総説

ヘビの多芸多才なロコモーションに内在する自律分散制御則

加納剛史, 石黒章夫 東北大学電気通信研究所

Snakes have lost their limbs and acquired the ability to move in various environments by using a simple elongated body structure through long-term evolutionary process. Specifically, snakes have various locomotion patterns (scaffold-based locomotion, concertina locomotion etc.) and change them in response to the environment. This ability is likely achieved by a decentralized control mechanism, yet it is still largely unknown. We have attempted to elucidate the decentralized control mechanism through a synthetic approach, an approach to unveil the mechanism through behavioral experiments, mathematical modeling, and robot experiments, for ten years. Here we review our works including some future scopes.

snake locomotion / decentralized control / robot

1. はじめに

動物は、限られた計算資源しか有さないにもかかわらず、非構造的で予測不能的に変動する環境下において実時間かつ合目的的に多様な運動パターンを生み出し、適応的に動き回る。この多芸多才な生物の振る舞いは、脳からの指令のみで実現されているわけではなく、脳より下位の分散的な神経回路や局所センサフィードバックが振る舞いの発現に重要な役割を果たしているはずである¹⁾。しかしながら、そのからくり(自律分散制御則)は依然多くの謎に包まれている。

筆者らの研究室では、構成論的アプローチ²⁾を用いて、動物の多芸多才な運動知能に内在する自律分散制御則の解明に取り組んでいる。構成論的アプローチとは、行動観察結果をもとに数理モデルを構築し、ロボットを用いてその妥当性を検証するアプローチである。このアプローチは以下の特徴・利点を有している:

1. 実際の動物を用いて行うことが困難な実験(侵襲を伴う実験など)を、ロボットを用いて行うことができる。これにより、生物学者に重要な知見を提供することができる。
2. できる限り単純化した身体構造や制御則を用いて動物の振る舞いを再現することで、当該現象が生起するための本質的な要因を理解できる。
3. ロボットを用いることで、不整地や流体などのシミュレーションでは扱いにくい実世界環境下での振る舞いを検証することができる。
4. 本アプローチにおけるロボットは「制御則解明のためのツール」という位置づけだが、その一方で、解明した制御則から新たな工学応用に道を切り拓

くこともできる。即ち、robotics-inspired biology と bio-inspired robotics の両方の側面を有している。

筆者らの研究室では様々な動物種を対象として研究を行っているが、本稿では特にヘビのロコモーションを採り上げる。ヘビは、紐状の単純な身体構造にもかかわらず、多種多様な運動パターンを有し、それらを環境に応じて巧みに使い分けることで、様々な環境を踏破する³⁾⁻⁶⁾。また、地面の凹凸などの環境の不均一性を積極的に活用して推進するという、従来のロボットにない特性を有している⁶⁾⁻⁸⁾。著者らは、このヘビの能力に魅せられ、約10年間にわたって研究を続けてきた。ここではその代表的な成果⁹⁾⁻¹²⁾について紹介する。

2. ヘビが示す多様な運動パターン

ヘビが示す運動パターンを以下に示す(図1)^{3),4)}:

- Lateral undulation (図1a): 体軸方向には滑りやすく体軸に垂直な方向には滑りにくいという摩擦の異方性¹³⁾を活用し、身体を体軸方向に滑らせながら推進する。その中でも特に、凹凸のある環境において凸部に身体を押しつけながら体軸方向に滑らせ、効率的に推進する運動を scaffold-based locomotion (図1b)と呼ぶ。
- Sinus-lifting locomotion (図1c): Lateral undulation と同様の推進原理であるが、身体の屈曲部を地面から浮かせることで、より効率的に推進する。
- Sidewinding (図1d): 左(右)屈曲部から右(左)屈曲部の間で接地し、接地点を頭側から尾側に伝搬させることで、横方向に推進する。

Decentralized Control Mechanism Underlying Adaptive and Versatile Locomotion of Snakes

Takeshi KANO and Akio ISHIGURO

Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University

図 1

ヘビが示す多様な運動パターン。文献 11, 12 より許諾を得て引用。(g) は横から見た図。それ以外は上から見た図。

- Concertina locomotion (図 1e, f): 頭側で地面や壁に身体を押しつけて尾側をたぐりよせた後、尾側で地面や壁に身体を押し付けて頭側を伸ばすという動作を繰り返して推進する。
- Rectilinear locomotion (図 1g): 腹板を伸縮させ、縮んだ部分で接地する。接地部分を頭側から尾側に伝搬させることで推進する。

