

機関番号：11301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：21860007

研究課題名（和文）二脚ロコモーションの背後に潜む多重時間スケールの共存メカニズムの
解明研究課題名（英文）Understanding the Mechanism of Multi-timescale Integration Underlying
Bipedal Locomotion

研究代表者

大脇 大 (OWAKI DAI)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：40551908

研究成果の概要（和文）：本研究では、時空間パターン形成の普遍的数理構造である「多重時間スケールの共存」に着想を得ることにより、二脚歩行・走行ロボットの新奇な制御手法の提案及びその工学的実現を目指し研究を行ってきた。その成果として、受動歩行・受動走行の自己安定化メカニズムに内在する多重時間スケールの理解、世界初の実験的受動走行、受動走行の自己安定化メカニズムと親和性の高い制御則の設計法提案とその有用性の確認という成果を得た。

研究成果の概要（英文）：This study aims to propose a novel control law for a bipedal walking and running robot and develop the robots with the proposed control law for the engineering design, by focusing “Multi-timescale integration for spatiotemporal pattern generation”. As a result, we have clarified the mechanism of multi-timescale integration, achieved a real-world passive bipedal running, and proposed a design methodology that well fits with the self-stabilization mechanism underlying passive dynamic running.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,010,000	303,000	1,313,000
2010年度	980,000	294,000	1,274,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,990,000	597,000	2,587,000

研究分野：制御工学，ロボット工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：歩行・走行，ロボット，制御工学，フィードバック構造，陰的制御則

1. 研究開始当初の背景

研究代表者はこれまで、受動歩行・受動走行を含めた受動的ロコモーションの統一的発現原理の解明を目指し、受動歩行と受動走行に内在する力学的共通原理について検討してきた。特に、受動走行に着目し、杉本らと同様に解析的ポアンカレマップを導出・解析を行うことで、2入力の状態フィードバックから構成される2-Delayフィードバック制御で説明される安定化構造（Implicit

Two-delay Feedback Structure）が内在し、受動走行の安定性に大きく寄与することを明らかにした。ここで特筆すべきは、制御が一切介在せず物理法則のみに従って発現する受動歩行・受動走行という自然現象の中に、制御理論の分野で人工的に開発された制御方策である2-Delayフィードバック制御で説明される安定化構造が内在しているという事実である。さらに、この知見はヒトのロコモーションの理解及びその制御手法の構

案に重要な知見を与えると考えられる。

このように申請者はこれまでの研究を通して、受動歩行・受動走行という物理現象に背後には歩行・走行ロボット制御の鍵となる安定化メカニズムが内在していることを認識するに至った。さらに、既存の手法とは異なる新たな歩行・走行ロボットの制御手法を構築するため、受動歩行・受動走行の安定化メカニズムを効果的に活用しこの自己安定化作用と親和性の高い制御手法を構築することが肝要であり、そのためには、受動歩行・受動走行の安定化メカニズムをさらに深く理解することが重要であると考えようになった。

2. 研究の目的

本研究では、以下の三段階の課題を具体的に遂行することを通して、二脚步行・走行ロボットの新奇な制御手法の提案及びその工学的実現を試みる：

(1) 受動歩行・受動走行の安定化メカニズムの徹底理解とその深化

本研究では、時空間パターン形成の普遍的数理構造である「多重時間スケールの共存」に着想を得た数理解析を行う。具体的には、身体の構成要素レベルで内在する多数の力学的フィードバックループの時定数の「ずれ」がロコモーションパターンに内在する **Implicit Feedback Structure** に与える影響について解析を行うことによって、受動歩行・受動走行の安定化メカニズム（自己安定化作用）のより明確な定式化を試みる。

