T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題	ローラーウォーカーに関する研究 第9報：ローラーウォーク推進の移動効率
Title	Study on Roller-Walker No.9: Energy Efficiency of Roller-Walk
著者	遠藤玄, 広瀬茂男
Author	Gen Endo, Shigeo Hirose
掲載誌/書名	日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, , , 2P1-D12
Journal/Book name	Proceedings of the 2009 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, , , 2P1-D12
発行日 / Issue date	2009, 5
URL	http://www.jsme.or.jp/publish/transact/index.html
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は日本機械学会に帰属します。
Note	このファイルは著者（最終）版です。 This file is author (final) version.

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

ローラーウォーカーに関する研究

第 9 報：ローラーウォーク推進の移動効率

Study on Roller-Walker

No.9: Energy Efficiency of Roller-Walk

○　遠藤 玄（東工大院）　　正　広瀬 茂男（東工大院）

Gen ENDO, Tokyo Tech., gendo@mes.titech.ac.jp
Sigeo HIROSE, Tokyo Tech., hirose@mes.titech.ac.jp

Roller-Walker is a leg-wheel hybrid mobile robot using a passive wheel equipped on the tip of each leg. The passive wheel can be transformed into sole mode by rotating ankle roll joint when Roller-Walker walks on rough terrain. This paper discuss energy efficiency of locomotion in wheeled mode. We define a leg trajectory to produce forward straight propulsion and optimize the parameters of the leg trajectory using numerical simulator where optimization criteria is set to specific resistance. Then we carried out hardware experiments and empirically derived the experimental specific resistance. We show that the wheeled locomotion has 8 times higher energy efficiency than an ordinary crawl gait.

Key words: Leg-wheel hybrid robot, Roller-Walker, Specific Resistance

1　はじめに

ローラーウォーカーとは歩行機械の脚先に駆動力を持たない受動車輪を取り付け，歩行のための脚の自由度をそのまま用いてローラースケートと同様の原理で効率よく推進する脚-車輪型ハイブリッド移動体である (Fig. 1)．足首ロール角度を直角に変化させることで平坦地では車輪による推進，不整地では足の裏として用いて歩行を行うことで，歩行機械の特質を損なうことなく車輪移動機能を実現できる．特に受動車輪を用いた推進をローラーウォークと呼び，現在までに直進・旋回などの基本的運動生成法 [1]，走行路面に応じた適応的運動生成法が提案検証されてきた [2]．

しかしながら筆者らの従来研究は，推進速度を評価基準として論じており，その移動効率については直観的な憶測の域を出ていなかった．また近年研究されている二足歩行ロボットの脚先に受動車輪を装備する例においても [3][4][5]，筆者らの知る限り議論の中心は推進可能性や脚先軌道制御法であり，移動効率について深く検討されてはいない．本論文では直進ローラーウォークの移動効率の定量化と最適化を目標とし，移動仕事率を評価指標とした脚軌道パラメータの最適化を行う．計算機シミュレーションにより検討した後，実機を用いて総消費電力を測定することで検証実験を行う．また典型的な歩行であるクロール歩容との比較を行い，受動車輪推進の有効性を移動効率の観点から示す．

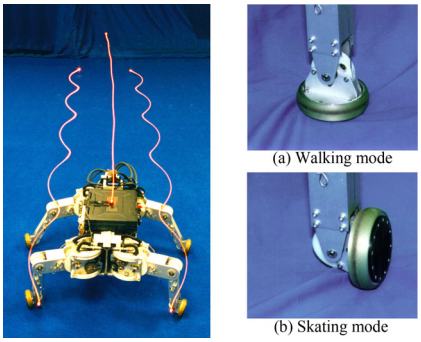

Fig. 1　Roller-Walker: the white lines show trajectories of the frontal leg ends and the body.(left)

2　シミュレーションモデル

ローラーウォークの脚軌道は可動範囲内で無限の可能性があるが，ここでは簡単のため脚を遊脚化せず，左右対称の周期運動をするという仮定の下，推進速度シミュレーションを行う．座標系を図 2 に示す．駆動される脚機構は本体に比して十分軽いため，その質量を無視し，ロボットの全質量を質点として本体中心に仮定する．車軸は脚に直角に固定され，Yaw 方向の自由度は持たない．またキャンバー角は常に 90 度であるとする．脚先の受動車輪位置を転がり方向（接線方向）と軸方向（法線方向）に各々正弦波で駆動する．（実機モデルの初期姿勢と可動範囲を考慮して適宜オフセットを加えている．）

$$d(t) = d_{offset} + d_0\big(\sin(\omega t + 3\pi/2) + 1\big) \tag{1}$$

$$\theta(t) = -\theta_0 \sin(\omega t + 3\pi/2 + \phi) \tag{2}$$

このとき制御パラメータは $d_0, \theta_0, \omega, \phi$ の 4 つである．胴体座標系における脚軌道の一例を図 2 に示す．一つの受動車輪に働く接線力，法線力の大きさはそれぞれ $F_t(t), F_n(t)$ として次式で表される．

$$F_t(t) = -sgn\big(V\cos\theta(t) + d(t)\dot{\theta}(t)\big)\cdot\mu_t\cdot W/4 \tag{3}$$

$$F_n(t) = -sgn\big(V\sin\theta(t) + \dot{d}(t)\big)\cdot\mu_n\cdot W/4 \tag{4}$$

ここで $sgn(*)$：符号関数，V：推進速度，μ_t, μ_n：接線・法線方向クーロン摩擦係数，W：ロボット重量である．後脚についても同様にモデル化を行い，推進速度の加減速を最小化

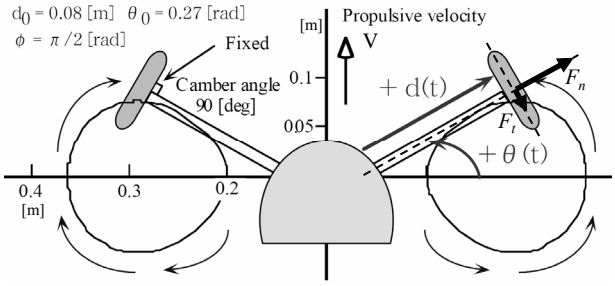

Fig. 2　Simulation model

するため前後の周期関数に対して位相差 $\phi_{fr} = 3\pi/2$[rad] を導入する [1]．このとき脚は左右対称に駆動されることから図中左右方向の力はキャンセルされ，上下方向の力のみがロボット本体に作用することになる．この推進力が本体質量を加速するものとして加速度を算出し，数値積分することで推進速度 V を求める．シミュレーションの時間刻みは 10[ms] とした．

なお推進可能となる必要条件は次式で表される．

$$|F_n(t)\sin\theta(t)| > |F_t(t)\cos\theta(t)| \tag{5}$$

ここで式 (3)（4）を代入し整理すると

$$|\theta(t)| > \tan^{-1}(\mu_t/\mu_n) \tag{6}$$

となり接線・法線方向の摩擦係数比に依存して推進可能な $\theta(t)$ の必要条件が規定される．

3　移動仕事率

移動のエネルギー効率を測る評価基準として次式で定義される無次元量，移動仕事率 ϵ を用いる [6].

$$\epsilon = \frac{E}{W \cdot L} \tag{7}$$

ここで，E : 移動に要するエネルギ [J]，W : 移動体に働く重力 [N]，L : 移動距離 [m] である．また分母分子を時間微分することで消費パワー P[W] と移動速度 V[m/s] を用いて次のように書ける．

$$\epsilon = \frac{dE/dt}{W \cdot dL/dt} = \frac{P}{W \cdot V} \tag{8}$$

移動仕事率は，その値が小さいほど高い移動効率を示す．摩擦係数 μ の路面上を滑る移動，重力に抗して上昇する移動の計算例を図 3 に示す．摩擦に抗する運動の場合，移動仕事率 $\epsilon = \mu$ となり，摩擦係数が小さければ小さいほど移動効率が高いことが分かり，直観とも一致する．重力に抗する運動では移動仕事率は 1 となる．

