

令和 6 年度 未来研究ラボシステム 研究成果報告書

研究種目：新領域開拓研究 研究期間：令和 5 年 10 月 ～ 令和 8 年 9 月
研究課題名：構成論的ニューロメカニクスによる生物の歩行形成メカニズムの解明と応用
ラボ長
所属：大学院基礎工学研究科機能創成専攻生体工学領域
職位 教授 氏名：青井 伸也

研究成果：

(概要)

令和 6 年度は、次の 4 つの研究を実施した：1. ネコの適応的な歩行形成メカニズムの解明、2. ニホンザルの四足歩行から二足歩行への遷移メカニズムの解明、3. ヒト歩行の肢間協調・体幹-肢間協調メカニズムの解明、4. 微小重力環境における歩行走行遷移の変化メカニズムの解明。

(本文)

令和 6 年度は、生物の有する優れた歩行形成メカニズムの解明に向けて、数理モデルを用いた次の 4 つの研究を行ったので、それぞれ報告する。

1. ネコの適応的な歩行形成メカニズムの解明

昨年度に構築した数理モデルを改良して、ネコの神経筋骨格モデルを構築した（図 1 A）。CMA-ES と呼ばれる最適化手法を用いてモデルのパラメータを最適化した結果、一歩ごとに段差が変化する特殊な歩行環境でも、転倒することなく適応的に歩行を継続できた（図 1 B）。さらに、ヌルクラインを用いた動力学解析より、筋からの長さフィードバックと力フィードバックが適応的な歩行に重要な役割を持つことが明らかになった。6 月の欧州神経科学会議 (FENS Forum 2024, Vienna) に本研究費を利用して助教と M2 学生を帯同して参加し、研究内容を発表しただけでなく [6, 7]、現地で共同研究者らと直接議論したことがこの成果につながった。11 月の国内学会 [5] では最優秀発表賞も受賞し [9]、阪大 NICT 合同研究討論会でもこの成果を報告した [8]。現在論文投稿準備中である。

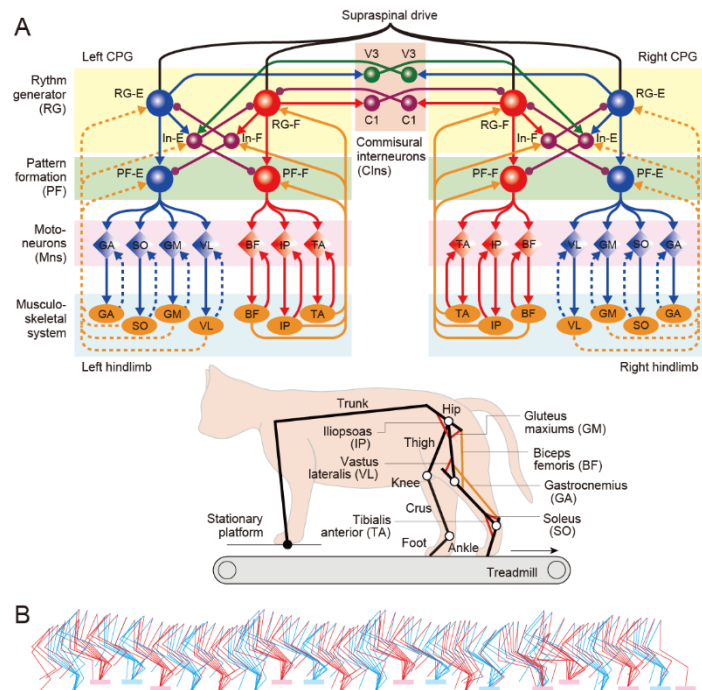


図1. ネコの神経筋骨格モデル(A. モデル, B. シミュレーション)

2. ニホンザルの四足歩行から二足歩行への遷移メカニズムの解明

ニホンザルは生来四足歩行する動物だが、訓練により安定した二足歩行を持続でき、ヒトの二

足歩行の進化を理解する格好のモデルとなっている。本研究では、これまでに構築していたニホンザルの神経筋骨格モデルを用いたシミュレーションより、四足歩行から二足歩行へ遷移する際の力学的特性を調べた。その結果、遷移する直前に足を大きく踏み出すことが重要であり[4]、倒立振子のような不安定な力学を上手く利用していることが示唆された。受賞もあり[10]、現在論文投稿準備中である。

