

令和 2 年 5 月 27 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K13016

研究課題名(和文) 身体の機械力学的特性に基づく歩行開始および停止動作の制御メカニズムに関する研究

研究課題名(英文) Neuromechanical analysis of control mechanism during human gait initiation and termination

研究代表者

鈴木 康之 (Suzuki, Yasuyuki)

大阪大学・基礎工学研究科・講師

研究者番号：30631874

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、立位姿勢と歩行運動に代表されるヒト二足歩行運動の制御メカニズムを明らかにし、得られた知見を医療福祉分野および医工学分野へ応用することを目的として、立位姿勢と歩行運動の遷移過程である歩行停止および歩行停止動作に関する研究を行った。ヒト二足運動の数値モデルを用いた数値シミュレーションおよび運動計測実験に基づく動作解析により、立位姿勢制御と歩行運動制御の本質的な差異を明らかにした。さらに、立位姿勢および歩行運動の遷移過程である歩行開始動作および歩行停止動作の制御において、身体の機械力学的特性を巧みに利用した間欠的な神経フィードバック制御が重要な役割を果たしている可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ヒトの静止立位姿勢を歩行速度が零となる極限であると捉えることで、両者はしばしば同一の枠組みの中で議論される。しかしながら、立位姿勢維持と通常歩行運動では必要とされる安定性が本質的に異なるとの見方もある。本研究では、両者の遷移動作である歩行開始および歩行停止動作における制御メカニズムを研究し、立位と歩行の不連続性を明らかにするとともに、遷移動作の制御における、身体の機械力学的特性を巧みに利用することの重要性を明らかにした。本研究で得られた知見は、ヒト運動制御メカニズムの本質を探るうえで大変有用であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, aiming at elucidating control mechanism of human bipedal motion (e.g. quiet standing, bipedal walking), we studied the control of human gait initiation and termination. We analyzed human quiet standing posture, normal speed bipedal walking, and very slow speed bipedal walking. We found that there is discontinuity in control mechanism through quiet standing to normal speed walking. In addition, we analyzed mathematical model of human bipedal walking, and developed/simulated dynamics of transition process between quiet standing and bipedal walking (gait initiation/termination). From the numerical analysis, it was shown that control mechanism which utilize advantage of passive dynamics might be used to succeed the gait termination. These findings indicate that gait initiation and gait termination are transition process between bipedal motions which require different control mechanisms, and skillful usage of passive dynamics is required to succeed the appropriate transition.

研究分野：生体医工学

キーワード：運動制御 姿勢制御 間欠制御 ニューロメカクス 歩行開始 歩行停止

1. 研究開始当初の背景

ヒトの静止立位姿勢を歩行速度が零となる極限であると捉えることで、両者はしばしば同一の枠組みの中で議論される。しかしながら、立位姿勢維持と通常歩行運動では必要とされる安定性が本質的に異なるとの見方もある。ヒト身体運動の代表であるこれらの二足運動の制御メカニズムを明らかにすることを目的として、これまでに静止立位姿勢あるいは歩行運動に関する数多くの研究がなされてきた。しかしながら、その詳細はいまだ十分に理解されていない。さて、超高齢社会を迎えた日本において、健康寿命の延伸は極めて重要な課題である。健康維持には日常生活の身体活動量の増加が有効であるが、身体活動には転倒リスクが伴う。高齢者の転倒時の状況には、歩行開始、方向転換、あるいは歩行停止のような、運動状態が変化する状況が多い。運動状態の変化を小さな転倒リスクで実現するための制御メカニズムを明らかにし、医療・健康分野へ応用することは、超高齢社会がさらに進行すると予想される日本において重要な課題である。そのためには、立位姿勢から通常歩行に代表されるヒト二足運動の連続的あるいは非連続的な制御メカニズムの変化を明らかにすることともに、その遷移動作である歩行開始および歩行停止動作の詳細な理解が必要である。

