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-基本的運動の生成と自立推進実験-
Title	
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. 18, No. 8, pp. 1159-1165
Citation(English)	, Vol. 18, No. 8, pp. 1159-1165
発行日 / Pub. date	2000, 11
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) 2000 The Robotics Society of Japan.

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

学術・技術論文

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 ―

遠藤 玄* 広瀬 茂男*

Study on Roller–Walker
—— Multi–mode Steering Control and Self–contained Locomotion ——

Gen Endo* *and* Shigeo Hirose*

We have proposed a new leg–wheel hybrid mobile robot named “Roller–Walker”. Roller–Walker is a vehicle with a special foot mechanism, which changes to a sole in walking mode and a passive wheel in skating mode. On rugged terrain the vehicle walks in leg mode, and on level or comparatively smooth terrain the vehicle makes wheeled locomotion by roller–skating using the passive wheels. The characteristics of Roller-Walker are:1) it has a hybrid function but is light-weight, 2) it has the potential capability to exhibit high terrain adaptability in skating mode if the control method for roller–walking is fully investigated in the future. In this paper, the 4 leg trajectory of straight roller–walk is optimized in order to achieve maximum constant velocity. Also steering roller–walk control method is proposed. It is obtained by the expansion of the straight roller-walk trajectory theory adding an offset to the swinging motion. This steering method resembles that of a car. The control system was modified into an untethered system, and control experiments were performed. The realization of the steering motion was verified by them.

Key Words: Leg–Wheel Hybrid Mobile Robot, Roller–Walker, Roller–Walk, Steering Control

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，(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わだちを残さないため移動効率がよい．(3) スリップなしでホロノミックな全方向移動ができる．そして，(4) 静止時に脚が搭載作業機器のための安定で動的な足場を構成できるため搭載機器の作業台となる，などの特異な機能性を発揮する．しかし，移動すべき環境が平坦地である場合には，車輪型移動方式の方がはるかに滑らかな運動を実現し，移動速度，移動効率とも勝っている．そのため，脚型歩行の特徴と車輪型移動の特徴を組み合わせ，凹凸の激しい不整地では歩行，凹凸の少ない地表面あるいは平坦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，これまでいくつかなされてきた[1]～[5].

例えば神戸製鋼で試作された災害現場への進入を行う極限作業用の6脚走行車[1]や日立で試作された直動型脚の先端に車輪を取り付けた走行車[2]などが挙げられる．また，大深度地下での掘削作業を目的として機械技研で開発された胴体部にクローラを装備した走行車[3]なども挙げられる．

原稿受付 1999年11月18日
*東京工業大学工学部
*Tokyo Institute of Technology

しかしながらこれら従来の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，駆動用アクチュエータ，ステアリング機構，ブレーキ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れらは全く用いられることなく，ただペイロードとして歩行性能を大きく制限する結果となった．実用的な移動機械の設計において駆動機械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い歩行機械にさらに重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，筆者らはより実用的で歩行機械の機能を阻害することのない新し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”を提案している[6].

2. ローラーウォーカー

2.1 ローラーウォーカーの概念

提案するローラーウォーカーを**Fig. 1**に示す．歩行機械の脚先に足裏と兼用となる駆動力を持たない軽量な受動車輪を取り付けた脚–車輪型ハイブリッド移動体である．歩行運動は**Fig. 2** (a)に示すような形態をとり，従来の歩行機械と全く同様である．車輪による推進は，足裏であった車輪を足首関節回りに90度回転し，

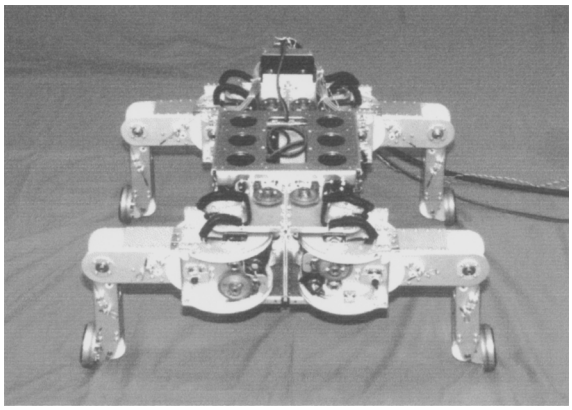


Fig. 1 Roller–Walker

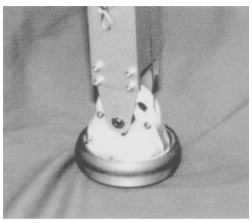


Fig. 2 (a) Walking mode

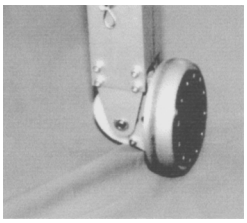


Fig. 2 (b) Skating mode

Fig. 2 (b)のように受動車輪に切り替えて行う. **Fig. 3**に示すように推進動作は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全く同様の原理で推進する. 足首の自由度は足裏と車輪の切り替えにのみ用い, 車輪による推進時は固定されている.

