

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：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760330

研究課題名(和文)ヘビのロコモーションから探る身体の変形性が生み出す適応的運動機能の発現機序

研究課題名(英文)Mechanism of Adaptive Snake Locomotion Yielded from Its Soft Deformable Body

研究代表者

加納 剛史 (Takeshi, Kano)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号：80513069

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円、(間接経費) 1,080,000円

研究成果の概要(和文)：生物の適応的運動機能の発現機序を理解する上で、力学系に基づいて自律分散制御則を設計し、その妥当性をロボットを用いて検証する構成論的アプローチは有効な方法論となる。しかるに従来のロボットが示す環境適応性は、実際の生物に比肩し得るレベルには達していない。申請者はこの原因が「身体の変形性」の欠如にあると考え、本研究では身体の変形性に由来する豊富な感覚情報から生み出される環境適応的な振る舞いの発現機序解明を目的とした。単純な身体構造にもかかわらず高度な環境適応性を示すヘビをモデル生物として採り上げ、行動観察、数理モデリング、ロボット実機開発を通して、その適応的運動機能の発現機序を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Performing experiments using robots is an effective methodology for understanding the mechanism underlying adaptive animal locomotion. However, previous robots could not reproduce innate behavior of real animals. We considered that the reason for this is the lack of deformability of the robots' body. Thus, we aimed to understand the mechanism of adaptive animal locomotion by developing robots in which rich sensory information yielded from their soft deformable body was used. We focused on the locomotion of snakes that exhibit highly adaptive locomotion in spite of its simple body structure, and through behavioral experiments, mathematical modeling, and development of a snake-like robot, we clarified the mechanism underlying adaptive locomotion of snakes.

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：自律分散制御 ヘビ 変形性 ロボット

1. 研究開始当初の背景

生物は、非構造的かつ予測不能的に変動する環境下でリアルタイムに適切な振る舞いを生成する「適応的な知」を有している。このような「知」の発現機序を理解する上で、力学系に基づいて自律分散制御則を設計し、その妥当性をロボットを用いて検証するという構成論的アプローチは有効な方法論となる。

このアプローチを採用するにあたり「環境との相互作用の結果身体に生じる感覚情報を積極的に活用した自律分散制御則を設計すること」が環境適応メカニズムの解明のための重要な「鍵」となる。これまで、このような観点に基づいた自律分散制御則の設計がなされ、ロボットへの実装が試みられてきた。しかしながら従来のロボットが示す環境適応性は、実際の生物のそれには遥かに及ばない。この事実は従来法に何らかの重大な「欠落」があることを示している。この欠落点を明らかにし、それを補うことなくしては、生物が示す環境適応メカニズムを真に理解することは不可能である。

2. 研究の目的

申請者は、上記で述べた「欠落」が、「ロボットが硬い素材を用いて作られているため、取得される感覚情報が決定的に不足していることにある」と考えるに至った。硬い素材で作られたロボットは、関節角や関節角速度といった深部感覚情報や、触覚などのごく限られた表在感覚情報しか取得することができない。このような限られた感覚情報のみでは、いかに自律分散制御則を設計しようとも環境適応的な振る舞いを生み出すのは困難である。

そこで本研究では、身体の変容性から生み出される豊富な感覚情報に着目した考察を行うことで、生物が示す環境適応的な振る舞いの発現機序解明を目指す。目的達成のためには、適切なモデル生物を設定して考察を進めていくことが肝要である。

申請者はこれまで、一次元の単純な身体構造であるにもかかわらず高度な環境適応性を示すヘビをモデル生物として設定し、ヘビ型ロボットを用いた構成論的アプローチに基づいて、その環境適応原理を追求してきた [1]。本研究ではこれまでの申請者のアプローチのさらなる深化を試みる。具体的には、

- (1) 実際のヘビを用いた行動実験
 - (2) 行動実験結果に基づく自律分散制御則の設計
 - (3) 柔軟な身体を有するヘビ型ロボットの開発および実験的検証
- により、身体の変容性から生み出される

ヘビの環境適応メカニズムを明らかにする。このことを通し、さまざまな生物ロコモーション様式に通底する環境適応原理の抽出を目指す。

[1] T. Sato et al., Bioinsp. Biomim. **6**, p. 026006 (2011); T. Sato et al., Proc. of IROS2011, pp. 1881-1886 (2011).

3. 研究の方法

(1)ヘビのロコモーションの行動実験

まず、ヘビのロコモーション様式を理解するため、実際のヘビを用いて行動観察・実験を行う。具体的には図1に示すように、杭をランダムに配置した地面や狭窄空間などでヘビをロコモーションさせ、フォースプレートを用いてヘビが地面を押しつける力を計測するとともに、撮影した動画を解析してヘビの体幹の軌跡に関するデータを取得する。

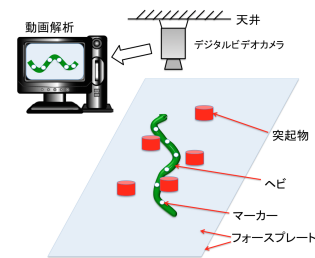


図1：行動実験の概要

(2)身体の変容性を活用したロコモーションの数理モデリング

行動観察結果を再現可能な数理モデルを構築する。モデルの構築にあたり、以下の点に留意する：

- 自律分散的なメカニズムを導入する。
- 身体に生じる豊富な感覚情報のフィードバックを取り込む。
- 本質のみを取り込んだシンプルなモデルにする。

また、モデルの妥当性はシミュレーションにより検証する。

以上を通して、ヘビの環境適応的なロコモーションに内在する自律分散制御則を抽出する。

(3)ロボット実機を用いた検証実験

(2)で構築したモデルをもとに、ロボット実機を開発する。弾性体をロボットに実装し、柔軟な身体構造をハードウェア的に実現する。そして、提案した自律分散制御則をロボットに実装して上記(1)で行った実験と同様の環境下でのロコモーション実験を行い、実際のヘビの振る舞いとを比較を行う。得られた結果をもとに数理モデルの再考察を行い、その改良と精緻化を行う。

4. 研究成果

(1) 行動実験

杭がランダムに配置された地面の上をヘビがロコモーションする様子およびヘビの

体幹曲線の軌跡をそれぞれ図2(a), 3(a)に示す. ヘビは杭やカーペットの継ぎ目のわずかな凹凸などの足場となる箇所を巧みに変化させることで多様な運動パターンを発現することが明らかになった[2].

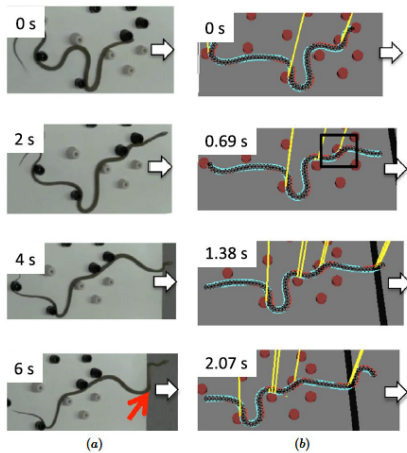


図2：ヘビのロコモーション：(a)行動実験，(b)シミュレーション

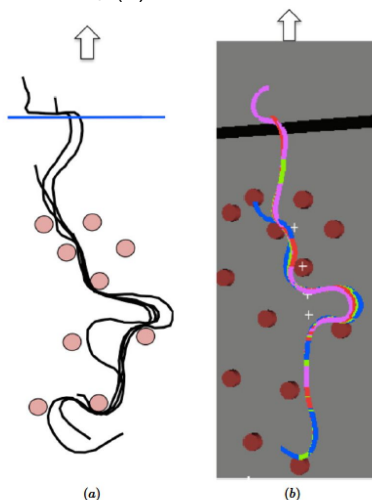


図3：ヘビの運動の軌跡：(a)行動実験，(b)シミュレーション

[2] 加納，伊達，石黒，第25回自律分散システムシンポジウム，pp. 25-30 (2013)

(2) 数理モデルおよびシミュレーション

ここでは，図2(a), 3(a)に示した「足場を活用したロコモーション」を再現可能な数理モデルについて紹介する. 多様な運動パターンを再現可能な数理モデルも構築したが，それについては上記文献[2]を参照されたい.

ヘビの身体を図4に示すモデルで記述する. 背骨は剛体リンクで一次元状につながれた質点で構成され，各質点の周囲には巻きバネが実装されている(青渦巻). 背骨の両側には体表面を表す質点が配置され，そのそれぞれが2つの隣接する背骨の質点と剛体リンクでつながれている(黒実線). 同側の隣接す

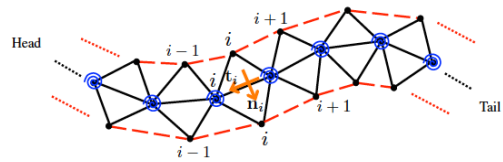


図4：モデル

る体表面の質点は自然長を任意に変えることができるバネおよびダンパでつながれている(赤破線). このバネおよびダンパは筋を表現しており，自然長を変化させることで身体のかねりを生み出すことが可能となる.

両側の体表面を表す質点には接地摩擦力が働く. 摩擦はクーロン摩擦により記述し，体軸進行方向の摩擦係数は法線方向の摩擦係数や体軸後退方向の摩擦係数より小さく設定した.

各筋を表すバネの自然長は，先頭部のみ上位中枢からの入力により定めるが，それ以外は自律分散的なメカニズムにより決定する. 具体的には，頭から*i*番目と*i+1*番目の右側・左側の体表面の質点を結ぶバネの自然長 $\bar{l}_{i+1/2,r}$ ， $\bar{l}_{i+1/2,l}$ は以下のように表される：

$$\bar{l}_{i+1/2,r} = l_{i-1/2,r} - c \sum_{j=i+1}^{i+n_f} \tanh(\mathbf{b}f_{j,l}) \quad (1)$$

$$\bar{l}_{i+1/2,l} = l_{i-1/2,l} - c \sum_{j=i+1}^{i+n_f} \tanh(\mathbf{b}f_{j,r}) \quad (2)$$

ここで， $l_{i-1/2,r}$ ， $l_{i-1/2,l}$ は頭から*i-1*番目と*i*番目の右側・左側の体表面の質点を結ぶバネの実際の長さである. (1)，(2)式の右辺第一項は頭側かつ同側の筋の長さに応じてばねの自然長を変化させる効果を表しており，伊達らが提唱した曲率微分制御[3]と等価なものになっている. (1)，(2)式の右辺第二項は今回改良した局所センサフィードバックの項である. *c*はフィードバックの大きさを表す定数，**b**は正の定数，*n_f*はフィードバックする体節の数である. $f_{i,r}$ ， $f_{i,l}$ はそれぞれ右側，左側の体表面が地面の凸部から受ける力の体軸に垂直な方向の成分の大きさを表している. これは，体表面のある部位が地面の凸部などによって力を受けると，その頭側かつ反対側および尾側かつ同側のばねの自然長を短くすることを意味している.

以上からわかるように，本モデルでは「筋の伸張」という深部感覚と「身体側面に生じる圧感覚」という表在感覚の双方のフィードバックを取り込んだ，きわめて単純な自律分散制御に基づくモデルとなっている.

提案モデルを用いてシミュレーションを行った. 先頭部のバネの自然長はキーボード入力により操作した. 結果を図2(b), 3(b)に示す. ヘビは足場(杭や地面の段差)を積極的に活用し，それらに身体を押しつけながら頭が通った軌跡をトレースするように推進していることがわかる. この振る舞いは実際のヘビを用いた行動実験の結果(図2(a)，

3(a))と驚くほどよく一致している。

[3] H. Date and Y. Takita, Proc. of IROS2007, pp. 3554-3559 (2007).

(3) ロボット実機検証

図5に、本研究で開発したヘビ型ロボットを示す。ロボットは、31個の等質な体節から構成されており、それらが関節を介して一次的に結合した構造となっている。各体節の下部には受動車輪が実装されており、体軸方向の接地

摩擦係数が体軸に対し垂直な方向の接地摩擦係数より小さくなる効果を実現している(実際のヘビにおいても、このような接地摩擦の異方性を活用して推進することが知られている)。

図6に詳細な体節構造を示す。各体節には、関節駆動用のサーボモータ、関節回転角度を検出するためのロータリポテンシオメータ、マイクロコンピュータを実装した制御回路基板、電源バッテリーが内蔵されている。関節軸の周りには弾性体が充填されており、モータは自身の駆動対象である隣接体節と弾性体を介して間接的に結合している。この機構により関節部分は受動的に変形することが可能であり、身体に生じる無理な力を吸収する役目を担っている。



図5：開発したヘビ型ロボット

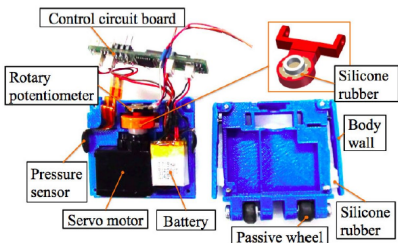


図6：体節構造

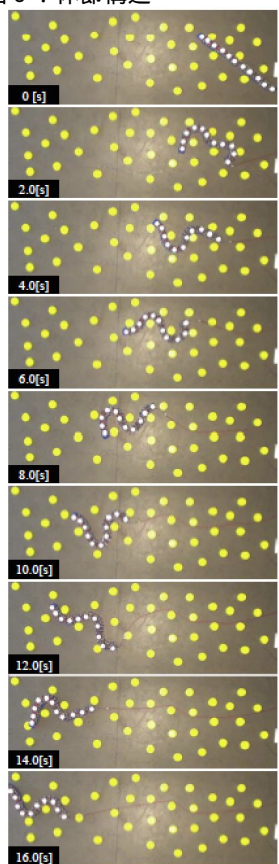


図7：実機実験

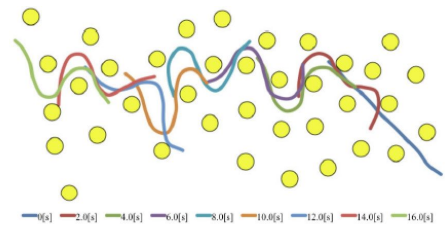


図8：ロボットの運動の軌跡

ここで、関節回転角度はロータリポテンシオメータで検出され、その出力値は一つ後ろの体節に有線で伝えられる。これにより曲率微分制御が実現可能となる。また、各体節側部には圧力センサが実装されており、これをカバーが覆う構造となっている。圧力センサとカバーの間には弾性体が挿入されており、この弾性を調整することで体表面で検出する接触圧力の感度を調整することが可能となっている。制御回路間は有線で結合されており、圧力センサの出力値は複数の頭部側体節に伝えられる。これにより、体表面にかかる圧力に基づく局所センサフィードバック則が実現可能となる。

提案する自律分散制御則を実装した場合のロコモーションのスナップショットを図7に示す。ロボットが杭に身体を押し付けその反力を活用することで推進する様子が観察された。また、図8に示す身体軌跡から、ロボットは杭を活用することで横滑りを抑えながら、頭部の軌跡を追従している様子が確認された。

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 1件)

1. Takeshi Kano, Takahide Sato, Ryo Kobayashi, and Akio Ishiguro, "Local reflexive mechanisms essential for snakes' scaffold-based locomotion", *Bioinsp. Biomim.*, **7**, 046008 (2012). doi:10.1088/1748-3182/7/4/046008, 査読有

〔学会発表〕(計 8件)

1. 佐竹冬彦, 加納剛史, 伊達 央, 井上康介, 石黒章夫, 狭窄空間におけるヘビのロコモーションに内在する自律分散制御則の解明, 第26回自律分散シンポジウム, pp.171-176, 2014.1.24, 東京
2. T. Kano and A. Ishiguro, Obstacles Are Beneficial to Me! Scaffold-based

- Locomotion of a Snake-like Robot Using Decentralized Control, 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. (IROS 2013), pp. 3273-3278, 2013.11.5, Tokyo, Japan.
3. T. Kano, H. Date and A. Ishiguro, Decentralized Control Scheme for a Snake-like Robot That Enables Omni-directional Locomotion, International Workshop on SoftRobotics and Morphological Computation, P-32, 2013.7.17, Ascona, Switzerland
 4. T. Kano, H. Date and A. Ishiguro, Considering Snake Locomotion with “Continuum Legs”, Dynamic walking2013 , 2013.6.13, Pittsburgh, USA
 5. 加納剛史, 石黒章夫 , 不整地走破を目指した自律分散型大自由度ヘビロボットの開発 , 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH2013) , 講演論文集 (CD-ROM) , 2A1-N05, 2013.5.茨城, 2013.5.24
 6. 佐藤貴英 , 加納剛史 , 石黒章夫 , 不整地走破が可能な大自由度ヘビ型ロボットの实機実現 , 第 25 回自律分散システムシンポジウム , pp. 1-4, 2013.1.25 , 仙台
 7. 加納剛史 , 伊達央 , 石黒章夫 , ヘビの「歩容」遷移メカニズム , 第 25 回自律分散システムシンポジウム , pp. 25-30, 2013.1.25 , 仙台
 8. T. Sato, T. Kano, R. Kobayashi, and A. Ishiguro, “Snake-like Robot Driven by Decentralized Control Scheme for Scaffold-based Locomotion”, 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. (IROS 2012), pp. 132-138, 2012.10.8, Vilamoura, Portugal

〔図書〕(計 0 件)

該当なし

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)
該当なし

取得状況 (計 0 件)
該当なし

〔その他〕
該当なし

- 6 . 研究組織
- (1) 研究代表者
加納 剛史 (KANO TAKESHI)
東北大学・電気通信研究所・助教
研究者番号 : 80513069
 - (2) 研究分担者
該当なし
 - (3) 連携研究者
該当なし