

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	重力方向分離駆動を用いた四脚歩行エンターテインメントロボットの開発 -動力学シミュレータを用いた駆動系の基礎検討-
Title(English)	Development of a Quadruped Walking Entertainment Robot with Gravitationally Decoupled Actuation -Fundamental Study of the Drive System Using a Dynamics Simulator-
著者(和文)	森脇幸一郎, 大久保暁史, 遠藤玄
Authors(English)	Koichiro MORIWAKI, Akifumi OKUBO, Gen ENDO
出典(和文)	ロボティクス・メカトロニクス講演会2025講演論文集, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2025, 6

重力方向分離駆動を用いた四脚歩行エンターテインメントロボットの開発 -動力学シミュレータを用いた駆動系の基礎検討-

Development of a Quadruped Walking Entertainment Robot
with Gravitationally Decoupled Actuation
-Fundamental Study of the Drive System Using a Dynamics Simulator-

○学 森脇 幸一郎 (東京科学大学) 学 大久保 暁史 (東京科学大学)
正 遠藤 玄 (東京科学大学)

Koichiro MORIWAKI, Institute of Science Tokyo, moriwaki.k.45b7@m.isct.ac.jp
Akifumi OKUBO, Institute of Science Tokyo
Gen ENDO, Institute of Science Tokyo

Mammal-type entertainment robots are popular due to their friendly appearance, but there are few examples of robots that walk only on their legs due to power consumption problems. In this study, we propose a mammal-type electric quadruped robot that employs a Gravitationally Decoupled Actuation (GDA) to enable high-speed movement while minimizing power consumption. We developed a dynamics simulator for the robot's design and used it to select actuators. Additionally, the effectiveness of GDA was confirmed by calculating the torque and rotational speed of the selected actuators during walking.

Key Words: Legged robot, Mobile mechanism, Gravitationally Decoupled Actuation

1 緒言

エンターテインメントロボットには、集客効果を高めるための親しみやすい外見に加え、長時間稼働を可能にするための高いエネルギー効率が求められる。例えば、遊園地等で見られる哺乳類型ロボットは親しみやすい外見で人気を博しているが、その多くは自重を支えるために車輪を使用しており、脚のみで移動を実現するエンターテインメントロボットの例は少ない。もし脚のみでの歩行が可能になれば、より遊園地等の世界観に引き込むことができると考えられる。また、従来の哺乳類型ロボットの多くは回転関節駆動を用いているが、この駆動方法では、歩行時にアクチュエータ出力が追いつかず、結果的に歩行速度が低下したり、過剰なエネルギー投入によるエネルギー効率低下につながる問題がある。そこで本研究では、これらの問題に有効な、重力方向分離駆動 (GDA: Gravitationally Decoupled Actuation) [1] を採用する。GDA とは脚の運動を重力方向に対して水平・垂直な運動に分け、歩行時にアクチュエータが発生しなければならない速度と力を分離することで、重心高さ一定の水平移動であれば原理的に消費パワーをゼロにできる駆動方法である。GDA を実現する脚機構は複数考えられるが、本稿では重力方向に対して水平・垂直に直動アクチュエータを配置し、これらの変位をパンタグラフ機構で拡大する機構を対象とする。本機構を用いることで、歩行時に必要なパワーを最小化することができるため、移動のエネルギー効率の向上と歩行の高速化が可能となる。

GDA の従来研究としては、K.Waldron らが開発した油圧・六脚歩行ロボットの ASV (Adaptive Suspension Vehicle) [2] や、米田らが開発した電動・四脚歩行ロボットの TITAN IV[3] がある。しかし、これらは六脚であったり、昆虫型の脚配置を採用しており、GDA を用いた哺乳類型の電動・四脚歩行ロボットの研究は行われていない。

そこで、本研究では、GDA を用いた哺乳類型の電動・四脚歩行エンターテインメントロボットの開発を行う。本稿では特に、実機の開発において、Fig. 1 に示す動力学シミュレータにより、駆動系の基礎検討を行った結果について述べる。

2 重力方向分離駆動による歩行の効率化と高速化

2.1 回転関節を用いた従来の脚駆動

本節では、回転関節を用いた従来の脚駆動 (回転関節駆動) について述べる。Fig. 2 に示す脚の質量が無視できる歩行ロボット [4] が、重心の上下動なしに等速で水平な路面を移動する場合、脚先で発生する力 F_0 と速度 V_0 は互いに直交する。そのため、出力パワーはゼロとなり、理論上エネルギーを必要としない。