健康者を対象とした計測実験に基づき、歩行開始動作および歩行停止動作の制御メカニズムに関する知見が数多く得られている。それらの多くは床反力および筋活動の計測データに基づく身体キネマティクスおよびキネティクスに関する定性的理解であり、中枢神経系が採用する制御戦略は十分に理解されていない。一方で、速度の異なる歩行運動時における下肢筋活動の変化を調べた実験により、歩行速度の制御メカニズムに関する不連続性が指摘されている。このことは、静止立位姿勢維持と歩行運動に必要な制御メカニズムは本質的に異なっており、歩行開始動作および歩行停止動作は、制御メカニズムが異なる2つの状態の遷移であることを示唆する。ヒトは、必要とされる制御メカニズムが異なる運動状態の遷移を、十分に注意を傾けることなく実現する。その遷移動作の制御メカニズムを明らかにすることは、状態変化の始点と終点である立位姿勢維持および歩行運動の制御メカニズムの理解においても大変重要であると考えられる。

ニューロメカニクスとは、身体の機械力学的特性と脳・神経系の制御戦略の相互作用を探求する学問である。我々は、これまでにヒト静止立位の姿勢動揺計測実験およびヒト立位姿勢の数理モデル解析・シミュレーションを通して、ヒト静止立位姿勢の新しい制御仮説「間欠制御仮説」を提案してきた。間欠制御仮説は、「中枢神経系が身体の機械力学的特性によって定義される安定多様体のダイナミクスを巧みに利用した間欠的なフィードバック制御により、立位姿勢を柔軟に維持する」と主張する。一方で、ヒト歩行計測実験および歩行運動の数理モデル解析・シミュレーションにより、ヒトの歩行運動もまた、身体の機械力学的特性を巧みに利用した間欠的な神経フィードバック制御により、ロバストに安定化されることを示した。これより、ヒト運動制御戦略の本質は、身体の機械力学的特性と脳・神経系の制御戦略の相互作用であり、歩行開始動作および歩行停止動作の制御メカニズムの本質的な理解においても、ニューロメカニクスの視点からのアプローチが必要不可欠であると考えられる。

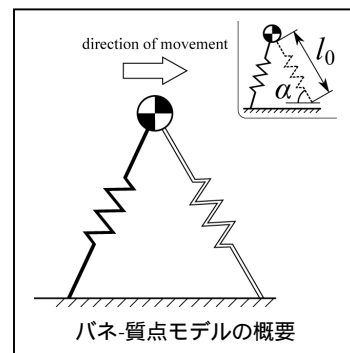
2. 研究の目的

本研究では、ニューロメカニクスの視点に立ってヒト静止立位姿勢と歩行運動の遷移過程である歩行開始動作および歩行停止動作の運動計測実験および数理モデル解析・シミュレーションにより、歩行開始および歩行停止動作の制御メカニズムを理解することとする。さらに、これらの遷移動作を成功させるために採用される戦略の本質を明らかにすることで、遷移動作の始点と終点である立位姿勢維持および歩行運動の制御メカニズムの理解の深化を目指す。

3. 研究の方法

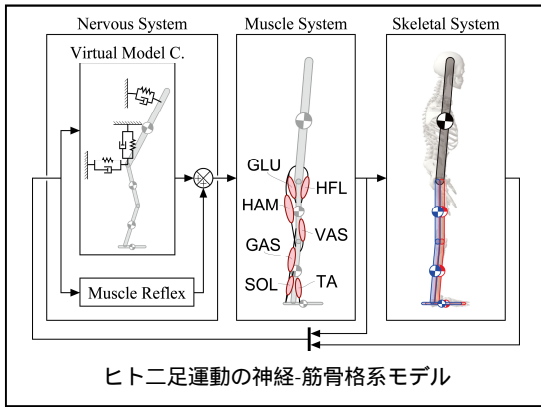
(1) バネ-質点モデルを用いたヒト歩行停止動作の数理モデル解析およびシミュレーション