なお、種によって得意とする運動パターンは異なるが、多くの種は複数の運動パターンを環境に応じて使い分ける。たとえば、砂漠に生息する *Cerastes vipera* は主に sidewinding (図 1d) を用いるが、狭窄空間では concertina locomotion (図 1e) や rectilinear locomotion (図 1g) を示す¹⁴⁾。

3. 「手応え制御則」の提案

筆者らが最初に注目したのは、環境の不均一性を積極的に活用して推進する scaffold-based locomotion (図 1b) である。日本蛇族学術研究所に足を運んだり、研究室内でヘビを飼育したりして、行動観察実験を行った。そして、撮影した動画を何度も見ることで、どのような制御則によりこの運動パターンを再現できるかを考察した。

図 2 は、地面に杭をおいた環境下でヘビ (*Elaphe climacophora*) を推進させた時の様子である。同図から、以下の 2 点を読み取ることができる:

- 1) 身体の一部は、頭が通った経路に沿って動く。
- 2) 身体が杭に接した際、杭から受ける反力が推進の助けになる場合は積極的に身体を杭に押し付け、

図 2

ヘビ (*Elaphe climacophora*) の Scaffold-based locomotion の様子。文献 10, 12 より許諾を得て引用。

逆に推進の妨げになる場合は杭を回避する。

上記知見をもとに数理モデルを構築した。二次元平面上において、複数の体節が連なった身体を考える。頭側から i 番目の関節の関節角、目標関節角をそれぞれ $\phi_i(t), \bar{\phi}_i(t)$ とする (t はタイムステップ)。関節角が目標関節角に近づくように関節トルクが発生する。目標関節角は以下の式で制御される:

$$\bar{\phi}_i(t+1) = \phi_{i-1}(t) + \sigma \tanh \left\{ \kappa \sum_{j=i-n_b}^{i+n_f} \tau_j(t) (f_{l,j}(t) + f_{r,j}(t)) \right\} \quad (1)$$

ここで、 $\tau_j(t)$ は j 番目の関節が発生するトルク、 $f_{l,j}(t)$ 、 $f_{r,j}(t)$ はそれぞれ j 番目の体節が左側、右側から受ける反力、 σ 、 κ は正の定数、 n_f 、 n_b はそれぞれ前側、後側にフィードバックする体節数である。ただし、先頭部数関節の目標関節角は、(1) 式ではなく中央集権的な制御により与えられる (後述のロボットでは、操作者がリモコンを用いて制御する)。

(1) 式の右辺第一項は上記知見 1) を再現するための項であり、前側の関節の関節角を目標関節角にすることで、頭側が通った経路を後方が追従できるようにしている。これは、体幹がなす曲線の曲率の空間微分に比例したトルクを発生させる制御である曲率微分制御と等価なものになっている¹⁵⁾。

一方、(1) 式の右辺第二項は上記知見 2) を再現するために筆者らが提案した項であり、動作とその結果得られた感覚情報の整合性を表す概念である「手応え」という言葉を用いて「手応え制御則」と名付けている。この項の意味を図 3 に示す。身体を右側に屈曲させた時 (図 3a)、身体の前側に杭などの環境から反力を受けた場合は、環境を足場として活用できるため「良い手応え」を受けていると言える (図 3b)。この時はさらにトルクを発生させて、身体を環境に対してより強く押し付ける (図 3c)。逆に、身体を右側に屈曲させた時に身体の前側に反力を受けた場合 (図 3d) を、「悪い手応え」を受けていると考え、さらにトルクを発生させて環境との接触を回避する (図 3e)。単に反力 $f_{l,j}(t)$ 、 $f_{r,j}(t)$ をフィードバックするのではなく、トルク $\tau_j(t)$ と反力 $f_{l,j}(t)$ 、 $f_{r,j}(t)$ の積 (つま

図3 手応え制御則の概念図. 文献12より許諾を得て引用.

