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12報：脚の抜重によるローラーウォークの高速化
Title	Study on Roller-Walker No.12: Velocity Increase by Vertical Leg Movement in Roller-Walk
著者	周宜新, 遠藤玄, 広瀬茂男
Author	Yi-Hsin Jou, 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 2012, , , 2A2-M01
Journal/Book name	Proceedings of the 2012 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, , , 2A2-M01
発行日 / Issue date	2012, 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 12 報：脚の抜重によるローラーウォークの高速化

Study on Roller-Walker

No.12: Velocity Increase by Vertical Leg Movement in Roller-Walk

周 宜新（ジョウアンドジョウ特許事務所） ○ 遠藤 玄（東工大） 正 広瀬 茂男（東工大）

Yi-Hsin Jou, JOU AND JOU Patent Offices,
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 a sole mode by rotating the ankle roll joint when Roller-Walker walks on rough terrain. This paper propose a velocity increase method by vertical leg movement in order to adjust weight distribution of the leg in accordance with a proper phase of the cyclic horizontal leg movement. We carried out hardware experiments and confirmed slight velocity increase.

Key words: Leg-Wheel Hybrid Robot, Roller-Walker, Vertical Leg Movement

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 (図 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 [2]，移動のエネルギ効率 [3] などが検証されてきた．

従来提案してきたローラーウォークは転倒しないよう常に四脚接地を仮定し，脚軌道を生成してきた．しかしながら人間のローラースケート運動のように遊脚を含む脚運動であれば，脚で蹴り出すような動的効果も利用でき，より高い運動性能が期待できる．一方で転倒しないためのバランス制御は脚先が受動車輪であることから，場合によっては劣駆動系となり大変難しい制御問題となってしまう．

そこで本研究では，脚を完全に遊脚化はしないものの，重力方向の上下動を加えることで，脚に働く垂直抗力を増減させ，これにより推進速度を向上させることを検討する．これはスケートボードなどで車輪にかかる力を上体の運動で制御する「抜重」に相当する．

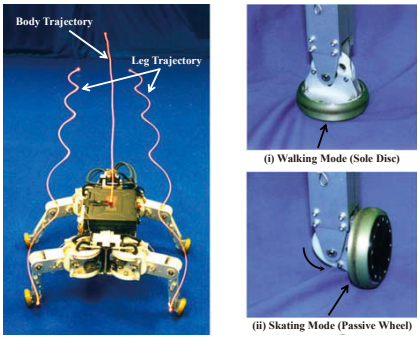

Fig. 1 Roller-Walker: the white lines show trajectories of the frontal leg ends and the body(left) and two modes of ankle joint(right).

2 従来の脚軌道

進行方向を X，重力に抗する紙面上向きを Z として右手系の胴体座標軸を設定する．脚は左右対称の周期運動をする（図 2）．このとき車軸は脚に直角に固定され Yaw 方向の自由度は持たず，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．）

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

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

このとき制御パラメータは $d_0, \theta_0, \omega, \phi$ の 4 つで，胴体座標系における脚軌道の一例を図 2 に示す．後脚についても同様の軌道とし，前後の周期関数に対して位相差 ϕ_{fr} を導入する [1]．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，進行方向の力のみがロボット本体に作用し推進することになる．

ところで脚軌道の位相と本体の推進速度を観察すると，1 周期の間に 2 回，おおよそ $\pi/2$[rad] 毎に加速（赤線）減速（青線）が発生していることが分かった．これは $\theta(t)$ が小さい場合，車輪の転がり方向と進行方向のなす角が十分ではなく，十分な推進力を発生できなくなるからであり，減速位相では車輪の転がり抵抗分だけ速度が低下する．よってこの 1 周期内での加減速位相に同期させて脚にかかる荷重（垂直抗力）を増減させることが出来れば転がり抵抗を減少させることができ，結果的に推進速度が向上する可能性がある．

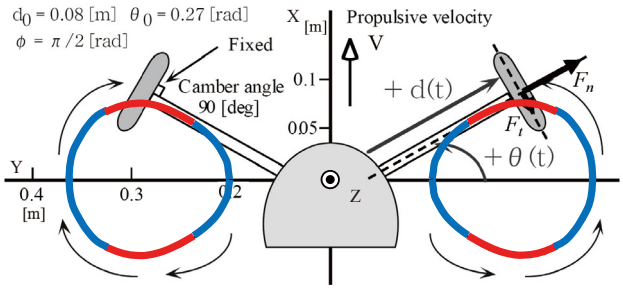

Fig. 2 Simulation model

3　提案する鉛直方向脚運動

前脚左右の式 (1)(2) に同期した鉛直方向 (Z 方向) 運動を脚位置の時系列軌道として与え，そのときの加速度を求めると次式になる．

$$Z(t) = Z_{offset} + Z_0 \sin(2\omega t + 3\pi/2) \tag{3}$$

$$\ddot{Z}(t) = -4\,\omega^2 Z_0 \sin(2\omega t + 3\pi/2) \tag{4}$$

XY 平面内での角速度 ω に対して，1 周期で 2 回の加減速位相があることから，Z 方向の角速度は 2ω としている．脚の Z 方向加減速と XY 平面内での脚位置の関係を図 3 に示す．加速位相ではより強く脚を踏み込み，減速位相では脚を引き上げることで垂直抗力を減ずる．

後脚についても同様の考え方で Z 方向の正弦波振動を導入するが，前後脚間の位相差は $\phi_{fr} = \pi$ とした．このように設定することで，重心位置は常に前後脚接地位置の中心に設定することができ，重心位置の変動による垂直抗力変化を抑えることが出来る．

4　動力学シミュレーション

提案した脚軌道を動力学シミュレータ Open Dynamics Engine を用いて検証した．（シミュレーションモデルの詳細は文献 [4] 参照のこと．）様々な Z_0 で速度シミュレーションを行ったが，脚可動範囲で最大である $Z_0 = 0.066$[m] のときに最も速度が大きくなった．図 4 に停止状態から加速し，定常速度で推進する様子の速度の時間変化を示す．従来軌道では定常速度の平均値 0.479[m/s] であるのに対し，新たに提案する脚軌道では 0.499[m/s] であり，推進速度の向上が確かめられた．

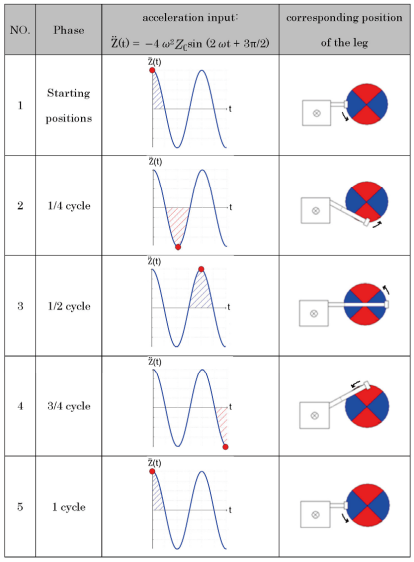

Fig. 3　Vertical leg acceleration according to the horizontal leg trajectory

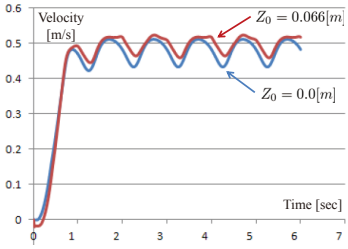

Fig.　4　Velocity simulation using Open Dynamics Engine (d_0=0.05[m], θ_0=0.3[rad], ϕ=$\pi/2$[rad], ω=3.14[rad/s], ϕ_{fr}=π[rad])

5　実験

提案する脚軌道を用いて実機により一定距離を定常速度で推進するときの時間を測定し，4 試行の平均値を計測値とした．また Z_0 をパラメータとして 0〜0.065[m] までの間 0.005[m] 毎に変化させて実験を行った．実験の様子を図 5 に，推進速度を図 6 に示す．Z_0=0.0[m] の従来脚軌道では 0.421[m/s] であったのに対し，Z_0=0.05[m] のとき最大値 0.43[m/s] となり速度上昇が確かめられた．しかしながらその効果は 2% 程度に留まっている．これは本実験条件が ω=3.14[rad/s]（周期 2.0[sec]）と比較的遅い振動で行ったためでロボット本体の固有振動の周期と整合性が取れていないためではないかと考えている．

6　まとめ

本報では鉛直方向の振動により脚の抜重を考慮した新たな脚軌道を提案し，その効果を検証した．今後はより広いパラメータ空間で最適値を求めてゆく予定である．

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] Gen Endo, Shigeo Hirose: ”Study on Roller-Walker -Energy Efficiency of Roller-Walk-”, Proc. ICRA, pp.5050-5055, 2011.

[4] Gen Endo, Keisuke Arikawa, Shigeo Hirose: “An Empirical Comparison of a Free Dynamics Simulator “ Open Dynamics Engine ” with TITAN-VIII Hardware Torque/Power Measurements”, Proc. ICRA, pp.6065-6070, 2011.

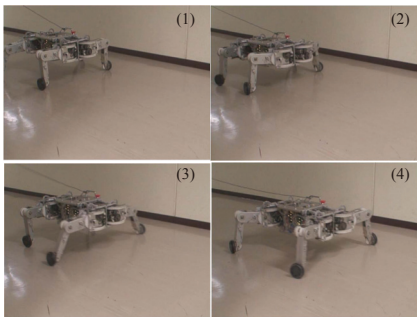

Fig. 5　Hardware experiment with the proposed leg trajectory (Z_0=0.015[m])

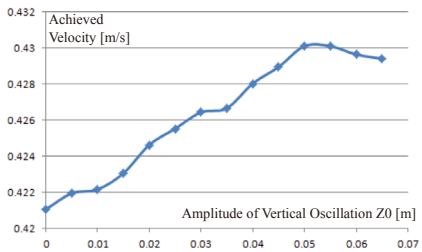

Fig. 6　Experimental velocity according to Z_0 (d_0=0.05[m], θ_0=0.3[rad], ϕ=$\pi/2$[rad], ω=3.14[rad/s], ϕ_{fr}=π[rad])