

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	ローラーウォーカーに関する研究 -第15報：Roller-Walker II の性能評価-
Title(English)	
著者(和文)	大久保暁史, 伊藤春那, 大澤来未, 難波江裕之, 遠藤玄
Authors(English)	Akifumi Okubo, Hana Ito, Kurumi Osawa, Hiroyuki Nabae, Gen Endo
出典(和文)	第42回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2024, 9
Note	このファイルは著者（最終）版です。 This file is author (final) version.

ローラーウォーカーに関する研究

-第15報：Roller-Walker II の性能評価-

○大久保 暁史（東京工業大学） 伊藤 春那（東京工業大学） 大澤 来未（東京工業大学）
難波江 裕之（東京工業大学） 遠藤 玄（東京工業大学）

Walking robots are slower than wheeled robots on flat surfaces. Additionally, conventional leg-wheel robots have heavy actuators at the tips of their legs. Therefore, we developed a leg-wheel hybrid mobile robot named Roller-Walker II, which has passive wheels attached to the tips of its legs, and evaluated its performance. We measured trajectory tracking accuracy, compared the propulsive velocity in Roller-Walk mode with simulations, and measured the Cost of Transport (CoT). The CoT was 0.537, showing an improvement in travel efficiency compared to previous studies.

1. 諸言

近年、不整地でも移動可能な歩行ロボットの開発が盛んに行われている [1]。しかし一般に、平坦地における歩行ロボットの移動速度は、車輪移動を行うロボットの速度に劣っている。このことから、脚と車輪を併せ持つ脚車輪ロボットがこれまでも開発されてきた [2] が、その多くは脚先に車輪を駆動するためのアクチュエータを持っており、歩行時には脚先が重く負荷となる。

そこで遠藤らは、4本の脚先に足裏と兼用となる受動車輪を取り付けた、脚車輪ハイブリッド移動体 Roller-Walker [3] を開発した。Roller-Walker の受動車輪による推進方法はローラーウォークと呼ばれ、歩行に用いる脚の自由度をそのまま用いて車輪移動することができる。さらに大澤らは、主な構造材を 3D プリントした樹脂部品で製作することにより軽量化された Roller-Walker II [4] を開発した。

本研究では、Roller-Walker II のローラーウォークの性能評価を行った。具体的には、脚先位置精度の測定と、MATLAB/Simulink によるシミュレーションとの速度の比較、移動仕事率の測定を行った。

2. Roller-Walker II の仕様

開発した Roller-Walker II の概要を図 1 に、仕様を表 1 に示す。基本的な構成は、我々の研究グループによって開発された四足歩行ロボット TITAN-E1 [5] をもとに開発されている。各脚 3 自由度の計 12 自由度で、関節配置が Yaw-Roll-Roll の爬虫類型の脚配置である。アクチュエータには、定格 80 W のブラシレス DC モータ (EC 45 flat 80W, maxon) と減速比 30 の減速機 (HPGP-11A-37-F0AAH, ハーモニック・ドライブ・システムズ) を使用している。足先側の 2 関節の駆動には高強度化学繊維ロープ (熱延伸高密度ポリエチレン繊維, Armare Ropes, NA20020SOC00\011.000) によるワイヤ干渉駆動 [6] を用いた。減速機の出力から Joint 1 への動力伝達と、Joint 2, Joint 3 の胴体側のプーリへの動力伝達にはタイミングベルトを使用している。主な構造材は、チタン酸カリウム繊維で強化された POTICON (ナイロンベース: NLT34M, PPS ベース: RT4, とともに大塚化学) を用いて 3D プリントにより製作されている。RT4 は筆者らの知る限り短繊維強化 FFF 式フィラメントの中で最も強度が高く、ボディと脚機構を締結する部材に用いた。足先の受動車

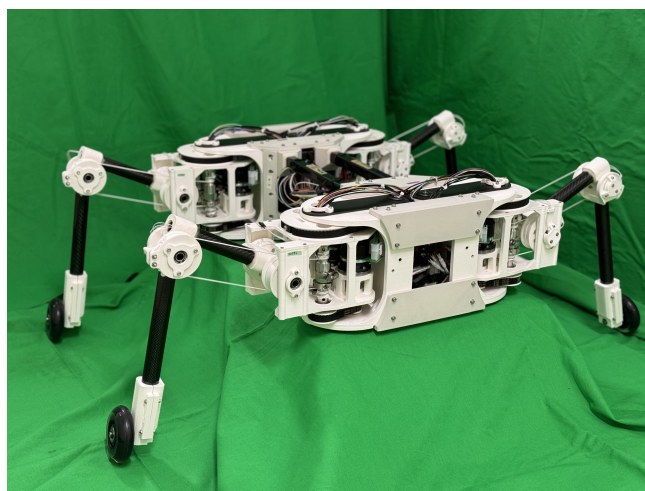


図 1 Overall view of Roller-Walker II

表 1 Specification of Roller-Walker II

Size of the body ($L \times W \times H$)	604 × 870 × 432 mm
Length of the each leg link (in order from the body side)	70.0, 165.4, 311.1 mm
Total mass	17.20 kg
Reduction ratio of each joint (in order from the body side)	66.43, 141.84, 141.84

輪には、ゴム製のインラインスケート用スペアホイール (RADIUS) を用いた。

3. 評価実験

開発した Roller-Walker II の推進時の脚先位置精度、移動速度、移動仕事率を評価した。脚先の軌道は [3] に記載のものを用いている。各パラメータは $T = 3$ s, $d_{\text{offset}} = 200$ mm, $d_0 = 50$ mm, $\theta_0 = 0.27$ rad, $\phi = \pi/2$ rad とした。実験はビニル床シートの廊下で行った。

3.1 脚先位置精度

路面走行時の関節角度及び脚先位置の指令値と実測値を比較した。脚先位置は、各関節のエンコーダの値から順運動学を用いて計算した。結果を図 2 に示す。図 2 の値は左前脚のものであり、上段が関節角度、下段が脚先位置である。脚先の軌道は概ね目標値に追従していることがわかる。y 座標の誤差が比較的大きいのは、

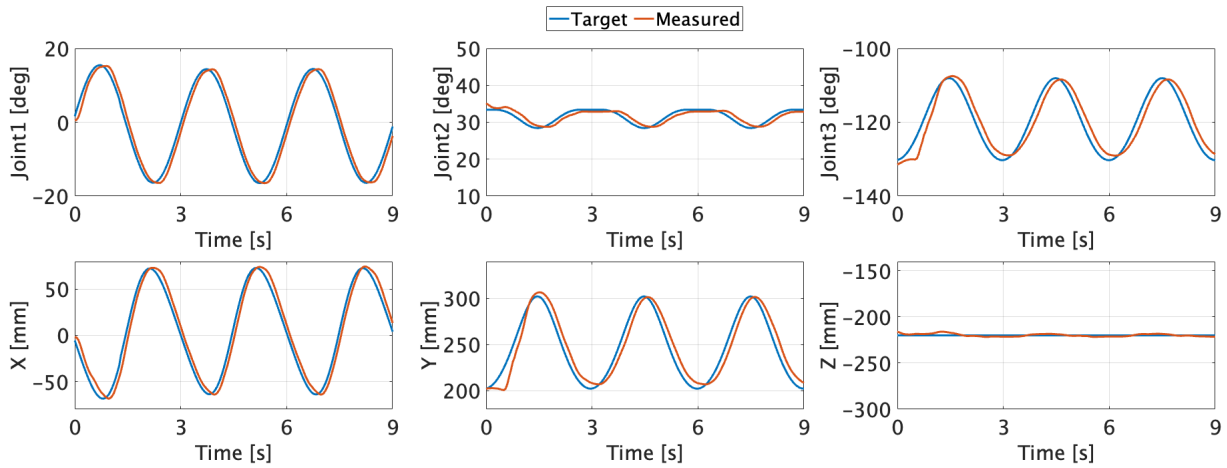


図2 Time course of joint angles and leg tip position.

車輪軸方向の摩擦力が主に y 軸方向に働くためである。特に動きはじめには大きな摩擦力が働くため、誤差も大きくなっていると考えられる。

3.2 移動速度

実験での移動速度とシミュレーションによる移動速度を比較した。シミュレーションは MATLAB/Simulink により行った。シミュレーションは、車輪の軸方向の静止摩擦係数と動摩擦係数を 0.5、速度閾値を 0.01 m/s とし、車輪の転がり方向の摩擦係数を 0.01、粘性摩擦係数を 10^{-6} Nm/(rad/s) として行った。接触力はバネ・マス・ダンパ系により定義されており、バネ定数は 70000 N/m、減衰係数は 2000 N/(m/s) とした。Simulink のソルバーには ode5 (Dormand-Prince) を用いた。実験での移動速度は、ボディ後部に速度計測用の受動車輪を取り付け、その回転速度をデッドレコニングにより計測した。

結果を図 3 に示す。平均値は速度の安定した 3 s から 9 s の範囲で計算している。実験とシミュレーションの速度は、平均速度はそれぞれ 0.351 m/s と 0.316 m/s で、実験での速度はシミュレーションの速度に比べ 10% ほど速かった。また、実験での速度には大きく周期的な変動が見られた。この原因は、車輪のキャンバー角が一定に保たれていないため、車輪と路面の間での摩擦特性が変化しているためだと考えられる。先行研究の Roller-Walker は足首関節によりキャンバー角が一定に保たれており、この点は新たに判明した課題であると思われる。

3.3 移動仕事率

ローラウォークでの走行時の移動仕事率 (CoT, Cost of Transport) [7] を計測した。移動仕事率は以下の式で表される無次元量であり、小さいほど移動効率が高いことを表す。

$$\epsilon = \frac{E}{MgL} = \frac{P}{MgV}$$

式中の文字はそれぞれ、 M がロボットの質量、 g が重力加速度、 L が移動距離、 E が L の移動に要するエネルギー、 V が移動速度、 P が消費電力を表している。

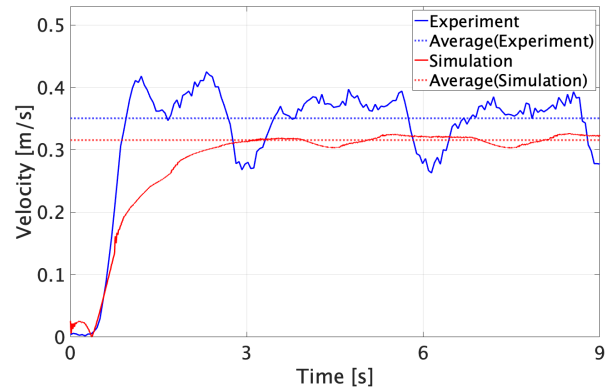


図3 Velocity in experiments and simulations.

消費電力は、バッテリー電圧が 26.4 V で一定とし、電流センサ (MCS-SD2537, mlabo) を用いてバッテリーから流れる電流を測定し計算した。その結果、速度が安定してからの移動仕事率は 0.50 であった。

先行研究の Roller-Walker の移動仕事率は 0.6 ~ 0.7 程度 [8] であり、Roller-Walker II の移動仕事率は先行研究に比べ向上していることがわかった。これはアクチュエータ・モータドライブの性能向上や、構造材を樹脂で製作したことによる軽量化が影響していると考えられる。

4. 結言

Roller-Walker II のローラウォークの性能評価を行った。脚先位置は概ね目標値に追従していることがわかった。移動速度は平均的にはシミュレーションでの値と一致するものの、周期的な速度の変動が大きかった。移動速度と消費電力により算出した移動仕事率は 0.537 であった。

今後は、路面による移動仕事率の違いや、脚先の受動車輪のキャンバー角の影響について調べる必要があると考えている。

5. 謝辞

本稿執筆にあたり，大塚化学株式会社の材料や情報のご提供，ならびにご助言，株式会社グーテンベルクの3D プリントに関するご協力やご助言を賜りました。ここに深甚なる謝意を表します。

貴重なコメントと議論をいただきました武居直行教授（東京都立大学），太田祐介教授（千葉工業大学），高木健教授（広島大学）に感謝いたします。

参 考 文 献

- [1] G. Bledt, M. J. Powell, B. Katz, J. Di Carlo, P. M. Wensing and S. Kim, “MIT Cheetah 3: Design and Control of a Robust, Dynamic Quadruped Robot,” *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 2245-2252, 2018.
- [2] Bjelonic, Marko, “Planning and Control for Hybrid Locomotion of Wheeled-Legged Robots,” *ETH Zurich*, 2011.
- [3] Gen Endo, Shigeo Hirose, “Study on Roller-Walker (system integration and basic experiments),” *Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol.3, pp. 2032-2037, 1999.
- [4] 大澤来未, 大久保暁史, 難波江裕之, 遠藤玄, “ローラーウォーカーに関する研究 -第 14 報:3D プリント製樹脂を主要構造材とした Roller-Walker II の開発-”, *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集*, 2A2-O01, 2024.
- [5] 角田柊平, 難波江裕之, 鈴森康一, 遠藤玄, “熱溶融積層方式による樹脂構造材を用いた四足歩行ロボット TITAN-E1 の開発”, *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集*, 2A1-Q07, 2022.
- [6] Ma, S. and Hirose, S. and Yoshinada, H., “Design and experiments for a coupled tendon-driven manipulator”, *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 30-36, 1993.
- [7] Gabrielli, G. and von Karman, Th: “What Price Speed?,” *Mech. Eng.*, vol. 72, no. 10, pp. 775-781, 1950.
- [8] Endo, G., and Hirose, S. “Study on Roller-Walker — Improvement of Locomotive Efficiency of Quadruped Robots by Passive Wheels”, *Advanced Robotics*, vol. 26, pp. 969-988, 2012.