

奨励金No.1585

筋シナジー制御を用いた神経筋骨格モデルによる歩行におけるフラクタル性を有するゆらぎの形成と変化の解明

青井 伸也
大阪大学 教授

Elucidating the mechanism of generation and change of fractal fluctuation during walking using neuromusculoskeletal model with muscle synergy control

Shinya Aoi
The University of Osaka, Professor



歩行におけるストライド時間のゆらぎに持続性相関が見られ、加齢や脳疾患によって無相関なものに変化するメカニズムは未解明である。この解明に向けて、解剖学的に詳細な筋骨格モデルと筋シナジーと姿勢制御に基づく神経制御モデルを統合した神経筋骨格モデルを用いて、歩行におけるストライド時間のゆらぎについて調べた。その結果、歩行におけるゆらぎは制御ゲインが小さいと若年健常者に近く、制御ゲインが大きいと高齢者や脳疾患患者に近い特徴を示すことが明らかとなった。

The mechanism by which stride interval fluctuations during human walking exhibit statistical persistence and change to become uncorrelated with aging or neurological disorders remains unclear. To address this issue, we investigated stride interval fluctuations using a neuromusculoskeletal model that integrates an anatomically detailed musculoskeletal model with a motor control model based on muscle synergy and posture control. The results showed that while low control gains produce stride interval fluctuations similar to those observed in healthy young adults, high control gains produce fluctuations similar to those observed in elderly people and individuals with neurological disorders.

1. 研究内容

1.1 はじめに

ヒトの歩行は必ずしも定常ではなく、微小にゆらいでいる。特にストライド時間には持続性相関と呼ばれるフラクタル性を持つゆらぎが見られることが知られており（Hausdorff et al., J Appl Physiol, 1995）、これは $1/f$ ゆらぎとも呼ばれる。このようなゆらぎは、運動機能の健常性を特徴づけており、加齢や脳疾患などによって、ゆらぎが無相関なものへ変化することも報告されている（Goldberger et al., PNAS, 2002）。しかしながら、健常者のスト

ライド時間のゆらぎに持続性相関が見られ、加齢や脳疾患などによってその性質が変化するメカニズムは未だ不明確である。

ヒトの歩行とは、脳・身体・環境との相互作用から形成される複雑な力学現象であり、計測のみから歩行のメカニズムを理解するには限界がある。そこで、数理モデルを用いたアプローチが注目されており、これまでコンパス型のシンプルな骨格系の数理モデルと位相振動子を用いたシンプルな神経制御系の数理モデルを用い、感覚フィードバックの違いに応じて、健常者と高齢者・脳疾患患者

に見られるゆらぎの違いを再現していた（Okamoto et al., Front Neural Circuits, 2022）。しかしながら、歩行とは冗長で複雑な筋骨格系を神経系が巧みに制御することで形成されるものであり、このシンプルな骨格系と神経系の数理モデルから、フラクタル性を有するゆらぎが形成され、その変化を引き起こすメカニズムを解明するには限界があった。そこで本研究では、動物の運動制御における冗長性の問題を解決する戦略として示唆されている筋シナジーに着目し（Dominici et al., Science, 2011）、解剖学的に詳細な筋骨格モデルと神経生理学的に詳細な神経制御モデルを統合したヒトの神経筋骨格モデルを用いて、歩行におけるストライド時間のゆらぎについて調べた。

1.2 方法

1.2.1 神経筋骨格モデル

図 1A に筋骨格モデルを示す。骨格モデルとして、頭部・上肢を含んだ上体と、大腿・下腿・足の 3 節からなる左右両脚の合計 7 節から構成される 2 次元直鎖型剛体リンク系を用いた。筋モデルとしては、片脚に対して歩行生成に主要な 1 関節筋と 2 関節筋を含む 9 つの筋を用いた。それぞれの筋は、収縮部と並列弾性・粘性部からなり、収縮部は筋の張力-長さ、張力-速度関係など筋に特有の非線形特性を考慮した。収縮部の生成する筋

張力を決定する筋活性度は、次の神経制御モデルにおいて構成される運動指令により 2 次のローパスフィルタを介して生成した。

神経制御モデルは、脊髄レベルの肢運動制御と位相リセット、そして脳幹・小脳レベルの姿勢制御から構成した。肢運動制御は、歩行の基本となるリズム情報を生成するリズム発生部と、このリズム情報をもとに運動指令の時空間パターンを形成するパターン形成部の 2 階層から構成される生理学的な CPG モデル（Rybak et al., J Physiol, 2006）に基づいて構築した。特に、リズム発生部をシンプルな位相振動子を用いてモデル化し、パターン形成部を筋シナジーに基づいてモデル化した。具体的には、リズム発生部の振動子の位相に応じて 5 つの矩形波を生成し、その線形和としてフィードフォワード的に運動指令を生成した（図 1B）。位相リセットは、接地情報に基づいて振動子の位相を制御することで、矩形波の発火タイミングをフィードバック的に制御した。姿勢制御は、時間遅れを有する体性感覚情報に基づいて、姿勢をフィードバック的に制御する運動指令を生成した（図 1C）。特に、体幹の傾きと移動速度に着目し、体幹角度は支持脚の股関節周りの筋（IL、GM）を用いた PD 制御、移動速度は足関節周りの筋（TA、SO）を用いた P 制御を行った。

