

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 16 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23760381

研究課題名（和文） 柔軟な足裏の変形から生み出される感覚運動協調に基づく動歩行制御

研究課題名（英文） Dynamic Walking Control Based on Sensory-motor Coordination That Yield from Soft Deformable Feet

研究代表者

大脇 大 (OWAKI DAI)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号：40551908

研究成果の概要（和文）：本研究では、柔軟な足裏の変形から生み出される良質な感覚運動情報を活用することで、脳・神経系、身体および環境から構成される直積空間内に広大な引き込み領域を有する安定なリミットサイクルを生起し、実環境下においてリアルタイムで適応可能な歩行運動を発現させることを目的として研究を行った。その成果として、柔軟な足部から生み出される感覚情報を効果的に活用し、安定かつ継続的な歩行生成を可能とする歩行制御器の構築ができた。また、ヒトの筋骨格構造を模擬した柔軟な足部を有する2足歩行ロボットを開発した。さらに、開発したロボットを用い提案する制御則の妥当性を実世界にて検証した。その結果、柔軟な足部から生み出される感覚情報を活用することで感覚運動協調を生起し、安定な歩行を生成可能であることを示した。

研究成果の概要（英文）：This study aims to generate adaptive bipedal walking under the real world constraints through the generation of a more stable limit cycle in the state space, which comprises a brain-nervous system (i.e., control system), musculoskeletal system (i.e., mechanical system), and the environment. In this study, I modeled an unconventional CPG-based control scheme that exploits local force feedback generated from the deformation of these feet. Moreover, I developed a bipedal walking robot with soft deformable feet inspired by human skeletal structure. I verified the validity of the proposed controller through experiments with the bipedal robot in real-world environments. I found that the robot exhibits a remarkably stable walking ability by exploiting the deformability of its feet. These results support the conclusion that the deformation of a robot's body plays a pivotal role in the emergence of sensory-motor coordination, which is a key aspect in generating adaptive locomotion in robotic systems.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：柔軟足、動歩行制御、感覚運動協調

## 1. 研究開始当初の背景

非構造的かつ予測不能的に変化する実世界環境下において、リアルタイムで適応可能な振る舞いを行動主体が発現するためには、各可動部の動きを逐一明示的に制御するの

ではなく、環境変動に呼応して振る舞いが創発するような余地を残した制御が必要不可欠である。多賀らによる先駆的な研究を端緒とする、力学系を基盤とする自律分散制御方策（以下、ダイナミカルシステムアプローチ

と呼ぶ)は、この要請を満たすための重要なアプローチとなり得る。このアプローチの要諦は、脳・神経系(制御系)と身体(機構系)、そして環境から構成される直積空間内に安定したリミットサイクルを生成させることである。これにより、各関節の軌道を明示的に制御することになり、自己組織的に行動主体の振る舞いを生成することが可能となる。

多賀らの研究を契機として、適応的動歩行生成を試みるさまざまなダイナミカルシステムアプローチが考察されてきた。しかしながら、広大な引き込み領域を持つ安定なリミットサイクルの生起を保証する設計論は依然として明らかになっていない。したがって、安定なリミットサイクルの成立を保証する設計論の構築と学理の究明は喫緊の課題である。

申請者は、この問題の源泉が、制御系と機構系を密に連関させ安定なリミットサイクルを生起させるのに十分な感覚情報が取得されておらず、力学系にフィードバックされていないことにあると考えるに至った。本研究では、身体の柔らかさから生み出されるレオロジー的特性に解決の糸口を求め、適応的動歩行生成へのダイナミカルアプローチの深化と新展開を試みる。従来の硬い身体材料を用いたロボットの制御においては、関節角度や関節角速度など単純かつ限られた深部感覚(運動覚)しか用いられていない。身体の柔らかさを活用することで、運動に伴って生み出される環境との相互作用を反映した、力学的に理にかなった良質な感覚運動情報が獲得される。すなわち、身体に柔軟性を持たせることで運動と感覚の連関が必然的に密になり、適応的運動機能発現の「鍵」となる感覚運動協調が自発的に達成されることが期待できる。柔軟な身体に立脚したソフト・コンティニュームロボットに着目する本研究は、これまでのロボティクスに対するパラダイムシフトとなる第一歩と位置づけられる研究である。

