

可変弾性要素と原形質量保存則を活用した アメーバ様ロコモーションの実現

Realization of An Amoeboid Locomotion That Exploits Real-time Tunable Springs and Law of Conservation of Protoplasmic Mass

○北村 太一, 梅舘 拓也, 小林 亮*, 中垣 俊之**, 石黒 章夫

○ Taichi Kitamura, Takuya Umedachi,
Ryo Kobayashi*, Toshiyuki Nakagaki**, Akio Ishiguro

東北大学, *広島大学, **北海道大学

Tohoku University, *Hiroshima University, **Hokkaido University

キーワード： 可変弾性要素(Real-time tunable spring), 原形質量保存則(Law of conservation of protoplasmic mass), 可変形性(Soft and deformable), 自律分散制御(Autonomous decentralized control)

連絡先： 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-05 電気・情報系1号館5階512号室
東北大学大学院 工学研究科 電気・通信工学専攻 石黒研究室 北村太一,

Tel.: (022)795-3207, Fax.: (022)795-3781, E-mail: kitamura@cmlpx.ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

動物はきわめて原初的な種と分類されるものであっても、非構造的で予測不能的に変動する環境（無限定環境と呼ばれる）下で実時間かつ合目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。このような生存脳機能とでも呼ぶべき知の様式の発現原理を解明するとともに、人工物へ工学的に実装することはきわめて有益であると考えられる。このような知の発現を議論するためには、行動主体の能動的移動に伴って自発的に顕在化する、制御系（脳・神経系）と機構系（身体系）、そしてこれらを取り巻く環境間の相互作用力学の存在を陽に意識することが肝

要である¹⁾。換言すれば、この相互作用の源に位置する、直接的な設計対象である制御系と機構系を初動段階から対等の存在として扱い、これらがいわば「渾然一体化」するように関連させることである²⁾。しかしながら、従来のロボティクスでは、バックドライバビリティや変形性に乏しい「ハードでドライ」な機構系を前提に制御方策が議論されていたため、このような制御系と機構系のカップリング様式を実現することはきわめて困難であった。

上記の考察に基づき、制御系の工夫のみならず、機構系の物理的特性に変形可能性といった「ソフトでウェット」な特性を積極的に持たせることもあわせて重要であると考えた³⁾。そ

のような機構系を構築することによって、行動主体は現在進行中の動きに都合がよい形に自ら変形することが可能となり（物理的に理にかなった可変形性）、これにより適切な制御系と機構系のカップリングを実現できることが期待される。ここで「ソフトでウェットな機構系（超軟性機械）」に対して筆者らは、これまでの「ハードでドライな機構系（超硬性機械）」への単なるアンチテーゼというトリビアルな意味ではなく、適応的運動機能という行動主体にとって根源的な能力の発現のために必須であるというノントリビアルな意味を見出していることに注意されたい。

上記の作業仮説に基づいて考察を進めるにあたって重要となるのは、初動段階からいたずらに複雑な構造を有する身体性に着目するのは賢明でない、ということである。このため本研究では、最も原初的なロコモーション様式であるアメーバ様ロコモーションを示す粘菌やアメーバに着目する。粘菌やアメーバは、柔軟な外皮や濡れ性、原形質質量保存則を身体系に組み込み⁴⁾、それらを積極的に活用することによって、中枢神経システムや特別な器官を持たずとも、無限定環境に対して高い適応性を示す。意図的にこのような原初的なロコモーション様式に着目することによって、本作業仮説を効果的に検証できるのみならず、制御系と機構系のカップリング方策や自律分散制御に関する新しい知見の抽出もあわせて期待できる。

上記の考察に基づき本研究では、具体的に、質量保存則を満たす原形質を内質として有し、可変弾性要素を閉ループ状に複数個つなぎ合わせたものを外皮とする平面二次元型アメーバ様ロボットを構築する。そして、外皮を構成する可変弾性要素の自然長と地面との接地摩擦を結合振動子系に基づいて完全自律分散

的に制御する。本稿では、このようなシステムが、安定したロコモーションを生成したので報告する。

2. 提案手法

2.1 機構系の設計

本稿で採り上げるアメーバ様ロボットは、曲率弾性を動的に改変可能で伸縮可能な外皮と内質により構成される(図1)。具体的には、同図に示すように接地摩擦機構を閉ループ状に配置し受動バネでつなぎ合わせる。さらに、接地摩擦機構を自然長可変式可変弾性要素で1つおきにつなぎ合わせて外皮を形成する。この可変弾性要素の自然長を動的に改変することにより、外皮の曲率弾性を改変する。また、質量保存則が成立する原形質を内質とする。ここで、図1に示す接地摩擦機構 i と可変弾性要素 i をまとめてユニット i と定義する。本稿では、誘引刺激に対して走性を示すロコモーション生成を目的とする。

