

令和 3 年 7 月 30 日

報道機関 各位

東北大学電気通信研究所
スイス連邦工科大学ローザンヌ校
Human Frontier Science Program

トカゲなどが示す原始的な歩行運動から紐解く 全身運動の制御のからくり

【研究のポイント】

- ・トカゲなどが示す全身を活用した歩行運動に潜むシンプルな制御メカニズムを解明
- ・世界で初めて、トカゲなどが示す移動速度に応じた歩行パターンの変化を再現
- ・各身体部位からの感覚フィードバック*1 が全身運動生成の鍵

【概要】

トカゲなどが示す体幹の屈曲を伴う歩行(図1, 以下、トカゲ様歩行と呼ぶ)は、現存する四肢動物の共通祖先も示していたことから[参考文献 1], 動物の運動制御の根源的なメカニズムを探る上で鍵となる振る舞いです。

東北大学電気通信研究所の石黒章夫教授, 加納剛史准教授, 鈴木朱羅氏(博士後期課程, 日本学術振興会特別研究員, 当時), スイス連邦工科大学ローザンヌ校の Auke J. Ijspeert 教授の研究グループは, このトカゲ様歩行に着目し, 全身運動を生み出す制御のメカニズムを解明しました。

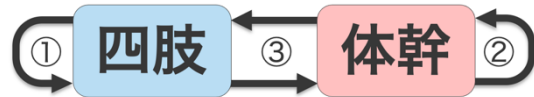
本研究では, トカゲ様歩行が「四肢と体幹がお互いの動きを補助するように動作する」という非常にシンプルな制御のルール(図 2)から生成されることをシミュレーション上で明らかにしました。さらに, 世界で初めて, 移動速度に応じたトカゲ様歩行のパターンの変化を再現することに成功しました。本成果は, 四肢動物が全身の動きを巧みに操るメカニズムの解明, さらには, 全身を活用して高い運動能力を発揮するロボットの実現にもつながると期待されます。

本研究成果は, 2021 年 7 月 30 日(日本時間 14 時 00 分)に国際学術誌 Frontiers in Neurorobotics にオンライン掲載されました。

<参考図> ※ 最終ページに動画 URL 案内あり



図 1:トカゲなどが示す体幹のくねりを伴う歩行運動(トカゲ様歩行)の様子。四肢と体幹の運動を適切に組み合わせることで大きな歩幅をとることができる。



- ① 四肢の協調運動を生み出す制御
- ② 体幹の協調運動を生み出す制御
- ③ 四肢と体幹の協調運動を生み出す制御

図 2:本研究で提案する制御のメカニズム。3 種類の非常にシンプルな制御の組み合わせによってトカゲ様歩行が生成される。

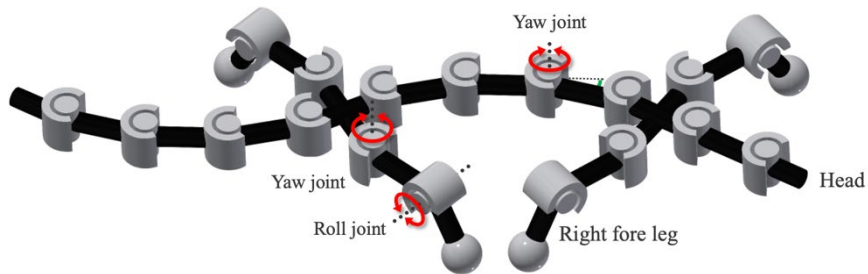


図 3:シミュレーションで使用したロボット。10 個の関節を持つ体幹部に 2 個の関節を有する脚部が接続された構造になっている。

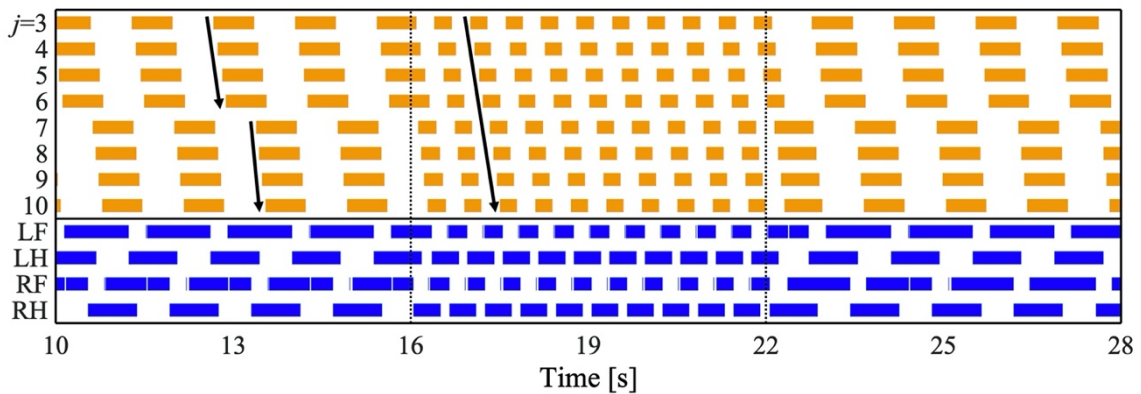


図 4:移動速度に応じた四肢と体幹の運動の変化:オレンジの着色部分は頭から j 番目の体幹関節が右に曲がっている期間,ブルーの着色部分は各脚(左前:LF, 左後:LH, 右前:RF, 右後:RH)の接地期間を示す。時刻 16-22[s]では高速歩行,それ以外の時刻では低速歩行をしている。高速歩行時は,体幹部のくねりは前方から後方にかけて波をつくるように屈曲し,足の運びは斜向かいの脚が同期して接地する。低速歩行時は,体幹部のくねりは胴体部($j=3-6$)と尾部($j=7-10$)が交互に屈曲し,足の運びは右後,右前,左後,左前の順に接地する。この移動速度に応じた振る舞いの変化はトカゲやサンショウウオで観察されている振る舞いと一致している。

【研究の背景】

地球上には多種多様な四肢動物が存在します。彼らは、身体の構造も棲む場所も違いますが、ある共通する特徴を持っています。それは、四本の脚だけでなく、頭部や尾部、胴体部なども含めた全身の運動を活用して動きまわることです。この四肢動物に共通する全身運動を生み出すメカニズムを明らかにすることができれば、動物の優れた運動能力に関する生物学的理解を深めるのみならず、自然環境を自在に振る舞う生き生きとしたロボットの制御方策として工学への応用も期待できます。

全身運動の制御原理の解明において、トカゲなどが示す体幹のくねりを活用した歩行運動(図 1, 以下、トカゲ様歩行と呼ぶ)はとても興味深い振る舞いです。まず、トカゲ様歩行は移動速度などの条件によって四肢や体幹の動きが変化します。そのため、この振る舞いの背後には、状況に応じて生成する全身運動を柔軟に変化させるメカニズムが存在すると考えられます。そして、トカゲ様歩行を示す生物の神経回路は、イヌやネコなどの哺乳類の神経回路に比べてシンプルな構造であること[参考文献 2]から、トカゲ様歩行は、他の四肢動物の振る舞いに比べシンプルな運動制御メカニズムによって実現されていると考えられます。さらに興味深いことに、トカゲ様歩行は現存する四肢動物に共通する祖先である原始的な四肢動物も用いていたことが足跡化石などから明らかになっており[参考文献 1]、この振る舞いには、四肢動物に通底する運動制御のエッセンスが内在していると考えられます。これらのことから、全身運動制御の解明における、トカゲ様歩行の重要性が示唆されてきたものの、どのような制御のからくりでトカゲ様歩行が実現されているのかはこれまで明らかではありませんでした。

【研究の方法】

本研究では、シミュレーション上で動物の動きを再現することで、そのメカニズムを明らかにするというアプローチを採用しました。このアプローチの利点として、神経の働きや身体の動きに関する情報の計測が容易であること、さまざまな実験条件下で再現性のある結果を得られることが挙げられます。これらの利点から、トカゲ様歩行のような全身の運動を活用する複雑な振る舞いにおいても、どの神経回路や身体の構造が重要な役割を果たしているのか明らかにすることができます。

具体的な研究の流れは、ロボットに制御則を実装し、その振る舞いを確認するというものです。本ロボットは 10 個の関節を持つ体幹部に 2 個の関節を有する脚部が接続された構造になっています(図 3)。制御則は 3 種類の制御メカニズムに大分され、それぞれ「四肢の協調」、「体幹の協調」、「四肢と体幹の協調」を担います(図 2)。各メカニズムの働きは、「四肢の協調制御」:脚に荷重がかかっている間は、その脚はそのまま身体を支持し続ける、「体幹の協調制御」:各関節角度は前方の関節角度を追従する、「四肢と体幹の協調」:お互いの動きに応じて歩幅がより大きくなるよう動作する、となっています。

【成果の内容】

シミュレーション実験の結果、安定したトカゲ様歩行の発現を確認しました(図 4)。さらに、移動速度や身体構造などのパラメータに応じて、四肢と体幹の運動が変化することが明らかになりました。これらの歩行パターンの変化は実際の動物の振る舞いとおおむね合致することが確認されており、提案制御則の妥当性を裏付けるものとなっています。

【研究の意義】

生物学意義:

四肢動物は身体が持つ膨大な数の筋肉を巧みに協調させることで全身の運動を生み出しています。その複雑さゆえに、それぞれの筋肉や神経回路の働きを逐一調べるような従来の生物学的アプローチでは、全身運動制御の本質を掴みとることは困難でした。本成果は、動物の身体構造や神経構造を簡略化したシミュレーションを用いることで、トカゲ様歩行が非常にシンプルな制御メカニズムの組み合わせによって実現されていることを明らかにしました。本研究で得られた知見は、トカゲ様歩行のみならず、四肢動物に共通する全身運動制御のからくりの解明につながると期待されます。

ロボット工学における意義:

本研究は、脚同士の協調だけでなく、脚と体幹という異なる身体部位間の協調をシンプルな制御則で実現しています。そのため、動物のように複雑な形態を有するロボットをいかに巧みに制御し、うまく動作させることができるか、というロボティクスにおける大きな課題に対して新たな知見を提供することが期待されます。

【用語説明】

*1 **感覚フィードバック**: 触覚や圧覚などの感覚情報に基づいて運動を調整する仕組み。

【研究助成資金等】

Human Frontier Science Program, RGP0027/2017 (Auke J. Ijspeert, Akio Ishiguro, Emily M. Standen)

日本学術振興会 科学研究費補助金 特別研究員奨励費 20J10805 (研究代表者: 鈴木朱羅)

【掲載論文名】

“Spontaneous gait transitions of sprawling quadruped locomotion by sensory-driven body–limb coordination mechanisms”

Shura Suzuki, Takeshi Kano, Auke J. Ijspeert and Akio Ishiguro

Frontiers in Neurobotics 2021年7月30日(日本時間 14時)

【参考文献】

[1] J. A. Nyakatura, K. Melo, T. Horvat, K. Karakasiliotis, V. R. Allen, A. Andikfar, E. Andrada, P. Arnold, J. Lauströer, J. R. Hutchinson, M. S. Fisher, and A. J. Ijspeert. Reverse-engineering the locomotion of a stem amniote. *Nature*, 565(7739):351–355, 2019.

[2] A. Bicanski, D. Ryczko, J. Knuesel, N. Harischandra, V. Charrier, Ö. Ekeberg, J. M. Cabelguen, A. J. Ijspeert. Decoding the mechanisms of gait generation in salamanders by combining neurobiology, modeling and robotics. *Biol. Cybern.* 107, 545–564, 2013.

【動画 URL】 <https://youtu.be/tDwapZzV2Rs>

【問い合わせ先】

(研究に関すること)

東北大学電気通信研究所

教授 石黒章夫

TEL:022-217-5464

E-mail:ishiguro@riec.tohoku.ac.jp

(報道に関すること)

東北大学電気通信研究所総務係

TEL:022-217-5420

FAX:022-217-5426

E-mail:riec-somu@grp.tohoku.ac.jp