

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760228

研究課題名(和文) 制御された不安定床面上での歩行の分析によるヒトの姿勢制御機構の解明

研究課題名(英文) Analysis of human posture control via walking experiment under unstable environment

## 研究代表者

船戸 徹郎 (Funato, Tetsuro)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・助教

研究者番号：40512869

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：様々な環境下で適応的に運動を実現するヒトの制御則を、不安定環境下での歩行・走行実験によって調べた。計測した運動の統計解析の結果から、脚軸回転による移動運動と伸縮運動の独立性が見られたため、環境に応じた伸縮運動の変化に伴う身体剛性の変化に注目した。バネ付き靴を履くことで身体剛性を低下させると、ヒトは全身の運動を靴の剛性に揃えるように変化させることが分かった。一方、床にバネを取り付けることで環境の剛性を低下させると、身体剛性は変化せず、デューティ比を調整して対応することが分かった。力学解析により、様々な環境下で運動を実現する共通した制御則を調べたところ、脚軸長を一定に保つ制御系の存在が示唆された。

研究成果の概要(英文)：Human posture control mechanism for adapting to unstable environment is investigated through walking and running experiment under unstable environment. By statistical analysis of the measured motion, independent control of limb axis orientation contributing on the forward motion and that of limb axis length contributing on the body stiffness was found. Then, in order to consider the change in body motion under low stiffness (unstable) environment, we focused on the adaptive change of body stiffness (i.e. limb axis length). When the leg stiffness was decreased by spring shoes, human motion changed so that the whole body motion matched the stiffness of shoes. In the meanwhile, when the floor stiffness was decreased by spring floor, body stiffness did not change and duty ratio changed instead. By analyzing shared control law for realizing these motions under various unstable environment, the existence of control for maintaining the limb axis length was found.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 知能機械学・機械システム

キーワード：姿勢制御 ヒト 歩行 走行 運動制御

### 1. 研究開始当初の背景

ヒトは堅い床面でも、ぬかるみのような柔らかい不安定な床面でも自由に歩行・走行を継続できる。このような環境適応機能を持つ移動機械の設計は、ヒトと同じ無限定環境下で移動機械を動かすにあたって、必須のものであり、ヒトが不安定環境下でどのように姿勢を調整しているかに注目が集まっている。我々は、ヒトの歩行中の関節運動を計測し、特異値分解を用いた特徴抽出を行うことで、歩行速度や傾斜に応じてヒトが運動の一部の性質のみを調整していることを示してきた。様々な環境下で計測したヒトの運動に対して、このような動作解析と力学解析を施すことで、不安定な環境下でのヒトの運動戦略を解明できる可能性がある。

### 2. 研究の目的

様々な環境下でヒトがどのように姿勢を調整しているかを、様々な不安定環境下での歩行・走行実験と力学解析によって調べる。ヒトの適応制御則を解明することで、環境適応性を持つ機械の設計論への基礎的な知見を得ることが目的である。

### 3. 研究の方法

本研究では、①バネ付きの靴を履いた条件での歩行・走行、②床面をバネで固定した不安定な床上での走行実験の2種類の環境下で歩行・走行実験を行い、モーションキャプチャ・床反力センサを用いて運動を計測した。

計測した重心の垂直運動と垂直床反力から身体の剛性を導出し、脚の周波数とともに靴・床の剛性と比較した。様々な靴・床剛性に対して、運動中のどのような特徴を変化させ、どのような基準(制御指標)が運動環境によらずに保たれているかを調べた。

さらに、これらの結果を基に、走行運動を決定する制御則を解明するために、質点-バネ-ダンパ系からなる身体力学モデルを構成し、実験結果と比較することで、走行制御に関与する身体パラメータを定量的に導出した。得られたパラメータの、運動環境に応じた変化を調べることで、ヒトの運動制御則を調べた。

