

# 令和5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（予定）

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5年度は、トレッドミル上で歩行するネコ後肢の神経筋骨格モデルを構築した。具体的には、剛体多リンク系からなる骨格モデルと関節トルクを形成する筋モデルを構築し、神経系として上位指令と感覚情報を統合する脊髄の中樞パターン生成器をモデル化した。ネコの計測データとの誤差に基づく最適化手法を用いてトレッドミル上での歩行シミュレーションを実施し、ネコの歩行の再現と外乱に対する適応的な歩行の実現に成功している。

(本文)

令和5年度は、適応的な歩行形成に寄与する感覚運動協調のメカニズムを明らかにするために、前肢が固定された状態でトレッドミル上を後肢のみで歩行するネコの後肢歩行 (Hiebert et al., 1994) を再現する数理モデルの構築を目標とした。具体的には、共同研究者らとこれまでに構築していたネコ後肢一脚の神経筋骨格モデル (Kim et al., 2022) を改良して、ネコ後肢二脚の神経筋骨格モデルを構築した (図1)。

この骨格系は、胴体と2本の後肢からなり、具体的には、胴体と大腿、下腿、足を表す7つの剛体リンクから構成される。前肢は胴体に固定され、その手先はトレッドミルより高い位置にある床に拘束されている。足先がトレッドミルに接地しているときは床反力を受ける。それぞれの後肢には歩行に主要な7つの筋を用いており、そのうち5つの筋 (IP, GM, VL, TA, SO) が単関節筋、残り2つの筋 (BF, GA) が二関節筋である。それぞれの筋では、張力-長さ関係や張力-速度関係による非線形性を有した筋活動に基づく収縮要素と、筋の粘弾性に基づく受動要素から筋張力が決定される。それぞれの関節まわりに寄与する筋の張力とその関節まわりのモーメントアームより関節トルクが決定

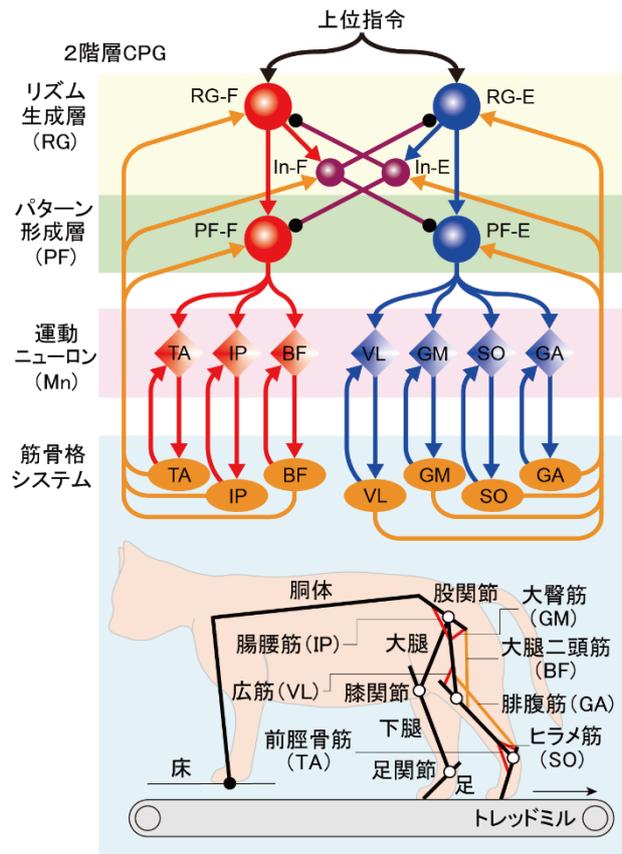


図1. ネコ後肢の神経筋骨格モデル

それぞれの筋では、張力-長さ関係や張力-速度関係による非線形性を有した筋活動に基づく収縮要素と、筋の粘弾性に基づく受動要素から筋張力が決定される。それぞれの関節まわりに寄与する筋の張力とその関節まわりのモーメントアームより関節トルクが決定

され、脚先のトレッドミルから床反力を受けて、このモデルの運動が形成される。

この神経系として、脊髄に存在して上位中枢からの指令と感覚情報を統合して運動ニューロンに投射される運動指令を形成する中枢パターン生成器 (Central Pattern Generator: CPG) をモデル化している。このモデルは、リズムを形成するリズム生成層 (Rhythm Generator: RG) と筋の活動を決定するパターン形成層 (Pattern Formation: PF) の2階層から構成され、それぞれ屈曲 (Flexor: F) と伸展 (Extensor: E) を司る一対のニューロンを有しており、介在ニューロン (Interneuron: In) を介して結合されている。それぞれのニューロンは、簡易型の Hodgkin-Huxley 方程式に従い、運動ニューロン (Motorneuron: Mn) に運動指令が伝達される。この指令によってそれぞれの筋が活性化され、骨格モデルの関節が駆動されることで運動が形成される。そして、筋の長さや収縮速度、筋張力などの感覚情報がそれぞれのニューロンにフィードバックされて、運動指令が調整される。

この数理モデルの妥当性を検証するために、トレッドミル上における歩行シミュレーションを実施した。具体的には、シミュレーション結果とネコの歩行計測データ (Prilutsky et al., 2016) との誤差を評価関数とした粒子群最適化を用いて神経系のパラメータを最適化し、ネコの歩行を再現した (図2)。この最適化されたパラメータを用いることで、トレッドミル上の外乱に対する適応的な歩行も実現された。これらの成果は、令和6年度に開催される欧州神経科学会議 (FENS2024) において発表する予定である。今後はこのモデルを用いて、適応的な歩行を形成する運動系と感覚系の協調メカニズムを解析していく予定である。

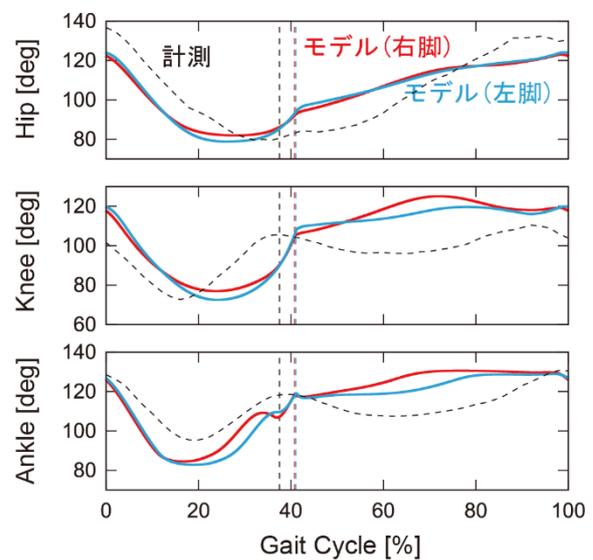


図2. 歩行シミュレーションの結果

研究経費 (R5 年度) の内訳 :

備品費	消耗品費	旅費	謝金	その他	合計
0 円	0 円	31,550 円	862,450 円	6,000 円	900,000 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・特任研究員

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

**発表論文等（令和6年3月31日現在）：**

〔雑誌論文〕 特になし

〔著書〕 特になし

〔学会発表〕 特になし

〔その他〕 特になし

**外部資金獲得状況・申請状況：**

公益財団法人日立財団 倉田奨励金に採択（令和6年～7年）。

**参考となるHP等：**

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