

修士学位論文要約（平成29年 3 月）

クモヒトデに学ぶ階層的な自律分散制御則の設計方策に関する研究

小野 達也

指導教員：石黒 章夫

Study on the Hierarchical Decentralized Control Scheme Inspired by Ophiuroid Locomotion

Tatsuya ONO

Supervisor: Akio ISHIGURO

To understand decentralized control mechanisms underlying highly adaptive and resilient animal locomotion, we focus on ophiuroids. We previously studied their inter- and intra-arm coordination mechanisms during their locomotion individually, yet the hierarchical control mechanism for the well-balanced coupling between the inter- and intra arm coordination is still unclear. Here we addressed this issue and proposed a hierarchic decentralized control scheme based on *Tegotae*, a Japanese concept describing how well a perceived reaction matches an expectation. The validity of the proposed control scheme was confirmed via simulation.

1. はじめに

生物は、限られた計算資源しか有しないにもかかわらず、予測不能的で非構造的な実世界環境にリアルタイムに適応してロコモーション（移動）することができる。また、予期せぬ事態により身体の一部を欠損した場合であっても、残存機能を活用しロコモーションを即座に生成することができる。したがって、このような生物が示すロコモーションの発現機序を解明することができれば、実世界環境下でもしどくしなやかに稼働するロボットの実現など、広範な工学的応用が期待できる。

上記を解明するため、本研究ではクモヒトデという生物に着目した。クモヒトデは棘皮動物の一種で、その身体は中央の盤とそこから放射状に伸びる 5 本の腕で構成される（図 1(a)）[1]。クモヒトデは、これらの腕を巧みに協調させることで、非構造環境に即座に適応し推進することや、外敵から襲われると腕をみずから切断し、腕の残存状態に応じた振る舞いをリアルタイムに生成して逃げ回ることができる。驚くべきことに、これらの能力は、各腕を貫く放射神経とそれらを盤の内部でつなぐ周口神経環からなるきわめて単純な分散神経系により実現されている（図 1(b)）[2]。つまり、クモヒトデのロコモーションには、環境適応性と耐故障性の双方を実現する優れた自律分散的な制御メカニズムが内在していると考えられる。

クモヒトデが示すこれらのロコモーションは、身体各所の感覚情報を統合することで決定した進行方向の情報をもとに腕の役割を自己組織的に分担し、その役割に即して各腕の振る舞いを決める、といった階層的なメカニズムにより実現されていると推察され

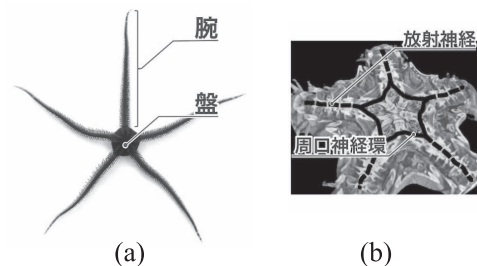


図 1 (a) クモヒトデの全体像, (b) 神経系のマイクロ CT 画像

る。そこで本研究ではこの階層性に着目し腕どうしの協調関係（腕間協調）と腕の自由度間の協調関係（腕内協調）の連関を実現する階層的な自律分散制御則を提案し、その妥当性をシミュレーション実験により検証したので報告する。

2. 行動観察実験と提案モデル

クモヒトデの適応的な振る舞いの生成メカニズムを解明するため、筆者らは実際にクモヒトデ (*Ophiarachna incrassata*) の行動観察実験を行った。その結果、クモヒトデの適応的なロコモーションは、各腕が地面などを蹴り推進に寄与するパワーストロークの状態と、環境からの反力を避けながら進行方向へと振り戻すリカバリーストロークの状態を適切に切り替えることで実現されているという知見を得た。また、この振る舞いの切り替えは、腕とその根元部にある盤の一部さえ残存する状態であれば発現可能であることが確認さ

