

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月25日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22500416

研究課題名（和文） ヒトの歩行運動における下肢と体幹姿勢の協調制御に関する研究

研究課題名（英文） A Study of Coordination Mechanism of the Lower Limb and the Posture of the Trunk in Human Locomotion

研究代表者

辻田 勝吉 (TSUJITA KATSUYOSHI)

大阪工業大学・工学部・准教授

研究者番号：20252603

研究成果の概要（和文）：随意的な上肢と下肢の筋運動を解析するため、モーションキャプチャシステムを用いて、人間の歩行運動を計測し、運動モードとアトラクタの構造解析から、上肢と下肢の筋シナジーについて考察した。その結果、受動性を活用した遊脚の弾道軌道制御メカニズムと、支持脚の重心揺動を伴う受動的な屈伸を伴う倒立振子モードの定量的解明、および自然な歩行速度を中心にした運動モードの遷移現象が起こるメカニズムを突き止めた。

研究成果の概要（英文）：This study treats joint synergy and control strategy of human locomotion. The numerical simulations based on the motion captured data of human locomotion revealed the physical meanings of the lower limb's joint synergy and control strategy. Support leg is controlled to move the center of mass to the forward keeping the soul's contact to the surface of the ground. The control strategy of swing leg is ballistic control with initiating active control and nonlinear passive visco-elastic properties determine periodic behavior. From these results, we can note that the fundamental control system of human locomotion is not based on exact model or reference motions but on 'no control as possible' principle.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学，医用生体工学・生体材料学

キーワード：バイオメカニクス，歩行運動，筋シナジー

## 1. 研究開始当初の背景

生物あるいは機械システムの運動制御において、身体を構成する多自由度の物理的実体としてのエレメントの振る舞いを統合し、身体全体として外部環境や内部環境の変動に対して適切な振る舞いを行なうことができる制御メカニズムの解明は重要な課題の一つである。

動物行動学の知見から、歩行運動は自発運動と随意運動の二種類の運動形態に分けて考えることができることが知られている。歩行運動の自発運動に関する研究においては、近年CPGモデルによる筋骨格系の相互引き込みを用いた運動制御モデルの研究が神経生理学およびロボット工学など分野において盛んに行われている。しかし、生理的

データを基にした現象の解釈や、ロボットなどの人工物設計論においても意図した運動パターンのアトラクタ構成論に留まる研究が大半であり、歩行における身体全体の制御メカニズムの解明には至っていない。また、既にヒトの筋骨格系の詳細な計算機モデルや現在解明されている脳機能、特に大脳基底核から小脳および脳幹を経て脊髄から抹消へのルートを取った詳細な数理モデルは存在している。しかしながら、これらのモデルを用いてもヒトの自発運動としての歩行における下肢のリズム運動と体幹の姿勢制御の協調による身体全体の動的安定化のメカニズムや、環境変動および歩行条件の変動に対するロバスト性と適応機能発現のメカニズムについては殆ど明らかにされていない。

申請者はこれまで、歩行運動における自発的運動制御に関する研究で自律的歩行制御系のモデルの構築を行ってきた。すなわち、歩行条件が変化する場合の歩行運動における自律的環境適応機能を、リズム生成系のダイナミクスと筋骨格系の多自由度非線形ダイナミクスの双方から構成される力学系のパターン形成と捉え、周期的下肢運動生成系と位相制御系から構成される制御系モデルの構築を行なった。しかしながら、従来までの研究では、自発歩行運動における体幹の下肢リズム運動に同期した姿勢制御と筋緊張制御のメカニズムは解明されるべき問題として残っている。本研究では、ヒトの歩行運動における下肢の周期的なリズム運動と体幹の姿勢運動の筋シナジーに着目し、自発歩行運動におけるリズム運動と筋緊張の適応的協調原理を明らかにし、さらに随意歩行運動におけるリアルタイムな運動パターン生成のメカニズムを明らかにすることを目的として研究を開始した。

