

ムカデのロコモーションに内在する自律分散制御則

Decentralized Control Mechanism Underlying Centipede Locomotion

安井浩太郎*, 酒井和彦*, 加納剛史*, 大脇大*, 石黒章夫*,**

Kotaro Yasui*, Kazuhiko Sakai*, Takeshi Kano*, Dai Owaki*, Akio Ishiguro*,**

* 東北大学, ** JST CREST

*Tohoku University, **JST CREST

キーワード：自律分散制御 (decentralized control), 脚間協調 (inter-limb coordination), ムカデ (centipede)

連絡先：〒 980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1 東北大学電気通信研究所本館 4 階 石黒研究室
安井浩太郎 Tel: 022-217-5465, Fax: 022-217-5464, E-mail: k.yasui@riec.tohoku.ac.jp

1 はじめに

現在のロボットと生物の運動能力を大きく分け隔てる属性の一つに環境適応性が挙げられる。ロボットは限定環境下においては優れた機能を発揮するものの、非構造環境下においては瞬時に適切な振る舞いを生み出すことができていないのが現状である。一方で、生物は非構造環境下においても多様かつ適応的なロコモーションを示す。この生物の巧みな振る舞いは、身体に有する膨大な自由度を巧みに協調させて動かすことで実現されており、その発現メカニズムを解明することができれば、生物学のみならず、ロボット工学においても優れた適応性をもつ大自由度ロボットの創成に資することが期待される。

このような生物ロコモーションの発現メカニズムを探るにあたり、自律分散制御は鍵となる概念である。自律分散制御とは、単純な知覚・判断・行動出力を持つ要素（自律個）が多数相互作用することで、大域的に非自明な機能を創発させる制御方策である。実際、生物学的知見により Central Pattern Generator (CPG) と呼ばれる脊髄内の神経回路網など自律分散的な

制御メカニズムの存在が示唆されている [1]。しかしながら、実際の生物が示すロコモーションの発現メカニズムを十分に説明しうる自律分散制御則はいまだ明らかになっていない。

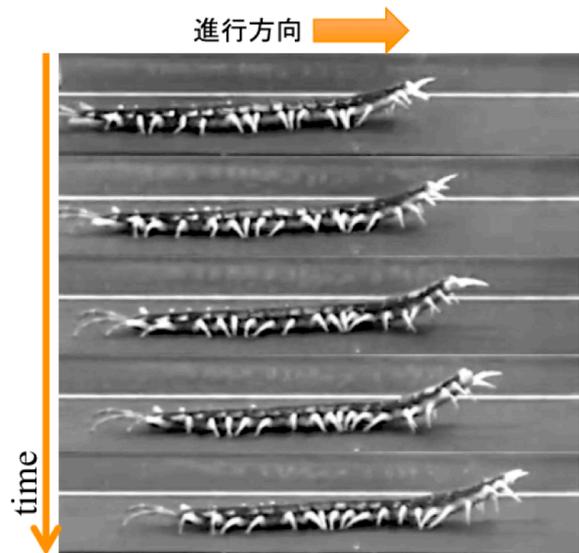


図 1: 頭部を切断されたムカデのロコモーション

この問題に取り組むため、筆者らはモデル生物としてムカデに着目する。ムカデはきわめて多くの脚をもつ生物であるが、地面に起伏があるような非構造環境下においても、膨大な数の脚を巧みに協調させ適応的なロコモーションを行う。さらに驚くべきことに、ムカデは頭部を切断されたとしても歩行することができる（図1）。それゆえ、ムカデのロコモーションには興味深い自律分散制御メカニズムが内在していることが示唆される。筆者らは、ムカデの行動観察を行い、そこで得た知見をもとに単純な自律分散制御則に基づく数理モデルを構築した。シミュレーションの結果、実際のムカデのロコモーションに類似した動きを再現することができたので報告する。

2 行動観察実験

ムカデのロコモーションに内在する脚間協調メカニズムを探るために、以下の行動観察実験を行った。脚と地面との接触が振る舞いに及ぼす影響を調べるため、ムカデが歩行を行っている最中に一部の脚が地面に着かない状況をつくり観察した。実際には、水平に置かれた2枚の平らな発泡スチロール板上を歩いている最中に、片方の板をずらすことで2枚の板の間に隙間をつくり、一部の脚が宙に浮くようにした。