## 2. 研究の目的

ヒトの二足歩行運動は、一方の足が地面に接地している片足支持期と両方の足が地面に接地している両足支持期の繰り返しによる運動である。片足支持期では全身の重量を支持足(地面に接地している足)で支え、両足支持期では支持足間での床反力中心を移動することによって継続的・安定的な歩行を発現する。このように二足歩行において、足裏は環境からの情報を直接獲得するという最も重要な感覚器官であるが、これまで足裏の役割に着目した研究は決定的に少ない。既存の歩行ロボットでは、硬い素材を用いた平面足、点接触足、円弧形状足などを実装し、

その表面に接触センサなどを配置する研究がほとんどである。

本研究では、柔軟な足裏のレオロジー的特性から創発する良質な感覚情報を活用することで、適応的歩行動作発現の「鍵」となる運動と感覚を密に連関すること(感覚運動協調)を通して、広大な引き込み領域を持つ安定なリミットサイクルを生起させることを目指す。

## 3. 研究の方法

### (1) シミュレーション

ヒトの筋骨格構造を参考に柔軟な変形を可能とする足部の骨格モデルを有する動力学シミュレータ(図1)を構築した。また、位相振動子をベースとし、足部からの感覚情報をフィードバックすることで、歩行のリズムを調整する歩行パターン生成器モデルを提案した(図1)。構築した制御則に基づき、定常歩行、移動速度変化に対する適応性、環境変化、外乱に対する頑健性の検証を行った。

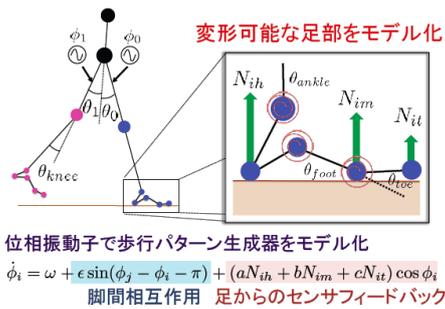


図1. 筋骨格モデルと制御モデル

### (2) 実機実験

提案する制御則の妥当性を実世界において検証するため、足裏にウレタン樹脂を実装し、センサを埋め込んだ足部を有する二脚ロボット(図2)を開発し、実機実験を行った。シミュレーションと同様に定常歩行、移動速度変化の実験を行った。

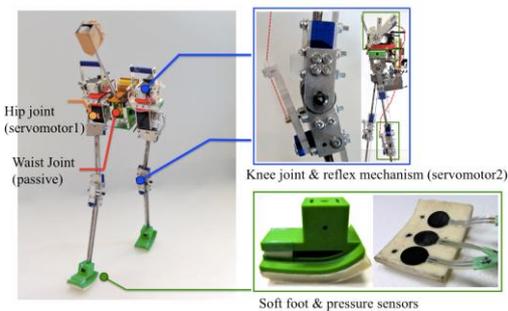


図2. 開発した2足歩行ロボット

(3) ヒトを模擬した足部の開発と理論解析  
 ヒトの足部を詳細に模擬した足部機構(図3)を開発し、足部の柔軟性から生み出される感覚情報が歩行の頑健性に与える影響を、2足ロボットを用いて検証した。さらに、得られた実験データから、安定な歩行生成に内在する力学構造の理論解析を行った。

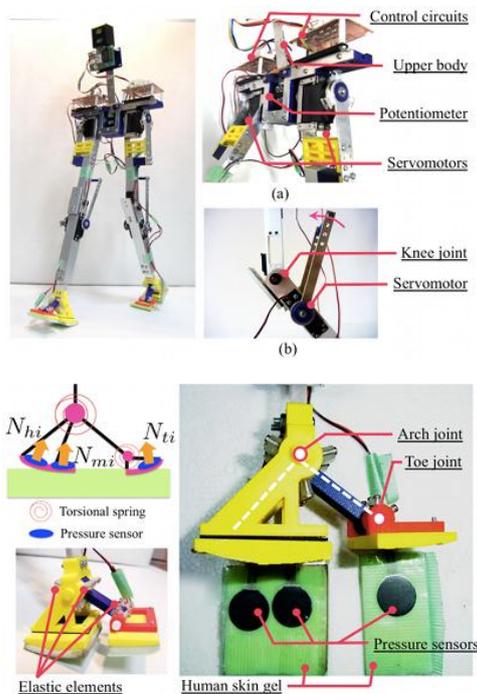


図3. 開発した柔軟足を実装した  
 2足歩行ロボット

#### 4. 研究成果

##### (1) シミュレーション

シミュレーションの結果、安定かつ継続的な歩行、静止状態から歩行状態への遷移が確認された。さらに、平地から斜面上へと環境が変化した際の環境適応性、歩行中に外乱を印可した際の頑健性(図4)についても、提案する歩行制御モデルによってパフォーマンスが向上する結果が得られた。柔軟な足裏から生み出される感覚情報を制御系にフィードバックし、歩行リズムを調整することで、優れた環境適応性や頑健性が発現する結果が得られた。