## 2. 研究の目的

ヒトの歩行運動は自発的リズム制御による動安定な歩行パターンと脚先の随意的リーチング制御による静安定な歩行パターンに大別される。しかしながら、これらの制御メカニズムは歩行パターンに応じて選択的に機能するわけではなく、共通の制御原理が存在すると考えられる。本研究では、随意的な意図による情報論的拘束を制御メカニズムに導入する。そして提案する自発運動の制御系モデルを用いて随意運動も考慮に入れた統一的な歩行運動制御モデルの構築を目的とする。そのためには次のような二段階の課題を設定する。

まず第一に、ヒトの自発歩行運動における下肢の周期的なリズム運動と体幹の姿勢運動の適応的協調制御のメカニズムを明らかにする。

第二に、障害物発見、回避、確認といった一

連の不連続な行動が発動される随意歩行運動の際に観測される行動の揺らぎの数理モデルを構築する。

## 3. 研究の方法

本研究では、ヒトの歩行運動における下肢の周期的なリズム運動と体幹の姿勢運動の筋シナジーに着目する。まず、ヒトの自発歩行運動における下肢のリズム運動および体幹の姿勢運動をキャプチャシステムやフォースプレートなどを用いて運動学的・力学的なデータを収集し、アトラクタ再構成法やモード解析、成分分析法などを用いて力学構造を解明する。そして安定なリミットサイクルを発現する全身自由度のヒト筋骨格系の周期運動モデルを構築する。また、ヒトの筋活動計測データ、特に体幹の筋活動データと下肢の筋緊張に関する整理データを収集し、構築した周期運動モデルの上で筋骨格系の物理パラメータである筋剛性可変制御の役割や受動性についての数理的構造解明を目指す。また、構成した周期運動モデルの主要運動モードと、観測運動データとの間で差分を取ることで、歩行中の障害物回避などの随意運動発現時における足先軌道のマイクロスリップ現象に代表される行動の揺らぎ現象を観測する。そして、自発運動制御モデルに対して随意的な意図による情報論的拘束が加えられたことによる身体を持つ力学的拘束との競合によってモード遷移現象が発現するメカニズムを明らかにする。

## 4. 研究成果

光学式モーションキャプチャシステムを用いてトレッドミル上の人の歩行を計測した。計測に使用したモーションキャプチャシステムはフレームレートが100[Hz]の6台のカメラで身体に取り付けた34個のマーカーを計測するシステムである。本研究では、7人の被験者（男性3人、女性4人）に協力してもらい計測を行った。計測した歩行運動は、被験者がトレッドミル上で自然に歩行を行う通常歩行と片側の膝が物理的に拘束されていることで片膝が固定された片膝拘束歩行の2種類を行ってもらい、それぞれの歩行の歩行速度を5種類（2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 [km/h]）計測した。キャプチャした歩行運動のデータは基準座標（6自由度）と18関節（54自由度）の60自由度の関節角度ベクトルに変換し、歩行時の関節角度ベクトルの時系列の行列とした。

$$A = \begin{bmatrix} \theta_1(t_1) & \theta_2(t_1) & \cdots & \cdots \\ \theta_1(t_2) & \theta_2(t_2) & \cdots & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ \vdots & \vdots & & \theta_N(t_M) \end{bmatrix} \quad (1)$$

離散時間  $j$  で計測された関節  $i$  の関節角度を  $\theta_i(t_j)$  で表し、番号  $M$  と  $N$  はそれぞれ計測したサンプリングデータのデータ番号と関節番号を表す。そして、この行列  $A$  を特異値分解法により次の形にモード分解した。

$$A = USV^T \quad (2)$$

$$U = \begin{bmatrix} | & | & | & | \\ u_1 & u_2 & \dots & u_N \\ | & | & | & | \end{bmatrix} \quad S = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & s_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & s_N \end{bmatrix} \quad V = \begin{bmatrix} | & | & | & | \\ v_1 & v_2 & \dots & v_N \\ | & | & | & | \end{bmatrix} \quad (3)$$