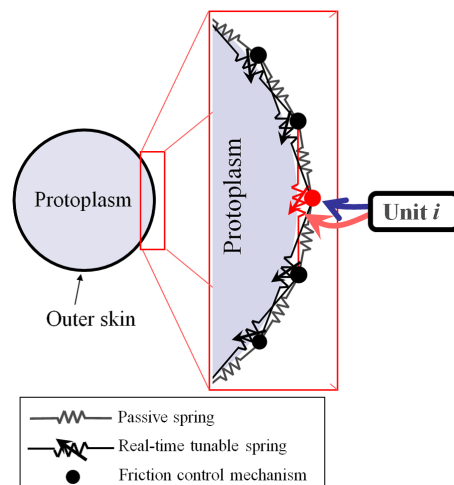


Fig. 1 A schematic of an amoeboid robot developed.

2.1.1 可変弾性要素

本稿で採用する可変弾性要素は，弾性体の有効長を動的に改変することにより自然長を制御する．有効長を改変することは，弾性体を強制的に巻き取ることで現実的に可能である⁶⁾．ここで，バネ定数 $k[\text{N/mm}]$ を記述すると以下ようになる．

$$k = \frac{Gd^4}{8 \cdot Na \cdot D^3} \quad (1)$$

ただし， $G[\text{N/mm}^2]$ はバネ材料の横弾性係数， $d[\text{mm}]$ はバネの線径， Na は有効巻き数， $D[\text{mm}]$ は平均コイル径である．有効巻き数 Na は，バネの自然長 $l[\text{mm}]$ をバネのピッチ長 $p[\text{mm}]$ で割ったものとみなせるので，可変弾性要素のバネ定数 $k^{RTS}[\text{N/mm}]$ は，

$$k^{RTS} = \frac{Gd^4 p}{8 \cdot l^{RTS} \cdot D^3} \quad (2)$$

となり，可変弾性要素の自然長 $l^{RTS}[\text{mm}]$ を制御値とし， k^{RTS} は l^{RTS} を改変した結果として変化する．

2.1.2 原形質量保存則の導入

機構システム全体が安定したロコモーションを協調して生成するためには，原形質量保存則が非常に重要な役割を果たすと考えられる．なぜならば，この物理的拘束を機構系に組み込むことによって，離れたユニット同士に力学的な長距離相関を生起させることができるからである．つまり，一部（局所）が押されると応力が分散し，機構システム全体（大域）に力学的な情報が伝わることになる．実現方法としては，外皮の中に粉粒体等の体積を一定に保つものを封入することで原形質と同様の効果を期待することができる．

2.2 制御系の設計

これまで筆者らは，上記の機構系に基づき，安定かつ持続的なロコモーションを生成するための制御系を設計してきた．本稿では，各ユニットに非線形振動子を実装し，それらの相互引き込みを活用することで可変弾性要素の自然長の制御と接地摩擦の制御を行う．本アメーバ様ロボットは，上記に説明した各受動バネと各可変弾性要素による力，原形質を介した力学的な長距離相関により，動的に形態を変形させることが可能である．これに接地摩擦の制御を加えることで，ロコモーションの生成が可能となる．以下にその詳細を示す．

2.2.1 非線形振動子モデル

アメーバ様ロボットが適応的なロコモーションを生起するためには，各可変弾性要素の自然長と，各接地摩擦機構を適切に制御する必要がある．本アメーバ様ロボットは多数のユニットで構成されることが前提である．そのため，中央集権的な制御よりも制御系は自律分散的なものであることが望ましい，と考えられる．このため，本稿では各ユニットに非線形振動子を実装し，それらの相互引き込みを活用する⁷⁾（図2）．振動子 i は，接地摩擦機構 i と可変弾性要素 i の自然長を制御するものとする．

本稿では非線形振動子のモデルとして，以下に示す位相方程式を採用した．

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_i}{dt} = & \omega + \epsilon_c \sum_{j=i-1, i+1} \sin(\theta_j - \theta_i) \\ & + \epsilon_m \frac{\partial l_i^{RTS}}{\partial \theta_i} \cdot (d_i - l_i^{RTS}). \end{aligned} \quad (3)$$

ただし， ω は非線形振動子の角速度， ϵ_c は隣接する振動子同士の結合強度， ϵ_m は機構系からのフィードバックの強度である．また，第3項

より制御系からの指令値と機構系の状態の齟齬をとることにより適切なフィードバックを生起させることが可能となる．非線形振動子の位相を可変弾性要素の自然長制御，接地摩擦制御に活用する．以下にその詳細を示す．

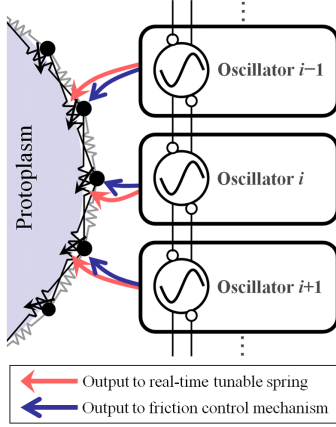


Fig. 2 CPG output corresponds to the original length of real-time tunable springs and friction control mechanisms.

2.2.2 可変弾性要素の自然長制御

外皮の曲率弾性改变のために，式(3)の θ_i の値を下記の式を用いて各可変弾性要素の自然長 l_i^{RTS} の変化と対応させる：

$$l_i^{RTS} = \bar{l}^{RTS} + a_i \sin \theta_i \quad (4)$$

ただし， $\bar{l}^{RTS}$ は可変弾性要素の平均自然長， a_i は各可変弾性要素 i の自然長変動の振幅である．式(4)により，本アメーバ様ロボットの外皮は曲率弾性を動的に改变させることが可能となり，形態を改变させることが可能となる．

2.2.3 接地摩擦の制御

本アメーバ様ロボットにロコモーションを生起させるためには，上記の可変弾性要素の自然長制御に加えて，適切に接地摩擦を制御する必要がある．本稿では，各振動子の位相 θ_i に対応して，下記のように接地摩擦を制御

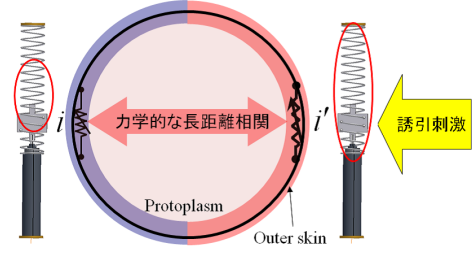


Fig. 3 Symmetry breaking of softness distribution.

する：

$$\text{接地摩擦} = \begin{cases} \text{anchor mode} & \sin \theta_i \geq h \\ \text{anchor free mode} & \text{上記以外.} \end{cases} \quad (5)$$

ただし， h は摩擦を上昇させるタイミングを制御するパラメータである．式(5)のように，anchor modeで摩擦を上昇させ，anchor free modeで摩擦を小さくする．

2.2.4 原形質流動の生成

式(3)に基づいて生成される位相情報から，式(4)により可変弾性要素の自然長制御と，式(5)の接地摩擦のパラメータ h を調節することによって摩擦制御を行う．しかし，これだけでは原形質流動を活用したロコモーションを生成することはできない．ここで図3に示すように，誘引刺激を受けた可変弾性要素はストローク長を大きくすることで柔らかくなり対称性を崩す．これにより，誘引刺激を受けた側すなわち，進行方向側へ原形質を流動させることが可能となる．さらに，進行方向側の外皮が柔らかくなることは，新規の環境と出会うための身体の構造としては理にかなっているといえる．シミュレーション結果を図4に示す．