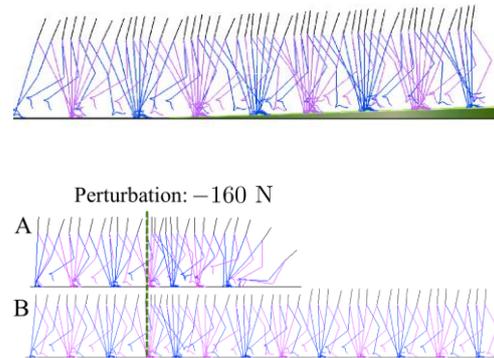


図4. シミュレーション結果

##### (2) 実機実験

提案手法の妥当性を実世界環境において検証するためのロボット実機(プロトタイプ)を製作した(図2)。開発した2足ロボットは、脚長0.4[m]、上体長0.2[m]、幅0.2[m]、重量1.6[kg]となっている。腰関節、および各脚に股関節、膝関節を有する構造となっている。腰関節には弾性要素が実装されており、受動的に可動可能となっている。各脚の股関節にはサーボモータが実装されており、歩行パターン生成器からの指令に応じて脚を駆動する。膝関節は、受動的な関節となっており、足裏が接地している時のみ関節の剛性を高める反射機構を有している。腰部に実装したサーボモータによりワイヤを引っ張ることで、足裏接地時に膝関節剛性を高める機構を実装した。本研究で着目する足裏には、シリコン材料である人肌ゲルを貼ることで柔軟性を実現した。足

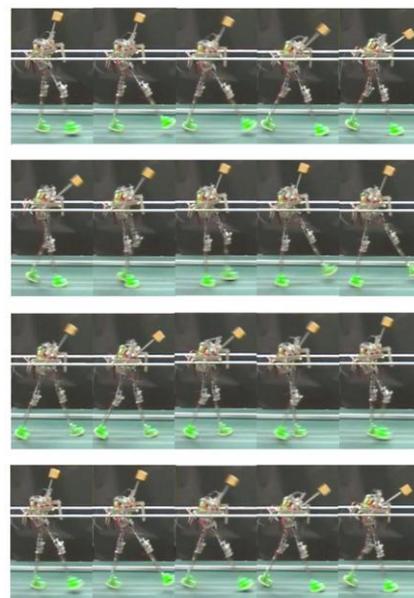


図5. 定常歩行の様子

裏からの感覚情報取得のために圧力センサを用い、柔軟な人肌ゲルを介したセンサ情報を活用することで、多様な感覚情報の取得が可能となる機構を採用した。初動段階の検証のため、実験環境であるトレッドミル上において、ロボットは矢状面のみに運動を拘束されている。

図5は、開発した2足ロボットの定常歩行時のスナップショット(歩行1周期)を示す。提案する制御則を用いることによって、安定かつ継続的な歩行が実世界においても確認された。さまざまな初期条件に対して約70%の成功率で100歩以上の継続的な歩行が可能であった。

### (3) ヒトを模擬した足部の開発と理論解析

足部構造に2関節を有し、各関節に弾性要素を実装した足部を開発し、関節可動による柔軟性を新たに実現した。また、足裏には人肌ゲル(ウレタン樹脂)を実装することで、ヒトの皮膚構造を模擬した柔軟性を実現した。足裏に圧力センサを埋め込むことによって、足裏の皮膚変形から生み出される感覚情報を獲得する機構を開発した。

実機実験の結果、継続かつ定常的な歩行が実現できた(図6)。また、歩行速度の変化に対しても柔軟に歩行速度を適応可能であることを示した。さらに興味深いことに、柔軟な足部機構を有するロボットにおいて、歩行中の外乱に対する頑健性が大きく向上する結果が得られた。この結果は、柔軟な足部を用いることで、歩行運動中の地面との力学的相互作用を反映した感覚情報が獲得され、さらにその感覚情報を歩行リズム制御器へとフィードバックすることで、感覚運動協調を生起し、より安定なリットサイクルを構成できたことを示唆する結果である。

