

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22760310

研究課題名（和文） 這行様ロコモーションに内在する位相・筋緊張が連関した自律分散制御則の解明

研究課題名（英文） Decentralized Control of Serpentine Locomotion That Enables Well-balanced Coupling between Phasic and Tonic Control

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

研究成果の概要（和文）：

生物の適応的ロコモーションは、膨大な身体自由度の間に生み出される動きの位相的關係と筋力の空間的關係の双方が整合的に噛み合って実現されている。本研究では、一次元状の単純な身体構造であるにも関わらず巧みな振る舞いを示すヘビをモデル生物として採り上げ、そのロコモーションに内在する自律分散制御則を明らかにすることを目的とした。まずヘビのロコモーションを記述する数理モデルを構築した。モデルの妥当性はシミュレーションにより検証した。さらに、ヘビ型ロボット実機を開発し、実世界でのモデルの妥当性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

Animals' adaptive locomotion is realized by properly adjusting the phase relationship and the spatial distribution of their muscle tonus among their large number of degrees of freedom. We aimed to clarify an autonomous decentralized control mechanism underlying such locomotion by focusing on snakes that exhibit dexterous locomotion in spite of its simple one-dimensional body structure. First, we constructed a model that can reproduce the snake locomotion. We confirmed the validity of the model through simulations. Furthermore, we validated the model in the real world by developing a snake-like robot.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：制御工学

科研費の分科・細目：制御システム

キーワード：自律分散制御，ヘビ型ロボット

1. 研究開始当初の背景

生物は、非構造的で予測不能的に変動する環境（無限定環境）下で実時間かつ目的的に振る舞いを自己組織化しながら対処する適応的な知を有している。このような知は、身体に持つ膨大な自由度の間に生み出される時間的秩序（phasic な運動パターン）と空間的秩序（tonic な運動パターン）の双方が

整合的に噛み合ってはじめて実現される。

自律分散制御は、このような優れた能力の発現機序を理解する際に鍵となる概念である。これは、単純な知覚・判断・行動出力の機能を持つ要素（自律個）を多数集めて相互作用させることで、大域的に新規かつ有用な機能を創発させる制御方式である。しかしながら現段階では、生物が行う自律分散制御の

詳細は明らかではなく、工学的な設計論としても確立していない。この理由は、協働的振る舞いを発現するための「個（自律個）」と「全体（自律個集団、目的など）」をつなぐロジックが依然として欠けているためと思われる。

これまでの研究において、生物が為す環境適応的な振舞いを、脳・身体・環境間の齟齬を検出する discrepancy function (齟齬関数) に基づく自律個への局所センサフィードバックによって説明しようとするアプローチがなされてきた[1, 2]。このアプローチは自律分散制御則の理解に重要な知見を与えるものであったが、phasic な運動パターンの生成のみに焦点を当てられており、tonic な運動パターンに関しては考慮されていなかった。それゆえ、実際の生物が示すような環境適応的な振舞いは部分的にしか実現することができなかった。そこで、phasic な運動パターンと tonic な運動パターンを有機的に連関させる自律分散制御様式を明らかにすることが急務とされている。

[1] 武田、北村、梅舘、中垣、小林、石黒、「真正粘菌をモチーフとした大自由度ソフトロボットの実験的検証」、ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集、2A2-F22 (2009)。

[2] 佐藤、渡邊、石黒、「脳・身体・環境間の齟齬を活用した自律分散制御スキームの実験的検証：ヘビ型ロボット実機を用いた事例研究」、ロボティクス・メカトロニクス講演予稿集、2A2-F21 (2009)。

2. 研究の目的

上記問題に取り組む上で、適切なモデル生物を採り上げて議論する必要がある。そこで本研究ではヘビの這行様ロコモーションに着目する。その理由には、i)ヘビは地面の摩擦や傾斜角度などの環境が変化しても身体の形状や硬さを時空間的に変化させてしなやかに進んでいくことができ、その背後には合理的かつ普遍的な局所センサフィードバック則が潜んでいると予想されること、ii)哺乳類などの高等生物に比して身体の構造が単純でありモデル化する上で扱いやすいこと、が挙げられる。ヘビのロコモーションには蛇行運動、アコーディオン運動、side winding など多様なモードが存在し、状況に応じてこれらを使い分けていることが知られているが、本研究は、最も基本的なロコモーションである蛇行運動に着目し、このロコモーションに内在する phasic な運動パターンと tonic な運動パターンを有機的に連関させる自律分散制御様式を解明することを目的とする。

3. 研究の方法

以下の過程を遂行する。

(1) ヘビのロコモーションの数理モデル化

実際のヘビの身体の構造及び機能を簡単な数理モデルで記述することで、ロコモーションに本質的な要因を見つけ出す。モデル化に際し、脳・身体・環境間に生じる齟齬をどのように自律個にフィードバックするかが鍵となる。先行研究においては、齟齬を軽減するようなフィードバックを自律個の位相 (phase) に対して行っていたが[2]、本研究では、これに加えて齟齬に応じて自律個の筋緊張度 (tonus) が増えるようなフィードバックもかかるようにし、両者のバランスによってヘビの環境適応的なロコモーションを記述する。

(2) シミュレーション及び実機実現によるモデルの検証

構築したモデルを用いてシミュレーションを行い、モデルの妥当性を検討する。さまざまな条件でシミュレーションを行うことで、phasic な運動パターンと tonic な運動パターンが果たす機能的役割をそれぞれ明らかにするとともに、両者の連関が無限定環境下での効率のよいロコモーション生成にどのように寄与しているかを明確にする。さらに、シミュレーションだけでなく実世界における実機実現を通して、モデルの妥当性をより明確にする。

4. 研究成果

ヘビの這行様ロコモーションを事例として採り上げ、その数理モデリング、シミュレーション、およびロボット実機開発を通して位相と筋緊張が連関した自律分散制御則を明らかにした。以下にその詳細を示す。

(1) 数理モデリング

申請者らの研究グループでは、先行研究において、齟齬関数に基づく局所センサフィードバック則を提案してきた。この制御則をヘビのロコモーションに適用することで、摩擦環境や狭窄空間などにおいて、身体の位相関

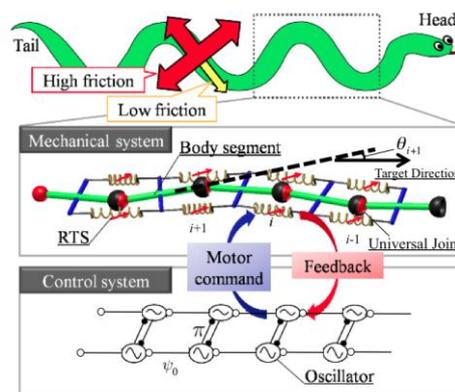


図 1 : モデルの概要

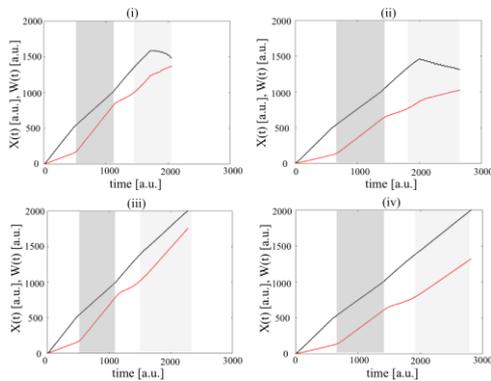


図2：シミュレーション結果。黒線は移動距離，赤線は消費エネルギーの累積を表す。濃い灰色，薄い灰色はそれぞれ高摩擦面，上り斜面を表す。(i)フィードバックなし，(ii)位相制御のみ，(iii)筋緊張制御のみ，(iv)位相制御+筋緊張制御

係を自己組織的に調節し，適応的なロコモーションを示すことを明らかにしてきた。しかしながら，従来の制御手法では上り斜面などの環境においては適応的な振る舞いを示すことができない。これは，従来手法ではphasicな運動パターンの生成のみに焦点を当てられており，tonicな運動パターンに関しては考慮されていなかったためと考えられる。そこで本研究では，従来のモデルを発展させ，位相と筋緊張が連関した自律分散制御則を提案した。

具体的には，図1に示すように，剛体リンクが一次元状につながれ，各関節の周囲に可変弾性要素が拮抗的に取り付けられたヘビの身体モデルを考えた。ここで，可変弾性要素とは，申請者らのグループで開発した自然長を能動的に可変なバネのことであり，自然長が短くなるとスティフネス（バネ定数）が大きくなるという特性を持つ。可変弾性要素の自然長は振動子の位相に応じて周期的に変化し，これにより身体のかねりを作り出すことができる。ここで，可変弾性要素にかかる張力を齟齬情報として検出し，齟齬を解消するように振動子の位相を調節するとともに，齟齬が生じるとその一次遅れで当該箇所の変弾性要素の自然長を短くする筋緊張制御を導入した。この位相制御と筋緊張制御が統合的に噛み合うことで，環境に呼応した振る舞いが生み出されることが期待できる。

(2) シミュレーション

構築したモデルの妥当性を検証するため，シミュレーションを行った。高摩擦面および上り斜面の環境を設定し，ロコモーションの評価を行った。結果を図2に示す。フィードバックがない場合や位相制御と筋緊張制御の片方みの場合では斜面を登れないか，登れたとしてもエネルギー消費が大きくなってしまふ。それに対し，位相制御と筋緊張制御の

双方を取り入れた場合，少ないエネルギー消費でロコモーションできていることがわかる。このことから，提案した位相制御と筋緊張制御が連関した自律分散制御則により，適応的な振る舞いを実現できることが明らかになった。

(3) ロボット実機開発

構築したモデルの実世界での妥当性を検証するため，ロボット実機開発を行った。図3に開発した実機の写真を示す。ロボットは18体節で構成されており，各体節には2つのモータが実装されている。隣接する体節間はシリコンゴムを介して結合されており，これら2つのモータを同期回転させることで関節部を駆動することができる。このように，関節に弾性要素を実装することで，制御系と機構系に齟齬を生み出すことが可能な構造となっており，この齟齬情報をもとに振動子の位相を修正することで位相制御が実現できる。さらに，齟齬が生じると上下のモータを逆方向に回転させてシリコンゴムのテンションを高めることで，筋緊張制御を実現することができる。

開発したロボットを用いて実験を行った。図4，5に高摩擦面や斜面において行った実験結果を示す。位相制御のみの場合ではロコモーション速度が著しく減少する，もしくはストップするのに対し，位相制御と筋緊張制御の双方を

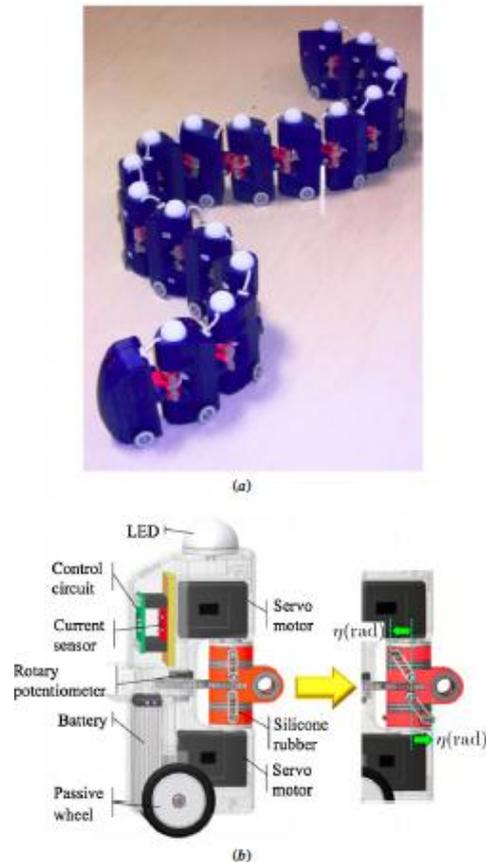


図3：開発したヘビ型ロボット実機

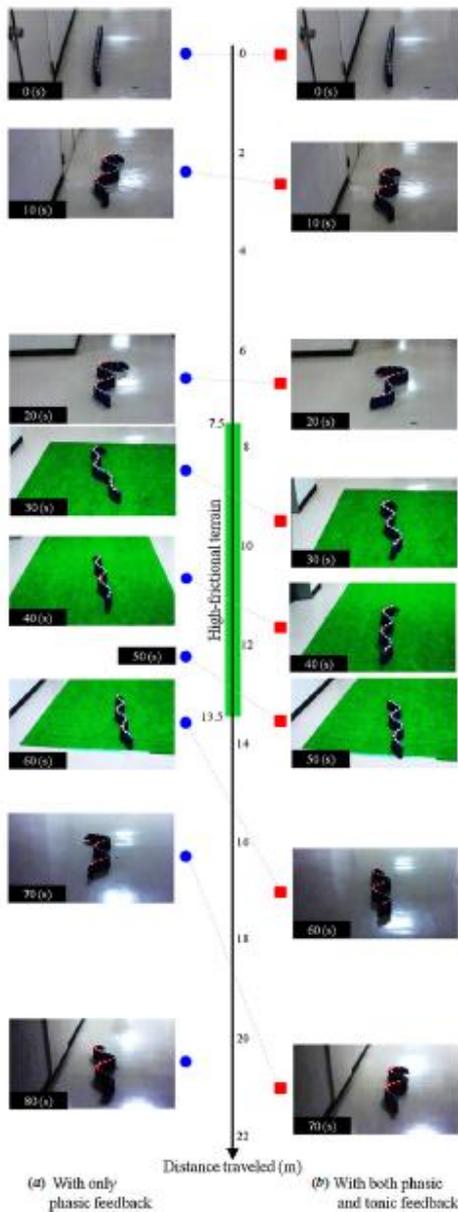


図4：高摩擦面におけるヘビ型ロボットのロコモーション

実装した場合は、適応的にロコモーションを生成できていることがわかる。このことから、提案した制御則の実世界での妥当性が確かめられた。

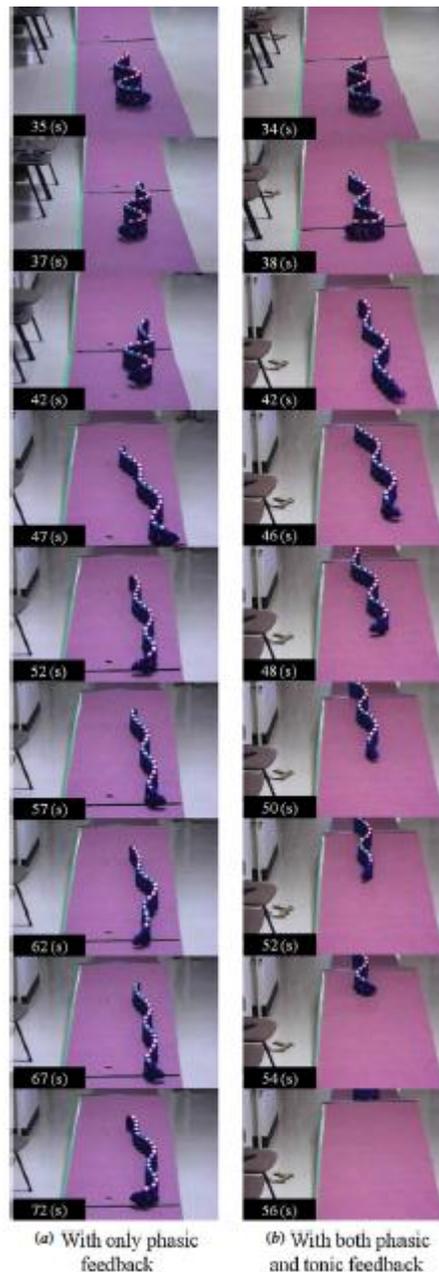


図5：斜面におけるヘビ型ロボットのロコモーション

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2件)

1. Takahide Sato, Takeshi Kano, Akio Ishiguro, On the Applicability of the Decentralized Control Mechanism Extracted from True Slime Mold -A Robotic Case Study with a Serpentine Robot-, *Bioinspiration and Biomimetics*, 6, 026006 (2011), doi: 10.1088/1748-3182/6/2/026006, 査読有.
2. Takahide Sato, Takeshi Kano, Akio Ishiguro, Decentralized control scheme for effective

coordination of phasic and tonic control in a snake-like robot, *Bioinspiration and Biomimetics*, 7, 016005 (2012), doi:10.1088/1748-3182/7/1/016005, 査読有.

[学会発表] (計 8 件)

1. 加納剛史, 佐藤貴英, 小林亮, 石黒章夫, 非構造環境下での這行が可能なヘビ型ロボットの自律分散制御, 第 12 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 (SI2011), 2011 年 12 月 23 日, 京都
2. T. Kano, T. Sato, R. Kobayashi, and A. Ishiguro, Efficient Undulating Locomotion Driven by a Decentralized Control That Fully Exploits Multi-articular Muscles, The 5th International Symposium on Adaptive Motion in Animals and Machines (AMAM2011), 2011 年 10 月 12 日, 淡路, 日本
3. T. Kano, T. Sato, R. Kobayashi, and A. Ishiguro, Decentralized Control of Multi-articular Snake-like Robot for Efficient Locomotion, 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. (IROS 2011), 2011 年 9 月 27 日, サンフランシスコ, アメリカ
4. T. Sato, T. Kano, and A. Ishiguro, A snake-like Robot Driven by a Decentralized Control That Enables Both Phasic and Tonic Control, 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. (IROS 2011), 2011 年 9 月 27 日, サンフランシスコ, アメリカ
5. 加納剛史, 佐藤貴英, 小林亮, 石黒章夫, 高効率推進を可能とする多関節ヘビ型ロボットの自律分散制御則, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH2011), 2011 年 5 月 27 日, 岡山
6. T. Kano, T. Sato, R. Kobayashi, and A. Ishiguro, Decentralized Control of Scaffold-assisted Serpentine Locomotion That Exploits Body Softness, 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2011), 2011 年 5 月 12 日, 上海, 中国
7. 加納剛史, ヘビのロコモーションから学ぶ生物の適応的運動機能の発現原理 ～位相制御と筋緊張制御の有機的整合を可能とする自律分散制御則～, 日本機械学会ロボメカ部門東北支部特別講演会 (招待講演), 2010 年 11 月 19 日, 仙台
8. 加納剛史, 佐藤貴英, 小林亮, 石黒章夫, 位相制御と筋緊張制御に着目した制御系と機構系の連関様式 –ヘビ型ロボットを用いた事例研究–, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOM

EC2010), 2010 年 6 月 16 日, 旭川

[その他]

【受賞】 (1 件)

T. Sato, T. Kano, and A. Ishiguro, “A Snake-like Robot Driven by a Decentralized Control That Enables Both Phasic and Tonic Control”, NTF Award for Entertainment Robots and Systems, IROS2011 (2011. 9. 29).

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

該当無し

(3) 連携研究者

該当無し