

優れた環境適応能力を示す脚ロボットの開発

Development of a legged robot that has a high environmental adaptability

京都大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻 講師 青井 伸也

Department of Aeronautics and Astronautics, Kyoto University, Shinya Aoi

要旨

未知で複雑な環境でも頑健に移動する能力を持つロボットの開発が求められている。近年、多様な環境でも優れた移動能力を示す生物の歩行に注目が集まり、生物のような脚構造を用いた脚ロボットの開発が盛んに行われている。本研究では、四本の脚を持つ四脚ロボットを対象に、神経生理学的な知見を参考にしたシンプルな歩行制御系を用い、左右平行に配置された二つのベルトを持つ左右分離型トレッドミル上での歩行実験を行った。特に、トレッドミルにおける左右のベルト速度を変化させ、制御系とロボットの機構力学系、そして環境との力学的な相互作用を通して、環境変化に対して適応的な歩行が実現されることを確認した。

1. はじめに

被災地や原発事故現場など人の立ち入り困難な場所で作業するロボットの開発が求められているが、瓦礫や段差などの過酷な環境のため、その実現は未だ困難である。近年、多様な環境で優れた適応能力を示す生物の歩行に注目が集まり、脚ロボットの開発が盛んに行われている。ただし生物の歩行とは、脳・身体・環境の相互作用から形成される複雑な力学現象であり、身体や環境との相互作用を介した脳機能を理解して、ロボットの制御系を構築することが不可欠である。

これまで、ヒトや動物の環境変化に対する歩行適応メカニズムを理解するために、左右分離型トレッドミルという特殊な装置が用いられている[1, 2, 3]。このトレッドミルは、左右平行に配置された二つのベルトを持ち、それぞれの速度を独立に制御することができるため、左右対称・非対称な歩行環境を作り出すことができる。そして、左右対称な状態 (Tied 状態) と非対称な状態 (Split-belt 状態) を切り替え、ヒトや動物がどのように適応す

るのが調べられており、特に環境の変化に応じて歩行中の肢間の協調関係が変化することが知られている。

本研究では、四脚ロボットを対象に、神経生理学的な知見を参考にしたシンプルな歩行制御系を用い、左右分離型トレッドミル上での歩行実験を行った。特に、トレッドミルにおける左右のベルト速度を変化させ、制御系とロボットの機構力学系、そして環境との力学的な相互作用を通して、環境変化に対して適応的な歩行が実現されることを確認した。

2. 実験方法

図 1 に本研究で用いた四脚ロボットと左右分離型トレッドミルを示す。ロボットは、一つの胴体と四本の脚から構成され、このトレッドミル上を歩行する。各脚は二リンクから構成され、ピッチ方向に回転自由度を有する関節を介して結合されている。それぞれの関節はモータによって駆動され、脚先に接地センサを持つ。

