

研究種目：特定領域研究
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20033003
 研究課題名（和文） 単純な運動機能を有する結合振動子系から探る移動知発現の力学的共通原理
 研究課題名（英文） A Collective Behavioral Approach with Coupled Oscillators to Understanding Mobiligence

研究代表者

石黒 章夫 (ISHIGURO AKIO)
 東北大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：90232280

研究成果の概要（和文）：移動知発現の共通原理を構成論的に考察するためには、最低限の設定から基本論理を探っていく「ミニマルデザイン」と呼ばれるアプローチが効果的である。そこで真正粘菌変形体をモチーフとして、非線形振動子を単純な運動機能を有するモジュールに実装した、可変形態型のモジュラーロボットを採り上げ、このロボットに状況適応的に形態を変形しながら移動する、アメーバ様ロコモーションを発現させる試みを通して、移動知の発現原理の理解を目指した。その結果、現在進行中の動きに即した受動的変形機能を持たせることで、優れた環境適応機能と耐故障性が発現することを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：This study is intended to intensively investigate the brain-body coupling, i.e., how control and mechanical systems should be coupled. One of the significant features of this study is that we have employed a minimalistic approach. More specifically, we have focused on an “embodied” coupled nonlinear oscillator systems by which we have generated one of the most primitive yet flexible locomotion, i.e., amoeboid locomotion, in the hope that this primitiveness allows us to investigate the question effectively. Simulations we have done strongly support that there exists a “well-balanced” coupling, under which significant abilities such as real-time adaptability and fault tolerance emerge.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	7,200,000	0	7,200,000
2009年度	6,200,000	0	6,200,000
総計	13,400,000	0	13,400,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気工学・制御工学

キーワード：真正粘菌，モジュラーロボット，自律分散制御，結合振動子系，創発，移動知，力学的共通原理

1. 研究開始当初の背景

歩く，走る，飛ぶ，泳ぐ，這うなど，動物

は，非構造的で予測不能的に変動する環境であつても，自身の身体に持つ自由度を巧みに

制御しながら移動する能力を有している。このような適応的な運動機能（移動知と呼ぶ）の発現原理を理解することは、生物学のみならず、ロボティクスや医学などさまざまな分野に対して、多くの重要な知見を与えると期待されている。しかしながらそのためには、以下の二つの不可避的な問題と真っ向から対峙することが要請される：

- 初動段階から、制御系（脳・神経系）、機構系（身体系、筋骨格系）、そして環境間の相互作用を抜きにして議論することは不可能である。
- 生物制御では、制御器と制御対象が渾然一体化しており、両者を明確に切り分けるのは困難であるという、いわゆる「不可分問題」が存在している。

したがって、これらの問題をいかにうまく対処するかが考察を効果的に進めるための鍵となる。

2. 研究の目的

上述の研究背景に基づき、われわれは真正粘菌 (*Physarum polycephalum*) と呼ばれる単細胞生物をモデル生物として着目した研究を進めてきた。真正粘菌に着目した理由は以下のように集約される：

- 真正粘菌変形体は全身がいわば CPG のような生き物であり、結合振動子系に基づく数理モデリングときわめて親和性が高い。
- 中枢が存在しない、完全に自律分散的な制御が行われている。
- アメーバ運動という最も原初的なロコモーション様式を示す。

これらの理由から、真正粘菌変形体は制御系と制御対象が完全に一致していると見なすことができ、この見事な一致性ゆえに不可分問題を巧妙に回避しながら移動知発現の原理を議論できる、希有のモデル生物であると考えられる。

そこで本研究では、アメーバ様ロコモーションを示すモジュラーロボットを構築しながら、真正粘菌変形体に内在する移動知の発現メカニズムを解明することを第一義的な目的とした。

3. 研究の方法

真正粘菌変形体は、収縮運動を進行波状に伝播させることでアメーバ様ロコモーションを効果的に生み出している。ここで鍵となるのが収縮部位間の協調である。これを工学的に模擬できるように、モジュラーロボットの各モジュールの機構系を図1のように設計した。同図に示すように各モジュールは、収縮運動を効果的に発現できるように、独立に収縮可能な複数のアームが放射状に取り付けられている。また、地面との接地摩擦の

大きさを制御できる機構を有している。さらに物理的に結合したモジュール間で局所的な通信が可能であり（非線形振動子間の引き込みに不可欠）、誘因刺激を検知するセンサと、自身がモジュラーロボット全体の外縁部に位置しているかどうかを検知するセンサも併せ有しているものとした。このようなモジュールを複数個集めてアメーバ様ロボットを構成するわけであるが（図2参照）、問題はこのようなロボットを群全体としてのまとまりを維持しつつ、合目的かつ状況依存的に形態を改変しながら移動するためには、どのように制御すればよいのかということである。さらに重要なことは、振る舞いに創発の余地を残すような設計を行う必要があることである。

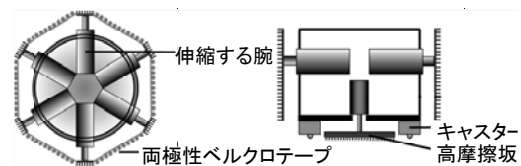


図1 モジュールの構造（左：上面図，右：側面図）

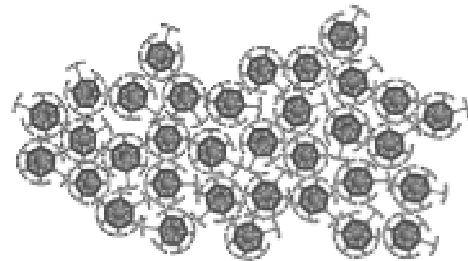


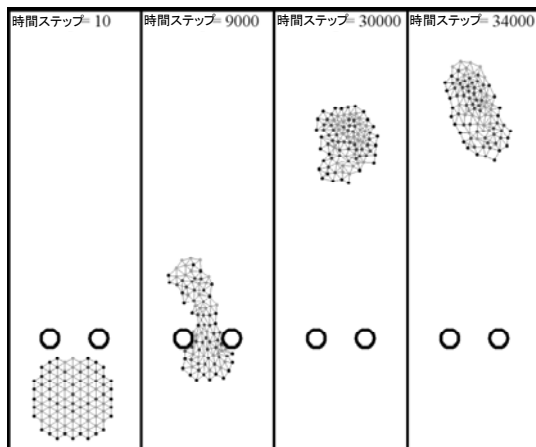
図2 真正粘菌を模擬したモジュラーロボットの全体図。粘菌 (Slime mold) にちなんで、このロボットのことを Slimebot と呼んでいる。

このような要請を満たすために、各モジュールの表面に機能性素材を貼り、自発的かつ受動的なモジュール間着脱が行えるような工夫を行った。これにより、モジュール間の着脱制御を明示的に行う必要がなくなるため、制御アルゴリズムは劇的に単純化され、形態制御に自発的かつ創発の特性が発現することが期待される。しかしながらこのような着脱制御のみでは、アメーバ様ロボットが全体としてのまとまりを維持しつつ環境を動き回することは不可能である。ばらばらにならないで動き回り、しかも環境適応のためには状況依存的に変形しなければならないという、二律背反する要請をいかに満足させるかが鍵となる。

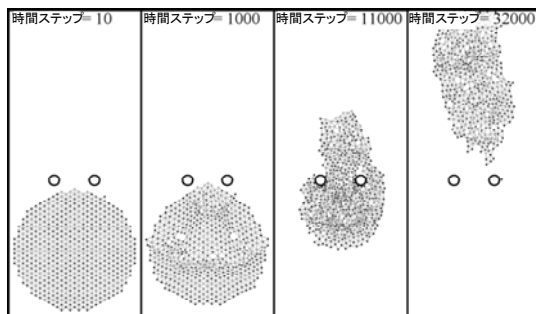
そこで各モジュールに非線形振動子を実装し、誘因刺激に向かうような進行波を精製させるだけでなく、凝集力が生じるような局所センサフィードバック則を実装した。これによって、完全に自律分散的な制御則にもかかわらず、モジュラーロボット全体はまとまりを維持しつつも変幻自在に形態を状況に応じて変化させることが可能となった。このような陽的制御則と陰的制御則を適切な配分でカップリングさせたのが本研究の特色であり、モジュラーロボットの分野では初めて陽に導入された事例研究となっている。

4. 研究成果

障害物が存在する環境下で誘因刺激へと向かうタスクを事例として採り上げ、提案する手法のシミュレーションによる検証実験をまず行った。シミュレーション条件を以下に示す。モジュール数を 100, 500 個とした二種類の条件を想定し、どちらの場合においてもモジュラーロボットの初期形態は円盤状形態を構成するものとした。また環境には二つの円筒状の障害物が存在すると仮定した。シミュレーションの結果を図 3 に示す。



(a) モジュール数 100



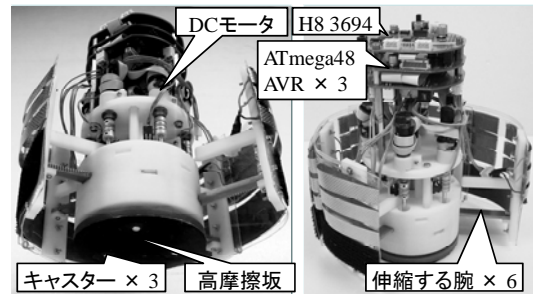
(b) モジュール数 500

図 3 障害物存在下のシミュレーション結果。誘因刺激は上方から与えられている。

同図(a)と(b)はそれぞれ、モジュール数 100, 500 個の場合のシミュレーション結果を表している。どちらも左から順に、時間推移に従ったスナップショットとなっている。図から、

モジュラーロボットは群全体のまとまりを失うことなく、適応的に行動している様子が見取れる。重要なポイントは、モジュール数の違いにより、異なった環境適応行動が創発しているという事実である。同図(a)においては障害物間を通り抜けるように行動しているのに対し、同図(b)においては障害物を取り囲むように行動している。これらの行動はあらかじめプログラムされているものではなく、完全に創発していることに注意されたい。

図 4 に実験的検証のために設計・製作したモジュラーロボット実機の写真を示す。また図 5 には 10 個のモジュラーロボット実機を用いた狭窄空間突入実験の結果を示す。図から、自発的なモジュール間着脱機構を活用することで、狭窄空間を適応的に対処している様子がわかる。



(a) モジュールの構造



(b) Slimebot の外観

図 4 製作したモジュラーロボット実機

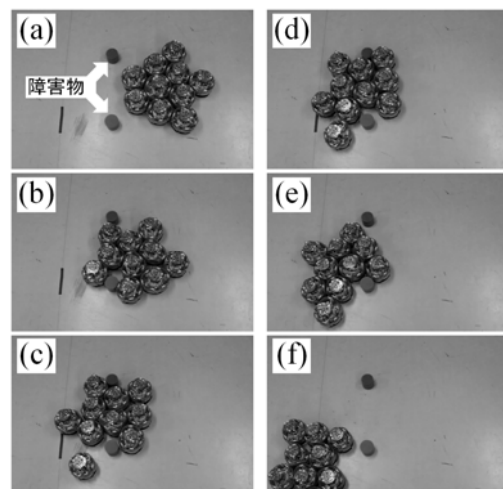


図 5 ロボット実機を用いた狭窄空間突入実験 (アルファベット順に時間発展)。

「振る舞いに創発の余地を残すように制御系と機構系を設計すべし」、「環境との相互作用の結果、行動主体の振る舞いがはじめて決まるように設計すべし」というのは、移動知発現にとっての重要な設計原理となりうる。しかしながら、これをどのように具現化するかは依然として明らかではない。本研究で紹介した、受動的・自発的なモジュール間着脱機構から生み出される「現在進行中の動きに対して自然で無理のない形態変形」を担う陰的制御則の活用は、この設計原理のひとつの具現化方策を示している。

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 5 件)

1. 石黒章夫, モジュラーロボットの自律分散制御～「三人寄れば文殊の知恵」的な知能はいかにして表現できるのか～機械の研究, 養賢堂, 査読無, 61-7 巻, 669-675, 2009
 2. 石黒章夫, 清水正宏, 自然で無理のない形態変形から生み出される適応的運動機能, 計画と制御, 査読有, 48-9 巻, 705-710, 2009
 3. Masahiro Shimizu, Takuma Kato, Max Lungarella, Akio Ishiguro, Adaptive Modular Robots through Heterogeneous Inter-Module Connections, Journal of Robotics and Mechatronics, 査読有, Vol. 20, No. 3, 386-393, 2008
 4. Takuya Umedachi, Taichi Kitamura, Akio Ishiguro, An Amoeboid Locomotion That Exploits Real-time Tunable Springs and Law of Conservation of Protoplasmic Mass, Journal of Robotics and Mechatronics, 査読有, Vol. 20, No. 3, 449-455, 2008
 5. Wataru Watanabe, Toshihiro Kawakatsu, Akio Ishiguro, Rapid and Cheap Learning by Exploiting Biarticular Muscles-A Case Study with a 2D Serpentine Robot, Advanced Robotics Special Issue on Mobiligence (1), 査読有, 22-15 巻, 1683-1696, 2008
- [学会発表] (計 25 件)
1. 武田孟, 八幡慎太郎, 清水正宏, 石黒章夫, 適応的運動機能を発現するアメーバ様モジュラーロボットの実機開発, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2009, 2009 年 11 月 25 日, 横浜
 2. Masahiro Shimizu, Akio Ishiguro, A Collective Behavioral Approach to Understanding Mobiligence, The 3rd International Symposium on Mobiligence in Awaji, 2009. 11. 21, Japan, Awaji
 3. Dai Owaki, Koichi Osuka, Akio Ishiguro, Implicit Control Law That Enables Stable Passive Dynamic Running, The 3rd International Symposium on Mobiligence in Awaji, 2009. 11. 21, Japan, Awaji
 4. Dai Owaki, Koichi Osuka, Akio Ishiguro, Understanding the Common Principle underlying Passive Dynamic Walking and Running, The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009. 10. 13, USA, St. Louis
 5. Masahiro Shimizu, Akio Ishiguro, An Amoeboid Modular Robot That Exhibits Real-time Adaptive Reconfiguration, The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009. 10. 12, USA, St. Louis
 6. 小山真理, 山口伸一, 久保翔達, 大脇 大, 石黒章夫, 膝付き受動走行機械の開発, 日本ロボット学会学術講演会, 2009 年 9 月 17 日, 横浜
 7. 小山真理, 山口伸一, 大脇 大, 石黒章夫, 弾性要素を活用した受動走行の実機実現, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009, 2009 年 5 月 26 日, 福岡
 8. 清水正宏, 石黒章夫, 適応的形態変形を可能とするモジュラーロボットの実機検証, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009, 2009 年 5 月 26 日, 福岡
 9. 大脇 大, 石黒章夫, 弾性要素を活用した受動的ロコモーションの背後に潜む多重時間スケールの統合, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009, 2009 年 5 月 26 日, 福岡
 10. 大脇 大, 大須賀公一, 石黒章夫, 受動歩行と受動走行に内在する力学的共通原理の解明, 第 14 回ロボティクスシンポジウム, 2009 年 3 月 17 日, 登別
 11. 加藤拓真, 清水正宏, Lungarella Max, 石黒章夫, 粘菌型ロボットから探る自律分散システムにおける自律個間の相互作用様式, 計測自動制御学会 SI 部門講演会, 2008 年 12 月 5 日, 岐阜
 12. 清水正宏, 加藤拓真, 松澤 亮, 石黒章夫, 粘菌様ロボットから発現する環境適応的な形態変形, 平成 20 年度無脊椎動物神経生物研究会, 2008 年 9 月 15 日, 旭川
 13. 小山真理, 山口伸一, 大脇 大, 清水正宏, 石黒章夫, 分子動力学法に基づく受動歩行シミュレータの開発, 第 26 回日本ロボット学会学術講演会, 2008 年 9 月 11 日,

- 神戸
14. 坂井善行, 石田 怜, 大脇 大, 手老篤史, 石黒章夫, 多重リズム性を活用した周波数と位相の自律的調整が可能な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学習への適用 -, 第 26 回日本ロボット学会学術講演会, 2008 年 9 月 11 日, 神戸
 15. 松澤 亮, 加藤拓真, 清水正宏, 石黒章夫, 粘菌様の適応的ロコモーションを発現するモジュラーロボットの実機開発, 第 26 回日本ロボット学会学術講演会, 2008 年 9 月 10 日, 神戸
 16. 加藤拓真, 清水正宏, Max Lungarella, 石黒章夫, 粘菌型ロボットから探る情報の相互作用と物理的相互作用間のバランスの力学, 第 26 回日本ロボット学会学術講演会, 2008 年 9 月 10 日, 神戸
 17. 清水正宏, 加藤 拓真, 石黒章夫, 適応的ロコモーションを発現するアメーバ様モジュラーロボットの実機開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008, 2008 年 6 月 7 日, 長野
 18. 加藤拓真, 清水正宏, Lungarella Max, 石黒章夫, 不均質な着脱特性を有するモジュラーロボット - 複雑ネットワークの手法を用いた性能評価 -, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008, 2008 年 6 月 7 日, 長野
 19. 石田 怜, 松野善幸, 大脇 大, 西井 淳, 石黒章夫, 筋群の協働的励起パターンに基づく制御系と機構系の連関様式に関する考察, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008, 2008 年 6 月 7 日, 長野
 20. 佐藤貴英, 渡邊 航, 石黒章夫, 多関節筋を活用した高効率学習の実験的検証 - 蛇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会 2008, 2008 年 6 月 7 日, 長野
 21. Dai Owaki, Koichi Osuka, Akio Ishiguro, Adaptive Gait Transition between Passive Dynamic Walking and Running, the fourth meeting of Adaptive Motion of Animals and Machines , 2008. 6. 5, U. S. A , Cleveland
 22. Akio Ishiguro, Masatoshi Koyama, Dai Owaki, Jun Nishii, Increasing Stability of Passive Dynamic Bipedal Walking by Exploiting Hyperextension of Knee Joints, the fourth meeting of Adaptive Motion of Animals and Machines, 2008. 6. 4, Cleveland, U. S. A
 23. Akio Ishiguro, Understanding Mobiligence Through Amoeboid Locomotion - A Case Study with a Modular Robot -, the fourth meeting of Adaptive Motion of Animals and

24. Masahiro Shimizu, Takuma Kato, Max Lungarella, Akio Ishiguro, Adaptive Reconfiguration of a Modular Robot through Heterogeneous Inter-Module Connections, 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation 2008. 5. 23, USA, Pasadena
25. Dai Owaki, Koichi Osuka, Akio Ishiguro, On the Embodiment That Enables Passive Dynamic Bipedal Running, 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008. 5. 19, USA, Pasadena

〔図書〕 (計 2 件)

1. 石黒章夫, 清水正宏, オーム社, 「移動知 - 適応行動生成のメカニズム - (シリーズ移動知第 1 巻)」, 2010, 151-185
2. R. Pfeifer, J. Bongard (細田 耕, 石黒章夫 訳) 共立出版, 「知能の原理 身体性に基づく構成論的アプローチ」, 2010, 432

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.cmplx.ecei.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石黒 章夫 (ISHIGURO AKIO)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号 : 90232280

(2) 研究分担者

清水 正宏 (SHIMIZU MASAHIRO)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号 : 50447140

郷原 一寿 (GOHARA KAZUTOSHI)

北海道大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号 : 40153746

(3) 連携研究者

なし