に応じて足関節を連動させることで、上記力の許容範囲を広げること成功した(図7)。開発義足を用いた被験者実験の結果、関節パワーの観点から負担軽減が実現できた。



図7 2関節連動型大腿義足

### <引用文献>

[1] T. Wada, T. Takeuchi, M. Sekimoto, Y. Shiba, and S. Arimoto, "Evaluation of Inertia Matching of Trans-Femoral Prosthesis based on Riemannian Distance," in *2010 IEEE/ICME International Conference on Complex Medical Engineering*, 2010, pp. 244-249.

[2] T. Takeuchi, T. Wada, K. Awakihara, and M. Sekimoto, "Analysis of walking skill with transfemoral prosthesis based on inertia-induced measure," in *IEEE/ICME International Conference on Complex Medical Engineering*, 2011, pp. 641-646.

[3] K. Inoue, T. Wada, and R. Harada, "Novel knee joint mechanism of transfemoral prosthesis for stair ascent.," in *In 2013 IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics*, 2013.

[4] S. Yoshida, T. Wada, and K. Inoue, "Passive Knee Joint for Transfemoral Prosthesis for Stair Ascent with Knee Flexion Function in Swing Phase," in *IEEE International Conference on Engineering in Medicine and Biology*, 2014.

[5] T. Wada, H. Sano, and M. Sekimoto, "Analysis of Inertial Motion in Swing Phase of Human Gait and Its Application to Motion Generation of Transfemoral Prosthesis," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2014, pp. 2075-2080.

### 5. 主な発表論文等

[雑誌・論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 42 件)

- ① Koh Inoue, Tomohiro Tanaka, Takahiro Wada, Sinichi Tachiwana 「Development of Multifunctional Knee Joint Unit with Passive Mechanism for Transfemoral Prosthesis :Integration of Level Walk and Stair Ascent Mechanisms」  
37th Annual International Conference of IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC) 2015年8月28日, Milan (Italy)
- ② Tomoka Tanabe, Masahiro Sekimoto, Koh Inoue, Takahiro Wada, Hiroaki Hobaru, Hiroyuki Kimura 「Relevance of Whole-body Inertial Properties and Gait in Swing Control during Stair ascending」  
37th Annual International Conference of IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2015年8月27日, Milan (Italy)
- ③ Shun Yoshida, Takahiro Wada, Koh Inoue 「A Passive Transfemoral Prosthesis with Movable Ankle for Stair Ascent」  
IEEE International Conference on

- Rehabilitation Robotics, 2015年8月12日, Singapore
- ④ Takahiro Wada, Hiroshi Sano, Masahiro Sekimoto 「Analysis of Inertial Motion in Swing Phase of Human Gait and Its Application to Motion Generation of Transfemoral Prosthesis」IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2014年9月16日, Chicago (USA)
- ⑤ Koh Inoue, Ryuichi Harada, Takahiro Wada, Keisuke Suzuki, Shinichi Tachiwana 「Effects of Functional Range of Knee Extension for Transfemoral Prosthesis on Stair Ascent Motion」36th Annual International Conference of IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2014年8月27日, Chicago (USA)
- ⑥ Koh Inoue, Hiroaki Hobar, Takahiro Wada 「Effects of Inertial Properties of Transfemoral Prosthesis on Leg Swing Motion during Stair Ascent」35th Annual International Conference of IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2013年7月5日, 大阪国際会議場 (大阪)
- ⑦ Koh Inoue, Takahiro Wada, Ryuichi Harada, Shinichi Tachiwana 「Novel Knee Joint Mechanism of Transfemoral Prosthesis for Stair Ascent」Rehabilitation Robotics (ICORR), 2013 IEEE International Conference 2013年6月25日, Seattle (USA)

〔その他〕

日本機械学会 中国四国支部賞 技術創造賞 受賞. “階段昇段可能な受動機構による大腿義足の膝継手の開発” 2015年3月6日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

和田 隆広 ( WADA, Takahiro )  
立命館大学・情報理工学部・教授  
研究者番号 : 30322564

(2) 研究分担者

井上 恒 ( INOUE, Koh )  
香川大学・工学部・助教  
研究者番号 : 90624205

関本 昌紘 ( SEKIMOTO, Masahiro )  
富山大学・大学院理工学研究部 (工学)・講師  
研究者番号 : 40454516

保原 浩明 ( HOBARA, Hiroaki )  
国立研究開発法人産業技術総合研究所・人間情報研究部門・研究員  
研究者番号 : 40510673