4　計算機シミュレーション

移動速度速度シミュレータを用いて，定常状態における移動仕事率を評価基準として脚軌道パラメータの最適化を行った．ここでは設定した脚軌道の物理的特性を検討するため，移動に要するパワーとして，純粋に受動車輪と走行路面の間で生ずる値だけを算出した．すなわち接線方向の転がり摩擦による損失と法線方向の滑り摩擦による損失の和である．

文献 [2] より，$\phi = \pi/2$[rad] のとき最も滑りが少なくなることが分かっている．また脚軌道角速度 ω と推進速度 V の間には良好な線形関係があることから，移動仕事率は ω に依存しないと考えられる．したがってここでは法線・接線方向の各々の振幅 d_0, θ_0 のみをパラメータとして最適化を行った．ここで d_0 と θ_0 は通常の車に例えればアクセルと変速比に各々相当することが分かっている [2].

計算機シミュレーションの結果を図 4 に示す．摩擦係数値は予備実験により得られたビニル床シートの実測値 $(\mu_t, \mu_n) = (0.026, 0.417)$ を用いた．

d_0 は大きいほど移動仕事率が低下（すなわち移動効率が上昇）することが分かる．また θ_0 は 0.17[rad] 付近で最小値を取ることが分かった．これは推進速度が高くなることにより移動仕事率が減少していると考えられる．

移動仕事率の値を転がり摩擦係数 μ_t で正規化すると，$0.11 \leq \theta_0 \leq 0.4[rad]$ の範囲でほとんど変化せず 1.3 以下であることが分かった．したがって推進に要するエネルギーの多くが転がり摩擦により消費されていることが分かり，効率的な脚軌道であることが理解できる．θ_0 が 0.1 以下の領域では式 (6) に示す推進の必要条件を満たすことが出来なくなることから急激に移動仕事率が上昇している．

5　実験

前節において，最適化された脚軌道では推進に要するエネルギーはほとんど転がり摩擦抵抗分だけであるという結果が得られた．しかしながら実験機においてこれを精度良く検証することは，転がり摩擦力の絶対値が小さいことから難しい．さらに実機の場合，アクチュエータ特性や各関節に働く摩擦など，エネルギ消費に影響を及ぼす支配的な因子が数多くあることから，ここでは一例として運動生成時の消費電力を求めることで実験的に移動仕事率を求める．この移動仕事率は前節で求めたシミュレーションの仮定と異なることから直接は比較することが出来ない．しかしながら絶対値を無視し，全体の傾向を比較することは可能であると思われる．

なお導出される移動仕事率は脚機構に大きく依存し，かつ，Gravitationally Decoupled Actuation(GDA) との兼ね合いから同一脚軌道であっても姿勢により変化すると予想される [7]．したがって受動車輪推進の移動仕事率について歩行機械すべてに適用可能な一般的議論をすることは不可能であるが，少なくとも同一脚機構を持つ移動体において，ローラーウォークと歩行のエネルギ効率を比較することは可能である．

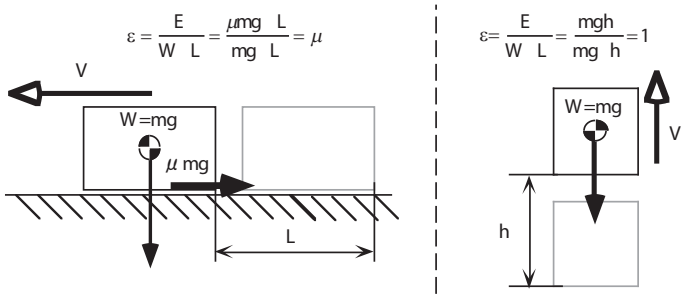

Fig. 3　Examples of specific resistance: work against friction resistance(left), work against gravity(right)

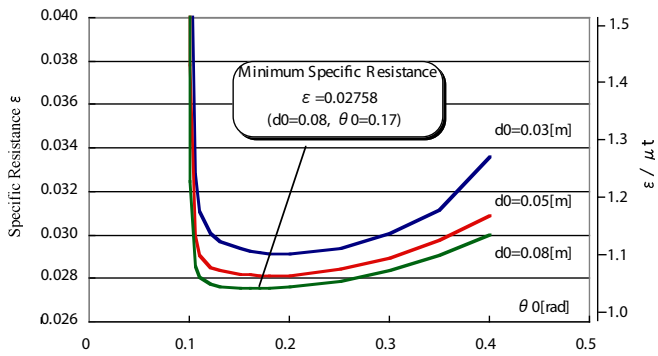

Fig. 4　Relationship between the leg trajectory parameters (d_0, θ_0) and simulated specific resistance ϵ

5.1 移動仕事率の測定

消費エネルギーの測定は電源である鉛蓄電池より供給される総消費電力の電圧・電流を計測することで求める．このとき，物理的な運動に関係しない消費電力を除くため，胴体部を支持し静止脚を宙に浮かせた状態でサーボを効かせたときの消費電力を測定し，その値をベースライン値として推進実験値から引くこととした．これは運動生理学で人間の運動によるエネルギ消費を計測する際に，安静時の基礎代謝を除くことに対応する．消費電力の計測と同時に推進速度をタコジェネレータによるデッドレコニングで計測し，式 (8) から定常状態における移動仕事率を算出する．

実験の様子を図 5 に示す．走行路面はシミュレーションと同様，滑らかで平坦なビニル床シートである．$d(t)$ 方向の可動範囲を最大化するためボディ中心の高さを基準姿勢から 0.07[m] 低く設定している．測定は停止状態から徐々に加速し，定常状態であると見なせるまで十分な距離，およそ 50[m] の走行を行った．これは無線によるマニュアル操作で ω を徐々に大きくしていくことで実現した．また θ_0 が小さい領域では路面のわずかな凹凸で進行方向が変化してしまうため，操舵のためのオフセットを同じくマニュアル操作で加えている．

d_0 をパラメータとして測定した移動仕事率を図 6 に示す．d_0 が大きくなるほど移動仕事率が下がる（すなわち移動効率が高くなる）傾向が見られる．また θ_0 をパラメータとした場合を図 7 に示す．グラフの傾向が図 4 と良く一致していることが確かめられる．実験的な最小値は推進速度が最大となる θ_0 のときに得られた．また ω をパラメータとした場合，ω が大きくなると僅かに移動仕事率が減少することが確かめられた．

以上の結果から，実験的に得られた移動仕事率の最小値は，$d_0 = 0.08[m], \theta_0 = 0.15[rad], \omega = 2\pi[rad/s]$ のとき $\epsilon = 0.44$ であった．

5.2 クロール歩容との比較

四脚歩行機械の典型的な歩容であるクロール歩容と，受動車輪による推進の移動仕事率を比較するため，クロール歩容の移動仕事率を計測した．

基準歩容姿勢において，デューティー比を 0.75，歩幅を 0.18[m]，遊脚高さを 0.05[m] とした．移動速度を 0.01 〜0.12[m/s] まで変化させ移動仕事率を測定した結果，0.04[m/s] 以上ではほぼ一定値の $\epsilon = 3.53$ となった．この値はローラーウォークのおよそ 8 倍であり，硬平地上における受動車輪推進の高いエネルギ効率が示された．

6 まとめ

本論文では移動仕事率を評価基準としてシミュレーションを行い，推進の移動仕事率がオーダーとしてほぼ接線方向摩擦係数に等しいことを示した．また実機を用いて移動仕事率の測定を行い，クロール歩容に比して 8 倍の移動効率があることを示した．

本論文での移動仕事率の測定実験は μ_t の小さいビニル床シート上で行われたため，車輪による移動効率が高いと考えられる．しかしながら，砂地のような路面の転がり抵抗が極めて大きい場合では，ローラーウォーク推進の移動仕事率は極端に増加するものと考えられる．これに対して歩行では路面に離散的に接地することで移動仕事率はあまり変化が生じないと考えられる．したがって路面の状況に応じた移動形態の選択が重要であると思われる．

環境を自律的に判断し，移動方式を切り替える手法は今後検討すべき重要な課題である．

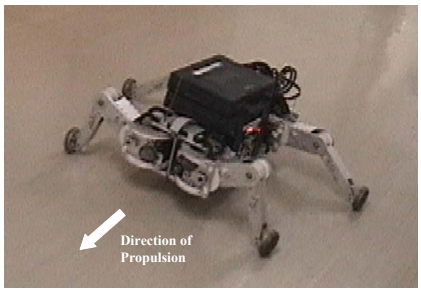

Fig. 5 Measurement of experimental specific resistance (lowering body height provides the larger d_0)

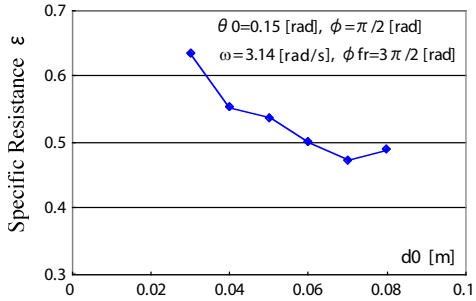

Fig. 6 Relationship between d_0 and experimental specific resistance ϵ

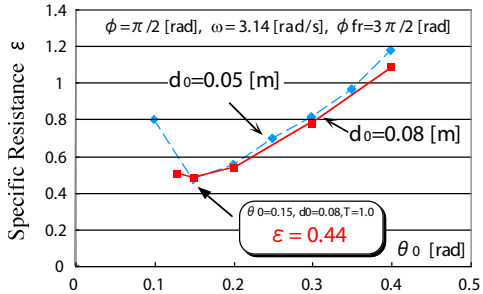

Fig. 7 Relationship between θ_0 and experimental specific resistance ϵ

参考文献

[1] 遠藤 玄, 広瀬 茂男:“ローラーウォーカーに関する研究-基本的運動の生成と自立推進実験- ”, 日本ロボット学会誌, 18, 7, pp.1159-1165, 2000.

[2] 遠藤 玄, 広瀬 茂男:“ローラーウォーカーに関する研究-脚軌道による推進特性の適応的調節-”, 日本ロボット学会誌, 26, 6, pp.691-698, 2008.

[3] 日向野光康, 氏田祐, 田口幹:“ 2 足スケーティングロボットＢＳＲ－１の研究 ”, ロボティクス・メカトロニクス講演会’06,1A1-D32, 2006.

[4] 熊谷正朗, 玉田薫谷:“ 旋回曲率を操作可能な台車による 2 脚ロボットのローラーウォーク ”, ロボティクス・メカトロニクス講演会’07, 2A1-J02, 2007.

[5] K. Hashimoto, Y. Sugahara, H. Lim, A. Takanishi: “ Swizzle Movement for Biped Walking Robot Having Passive Wheels ”, Journal of Robotics and Mechatronics Vol.20, No.3, pp. 413-419, 2008.

[6] G. Gabrielli and T. H. von Karman, “What price speed?”, Mechanical Engineering, vol.72, no.10, pp. 775–781, 1950.

[7] 有川敬輔, 広瀬茂男 : 3D 荒地用歩行ロボットの研究 (GDA と干渉駆動に基づく最適化歩行), 日本ロボット学会誌, vol.13, no.5, pp.720–726, 1995.