

仮想空間上の四脚歩行モデルに対するパッシブジョイントによる柔軟な身体性の拡張がゲームパッド操縦性に与える効果検証

Verification of the effect of extending flexible physicality with passive joints to a quadruped walking model in virtual space on gamepad controllability

城宝 一司¹⁾ 小川 純¹⁾
Kazushi Joho Jun Ogawa

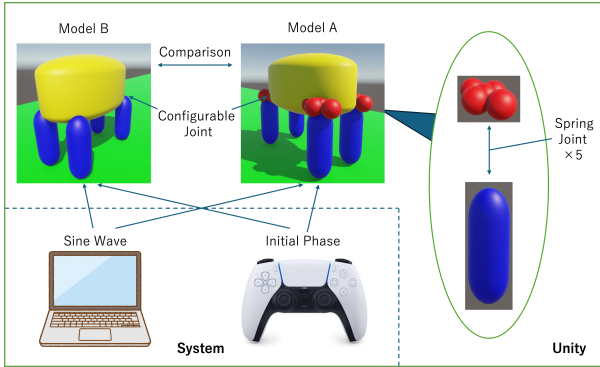


図1 四脚歩行モデル比較検証の概念図

1 はじめに

ロボティクスにおいて、身体の柔軟性は外部からの力の変動を受動的に緩衝・吸収することで、姿勢の乱れや制御の負荷を軽減し、安定した運動を実現することに寄与することが明らかにされてきている [1, 2]. こうした柔軟性が生み出す身体の受動的適応特性を活用した歩行ロボットの開発が仮想・実機ともに進められており、とくに四脚歩行ロボットでは多様なアプローチが提案されている [3]. たとえば、地形テンプレートに基づく学習手法 [4], パッシブ柔軟構造による高ダイナミクス歩行 [5], 深層強化学習による自律的歩行獲得 [6], および非線形最適化に基づく運動生成 [7] などが挙げられる. さらに、効率性と機動性を両立させた設計例として、MIT Cheetah ロボットによる高効率な四脚構造の提案 [8] や、これらの技術を統合した四足ロボット ANYmal による実地検証も進んでいる [9].

一方で、柔軟構造の導入が操縦性や歩行安定性に与える具体的な影響については、依然として体系的な知見の蓄積が十分とはいえない. 特に、受動的な柔軟性が歩行挙動にどのようなメリットや課題をもたらすのかは、今後の設計指針を検討する上で重要な論点となる.

本研究では、図1に示すようにUnity上に構築した四脚歩行ロボットにパッシブな柔軟性 (SpringJoint) を付与し、その有無が操縦性・歩行安定性に及ぼす影響を検証する. PS5 コントローラーによって脚ごとの初期角度を個別設定し、位相の異なるサイン波で歩行動作を生成することで柔軟性の方向に対する寄与を評価する. 本稿では、移動距離と体高変化を指標として、柔軟構造の有無による挙動特性を比較し、今後の設計への示唆を得ることを目的とする.

2 パッシブジョイントによる柔軟性評価実験

本章では、受動的柔軟性が四脚歩行ロボットの操縦性および安定性に及ぼす影響を検証するため、Unity上に

1) 山形大学 Yamagata University

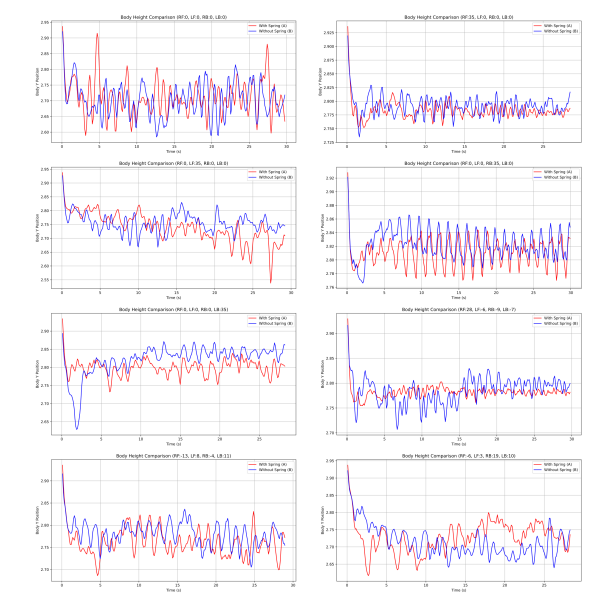


図2 体高の比較グラフ

構築した仮想環境において評価実験を実施した.

