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第８報：ローラーウォーク軌道パラメータの適応的調節
Title	
著者(和文)	遠藤玄, 広瀬茂男
Authors	Gen Endo, SHIGEO HIROSE
出典 / Citation	第25回日本ロボット学会学術講演会予稿集, Vol. , No. , pp. 3K23
Citation(English)	, Vol. , No. , pp. 3K23
発行日 / Pub. date	2007, 9
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は日本ロボット学会に帰属します。 Copyright (c) 2007 The Robotics Society of Japan.

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

ローラーウォーカーに関する研究
第８報：ローラーウォーク軌道パラメータの適応的調節

○遠藤 玄 (東京工業大学) 広瀬 茂男 (東京工業大学)

Study on Roller-Walker
No.8: Automatic leg trajectory adaptation

*Gen ENDO *and* Shigeo HIROSE (Tokyo Institute of Technology)

Abstract— Roller-Walker is a leg-wheel hybrid mobile robot using a passive wheel equipped on the tips 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 describes automatic leg trajectory adaptation in case of wheeled locomotion. We propose asymptotical parameter tuning method to perform specified velocity. The method allows the robot to keep constant velocity on different surface with different friction in numerical simulations.

Key Words: Leg-wheel hybrid robot, Roller-Walker, Asymptotic parameter adaptation

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 [1]．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が提案されている．しかしながら従来の研究では脚軌道が定まった際に，結果として生成される推進速度についてのみ論じていた．本報では問題を逆にし，目標速度が与えられたときの脚軌道について検討する．特に走行路面の環境に応じて脚軌道パラメータを漸近的に調節する手法を提案し，計算機シミュレーションによって確認する．

2. シミュレーションモデル

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 Fig.2 に示す．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 つである．胴体座標系における脚軌道の一例を Fig.2 に示す．一つの脚先に働く力は次式で表される．

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

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

ここで 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．定常状態の推進

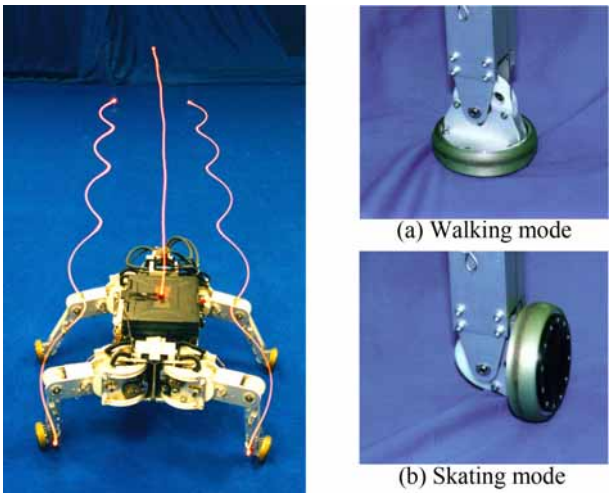

Fig.1 Roller-Walker

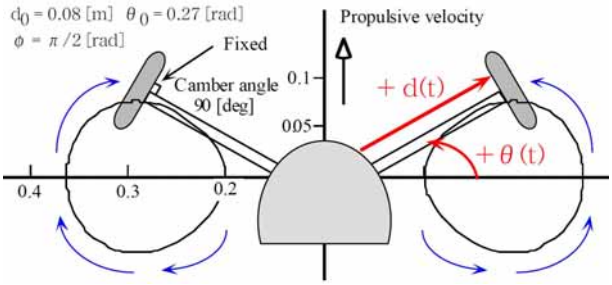

Fig.2 Simulation model

速度 V と各パラメータの関係を網羅的に調べた結果，以下のことが分かっている [2].

- V は d_0 の単調増加関数
- V の最大値を与える θ_0 が一点存在する
- V は ω と良好な線形関係がある
- V は $\phi = \pi/2$ で極大値をとる

簡単のため本報では $d_0 = 0.08[m], \phi = \pi/2[rad]$ として固定し，$V = f(\theta_0, \omega)$ とみなして，目標速度が与えられたときそれを実現する (θ_0, ω) を導出する．

3. 推進速度と脚軌道パラメータ θ_0, ω

まず始めに θ_0 と ω の物理的意味を定性的に解説する．θ_0 は推進方向と受動車輪の接線方向の為す角の最大値であり，θ_0 が大きいほど V は低下する反面，推進力は増加する．逆に θ_0 が小さいと V は増加し推進力は低下する．よって θ_0 は推進の減速比を代表するパラメータと考えられる [3]．また ω は大きくなるほど単位時間当たりに投入されるエネルギが増大するため V は増大する．以上から θ_0, ω を自動車で考えると θ_0 **はギア，ω はエンジン回転数**に例えることが出来る．

(θ_0, ω) をパラメータとして実機の可動範囲と出力を考慮してシミュレーションにより V を求めた（Fig.3）．受動車輪の接線・法線方向摩擦係数はビニル床の実測値 $\mu_n = 0.417, \mu_t = 0.026$ を用いた．$V \propto \omega$ を仮定し，さらに V と θ_0 の関係を 3 次の多項式で近似することで次の実験式を得る．

$$V(\theta_0, \omega) = f(\theta_0, \omega) = \omega \cdot g(\theta_0) \tag{5}$$

$$= \omega \sum_{k=0}^{3} a_k \theta_0^k \tag{6}$$

ここで $a_0 = 1.256, a_1 = -7.349, a_2 = 18.556, a_3 = -16.947$ であった．

この式を θ_0 または ω について解くことが出来れば目標速度を実現するパラメータが求められる．ところが自動車の場合，同じ速度であっても減速比によってエンジン回転数が異なるのと同様，(θ_0, ω) は無限の組み合わせが考えられ一意に定まらない．そこで物理的考察に基づくパラメータ適応則を次節で提案する．

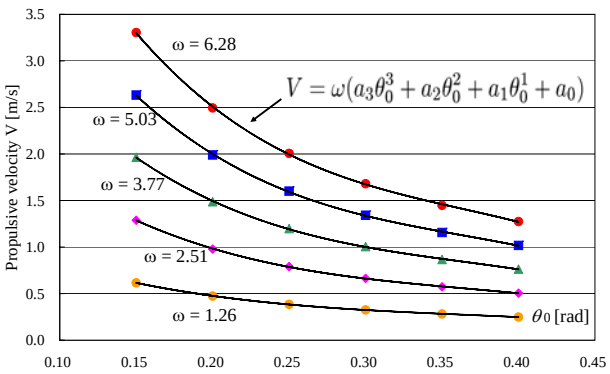

Fig.3 Simulated propulsive velocity with paramter θ_0 and ω

4. θ_0 適応則

ある一定の目標速度を達成するとき，θ_0 が小さい場合 ω も小さくなり移動効率も高くなる．一般に歩行機械の脚は高減速比で設計されるため，小さい ω は有利である．一方，θ_0 が小さい場合，推進力が低下し外乱に対して速度変動が大きくなる [2]．逆に θ_0 が大きい場合，推進力は大きくなり，停止状態からの動き出しや登坂には優れるが，高速移動では大きな ω となり実機では実現できない場合が生じる．そこで推進力を要する加減速時には大きな θ_0 をとり，目標速度に到達したら小さな θ_0 を取るよう，目標推進速度と現在速度の差に応じて θ_0 を適応的に調節することを提案する．θ_0 の目標値，最大値，最小値を各々 θ_0^{target}，θ_0^{max}，θ_0^{min} と定め，以下の条件で θ_0^{target} を設定する．

$$\theta_0^{target} = \begin{cases} \theta_0^{max} & |V/V_d - 1| > tol \\ \theta_0^{min} & \text{それ以外のとき} \end{cases} \tag{7}$$

ここで V_d は目標速度，tol は速度制御の許容誤差である．誤差が許容値以上の場合，何らかの加減速を要していることから，θ_0 を増大させる必要がある．したがって $\theta_0^{target} = \theta_0^{max}$ とした．また誤差が許容値以内である場合，ゆっくりとした脚軌道周期で移動効率を高めるよう $\theta_0^{target} = \theta_0^{min}$ とした．(なお実装では許容値付近でのチャタリングを防ぐため 1 周期分の時間，値をラッチした.）実際の θ_0 の変更は脚軌道の連続な遷移を保証するため k_{θ_0} をゲインとして以下のダイナミクスを導入する．

$$\dot{\theta_0} = -k_{\theta_0}(\theta_0 - \theta_0^{target}) \tag{8}$$

$$\theta_0 \leftarrow \theta_0 + \dot{\theta_0} \cdot \Delta t \tag{9}$$

5. ω 適応則

θ_0 が定まれば ω は導出できる．式 (5) より V_d が与えられたときそれを実現する ω_d は

$$\omega_d = V_d / g(\theta_0) \tag{10}$$

で与えられる．$\theta 0$ の適応と同様に k_{ω_d} をゲインとして以下のダイナミクスを導入する．

$$\dot{\omega} = -k_{\omega_d}(\omega - \omega_d) \tag{11}$$

$$\omega \leftarrow \omega + \dot{\omega} \cdot \Delta t \tag{12}$$

ところで式 (11) はビニル床上の平面を走行した場合に基づいて算出されている．概算の目標値としては適切だが，路面の摩擦抵抗が異なったり走行路面に傾斜がある場合は目標速度を達成できない．そこで実際の走行速度に基づいて k_v をゲインとするフィードバック項を導入する．

$$\dot{\omega} = -k_{\omega_d}(\omega - \omega_d) - k_v(V - V_d) \tag{13}$$

6. 計算機実験

$\theta_0 = 0.15$ と固定し $\omega_0 = 3.14, V = 0.0$ を初期値として，ω 適応則（式 (11)，$k_{\omega_d} = 10.0$）により速度制御した結果を Fig.4 に示す．μ_n, μ_t は式 (6) 導出時と同じ値を用いた．定常状態に達した際の速度 V は，目標値 V_d とよく一致することが分かる．しかしながら μ_n, μ_t が式 (6) 導出時と異なる場合，例えばカーペットの実測値 $\mu_n = 0.61, \mu_t = 0.057$ のときには Fig.5 に示すように大きな誤差を生ずる..

そこで式 (13) によって ω を適応させる（$k_v = 50.0$）．これにより定常状態での平均速度 V_{ave} は 0.354 から $0.481[m/s]$ へと向上し，目標値 $V_d = 0.5[m/s]$ によく追従していることが分かる．よって走行路面の摩擦係数が変化したとしても実際の走行速度に基づいて ω を漸近的に適応させれば目標速度が達成できることが示唆された．なお速度変化に対するゲイン k_v を大きく取

ることにより，脚軌道 1 周期内の速度変動も抑制できる可能性がある．

次に θ_0 適応則を加えて，初速ゼロから加速する場合を考える (Fig.6)．まず推進速度 V は時刻 15 秒以降ではほぼ $2.0[m/s]$ に到達しておりどの場合でも速度制御が実現できているが，その加速特性は顕著な差が見られる．まず式 (11) のみの場合 ($k_{\omega_d} = 10.0, k_v = 0.0, k_{\theta_0} = 0.0$)，$\omega$ は時刻 0.4 秒で一定値に達しそれ以降 V は緩やかに加速しおよそ 15 秒でようやく目標速度に到達している．次に式 (13) の場合 ($k_{\omega_d} = 10.0, k_v = 50.0, k_{\theta_0} = 0.0$)，$\omega$ は大きく増加しているが V の速度はさほど増えていない．つまり θ_0 が小さい状態ではいくら ω を増加しても加速に寄与しにくいと考えられる．これに対し，θ_0 の適応を導入した場合 ($k_{\omega_d} = 10.0, k_v = 50.0, k_{\theta_0} = 1.0$)，運動開始からおよそ 3 秒間 θ_0 は増加し，その間に目標速度まで急速に到達している．そして V_d 到達後は θ_0, ω とも減少し，式 (11) の定常値と同じ値に収束している．以上のことから提案した手法が加速性に大きく寄与することが示唆される．

最後にビニル床上を定常走行しているとき時刻 5〜10 秒にかけてカーペットがあった場合の実験結果を Fig.7 示す（乗り移りの段差はなく摩擦係数のみが変化したと仮定した）．ω 適応則の式 (11) ではカーペットの領域で減速している様子が分かる．式 (13) では減速に応じて ω が増大しており，式 (11) に比して減速は抑えられているものの十分ではない．これに対し θ_0 適応則を加えると，カーペットの領域では θ_0 が増加するのに追従して ω も急速に増加し，速度の低下を抑えている．これは自動車の AT 車が加速が必要な際，自動的にギアを落としアクセルを噴かす「キックダウン」することと同じ効果であると考えられる．

以上により θ_0, ω 適応則の導入で路面変化に対してロバストに目標速度を維持することが可能であることが示唆された．

7. まとめ

本報では目標推進速度が与えられたときに脚軌道パラメータを漸近的に適応する手法を提案し，シミュレーションにより検証した．減速比の設定には任意性があり本手法はあくまで一例に過ぎないが，脚軌道パラメータを自律的に変化させることで，オートマチック変速機に相当する制御を提供しうることが示唆された．今後は実機による検証を行っていく．

[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:“索状能動体と脚車輪ハイブリッド移動体におけるグライド推進の研究”, 平成 12 年東京工業大学学位論文 (http://tdl.libra.titech.ac.jp/cgi-bin/z3950/full_display.cgi?pid=24479&findex=0&pagecnt=10&dspcnt=0&tgetidx=0&cgi_no=5&search_mode=DOCTJ)

[3] 遠藤 玄, 広瀬 茂男:“ローラーウォーカーに関する研究-第 7 報：ローラーウォーク脚軌道による減速比調整-”, 第 19 回日本ロボット学会学術講演会，3E+14(1)-(2),2001

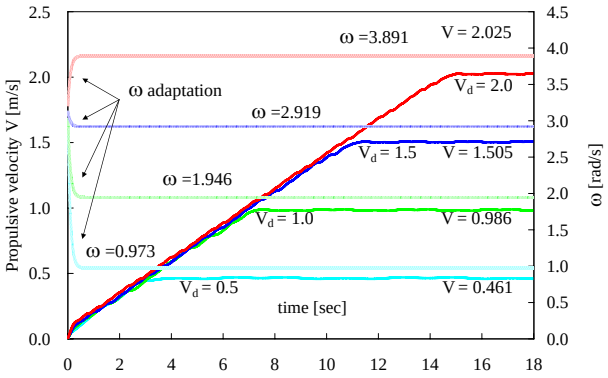

Fig.4 Velocity control by ω adaptation (Eqn.(11))

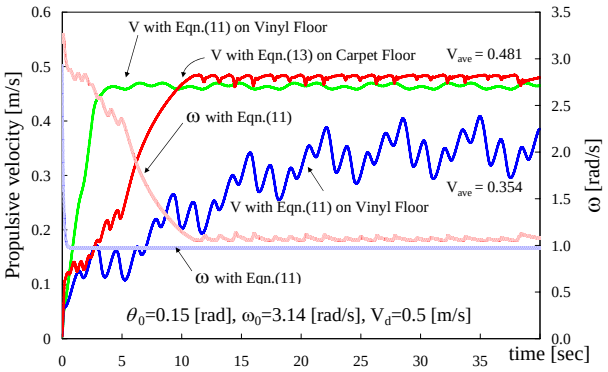

Fig.5 Comparison between Eqn.(11) and Eqn.(13) on carpet floor

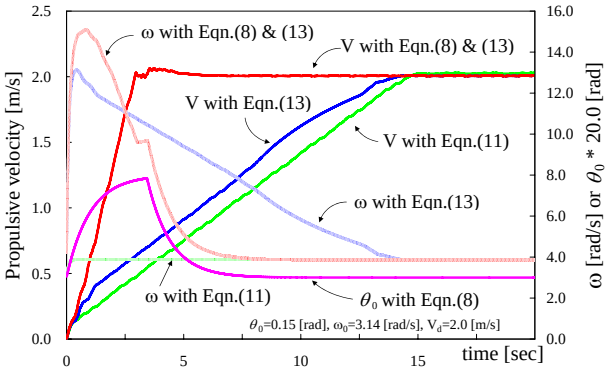

Fig.6 Effect of θ_0 adaptation in acceleration phase

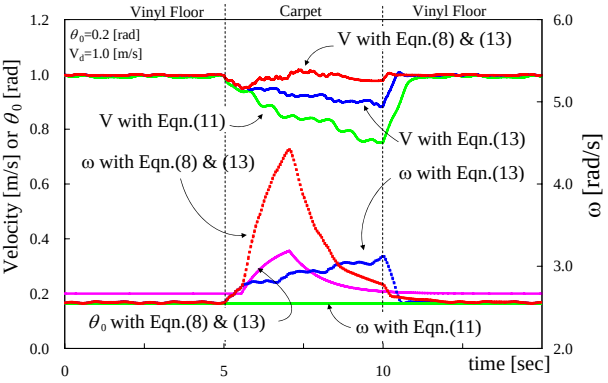

Fig.7 Adaptation to different surface