り行動と感覚情報の整合性)をフィードバックしていることに注意されたい. これにより, 検知した反力が推進に利するかどうかを瞬時に峻別し, 結果として推進に利する反力のみを選択的に活用することが可能となるのである.

4. ヘビ型ロボットを用いた検証

提案制御則の妥当性を検証するため, ヘビ型ロボット HAUBOT VII を開発した (図4). このロボットは, 同一構造を持つセグメントが30個連なっており, 各セグメントには関節を駆動するモータや体節両側面から受ける力を検出するセンサなどが実装されている.

地面に杭を複数置いて実験した結果を図5aに示す. 実際のヘビと同様, 推進の助けとなる杭に積極的に身体を押しつけて推進していることがわかる.

さらに筆者らは, 「この制御則が本当にヘビのロコモーションの本質を捉えているならば, scaffold-based locomotion 以外の運動パターンも再現できるかもしれない」と考えた. そこで, ロボットを狭窄空間に置いて実験してみた. すると, なんと concertina locomotion (図1e) が出るではないか (図5b)! 改めて強調するが, 図5の実験は同一の制御則・パラメータで環境が違うだけである. それにもかかわらず異なる運動パターンが生み出されたのは驚きである.

5. 三次元ロコモーションへの発展

Sinus-lifting locomotion (図1c) や sidewinding (図1d)

図4 ヘビ型ロボット HAUBOT VII. 文献10, 12より許諾を得て引用.

図5 ヘビ型ロボット (HAUBOT VII) による (a) scaffold-based locomotion, (b) concertina locomotion の再現. 文献10, 12より許諾を得て引用.

などの運動パターン (図1) は, 身体の屈曲のみならず接地箇所の時空間分布をも適切に制御することで実現されている. そこで, モデルを二次元から三次元に拡張し, 新たに開発したヘビ型ロボット HAUBOT VIII を用いてこれらの振る舞いを再現できるか検証した. 紙面の都合上詳細は割愛し, 結果のみ紹介する. 図6は, 先頭関節の目標角の時間発展を左右対称に設定した場合と左右非対称に設定した場合の結果である. 対称の場合は sinus-lifting locomotion (図6a), 非対称の場合は sidewinding (図6b) を再現できている

図6 ヘビ型ロボット (HAUBOT VIII) による (a) sinus-lifting locomotion, (b) sidewinding の再現. 文献12より許諾を得て引用.

ことがわかる。先頭関節の入力を変えるだけで異なる運動パターンが出たことは興味深い。

6. まとめと今後の展望

構成論的アプローチに基づき、多芸多才なヘビのロコモーションに内在する自律分散制御則の解明に取り組んできた。行動観察結果をもとにシンプルな自律分散制御則を提案し、ヘビ型ロボットを用いて多様な運動パターンを再現することに成功した。

提案した制御則が実際のヘビに内在しているという確証は依然ない。だが、本研究はヘビのロコモーションを担う神経回路網の構造について、重要な示唆を与えていると言えよう。今後、生物学者が提案制御則の妥当性を裏付けてくれることを期待している。

本研究でロボットを用いて検証を行った意義の一つとして、災害現場など複雑な実世界環境で活躍する実用的なロボットの実現につながり得る点が挙げられる。筆者らは、真に環境適応能力の高い実用的なロボットを実現するためには、初動段階から工学応用を考えるのではなく、動物の運動知能の原理を徹底的に追求する「急がば回れ」のアプローチが必要だと考えている。本研究は、このアプローチを採用している点で、従来のヘビ型ロボットの研究^{3),4),16)-18)}と異なる。今後、本研究がロボティクス分野にブレークスルーをもたらすことを期待している。

今後解決したい課題として、中央集権制御と自律分散制御の連関様式の解明が挙げられる。これまでは自律分散制御に焦点を当てた考察を行ってきたが、実際のヘビは脳からの中央集権的な指令もまた重要な役割を果たしているはずである。両者の連関により、さらに知能的な振る舞いが実現できると期待している。

謝 辞

本研究の一部は、JST CREST (JPMJCR14D5) からの援助により行われた。(財)日本蛇族学術研究所の故・鳥羽通久所長、堺淳研究員、三保尚志研究員、広島大学大学院統合生命科学研究科の小林亮教授、筑波大学システム情報系の伊達央准教授、茨城大学工学部の井上康介講師、東北大学電気通信研究所の中島大樹氏、吉澤遼氏、松井尚輝氏、大滝範幸氏からは、実験協力や貴重な助言を頂いた。謝意を表します。

文 献

- 1) Ijspeert, A. J. (2008) Neural Netw. **21**, 642-653. DOI: 10.1016/j.neunet.2008.03.014.
- 2) Pfeifer, R., Bongard, J. (2007) How the body shapes the way we think: a new view of intelligence, MIT Press, Cambridge (MA). DOI: 10.7551/mitpress/3585.001.0001.
- 3) Hirose, S. (1993) Biologically inspired robots: Snake-like locomotors and manipulators. Oxford University Press, UK.
- 4) Liljebäck, P. *et al.* (2013) Snake robots—Modelling, mechatronics, and control. Advances in Industrial Control. Springer Verlag, London. DOI: 10.1007/978-1-4471-2996-7.
- 5) Jayne, B. C. (1988) J. Exp. Biol. **140**, 1-33.
- 6) Gray, J. (1946) J. Exp. Biol. **23**, 101-120.
- 7) Jayne, B. C. (1988) J. Morphol. **197**, 159-181. DOI: 10.1002/jmor.1051970204.
- 8) Moon, B. R., Gans, C. (1998) J. Exp. Biol. **201**, 2669-2684.
- 9) Kano, T. *et al.* (2017) Bioinsp. Biomim. **12**, 046009. DOI: 10.1088/1748-3190/aa7725.
- 10) Kano, T. *et al.* (2018) Biomimetic and Biohybrid Systems. Living Machines 2018. Lecture Notes in Computer Science, vol 10928 (Vouloutsis, V. *et al.*, eds.) pp. 249-254, Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-95972-6_26.
- 11) Kano, T. *et al.* (2019) Biomimetic and Biohybrid Systems. Living Machines 2019. Lecture Notes in Computer Science, vol 11556 (Martinez-Hernandez, U. *et al.*, eds.) pp. 346-350, Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-24741-6_35.
- 12) Kano, T., Ishiguro, A. (2020) Integ. Compar. Biol. **icaa014**. DOI: 10.1093/icb/icaa014.
- 13) Hu, D. L. *et al.* (2009) Proc. Natl. Acad. Sci. USA **106**, 10081-10085. DOI: 10.1073/pnas.0812533106.
- 14) 加納剛史ら (2013) 第 25 回自律分散システムシンポジウム, 25-30.
- 15) Date, H., Takita, Y. (2007) IEEE/RSJ Int. Conf. Intel. Rob. Sys., San Diego, CA, 3554-3559. DOI: 10.1109/IROS.2007.4399635.
- 16) Transeth, A. A. *et al.* (2008) IEEE Trans. Robot. **24**, 88-104. DOI: 10.1109/TRO.2007.914849.
- 17) Bayraktaroglu, Z. Y. (2009) Mech. Mach. Theor. **44**, 591-602. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2008.08.009.
- 18) Travers, M. *et al.* (2018) Int. J. Rob. Res. **37**, 1253-1268. DOI: 10.1177/0278364918761569.

加納剛史

加納剛史 (かのう たけし)

東北大学電気通信研究所准教授
2008 年大阪大学大学院生命機能研究科博士課程修了。博士 (理学)。同年、同大学特任研究員。2009 年東北大学助教 (大学院医学系研究科)。2011 年東北大学電気通信研究所助教。2016 年同准教授、現在に至る。

研究内容: 非線形科学, 現象数理学
連絡先: 〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2 丁目 1-1 東北大学電気通信研究所本館
E-mail: tkano@riec.tohoku.ac.jp
URL: <http://www.cmplx.riec.tohoku.ac.jp/jp/>

石黒章夫

石黒章夫 (いしぐろ あきお)

東北大学電気通信研究所教授
1991 年名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程修了。工学博士。同年、同大学助手。1997 年同大学大学院工学研究科助教授。2006 年東北大学工学研究科教授。2011 年東北大学電気通信研究所教授、現在に至る。この間、チューリッヒ大学客員教授。

研究内容: 生物規範型ロボティクス, 数理生物システム論
連絡先: 同上
E-mail: ishiguro@riec.tohoku.ac.jp
URL: 同上