

局所摩擦の推定に基づくヘビ型ロボットの分散的な運動モード切り替え

Decentralized Locomotion Mode Switching in a Snake-like Robot Based on Local Friction Estimation

○学 JU HODON (信州大) 学 稲葉 悠馬 (信州大) 正 梅館拓也 (信州大)

Hodon JU, Shinshu University, ap390696@gmail.com

Yuma INABA, Shinshu University

Takuya UMEDACHI, Shinshu University

This study investigates the impact of varying friction environments on the locomotion performance of snake-like robots and proposes an adaptive control method to dynamically select the optimal locomotion mode. We constructed a mathematical model incorporating friction anisotropy inspired by snake scales. Through simulation, we compared bending-based snake-like motion and expansion/contraction-based earthworm-like motion. Results showed that snake-like motion is fast in low-friction environments but struggles as friction increases, whereas earthworm-like motion maintains stability under high friction. Based on these findings, we developed a decentralized control strategy where each segment estimates local friction and independently switches its behavior. Experimental results in heterogeneous friction fields demonstrated that this adaptive method allows the robot to smoothly traverse sudden environmental changes without getting stuck, achieving robust and highly efficient locomotion.

Key Words: Snake robot, Simulation, Control

1 緒言

ヘビ型ロボットの研究は、1972年のACM-III開発に端を発し、半世紀以上にわたり活発に行われてきた[1]。ヘビ型ロボットの最大の特徴は、直列に連結された多数の関節を持つ冗長な身体構造であり、車輪型や脚型ロボットが進入不可能な狭隘空間や不整地での移動が可能である点にある[2, 3]。動物のヘビ、ヘビ型ロボットの両方において、推進力を得るためには摩擦の異方性が必要であり、進行方向への摩擦抵抗を最小化しつつ体軸直交方向への摩擦抵抗を最大化することで推進ベクトルを生成する。

従来、ヘビ型ロボットが推進力を推進力を得るために、この異方性を実現するため車輪が広く採用されてきた[4]。しかし、砂地や泥濘地などの流動性を持つ軟弱地盤においては、自重によって点接触の車輪が埋没しやすく、抗力を確保できないという致命的な課題があった[5]。この課題を解決するため、近年では生物のヘビが持つウロコ構造に着想を得た、面接触による動的な摩擦異方性を生成する接地機構の研究が注目されている[6]。

一方、ヘビとほぼ同じ形態である一次元ヒモ状のミミズ型ロボットは、体軸方向の伸縮運動を後方から前方へ伝播させる蠕動運動によって移動を行う[7]。ヘビ型ロボットが身体を左右に振る空間を必要とするのに対し、ミミズ型ロボットは自身の体幅分の空間さえあれば移動可能であるため、極めて狭い管内や土砂などの高密度媒質中での探索に適している[8]。ミミズの運動は、接地している体節を地面に固定(アンカー)し、その反力を利用して他の体節を前進させることで強力な推進力を生み出す[9]。

本研究の目的は、車輪を用いずウロコ構造による摩擦異方性を考慮した数理モデルを構築し、ロボットの接地機構と運動様式の関

係を包括的に評価することである。このモデル上で、曲げ運動を主体とするヘビ型運動と伸縮運動を主体とするミミズ型運動を再現し、摩擦環境が移動速度に与える影響を定量的に明らかにする。さらに、摩擦条件に応じて最適な運動モードを局所的に切り替える適応型制御手法を提案し、その有効性を実証する。

2 数理モデルとシミュレーションの構築

摩擦環境と運動速度の関係を定量的に解析するため、質点-バネ-ダンパ系に基づく物理シミュレーションを構築した。計算環境にはJavaScriptライブラリであるp5.jsを用い、各質点位置の時間発展には速度ベレル法を採用した[10]。Fig1に本研究で構築したヘビ型ロボットの数理モデルを示す。

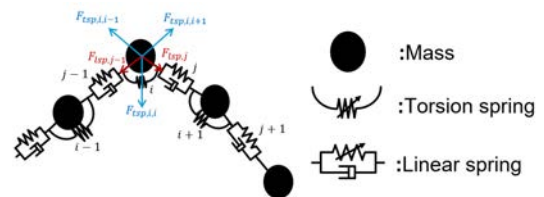


Fig.1: Mathematical model of the snake-like robot

2.1 ロボットの身体構造と運動制御

ロボットは複数の質点(マス)から構成され、各質点は直動バネおよびダンパによって体軸方向に接続されるとともに、隣接するリンク間にはねじりバネが配置されている(Fig.1)[11]。