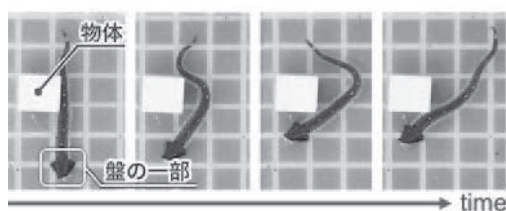


図2 行動観察実験のスナップショット

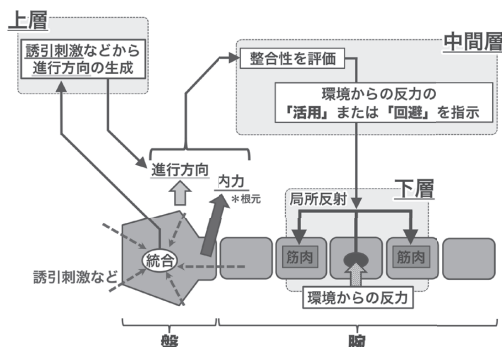


図3 作業仮説の概要

れた (図2)。

上記の知見から、本研究ではクモヒトデのロコモーションは以下のような3つの層を経て生成されているとの作業仮説を設けた(図3)：

上層：感覚刺激を統合し、進行方向を決定する。

中間層：各腕が、進行方向と腕の根元で盤が腕から受ける力との整合性を評価する。

下層：腕の各所で、当該腕の中間層で判断された整合性が高い場合は、その腕が受けている環境からの反力を増やすように、整合性が低い場合は減らすように、局所フィードバックする。

上記の作業仮説に基づき、本研究では階層的な自律分散制御制御則を提案した。その詳細に関しては紙面の都合上割愛する。

3. シミュレーション実験による検証

提案モデルの妥当性を検証するため、シミュレーション実験を行った。その結果を図4に示す。実際のクモヒトデと同様に、周囲の環境や腕の本数、長さなどの身体構造が変化した場合であっても、所望の方向へと推進可能であることが確認された。また、各腕の振る舞いに着目すると環境からの反力のうち、推進に利するものは活用し、そうでないものは回避するという動作が発現していることが分かる (図4矢印参照)。

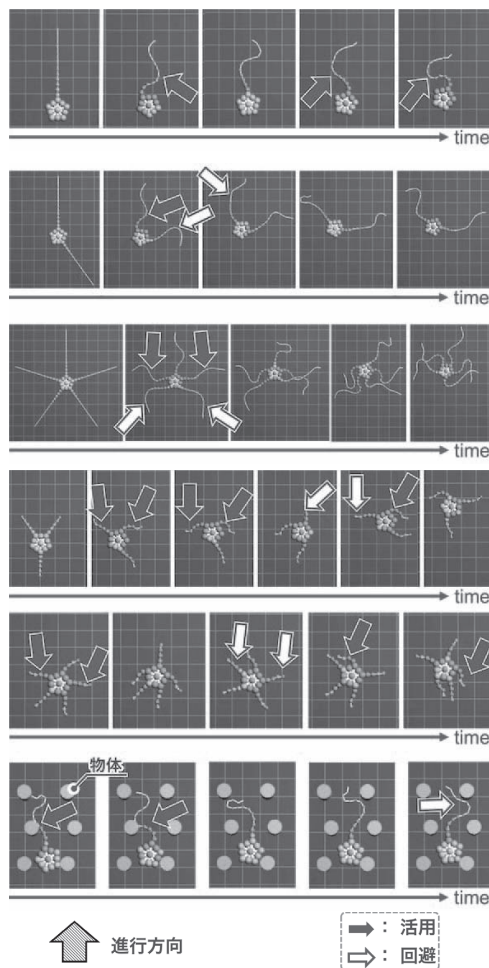


図4 シミュレーション結果

4. まとめと今後の展望

本研究では、生物が示す適応的かつレジリエントなロコモーションの発現機序を解明するため、クモヒトデという生物に着目した。そして、腕間協調と腕内協調の有機的な連関を実限する階層的な自律分散制御則を提案した。この提案制御則をシミュレーション実験により検証した結果、耐故障性および環境適応性の実現が確認された。今後は、実際にロボットを開発し、実世界環境下における提案制御則の妥当性を検証する予定である。

参考文献

- 1) 内田亨, 山田真弓, 小郷一三, 林良二, 入村清一, 重井陸夫, 小黒千足: 動物系統分類学 8(中) 棘皮 動物, pp. 145/157, 中山書店, (1974)
- 2) Y. I. Arshavskii, S. M. Kashin, N. M. Litvinova, G. N. Orlovskii and A. G. Fel'dman: "Types of Locomotion in Ophiurans", *Neurophysiology*, vol.8-5, pp.398-404(1976)