実験結果を図2に示す。同図からわかることは以下の2点である。

- (A) 宙に浮いたことで地面と接触しなくなった脚は動きが止まる。
- (B) 一度動きが止まった脚が再び運動を開始するタイミングは、当該脚の同側前方の脚が接地した後である。

3 数理モデリング

3.1 身体モデル

ムカデの身体モデルを図3に示す。本研究では簡単のため2次元平面上の運動を考える。脚先と脚の基部を質点で表し、各質点間はバネとダンパを並列につなぐ。各脚は自然長を実時間

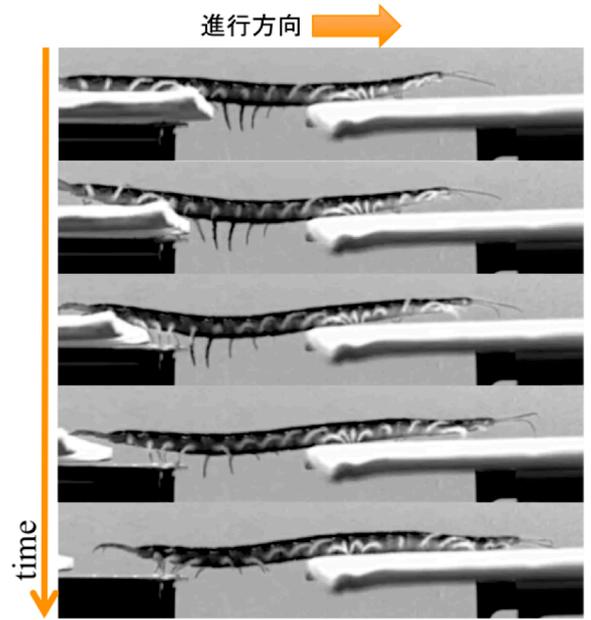


図 2: 行動観察実験の結果

かつ動的に変化させることができるバネ (Real-time Tunable Spring; RTS) [2] で構成し、これにより脚の屈伸運動を表現する。また、各脚の基部には3つの巻きバネを配置する。1つは脚の前後の体軸をつなぐ受動的な巻きバネであり、身体の姿勢をまっすぐに保とうとする性質を表す。残りの2つは脚と前後の体軸を各々つなぐ巻きバネであり、これらの巻きバネの目標角を制御入力により変化させることで脚の前後方向への振りを実現する。 i 番目の脚の基部まわりで発生するトルク $\tau_{i,back}$, $\tau_{i,fore}$, $\tau_{i,hind}$ は以下の式で記述される。

$$\tau_{i,back} = k_1(\phi_{i,back} - \pi) + d_1\dot{\phi}_{i,back} \quad (1)$$

$$\tau_{i,fore} = k_2(\phi_{i,fore} - \bar{\phi}_{i,fore}) + d_2\dot{\phi}_{i,fore} \quad (2)$$

$$\tau_{i,hind} = k_2(\phi_{i,hind} - \bar{\phi}_{i,hind}) + d_2\dot{\phi}_{i,hind} \quad (3)$$

ただし、 k_1 , k_2 , d_1 , d_2 は正の定数。 $\phi_{i,back}$ は i 番目の脚の前後の体軸がなす角であり、 $\phi_{i,fore}$ および $\phi_{i,hind}$ は i 番目の脚が前後の体軸となす角である。 $\phi_{...}$ を実際角、 $\bar{\phi}_{...}$ を目標角とする (... は添え字を表す)。

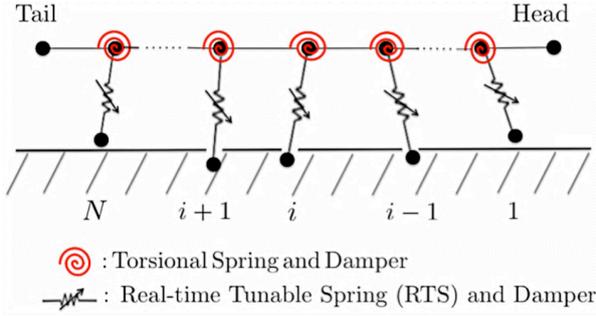


図 3: ムカデの身体モデル

3.2 自律分散制御則の設計指針

上記の行動観察実験で得られた知見に基づき、ムカデの自律分散制御則を設計する。まず、行動観察実験の結果 (A) から、接地情報の有無が脚の周期的な運動の生成に関与していると考えられるため、各脚が脚先で感じる地面からの反力に応じて脚の振る舞いを変化させる。仮に、自脚が受ける反力の情報のみが自脚の振る舞いに影響を及ぼすと考えると、行動観察実験の結果 (B) を説明することは難しい。そこで、各脚は隣接脚が受ける反力の情報を得ることができると仮定し、各脚が自脚と隣接脚が受ける反力の情報に応じて振る舞いを生成するように制御則を設計する。