モード分解された各固有モードは、対応する特異値の大きさに応じて、身体全体の運動に与える寄与が理解できる。特異値の大きな固有モードは、身体運動に取って大きな寄与を持つものであり、大きな特異値から順にいくつかのモードのみを使って、ほぼ身体全体の運動を再現できる。ここでは、このような寄与率の高い4つのモードを主要モードとして抽出することができた。これらのモードを図1に示す。

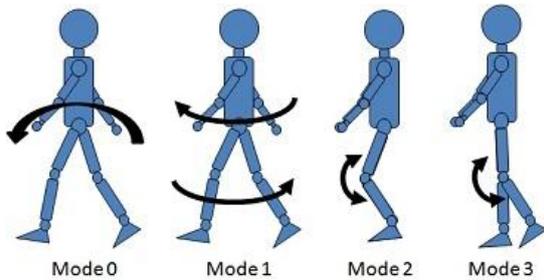


図1. 主要モード (モード0～モード3)

- モード0：身体全体の重心の倒立振子の運動
- モード1：上下肢間の逆位相の周期運動
- モード2：両膝の同相の周期的屈伸運動
- モード3：両膝の逆相の周期的屈伸運動

これらの4つのモードを用いて、成人健常者の歩行運動は寄与率 90%以上の精度で再現できることが明らかとなった。

次に、人の歩行運動を関節空間内でプロットするとアトラクタの構造が理解できる。人の歩行運動の股関節、膝関節、足首関節の関節角度の時間軌道は、遊脚期と支持脚期それぞれの関節間協調を示す2つの超平面内に収まることが知られている。本研究では、歩行1周期の下肢関節角度データを遊脚期と支持脚期の2つに分け、それぞれの拘束超平面に近似した。関節角度ベクトルの軌道が遊脚期と支持脚期の2つの超平面内にリミットサイクルを構成することが明らかとなった。関節角度空間におけるアトラクタと超平面の関係を図2に示す。

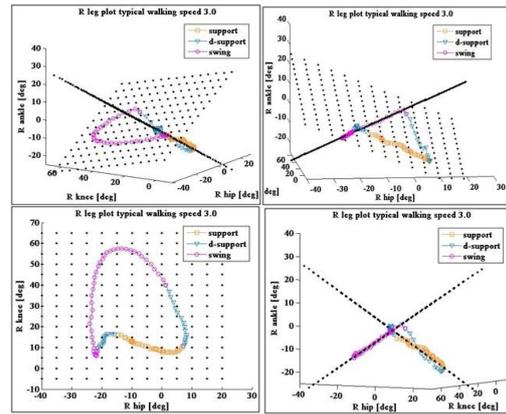


図2. 関節角度空間におけるアトラクタ

関節角度空間におけるアトラクタは、遊脚の運動および支持脚の運動のそれぞれが別の2枚の超平面を形成し、2枚の超平面の交差線上のアトラクタ軌道の2点が、脚の地面からの離脱点および地面への接地点を表している。また、関節角度の時間履歴が超平面に拘束されるということは、関節角度間に一定の従属関係が存在していることを表しており、この関係こそが関節シナジーとして知られる関節の協調動作制御メカニズムである。従って、本研究では、この超平面の構造と物理的な意味を考察した。超平面の物理的な意味を考察する上で、身体計測データに基づいた動力学シミュレーションを用いて、数値解析を行う手法を採用した。動力学シミュレーションを実行するにあたって、予備実験として、実験参加者の通常歩行における下肢の筋活動をEMGデータとして記録し、各筋の活動パターンから、シミュレーションモデルにおける関節入力トルクパターンを割り出した。また、各関節の粘弾性特性は、キャプチャデータとシミュレーションの間で対応が取れる精度で非線形粘弾性モデルを仮定し、試行錯誤により推定した。図3に動力学シミュレーションの結果の一例を示す。