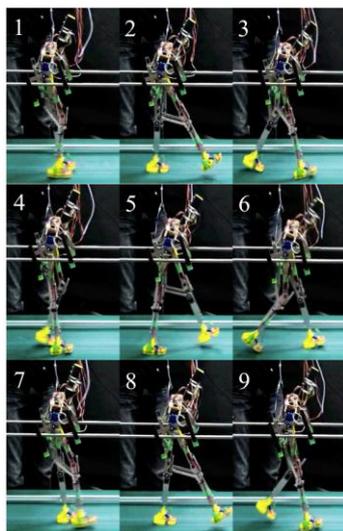


図6. 実験結果

さらに理論的な観点から考察を行った結果、適応的な歩行を実現する力学構造として、周期的な振動性と非周期的な興奮性の特性を、状況依存的に遷移する適応的構造が背後に存在すること(図7)が明らかとなった。

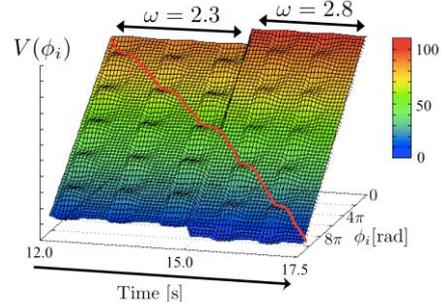


図7. 歩行に内在する力学構造

## 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)

[学会発表] (計10件)

- ① Hartmut Witte and Dai Owaki, Role of Passive Properties in Producing Adaptive Motion in Robotic and Biological Systems, 6<sup>th</sup> International Symposium on Adaptive Motion on Animals and Machines (AMAMM2013), Darmstadt, Germany, March 14<sup>th</sup>, 2013 (Invited talk).
- ② 大脇大, 福田裕樹, 石黒章夫, 柔軟な足部から生み出される感覚情報を活用した適応的動歩行制御, 第33回バイオメカニズム学術講演会, pp. 201-202, 仙台, 2012年12月16日.
- ③ Dai Owaki, Hiroki Fukuda, and Akio Ishiguro, Adaptive Bipedal Walking through Sensory-motor Coordination Yielded from Soft Deformable Feet, The 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2012), pp. 4257-4263, Vialmoura, Portugal, October 10<sup>th</sup>, 2013.
- ④ 福田裕樹, 大脇大, 石黒章夫, ミニマリストなCPGモデルから探る二脚ロボコモーションに内在する脚間協調と脚内協調の発現機序, 第30回日本ロボット学会学術講演会, 札幌, 2012年9月19日.
- ⑤ Dai Owaki et al. Minimalist CPG Model for Inter- and Intra-limb Coordination in Bipedal Locomotion,

- IAS-12, Jeju, Korea, June 29<sup>th</sup>, 2012.
- ⑥ 福田裕樹, 大脇大, 石黒章夫, 足部の表在感覚情報をCPG制御に活用した適応的二脚歩行の実験的検証, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, 2P1-H03, 浜松, 2012年5月29日.
  - ⑦ Dai Owaki, Hiroki Fukuda, and Akio Ishiguro, Soft Deformable Feet Yield Sensory-motor Coordination for Adaptive Bipedal Walking, Dynamic Walking 2012, Florida, USA, May 22<sup>th</sup>, 2012.
  - ⑧ Dai Owaki, Shota Kubo, and Akio Ishiguro, CPG-based Control of Bipedal Locomotion by Exploiting Soft Deformable Feet, 5<sup>th</sup> International Symposium on Adaptive Motion on Animals and Machines (AMAMM2011), Awaji, Japan, pp. 78-80, October 12<sup>th</sup>, 2011.
  - ⑨ Akio Ishiguro, Shota Kubo, and Dai Owaki, CPG-based Adaptive Control of Bipedal Locomotion, Dynamic Walking 2011, Jena, Germany, July 18<sup>th</sup>, 2011.
  - ⑩ 久保翔達, 熊原渉, 大脇大, 石黒章夫, 柔軟な足裏の表在感覚情報を活用した振動性・興奮性の自律的遷移に基づく適応的動歩行制御, ロボティクスメカトロニクス講演会 2011, 2P2-K01, 岡山, 2011年5月28日.

[その他]

ホームページ等

東北大学電気通信研究所石黒研究室

[www.cmplx.riec.tohoku.ac.jp](http://www.cmplx.riec.tohoku.ac.jp)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大脇 大 (OWAKI DAI)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号：40551908

### (2) 研究分担者 なし

### (3) 連携研究者 なし