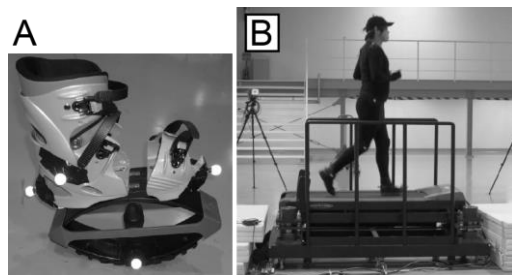


図1 A: バネ付き靴、B: 不安定床

### 4. 研究成果

(1) 歩行・走行の運動制御則: 脚剛性と脚軸回転の独立した制御

通常の(固い)床面上で歩行・走行実験を行い、計測した運動に特異値分解を施したところ、全身の運動は脚軸の回転と脚軸の伸縮に分解できること、また、歩行・走行速度に応じて回転・伸縮の時間パターンは変化しないことが分かった。このことは、脚軸の回転による移動運動と、脚軸の伸縮を独立に制御していることを示唆している。特に走行運動は、(脚軸の伸縮運動に相当する)シンプルなバネの運動で表せることが知られており、上記結果は、このバネの性質(脚剛性)を、脚軸回転による移動運動と独立に制御できることを示している。

そこで、脚剛性に注目し、バネ付き靴による身体系の剛性変化、不安定床による環境の剛性変化と、脚剛性の関係を調べる。

### (2) 不安定歩行環境下でのヒトの運動変化

① バネ付き靴による身体的不安定化  
靴底にバネを付けた靴(図1 A)を履くことで異なる剛性条件を設定し、トレッドミル上を徐々に速度を変えながら運動することで、様々な速度・剛性条件下での歩行・走行の関節運動及び床反力を計測した。計測した床反力と重心の上下動の比例係数として、脚剛性を求め、床反力と靴の運動の比例係数として、靴剛性を算出した。

靴剛性と脚の周波数の関係を調べたところ、

- 靴剛性の低下に従って、脚周波数が(ほぼ線形に)低下する(図2 A)
- 脚剛性は靴剛性と線形関係を持つ(図2 B)

トレッドミルのベルト速度で決まる歩行・走行速度を実現するために、通常の靴条件では脚運動の振動数と歩幅の2つが変化する。一方で、バネ付き靴によって身体剛性が低下すると、ヒトは足の伸縮によって決まる仮想的な剛性(脚剛性)を、靴の剛性にあわせるよ

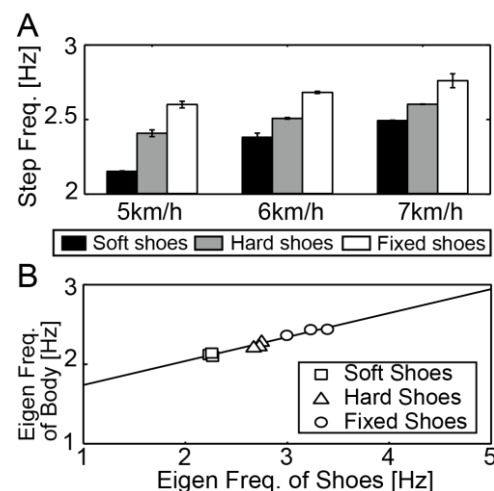


図2 A: 各歩行速度ごとの靴剛性と脚の周波数の関係、B: 靴剛性と脚剛性の関係

うに変化させることを上記の結果は示している。これによって脚運動の振動数が決まり、同時に歩行速度の実現のために、歩幅を変化させる。このように、身体(靴)剛性の変化に応じて全身運動を調整する機構があることが分かった。

## ② 不安定床による環境の不安定化

床にバネを取り付けることで異なる剛性条件を設定し、様々な剛性条件、走行速度で走行実験を行い、運動を計測した。

不安定靴を用いた実験と同様に、走行中の脚剛性を求め、床の剛性と比較をしたところ、靴の剛性が変化した場合と違い、床剛性が変わっても、脚運動の周波数に大きな変化はなかった(図3A)。このことは、不安定性が靴(身体系)に存在する場合と床(環境)に存在する場合で異なる調整が行われる可能性を示している。