ヒト歩行停止時における身体キネマティクス、足関節筋の活動、および床反力を計測した実験により、ヒト歩行停止時における制御メカニズムは足関節の底屈（足関節制御）、膝関節の伸展（膝関節制御）、および歩幅の制御（歩幅制御）に大別される。しかしながら、これらの制御が、歩行停止動作においてどのように作用するのかは、十分に理解されていない。また、ヒト身体運動の本質的な制御メカニズムを探るうえで、比較的単純な数理モデルを用いた動作解析および数値シミュレーションは大変有用な手段である。Hartmutらは、質点およびバネのみから構成されるバネ-質点モデルが、ヒト歩行運動時の身体ダイナミクスを良く再現できることを示した。このバネ-質点モデルに足関節制御、膝関節制御、および歩幅制御を実装することにより、これらの



の制御メカニズムの効果を明らかにすることができる。また、これらの制御メカニズムを融合したヒト歩行停止動作のバネ-質点モデルを構築し、歩行停止動作を成功するために必要とされる戦略を明らかにすることにより、ヒト歩行停止動作の制御戦略の本質的な理解が期待される。そこで、ヒト歩行停止動作のバネ-質点モデルを構築し、その動態解析および数値シミュレーションを行う。

(2) ヒト神経-筋骨格系モデルを用いたヒト静止立位および歩行開始動作のシミュレーション



ヒト静止立位姿勢の神経制御メカニズムを探る研究において、足関節を回転中心とする倒立単振子モデルが広く使用されてきた。近年、関節間協調の制御メカニズムを探ることを目的として、ヒト静止立位姿勢の倒立二重振子モデルの構築もなされているが、ヒト静止立位姿勢の詳細な筋-骨格モデルの構築は十分になされているとは言い難い。倒立単振子モデルおよび倒立二重振子モデルの解析・シミュレーションにより得られた知見を応用して、ヒト静止立位姿勢の神経-筋骨格系モデルを構築できれば、立位姿勢維持の神経制御メカニズムの理解がより深化されることが期待される。さらに歩行開始動作の制御メカニズムを導入を試みることにより、

ヒト歩行開始動作の本質的な理解が期待できる。本研究では、Hartmut らが構築したヒト神経-筋骨格モデルを基盤とした静止立位姿勢および歩行開始動作モデルの構築を試みる。Hartmut らが構築したヒト神経-筋骨格モデルは、脊髄反射による歩行運動を半自動的に生成する。これに、中枢神経系を介した静止立位姿勢維持の制御メカニズムおよび、歩行開始動作のメカニズムを加えることにより、ヒト静止立位姿勢および歩行開始動作の神経-筋骨格系モデルを構築する。

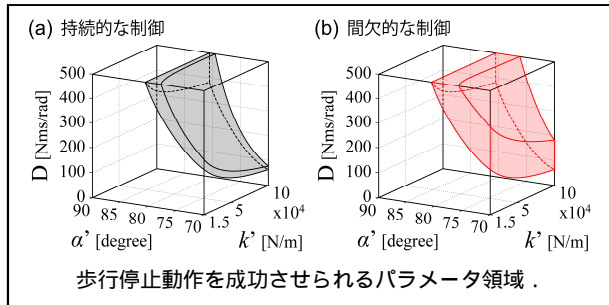
(3) 超低速の歩行運動計測実験

ヒトの二足運動を代表する静止立位と通常歩行は、しばしば同一の枠組みで理解される。一方で、歩行速度の低下に伴う筋活動の変化は線形ではなく、下肢筋の活動はある速度を境界として不連続に変化することが知られている。このことは、速度の違いという尺度では両端に位置する立位姿勢と通常歩行の制御メカニズムは本質的に異なるものであることを示唆する。しかしながら、超低速での歩行運動計測は十分に行われておらず、制御メカニズムの変化の十分な理解はなされていない。本研究では、モーションキャプチャシステムおよび床反力系を利用した、速度変化に伴う歩行運動ダイナミクスの変化を詳細に解析する。

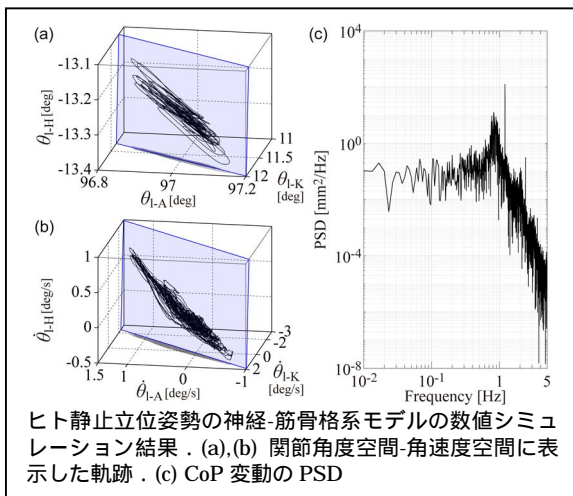
4. 研究成果

(1) バネ-質点モデルを用いたヒト歩行停止動作の数値モデル解析およびシミュレーション

バネ-質点モデルを用いたヒト歩行停止動作の解析およびシミュレーションを行った。足関節制御・膝関節制御・歩幅制御を独立して作用した数値シミュレーションにより、歩行停止動作に有効に作用する制御は足関節制御のみであることを示した。また、これらを融合したヒト歩行停止動作のバネ-質点モデルが歩行停止動作を成功するためには、各パラメータを適切に選択する必要があることがわかった。さらに、この制御メカニズムに、身体の力学的特性を利用した間欠性を導入することにより、歩行停止動作を成功させられるパラメータ領域が増大することを示した。



(2) ヒト神経-筋骨格系モデルを用いたヒト静止立位および歩行開始動作のシミュレーション

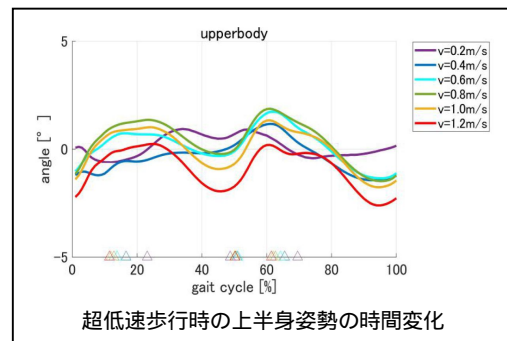


Hartmut らが構築したヒト神経-筋骨格系モデルに、中枢神経系を介したフィードバック制御として持続的な Virtual Model Control を導入することにより、立位姿勢維持を実現した。構築したモデルの姿勢動揺ダイナミクスは、質量中心位置の前後方向が変動しないための低次元空間に維持されるとい、ヒトの姿勢動揺ダイナミクスの特徴の一部を再現した。一方で、健康者の姿勢動揺ダイナミクスに見られる、大きな振幅で周波数の低い柔軟な変動は見られなかった。ヒト静止立位姿勢の神経制御メカニズムを詳細に探るために必要なモデルの基盤が構築できたと考えられる。Virtual Model Control の間欠制御の導入などにより、静止立位姿勢の制御メカニズムのより詳細な理解が期待される。

さらに、Virtual Model Control に、身体質量中心位置の前方移動、および目標位置変化に伴う脊髄反射レベルの変化機構を導入することにより、ヒト歩行開始動作の神経-筋骨格モデルの構築を行った。これにより、一部のモデルは歩行を開始することに成功したが、歩行リミットサイクルへのスムーズな変化は困難であった。これらの結果は、ヒト歩行開始動作は、静止立位姿勢の神経制御メカニズムから歩行運動の神経制御メカニズムへの単純な切り替えによっては実現されず、これらを結ぶ中間的な制御が必要であることを示唆する。