いま、各脚が受ける地面からの反力として摩擦力に着目し、反力が推進に利するものであるか否かによって自脚および隣接脚の振る舞いを制御する。図 4(a) に示すように、 i 番目の脚が受ける摩擦力が進行方向と同じ向きである場合は推進に利する反力を受けているため、当該脚は脚先を地面に押し付けながら後方に蹴りだす。それと同時に、隣接する $i-1$ 番目、 $i+1$ 番目の脚は推進の妨げとならないように脚先を地面から浮かせながら前方に振りだす。逆に、図 4(b) に示すように、 i 番目の脚が受ける摩擦力が進

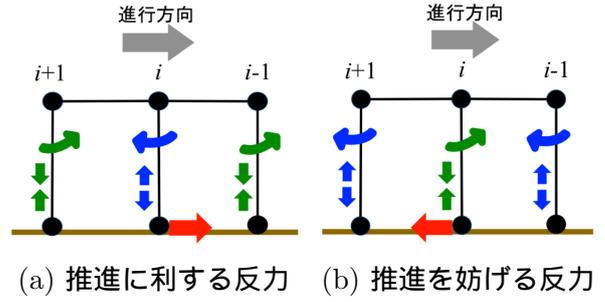


図 4: 地面からの反力を活用する制御則の概要

行方向と逆向きである場合は、推進の妨げとなる反力を受けているため、当該脚は脚先を地面から浮かせながら前方へ振りだし、隣接脚は脚先を地面に押し付けながら後方に蹴りだすことで推進に寄与する。このように制御則を設計することで、自脚と隣接脚の振る舞いが協調した効果的な推進が可能であると考えられる。

3.3 提案する制御則

前述した指針に基づき設計した各脚の自律分散制御則について述べる。 i 番目の脚の目標関節角 $\bar{\phi}_{i,fore}$ 、 $\bar{\phi}_{i,hind}$ および RTS の自然長 \bar{l}_i の時間発展を以下の式で定める。

$$\lambda \dot{\bar{\phi}}_{i,fore} = \frac{\pi}{2} + \alpha(\Delta F_i) - \bar{\phi}_{i,fore} \quad (4)$$

$$\lambda \dot{\bar{\phi}}_{i,hind} = \frac{\pi}{2} - \alpha(\Delta F_i) - \bar{\phi}_{i,hind} \quad (5)$$

$$\lambda \dot{\bar{l}}_i = l_0 + \beta(\Delta F_i) - \bar{l}_i \quad (6)$$

ここで、

$$\Delta F_i = -F_{i-1} + 2F_i - F_{i+1} \quad (7)$$

$$F_i = \tanh(af_i) \quad (8)$$

ただし、 $\alpha, \beta, \lambda, l_0, a$ は正の定数。 f_i は i 番目の脚先が地面から受ける摩擦力であり（進行方向を正とする）、 F_i は i 番目の脚先が感じる力覚情報を表す。(7) 式において双曲線関数を用いているのは、生物の感覚情報は刺激がある程度大きくなると飽和すると考えられるためである。