移動形態は路面状況により選択し, 段差を含む凹凸の激しい不整地や急傾斜面の登坂, 脆弱な路面上では歩行を行い, 比較的凹凸の少ない硬平地, 緩斜面, あるいは斜面を下る場合は受動車輪による推進を行う.

このような脚–車輪型ハイブリッド移動体の概念を「ローラーウォーカー」と呼び, ローラーウォーカー特有の受動車輪を用いた推進方法を「ローラーウォーク」と呼ぶことにする. なお, ここでは4脚のローラーウォーカーを例に挙げたが, 本概念はもちろん脚数に依存するものではない.

2.2 ローラーウォーカーの特徴

ローラーウォーカーの特徴として以下の二つが考えられる.

(1) ローラーウォークするための駆動力は, 歩行のための駆動自由度から供給され, 歩行機械に余分な駆動自由度を付加する必要がない. また, ローラーウォークのための車輪は, 歩行のための足裏を兼ねているため, 歩行機械に車輪を新たに装備することにはならない. そのため, ローラーウォークのために歩行機械に付加すべき装置は, 足首の回転切り替え機構のみとなる. これにより, ローラーウォーカーは従来のハイブリッド走行車の最大の欠点であった, 駆動系重量を過大化する問題を回避できる.

(2)歩行機械の脚は歩行運動を生成するための広い可動範囲と十分な出力を有している. ローラーウォーカーはその脚先に受動車輪を装備していることから, 脚の持つ特性を有効に利用することが可能である. したがって今後, 対地適応的なローラーウォークを開発して行けば, 直進運動のみならず旋回運動や加速減速運動, さらに**Fig. 4**に示すような段差のあるところや凹凸の激しい路面でも移動できるようになる可能性がある.

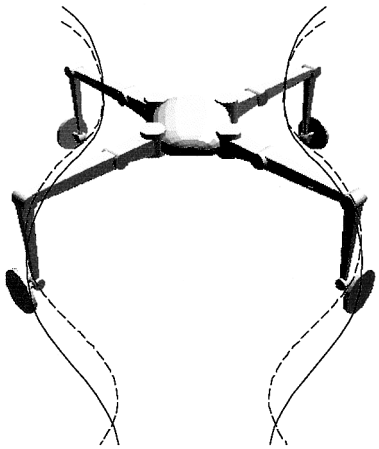


Fig. 3 Skating locomotion

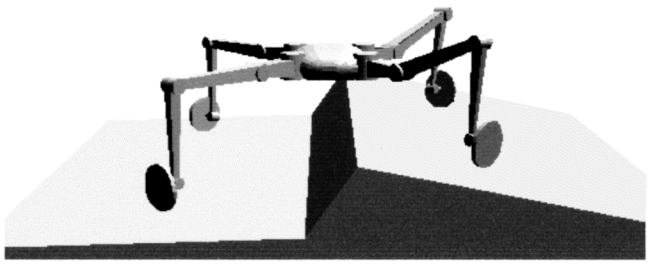


Fig. 4 Roller–Walker on uneven terrain

このように, 提案するローラーウォーカーとその移動法であるローラーウォークの有効性は十分に高く, また実用的なハイブリッド化の方法であると考えられる.

筆者らは現在までに前2脚を用いた直進動作に関して速度シミュレーションを行った. また普及型4脚歩行機械 *TITAN VIII* [7][8]をベースとした実験機を構築し, その概念を実モデルで実現するとともに, 推進速度をシミュレーション結果と比較した.

本論文では移動体の基本的運動として実用上十分であると考えられる直進・旋回・超信地旋回・斜行運動を提案し, 実機により検証することを目的とする. まず前報までの結果を拡張し, 4脚全てを用いた直進動作を実現する. 次に超信地旋回・旋回を行う運動生成法を提案し, その速度シミュレーションの結果を実験と比較する. また斜行運動の提案と確認を行う. 実機に関しては, より自由な推進を可能にするため制御システムを自立化する. さらに無線による操縦実験を行いその操作性を検討する.

3. 運動学モデル

まずシミュレーションを行う上で, 共通して用いた運動学モデルについて述べる.