ヘビ型の曲げ運動は、ねじりバネの目標角度 Θ_i を位相 ϕ_i に従って周期的に変化させることで生成する。

$$\Theta_i(\phi_i) = \bar{\Theta} + A_{tsp} \sin \phi_i \quad (1)$$

ここで、 $\bar{\Theta}$ は自然角の初期値、 A_{tsp} は振幅である。

一方、ミミズ型の伸縮運動は、直動バネの目標自然長 L_i を次式のように動的に変化させ、隣接セグメント間で適切な位相差を持って伝播させることで実現する。

$$L_i(\phi_i) = \bar{L}(1 + A_{tsp} \sin \phi_i) \quad (2)$$

ここで、 $\bar{L}$ は初期自然長、 A_{tsp} は伸縮の振幅係数である。これにより、シミュレーション内で単一のモデルを用いて 2 つの異なる運動様式を表現可能とした。

2.2 ウロコ構造に基づく摩擦モデル

地面との相互作用を表現するため、速度に比例して作用する粘性摩擦モデルを導入した。Fig.2 に示す実機におけるウロコ構造が持つ。左が模式図、右が 3D 造形物で、黒/深青の部分がゴム状で高摩擦、白の部分が硬プラスチックで低摩擦である。この進行方向と逆方向での摩擦特性の違い [12] を連続的に表現するため、体軸方向ベクトルと各質点の速度ベクトルのなす角 α に依存するシグモイド関数を用いた摩擦力 $\vec{F}_{fric,i}$ を次式で定義した。

$$\vec{F}_{fric,i} = \frac{\mu}{1 + e^{-(K\alpha - C\pi)}} \vec{v}_i \quad (3)$$

ここで、 μ は摩擦係数、 K はシグモイド関数の傾き、 C はシグモイド関数の変曲点を規定するパラメータである。これにより、なす角が変曲点付近に達すると摩擦係数が急激に増加し、ウロコの物理的な傾斜角度に相当する異方性を滑らかかつ明確にシミュレートできる。

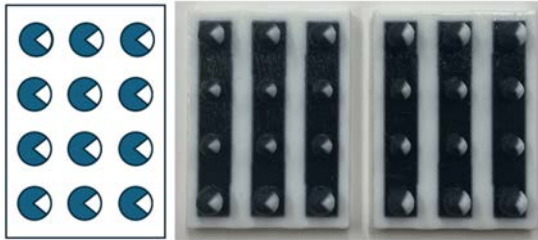


Fig.2: Scale structure and friction anisotropy in the physical robot: black / dark blue: high friction (rubber); white: low friction.

3 シミュレーション実証実験

構築したモデルを用い、摩擦環境および接地機構の特性がロコモーション性能に与える影響を 3 段階の実験を行い、検証した。

3.1 ウロコのパラメータ探索

実機のウロコ構造が持つ幾何学的な摩擦切り替わり角度をシミュレーション上で再現するため、摩擦モデルのシグモイド関数の傾き K と変曲点 C の最適な組み合わせを探索した。低摩擦条件 ($\mu = 20$) と高摩擦条件 ($\mu = 100$) において 60 秒間のシミュレーションを行い、平均移動速度の差を評価指標とした。

パラメータ探索の実験結果を表 1 に示す。表 1 からわかるように、 $K = 11$ 、 $C = 4.0$ の条件で速度差が最大となり、このときの変曲点角度は約 65° となった。これは実機ウロコの幾何学的な傾

Table 1: Results of parameter exploration

	K				
	7	8	9	10	11
3.5	-6.4	-1.7	16.9	16.7	12.9
4.0	-7.8	-9.4	-3.7	-24.4	18.7
4.5	-6.8	-6.7	-14.5	-7.2	-2.4
C	5.0	-5.8	-5.0	-5.8	-22.1
5.5	-5.0	-4.3	-4.7	-5.6	-22.9
6.0	-5.0	-3.1	-4.4	-4.6	-4.6
6.5	-5.0	-3.0	-4.4	-4.7	-3.8