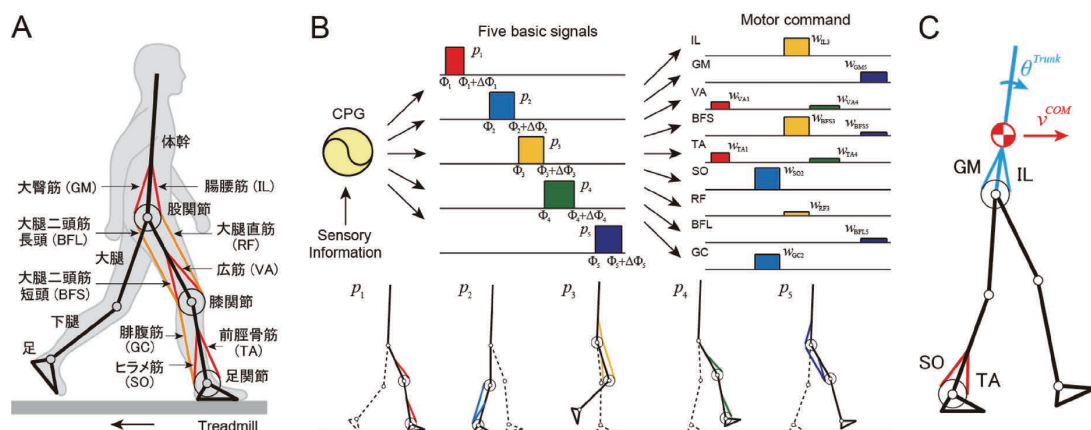


図 1. ヒトの神経筋骨格モデル (A. 筋骨格モデル、B. 筋シナジーモデル、C. 姿勢制御モデル)

1.2.2 シミュレーション方法

歩行におけるストライド時間のゆらぎに見られる特性を調べるために、6つの関節それぞれに同一のホワイトガウスノイズを加え、オイラー丸山法を用いて神経筋骨格モデルの支配方程式を数値的に解いた。そして、トレンド除去変動解析を用いてストライド時間のスケール指数 α を計算し、ゆらぎの相関関係を調べた。このとき、 $\alpha=0.5$ の場合にはゆらぎが無相関（ホワイトノイズ）であり、 $\alpha>0.5$ の場合は持続性相関、 $\alpha<0.5$ の場合は反持続性相関であることを意味する。特に、若年健常者と高齢者・脳疾患患者の違いを明らかにするために、速度制御に関わるゲインパラメータに4つの値（ $K_1<K_2<K_3<K_4$ ）を用いて、その違いを調べた。

1.3 結果

図2A、Bに、制御ゲインに対するストライド時間の履歴とスケール指数 α の結果を示す。これらの図より、制御ゲインに応じてストライド時間のゆらぎが変化していることがわかる。特に、制御ゲインが大きくなるにつれて、 α が1近くから0.5近くまで減少しており、若年健常者のなゆらぎから、高齢者・脳疾患患者的なゆらぎに変化していることがわかる。

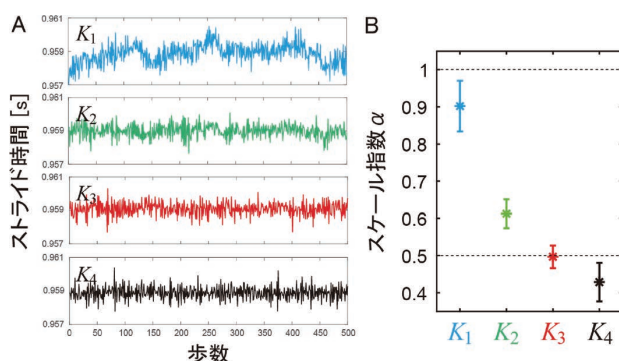


図2. 制御ゲインに応じた歩行ストライド時間のゆらぎの変化（A. ストライド時間、B. スケール指数 α ）

1.4 考察

若年健常者の方が、高齢者や脳疾患患者よりも安定に歩行しているように見受けられる。一般的に、制御においてゲインが大きい方が安定化できるため、若年健常者の方が、高齢者や脳疾患患者よりも歩行における制御ゲインが大きいと予想される。しかしながら、本研究の結果、歩行におけるゆらぎに関しては、むしろ制御ゲインが小さい方が若年健常者に近い特徴を示すことが明らかとなった。近年、歩行における左右交互の運動を調整する肢間協調の制御において、若年健常者は転倒リスクの低い通常の歩行時には過度に安定化するような大きな制御ゲインは用いず、むしろゆらぎを許容するような小さい制御ゲイン、あるいは制御をほとんど行わないような方策をとっていることを明らかにしている（Arai et al., Commun Biol, 2024）。すなわち、若年健常者はエネルギー効率や柔軟な運動制御の観点から制御ゲインは小さくして、一方で高齢者や脳疾患患者は転倒リスクを低減するために、制御ゲインを大きくしている可能性がある。数理モデルや計測データの解析を進めて、こうした制御戦略の違いやその背景にあるメカニズムをより詳細に明らかにしていきたい。

2. 発表（研究成果の発表）

- ・鈴木拓歩、岡本耕太、安部祐一、青井伸也、“神経筋骨格モデルを用いたストライド時間に見られる持続性相関の位相応答曲線に基づく解析”、第68回システム制御情報学会研究発表講演会、大阪工業大学梅田キャンパス、pp. 1231-1236、2024.
- ・青井伸也、“歩くとは？—不安定性から読み解く歩行の原理—”、NU7、No. 56、pp. 1-9、2024.
- ・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, 2024.

・ 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, 2024.

・ 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、富山県民会館、pp. 191-194、2024.