床剛性の低下に応じた運動の変化を調べたところ、立脚期が増加し、遊脚期が減少するというデューティ比の変化が大きな特徴として見られた。このような運動変化が、何を基準として生じているかを解明するために、歩行条件によらずに保たれている運動の特徴を探索した。各剛性条件における立脚期の脚軸長及び脚軸角度(脚軸:腰から足先を繋ぐ直線の、垂直との角度)を算出したところ、支持期間で規格化した脚軸長・脚軸角度は、床剛性に対して大きく変化せず、特に離地時刻における脚軸角度が床の固さによらず一定であることが分かった(図3B)。この結果から、ヒトは床の剛性(安定性)が下がると歩行周期を変えずに立脚期の足の運動速度を下げ(デューティ比の変化)、常に脚軸角度が一定の値になった時に離地するという運動戦略をとることが示唆された。

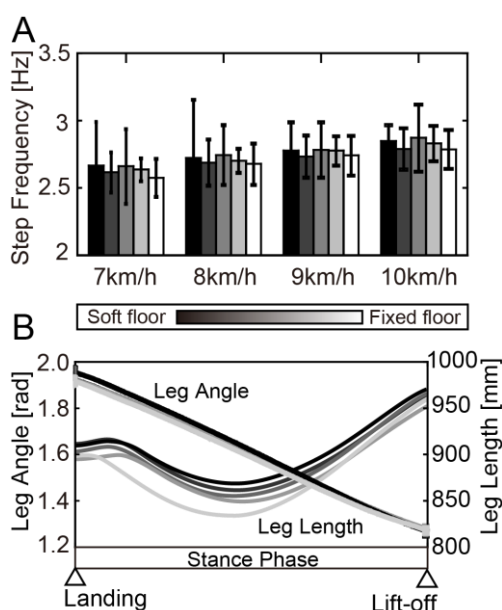


図3A: 床剛性と脚周波数の関係、B: 床剛性と脚軸角度の関係

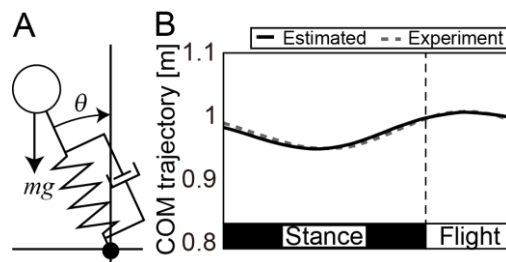


図4A: 走行の力学モデル、B: 推定された重心垂直運動とヒトの重心垂直運動

表1: 同定された制御パラメータの変化率

脚軸の自然長 $l$	0.052 ( $\pm 0.030$ )
振動数 $\omega$	0.327 ( $\pm 0.130$ )
減衰比 $\zeta$	0.697 ( $\pm 0.062$ )

## (3) 脚剛性のモデル化と力学解析による制御則の推定

以上の実験で見られた走行運動の変化がどのような制御則によって構築されていたかを、力学モデルを用いたモデル同定によって分析した。用いる力学モデルとして、走行中の重心を質点、脚をバネ-ダンパ系とするモデル(図4A)を構築した。モデルの垂直方向の運動方程式は

$$m\ddot{z} = -k(z - l \cos \theta) - c\dot{z} - mg + mf$$

( $k$ ,  $c$ : バネ及びダンパの定数、 $l$ : 脚軸の自然長、 $f$ : 制御力)であり、質量あたりの垂直床反力  $F(t)$  に対して、

$$\text{立脚期: } \ddot{z}(t) = F(t) - g$$

$$\text{遊脚期: } \ddot{z}(t) = -g$$

となることから、計測した垂直床反力、重心変位を基にパラメータの推定が可能である。固定床上を走行中のヒトの実験データをよく表すようにバネの自然長  $l$  及び、振動数  $\omega = \sqrt{k/m}$ 、減衰比  $\zeta = c/2\sqrt{mk}$  の値を探索したところ、図4Bのように、実験データをうまく表すことができる力学モデルが構築できた。

