

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 26 日現在

機関番号：22604

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2012～2013

課題番号：24860063

研究課題名(和文) 大腿切断者を含む制約のないヒトの運動解析および歩行訓練技術の開発

研究課題名(英文) Development of the Unrestrained Human Motion Analysis and Gait Training Techniques including Trans-Femoral Amputee with the Prosthetic Limb

研究代表者

林 祐一郎 (Hayashi, Yuichiro)

首都大学東京・理工学研究科・助教

研究者番号：70631935

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円、(間接経費) 690,000円

研究成果の概要(和文)：義足を装着した大腿切断者を含めたヒトの歩行運動解析を、平地、斜面、階段などの日常生活動作を反映した多種多様な路面環境に適応可能な形で実施し、運動学・動力学的視点からの現象解明に基づき、下肢の各関節に生じる負荷状態、角度変化、消費エネルギーに加えて、関節間協調動作の寄与度を表す特異値分解に基づく定量的な歩行評価指標を定義し、健常者と大腿義足装着者の相互比較を用いた外部制約を受けない汎用性を持つ歩行運動解析技術を開発した。

続いて、大腿切断者を始めとするヒトの足に対して左右個別に並進外乱を付加し、各評価指標値との相互関係を考察することにより、歩行障害者に用いる客観的な指標を持つ歩行訓練技術を開発した。

研究成果の概要(英文)：Human gait motion analysis including trans-femoral amputee with the prosthetic limb was performed in the adaptable cases to various terrain conditions such as level, slant and stairs reflecting activities of daily living. Next, In addition to load condition, angular variation and energy consumption in each joint of the lower limb, quantitative gait evaluation indices that mean contributing rate of intersegmental coordination based on singular value decomposition were defined by elucidating phenomena from kinematic and kinetic perspectives. As a result of these applications to intercomparison of health subjects and trans-femoral amputee, unrestrained gait motion analysis technique with broad utility was developed.

Moreover, left and right translational disturbances were separately input to the human limb including trans-femoral amputee. Finally, gait training technique with objective indices for gait disability person was developed by considering interaction with each evaluation indices.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械力学・制御

キーワード：医療・福祉支援 臨床 リハビリテーション バイオメカトロニクス 歩行分析 解析・評価 日常生活動作 システム工学

## 1. 研究開始当初の背景

疾病や労働災害・交通事故による下肢切断など歩行障害の増加は、近年における高齢化社会の到来と相まって、臨床現場で実施されるリハビリテーション医療の重要性を高める原因と位置づけられている。歩行障害は日常生活動作(ADL)能力の低下など大きな影響を及ぼすことから、それらの病態理解や治療効果の検証をおこなうための評価タスクとして、運動学・動力学データの取得による歩行解析が必要となってくる。

しかし、現在、リハビリテーション医療の観点からおこなわれる歩行解析は、図1に示すような10m以内の限定された空間内における歩行に要した時間の計測による歩行速度と歩数から算出した歩幅と歩行率、視診による異常歩行パターンの類型化に加えて、据え置き型である複数のカメラによる3次元動作解析装置と設置型床反力計の出力から歩行中の関節モーメントを推定する方法によるものが一般的である。

したがって、歩行障害を抱える患者が本来実行可能であった日常生活動作を反映した幅広い環境下における長時間連続した歩行運動を計測できていない。この原因として、使用した設置型床反力計、3次元動作解析装置、筋電図計などの市販されている歩行解析装置に専有計測空間の制約、運動学習効率に対する評価指標欠如、高コスト、自立歩行が困難な低歩行能力者への不適合などの問題点が内在していることが挙げられる。

そこで、上記の機械装置をウェアラブル化することにより、外部環境に制約を受けない自然な状態におけるヒトの運動解析に基づく定量的な歩行評価指標の獲得に加えて、それらを用いた運動学習効果を反映させる歩行訓練手法の構築に寄与すると考えられる。

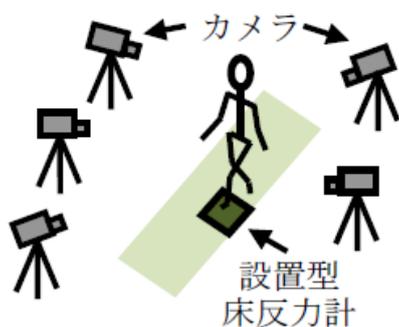


図1 従来の歩行解析装置

## 2. 研究の目的

研究代表者らは各種計測装置のウェアラブル化に挑戦した結果、新たに提案した多軸力覚センサの構造最適化手法を適用した形で計測部と信号処理部を一体化し外部接続が不要な図2に示す義足内蔵型6軸力覚セ