斜角度と概ね一致する妥当な値であるため、以降の実験ではこのパラメータを採用した。

3.2 摩擦環境での運動様式の特性比較

特定したウロコパラメータを用い、摩擦係数を 10 から 100 まで段階的に変化させてヘビ型運動とミミズ型運動の平均移動速度を比較した結果を Fig.3 に示す。

Fig.3 の実験結果から、低摩擦環境ではヘビ型の曲げ運動が高い移動速度を示したが、摩擦係数が増加するにつれて速度は急激に低下し、特に摩擦係数が 60 を超える条件において顕著な性能低下が確認された。対照的に、ミミズ型の伸縮運動は絶対的な速度こそヘビ型に劣るものの、高摩擦条件においても速度低下が少なく、一定の安定した移動性能を維持することが証明された。この結果から、摩擦が $\mu = 60$ を超える環境ではミミズ型運動へ切り替える制御が有効であることが示唆された。

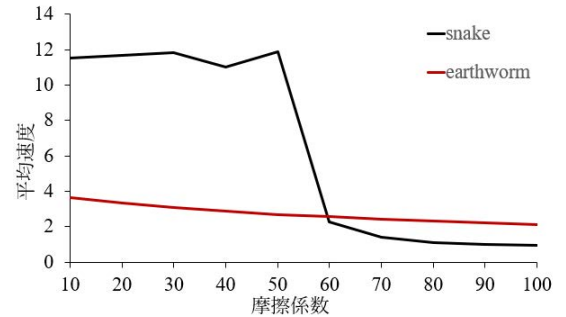


Fig.3: Comparison of average speeds of snake-like and earthworm-like locomotion modes against maximum friction μ

3.3 環境適応型切り替え制御の検証

実際の環境では摩擦係数が空間的に不均一であることを考慮し、各セグメントが局所的な摩擦抵抗を感知して個別に運動モードを選択する適応型切り替え制御を提案した。前節の結果から切り替え閾値を $\mu_{th} = 60$ と設定し、各セグメントの制御モード M_i を以下の閾値判定に基づいて決定する論理を実装した。

$$M_i = \begin{cases} 0 \text{ (Snake Mode)} & (\mu_{local} < \mu_{th}) \\ 1 \text{ (Adaptive Mode)} & (\mu_{local} \geq \mu_{th}) \end{cases} \quad (4)$$

フィールド中央を境界とし、前半が低摩擦 ($\mu = 20$)、後半が高摩擦 ($\mu = 100$) となる環境を走行させた結果を Fig.4 に示す. Fig.4 より、ヘビ型運動 (Snake Mode) では高摩擦領域に進出した直後に推進力が相殺されて停止してしまったことがわかる. 一方、適応モード (Adaptive Mode) では、低摩擦領域をヘビ型で高速移動し、境界に達すると先頭セグメントから順次ミズ型運動へと滑らかに遷移するハイブリッド運動が生成された.

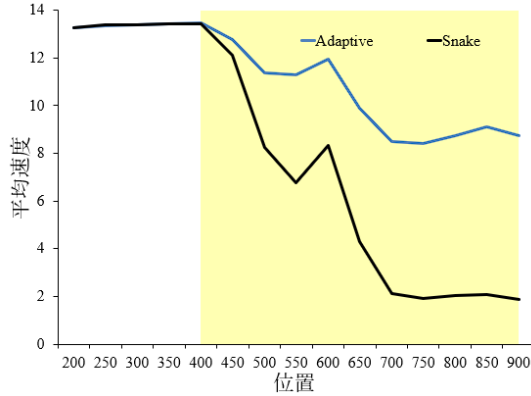


Fig.4: Comparison of average speeds between pure snake-like locomotion and adaptive locomotion along the position

4 結言

本研究では、ウロコ構造による摩擦の異方性を考慮した数理モデルを構築し、摩擦環境の違いがヘビ型ロボットのロコモーションに与える影響を定量的に検証した. 摩擦係数の変化に伴い、低摩擦ではヘビ型運動、高摩擦ではミズ型運動が有効であることを明らかにし、単一の運動様式を固定的に用いるのではなく、環境に応じて運動モードを切り替える必要性を示した. さらに、各セグメントが局所的な摩擦情報に基づいて運動モードを自律的に切り替える分散制御を導入した結果、摩擦環境が急激に変化する状況下においても、スタックすることなくロバスタかつ効率的なロコモーションが実現できることを実証した. これは、未知の不整地を移動する実機ロボットの制御戦略として極めて有効である. 今後は、ポスター発表前に分散制御を完成し、実機に適用する予定である.

