T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

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 ー第13報：多様な路面上における歩行とローラーウォークの移動仕事率比較ー
Title(English)	Study on Roller-Walker - Comparison of Specific Resistance between Walking and Roller-Walk on Various Road Surfaces -
著者(和文)	大澤来実, 大久保暁史, 難波江裕之, 遠藤玄
Authors(English)	Kurumi Osawa, Akifumi Okubo, Hiroyuki Nabae, Gen Endo
出典(和文)	ロボティクス・メカトロニクス講演会2023講演論文集, , , 2P2-G15
Citation(English)	Proceedings of the 2023 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, , , 2P2-G15
発行日 / Pub. date	2023, 6

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

ローラーウォーカーに関する研究
-第 13 報：多様な路面上における歩行とローラーウォークの移動仕事率比較-

Study on Roller-Walker
- Comparison of Specific Resistance between Walking and Roller-Walk on Various Road Surfaces -

○学　大澤　来実（東工大）　　学　大久保　暁史（東工大）
正　難波江　裕之（東工大）　正　遠藤　玄（東工大）

Kurumi OSAWA, Tokyo Tech
Akifumi OKUBO, Tokyo Tech
Hiroyuki NABAE, Tokyo Tech
Gen ENDO, Tokyo Tech, endo.g.aa@m.titech.ac.jp

Walking and Roller-Walk experiments were conducted on surfaces with different coefficients of friction using TITAN-E1, a quadruped robot, and specific resistance ε was measured and compared. As a result, it was found that in any environment, specific resistance was lower with roller-walking, meaning that the efficiency of movement was higher. On the other hand, Roller-Walk was not possible on lawn and fallen leaves. It can be said that walking had a smaller ε in such situations. Additionally, while the efficiency of walking was not so much influenced by the environment, the efficiency of Roller-Walk decreased on surfaces with a high coefficient of friction.

***Key Words*:** Roller-Walker, Leg-Wheel Robot, Quadrupled Robot

1.　緒言

近年，不整地においても移動可能な歩行ロボットの開発が盛んに進められている[1]．しかし平坦地の場合，歩行ロボットは車輪走行のロボットに比べて移動速度が低いというデメリットがある．そのため，脚と車輪を併せ持つ脚車輪ロボットがこれまでにも開発されてきたが[2]，その多くで脚先に車輪を駆動するためのアクチュエータを負荷しているため，機構が大きく重くなるという欠点がある．そこで遠藤らは，ローラーウォーカー[3]という，4 本の脚の先に足裏と兼用となる受動車輪を取り付け，歩行の脚の自由度をそのまま用いて車輪移動を行う脚車輪ロボットを開発した．この推進方法はローラーウォークと呼ばれ，脚先は軽量であるため，歩行の性能を落とさずに車輪走行することが可能である．一方，推進時に地面の状態に応じて歩行/ローラーウォークを適切に切り替える方法については十分に検討されていない．硬平地であればローラーウォークは歩行よりも高効率な走行が可能であることが確かめられているが，路面の凹凸や硬さが異なる環境においてはその比較がなされていないため，切り替えのタイミングは未知である．そこで本研究では，移動様式選択の足掛かりとするため，多様な路面上で歩行とローラーウォークの移動効率を実験的に測定し，定量的な比較を行うことを目的とする．

実験を行うにあたっては，角田らが開発した樹脂製 4 足歩行ロボットである TITAN-E1[4]を用いて，通常の歩行動作と，このロボットの脚先に車輪を取り付けることで行うローラーウォークの動作を比較することとした．

2.　車輪取り付け治具の製作

TITAN-E1 の脚先は円筒状の部品(A)の先端に簡単に取り外し可能なウレタンゴムが取り付けられている状態である．そのため，車輪を取り付ける方法として，図 1 に示すように，ウレタンゴムを取り外した後，円筒状の部品(A)に治具(B)を取り付け，最後に車輪を治具に固定する．治具はチタン酸カリウム繊維で強化されたナイロンであるポチコン（大塚化学製）[5]を素材とし，FFF 式 3D プリンタで製作した．組み立て手順としては，治具を脚先に取り付けた後，軸を通して車輪を固定