(2) 受動歩行・受動走行の自己安定化作用と親和性の高い制御手法の構築

Science に掲載された Collins らの研究に代表される準受動歩行機械は、受動歩行の特性（高エネルギー効率、自然な歩行など）を積極的に活用することで、簡便な制御方策により平地での歩行運動を実現するという試みである。実現されたロボットは自然で高効率な歩行を実現するものの、その設計指針は極めてアドホックかつテイラーメイド的であり、明確な設計論は存在しないのが現状である。申請者は、この現状を打破するため、受動歩行・受動走行の安定化メカニズムに着目し、その徹底理解及びその深化を(1)の課題としている。すなわち、(1)の考察を経ることで受動歩行・受動走行の有する自己安定化作用の定式化が可能となり、受動歩行・受動走行とより親和性の高い制御手法の構築が可能となり、明確な設計指針に基づく高効率かつ自然な二脚ロコモーションの工学的実現が可能となる。このような観点から受動歩行・受動走行の現象の解明及びその活用を試みている研究はなく、その新奇性は高い。

(3) 歩行・走行ロボットの実機開発及び提案手法の実験的検証

提案する手法の妥当性を検証するためには、シミュレーションだけでなく実世界における実機実現が不可欠である。これまでの実験的検証によって得られた知見を活用し、さらに(2)で構築した制御手法を実装することによって、さまざまな環境下において準受動歩行・準受動走行を可能とする二脚ロボットの実現が期待でき、その工学的意義はきわめて高い。

3. 研究の方法

(1) 受動歩行・受動走行の安定化メカニズムの徹底理解とその深化

「多重時間スケールの共存」という観点から身体の各構成要素の有する力学的フィードバックの時間スケールがロコモーションパターン形成に与える影響についての数理的考察を行う。具体的には、身体の幾何学的構造や粘弾性特性が受動歩行・受動走行の **Implicit Feedback Structure** に与える影響を明らかにする。これを実現するためには①弾性パラメータが歩容パターン与える影響の解明、②受動歩行・受動走行を安定化するフィードバック構造と身体パラメータの対応関係の理解、③身体の構成要素のレベルでのフィードバック構造の抽出、という考察が必要となる。

(2) 受動歩行・受動走行の自己安定化作用と親和性の高い制御手法の構築

受動歩行・受動走行の自己安定化作用と親和性の高い制御手法の構築を目指す。受動歩行・受動走行の安定化メカニズムの深化によって、制御理論と親和性の高い安定化構造の定式化が行われており、実装すべき制御方策の候補は比較的容易に構築可能である。さらに、これらの制御手法は受動歩行・受動走行という自己安定化能力を有する現象に基づく明確な設計指針の存在する制御手法であるとともに、得られる結果は極めて高いパフォーマンスを示し、ヒトのロコモーション原理の理解につながることを期待できる。

4. 研究成果

(1) 「多重時間スケールの共存」という観点から身体の各構成要素の有する力学的フィードバックの時間スケールがロコモーションパターン形成に与える影響についての数理的考察を行った。具体的には、身体の幾何学的構造や粘弾性特性が受動歩行・受動走行の安定化メカニズムに与える影響を明らかにすることを試みた。その結果、股関節に実

装した巻きバネのバネ定数 K_{hip} と脚に実装した直動バネのバネ定数 K_{leg} の値によって発現する受動歩行や受動走行さらには受動スキップといった多様な歩容とその歩容に対応するフィードバック構造の関係が明らかになりつつある (図1). 実機製作については, 世界初の受動走行を実機により実現し [図2, 雑誌論文②], 最終目標である準受動走行機械の実現に向けたプラットフォームが確立しつつある.

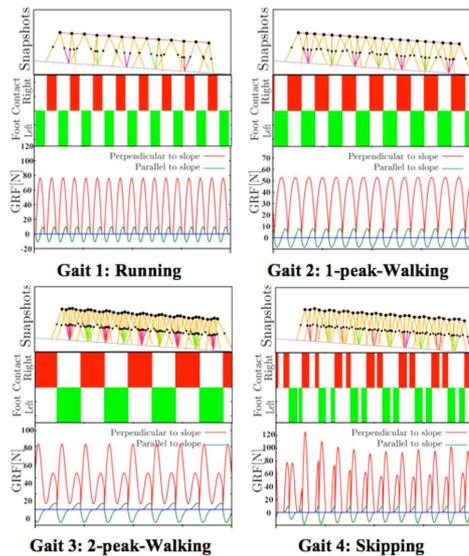


図1: 発現する多様な歩容

(2) 得られた受動走行の自己安定化メカニズムに関する知見に基づき, 受動走行に内在し走行運動を安定化する「陰的」制御則と親和性の高い「陽的」制御則の設計方針について検討した. 具体的には, 定式化した受動走行を安定化するフィードバック構造に基づき, 走行運動の安定性をさらに向上させる制御則を導出した (図3). 理論解析の結果, 走行運動の着地点 (地面に着地する瞬間の状態) に関するポアンカレマップの最大固有値を減少させる制御則の設計が可能となった. さらに, 導出した制御則の妥当性を検証するため, 提案する制御則を実装した準受動走行モデルを構築し, シミュレーションによる検証を行った. その結果, 提案する制御則を実装することで初期値に対する頑健性が向上することが確認された. また得られた制御則は, 安定な受動走行を実現する身体ダイナミクスを効果的に活用し, 走行制御の時空間的「コツ」を抽出していることを示唆する結果が得られている. 本研究は, 安定・高効率走行を実現する制御則の設計論を提供し, 走行運動の発現原理の理解に迫る知見を提供すると考えられる.

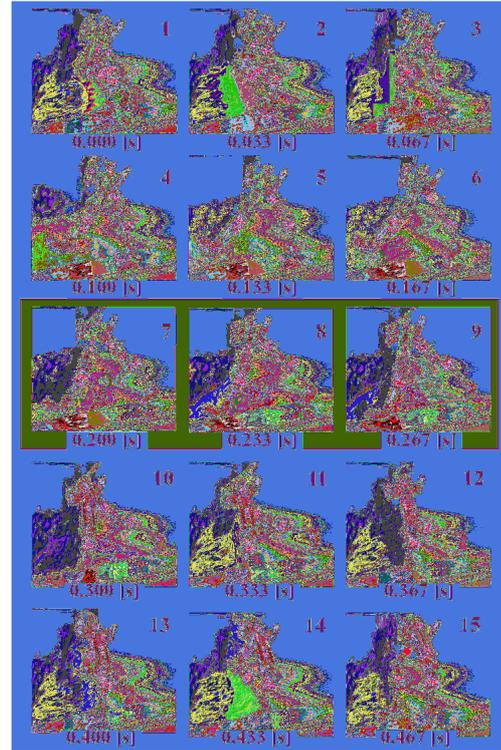


図2: 世界発の実験的受動走行

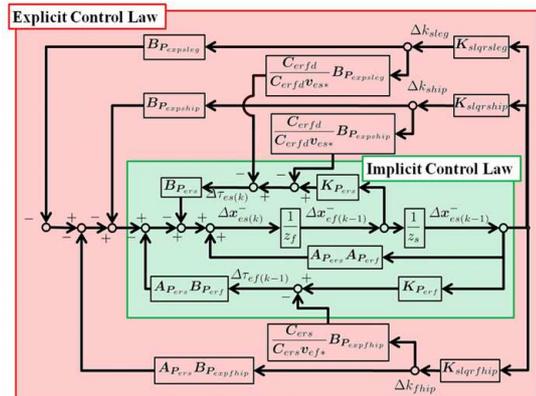


図3: 受動走行と親和性の高い制御則の設計

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 Dai Owaki, Satoshi Ishida, Atsushi Tero, Kentaro Ito, Koh Nagasawa and Akio Ishiguro, An Oscillator Model That Enables Motion Stabilization and Motion Exploration by Exploiting Multi-rhythmicity, Advanced Robotics, 査読有, Vol. 25, No.8-9, 2011, *in press*
- ② Dai Owaki, Masatoshi Koyama, Shin'ichi Yamaguchi, Shota Kubo and Akio Ishiguro, A Two-Dimensional Passive Dynamic Running

Biped with Elastic Elements, IEEE Transactions on Robotics, 査読有, Vol. 27, issue 1, 2011, pp. 156-162

- ③ 大脇大, 坂井善行, 石田怜, 手老篤史, 石黒章夫, 運動安定化と運動探索をシームレスに統合可能なマルチリズムミックオシレータモデルの提案 ～一次元ホッピングロボットの跳躍運動への適用～, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol. 46, No. 9, 2010, pp. 562-571

[学会発表] (計 12 件)

- ① 山口伸一, 久保翔達, 大脇大, 杉本靖博, 大須賀公一, 石黒章夫, 安定な準受動走行を実現する陰的制御則と陽的制御則の連関様式, 第 11 回計測自動制御学会 (SICE) システムインテグレーション部門講演会 (SI2010), 仙台, 2010.12.23
- ② 大脇大, 久保翔達, 山口伸一, 手老篤史, マウスモリツ, モフロアクリストフ, サイファートアンドレ, 石黒章夫, 上体を活用した受動走行機械の安定性向上, 第 53 回自動制御連合講演会, pp. 284-289, 高知, 2010.11.4
- ③ Koichi Osuka, Akio Ishiguro, Xin-Zhi Zheng, Yasuhiro Sugimoto and Dai Owaki, Dual Structure of Mobiligence -Implicit Control and Explicit Control-, The 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2010), pp. 2407-2412, Taipei, Taiwan, October 20, 2010
- ④ Dai Owaki, Shota Kubo, Shin'ichi Yamaguchi, Atsushi Tero, Moritz Maus, Christophe Maufroy, Andre Seyfarth and Akio Ishiguro, A Two-dimensional Passive Dynamic Runner with Upper Body, The 13th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technology for Mobile Robots (CLAWAR2010), pp. 622-630, Nagoya, Japan, September 1, 2010
- ⑤ Koichi Osuka, Akio Ishiguro, Xin-Zhi Zheng, Yasuhiro Sugimoto and Dai Owaki, Implicit Control Law in Passive Dynamic Walking, SICE 2010 Annual Conference, Taipei, Taiwan, August 21, 2010
- ⑥ Dai Owaki, Shota Kubo, Shin'ichi Yamaguchi, Atsushi Tero, Moritz Maus, Christophe Maufroy, Andre Seyfarth, Akio Ishiguro, Passive Dynamic Running Biped with Upper Body, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010, 2A2-E24, 旭川, 2010.6.16
- ⑦ 大脇大, 石田怜, 塚辺有哉, 手老篤史, 伊藤賢太郎, 加納剛史, 石黒章夫, マルチリズムミックオシレータを活用した多自由度運動パターンの自律的獲得, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010, 2P1-F28, 旭川, 2010.6.16

- ⑧ 山口伸一, 久保翔達, 大脇大, 杉本靖博, 大須賀公一, 石黒章夫, 受動走行のポアンカレマップに内在する陰的制御則と整合する陽的制御則の設計, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010, 2A2-E19, 旭川, 2010.6.16.

- ⑨ Dai Owaki, Masatoshi Koyama, Shinichi Yamaguchi, Shota Kubo and Akio Ishiguro, A Two-dimensional Passive Dynamic Running Biped with Knees, 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2010), pp. 5237-5242, Anchorage, Alaska, USA, May 8, 2010

- ⑩ 手老篤史, 長澤昂, 秋山正和, 加納剛史, 大脇大, 伊藤賢太郎, 小林亮, 石黒章夫, グローバルエントレインメントを生起させる脳・身体間連関様式の再考 ～四脚ロボットを用いた CPG 制御の基本論理の理解～, 第 22 回自律分散システム・シンポジウム, pp. 105-110, 名古屋, 2010.1.30

- ⑪ Dai Owaki, Koichi Osuka and Akio Ishiguro, Implicit Control Law that Enables Stable Running, The 3rd International Symposium on Mobiligence, pp. 352-356, Awaji, Kobe, Japan, November 21, 2009

- ⑫ Dai Owaki, Koichi Osuka and Akio Ishiguro, Understanding the Common Principle underlying Passive Dynamic Walking and Running, The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2009), pp. 3208-3213, St. Louis, MO, USA, October 13, 2009

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大脇 大 (OWAKI DAI)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：40551908

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし