

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 -一脚試験機的设计-
Title(English)	Development of a Quadruped Walking Entertainment Robot with Gravitationally Decoupled Actuation -Design of Single leg test rig-
著者(和文)	森脇幸一郎, 有賀嵩紘, 程島竜一, 土居隆宏, 遠藤玄
Authors(English)	Koichiro Moriwaki, Takahiro Aruga, Ryuichi Hodoshima, Takahiro Doi, Gen Endo
出典(和文)	第26回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 予稿集, , ,
Citation(English)	Proceedings of the 26th SICE System Integration Division Annual Conference, , ,
発行日 / Pub. date	2025, 12
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は公益社団法人計測自動制御学会に帰属します。 (c) 2025 The Society of Instrument and Control Engineers

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 -一脚試験機的设计-

○森脇 幸一郎 (東京科学大学), 有賀 嵩紘 (東京科学大学),
程島 竜一 (埼玉大学), 土居 隆宏 (金沢工業大学), 遠藤 玄 (東京科学大学)

Development of a Quadruped Walking Entertainment Robot with Gravitationally Decoupled Actuation

-Design of Single leg test rig-

○ Koichiro Moriwaki (Institute of Science Tokyo), Takahiro Aruga (Institute of Science Tokyo),
Ryuichi Hodoshima (Saitama University), Takahiro Doi (Kanazawa Institute of Technology),
and Gen Endo (Institute of Science Tokyo)

Abstract: Mammalia entertainment robots are popular due to their friendly appearance; however, examples of robots that walk solely on their legs are limited because of high power consumption. In this study, we propose a mammal electric quadruped robot that employs Gravitationally Decoupled Actuation (GDA) to enable high-speed locomotion while minimizing power consumption. For GDA evaluation, a one-legged test machine was designed and fabricated based on the results of a dynamics simulator. In designing the monopod testing machine, we proposed a space-saving design and lightweighting techniques for parts, taking into account the characteristics of the GDA that requires numerous fixed components.

1. 緒言

遊園地等で稼働しているエンターテインメントマシンは、集客力を高めるための魅力的な外見や動作に加え、長時間稼働を可能にするための高いエネルギー効率求められる。一方でその多くは自重を支えるために車輪を使用しており、脚は装飾的な要素にとどまっている。我々はこの副次的な脚に注目し、脚機構を用いて実際に歩行するエンターテインメントロボットの開発を行う。もし本ロボットを実現できれば、遊園地における新たな集客のコンテンツとなり、エンターテインメントロボット分野の開拓につながる。また、本研究では、親しみやすさなどの心理的影響や、移動に要する面積が小さいことから、馬や犬などの哺乳類型の関節配置を有する脚機構で構成する四脚歩行ロボットを対象としている。

一方、遊園地ならではのロボットの大型化等を見据えた場合、駆動系が問題となる。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¹。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)²を採用する。GDAとは脚の運動を重力方向とそれに直交する水平方向 (前後方向) 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、本稿では重力方向とそれに直交する水平方向 (前後方向) に直動アク

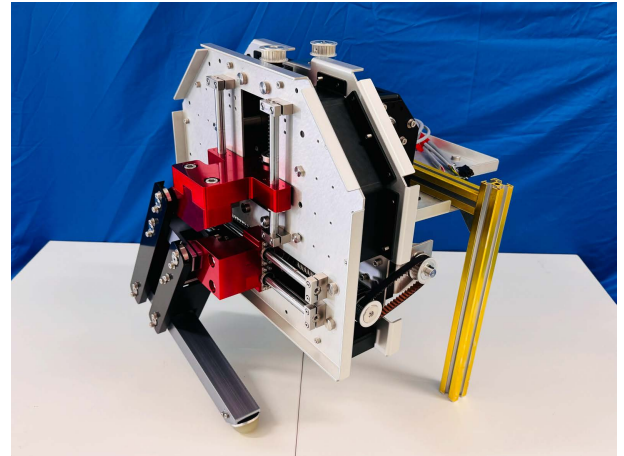


Fig. 1 Single leg test rig (Front angle)

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らによる油圧駆動の六脚歩行ロボット ASV (Adaptive Suspension Vehicle)³や、米田らによる電動・四脚歩行ロボット TITAN IV⁴などがある。しかし、これらはいずれも六脚構成あるいは爬虫類型の脚構成である。また、静粛性が求められるエンターテインメントロボットの分野においては、油圧駆動より電動に需要がある。だが、これらの需要を満たす、GDAを適用した哺乳類型脚構成の電動四脚歩行ロボットの研究例は我々が調べた限りでは見当たらない。

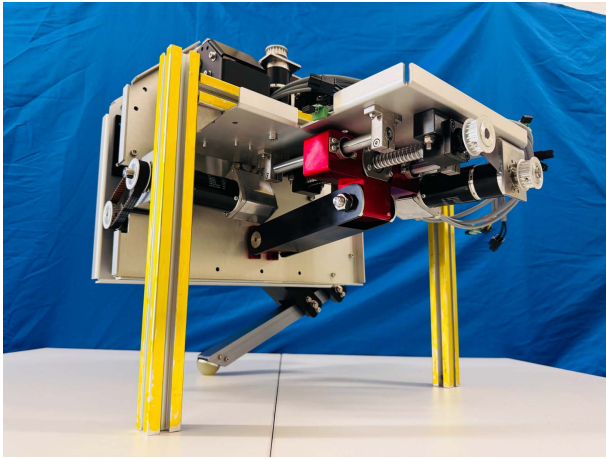


Fig. 2 Single leg test rig (Back angle)

そこで、本研究では、移動の高速化および効率化を目的として、重力方向分離駆動 (GDA) を適用し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、Fig. 1 に示す一脚試験機 (実験用試作機) の設計について述べる。

2. 一脚試験機の設計

森脇らは、ロボットの目標性能を反映した動力学シミュレータを開発し、そのシミュレーション結果に基づき、哺乳類型電動四脚歩行エンターテインメントロボットの実機実現が可能なアクチュエータ等を選定した¹。本研究では、その成果を踏まえ、Fig. 1, 2 に示す一脚試験機の設計・製作を行った (黄色のアルミフレームは固定用であり、試験機パーツに含まない)。以降は、Fig. 3 に示すように、機体前進方向を X 方向、垂直上方向を Z 方向、胴体から脚へ抜ける方向を Y 方向と定義し議論を進める。本試作機は、モータにより駆動されるボールねじの直動運動を、パンタグラフ機構による拡大および受動関節による回転運動に変換することで 3 自由度を実現する。具体的には、Fig. 3 に示す肩プレートに配置した X 方向および Z 方向の駆動はパンタグラフ機構によって拡大され脚を駆動する。一方、Y 方向の駆動は、Fig. 2 および Fig. 4 に示すように、肩プレート上部を受動回転軸とし、胴体背面に配置したモータとボールねじの直動機構が肩プレート下部を押し出すことで、肩プレート全体を X 軸周りに回転させることで実現している。

本機構では、前後進のみ GDA が有効となる。3 自由度すべてに GDA を適用することも可能であるが、哺乳類の主たる移動は前進であるため、前進方向の速度が他より支配的となる。また、エンターテインメントロボットとしての観点からは、メンテナンス性が重要であり、機構複雑化は避けたい。よって、本設計では前進時のみ GDA が機能する構造を採用した。

以下では、GDA の特徴を活かすために行った設計内容について述べる。

2.1 二重プレート構造

本設計の特徴は、大型プレートを 2 枚組み合わせる構造を採用した点にある。GDA を採用したロボットでは、ボールねじやリニアブッシュなどの固定装置、モータ等を搭載する必要がある。そのため、限られたスペースに多くの機構を配置しなければならず、設計上の大きな制約となっていた。そこで本機体では、Fig. 3 に示すように 2 枚のプレート間に空間を確保し、

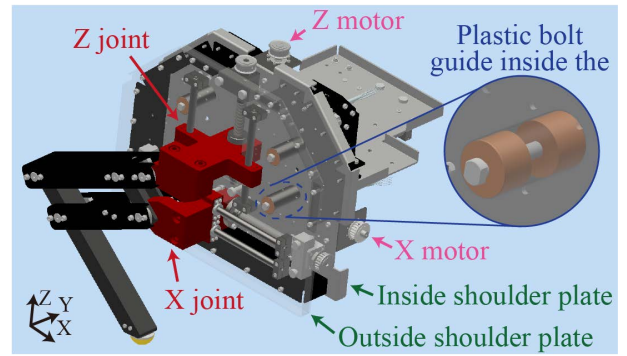


Fig. 3 Illustration of the area around the shoulder plate

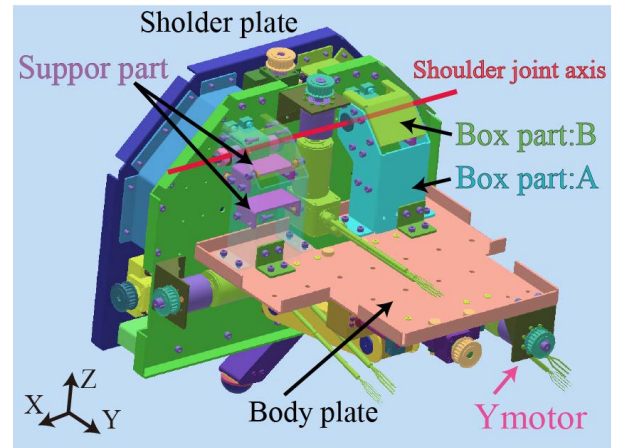


Fig. 4 Illustration of the area around the shoulder joint support unit

リニアブッシュの固定面、ボールねじの固定面、肩プレートを駆動する関節とモータの設置面を分離して配置する設計を行った。パーツ取り付けに関しても、外側のプレートに直動固定装置を集中配置することで、分解時のメンテナンス性を向上させている。また、モータとボールねじの接続にはカップリングを直接用いず、タイミングベルトを介してプレート間を接続する方式を採用した。これにより、モータを機体内部に配置でき、転倒や衝突による直接的な損傷を回避できる設計となっている。

一方で、二重構造の採用により機体質量の増加が懸念されるため、各プレートの厚みを小さくした結果、1 枚あたりの剛性不足が課題となった。この問題に対して本設計では、プレート端部に曲げ加工を施し断面二次モーメントを増加させた。さらに、Fig. 3 に示すように、プレート中央部の変形を抑制するため、中空パイプで両プレートを 4 か所接続した。中空パイプ内にはボルトを同軸にするため、3D プリンタ製キャップを挿入しており、ボルトで締結することで、軽量化と強度確保を両立させた。

2.2 肩関節支持部 (箱形状)

肩の可動部は荷重を受けるため、高い耐荷重とする必要がある。本研究では、Fig. 4 に示す Box part: A, B から構成される箱形状の肩関節支持部を製作した。これらの部材は板曲げ加工によって形成しており、切削加工に比べて低コストであり、中空構造による軽量化も実現している。さらに、各箱内部には、強度不足による曲げ変形を抑制するため、2 本の補剛材を配置した。

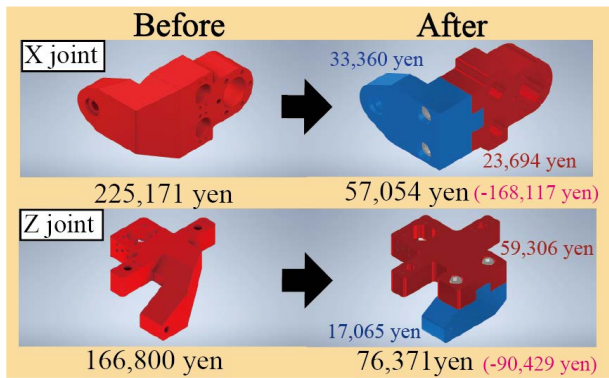


Fig. 5 Comparison of Processing Costs Due to Design Changes

Table 1 Performance specifications in quadruped configuration (Simulation study)

Specification	Value
Total mass	125 kg
Body dimensions	0.80 m (W), 0.35 m (D), 0.625 m (H)
Forward velocity	0.335 m/s
Leg trajectory	Cycloid trajectory
Gait pattern	Trot
Duty ratio	0.5
Cycle time	1 s
Stride length	0.335 m
Swing leg height	0.05 m
Motor output	150 W
Supply voltage	48 V

2.3 パーツ分割によるコスト低減

本研究では、MISUMIの加工サービスである meivy を利用した。このサービスでは、CAD データを読み込むことで加工コストを自動算出できるため、パーツ設計段階でコスト低減を考慮することが可能である。本機体においては、Fig. 3 に示すような、直動機構と脚部のパンタグラフを接続する X joint および Y joint が複雑な形状を有しており、加工コストが高いことが課題であった。初期設計においては該当パーツはそれぞれ、X joint が 225,171 円、Z joint が 166,800 円と見積もられた。この問題を解決するため、従来は一体で設計していた部品を二つに分割する構造へと変更した。その結果、X joint は 57,054 円、Z joint は 76,371 円となり、大幅にコストを低減した。パーツの最大寸法（幅、高

さ、奥行）に基づく元のブロック材からの除去率は、X joint では 70.0 % から 50.5 % へ、Z joint では 79.8 % から 52.3 % へと削減された。設計改良前後の形状およびコストの比較を Fig. 5 に示す。

2.4 寸法および質量

機体寸法は、全幅 430 mm (X 方向)、奥行 520 mm (Y 方向)、屈曲時の高さ 430 mm (Z 方向)、開脚時の高さ 600 mm (Z 方向) である。固定用のアルミフレームを含まない一脚試験機の質量は、合計 23.03 kg となった。また、CAD 上での質量合計は、22.05 kg であった。シミュレーション検討時の四脚構成においては、全幅 0.8 m、奥行 0.35 m、高さ 0.625 m であり、想定質量は 125 kg であった¹。四脚想定時の基本性能を Table 1 に示す。

3. 結言

本稿では、一脚試験機の設計・製作を行うと共に、GDA を採用した場合に機能を最大化させるための手法を示した。特に、プレート二重構造の採用により、プレート間の空間を最大限活用できることを示した。

GDA を採用した歩行ロボットは移動効率が優れる反面、課題としては機構構築に伴う部品点数と機体質量の増加が挙げられる。今後は、歩行実験を通じて電力消費や移動効率を評価し、GDA の駆動効率のメリットと質量増加のデメリットを比較検討する予定である。なお、予稿では動作時のデータを掲載できなかったが、ポスター講演では、実機の動作および計測データを提示する予定である。

References

- [1] K. Moriwaki, A. Okubo, and G. Endo. Development of a Quadruped Walking Entertainment Robot with Gravitationally Decoupled Actuation (Fundamental Study of the Drive System Using a Dynamics Simulator). ROBOMECH2025, 2A1-M06, 2025.
- [2] 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.
- [3] Waldron, Kenneth J. et al., "Configuration Design of the Adaptive Suspension Vehicle." The International Journal of Robotics Research 3, pp.37-48, 1984.
- [4] 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.
- [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, pp.97-108, 2023.