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, ここでは脚を遊脚化せず, かつ各脚は周期的な運動をするという条件の下でシミュレーションを行う. この仮定を用いる利点

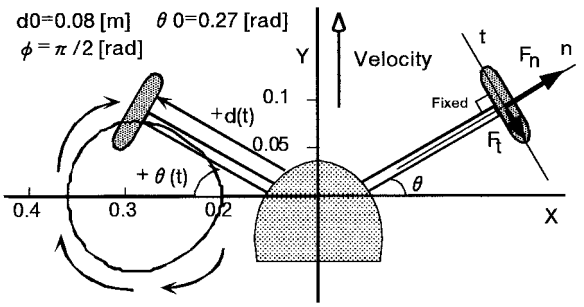


Fig. 5 Simulation model and parameters

としては（1）高い安定性（2）容易な解析（3）ペイロードに依存しない, などの特徴が挙げられる反面, 加減速の繰り返しによる移動速度, 効率の低下なども考えられる. しかしながらすべてのローラーウォーク解析の基礎として本仮定の下に得られる結果は重要であると思われるため, 現在までに前２脚の脚軌道を固定した場合のシミュレーションが行われている[9][10].

前脚の座標系を**Fig. 5**に定める. 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度であるとし, 各脚は自重Wの1/4を均等に支えるものとする. このとき脚を水平面上で左右対称に動かすことでX方向への力をキャンセルし, Y方向への推力のみが作用することになる. このとき軌道を次式で定める.

$$d(t) = d_{offset} + d_0\left\{\sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \frac{3}{2}\pi\right) + 1\right\} \qquad (1)$$

$$\theta(t) = -\theta_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \frac{3}{2}\pi + \phi\right) \qquad (2)$$

このとき制御パラメータはd_0, θ_0, ϕ, Tの四つである. d_0, θ_0は極座標系での半径・周方向の振動に対する振幅であり, ϕは式(1)(2)間の位相差である. これらのパラメータにより脚軌道を変化させる. またTは周期でありその軌道を描く時間を規定している. なお開発した実機の可動範囲を考慮してあらかじめ位相差として$3\pi/2$, dにオフセットが加えられている.

路面とタイヤの摩擦はクーロン摩擦であると仮定する. また転がり方向に関してはベアリングの抵抗を考慮して速度に比例する粘性項を加えている. このとき脚先に働く力は次式で表される.

$$F_t = -\mathrm{sign}\left\{V\cos\theta(t) + d(t)\dot{\theta}(t)\right\}\cdot\mu_t\cdot\frac{W}{4} - \mu_{tc}\cdot\left\{V\cos\theta(t) + d(t)\dot{\theta}(t)\right\} \qquad (3)$$

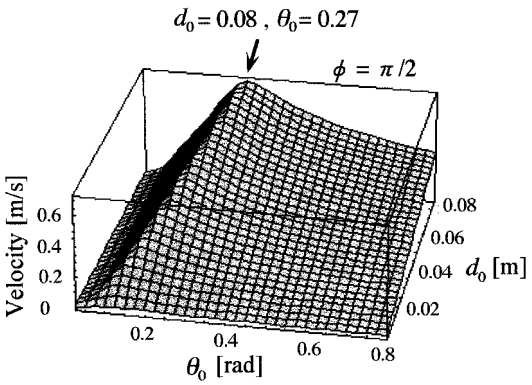
$$F_n = -\mathrm{sign}\left\{V\sin\theta(t) + \dot{d}(t)\right\}\cdot\mu_n\cdot\frac{W}{4} \qquad (4)$$

ここで転がり方向の摩擦係数μ_t, その粘性摩擦をμ_{tc}, 軸方向摩擦係数μ_nとおき, 予備実験より得られた以下の値を用いる.

$$\mu_t = 0.01 \quad \mu_{tc} = 5.5 \qquad (5)$$

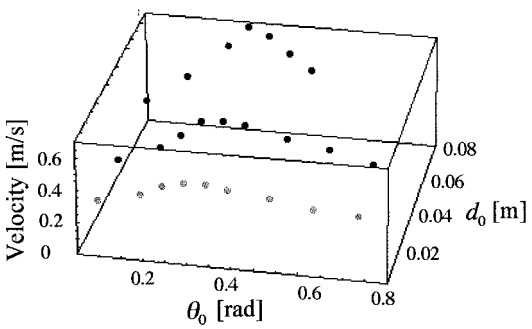
$$\mu_n = 0.56 \quad \left(|V_n| \geq 0.01[m/s]\right) \qquad (6)$$

μ_nはシミュレーション上での発振を防ぐため, 軸方向速度の小さい領域では粘性摩擦を仮定した.