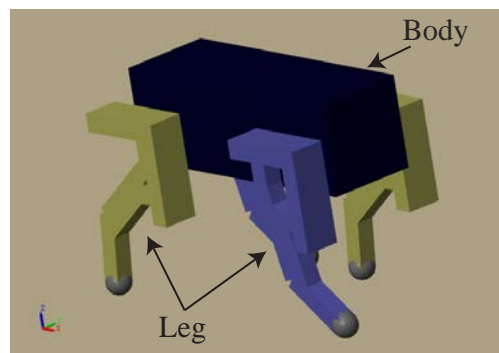


Fig.1 Walking model on the dynamics simulator

しかし、回転関節駆動では速度と力の両方が発生するため、各アクチュエータ間で正負の入力パワー ($P_1 < 0, P_2 > 0$) の受け渡しが行われる。現状、ロボットに搭載可能な小型の回生装置の実現には至っておらず、受け渡されたパワーは全て熱エネルギーとして散逸する。その結果、歩行時のエネルギー効率が低下するという問題に繋がる。また、過剰なパワーを必要とし、目標速度に対する出力が不足することで、機体の低速化に繋がる問題もある。

2.2 直動関節を用いた重力方向分離駆動

本節では、従来の回転関節駆動の問題を解決するために有効な重力方向分離駆動 (GDA) について述べる。Fig. 3 に示す GDA[4][5] は、重力方向に対して水平・垂直に配置した直動アクチュエータとパンタグラフ機構を用いることで、各アクチュエータで速度・力の一方のみを発生させ、歩行時のアクチュエータにおける入力パワーを理論上ゼロにする駆動方法である ($P_1=0, P_2=0$)。これにより、アクチュエータ間での不要なパワーの受け渡しが行われず、エネルギー効率の向上に繋がる。また、過剰なパワーの発生を防ぐため、歩行の高速化も可能である。以上の理由から、本研究ではこの機構を採用した。

3 ロボットの仕様

本研究で開発するエンターテインメントロボットの仕様について述べる。機体寸法は、全長 0.75 m, 横幅 0.50 m, 高さ 0.625 m, 歩行時の脚長は 0.50 m, 重量は 62.5 kg (胴体:52.5 kg, 各脚:2.5 kg) である。また、目標移動速度は平地で 20 m/min, 傾斜 10 度の坂では 0.6 m/min を目指す。なお、直動アクチュエータは、ボールねじと電動モータを組み合わせて構成する。

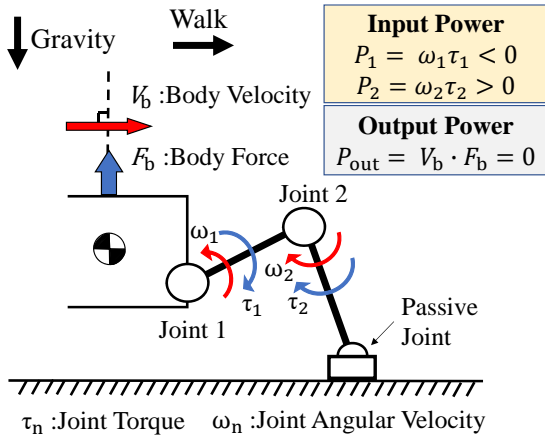


Fig.2 Rotary Joint Actuation[4]

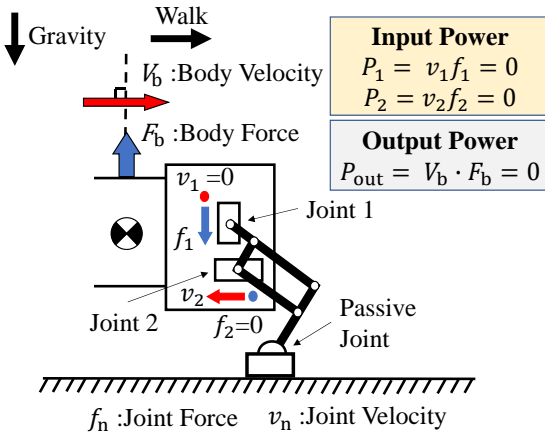


Fig.3 Gravitationally Decoupled Actuation[4]

4 動力学シミュレータを用いた駆動系の基礎検討

目標とする移動速度の達成が可能なアクチュエータを選定するため、歩行に要するモータのトルクと回転数の算出が可能な動力学シミュレータ (Fig. 1) を MATLAB Simulink 上で開発した。なお、機体の胴体部 (Body) に関しては、地面衝突時の影響を除外し、静力学的な脚先力を測定する目的でピッチ軸の回転を拘束している。また、本シミュレータでは、ボールねじのリード (一回転あたりの直動距離)、ギアヘッドの減速比、モータ特性 (トルク・回転数特性、巻線抵抗、連続運転範囲) を組み込むことで、目標とする歩行性能を満たすアクチュエータを選定可能である。ストールトルクや連続運転範囲を考慮した選定を行った結果、モータは出力 150 W、電圧 48 V のものを採用し、リードと減速比はそれぞれ、X 方向 (前進方向) で 30 mm と 4.3、Z 方向 (垂直上方向) で 5 mm と 4.3 に決定した。次に、この機体構成で歩行動作のシミュレーションを行った。脚動作一周期における X 方向および Z 方向のトルク・回転数の出力結果を、それぞれ Fig. 4、Fig. 5 に示す。図中の赤線部分は遊脚期間、青線部分は支持脚期間を示している。この結果から、本機体構成においてストールトルクに対して余裕のある出力が得られ、選定したアクチュエータにおいて歩行動作の実現が可能であることを確認できた。また、X 方向に関しては、支持脚期間 (星印) においてトルクと回転数が同時に増大する瞬間が確認されたが、これは機体が地面に対して垂直に脚を接地しておらず、地面を前方にけり込んだ際の反力が影響したものと考えられる。Z 方向に関しては、遊脚期間・支持脚期間において、トルク・回転数のいずれか一方のみが大きく変化することから、動力学シミュレータ上で速度と力を分離する GDA の効果を確認できた。

5 結言

本研究では、重力方向分離駆動 (GDA) を採用した電動哺乳類型四脚歩行エンターテインメントロボットの実現に向け、動力

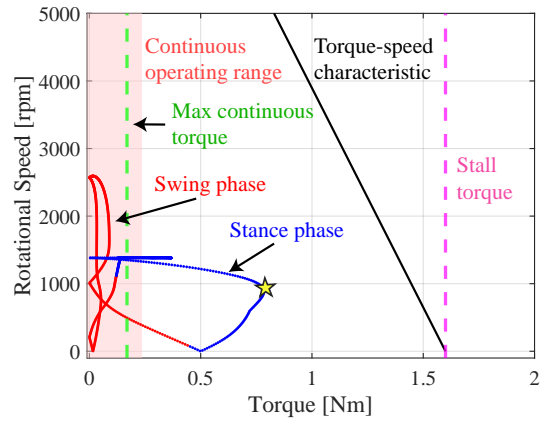


Fig.4 Relationship between Torque and Rotation Speed during Stance and Swing Phases in X direction

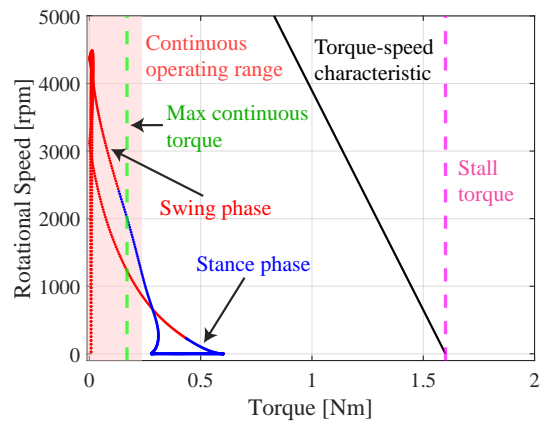


Fig.5 Relationship between Torque and Rotation Speed during Stance and Swing Phases in Z direction

学シミュレータを用いた駆動系の基礎検討を行った。その結果、動力学シミュレータ上で算出したモータのトルクおよび回転数を基に、実機に適用可能なボールねじ、ギアヘッド、モータの選定し、GDA の有効性を確認した。今後は、選定した構成要素をもとに試験機の製作および実験による性能評価を進める。具体的には、一脚試験機の製作・実験を行い、その結果をもとに四脚試験機の開発および評価を行うことで、実機の性能検証を進める予定である。

参考文献

- [1] 広瀬 茂男, 梅谷 陽二, "歩行機械の脚形態と移動特性", バイオメカニズム, vol.5, pp.242-250, 1980.
- [2] Waldron, Kenneth J. et al., "Configuration Design of the Adaptive Suspension Vehicle." The International Journal of Robotics Research 3, pp.37-48, 1984.
- [3] K. Yoneda and S. Hirose, "Dynamic and static fusion gait of a quadruped walking vehicle on a winding path," Proceedings 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nice, France, vol.1, pp.143-148, 1992.
- [4] Hirose, S., Fukuda, Y., Yoneda, K., Nagakubo, A., Tsukagoshi, H., Arikawa, K., Endo, G. and Hodoshima, J., "Quadruped Walking Robots at Tokyo Institute of Technology : Design , Analysis , and Gait Control Methods," 2018.
- [5] 永谷圭司編著, 石上玄也, 遠藤大輔, 永岡健司, 遠藤玄, 程島竜一, 亀川哲志, 田中基康, "不整地移動ロボティクス", コロナ社, 2023.