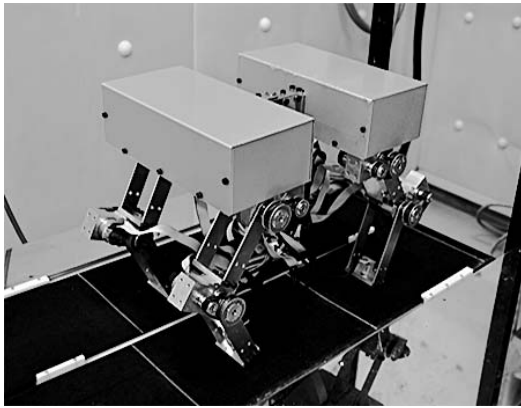


図1 四脚ロボットと左右分離型
トレッドミル

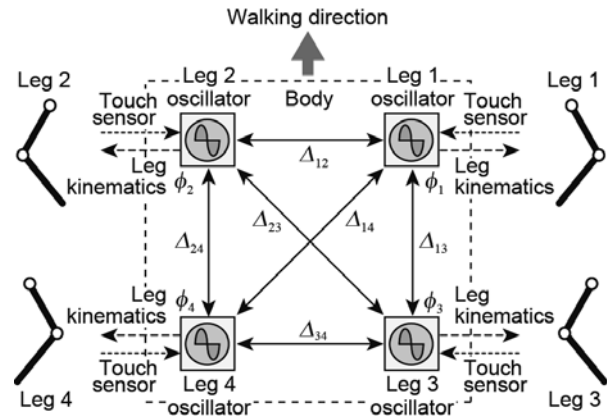


図2 歩行制御系

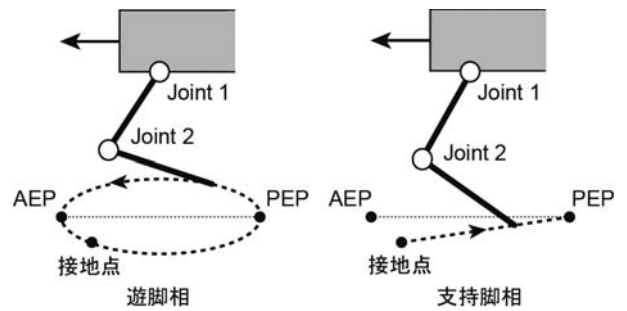


図3 脚の軌道

歩行制御系は、我々の先行研究[4]で構築したものをを用いた(図2)。この制御系は、神経生理学的な Central Pattern Generator (CPG) や接地タイミングに依存した位相リセットに基づいて、非線形振動子を用いて構成されている。それぞれの脚毎に位相振動子 ϕ_i ($i = 1, \dots, 4$) を配置し、位相情報に基づいて図3のように脚先の運動が計画されている。この軌道は、楕円軌道からなる遊脚期と接地点からの直線軌道からなる支持脚期から構成され、接地情報に従って切り替えられる。また、位相振動子は次の微分方程式に従う。

$$\dot{\phi}_i = \omega - \sum_{j=0}^4 K_{ij} \sin(\Delta_{ij} - \hat{\Delta}_{ij}) + (\hat{\phi} - \phi_i)(t - t_i)$$

ここで、 ω は基準となる歩行周波数である。 $\Delta_{ij} = \phi_i - \phi_j$ が振動子間の位相差を表し、それぞれの脚の運動が位相 ϕ_i で記述されているため、この位相差がロボットの歩容を決めることになる。右辺第2項は、 K_{ij} をゲインパラメータとして位相差を基準値 $\hat{\Delta}_{ij}$ に安定化させる効果を持つ。第3項が位相リセットに対応し、脚 i が接地した時刻 t_i に位相を基準値 $\hat{\phi}_i$ にリセットする。

制御パラメータとして、 $\hat{\Delta}_{12} = \hat{\Delta}_{34} = \pi$ 、 $\hat{\Delta}_{13} = \hat{\Delta}_{24} = 0$ を用いて、ペース歩容を基準とした。更に、 $K_{12} = K_{34} = K_{13} = K_{24} = 2$ として、位相リセットの効果で振動子間の位相差が変化し得るように、なるべく小さい値を用いた。また、その他の K_{ij} は0とした。歩行環境として、トレッドミルの左右のベルト速度は、9.2 s までは Tied 状態 (5.4 cm/s) として、9.2 s 以降に左右のベルトの速度比が5倍となる Split-belt 状態 (2.7 cm/s, 13.5 cm/s) に切り替えた。ただし、この環境変化に対して制御パラメータなどの制御系は全く変えず、環境変化の前後で四肢の位相関係がどのように変化するかを調べた。

3. 実験結果

歩行実験の結果、左右のベルトの速度比が5倍もあるにも関わらず、Tied 状態から Split-belt 状態に切り替えてもロボットは転倒することなく、トレッドミル上で歩行を継続した。図 4A、B に、その時の左右位相差 Δ_{12} と Δ_{34} 、前後位相差 Δ_{13} と Δ_{24} の結果を示す。ただし、歩行周期 T に対して、周期平均 $(\frac{1}{T} \int_T \Delta_{ij} dt)$ したものを示している。

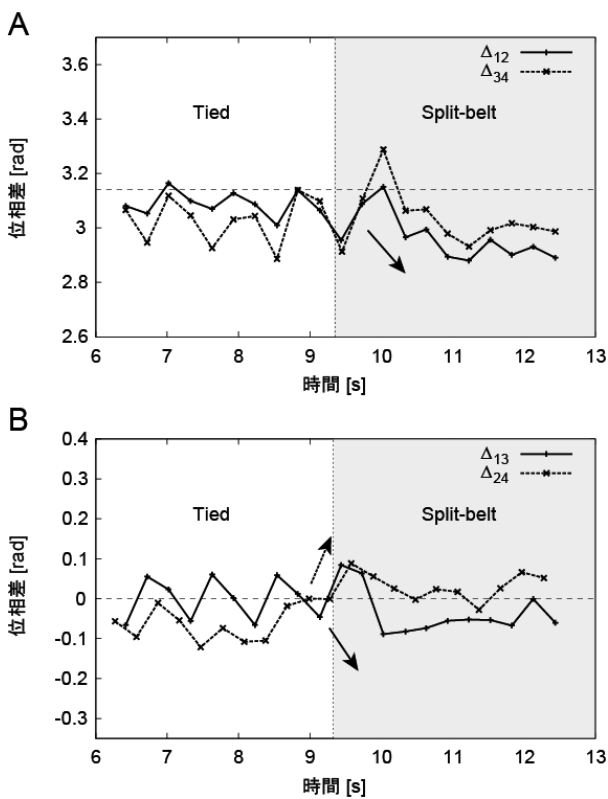


図 4 Tied 状態から Split-belt 状態への変化に対する位相差の変化。A：左右位相差 Δ_{12} と Δ_{34} 、B：前後位相差 Δ_{13} と Δ_{24}

この図より、 Δ_{12} に関しては、Tied 状態ではほぼ逆位相であったものが、Split-belt 状態に切り替えると減少している様子が確認できる。また、 Δ_{34} に関しては、Tied 状態と Split-belt 状態でそれほど違いがないことが確認できる。 Δ_{13} に関しては、Tied 状態ではほ

ぼ同位相であったものが、Split-belt 状態に切り替えると減少している様子が確認できる。更に、 Δ_{24} に関しては、Tied 状態ではほぼ同位相であったものが、Split-belt 状態に切り替えると増加している様子が確認できる。すなわち、歩行環境に応じて、四肢の位相関係が変化していることが確認できる。具体的には、Tied 状態では左右で前後の脚が同期していたペース歩容から、Split-belt 状態に切り替えると、全ての脚の同期が外れたウォーク歩容に変化していることが確認できる。

更に、これらの変化をより明確にするために、環境変化前後におけるそれぞれ 9 周期分のデータを用いて、t 検定より位相差の変化を統計的に調べた。図 5 にその結果を示す。 Δ_{34} に関しては、有意な差は見られないものの、 Δ_{12} と Δ_{13} 、 Δ_{24} に関しては、環境変化の前後で有意な差が見られることが確認できる (Δ_{12} : $p=0.0056$, Δ_{13} : $p=0.0036$, Δ_{24} : $p=0.0013$, Δ_{34} : $p=0.82$)。

このような歩容の変化を引き起こした力学的要因を考えると、速度の速いベルト上にある支持脚は、速度の遅いベルトよりもより強く後方に引っ張られるため、前方に倒れやすくなり、その左右逆側の遅いベルト側の脚で早く接地が起こる。また、前肢と後肢で傾きによる接地タイミングが変化するので、遅いベルト側の前肢で最も早く接地が起こる。逆に、速いベルト側の前肢で最も接地が遅れてくる。このような時間的な非対称性が、肢間の空間的非対称性を生み出したと考えられる。このような歩容の変化はあらかじめ設計していたものではなく、制御系とロボットの機構力学系、そして環境との力学的な相互作用を介して自己組織的に発現したものである。

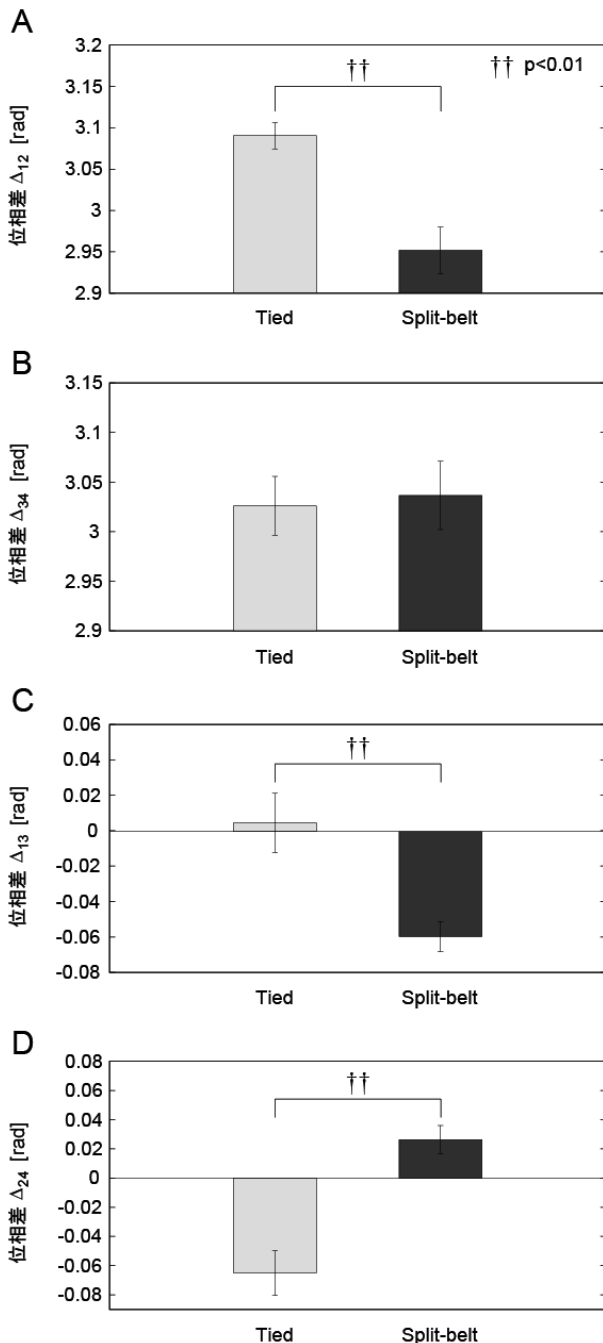


図5 環境変化前後における位相差の変化 (平均値と標準誤差)。A : Δ_{12} 、B : Δ_{34} 、C : Δ_{13} 、D : Δ_{24}

4. まとめ

本研究では、四脚ロボットを対象に、左右分離型トレッドミル歩行実験を行い、環境変化に対して、適応的な歩行を実現できることを確認した。その際、左右対称な Tied 状態で

は、ペース歩容が安定に実現し、左右非対称な Split-belt 状態に切り替わると、ロボットの機構系、振動子制御系、環境の力学的な相互作用の結果として、肢間の位相関係が変化し、新たな歩容に変化した。今後は、左右分離型トレッドミルだけでなく、様々な環境に対して、優れた環境適応能力を有する脚ロボットの開発を目指した研究を行っていく。

謝辞

本研究を援助していただいた公益財団法人京都技術科学センターに厚く感謝いたします。

参考文献

- [1] D.S. Reisman, H.J. Block, and A.J. Bastian, Interlimb coordination during locomotion: What can be adapted and stored?, *J. Neurophysiol.*, 94:2403-2415, 2005.
- [2] A. Frigon, M.F. Hurteau, Y. Thibaudier, H. Leblond, A. Telonio, and G. D'Angelo, Split-belt walking alters the relationship between locomotor phases and cycle duration across speeds in intact and chronic spinalized adult cats, *J. Neurosci.*, 33(19):8559-8566, 2013.
- [3] D. Yanagihara and I. Kondo, Nitric oxide plays a key role in adaptive control of locomotion in cat, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 93:13292-13297, 1996.
- [4] S. Aoi, D. Katayama, S. Fujiki, N. Tomita, T. Funato, T. Yamashita, K. Senda, and K. Tsuchiya, A stability-based mechanism for hysteresis in the walk-trot transition in quadruped locomotion, *J. R. Soc. Interface*, 10(81):20120908, 2013.

研究成果発表

1) S. Aoi, S. Fujiki, D. Yanagihara, T. Funato, and K. Tsuchiya, Adaptive split-belt treadmill walking of musculoskeletal models and legged robots by reflex and learning, the 8th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM2017), 2017.

2) S. Aoi, P. Manoonpong, Y. Ambe, F. Matsuno, and F. Wörgötter, Adaptive control strategies for interlimb coordination in legged robots: A review, *Front. Neurobot.*, 11:39, 2017.