ロボットモデルは、各脚が1自由度 (X軸回転) を持ち、ConfigurableJointを用いて関節駆動を実装した. 駆動トルクはJointDriveにより制御され、弾性・粘性特性を設定し、仮想的なバネ付き関節を再現している.

比較対象として、以下の2種類のモデルを準備した. モデルAはJointDriveによる弾性駆動に加え、脚部リンク間にSpringJointを配置して受動的な構造柔軟性を付与している. これにより、外力による衝撃や揺動が機構全体に分散し、生物的な緩衝挙動を再現する構成となっている. 一方、モデルBはJointDriveによる弾性駆動のみを備え、追加の柔軟構造を持たない標準構成とした.

歩行動作の初期設定はPS5コントローラーを用いて行った. 4つのボタン (△, ○, □, ×) により、各脚の初期角度 $\theta_{i,0}$ を±1度単位で個別に設定できる. L1ボタンにより増減方向を切り替え、任意の初期姿勢を直感的に指定可能とした. 設定された初期角度は、各脚の駆動サイン波の位相として反映され、歩行動作における脚のタイミング調整に利用される. 歩行開始はR1ボタンの押下によって全脚の同期駆動が開始される.

脚の回転角度 $\theta_i(t)$ は以下の式で定義した.

$$\theta_i(t) = A \cdot \sin(\omega t + 2\pi \cdot \phi_i) \quad (1)$$

ここで、 A は振幅、 ω は角周波数、 ϕ_i は各脚の正規化初期位相であり、以下により計算した.

$$\phi_i = \frac{\theta_{i,0}}{A} \quad (2)$$

Unity 上の実装では、この ϕ_i に 2π を乗じて位相シフトとして用い、各脚ごとにサイン波の開始タイミングを調整している。これにより、操縦者は各関節の初期角度を操作するだけで自然に歩行周期中の脚のスタートタイミングを調整でき、直感的な歩容設計が可能となっている。

歩行性能の評価は以下の 2 指標に基づいて実施した。第一に、Z 軸方向の移動距離（直進性）として、15 秒および 30 秒時点での前進距離を計測し、歩行効率を定量化した。第二に、Y 軸方向の体高変化（安定性）として、重心高さの時間変化を記録し、姿勢の安定性および沈み込み傾向を評価した。

3 実験結果

3.1 移動距離の比較

表 1 に、各初期位相条件における Z 軸方向の移動距離を示す。ここで、初期位相 (RF, LF, RB, LB) はそれぞれ右前脚 (Right Front)、左前脚 (Left Front)、右後脚 (Right Back)、左後脚 (Left Back) の初期位相 (deg) を示す。表中の A15 および A30 は、モデル A (SpringJoint あり) における 15 秒および 30 秒時点の移動距離を表し、B15 および B30 は、柔軟構造を持たないモデル B (SpringJoint なし) での同時点の移動距離を示す。

特定の初期位相下ではモデル A がモデル B を上回る移動距離を記録しており、柔軟構造の導入が移動性能に好影響を及ぼす場合があることが確認された。

表 1 Z 軸方向の移動距離 [m]

初期位相 (RF,LF,RB,LB) [deg]	A15	A30	B15	B30
0,0,0,0	-0.71	-0.63	1.94	3.92
35,0,0,0	7.43	17.29	8.81	18.49
0,35,0,0	0.21	-0.09	5.10	10.98
0,0,35,0	-11.89	-25.60	-3.78	-8.92
0,0,0,35	-7.39	-15.09	-2.93	-5.51
28,-6,-9,-7	8.26	17.99	8.04	19.93
-13,8,-4,11	4.29	8.47	3.97	7.76
-6,3,19,10	1.34	4.78	3.39	6.02

3.2 体高の比較

図 2 に示すように、体高の時間変化の比較から、モデル A (SpringJoint あり) とモデル B (SpringJoint なし) のいずれも、体高安定性が初期位相に大きく依存することが確認された。モデル A は条件によって安定した体高を維持する傾向があったが、位相設定によっては不安定になる場合も見られた。すなわち、適切でない初期条件下では、両モデルとも上下方向のばらつきが大きくなり、歩行安定性が損なわれる結果となった。

柔軟構造の影響は、先行研究で指摘されているように制御条件との整合性に強く依存することが知られている [3]。本実験においても、初期位相を適切に調整した場合には、モデル A の方が明確に体高安定性に優れていたことが確認された。

4 考察

本研究では、柔軟構造を有する四脚歩行ロボットを仮想環境内に構築し、柔軟性の有無が歩行性能および体高安定性に与える影響を検証した。結果から、柔軟構造の導入は推進力や姿勢安定性に対し常に有利とは限らず、

位相設定などの制御条件に強く依存する複雑な関係が示された。

柔軟構造の影響は移動距離と体高安定性の両面に現れた。特定の初期位相ではモデル A がモデル B より優れた移動性能を示し、接地衝撃の緩和や滑らかな推進力伝達に柔軟性が寄与していると考えられる。一方で、過剰な自由度がエネルギーの散逸や効率低下を招く例も見られた。柔軟構造は上下方向の衝撃を吸収し体高の揺れを抑えるが、位相設定が不適切な場合には不安定性を助長する傾向も見られた。これらの結果から、柔軟性の利点を引き出すには制御条件との整合が不可欠である。

これらの観察結果は、従来のコンプライアントモデルに関する知見 [3] と一致し、制御戦略と柔軟構造を統合的に設計することが歩行性能の最大化に不可欠であることを示している。適切に調整された柔軟性は、単なる受動的構造ではなく、機能的スタビライザとしても有効である。

5 終わりに

本研究では、構造に柔軟性を付与した四脚歩行ロボットを仮想空間に構築し、柔軟性の有無が歩行性能および安定性に及ぼす影響を検証した。柔軟性は適切な位相条件下で推進力や安定性を向上させる一方、不適切な条件下では性能低下を招く傾向も確認された。今後は、動的な位相調整やスプリングパラメータの最適化、自律化に向けた学習的制御の導入が課題となる。

参考文献

- [1] Rolf Pfeifer, Hugo Gravano Marques, Fumiya Iida, "Soft robotics: the next generation of intelligent machines", AAAI Press, 2013.
- [2] Dylan S. Shah, Joshua P. Powers, Liana G. Tilton, Sam Kriegman, Josh Bongard, Rebecca Kramer-Bottiglio, "A soft robot that adapts to environments through shape change", Nature Machine Intelligence, Vol.3, No.1, pp.51–59 (2021).
- [3] Hartmut Geyer, Andre Seyfarth, Reinhard Blickhan, "Compliant leg behaviour explains basic dynamics of walking and running", Proc. of the Royal Society B: Biological Sciences, 2006.
- [4] M. Kalakrishnan, S. Chitta, E. Theodorou, P. Pastor, S. Schaal, "Learning locomotion over rough terrain using terrain templates", Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010.
- [5] Sangbae Kim, Taewan W. Seok, Yoonho H. Hwang, H. Jin Kim, "Highly dynamic quadruped robot using passive compliant legs", IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2013.
- [6] Jemin Hwangbo, Joonho Lee, Alexey Dosovitskiy, Dario Bellisioso, Vassilios Tsounis, Marco Hutter, "Learning agile and dynamic motor skills for legged robots", Science Robotics, Vol.4, No.26 (2019).
- [7] C. Dario Bellicoso, Felix Jenelten, Marco Hutter, Darwin G. Caldwell, "Dynamic locomotion through online nonlinear motion optimization for quadrupedal robots", IEEE Robotics and Automation Letters, 2018.
- [8] Sangbae Seok et al., "Design principles for highly efficient quadrupeds and implementation on the MIT Cheetah robot", IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2013.
- [9] Marco Hutter et al., "AnyMal - A highly mobile and dynamic quadrupedal robot", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2016.