(3) 超低速の歩行運動計測実験

様々な速度を設定したトレッドミル上での歩行計測実験を行った。身体特徴点上に貼付されたマーカ位置の時間変化から、身体キネマティクスを推定した。その結果の一部を示す。これにより、例えば上半身姿勢に関して、通常歩行から、ある速度までは連続的な変化を見せるが、その速度を下回ると、定性的に異なる波形となることがわかった。このことは、静止立位と通常歩行の制御メカニズムが、本質的に異なることを示唆する。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

| | |
|--|--------------------------|
| 1. 著者名 Yasuyuki Suzuki, Takuya Inoue, Taishin Nomura | 4. 巻 6 |
| 2. 論文標題 A simple algorithm for assimilating marker-based motion capture data during periodic human movement into models of multi-rigid-body systems | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Frontiers in Bioengineering and Biotechnology | 6. 最初と最後の頁 (16 pages) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fbioe.2018.00141 | 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 Pietro Morasso, Taishin Nomura, Yasuyuki Suzuki, Jacopo Zenzeri | 4. 巻 13 |
| 2. 論文標題 Stabilization of a cart inverted pendulum: improving the intermittent feedback strategy to match the limits of human performance | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Frontiers in Computational Neuroscience | 6. 最初と最後の頁 (15 pages) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fncom.2019.00016 | 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 該当する |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 Yasuyuki Suzuki, Hartmut Geyer | 4. 巻 13 |
| 2. 論文標題 A simple bipedal model for studying control of gait termination | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Bioinspiration & Biomimetics | 6. 最初と最後の頁 36005 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-3190/aaae8e | 査読の有無 有 |
| 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 該当する |

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件/うち国際学会 4件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yasuyuki Suzuki, Hartmut Geyer |
| 2. 発表標題 A Neuro-Musculo-Skeletal Model of Human Standing Combining Muscle-Reflex Control and Virtual Model Control |
| 3. 学会等名 40th Annual International Conference of the IEEE EMBS (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shunpei Yano, Lauren Dimalanta, Yasuyuki Suzuki, Taishin Nomura |
| 2. 発表標題 Fluctuation of stride time intervals during walking with smartphone |
| 3. 学会等名 IEEE 1st Global Conference on Life Sciences and Technologies (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Akihiro Nakamura, Yasuyuki Suzuki, Kazuya Kondo, Taishin Nomura |
| 2. 発表標題 Assimilating the intermittent control model into postural sway data using Bayesian inference |
| 3. 学会等名 IEEE 1st Global Conference on Life Sciences and Technologies (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 中村晃大, 鈴木康之, 野村泰伸 |
| 2. 発表標題 微小床面移動摂動に対する静止立位姿勢と脳波応答 |
| 3. 学会等名 計測自動制御学会ライフエンジニアリング部門シンポジウム2018 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 野村泰伸, 矢野峻平, 鈴木康之 |
| 2. 発表標題 歩行周期ゆらぎに基づく歩行の安定性および転倒リスク定量評価の試み |
| 3. 学会等名 計測自動制御学会ライフエンジニアリング部門シンポジウム2018 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 鈴木康之, Geyer Hartmut |
| 2. 発表標題 ばね-質点モデルを用いたヒト歩行停止動作の解析 |
| 3. 学会等名 計測自動制御学会ライフエンジニアリング部門シンポジウム2018 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Taishin Nomura, Yasuyuki Suzuki, Akihiro Nakamura, Kazuya Kondo, Pietro Morasso |
| 2. 発表標題 A Method for Examining the Intermittent and the Stiffness Postural Control Models using Data Assimilation with Bayesian Inference |
| 3. 学会等名 41st Annual International Conference of the IEEE EMBS (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019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 | 野村 泰伸 (NOMURA Taishin) | 大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授 (14401) | |
| 研究協力者 | ガイヤー ハートムット (GEYER Hartmut) | カーネギーメロン大学・Robotics Institute・Associate Professor | |
| 研究協力者 | モラッソ ピエトロ (MORASSO Pietro) | イタリア工科大学・Robotics Brain and Cognitive Sciences Department・Senior Researcher | |