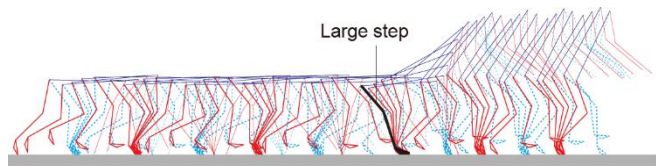


図2. ニホンザルの神経筋骨格モデルシミュレーション

3. ヒト歩行の肢間協調・体幹-肢間協調メカニズムの解明

ヒトは歩くときに左右の足を交互に前に出し、例えば歩幅を大きくして、リズムを早めて速度を上げたとしても、さらには走ったとしても、左右交互の関係性は変化しない。むしろ歩行中にこの関係性が崩れてしまうと、上手く歩くことが難しくなる。そのため、左右の足はきっちりと交互に前に出すように比較的厳密に制御されていると予想されていたが、歩行における複雑な身体運動のために、その実態は未解明だった。本研究では、左右の足を協調的に動かす肢間協調の制御様式を位相縮約理論に基づく位相振動子を用いてモデル化し、健常者の歩行中の計測データを用いたベイズ推定により推定した。その結果、これまでの予想に反して、左右の足の交互運動は、左右交互の関係から少しくらい外れても元に戻そうとするような制御は働いておらず、この関係性は必ずしも厳密には制御されていないことが明らかになった(図3)。この成果は Communications Biology に採録され[3]、プレスリリースも行った。また、歩行中には体幹も左右の足と連動して動くため、体幹-肢間協調も適応的な歩行に重要である。そこで同様の手法を用いてこの制御様式も推定したところ、体幹と左右の足の関係も必ずしも厳密には制御されていないことが明らかになった[2]。

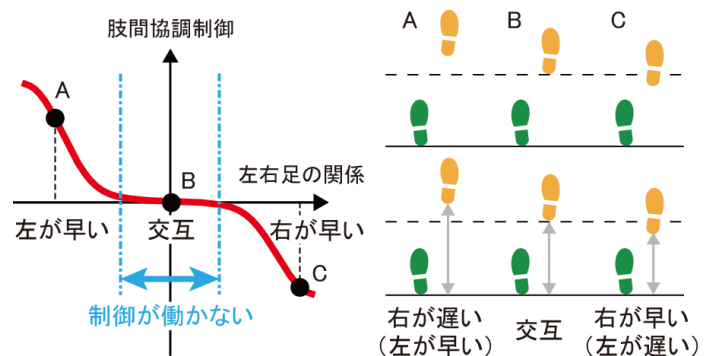


図3. ヒト歩行の肢間協調制御の推定

4. ヒトの微小環境における歩行走行遷移の変化メカニズムの解明

ヒトは速度に応じて歩行と走行を使い分ける。加速時の歩行から走行、減速時の走行から歩行に変化する速度が異なるヒステリシスが生じることが知られていたが、そのメカニズムは未解明であった。さらには、月面などの微小重力環境ではこのヒステリシスは生じず、速度変化に対して歩行と走行が滑らかにつながるということが知られており、このメカニズムも未解明であった。本研究では、質点と神経制御モデルに駆動されるバネからなるシンプルな数理モデルを用いて解析した結果、通常重力では共振に起因した2つのサドルノード分岐

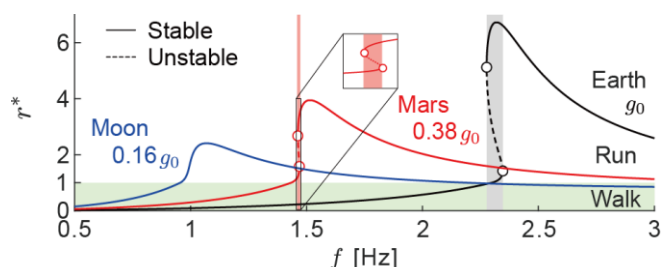


図4. 重力に応じた歩行走行遷移の変化

によりヒステリシスが生じ、重力の減少に応じて 2 つのサドルノード分岐が縮退するカスプカタストロフによってヒステリシスが消滅して、滑らかな歩容遷移となることが示された(図 4) [1]。

研究経費（R6 年度）の内訳：

備品費	消耗品費	旅費	謝金	その他	合計
0 円	12,595 円	1,437,405 円	0 円	0 円	1,450,000 円

共同研究者等：

(1) 共同研究者（氏名・所属）

Ilya A. Rybak・Drexel University College of Medicine

Simon M. Danner・Drexel University College of Medicine

(2) 研究協力者（氏名・所属・学年（学生の場合））

安部 祐一・機能創成専攻生体工学領域・助教

安達 真永・機能創成専攻生体工学領域・招へい研究員

富田 望・機能創成専攻生体工学領域・特任研究員

大島 裕子・機能創成専攻生体工学領域・特任研究員

篠原 晃大・機能創成専攻生体工学領域・M2

西崎 航紀・機能創成専攻生体工学領域・M2

発表論文等（令和 7 年 3 月 31 日現在）：

〔雑誌論文〕

1. M. Adachi, K. Tsuchiya, and S. Aoi, Gravity-dependent walk-run transition via saddle-node bifurcation and cusp catastrophe, Physical Review Research, in press.
2. H. Furukawa, T. Arai, T. Funato, S. Aoi, and T. Aoyagi, Bayesian estimation of trunk-leg coordination during walking using phase oscillator models, Neuroscience Research, in press.
3. T. Arai, K. Ota, T. Funato, K. Tsuchiya, T. Aoyagi, and S. Aoi, Interlimb coordination is not strictly controlled during walking, Communications Biology, 7:1152, 2024.

〔著書〕 特になし

〔学会発表〕

4. 西崎航紀, 安部祐一, 安達真永, 鈴木享, 日暮泰男, 大島裕子, 望月圭, 中隣克己, 青井伸也, ニホンザルが四足から二足歩行への遷移時に腰を下げる運動の神経筋骨格モデルを用いた機能的理解, 第 37 回自律分散システム・シンポジウム, 山口, 2025 年 1 月 15 日.
5. 篠原晃大, 安部祐一, Simon Danner, Shravan Tata Ramalingasetty, Andrew B. Lockhart,

Sergey N. Markin, Jessica Ausborn, Ilya A. Rybak, 青井伸也, ネコ後肢の足場の喪失に対する適応メカニズムの神経筋骨格モデルを用いた解析, システム・情報部門学術講演会 (SSI2024), 富山, 2024 年 11 月 15 日.

6. Y. Ambe, K. Shinohara, Y. Kim, S.M. Danner, S.T. Ramalingasetty, A.B. Lockhart, S.N. Markin, J. Ausborn, I.A. Rybak, and S. Aoi, The role of afferent feedback in adaptive interlimb coordination in cat locomotion, FENS Forum 2024, Vienna, Austria, June 29, 2024.
7. K. Shinohara, Y. Ambe, Y. Kim, S.M. Danner, S.T. Ramalingasetty, A.B. Lockhart, S.N. Markin, J. Ausborn, I.A. Rybak, and S. Aoi, Dynamic mechanism of adaptive interlimb coordination in cat locomotion, FENS Forum 2024, Vienna, Austria, June 29, 2024.

[その他]

8. 青井伸也, 神経筋骨格モデルを用いた動物の適応的な歩行形成メカニズムの解明, 第2回阪大 NICT 合同研究討論会, NICT 未来 ICT 研究所, 2024 年 11 月 26 日.
9. 篠原晃大, 安部祐一, Simon Danner, Shravan Tata Ramalingasetty, Andrew B. Lockhart, Sergey N. Markin, Jessica Ausborn, Ilya A. Rybak, 青井伸也, SSI 最優秀発表賞, システム・情報部門学術講演会 (SSI2024).
10. K. Nishizaki, Best Presenter Award, Bioengineering Colloquium 2024.

外部資金獲得状況・申請状況：

本研究の内容を発展させて、「起き上がり小法師の安定化原理に逆らう不安定性を利用した直立二足歩行の獲得」という題目で、基盤研究 (A) (2024-2027) に採択された。

参考となる HP 等：

研究室 HP : <https://mechbiosys.me.es.osaka-u.ac.jp/>