2.2.5 シミュレーション実験

シミュレーション結果を図4に示す．赤色で示した部分が誘引刺激を検知したユニット，青

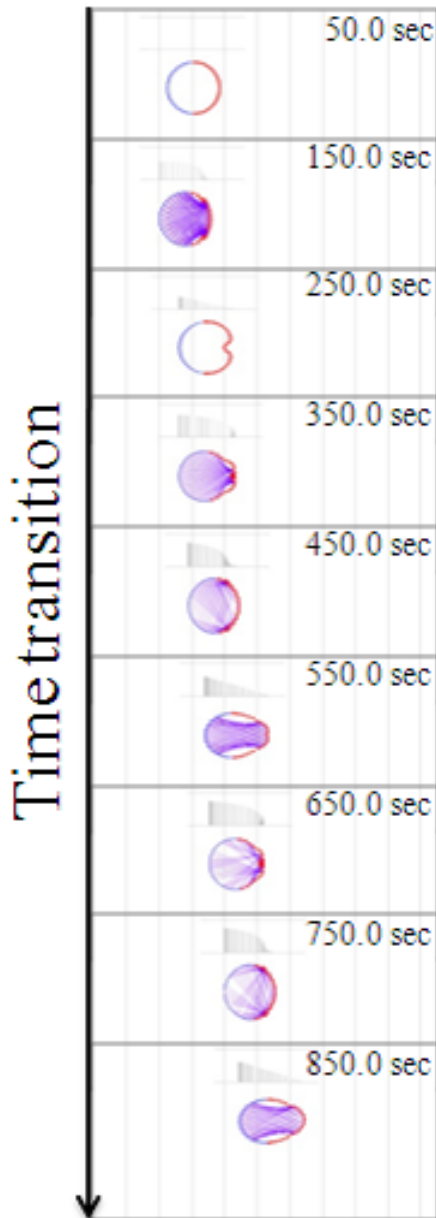


Fig. 4 Representative data of the locomotion of the amoeboid robot are shown in chronological sequence.

色で示した部分がそれ以外のユニットである。紫色の線で結ばれたユニットは、互いに逆相に振る舞っているユニットを線で結び可視化している。前後の離れたユニット同士が協調しあい、安定したロコモーションを生成している。

3. 機構系開発

これまで筆者らが提案してきたモデルの妥当性を実世界にて検証するために、実機を用いた検証実験を行う。そこで、本節ではシミュレーションモデルに基づいた実機を紹介する。

3.1 自然長可変式可変弾性要素

本研究において、実機実現をするにあたって重要な機構となるのが自然長を改変する可変弾性要素である。この可変弾性要素を実現するために、コイルバネを巻き取るための機構部品を設計した。この機構部品（図5左上）がモータによって回転することにより、コイルバネの有効長を動的に変化させることが可能となる。それとともなってコイルバネのパネ定数も変化する。図5に自然長可変式の可変弾性要素を示す。この可変弾性要素の有効長を l_{active}^{RTS} 、非有効長を $l_{nonactive}^{RTS}$ とすると、非有効長はDCモータの末尾からバネ巻き取り機構部までである。つまり可変弾性要素全体から見て、有効長 l_{active}^{RTS} は変化するが非有効長 $l_{nonactive}^{RTS}$ は変化しないため、可変弾性要素の全長を改変することが可能である。この機構はアクチュエータとしてのアクティブな機能と、コイルバネをベースに作られていることによるパッシブな機能を合わせ持っていることに注意されたい。これを図1のように組み込むことにより外皮の曲率弾性を改変し、外皮の変形が可能となる。

3.2 接地摩擦機構

ここでは、接地摩擦機構の詳細を述べる（図6）。接地摩擦機構は、DCモータによってネジが回転することで接地摩擦板を上下させる。アメーバ様ロボットは、2枚の亚克力板の間を移動する。接地摩擦板が下りると、接地摩擦

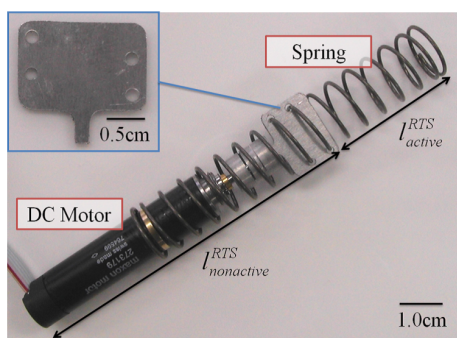


Fig. 5 Mechanical structure of the real-time tunable spring.

機構自体が上下2枚の亚克力板を押し，接地摩擦力を高めることが可能となる．

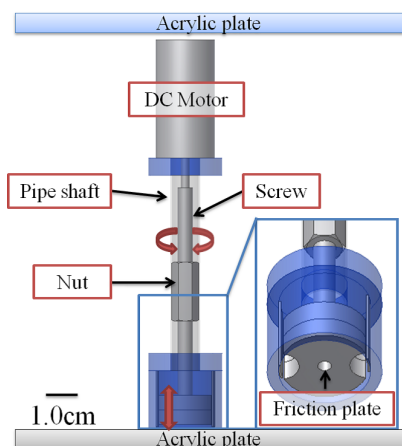


Fig. 6 Friction control mechanism employed.