(4) ~ (6) 式の物理的意味を説明する。(4), (5) 式の右辺第 2 項 $\alpha(\Delta F_i)$ は自脚と隣接脚の反力

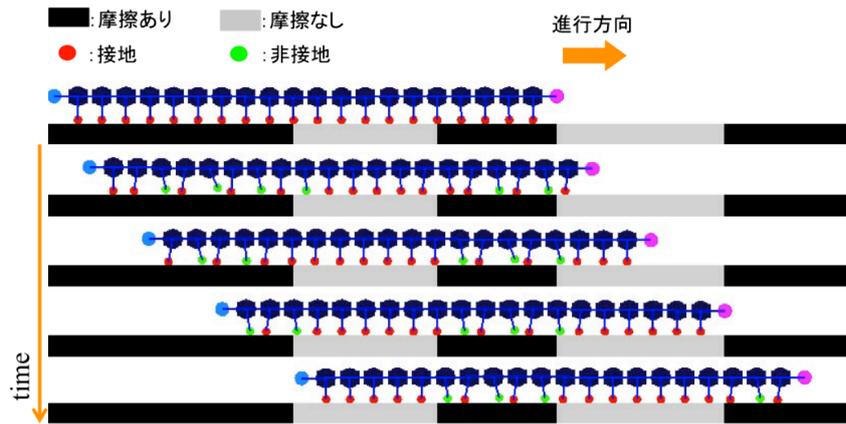


図 5: シミュレーション実験の結果

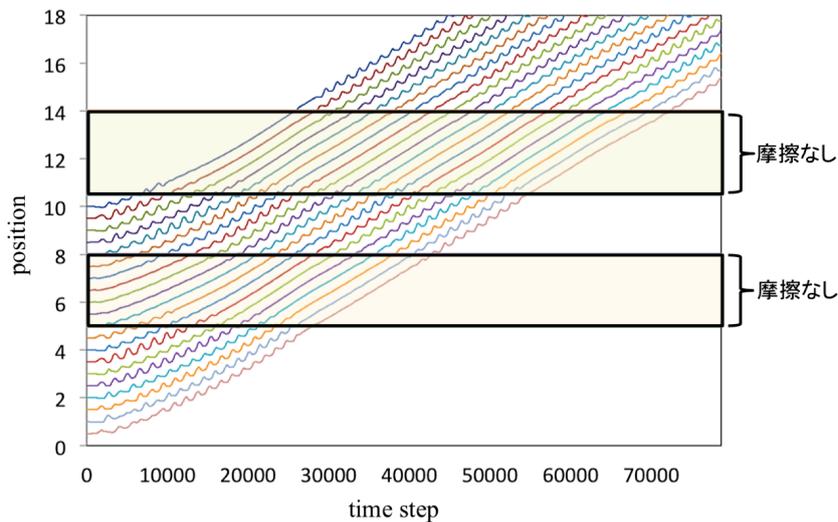


図 6: 脚先の水平方向の位置に関する時空間プロット

情報に応じて脚を前後に振りだす効果を表している。また、(6) 式の右辺の第 2 項 $\beta(\Delta F_i)$ は、自脚と隣接脚の反力情報に応じて脚を地面に押し付ける、あるいは地面から脚を浮かせる効果を表す。

4 シミュレーション結果

提案する自律分散制御則の妥当性を検証するためにシミュレーション実験を行った。今回のシミュレーションで用いたパラメータは以下の通りである： $k_1 = 800000$ ， $k_2 = 3500$ ， $d_1 = 1000$ ， $d_2 = 250$ ， $\lambda = 50$ ， $\alpha = 0.15$ ， $\beta = 0.1$ ，

$l_0 = 0.5$ ， $a = 0.0005$ 。タイムステップの刻み幅は 0.0001 とした。

摩擦が生じる領域（摩擦係数 > 0 ）と摩擦が生じない領域（摩擦係数 $= 0$ ）が存在する地面において、ムカデのロコモーションをシミュレーションした。シミュレーション結果のスナップショットを図 5 に示し、脚先の位置に関する時空間プロットを図 6 に示す。図 5 および図 6 から、摩擦が生じる領域において脚の周期的な運動が発現し、摩擦が生じない領域では脚の運動が止まる様子が確認できる。したがって、本稿で示した行動観察実験の結果と類似した動きを再現することができた。

5 まとめと今後の展望

本研究では、ムカデの適応的なロコモーションに着目し、行動観察実験で得られた知見をもとに、各脚が運動した結果環境から得られる反力情報に応じて脚の振る舞いを変化させる自律分散制御則を提案した。提案制御則を用いてシミュレーション実験を行った結果、実際のムカデの振る舞いに類似した動きを再現することができた。

今後の展望として、今回提案した制御則が実世界環境下においても機能するかを確かめるため、ムカデ型ロボット実機を用いて検証を行う予定である。

参考文献

- [1] A. J. Ijspeert: Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: A review, *Neural Networks*, 21-4, 642/653 (2008)
- [2] T. Umedachi, K. Takeda, T. Nakagaki, R. Kobayashi, and A. Ishiguro: Fully decentralized control of a soft-bodied robot inspired by true slime mold, *Biological Cybernetics*, 102-3, 261/269 (2010)