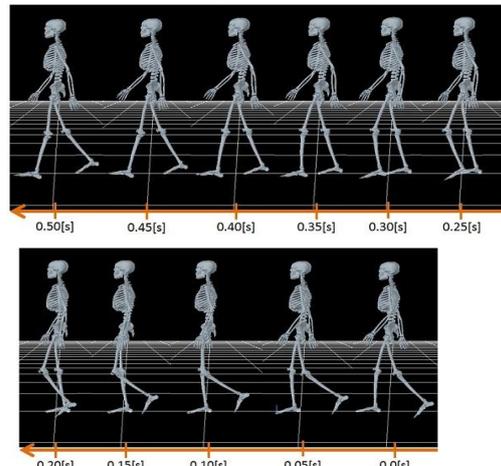


図3. キャプチャデータに基づく動力学シミュレーション

動力学シミュレーションの結果はキャプチャデータから求められる関節角度空間でのアトラクタの構造は 98%の精度で一致させることに成功し、その構造が明らかとなった。一例を図4に示す。

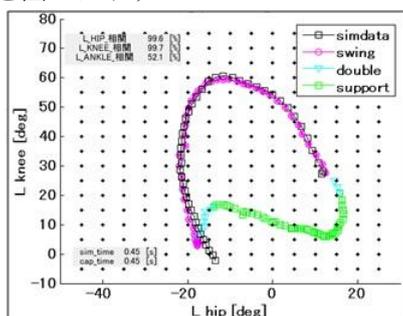


図4. 関節角度空間におけるキャプチャデータとシミュレーションのアトラクタ構造

歩行運動制御について以下のようなプロセスを経て安定なアトラクタを構成していることが解った。

- ① 遊脚開始時において、大きな筋の活動が見られ、推進力を生むための蹴りの運動が約 0.2[sec] 間、実行される。
- ② その後、遊脚の筋活動は殆ど無くなり、各関節の弛緩状態での粘弾性特性と脚全体の 2 重振子運動に従った弾道軌道を描いて運動する。
- ③ 遊脚はそのまま着地点の位置まで弾道軌道を描いて運動し、着地点の寸前で膝関節を支持する筋活動が急激に活発化し、膝の関節剛性が急増して着地の衝撃に備える。
- ④ 遊脚は踵から着地。
- ⑤ 一方、支持脚は、重心と足首関節の位置関係をほぼ不変に保ったまま、身体全体の重心の倒立振子運動を実現している。

さらに、遊脚の離陸開始時における蹴り運動について詳細に調べた。モーションキャプチャシステムによる計測と同時に、毎秒 250 フレームの高速カメラを用いて足先の離陸の瞬間を撮影し、運動解析を行った。遊脚の離陸の瞬間における運動の軌跡は、実験参加者ごとに異なるが、その運動方向ベクトルを調べた。その結果、蹴り出し方向ベクトルは、足先の操作力楕円体の主軸方向、すなわち、その脚と体幹の姿勢において関節を動かしたときに最も並進力を発生しやすい方向ベクトルとの間の相関が実験参加者 8 名全員についての平均で 95%以上の一致が得られた。このことから、人間は通常歩行時、遊脚の離陸時には、最も蹴り出し力を発生しやすい方向に向かってつま先を蹴り出す運動を 0.2 秒間ほど続けて並進方向の重心の推進力を生むとともに、その後は、遊脚は弾道軌

道制御に基づいて着地点まで運動し、支持脚は倒立振子運動を続けて、筋による特別な推進や詳細な制御を必要とせずに着地まで運動するといった、“最小制御の原理”に従った筋シナジーを内包していることが明らかとなった。

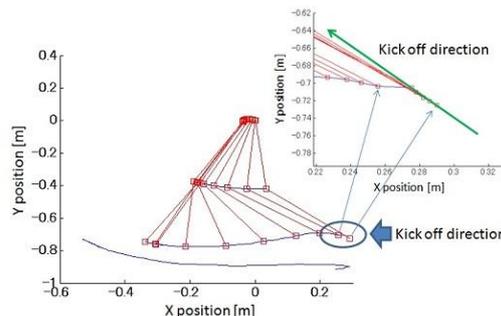


図5. 蹴り出し方向ベクトル

## 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 2 件)

- ① M. Goan, K. Tsujita, T. Ishikawa, S. Takashima, S. Kihara and K. Okazaki, "Perceiving the Gap: Asynchronous Coordination of Plural Algorithms and Disconnected Logical Types in Ambient Space," WSH 2011 and IWNC 2012, PICT, Proceedings in Information and Communications Technology, Vo. 6, pp.130-147, 2013, 査読有, DOI無
- ② K. Tsujita and G. Miki, "A Simulation Approach for an Infant Robot to Understand the Acquisition Process of Human Locomotion," Introduction to Modern robotics, Vol. 1, pp. 39-53, 2012, 査読有, DOI無

[学会発表] (計 12 件)

- ① K. Miki and K. Tsujita, "A Study of the Effect of Structural Damping on Gait Stability in Quadrupedal Locomotion using a Musculoskeletal Robot," IEEE/RSJ IROS 2012, 2012年10月9日, Vilamoura, Algarve, Portugal
- ② 辻田, 森本, "円筒物体の握り易さに関する研究 -把持時の外モーメントに対する安定性の考察-", 日本生態心理学会第4回大会, 2012年07月08日, 公立はこだて未来大学(函館)

- ③ 千田, 辻田, “モーションキャプチャデータに基づく人の歩行運動の動力学シミュレーション解析,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, 2012年05月27日~2012年05月29日, アクトシティ浜松 (浜松)
- ④ 高田, 辻田, “人の物理的拘束条件下での歩行運動における協調性に関する研究,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, 2012年05月27日~2012年05月29日, アクトシティ浜松 (浜松)
- ⑤ K. Tsujita and K. Miki, ” Stability Analysis on Quadrupedal Gaits according to Body’s Flexibility using Musculoskeletal Robot,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO) 2011, 2011年12月9日, Phuket, Thailand
- ⑥ N. Takata, S. Senda, K. Nakai and K. Tsujita, ” Mode Analyses on the Kinematical Structure of Basic Movements and Residual Patterns in Human Locomotion using Motion Capture Data,” Proc. of the 5th Int. Symp. on Adaptive Motion in Animals and Machines, 2011年10月12日, Awaji, Japan
- ⑦ K. Tsujita and K. Miki, “A Study on Trunk Stiffness and Gait Stability in Quadrupedal Locomotion Using Musculoskeletal Robot,” Proc. of the 5th Int. Symp. on Adaptive Motion in Animals and Machines, 2011年10月12日, Awaji, Japan
- ⑧ S. Senda, N. Takata, K. Nakai and K. Tsujita, ” Mode Analyses on Kinematical Structure of Common Motion Pattern, Personal Peculiarity and Motor Dysfunction in Human Locomotion,” The 16th Int. Conf. on Perception and Action, 2011年7月10日, Ouro Preto, Brazil
- ⑨ N. Takata, S. Senda, K. Nakai and K. Tsujita, “Mode Analyses on the Kinematical Structure of Basic Movements and Residual Patterns in Human Locomotion,” The 16th Int. Conf. on Perception and Action, 2011年7月8日, Ouro Preto, Brazil
- ⑩ M. Goan and K. Tsujita, ” Direct and Indirect Control of Collective Human Action in a Medium-Sized Drama System,” The 16th Int. Conf. on Perception and Action, 2011年7月8日, Ouro Preto, Brazil
- ⑪ K. Tsujita and K. Miki, “A Study on Trunk Stiffness and Gait Stability in Quadrupedal Locomotion Using Musculoskeletal Robot,” Int. Conf. on Advanced Robotics, 2011年6月21日, Tallinn, Estonia
- ⑫ K. Tsujita, M. Matsuda and T. Masuda, ” An Adaptive Locomotion of a Quadruped Robot on Irregular Terrain using Simple Biomimetic Oscillator and Reflex Controllers without Visual Information,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO) 2010, 2010年12月17日, Tianjin, China

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

辻田 勝吉 (TSUJITA KATSUYOSHI)  
大阪工業大学・工学部・准教授  
研究者番号：20252603

### (2) 研究分担者

後安 美紀 (GOAN MIKI)  
大阪市立大学・法学(政治学)研究科  
(研究院)・研究員  
研究者番号：70337616