(d_0, θ_0 : parameter $\phi = \pi/2$, T =2.0)

Fig. 6 (a) Simulated velocity



(d_0, θ_0 : parameter $\phi = \pi/2$, T =2.0)

Fig. 6 (b) Experimental velocity

本論文では移動体の最も基本的な物理量である, 定常状態における平均移動速度を評価関数とし, それを最大化する軌道を求めることとする.

4. 直　　進

4.1 前脚のみの軌道

後脚受動車輪を進行方向に固定し, 前脚のみで推進する場合を考える. 周期が短いほど投入されるパワーが大きくなり定常速度も上昇することが予想されるため, ここではT = 2.0 [s]に固定し, 脚軌道の形を導出することにする. d_0, θ_0, ϕについて可動範囲内で全検索した結果, 以下のことが分かった.

（1） $\phi = \pi/2$のとき前進速度は最大化される.
（このとき一周期内の加減速が最小）

（2） d_0は大きいほどよい.

（3） θ_0は0.3付近で最大値となる.

なおこの結果はロボットの重量・サイズに依存しない.

$\phi = \pi/2$と固定し, 可動範囲内でd_0, θ_0をパラメータとしてシミュレーションを行った結果と, 実際の測定結果を示す. 移動速度は本体に計測用キャスタを取り付け, その回転速度をタコジェネレータで測定することにより求めた（**Fig. 6** (a) (b)）. 全体の傾向がよく一致していることが分かる. 最適化された軌道をFig. 5の第2象限に示す. またこの軌道での推進速度の推移を**Fig. 7**に示す. 前進方向へ速度が生成されていることが確認され, また脚

軌道一周期の間に加減速が2回見られることが分かる. 定常速度はシミュレーション結果に比して5%程度小さくなっているが, 加減速の変化も含めて良好な一致が見られる. またこのときの値は脚先最大速度0.34 [m/s]のおよそ2.3倍であり, 歩行に比して十分に高速な移動が実現されている.

また軌道周期Tの逆数と定常速度の間には, 良好な線形関係があることがシミュレーションおよび実験により確かめられた. このことから望みの定常速度を得るためには, 同一の軌道でTのみを変化させれば容易に実現できることが分かった.

4.2 4脚軌道

後脚の軌道も前脚と同様の座標軸をおき解析する[11]. このとき新たに前後の周期関数に対して位相差ϕ_{fr}を導入する. 前2脚の結果と“摩擦力は速度にのみ依存する”という物理的考察より後2脚のd_0, θ_0, ϕも同様の値をとることが予想されるので, ϕ_{fr}のみを変化させてシミュレーションを行った. このとき一周期内の加減速は$\phi_{fr}=\pi/2$, $3\pi/2$[rad]のときに極小化され, かつ平均速度も最大値となり2脚に比して12%増加した. この理由を考察する.

定常速度に達した場合, 脚は一周期の間に加速と減速を行い, その両者が釣り合っている状態であるので, 推進に抗する摩擦が全くない場合と等価である. したがって4脚に拡張した場合, 前脚のみのとき後脚が従動輪として生じていた抵抗の分だけ, 定常速度が増加する.

また前後の位相をずらすことによる効果は, Fig. 7より1周期の間に加減速がおよそ$\pi/2$ [rad]ごとに現れるため$\phi_{fr}=\pi/2$とすれば加減速が前後で常にキャンセルされて速度の増減を抑制する. このとき摩擦力を常に内力として消費している状態であるので, エネルギ的には効率が悪くなる一方, プリロードとして考えれば外乱に対するロバスト性が向上している状態でもある.

速度を最大化する4脚軌道の速度変化を示す（**Fig. 8**）. ϕ_{fr} =0としたときの実験値と比して加減速が少なく平均速度も高いことが確かめられる.