謝辞

本研究は、日本学術振興会 (JSPS) 科研費 基盤研究 (B) (課題番号: 25K01197, 25K01203) の助成を一部受けて行われました.

参考文献

- [1] Shigeo Hirose and Hiroya Yamada. Snake-like robots [tutorial]. IEEE Robotics Automation Magazine, Vol. 16, No. 1, pp. 88-98, 2009.
- [2] Ismet Erkmen, Aydan M. Erkmen, Fumitoshi Matsuno, Ranajit Chatterjee, and Tetsushi Kamegawa. Snake robots to the rescue! IEEE Robotics and Automation Magazine, Vol. 9, No. 3, pp. 17-25, September 2002.
- [3] Julian Whitman, Nico Zevallos, Matt Travers, and Howie Choset. Snake Robot Urban Search After the 2017 Mexico City

Table 2: simulation parameters used in this study

Param.	Description	Value
N	Number of segments	15
R	Radius of body	20
m	Mass of a particle	4
dt	Time step	1/30
k_{tsp}	Stiffness of torsion springs	30000
Θ	Neutral angle of torsion springs	π
A_{tsp}	Amplitude of torsion springs	0.5π
ω	Angular frequency	1.1π
n_{wave}	Wave number	3.0
k_{lsp}	Stiffness of linear springs	400
$\bar{L}$	Neutral length of linear springs	30
A_{lsp}	Amplitude of linear springs	0.15
c	Damping coefficient	20
μ	Viscous coefficient	20, 100
K	Slope of friction sigmoid	11
C	Inflection point of friction sigmoid	4.0

Earthquake. In 2018 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), pp. 1-6, August 2018.

- [4] Aksel Andreas Transeth, Kristin Ytterstad Pettersen, and Pål Liljebäck. A survey on snake robot modeling and locomotion. Robotica, Vol. 27, No. 7, pp. 999-1015, 2009.
- [5] Hamidreza Marvi, Chaohui Gong, Nick Gravish, Henry Astley, Matthew Travers, Howie Choset, David L. Hu, and Daniel I. Goldman. Sidewinding with minimal slip: Snake and robot ascent of sandy slopes. Science, Vol. 346, No. 6206, pp. 224-229, 2014.
- [6] Ahmad Rafsanjani, Yuzhe Zhang, Bolei Liu, Shmuel M. Rubinstein, and Katia Bertoldi. Kirigami skins make a robotic snake crawl. Science Robotics, Vol. 3, No. 15, p. eaar7555, 2018.
- [7] Taro Nakamura, Hirotaka Omori, and Kazuo Tanaka. Peristaltic motion of earthworm-like robot with friction control. Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 18, No. 3, pp. 286-293, 2006.
- [8] Kathryn A. Daltorio, Alexander S. Boxerbaum, Andrew D. Horchler, Kevin M. Shaw, Hillel J. Chiel, and Roger D. Quinn. Design and evolution of a soft mobile robot for confined environments. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 18, No. 2, pp. 664-674, 2013.
- [9] Kelly J. Quillin. Kinematic scaling of locomotion by hydrostatic animals: ontogeny of peristaltic crawling by the earthworm lumbricus terrestris. Journal of Experimental Biology, Vol. 202, No. 6, pp. 661-674, 1999.
- [10] 上田顕, 分子シミュレーション: 古典系から量子系手法まで, 裳華房, 2003.
- [11] 稲葉悠馬, 伸縮運動による斜め横に這行を行う蛇型ロボット. Master's thesis, 信州大学, 2025.
- [12] D. Ta Tung, Takuya Umedachi, Michiyo Suzuki, and Yoshihiro Kawahara. A printable soft-bodied wriggle robot with frictional 2d-anisotropy surface. Journal of Information Processing, Vol. 30, pp. 201-208, 2022.