3.3 原形質量保存則を満たすアメーバ様ロボット

図7に原形質量保存則を満たすアメーバ様ロボットのプロトタイプモデルを示す．上記で説明した自然長可変式可変弾性要素，受動バネおよび，接地摩擦機構により外皮を構成した．さらに，その内部にプラスチックシートで作製した円筒を原形質として組み込むことで原形質量保存則を満たした．アメーバ様ロボットは外力を受けると変形し，局所が受けた力を原形質により大域に力学的な情報として伝達することが可能となる．

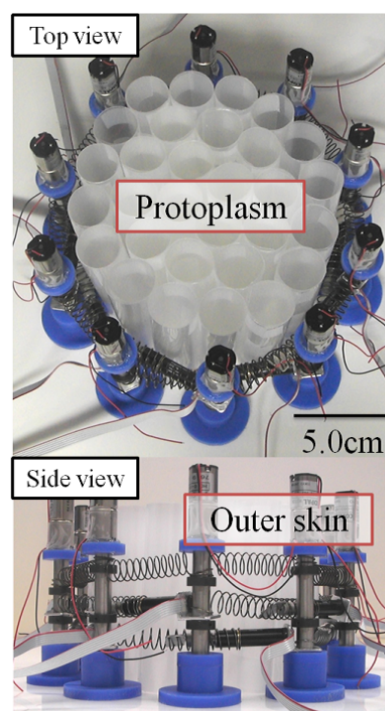


Fig. 7 Prototype model of the amoeboid robot.

4. まとめと今後の課題

以上に確認されるように，安定なロコモーションの生成が実現した．ここで，本稿で示したロコモーション生成には可変弾性要素の自然長と接地摩擦のタイミングのみを制御していることに注目されたい．本稿のアメーバ様ロボットの振る舞いは「soft and wet」な機構系の特徴から生成されたものである．すなわち，原形質量保存則から，物理的に離れた可変弾性要素間に，力学的な長距離相関を生起させることで実現されているのである．

また本稿で論じられた大域的な相互作用力学を機構系に組み込む設計方策は，より多自由度を扱うシステムになればなるほど重要になる，と考えられる．なぜなら，可変性を有する多自由度なシステムを扱う場合，制御系の自律分散化をはかることにより実時間で適応的な振る舞いを可能にし，さらに要素間の力学的な長距離相関を活用することによって，

自律分散型のシステムを機能的に振る舞わせることが可能となるからである。

今後の課題として、実機開発をし実世界で検証を行う。さらに、本稿で提案した非線形振動子に改良を加える。それにより、物理的にも情報的にも離れた各ユニットが、ユニット同士で共有する力学的な拘束条件を介して同期・協調するといった新しい自律分散システムの設計論に発展すると考えている。

謝辞

本研究の一部は、「東北脳科学グローバルCOE脳科学を社会に還流する教育研究拠点」からの援助によって行われた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) R. ファイファー, C. シャイアー著(石黒章夫, 小林宏, 細田耕 監訳), “知の創成—身体性認知科学への招待—”, 共立出版, 2001.
- 2) 石黒章夫, 清水正宏, “移動知発現のための制御系と機構系の設計原理—モジュラーロボットを用いた事例研究—”, 計測と制御, vol.44-9, pp634-639, 2005.
- 3) S. A. Wainwright, *Axis and Circumference: The Cylindrical Shape of Plants and Animals*, (Harvard Univ. Press, 1988).
- 4) R. Kobayashi, A. Tero, T. Nakagaki, “Mathematical model for rhythmic protoplasmic movement in the true slime mold,” *Mathematical Biology*, 53, pp273-286, 2006.
- 5) 梅舘拓也, 北村太一, 石黒章夫, “原形質量保存則を活用したアメーバ様ロボットの自律分散的形態制御,” 第20回自律分散システム・シンポジウム予稿集, pp.57-62, 2008.
- 6) 尾出十八, 王安麟, 松本徳之, “可変剛性バネの試作とその変位制御問題への応用”, 日本機械学会論文集(C編), 59巻564号, pp.262-267, 1993.
- 7) A. Ishiguro and T. Kawakatsu, “How Should Control and Body Systems be Coupled? — A Robotic Case Study —”, *Lecture Notes in Computer Science* (Eds. F. Iida, R. Pfeifer, L. Steels, and Y. Kuniyoshi), Springer, 2004, pp.107-118.
- 8) Y. Kuramoto, *Chemical Oscillations, Waves, and Turbulence*, (Dover, Mineola, NY, 2003), 2nd ed.