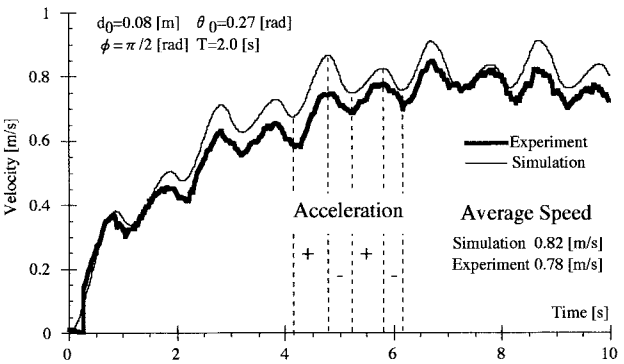


Fig. 7 Velocity at optimized trajectory

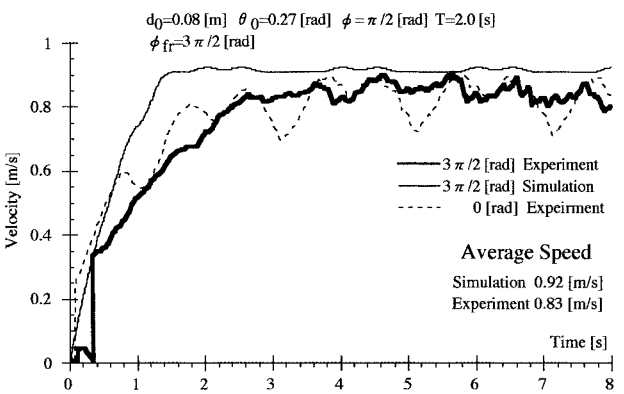


Fig. 8 Velocity using 4 legs

5. 超信地旋回

4章の結果を受けて, ここでは超信地旋回を実現する脚軌道を考える[12].

直進動作に関して推進方向成分のみの運動を考える. 受動車輪をFig. 5に示す軌道で左右対称に動かした場合, 脚軌道周期に応じた推進速度が生成される. この推進力を等価的に通常の駆動車輪により生成したと考える. 駆動車輪による超信地旋回を考えると, 脚配置を**Fig. 9**に示すように放射状に置くことにより, 超信地旋回も可能であると考えられる. このとき対角脚((Leg1,Leg3)および(Leg2, Leg4))を対称に動かせば, 半径方向の反力をキャンセルすることが可能であり, 旋回運動のみを生成することができる.

以上の考察に基づきボディ中心周りの角速度シミュレーションを行い, 直進動作と同様に軌道の最適化を行った. 最適化パラメータは慣性モーメントに依存することから, 予備実験により得られた値I = 2.28 [kgm^2]を用いた. その結果, 定常平均角速度は脚軌道を変化させる各パラメータに対し, 直進の場合とほとんど

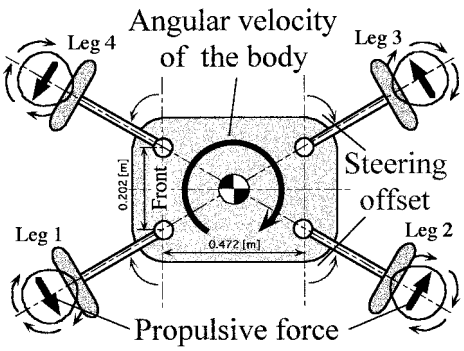


Fig. 9 Standard posture of the rotational roller–walk

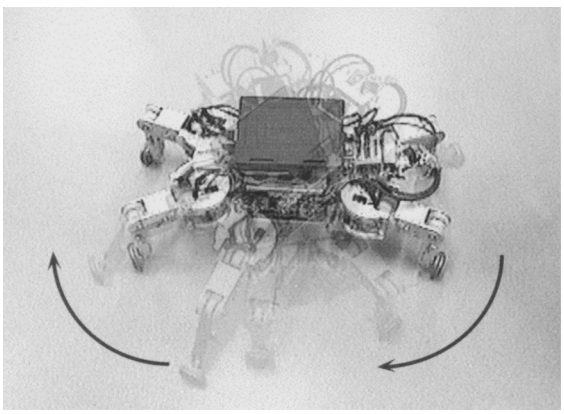


Fig. 10 Rotational experiment

同様の変化を見せることが分かった. また角速度を最大化するパラメータもθ_0= 0.28とわずかに増加する以外は, 直進の場合とほとんど同一であった.

この結果を検証するため軌道パラメータを変化させて50回以上の走行実験を行った（**Fig. 10**）. その結果, 実験による最適化脚軌道パラメータはθ_0が0.31と理論値に比してわずかに大きくなっているが, その他は理論値とほぼ同一であった. このときの角速度変化を**Fig. 11**に示す. 歩行では実現不可能な, 著しく高速の超信地旋回が実現されていることが分かる.

さらに4脚直進動作の場合と同様に(Leg1,Leg3)と(Leg2,Leg4)の間に位相差ϕ_{fr}を導入し, その最適化を行った. 実験条件はd_0 = 0.05 [m], θ_0= 0.3 [rad], $\phi = \pi/2$ [rad], T = 2.0 [s]とした. このとき直進の場合と同様に$\phi_{fr} = \pi/2, 3\pi/2$で極大値となり, およそ11%程度の角速度の増加が見られた. また同時に加減速も減少することが分かった. しかしながらこのとき, 脚付け根の幾何学的関係より4脚の車輪の転がり方向がほぼ同一の方向に揃ってしまう瞬間があり, 外乱を受けた場合容易に並進運動を生じる現象が観察された. 4脚接地による不静定問題を考えると, 本実験機に関しては4脚の条件が均一なϕ_{fr}= 0の場合が適当であると考えられる.

6. 旋　　回

旋回動作に関しても, 超信地旋回と同様に等価的に駆動車輪による推進であると考えれば, 通常の車輪でのステアリングと同様に, $\theta(t)$の振動の中心値にオフセットを持たせることで円弧に沿った推進が可能であると考えられる（**Fig. 12**）. この場合オフセットの付加は車輪の転がり方向のみであることから, 反力は無視できる. したがって任意の脚位置から任意のオフセット量を加えることが可能となり自由なステアリング動作を実現することができる(以降このオフセットをステアリングオフセットと呼ぶ).

旋回運動を行う場合, 脚付け根位置の幾何学的関係から半径方向の反力は偶力を生じる. しかし一周期中で考えると反力の向きが変化することからその積分は小さなものとなる. さらに他の脚によってその偶力が支えられる効果を考えると, これらの偶力は本体の運動にほとんど影響を与えない. したがって進行方向成分のみが残り, 円弧に沿った推進が実現できると考えられる.

以上の考察に基づき旋回動作のシミュレーションを行った. 生成される運動は脚付け根位置および慣性モーメントに依存することから, 実機の値を用いた. 旋回半径R=0.5 [m]と設定し, 幾何学的に求められるステアリングオフセットを付加した状態で4脚を動かした場合, 生じる本体の前方向速度Vy, 横方向速度Vx, 本体回転角速度ωを求めた. $\bar{V}_y$, $\bar{\omega}$を一周期の平均値として最適化の評価基準を以下に示す.

$$\left| \bar{V}_y / \bar{\omega} - R \right| \le 0.02 \text{ [m] and Maximize } \bar{V}_y \qquad (7)$$

全検索の結果, 最適化パラメータは超信地旋回同様θ_0のみ変化がみられ, 円周外側脚である(Leg1,Leg2)に関してはθ_0=0.21, 内側脚である（Leg3,Leg4）ではθ_0=0であった. またϕ_{fr}=11π/6のときVyは最大化された（なおこのとき, 内側脚の干渉を考慮してd_0= 0.05としている）. さらに旋回半径Rが増大するとともに内側脚のθ_0が増大してゆくことが導かれた. d_0は一定であっ

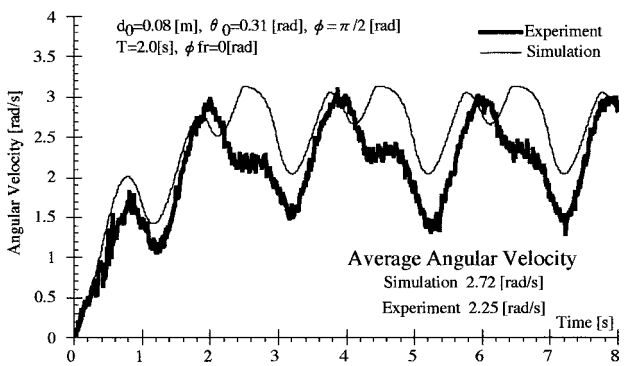


Fig. 11 Angular velocity at optimized trajectry

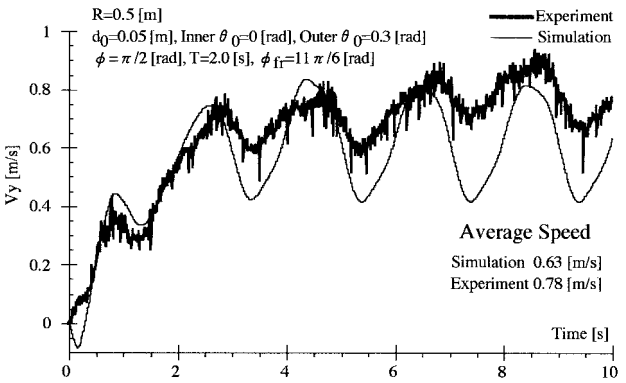


Fig. 13 *Vy* at optimized trajectory

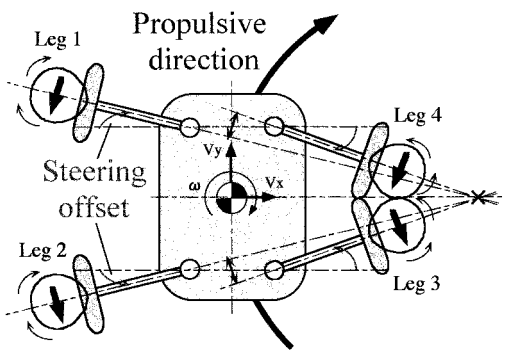


Fig. 12 Steering Roller–Walk

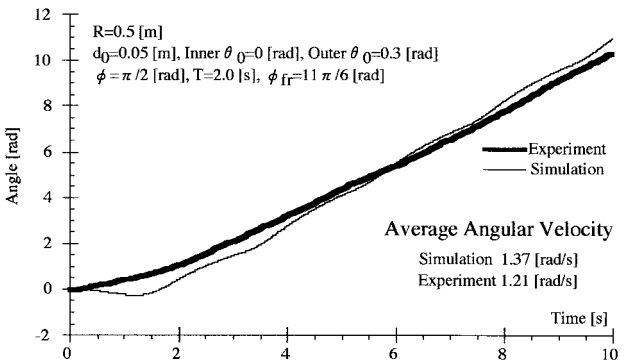


Fig. 14 Variation of the body angle with time

たことから,半径方向に対しては常に対称に動かすことでその反力をキャンセルしていると考えられる.また旋回の外側脚と内側脚の位置による周速の差を，内側の θ_0 を変化させることで吸収していると考えられ，これらの結果は直観ともよく一致する.

シミュレーション結果の検証実験は，キャスタによる Vy 速度計測に加えて,ボディ中心の位置と姿勢を三次元位置計測システムOPTOTRAK（Northern Digital Inc.）を用いて計測した.ボディ上に4点のマーカーを取り付け,その軌跡から位置と姿勢を同定した．測定誤差は走行平面のキャリブレーション誤差も含めて0.015 [m]程度であると思われる．R = 0.5[m]として，およそ30回の走行試験を行った.

その結果，実験による最適化脚軌道パラメータは θ_0 が0.30と理論値に比してやや大きくなっているが,その他は理論値とほぼ同一であり，パラメータ変動による Vy の平均値の変化も同様の傾向を示した．Vy 及び姿勢の変化を **Fig. 13, 14** に示す.

$\bar{V}_y$ はシミュレーション結果より30% 程度大きくなっている.これはシミュレーション上では静止摩擦が反映されないためであると考えられる．式（6）に示すようにシミュレーション上では受動車輪の軸方向速度 Vn が0に近くなると摩擦力が減少するモデルを用いているが,実際は動摩擦状態から静止摩擦状態に遷移するため，より大きな力を発生することが可能である．実際，推進の様子を注意深く観察すると,内側脚は走行路面に対しほとんど軸方向へ滑りが生じていないことが分かる.したがって静止摩擦力により理論値よりも大きな推進速度が得られたものと考えられる.

定常状態において，初期条件が時刻 t = 0 [s] のとき原点上を Y 方向に推進している場合の本体中心の移動軌跡を**Fig. 15**に示す.この結果からシミュレーションが位置レベルにおいてよく一致しているとは言い難く,より現実に則した摩擦モデルの導入が必要であることが分かる．しかしながら，R = 0.6 [m] 以下でほぼ等速で旋回することが可能であり,十分な旋回能力を持つことが定量的に確認された.本実験機においては内側脚の干渉などを考慮すると最小旋回半径はおよそ 0.4 [m] である.

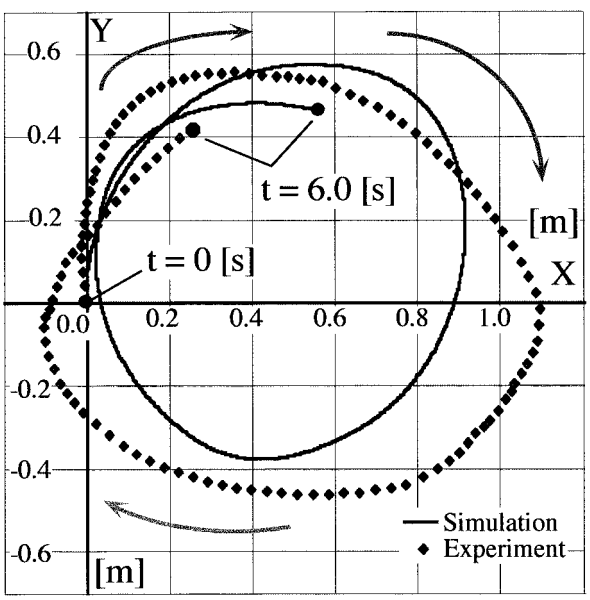


Fig. 15 Trajectory of the body position

7. 斜　　行

旋回動作のステアリングオフセットは，自動車でいえば4WSの逆相での操舵に相当する.したがって同相での操舵も同様に実現可能であり,これにより本体正面に対して斜め方向に並進する運動も可能である（**Fig. 16**）.実際に同相で30[deg]のオフセットを付加し，斜め方向に推進できることを確認した.