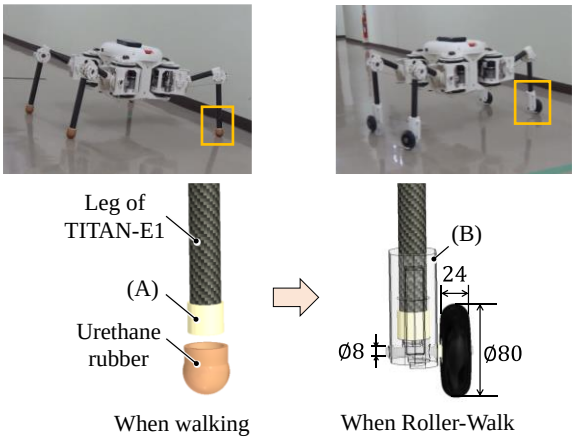

Fig. 1　Installation of wheels

する．ローラーウォーカーの動作中に車輪が治具ごと脛リンク軸周りに回転しないよう，治具は長めに製作し，脚との接触面を大きくすることで摩擦により固定できるようにした．車輪には，比較的硬いゴムが使用されているインラインスケート用スペアウィール（RADIUS 社製）を用いた．ローラーウォークは車輪と地面の間の摩擦力を利用し推進するため，摩擦係数の高いゴム材を選択した．この車輪の摩擦係数は，遠藤らが先行研究で実験的に求めたインラインスケート用中実ゴムタイヤの摩擦係数を参考にすると，転がり方向 0.01，軸方向 0.56 である[3]．

3.　歩行およびローラーウォークの評価実験

歩行とローラーウォークの性能を評価するため，ロボットを動作させた際の電流値・速度を測定する実験を実施した．電圧は安定化電源で 26.4[V]を一定に出力し，電流は，安定化電源につないでいる配線を電流プローブを通してオシロスコープにつなげることで測定した．速度は，ロボット胴体の移動距離を動画撮影し，要した時間で算出した．

歩行およびローラーウォークの実験の様子を図 2 に示す．

歩行の実験については，ロボット胴体を支え脚先を地面に接地させずに行う空中動作に加え，ビニル床シートの廊下，絨

Fig. 2　Locomotion experiment

毯，芝生，落ち葉の上で実験を実施した．歩数は 16 歩である．

ローラーウォークの実験については，歩行と同様の空中動作と廊下及び絨毯上で実験を実施した．芝生と落ち葉に関しては，絨毯上で実施した数回目の実験時に，脚の第 3 関節の樹脂製部品が割れそれ以上出力を出せないと分かったため，絨毯より摩擦係数が大きいことから実験を行わなかった．ローラーウォークでは通常の歩行ロボットとは異なる脚出力が要求されるため樹脂が割れたと考えられる．脚軌道は[3]に記載のもので，脚軌道パラメータは$d_{offset} = 200$[mm], $T = 3.0$[s], $d_0 = 50$[mm]，$\theta_0 = 0.2$[rad]，$\varphi = \pi/2$[rad] と設定した．

各動作の移動仕事率εは CoT (Cost of Transport)[6]とも呼ばれる値である．

$$\varepsilon = \mathrm{CoT} = \frac{E}{MgL} = \frac{P}{MgV} \tag{3.1}$$

εは無次元数で，値が小さいほど移動における効率が高いことを示す．Mはロボットの全質量[kg]，gは重力加速度[m/s^2]，Lは走行距離[m]，EはLだけ進んだときに消費するエネルギー[J]，Pは消費パワー[W]，Vは速度[m/s]である．

Mはバッテリを含めた値で，歩行時 14.60[kg]，ローラーウォーク時 15.34[kg]であった．これを踏まえ，測定した速度と電流値を基に求めたεを表 1，表 2 に示す．

Table. 1　Specific resistance of Walking

Environment	Power [W]	ε	ε (Difference from in the air)
In the air	26.48	-	-
Vinyl floor	33.16	2.25	0.453
Carpet	33.95	2.29	0.505
Lawn	35.12	2.64	0.905
Fallen leaves	38.53	2.91	0.909

Table. 2　Specific resistance of Walking

Environment	Power [W]	ε	ε (Difference from in the air)
In the air	14.05	-	-
Vinyl floor	22.55	0.271	0.102
Carpet	28.25	0.816	0.410

4.　考察

歩行では，廊下と絨毯に比べて芝生や落葉の方がεが大きくなった．これは，廊下と絨毯は室内の環境であり平坦な地面であった．一方，芝生と落葉は屋外の多少の凹凸がある地面で実験を実施したことから差が生じたと考えられる．

ローラーウォークでは，廊下よりも絨毯の方がεが大きくなった．これは，絨毯の摩擦係数が大きくロボットの関節剛性が小さいことから，脚先の変位が大きくなりローラーウォークの動作が滑らかにいかなくなったからだと考えられる．またそれによりロボットが動作中に直進せず曲がってしまい，直進方向の速度が遅くなったことも要因の 1 つだと考えられる．

歩行とローラーウォークを比較すると，廊下と絨毯上ではローラーウォークは歩行に比べてεが小さいことが確認できた．一方，今回の実験においては，芝生や落葉上でのローラーウォークは実現することができず，速度 0，つまりεは無限大であるため，歩行の方がεが小さいということができる．

また，廊下と絨毯に関して，歩行はεの差が 0.04 と小さかったが，ローラーウォークは差が 0.545 と大きいことが分かった．これは，ローラーウォークは路面の摩擦係数が大きくなると，移動速度は低く，消費エネルギーは大きく変化しやすいからであると考えられる．

クーロン摩擦（摩擦係数μ）を発生させる物体が路面上を滑り移動するとき，εは 3.1 式の定義からμとなる．したがってローラーウォークの場合，εは車輪の転がり摩擦係数と同義になる．しかし，今回の実験ではεが 0.102，0.410 となり，車輪の転がり摩擦係数 0.01 の 10 倍もの大きさとなった．ローラーウォーク時のεは脚先が蛇行しているためロボットの移動距離と脚先の道のりが同じでないことを考慮しても，過大な値である．これは，車輪の組付け誤差といった車輪以外の部分が転がり抵抗になっているからだと考えられる．

5.　結言

本研究では，TITAN-E1 を用いて歩行とローラーウォークの移動仕事率εを比較するための実験を行った．その結果，ビニル床シートの廊下と絨毯上においては，ローラーウォークの方がεが小さくなると分かった．一方，芝生と落葉上では，実質的に歩行の方がεが小さくなるといえる．また，ローラーウォークは歩行と異なり，摩擦係数が大きい路面上で走行させるほど効率が低くなることを確認した．

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准教授（東京都立大学），太田裕介教授（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 et al., “MIT Cheetah 3：Design and Control of Robust, Dynamic Quadruped Robot,” in 2018 IEEE/RSJ Inter-national 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] 遠藤玄，広瀬茂男：“ローラーウォーカーに関する研究-システムの構成と基本的動作実験-”，日本ロボット学会誌，vol. 18，no. 2，pp. 270-277，2000.

[4] 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 2022 講演論文集，2022.

[5] 大塚化学株式会社，“ポチコン「ティスモ」配合複合材料”，[online], https://www.otsukac.co.jp/products/chemical/poticon/, Accessed: March 2, 2023.

[6] Gabrielli, G. and von Karman, Th: “What Price Speed?,” Mech. Eng., vol. 72, no. 10, pp. 775-781, 1950.