

平成22年5月10日現在

研究種目：特定領域研究
 研究期間：2005～2009
 課題番号：17075009
 研究課題名（和文）
 適応的ロコモーション創発のための反射と志向性の相互作用設計
 研究課題名（英文） Realization of Adaptive Locomotion based on Dynamic Interaction between Body, Brain, and Environment
 研究代表者
 細田 耕 (HOSODA KOH)
 大阪大学・工学研究科・准教授
 研究者番号：10252610

研究成果の概要（和文）：

生物のさまざまな適応的行動の中から特にロコモーションに注目し，反射やCPGなどによってもたらされるリズム的な制御系と，振る舞い全体を修飾する調整制御系の相互作用によって適応性の実現を試みた．これらの実現には生物のような筋骨格系が大きな役割を果たしているとの仮説のもとに，二足，四足，ヘビ型とさまざまなロコモーションについて筋骨格からなる新しいロボットを多数試作し，リズム制御系と調整制御系の役割を実験的に検証した．

研究成果の概要（英文）：

Focusing on locomotion, we realized adaptive locomotive control consisting of a rhythmic controller based on reflexes and CPG and a regulatory controller that modulates the interaction between the body and its environment. We suppose that muscular-skeletal structure of a biological system plays a crucial role for realizing such adaptive control. To support this supposition we realize three types of locomotive robots, biped, quadruped, and snake-like robots, out of muscular-skeletal structure, and conduct experiments.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	16,000,000	0	16,000,000
2006年度	16,100,000	0	16,100,000
2007年度	14,600,000	0	14,600,000
2008年度	13,100,000	0	13,100,000
2009年度	13,400,000	0	13,400,000
総計	73,200,000	0	73,200,000

研究分野：工学・総合領域

科研費の分科・細目：電気電子工学・システム工学／情報学・生体生命情報学

キーワード：移動知，ロコモーション，適応，反射，志向性

1. 研究開始当初の背景

これまでの移動ロボットの制御系は，脚の軌道制御系などの下位の制御系と視覚やナ

ビゲーションなどの上位の制御系は明快に区別され，その関係は設計者によって記述されていた．その結果，アーキテクチャとして

は単純化されるものの、環境に対する適応性を失っていたと考えられる。生物の場合にはこれらのリズム制御系と志向性制御系の関係は動的に変化する相互作用であり、身体と環境の間に存在する相互作用が反映されている。このような二つの階層の力学的な相互作用からロコモーションを生み出すようなアーキテクチャを用いることにより、環境変化に対する適応性や効率が向上する可能性がある。また、さまざまな移動形態についてのアプローチを並列に進めることにより、移動形態に依存する部分と非依存の部分が明快になり、環境に適応する移動全般についての知見を期待できる。

これまで各種の移動形態に対して膨大な制御方略が提案されているが、反射あるいはリズム行動と志向的行動の関係は設計者が明示していた。例えば産総研のHRPプロジェクトや東大・早稲田大のヒューマノイドプロジェクトでの二足歩行は、下位の歩行制御系と上位の視覚による行動制御系は完全に独立しており、その間のネットワーク構造は設計者が明示的に設計している。本研究では、二つの階層間の関係は、生物のそれを模倣し動的な相互作用として実現するので、環境に対する適応性が飛躍的に向上することが期待される。

2. 研究の目的

本研究では、多自由度の身体を有するロボット(2足歩行ロボット、4足歩行ロボット、ヘビロボットなど)の不整地適応や移動効率最大化を、自発的励振を用いたリズム制御や局所的センサの情報を用いたフィードバック制御によって構成される制御階層と、視覚情報などを用いた主体の移動を戦略的に行う志向性制御階層との力学的相互作用によって実現するための制御構造を提案し、各種の実ロボットによって検証する。この相互作用は、環境と身体との相互作用を反映しており、結果的にロボットの適応性向上に大きく寄与すると考えられる。身体の構造が異なる対象についての研究を並列に進めることにより、制御構造のうち移動形態に依存する部分と非依存の部分を明らかにすることができると考えられる。

特定領域研究内には、生物において大脳皮質・脳幹・大脳基底核・小脳・脊髄の間にもどのような経路が存在し、どういった情報を交換することによって移動を実現しているか生理学的に解明する研究グループがあり、当研究によって工学的に実現する移動制御系の階層間の相互作用を設計するための知見が得られると考えられる。また、当研究によって得られた制御構造によって、生理学的な経路が何を意味しているかを構成論的に説明、数々の疾患がどの経路の欠落によって起

こるかを説明できる可能性がある。

3. 研究の方法

ロコモーション制御系を、リズムや反射からなる下位の制御系と、それを上位から調整する志向性制御系からなるとし、それらの間の動特性を巧妙に設計することにより、環境変化に適応的に振る舞うロコモーション制御系を構成する。対象としては単一の形態ではなく、二足、四足、ヘビ型など様々な形態、様々なロコモーション様式について研究し、そこに存在するロコモーション制御系の普遍的な設計原理についての解明を目指す。そのためには、生物がどのような身体を持っており、その構造が制御系にどのような影響を与えるかも問題となる。本研究課題では、生物が持つ身体構造が、適応的なロコモーション制御系の構成にとって非常に重要であることを示し、生物模倣を基にした適応的制御のための身体設計についても研究する。

4. 研究成果

[二足ロボット]

- (1) 人工筋駆動受動歩行機械の安定性
受動歩行機械に空気圧人工筋を付加し、接地信号に基づいたフィードバック制御を適用することによって、段差を乗り越える安定な歩行が実現された。
- (2) 股関節の弾性変化による歩行速度の調節
歩行速度の目標値を明示的に与えるのではなく、股関節の弾性を調整することによって歩行速度を調整する、生物型の調整法を提案、検証した。
- (3) 二関節筋を持つ下肢ロボットの跳躍
ヒトの下肢に支配的であると考えられる5対9筋を備えた下肢ロボットを試作し、跳躍実験を行って、2関節筋、特に腓腹筋が跳躍方向に及ぼす影響を調査した。腓腹筋の強度を変えることにより、他の一関節

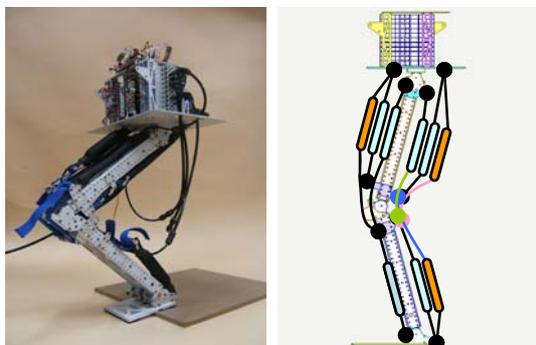


図1：二関節筋を持つ二次元跳躍ロボット
筋の変化によらず、方向を制御できることを示した。

[四足ロボット]

(4) 自律不整地走行

簡単な制御を用いたエネルギー効率の良い四脚ロボットの自律不整地走行の実現を目指して、遅延フィードバックを用いたCPGとトルク発生部を組み合わせた手法を提案した。過渡状態や不整地適応などの非定常状態においてCPGが有効に働き、定常状態ではバネ・質量系という受動ダイナミクスが主に働くという系が、切り換えを必要とせず一つのシステムで構成できることを示した。

(5) 人工筋駆動四足ロボットの行動実験

人工筋によって駆動される四足ロボットを試作し、体幹関節のアクチュエータの空気圧を変化させることにより体幹の剛性を変化させ、ウォークとトロットパターンにおける歩行の体幹の剛性の相違による安定性の相違を数値シミュレーションおよびハードウェア実験を通して検証した。その結果、それぞれのパターンにおいて、歩行運動が安定となる体幹の剛性が個別に存在することが明らかとなった。

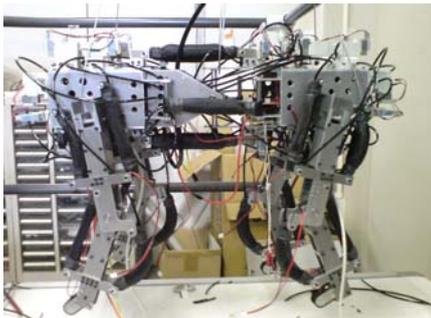


図2：空気圧人工筋駆動四足ロボット

[ヘビロボット]

(6) 生体ヘビの観察に基づくシミュレーションとヘビ様の筋骨格系を持つヘビ型ロボットの構築

解剖、CTなどを用い、生体ヘビの筋骨格構造を解析し、それに基づいたシミュレータを開発した。また、ヘビの詳細な筋骨格系のデータに基づき、ヘビと同様の超多関節筋による駆動を実現する空気圧型ヘビ型ロボットを設計した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計19件)

- [1] Hosoda, Sakaguchi, Takayama, and Takuma, "Pneumatic-driven jumping robot with anthropomorphic muscular skeleton structure", *Autonomous Robots*, 28, 307/316, 2010, peer

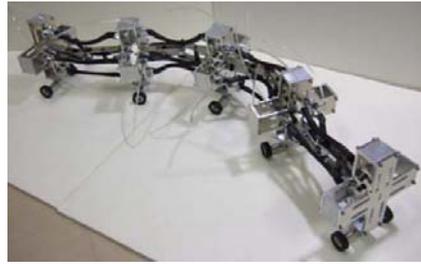


図3：空気圧人工筋駆動ヘビ型ロボット

review.

- [2] Tsujita et al., "Feasibility Study on Stability of Gait Patterns with Changable Body Stiffness using Pneumatic Actuators in Quadruped Robot", *Advanced Robotics*, 23, 503/520, 2009, peer review.
- [3] 細田, 田熊, 生物規範実験ロボティクスのススメ, 計測と制御, 48, 9, 693/698, 2009, 査読有.
- [4] Hosoda, Takuma, Nakamoto, and Hayashi, "Biped Robot Design Powered by Antagonistic Pneumatic Actuators", *Robotics and Autonomous Systems*, 56, 1, 46/53, 2008, peer review.
- [5] Takuma and Hosoda, "Terrain Negotiation of a Compliant Biped Robot Driven by Antagonistic Artificial Muscles", *Journal of Robotics and mechatronics*, 19, 4, 423/428, 2007, peer review.
- [6] Kimura et al., "Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot on Natural Ground Based on Biological Concepts", *Int. J. of Robotics Res.*, 26, 5, 475/490, 2007, peer review.
- [7] Tsujita and Masuda, "Simulation Study on Acquisition Process of Locomotion by using an Infant Robot", *Int. J. of Advanced Robotic Syst.*, 409/422, 2007, peer review.
- [8] Tsujita et al., "Oscillator-controlled Bipedal Walk with Pneumatic Actuators", *Int. J. of Mechanical Science and Tech.*, 976/980, 2007, peer review.
- [9] 福岡, 木村, 4足ロボットの生物規範型不整地適応動歩行 - 自立型「鉄犬2」による屋外歩行の実現, *日本ロボット学会誌*, 25, 1, 2007, 査読有.
- [10] Kimura, Fukuoka, and Cohen, "Biologically Inspired Adaptive Walking of a Quadruped Robot", *Philosophical Trans. of the Royal Society A*, 365, 1850, 153/170, 2007,

peer review.

- [11] Zhang, Kimura, and Fukuoka, " Self-Stabilizing Dynamics for a Quadruped Robot and Extension Towards Running on Rough Terrain", J. of Robotics and Mechatronics, 19, 1, 2007, peer review.
- [12] Kimura, Fukuoka, and Cohen, " Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot on Natural Ground Based on Biological Concepts", Int. J. of Robotics Res., 26, 5, 475/490, 2007, peer review.
- [13] Takuma and Hosoda, " Controlling the Walking Period of a Pneumatic Muscle Walker", Int. J. of Robotics Research, 25, 9, 861/866, 2006, peer review.
- [14] Zhang, Kimura, and Fukuoka, " Autonomously generating efficient running of a quadruped robot using delayed feedback control, Advanced Robotics, 20, 6, 607/629, peer review, 2006.
- [15] Zhang, Kimura, and Takase, "Delayed Feedback Control", J. of Vibration and Cont., 12, 12, 1361/1383, 2006, peer review.
- [16] 福岡, 木村, 神経振動子を用いた4足歩行ロボット「鉄犬4」による不整地動的旋回運動の実現, 日本機械学会論文集C編, 72, 724, 3848/3854, 2006, 査読有.
- [17] 細田, 非限定環境に適応する二足歩行ロボット, 計測と制御, 44, 9, 609/614, 2005, 査読有.
- [18] 細田, 動特性を利用した空気圧拮抗駆動二足歩行, システム/制御/情報, 49, 10, 411/416, 2005, 査読有.
- [19] 木村, 張, 脚式移動におけるCPGの役割, 計測と制御, 44, 9, 602/608, 2005, 査読有.

[学会発表] (11件)

- [1] Hosoda, Takayama, and Takuma, " Bouncing Monopod with Bio-mimetic Muscular-Skeleton System", Int. Conf. on Intelligent Robots and Syst., 2008年9月25日, Nice, France.
- [2] Tsujita et al., " Gait Transition by Tuning Muscle Tones using Pneumatic Actuators in Quadruped Locomotion", Int. Conf. on Intelligent Robots and Syst., 2008年9月25日, Nice, France.
- [3] Maufroy, Kimura, and Takse, " Biologically Inspired Neural Controller for Quadruped", Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, 2007年12月15日, Sanya, China.
- [4] Tsujita et al., " daptive locomotion

control of a legged robot with pneumatic actuators", Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, 2007年12月15日, Sanya, China.

- [5] Takuma and Hosoda, " Controlling Walking Behavior of Passive Dynamic Walker utilizing Passive Joint Compliance", Int. Conf. on Intelligent Robots and Syst., 2007年10月30日, San Diego, CA.
- [6] Zhang, Masuda, Kimura, and Takase, " Towards Realization of Adaptive Running of a Quadruped Robot Using Delayed Feedback Control", Int. Conf. on Robotics and Automation, 2007年4月11日, Rome, Italy.
- [7] Hosoda, Takuma, and Nakamoto, " Design and Control of 2D Biped that can Walk and Run with Pneumatic Artificial Muscles", Int. Conf. on Humanoid Robotis, 2006年12月4日, Genova, Italy.
- [8] Tsujita and Masuda, " Simulation of Acquisition of Locomotion of an Infant Robot", Int. Conf. on Intelligent Robots and Syst., 2006年10月9日, Beijing, China.
- [9] Takuma, Hosoda, and Asada, " Stabilization of Biped with Pneumatic Actuators against Terrain Changes", Int. Conf. on Intelligent Robots and Syst., 2005年8月2日, Edmonton, Canada.
- [10] Inoue, Ma, and Jin, " Optimization of CPG-Network for Decentralized Control of a Snake-Like Robot", Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, 2005年6月29日, Hong Kong.
- [11] Zheng, Fukuoka, and Kimura, " Adaptive Running of a Quadruped Robot Using Delayed Feedback Control", Int. Conf. on Robotics and Automation, 2005年4月18日, Barcelona, Spain.

[図書] (計2件)

- [1] 細田, 石黒, 知能の原理—身体性に基づく構成論的アプローチ, 共立出版, 2010, 432 ページ.
- [2] 浅間, 伊藤ほか, シリーズ移動知, オーム社出版, 2010, 2巻, 261-283.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

細田 耕 (HOSODA KOH)
大阪大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 10252610

(2)研究分担者

木村 浩 (KIMURA HIROSHI)
京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・教授
研究者番号：40192562

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

井上 康介 (INOUE KOUSUKE)
茨城大学・工学部・助教
研究者番号：10344839

田熊 隆史 (TAKUMA TAKASHI)
大阪工業大学・工学部・講師
研究者番号：40437372