ンサ、ならびに図3のようにデータロガ、姿勢センサと組み合わせた移動式床反力計となる図4に示す履物装着用床反力センサを開発した。さらに、健常者および大腿義足装着者による歩行計測実験をおこない、装置の有効性を示し、歩行の生体力学的なメカニズムを解明した。図5に示すシステムは、開発した6軸力覚センサを実験に使用する際、大腿義足の下腿部に組み込み構築した義足歩行訓練装置である。

これらの多軸力覚センサを応用したウェアラブルな歩行解析システムを包括的な形として考え、周囲の地形に左右されない負荷状態や関節角度、表面筋電位の計測に基づく生体工学的・運動学的物理量の獲得に用いた上で、データ解析によって定量的な歩行評価指標となる特徴量を抽出し、健常者および大腿義足装着者の相互比較をおこなうとともに双方の歩行制御機能に関する構成原理を解明し、歩行障害を持つ患者の歩行訓練における外部入力との相関性を考慮可能な訓練指標を確立することにより、臨床現場に資する客観的な歩行評価手法を提案するとともに、歩行訓練の高効率化を図りたい。

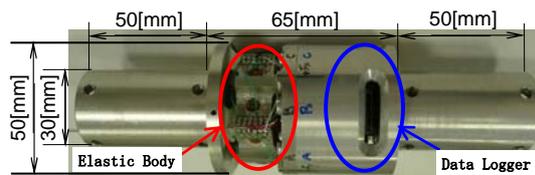


図2 義足内蔵型6軸力覚センサ

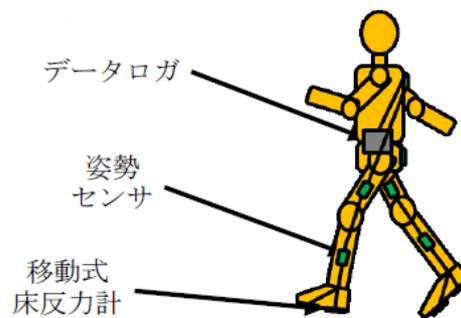


図3 ウェアラブルな歩行解析装置の構成



(a) 移動式床反力計の表面



(b) 移動式床反力計の裏面



(c) 姿勢センサ (d) データロガ

図4 履物装着用床反力センサを内蔵したウェアラブルな歩行解析装置



図5 センサ内蔵型大腿義足

### 3. 研究の方法

#### (1) 大腿切断者を含む制約のない運動解析技術の開発：

これまでの生体力学的指標の獲得を目的としていた計測データの取得に加えて、新たに筋電図計を導入し移動式床反力計および姿勢センサと組み合わせて、特別に環境が整った実験室以外での無拘束状態における下肢および上肢の表面筋電位を計測し、それぞれに対応する筋肉活性度を調べるとともに、他の歩行評価指標との具体的な関連性を確認する。また、計測データに関する健常者と大腿義足装着者の相互比較をおこなうとともに、後者については健足側と義足側の比較を検討する。これにより、ウェアラブルな歩行解析システムにおける最も重要な計測対象となり得るヒトの全身運動解析に踏み出す。

さらに、健常者および大腿義足装着者の歩行制御機能に基づく多様な歩行路環境への適応性に着目し、諸々の生体医工学的・運動学的物理量に関して特異値分解を用いた各身体部位における運動の寄与度解析をおこ

ない、ヒトの無拘束状態における関節間協調動作の中でも相関が高い動作パターンを抽出し、それらを定量的に評価していく。

#### (2) 定量的な歩行評価指標を適用した歩行訓練技術の開発：

(1)で定義した歩行評価指標を実際的な歩行訓練における観点から理解するため、床反力計となる多軸力覚センサを床面内に埋設した患者の歩容、歩行速度に対応して左右の足それぞれを個別に速度制御可能なスプリットベルト式の3次元トレッドミルを用いて、健常者および大腿義足装着者を被験者とした片足もしくは両足にベルトからの外乱を与えることによる歩行計測実験をおこない、受動的な歩行の変化を観察しデータを取得する。

また、実験実施時に健常者は移動式床反力計および姿勢センサを用いた歩行解析システム、大腿義足装着者については6軸力覚センサ内蔵型義足歩行訓練装置を併用し、(1)と同様に計測データを解析した上でベルト速度と各歩行評価指標との相互関係を調べ、被験者の身体特性に準じた最適な外部入力の大さを判断し、どの評価指標値がより大きく改善されているか、一歩行周期中において規則性を持つ変化が顕著に現れており歩行訓練に有用であるかどうかを、ばらつきなどの統計的な観点からも検証する。

最終的には、最適な評価指標を決定した後、大腿義足装着者を始めとする歩行障害者に対して提案手法を用いた実験結果に基づく歩行訓練をおこない、運動学習効果が評価指標値に十分な形で反映されていることを確認した上で、開発した定量的な歩行訓練技術の有効性を検証する。

### 4. 研究成果

(1)最初に、筋骨格モデルを適用したシミュレーションソフトウェア SIMM によって、平地歩行中に既存の設置型床反力計および3次元動作解析装置を用いた場合における大腿義足装着者の関節間力、関節モーメントを理論解析の結果として数値計算により求めた。

次に、移動式床反力計および姿勢センサ、義足内蔵型6軸力覚センサを併用して実験室外の環境下で生じる下肢の運動状態を計測し、その際に生じた床反力、足底圧中心点、関節角度、関節間力、関節モーメント、関節パワーなどとの相関性を調べ、計測データを実験結果として健常者と大腿義足装着者、健足側と義足側の相互比較をおこなった。ここで、各歩行解析システムは被験者に適用、装着するものとし、歩行計測実験においては日常生活動作を反映した屋外の平地、斜面および階段の昇降を路面環境として使用した。

さらに、歩行計測実験において得られた各種物理量に関するデータ解析をおこない、姿

勢センサの装着位置に対応した下肢に生じる床反力、関節角度、関節モーメントに加えて、一歩行周期での各関節の仕事率である関節パワーを積分した消費エネルギーを求め、ヒトの歩行に関する特徴量として抽出し、定量的な歩行評価指標を定義した。加えて、歩行の制御メカニズムを具体的に解明する上で重要となる各関節間の協調動作における時空間パターンを調べるため、これまでに触れてきた運動学・動力学的物理量の時系列データを立脚期、遊脚期、両脚支持期などに分類して行列にまとめ特異値分解を施し、得られた特異値を関節間の寄与度とみなし、各被験者・各歩行条件に関して整理することによって、無拘束状態におけるヒトの各身体部位で最も相関が高い動作パターンを抽出し評価した。

これらを包含した提案手法を、大腿切断者を含む制約のない汎用性を持つヒトの歩行運動解析技術として開発し、被験者や歩行周期における統計処理も考慮した上で、有効性を検証した。

(2)今までに提案した、一歩行周期での各関節の仕事率である関節パワーを積分した消費エネルギーを算出する手法やヒトの歩行などの制御メカニズムを具体的に解明する上で重要となる各身体部位で最も相関が高い関節間協調動作の時空間パターンを抽出する手法に基づく歩行評価指標の有用性を確認するため、設置型床反力計を内蔵し被験者の歩容、歩行速度に準じて左右の足に個別のベルト速度、進行方向による並進外乱を与えて制御することが可能なスプリットベルト式の3次元トレッドミルを計測装置として適用し、健常者および大腿義足装着者を被験者とする片足もしくは両足に適宜変更してベルト速度を付加する歩行計測実験をおこない、これまでのウェアラブルな歩行解析システムも併用した場合の各出力を相互比較するとともに、定義した評価指標値を算出し、それらの特徴を把握した。

#### 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 3 件)

- (1) 林祐一郎, 辻内伸好, 小泉孝之, 松田靖史, 土屋陽太郎, 井上喜雄, 長谷和徳, ウェアラブルな6軸力覚センサを用いた大腿義足歩行の動力学解析, 同志社大学理工学研究報告, 54巻, 4号, pp. 105-110, 2014, 査読無.
- (2) 林祐一郎, 辻内伸好, 小泉孝之, 宇野龍司, 移動式床反力計および姿勢センサを用いた制約のないヒトの歩行運動解析,

同志社大学理工学研究報告, 53巻, 4号, pp. 173-184, 2013, 査読無.

- (3) 林祐一郎, 辻内伸好, 小泉孝之, 松田靖史, 土屋陽太郎, 井上喜雄, 移動式床反力計を用いた制約のない健常者および大腿切断者の歩行運動解析, 日本機械学会論文集 C 編, 79巻, 805号, pp. 3059-3074, 2013, 査読有.

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/kikaic/79/805/79\\_3059/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/kikaic/79/805/79_3059/_pdf)

[学会発表] (計 13 件)

- (1) 林祐一郎, 辻内伸好, 小泉孝之, 牧野裕太, 中村匠汰, 松田靖史, 土屋陽太郎, 井上喜雄, 移動式床反力計と左右分離式トレッドミルによる大腿切断者を含むヒトの歩行運動解析, 第26回自律分散システム・シンポジウム, 2014年1月23日, 東京大学 本郷キャンパス 山上会館.
- (2) 林祐一郎, 辻内伸好, 小泉孝之, 松田靖史, 特異値分解に基づく健常者と大腿切断者の歩行運動に関する比較検証, 第14回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会, 2013年12月20日, 神戸国際会議場.
- (3) 林祐一郎, 辻内伸好, 小泉孝之, 松田靖史, 土屋陽太郎, ウェアラブルな6軸力覚センサを用いた大腿義足歩行の定量的評価, 第34回バイオメカニクス学術講演会, 2013年11月17日, 国立障害者リハビリテーションセンター (埼玉・所沢).
- (4) 林祐一郎, 辻内伸好, 小泉孝之, 牧野裕太, 中村匠汰, 土屋陽太郎, 井上喜雄, ウェアラブルセンサとバイオフィードバック機構を統合した歩行訓練システムの評価, 日本機械学会 スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2013, 2013年11月2日, 工学院大学 新宿キャンパス.
- (5) Yuichiro Hayashi, Nobutaka Tsujiuchi, Takayuki Koizumi, Yasushi Matsuda and Youtaro Tsuchiya, Unrestrained Kinetic Analysis of Trans-Femoral Prosthetic Gait Using Wearable Six-Axis Force/Moment Sensor, SICE Annual Conference 2013, pp. 2284-2289, 2013年9月17日, 名古屋大学 東山キャンパス, 査読有.

- (6) Yuichiro Hayashi, Nobutaka Tsujiuchi, Takayuki Koizumi, Yuta Makino, Yasushi Matsuda, Youtaro Tsuchiya and Yoshio Inoue, Biomechanical Kinetic Consideration of the Unrestrained Trans-Femoral Prosthetic Gait Using Energy Consumption, SICE Annual Conference 2013, pp. 2278-2283, 2013年9月17日, 名古屋大学 東山キャンパス, 査読有.
- (7) 林祐一郎, 辻内伸好, 小泉孝之, 牧野裕太, 松田靖史, 土屋陽太郎, 井上喜雄, 制約のない大腿義足歩行における下肢関節回転運動の定量的評価, 第31回日本ロボット学会学術講演会, 2013年9月5日, 首都大学東京 南大沢キャンパス.
- (8) 辻内伸好, 牧野裕太, 小泉孝之, 土屋陽太郎, 林祐一郎, 無拘束状態における下肢関節回転運動の定量的評価, 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2013, 2013年9月2日, 山梨大学.
- (9) 林祐一郎, 辻内伸好, 小泉孝之, 牧野裕太, 松田靖史, 土屋陽太郎, 井上喜雄, 無拘束状態における健常者および大腿切断者の歩行運動解析, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2013, 2013年8月29日, 九州産業大学.
- (10) 林祐一郎, 辻内伸好, 小泉孝之, 松田靖史, 土屋陽太郎, ウェアラブルな6軸力覚センサを用いた制約のない大腿義足歩行の動力学解析, 第23回バイオメカニズム・シンポジウム, 2013年7月26日, ルビノ京都堀川 (京都).
- (11) Yuichiro Hayashi, Nobutaka Tsujiuchi, Takayuki Koizumi, Yuta Makino, Youtaro Tsuchiya and Yoshio Inoue, Kinetic Analysis of Human Gait Motion by Calculation of Energy Consumption in the Unrestrained Condition, The 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2013年7月5日, 大阪国際会議場.
- (12) Yuichiro Hayashi, Nobutaka Tsujiuchi, Takayuki Koizumi, Yuta Makino, Youtaro Tsuchiya and Yoshio Inoue, Quantitative Evaluation of the Rotational Motion Pattern in the Joints of the Lower Limb during the Unrestrained Human Gait, The 11th International Conference on Recent

Advances in Structural Dynamics, 2013年7月1日, University of Pisa, 査読有.

- (13) 林祐一郎, 辻内伸好, 小泉孝之, 牧野裕太, 宇野龍司, 土屋陽太郎, 井上喜雄, 制約のないヒトの歩行における下肢関節回転運動の定量的評価, 日本機械学会 関西支部第88期定時総会講演会, 2013年3月17日, 大阪工業大学 大宮キャンパス.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

<http://www.comp.tmu.ac.jp/hase-lab/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

林 祐一郎 (HAYASHI, Yuichiro)  
首都大学東京・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号: 70631935

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号: