

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 13 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630175

研究課題名(和文)生物ロコモーションの通底原理から拓くマルチテレストリアルロボットの設計論

研究課題名(英文) Design of Multi-terrestrial Robot from Common Principle Underlying Animal Locomotion

研究代表者

石黒 章夫 (Ishiguro, Akio)

東北大学・電気通信研究所・教授

研究者番号：90232280

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、環境に呼応して這行や遊泳、飛行などの異なるロコモーション様式を自己組織的に発現する、広大な稼働環境領域を有するマルチテレストリアルロボットの具現化を目指した。具体的には、「生物は、いかなるロコモーション様式であっても、周囲環境から足がかり(scaffold)を効果的に獲得して、それらから反力を得て推進している」というシンプルな基本原理に基づき、1)二次元シート状の身体構造を有するヒラムシをモデル生物とした、這行と遊泳を自律的に実現するシート型ロボットの開発、2)陸ヘビが示す這行と海ヘビが示す遊泳の背後にある制御原理の共通性のシミュレーションによる検証、を行った。

研究成果の概要(英文)：In this study, we aimed to develop multi-terrestrial robots that can exhibit various locomotion patterns such as crawling, swimming, and flying in response to the environment. We tackled this issue by focusing on a simple principle that animals move by exploiting the various features in their surrounding environments as scaffolds. Our achievements were twofold: 1) We developed a sheet-like robot that can both crawl on the ground and swim in water, inspired by the locomotion of a flatworm having a sheet-like body structure. 2) Through a simulation study, we found a common control principle underlying crawling of land snakes and swimming of sea snakes.

研究分野：システム工学

キーワード：マルチテレストリアルロボット 自律分散制御 ヒラムシ ヘビ 生物ロコモーション

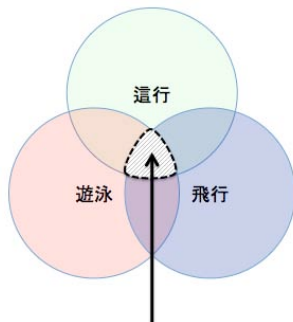
1. 研究開始当初の背景

現在の人工物は、所与のタスクや環境に特化した設計がなされており、それゆえその発現する環境適応能力は著しく限定されているのが現状である。一方、生物は、自身の身体が持つ膨大な自由度を巧みに協調させることにより、状況変化に呼応して環境適応的かつ多様な振る舞いを生み出している。このような能力の発現機序が解明できれば、既存技術では達成し得ない優れた適応能力を有する人工物の構築など、工学のみならず生物学に対しても大いに資することが期待される。

このような背景から、これまでは歩行や這行といった特定のロコモーション様式を採り上げて、大自由度システムの制御原理の解明を目指した考察が行われてきた。しかしながら、このような個別論的な考察が、かえってさまざまなロコモーション様式に通底する発現機序の本質を捉えることを阻害していた可能性は否めない。このように、生物ロコモーションに内在するカラクリの解明は、いわば隘路に入ってしまった状況にある。

2. 研究の目的

前述の現状を打破するために、本研究では俯瞰的な視座に基づいた考察を展開する。具体的には、「這行や遊泳、歩行、飛行など、いかなるロコモーション様式であっても周囲環境から足がかり (scaffold) を効果的に獲得して、それらから反力を得て推進しているにすぎない」という、いわば原点回帰のシンプルな基本原理に基づいた議論を展開する。そして図1に示すように、異なるロコモーション様式に通底する普遍的な制御則の立式化を通して、上位中枢からの指令によって制御則を切り替えるなどをしなくても、環境の力学的特性に呼応して這行や遊泳、飛行といった異なるロコモーション様式を自発的かつ自己組織的に発現する、広大な稼働環境領域を有するマルチテレストリアルロボットの具現化を目指す。このような視座に基づく研究はこれまでに行われたことがなく、その新奇性ならびに挑戦性はきわめて高い。



この「通底する基本原理を掴んだ制御則」が立式化できれば、上位中枢からの切り替えがなくても、マルチテレストリアルロコモーションを必然的に自己組織化できるはず！

図1：本研究の目的

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、以下の項目の研究を主として行った：

研究項目1

扁平動物の一種で二次元シート状の身体構造を有するヒラムシ (flat worm) をモデル生物として設定した事例研究を行う。ヒラムシは、そのシート状の身体を巧みに操り、「海底を這う」だけでなく、「水中を泳ぐ」といった多様なロコモーション様式を発現できる (図2)。また、扁平動物ゆえに神経系は極度に単純であることを踏まえると、ヒラムシにはマルチテレストリアルロコモーション実現の鍵が比較的わかりやすいかたちで内在しているはずである。そこで、ヒラムシに内在する制御則を解明し、単一の制御則のみによって這行と遊泳を自律的に実現するシート型ロボットを開発する。



Crawling on the ground



Swimming in water

図2：モデル生物として採り上げた扁平動物の一種であるヒラムシ。這行と遊泳の様子。

研究項目2

さまざまなロコモーション様式に通底する制御原理の抽出を目指し、一次元ひも状という、さらに単純な身体構造を有するヘビに着目した。具体的には、陸ヘビと海ヘビを採り上げた。陸ヘビと海ヘビは、周囲の環境の力学的特性が異なるが、ともに環境から反力を得て推進する点では同じである。そこで、陸ヘビが示す這行と海ヘビが示す遊泳の背後にある制御原理の共通性を「環境からの手応えの活用」という視座から見出すことを試みた。

4. 研究成果

研究項目1 (ヒラムシに着想を得たマルチテレストリアルロボット)

ヒラムシを質点群がバネで繋がれた2次元状シートとみなしてモデル化した。次に、ヘビの這行運動を表現しうる曲率微分制御を2次元へと拡張し、これに環境内の足がかり (地面の凹凸や流体塊など) から効果的に推進力を得ることができるよう反射メカニズム (図3) を組み合わせたものを制御則とした。

この制御則を実装するために構築したロボットのCADイメージと実機の写真を図4と5にそれぞれ示す。ロボットは十数個のセグメントから構成されており、各セグメントには防水処理を施したサーボモータとポテンシオメータが実装されている。さらに、反射

メカニズムのために圧力センサも実装されている。制御用の回路は、水中での稼働を考慮し、ロボットボディの外側に配置している。

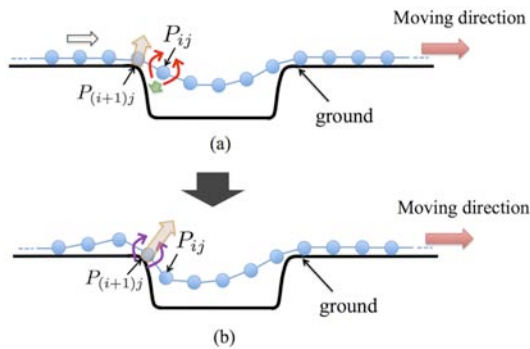


図3：効果的に推進力を得るために実装した反射メカニズム。環境の不均一性を足がかりとして活用する。

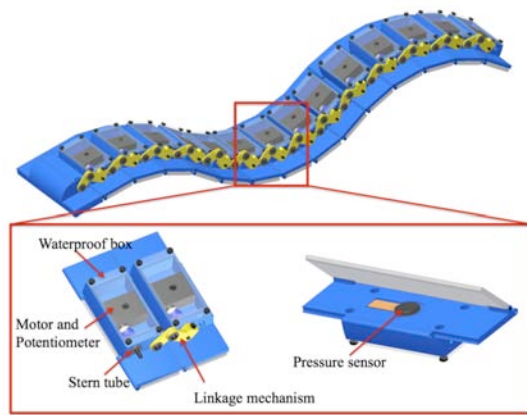


図4：製作したヒラムシ型ロボットのCADイメージ。

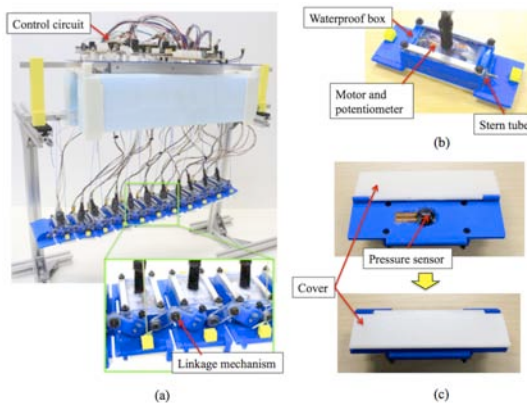


図5：製作したロボット実機。遊泳実験のために、ロボットボディには防水処理が施してある。

このロボットを用いて、提案する制御則の妥当性を調べるために実機実験を行った。具体的には、凹凸面のある地面上での這行実験、ならびに擾乱として水流を加えた水中での遊泳実験を行った。それぞれの実験結果を図

6と7に示す。図から、曲率微分制御に加えて、反射メカニズムを実装した提案制御則により効果的な推進を得ていることがわかる。同一の制御則から這行と遊泳を発現できたことはきわめて興味深い。

以上の実験結果は、異なるロコモーション様式に通底する制御則を抽出できれば、その制御則をなんら変更しなくてもマルチテレストリアルロコモーションが実現できることを強く示唆している。それゆえ本成果は、ロボットの稼働環境を拡張するための重要な知見となっていることが期待される。

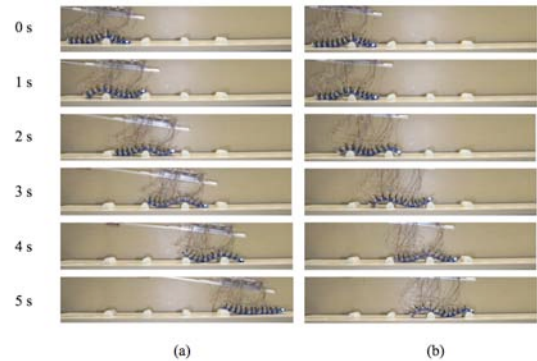


図6：這行実験。(a)提案制御則(曲率微分制御+反射メカニズム)。(b)曲率微分制御のみ。提案制御則は、地面の凹凸を推進のために効果的に活用していることがみてとれる。

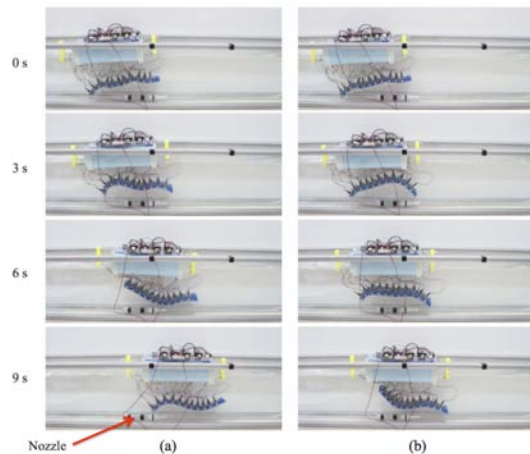


図7：遊泳実験。(a)提案制御則(曲率微分制御+反射メカニズム)。(b)曲率微分制御のみ。提案制御則は、ノズルから噴射される水流を推進のために効果的に活用していることがみてとれる。

研究項目2 (陸へびと海へびの制御則は共通なのか?)

陸へびは主として地上で這行を、海へびは水中で遊泳運動を発現する。両者の身体はともに一次元ひも状であり、ほぼ同一の身体構造を有している。このことから、両者のロコモーション様式の発現機序に通底するとこ

ろがあるかどうかを調べることで、マルチテレストリアルロコモーションの制御則の設計原理にせまることができると考えた。そこで本研究項目ではその初動段階として、1) 流体力学を考慮したシミュレータの構築、ならびに 2) もっとも基本的なロコモーション制御方策である曲率微分制御を実装した海へびの遊泳シミュレーションを行った。以下に得られた結果を示す。

流体力学を考慮したシミュレータの構築においては、計算の軽さと物理現実の反映という二律背反する要請を満たす必要がある。そのために、広島大学の飯間らが開発した離散渦法 (discrete vortex method) を用いたシミュレータを構築した。構築したシミュレータ上で、曲率微分制御を実装した海へびを泳がせた様子を図8に示す。シミュレーションの結果、海へびの遊泳が再現できていることがわかった。このことは、陸へびにおける制御則が海へびでも有効であることを示唆しており、両者の間に通底要素があることを示している。本シミュレータはマルチテレストリアルロコモーションを考察する際の重要な基盤となることが期待される。今後はこのシミュレータを用いて、さらに定量的な考察を展開していく予定である。

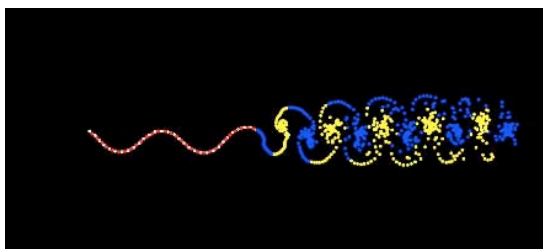


図8：離散渦法を用いて構築したシミュレータ。曲率微分制御を実装した海へびの後方にカルマン渦列が発現していることが見て取れる (統計数理研究所の風間俊哉博士のご厚意による)。

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. T. Kano, Y. Watanabe, F. Satake, and A. Ishiguro, “Decentralized-controlled Multi-terrain Robot Inspired by Flatworm Locomotion”, *Advanced Robotics*, vol.28, pp. 523-531 (2104) (査読あり)

[学会発表] (計2件)

1. T. Kazama, T. Kano, M. Iima, R. Kobayashi, and A. Ishiguro, “On the applicability of the decentralized control mechanism of snake locomotion

to sea snake locomotion”, *The Sixth International Symposium on Aero Aqua Bio-mechanisms*, 平成26年11月15日, ホノルル (アメリカ)

2. 加納剛史, 渡辺裕喜, 佐竹冬彦, 石黒章夫, 「ヒラムシに着想を得たマルチテレストリアルロボットの開発」, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH2013), 平成25年5月22日, つくば国際会議場 (茨城県・つくば市)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石黒 章夫 (ISHIGURO, Akio)
東北大学・電気通信研究所・教授
研究者番号：90232280

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

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