このようにして同定した制御パラメータを基に、ヒトの走行の制御則を考察した。表1は同定されたパラメータの走行速度に対する変化率(|最大値-最小値/平均値|)を表しており、表から、脚軸の自然長が走行環境に対して変動が少ないことがわかる。この結果から、脚軸を一定に保つように走行中の運動制御系が構築されている可能性が示唆された。

以上から、本研究の成果として、ヒトが環境変化に対して、以下のように運動・姿勢制御を構築していることが分かった。

- 走行中の運動は、走行速度によらず、脚軸長を常に一定に保つようなフィードバック制御系で構築されている。
- 環境(床)の剛性変化(不安定化)に対して、支持脚の運動速度を下げ、デューティ比を調整して対応する。
- 身体(靴)の剛性変化に対して、全身のリズム(周波数)をあわせるような調整機構が存在する。

## 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6件)

- ① 船戸 徹郎, 青井 伸也, 富田 望, 土屋 和雄. 運動学シナジーに基づくヒトの歩行制御構造の構成論的理解. 日本ロボット学会誌. 査読有, 31(8):739-746, 2013. DOI:10.7210/jrsj.31.739
- ② T. Funato, Y. Yamamoto, S. Aoi, N. Tomita, T. Imai, T. Aoyagi, K. Tsuchiya. Estimating the phase response curve of human walking using WSTA method, Proc. SICE Annual Conference 2013, 査読有, pp. 1298-1299, 2013. DOI:なし
- ③ T. Funato, K. Hashizume, S. Aoi, N. Tomita, K. Tsuchiya. Experimental validation of nonlinear PID control model for human sway during standing, Proc. 5th International Symposium on Measurement analysis and Modelling of Human Functions, 査読有, pp. 10-13, 2013. DOI:なし
- ④ T. Funato, S. Aoi, N. Tomita, K. Tsuchiya. The contribution of kinematic synergy on feedback control of human walking, Proc. the 6th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, 査読有, pp. 35-36, 2013. DOI:なし
- ⑤ T. Funato, S. Aoi, N. Tomita, K. Tsuchiya. A system model that focuses on kinematic synergy for understanding human control structure, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, 査読有, pp. 378-383, 2012. DOI:10.1109/ROBIO.2012.6490996
- ⑥ T. Funato, Y. Yamamoto, S. Aoi, N. Tomita, K. Tsuchiya. Analysis of Rhythm Adjustment Mechanism of Human Locomotion against Horizontal Perturbation. Proc. 4th IEEE RAS/EMBS Int. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechatronics, 査読有, pp. 1359-1364, 2012. DOI:10.1109/BioRob.2012.6290935

[学会発表] (計18件)

- ① T. Funato, Y. Yamamoto, S. Aoi, N. Tomita, T. Imai, T. Aoyagi, K. Tsuchiya. Estimating the phase response curve of human walking using WSTA method, SICE Annual Conference 2013, September 16, 2013, Nagoya, Japan.

- ② T. Funato, K. Hashizume, S. Aoi, N. Tomita, K. Tsuchiya. Experimental validation of nonlinear PID control model for human sway during standing, 5th International Symposium on Measurement analysis and Modelling of Human Functions, June 27, 2013, Vancouver, Canada.
- ③ 藤原直, 石塚駿太郎, 青井伸也, 船戸徹郎, 大島裕子, 富田望, 辻内伸好, 小泉孝之, 土屋和雄. 数理モデルと運動計測データに基づくヒトの走行における脚剛性の推定, 第26回自律分散システム・シンポジウム, January 24, 2014, 東京.
- ④ 青井伸也, 富田望, 船戸徹郎, 土屋和雄. 神経筋骨格モデルを用いた筋シナジーに基づくヒトの歩行・走行制御”, 第7回 Motor Control 研究会, September 7, 2013, 東京.
- ⑤ 富田望, 勝部晃将, 船戸徹郎, 青井伸也, 土屋和雄. ヒト歩行遷移時の筋電位解析, 第7回 Motor Control 研究会, September 7, 2013, 東京.
- ⑥ 船戸徹郎, 山本雄基, 青井伸也, 富田望, 今井貴史, 青柳富誌生, 土屋和雄. WSTA法によるヒト歩行リズムの位相応答曲線の推定, 第30回日本ロボット学会学術講演会, September 4, 2013, 東京.
- ⑦ T. Funato, S. Aoi, N. Tomita, K. Tsuchiya. The contribution of kinematic synergy on feedback control of human walking, The 6th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, March 12, 2013, Darmstadt, Germany.
- ⑧ T. Funato, S. Aoi, N. Tomita, K. Tsuchiya. A system model that focuses on kinematic synergy for understanding human control structure, IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, December 11, 2012, Guangzhou, China.
- ⑨ T. Funato, Y. Yamamoto, S. Aoi, N. Tomita, K. Tsuchiya. Analysis of Rhythm Adjustment Mechanism of Human Locomotion against Horizontal Perturbation. 4th IEEE RAS/EMBS Int. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechatronics, June 27, 2012, Rome, Italy.
- ⑩ 橋詰幸治, 船戸徹郎, 青井伸也, 富田望, 土屋和雄. 非線形PID制御によるヒト直立姿勢動揺モデルの解析, 第25回自律分散システム・シンポジウム, January 25, 2013, 宮城.
- ⑪ 山本雄基, 船戸徹郎, 青井伸也, 富田望, 土屋和雄. WSTA法を用いたヒトの歩行運動の位相応答曲線の導出, 第13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, December 19, 2012,

- 福岡.
- ⑬ 藤原直, 船戸徹郎, 富田望, 青井伸也, 土屋和雄. バネ付き床を用いたヒトの走行運動の調整機構の解析, 第 13 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, December 19, 2012, 福岡.
  - ⑭ 橋詰幸治, 船戸徹郎, 青井伸也, 富田望, 土屋和雄. ヒトの直立姿勢動揺の非線形 PID 制御モデルの提案, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2012, November 22, 2012, 愛知.
  - ⑮ 船戸徹郎, 青井伸也, 富田望, 土屋和雄. 運動学シナジーに基づくヒト歩行制御系の力学解析. 第 30 回日本ロボット学会学術講演会, September 18, 2012, 北海道.
  - ⑯ 船戸徹郎, 青井伸也, 富田望, 土屋和雄. 運動学シナジーに基づくヒトの歩行制御構造の力学解析. 生理学研究所第 6 回 Motor Control 研究会, June 22, 2012, 愛知.
  - ⑰ 富田望, 上江洲佑典, 勝部晃将, 船戸徹郎, 青井伸也, 土屋和雄. ヒト歩容遷移運動時のキネマティクスデータ解析. 生理学研究所第 6 回 Motor Control 研究会, June 22, 2012, 愛知.
  - ⑱ 橋詰幸治, 船戸徹郎, 富田望, 土屋和雄. ヒトの直立姿勢時の積分補償付き間欠制御モデルの提案, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, May 29, 2012, 静岡.
  - ⑲ 山本雄基, 船戸徹郎, 青井伸也, 富田望, 土屋和雄. ヒトの歩行運動の関節間協調における位相応答の解析, 第 24 回自律分散システム・シンポジウム, January 28, 2012, 兵庫.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

船戸 徹郎 (Funato Tetsuro)

電気通信大学・情報理工学研究科・助教

研究者番号 : 40512869