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(和文)	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-
Title	Study on Roller-Walker - Adaptation of Characteristics of the Propulsion by a Leg Trajectory -
著者(和文)	遠藤玄, 広瀬茂男
Authors	Gen Endo, SHIGEO HIROSE
出典 / Citation	日本ロボット学会誌, Vol. 26, No. 6, pp. 691-698
Citation(English)	Journal of Robotics Society of Japan, Vol. 26, No. 6, pp. 691-698
発行日 / Pub. date	2008, 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) 2008 The Robotics Society of Japan.

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

学術・技術論文

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—

遠藤　玄* 広瀬茂男*

Study on Roller-Walker
—Adaptation of Characteristics of the Propulsion by a Leg Trajectory—

Gen Endo* *and* Shigeo Hirose*

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 describes adaptation of characteristics of the propulsion by a leg trajectory in the case of wheeled locomotion. Firstly, we define a leg trajectory to produce forward straight propulsion and discuss the relationships between the parameters of the leg trajectory and the characteristics of the propulsion. Secondly, we demonstrate that Roller-Walker could achieve high speed propulsion and slope climbing propulsion by changing the parameters of the leg trajectory in the hardware experiment. Thirdly, we propose an automatic leg trajectory adaptation method which is asymptotical parameter tuning method to perform specified velocity on the different surfaces with different friction. We evaluate the adaptation method in the numerical simulations. The results suggest that this adaptation method would provide the Roller-Walker with a function of an automatic transmission of a usual car.

Key Words: Mobile Robot, Leg-Wheel Hybrid Vehicle, Passive Wheel, Roller-Walker

1. はじめに

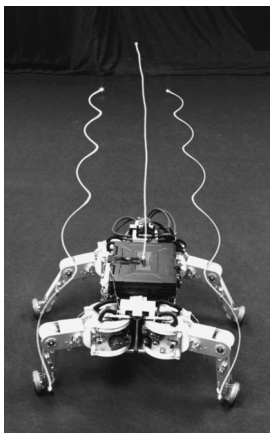
脚によって離散的な支持点を選択しつつ移動する歩行型移動方式は，以下に示す特異な機能を発揮しうる．

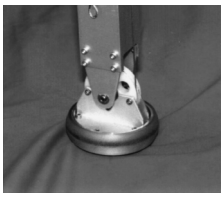
(1) 凹凸の激しい不整地を対地適応的に移動できる．
(2) 脆弱な地表面でも車輪のような連続的な轍を残さないため移動効率が低下しない．
(3) スリップなしでホロノミックな全方向移動ができる．
(4) 搭載作業機器のための安定で動的な足場を脚により構成できるため搭載機器の作業台となる．

これらの歩行機械独特の特長を生かし，山間部のコンクリート傾斜面上で削孔を行う建設作業用 4 脚歩行機械 TITAN-XI [1] や，森林での伐出を行う森林作業用 6 脚歩行機械 The Walking Forest Machine [2] が開発され，現在では実用化を目前に控えるまでに研究が進展している．一方で移動すべき環境が舗装路面など平坦地である場合には，車輪型移動方式の方がはるかに高い移動速度および移動効率を実現することができる．そのため，脚型歩行と車輪型移動の両方の特長を組み合わせ，凹凸の激しい不整地では歩行，整地された硬平地では車輪走行を行ういわゆる「ハイブリッド走行車」を構成しようとする試みがこれまでなされてきた [3]～[11]．しかしながら，これらの従来研究の多くは駆動力を持った能動車輪を用いているため，車輪駆動用アクチュエータやステアリング機構などが必要であり，その結果，ハイブリッド化に伴う重量増加は過大なものとなっていた．これらの複雑で質量の大きな機構は，車輪型推進には適した機能であっても，歩行型移動を行う際にはその質量ゆえ脚の運動性能を低下させ，歩行性能を大きく制限する可能性がある．より高性能な移動体を設計するためには，機構質量の軽量化を計ることは第一義的な要因であり，ただでさえ自由度が多く駆動系が重くなりがちな歩行機械に，さらに質量を付加する能動車輪を用いたハイブリッド化は大きな問題があると筆者らは考えている．

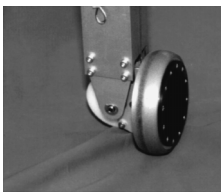
このような観点から，筆者らは歩行機械本来の性能を極力阻害することのないハイブリッド移動体として，最も簡素な車輪機構である受動車輪を用いた脚–車輪型移動体「ローラーウォーカー」を提案し研究開発を行ってきた [12]～[14]．開発したローラーウォーカーの概観を **Fig. 1** に示す．ローラーウォーカーは歩行機械の脚先に駆動力を持たない受動車輪を装備することで，歩行のための脚の自由度をそのまま用いてローラースケートと同様の原理で効率よく推進する．この推進をローラーウォークと呼ぶことにする．また足首ロール角度を直角に変化させることで平坦地では車輪による推進（Fig. 1 (b)），不整地では足の

原稿受付　2007 年 12 月 15 日
*東京工業大学
*Tokyo Institute of Technology
■ 本論文は提案性で評価されました．





(a) Walking mode



(b) Skating mode

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

裏（Fig. 1 (a)）として用いて歩行を行う．

このような構成にすると以下のような利点がある．

(1) 機構質量増加を大きく抑制することができる．
(2) 既存の歩行機械を簡単にハイブリッド化できる．
(3) 歩行のための脚出力を車輪推進に利用できる．
(4) 高い対地適応性能が期待できる．

特に（4）に関して，ローラーウォークの最も興味深い特性として，**脚軌道を変化させることでその推進特性を大きく変化させることが可能**であることが挙げられる．例えば坂道を登坂するような大きな推進力を要する移動や，平坦地上での高速移動を考えるとき，通常の能動車輪では変速機を使わなければこれら二つの推進を同時に実現するのが難しいのに対し，ローラーウォークでは脚軌道を変更するだけで対応することが可能であると予想される．さらにこの脚軌道変化を路面状況に応じて行えば，より高い対地適応性を持つ推進が可能になると考えられる．

現在までにローラーウォークにより直進・旋回などの基本的運動を生成する脚軌道が導出され，計算機シミュレーションおよび実機推進実験により，歩行に比して十分高速の移動が可能であることが確かめられている [13]．しかしながら従来研究では，基本的運動の生成が可能であることが報告されたのみで，脚軌道と推進力・推進速度の関係は詳しく論じられてはいなかった．また近年盛んに研究されている 2 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 [15]～[17]，論じられているのは主に推進可能性や脚先軌道制御法であり，脚軌道と推進特性の関係について詳しく議論はされてはいない．

本論文では，直進ローラーウォーク脚軌道と推進特性の関係に焦点を当てる．まず初めに脚軌道を規定するパラメータのパラメトリック・スタディを行い，各パラメータの物理的意味を解説する．その結果を利用して，高速移動と推進力を要する登坂移動が脚軌道の調節により実現可能であることを計算機シミュレーションおよび実機実験によって明らかにする．次に所望の目標推進速度が与えられたとき，それを実現する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．本論文は次のように構成される．第 2 章では計算機シミュレーションに用いた運動学モデルについて述べ，第 3 章では脚軌道を決定するパラメータと推進特性について論じる．続く第 4 章では脚軌道パラメータの漸近的な適応則を提案し，第 5 章では計算機シミュレーションによる実験結果を示す．最後に第 6 章でまとめと今後の課題について述べる．

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 **Fig. 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）におのおの正弦波で駆動する（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）．

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

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

ここで d_0，θ_0 はおのおの法線・接線方向の振幅であり，d_{offset} は法線方向位置オフセットを表す．ω は正弦波の角速度であり，ϕ は法線方向振動に対する接線方向振動の位相差である．このとき制御パラメータは d_0，θ_0，ω，ϕ の四つである．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．

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

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

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（なお本モデルでは解析を簡単にするため法線方向滑りを許容し，動摩擦力によって推進力を得ている．滑りが生じると移動効率を低下させる可能性があるが，式（1），（2）に示す脚軌道でも一定速度で推進する場合には法線方向滑りを生じないことが解析的に導出できる（付録参照）．したがって，本脚軌道を用いても高効率の移動が可能である）．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 [2]．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．

$$|F_n(t)\sin\theta(t)| > |F_t(t)\cos\theta(t)| \qquad (5)$$

ここで式（3），（4）を代入し整理すると

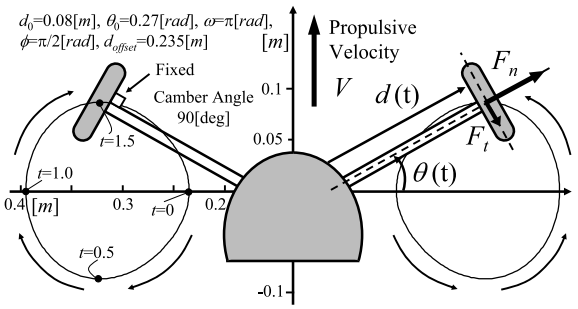


Fig. 2 Simulation model

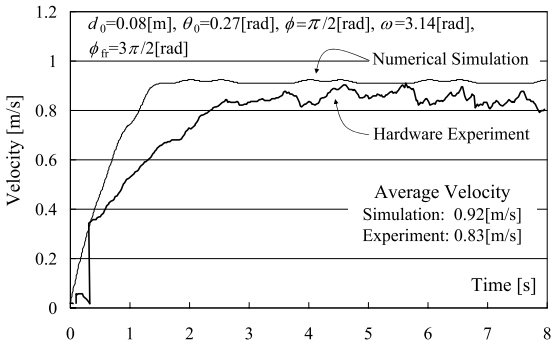


Fig. 3 An example of a numerical velocity simulation and a hardware experiment

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

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．

速度シミュレーションの一例を，実機実験結果と合わせて **Fig. 3** に示す．定常状態に達したときの平均速度を実験値と比較すると，シミュレーションとの誤差は 10%程度であり，パラメトリック・スタディを行うのに十分な精度であると思われる．

3. 脚軌道と推進特性

式（1），（2）で定義された脚軌道において，制御可能なパラメータは d_0，θ_0，ω，ϕ の四つである．本章では定常状態に達したときの平均推進速度 V を評価指標として，各パラメータの物理的意味を定性的に議論する．計算機シミュレーションに要する時間は非常に短いため，全検索によるパラメトリック・スタディが可能である．分析の詳細は文献 [18] に譲り，ここでは結果のみをまとめると以下のようになる．

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

軌道パラメータ d_0，ω，θ_0 と V の関係をさらに詳しく考察する（ϕ についての考察は付録を参照されたい）．

3.1 法線方向振幅 d_0 および角速度 ω

ローラーウォークは受動車輪の持つ摩擦抗力の異方性を利用して推進する．このとき接線方向の摩擦係数は微少であることから，法線方向摩擦力を源として推進力が生成される．よって法線方向振幅 d_0 が増大するにつれ，脚軌道一周期内に投入されるエネルギー量が増加し，その結果として V も増加すると考えられる．また，脚軌道角速度 ω が大きくなるにつれ単位時間に投入されるエネルギー量が線形に増大することから（2）の結果が説明できる（解析的な考察は付録参照）．

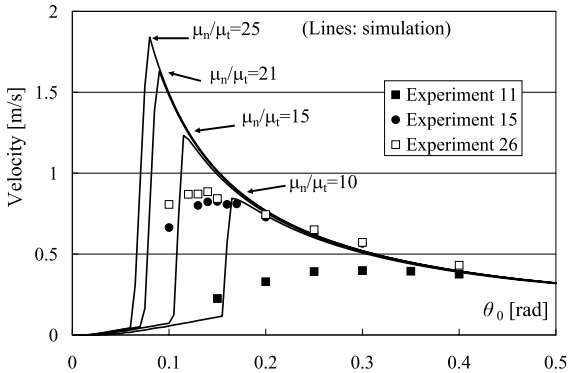


Fig. 4 The relationship between generated velocity and θ_0 with different friction coefficient ratio ($d_0 = 0.05$ [m], $\phi = \pi/2$ [rad], $\phi_{fr} = 3\pi/2$, $\omega = 3.14$ [rad/s])

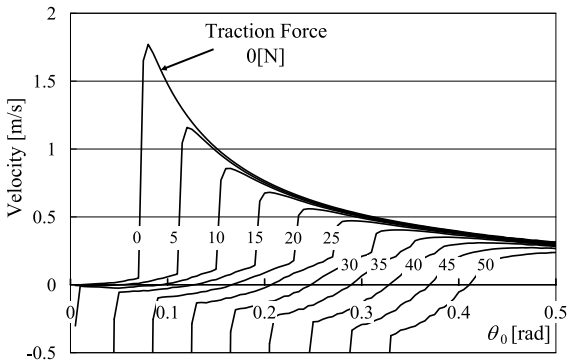


Fig. 5 The relationship between θ_0 and generated velocity with different traction force ($d_0 = 0.05$ [m], $\phi = \pi/2$ [rad], $\phi_{fr} = 3\pi/2$, $\omega = 3.14$ [rad/s], $\mu_n/\mu_t = 25$)

通常の自動車に例えればこれら d_0，ω はエンジントルクと回転数に対応し，増大させるにつれ推進速度が増加することから，アクセルに相当するものと考えられる．

3.2 接線方向振幅 θ_0

ローラーウォークは接線・法線方向の摩擦係数 μ_t，μ_n に依存して推進速度が変化すると予想される．摩擦係数をパラメータとして V を比較したところ，V は摩擦係数比 μ_n/μ_t の関数として表せることが分かった（**Fig. 4**）．速度シミュレーションの結果を実線で示す．θ_0 を大きな値から徐々に小さくするに従い V が上昇し，最大速度を与える θ_0 よりさらに低下すると急激に推進速度が低下することが分かる．この現象は式（6）の推進可能条件から理解できる．また θ_0 の大きな領域では摩擦係数比に依存せずほぼ同じ推進速度を示すが θ_0 の小さな領域では μ_n/μ_t が大きいほど高速の推進が可能であることが分かる．

次に推進力の大きさを定量的に議論するため，推進方向とは逆向きに 0〜50 [N] の範囲で一定の力を負荷した場合のシミュレーション結果を示す（**Fig. 5**）．停止状態から加速に要する力を除くためシミュレーション開始時の初速を $V_0 = 2.0$ [m/s] と

し，十分時間が経過した後の定常速度を図示している．θ_0 を大きくとると，より大きな力に抗して推進できることが分かる．

以上の結果をまとめると接線方向振幅 θ_0 は，法線方向摩擦力を推進方向に変換する割合，すなわち推進における出力減速比を規定するパラメータと考えられる．通常の自動車で例えれば **θ_0 は変速比に相当**するものと考えられる．

3.3 実機による推進実験

θ_0 をパラメータとして実機による定常推進速度を測定した．走行路面は絨毯・ビニル床シート・石タイルの三種で摩擦係数比 μ_n/μ_t はそれぞれ 11，15，26 となっている．実験結果を Fig. 4 にプロットする．θ_0 が大きい領域ではシミュレーション結果と実機実験値は比較的よく一致するのに対し，θ_0 が小さい領域では大きな差異が見られる．これは計算機シミュレーションでは微小な推進力を長い時間をかけて積分し，その結果定常速度に達しているのに対し，実機では走行路面の凹凸などの外乱により微小な推進力が相殺されてしまうものと考えられる（なお，石タイル上での推進実験では過大な摩擦係数のため法線力が脚アクチュエータの出力限界を超える場合があり，それによりシミュレーション推進速度と一致しなかった）．

次に無線により操縦者が (θ_0, ω) の指令値を送信できるシステムを実装し，ビニル床シート上で推進実験を行った．$\theta_0 = 0.3\,[\mathrm{rad}]$ とし ω をゼロから徐々に大きくすると停止状態から滑らかに加速していく様子が確かめられた．またその操縦性は通常の自動車の場合とまったく遜色がなかった．さらに ω を一定に保ったまま，θ_0 を 0.3 [rad] から 0.15 [rad] まで徐々に減らすことで，推進速度が滑らかに増加することを確かめた．最大推進速度は $d_0 = 0.08\,[\mathrm{m}]$，$\theta_0 = 0.15\,[\mathrm{rad}]$，$\omega = 1.57\,[\mathrm{rad/s}]$ のとき 2.25 [m/s] であり歩行に比して著しく高速の推進が確認された．また推力が必要な停止状態からの加速推進では $\theta_0 = 0.15\,[\mathrm{rad}]$ とするとその場で法線方向滑りを生じるのみでほとんど推進することができなかった．このことから，小さい θ_0 は低減速比の状態であり加速に必要な推進力を十分に発生できていないことが分かった．

さらに脚可動範囲内で最大の $\theta_0 = 0.4\,[\mathrm{rad}]$ とし，傾斜角 3.0 [deg]（5.3%勾配）の車椅子用石タイルスロープ上で登坂実験を行った．およそ 0.32 [m/s] の速度で登坂推進可能であることを確かめた（**Fig. 6**）．

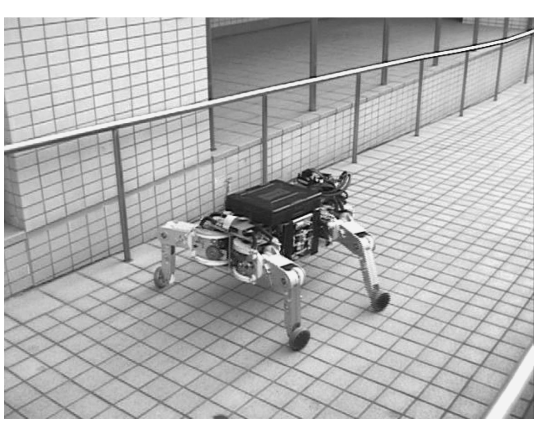


Fig. 6 Slope climbing experiment ($\theta_0 = 0.4\,[\mathrm{rad}]$, $\omega = 2.88\,[\mathrm{rad/s}]$, $V = 0.32\,[\mathrm{m/s}]$)

以上から ω を変化させることで推進速度が調節可能であり，また θ_0 が推進の減速比を規定するパラメータであることが確かめられ，それらを変化させることで多様に推進特性を調節することが可能である，本推進の有効性が示された．

4. 脚軌道パラメータ適応則

ローラーウォークは脚軌道パラメータを調節することで多様な推進特性を発揮しうる．そこで前章までの結果を踏まえ，本章では脚軌道パラメータを環境に応じて漸近的に変化させる適応則を提案する．

脚軌道による推進特性の調節は，受動車輪による推進と原理的に同一なスピードスケートの場合にも観察される．加速力が必要なスタートのとき，スケート選手はスケートエッジ先端を蟹股に大きく開き，速いピッチで氷上を走るように滑走する．一方十分に速度が得られた後は，スケートエッジは進行方向にほとんど平行になり，ゆっくりとしたピッチで氷を力強く左右方向に押すようにして高速推進する．このように状況や環境に応じて推進特性を自律的に調節することができれば，より高い対地適応性を持ったローラーウォーク推進が可能になる．

本論文ではその第一歩として**推進速度を目標速度に保つこと**を目的とする．今までの議論では脚軌道パラメータが設定されたとき，結果として生じる推進速度について検討していたが，本章以降では問題を逆にし，目標推進速度が与えられたときに，それを達成するよう脚軌道パラメータを調節する．特に路面の摩擦係数が変化するような場合でも実測推進速度を手がかりに自律的に脚軌道パラメータを変化させる漸近的適応手法を提案する．

前述のように制御可能な脚軌道パラメータは d_0，θ_0，ω，ϕ の四つであるが，簡単のため以降の議論では一部のパラメータを固定し低次元化することを考える．3.1 節で述べたように d_0，ω の二つのパラメータは推進のために系に投入されるエネルギーを規定しており，冗長なパラメータであることから，どちらか一方を固定することを考える．推進速度 V と d_0，ω の関係をおのおの数値シミュレーションにより比較すると，ω のほうが d_0 に比してより高い線形性をもって V を変化させることが分かった．したがって推進速度調節は ω を用いることとし，d_0 は可動範囲の最大値である $d_0 = 0.08\,[\mathrm{m}]$ として固定した．また ϕ については幾何学的に法線方向滑りを生じない最も移動効率の高い値として $\phi = \pi/2\,[\mathrm{rad}]$ を選択し固定した（付録参照）．以上の簡単化の結果，以降の議論では $V = f(\theta_0, \omega)$ 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．また推進速度 V は実際の推進速度を表し，観測可能であると仮定する．

4.1 推進速度実験式

(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. 7**）．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．

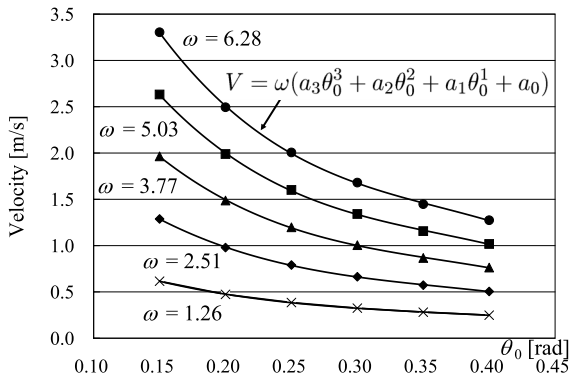


Fig. 7 Simulated propulsive velocity with parameter θ_0 and ω on the vinyl floor

$$V(\theta_0,\omega) = f(\theta_0,\omega) = \omega \cdot g(\theta_0) \tag{7}$$

$$= \omega \sum_{k=0}^{3} a_k \theta_0^k \tag{8}$$

ここで $a_0 = 1.256$，$a_1 = -7.349$，$a_2 = 18.556$，$a_3 = -16.947$ であった．なお $f(*)$，$g(*)$ は関数である．

この式を θ_0 または ω について解くことができ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．

4.2 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 [18]．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，3.3 節で示したように 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．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 を取り，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，最小値をおのおの 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．

$$\theta_0^{target} = \begin{cases} \theta_0^{max} & |V/V_d - 1| > tol \\ \theta_0^{min} & \text{それ以外のとき} \end{cases} \tag{9}$$

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}，Δt をそれぞれゲイン，シミュレーション時間刻みとして以下のダイナミクスを導入する．

$$\dot{\theta_0} = -k_{\theta_0}(\theta_0 - \theta_0^{target}) \tag{10}$$

$$\theta_0 \leftarrow \theta_0 + \dot{\theta_0} \cdot \Delta t \tag{11}$$

4.3 ω 適応則

θ_0 が定まれば ω は導出できる．式（7）より V_d が与えられたときそれを実現する ω_d は

$$\omega_d = V_d / g(\theta_0) \tag{12}$$

で与えられる．θ_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．

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

$$\omega \leftarrow \omega + \dot{\omega} \cdot \Delta t \tag{14}$$

ところで式（13）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，路面の摩擦係数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．そこで実際の推進速度 V 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．

$$\dot{\omega} = -k_{\omega_d}(\omega - \omega_d) - k_v(V - V_d) \tag{15}$$

以降便宜上，式（13），（15）を「ノミナル ω 適応則」，「実速 ω 適応則」と呼ぶことにする．

5. 計 算 機 実 験

提案した適応則を，計算機シミュレーションにより検証する．$\theta_0 = 0.15$ [rad] と固定し $\omega_0 = 3.14$ [rad/s]，$V = 0.0$ [m/s] を初期値として，ノミナル ω 適応則式（13）（$k_{\omega_d} = 10.0$）により速度制御した結果を **Fig. 8** に示す．μ_n，μ_t は式（8）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．しかしながらノミナル ω 適応則は μ_n，μ_t が式（8）導出時と同じ場合にのみ有効であり，例えば絨毯（実測値 $\mu_n = 0.61$，$\mu_t = 0.057$）のときには大きな誤差を生ずる．目標速度 $V_d = 0.5$ [m/s] とし絨毯上を走行した場合の推進速度を **Fig. 9** 黒細線で示す．定常状態における平均速度は $V_{ave} = 0.354$ [m/s] となり，目標速度を達成できていない．

そこで実速 ω 適応則式（15）によって ω を適応させる（$k_v = 50.0$）．これにより 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．なお実速 ω 適応則は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 周期内の速度変動をも抑制できる可能性がある．

次に θ_0 適応則を加えて，ビニル床上で初速ゼロから加速する場合を考える（**Fig. 10**）．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．まずノミナル ω 適応則のみの場合（$k_{\omega_d} = 10.0$，$k_v = 0.0$，$k_{\theta_0} = 0.0$），ω 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．次に実速 ω

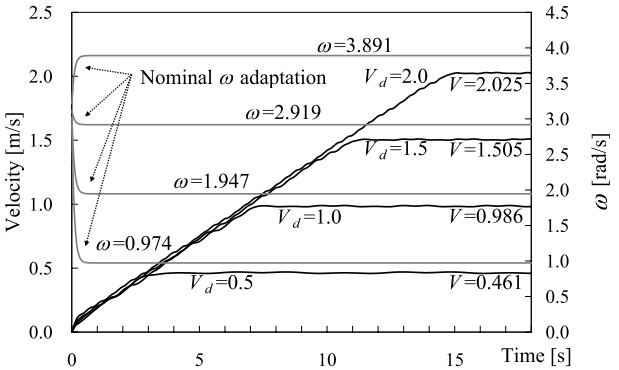


Fig. 8 Velocity control by nominal ω adaptation (Eqn. (13)) (Black lines are V and gray lines are ω)

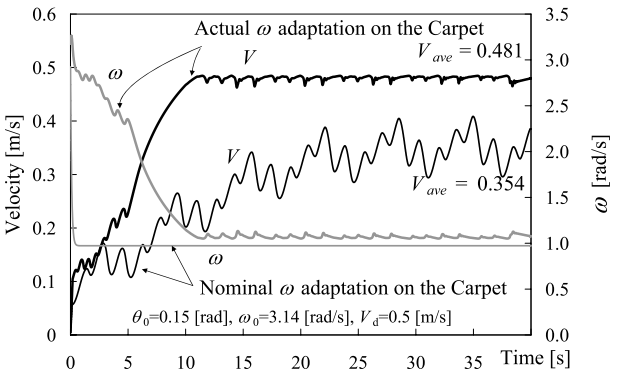


Fig. 9 Comparison between nominal ω adaptation (Eqn. (13)) and actual ω adaptation (Eqn. (15)) on the carpet

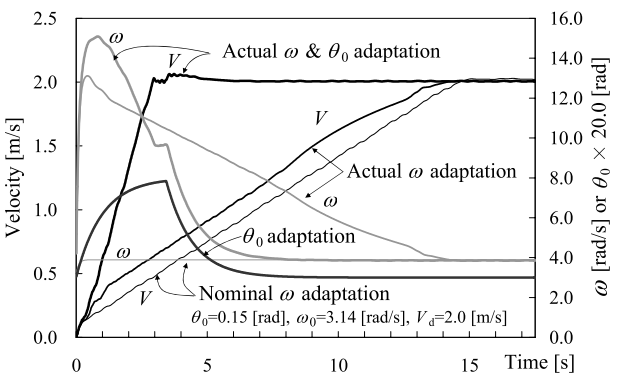


Fig. 10 Effect of θ_0 adaptation in acceleration phase

適応則の場合（$k_{\omega_d} = 10.0$，$k_v = 50.0$，$k_{\theta_0} = 0.0$），ω は大きく増加しているが V 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，ノミナル ω 適応則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 θ_0 適応則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. 11** 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）．ノミナル ω 適応則ではカーペットの領域で減速している様子が分かる．実測 ω 適応則では減速に応じて ω が増大しており，ノミナル ω 適応則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．これはオートマチック自動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．

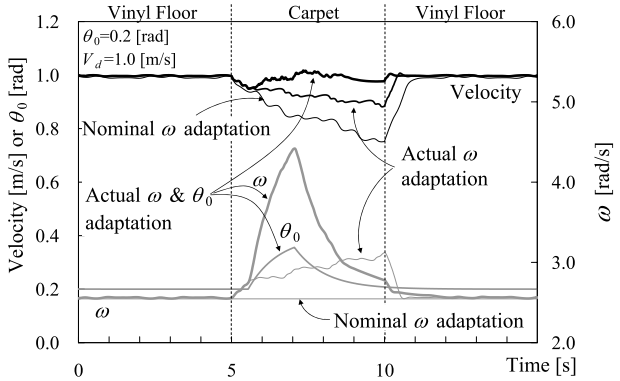


Fig. 11 Adaptation to different surface (Upper three lines: Velocity, Lower 4 lines: ω and θ_0)

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．

6. まとめ

本論文では，脚先に受動車輪を装備した脚–車輪ハイブリッド移動体ローラーウォーカーの受動車輪による推進，ローラーウォークについて，特に脚軌道と推進特性の関係に注目して議論した．まず初めに脚軌道パラメータの物理的意味について計算機シミュレーションを元に考察し，通常の自動車でいうアクセルや減速比に相当するパラメータを示した．次にその脚軌道パラメータを調節することで，2.25 [m/s] にも及ぶ高速推進やスロープ上の登坂推進が可能であることを実機で示した．続いて目標推進速度が与えられたとき，脚軌道パラメータを実速値に応じて漸近的に適応させる手法を提案した．計算機シミュレーション実験により目標速度への追従が可能であること，異なる摩擦係数の路面上であっても自律的に脚軌道角速度や接線方向振幅を調節し速度変動を抑えることができることが示された．

減速比の設定には任意性があり提案手法はあくまで一例に過ぎないが，変速機など機構的な切り替えなしに，脚軌道のみを変更す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本論文で示唆された．

今後は実機により有効性を検証していく予定である．特に実際の推進速度の計測が重要であると考えており，受動車輪を用いたデッドレコニング計測を現在検討している．通常デッドレコニングによる距離計測は滑りや路面の凹凸により大きな誤差を生じるが，本ロボットにおいて計測するのは誤差が積分されない速度の次元であること，四つの受動車輪を用いて計測値を平均化できること，脚軌道パラメータの変更が 1 次遅れ系である

ことなどから，有効に働き得るのではないかと考えている．また脚軌道により移動効率も変化すると考えられ，エネルギー効率の観点からも計算機シミュレーション・実機実験双方で検討を進めていく．

参 考 文 献

[1] 程島，土居，福田，広瀬，岡本，森："4 足歩行型法面作業ロボット TITAN XI の開発—基本設計と脚機構の動作実験—"，日本ロボット学会誌，vol.23, no.7, pp.847–857, 2005.

[2] http://www.gearlive.com/index.php/news/article/plustechs_walking_forest_machine_03150832/

[3] N. Kimura, T. Kamigaki, N. Suzuki, A. Nishikawa and N. Yamamoto: "Locomotion Mechanism and Control Architecture for Disaster Preventing Robot," '91 ISART, pp.375–380, 1991.

[4] Y. Ichikawa, N. Ozaki and K. Sadakane: "A Hybrid Locomotion Vehicle for Nuclear Power Plants," IEEE Trans. on System, Man and Cybern, vol.13, no.6, pp.1089–1093, 1983.

[5] H. Adachi, T. Arai and K. Homma: "Study on Underground Space Excavating Machine," The 9th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, pp.751–758, 1992.

[6] H. Adachi, N. Koyachi, T. Arai, A. Shimizu and Y. Nogami: "Mechanism and Control of a Leg-Wheel Hybrid Mobile Robot," Proc. of Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pp.1792–1797, 1999.

[7] 熊谷，高橋，王，中野："脚車輪型移動ロボットの動的歩容生成アルゴリズム"，第 4 回ロボティクスシンポジア予稿集，pp.155–160, 1998.

[8] S.J. Ylonen and A. J. Halme: "WorkPartner—Centaur like Service Robot," Proc. of Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pp.727–732, 2002.

[9] Ch. Grand, F. BenAmar, F. Plumet and Ph. Bidaud: "Decoupled control of posture and trajectory of the hybrid wheel-legged robot Hylos," Proc. of Int. Conf. Robotics and Automation, pp.5111–5116, 2004.

[10] 吉岡，田窪，井上，新井，國松："脚車輪ハイブリッド動作による ASTERISK の不整地移動"，ロボティクス・メカトロニクス講演会'07 予稿集，1A1-E07, 2007.

[11] 飛田，嵯峨山，小川，金森："四脚車輪型自律移動ロボット NR002 の開発（第 2 報：基本構成と階段昇降）"，第 25 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM，2G14, 2007.

[12] 広瀬，竹内："ローラウォーカ 新しい脚–車輪ハイブリッド移動体の提案"，日本機械学会論文集，C 編，vol.62, no.599, pp.242–248, 1996.

[13] 遠藤，広瀬："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.

[14] 遠藤，広瀬："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，vol.18, no.8, pp.1159–1165, 2000.

[15] 日向野，氏田，田口："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 予稿集，講演番号 1A1-D32, 2006.

[16] 熊谷，玉田："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 予稿集，2A1-J02, 2007.

[17] 橋本，菅原，細畠，御厨，砂塚，川瀬，林，高西："2 足歩行ロボットの受動車輪機構を用いた滑走移動（第 1 報：インラインスケートによるスウィズル動作の実現）"，ロボティクス・メカトロニクス講演会'07 予稿集，1A1-E11, 2007.

[18] 遠藤："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）．

付　　録

第 2 章で定義したシミュレーションモデルは，受動車輪の法線方向への滑りを許容している．法線方向への滑りは推進に寄与しないエネルギー消費を伴う可能性があるだけではなく，静止摩擦状態から動摩擦状態となることで推進力の低下も考えられる．ここでは推進速度を一定値 V，ω も変化しないものとし，$\theta(t)$ を正弦波と仮定した場合に走行路面との受動車輪の法線方向相対速度 V_n がゼロとなる $d(t)$ の必要条件を求める．

まず，以下の仮定をおく．

$$V, \omega = const \tag{16}$$

$$\theta(t) = -\theta_0 \sin \omega t \tag{17}$$

Fig. 12 より接線・法線方向の路面に対する相対速度は次式で表される．

$$V_t = d(t) \cdot \dot{\theta}(t) + V \cos \theta(t) \tag{18}$$

$$V_n = \dot{d}(t) + V \sin \theta(t) \tag{19}$$

法線方向に滑りがないことから $V_n = 0$ として式（17），（19）から

$$d(t) = \int V \sin(\theta_0 \sin \omega t) dt \tag{20}$$

$\omega t = u$ と置き換えると $dt = du/\omega$ となり V が定数であるから

$$d(t) = \frac{V}{\omega} \int \sin(\theta_0 \sin u) du \tag{21}$$

ここで第一種 Bessel 関数を用いて次のような展開が可能である．

$$\begin{aligned} \sin(\theta_0 \sin u) &= 2J_1(\theta_0) \sin u + \cdots \\ &+ 2J_{2m-1}(\theta_0) \sin(2m-1)u + \cdots \end{aligned} \tag{22}$$

したがって，$d(t)$ は C を定数として以下のように積分できる．

$$d(t) = -\frac{2V}{\omega} \sum_{m=1}^{\infty} 2J_{2m-1}(\theta_0) \frac{\cos(2m-1)\omega t}{2m-1} + C \tag{23}$$

このとき例えば $\theta_0 = 0.3$ として Bessel 級数の値を計算すると $J_1(\theta_0) = 0.148319$，$J_3(\theta_0) = 0.000559$ となり，その比は $J_3(\theta_0)/J_1(\theta_0) \approx 10^{-3}$ であり第 2 項以下は無視し得る．ゆえ

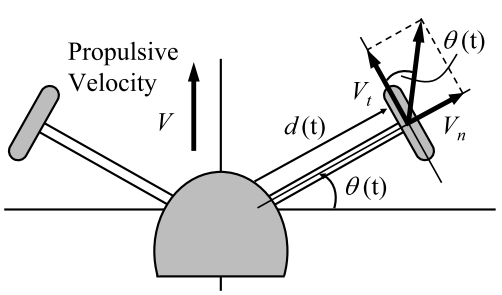


Fig. 12 Relative velocity between the passive wheel and the ground

に $d(t)$ は次のように近似できる．

$$d(t) = d_{offset} - \frac{2V}{\omega} J_1(\theta_0) \cos \omega t$$
$$= d_{offset} - \frac{2V}{\omega} J_1(\theta_0) \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (24)$$

よって $(d(t), \theta(t))$ 間の位相差 ϕ は $\pi/2$ であり，3 章で述べた数値演算結果が解析的に支持される．

また脚軌道の振幅 $d_0, \theta_0 = const$ とした場合，式（24）より

$$\frac{V}{\omega} = const \quad \therefore \quad V \propto \omega \quad (25)$$

となり，脚軌道角速度は推進速度に比例する必要があることが求められる．

遠藤　玄（Gen Endo）

2000 年東京工業大学機械物理工学専攻博士課程修了．博士（工学）．2000 年ソニー（株）入社．2002〜2006 年（株）ATR 脳情報研究所客員研究員．2007 年東京工業大学理工学研究科特任助教を経て，2008 年同大機械宇宙システム専攻助教．ヘビ型移動ロボット，脚–車輪型移動ロボット，2 足歩行運動制御の研究に従事．日本ロボット学会第 16 回論文賞受賞．

（日本ロボット学会正会員）

広瀬茂男（Shigeo Hirose）

1976 年東京工業大学制御工学専攻博士課程修了（工学博士）．同大学助手，助教授を経て 1992 年東京工業大学機械物理工学科（2000 年以降機械宇宙システム専攻）教授．ロボット創造学の研究に従事．Pioneer in Robotics and Automation Award（IEEE 1999），Award of Merit（IFToMM 2004），紫綬褒章（2006）など受賞．主な著作は，「ロボット工学」（裳華房），「生物機械工学」（工業調査会），Biologically Inspired Robots（Oxford University Press，1993）など．

（日本ロボット学会正会員）