8. システムの自立化

より自由な推進を可能にするためノートPCを用いてシステムを完全自立化した(**Fig. 17**)．無線により推進速度と方向のパラメータを送り,それに基づき脚軌道周期と旋回半径を変化させている.また歩行とローラーウォーク・超信地旋回ローラーウォークのモード切替指令を送り,シーケンシャルに脚位置及び足首角度を変化させる制御プログラムを構成した.搭載したバッテリにより，およそ 25[min] の自立推進が可能である.

9. 操 縦 実 験

上記の結果を踏まえて,旋回動作の操縦性を検討するためビニル床シート上での推進制御実験を行った.軌道パラメータは直進

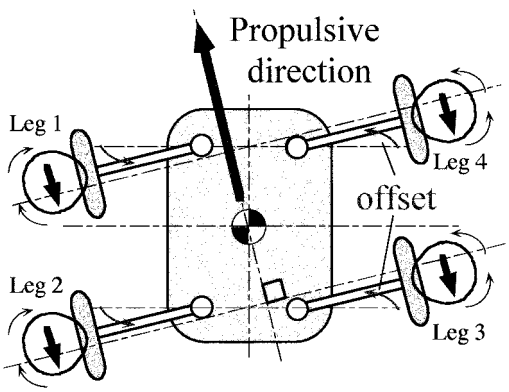


Fig. 16 Crab Roller–Walk

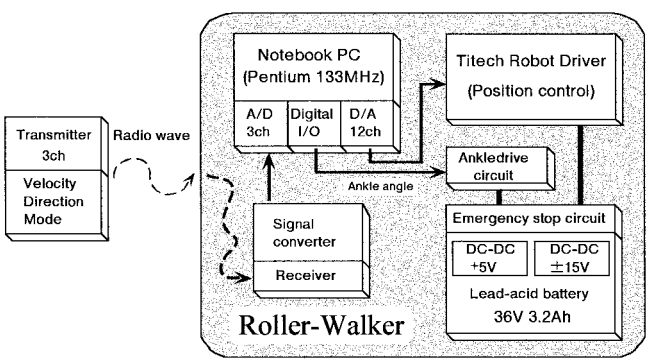


Fig. 17 System configuration

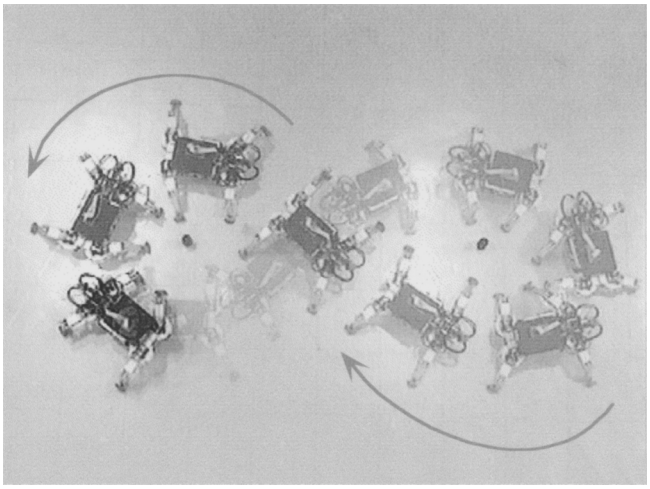


Fig. 18 Figure 8 propulsion

の最適値を用い, ステアリングオフセットを付加することで操舵を行う. また推進速度は脚軌道の時間軸スケールを変化させることで制御する.

走行実験を行った結果，推進速度は脚軌道周期を無限大から2.0 [s]まで調節することにより停止状態からおよそ0.5 [m/s]まで滑らかに変化させることが可能であった. また脚軌道を描く向きを逆にすることで後退の動作も同様に実現した.

旋回動作に関しても操縦者の操舵に対して良好な応答を確認した．操作実験の一例として間隔2.0 [m]のポールを8の字走行した結果を示す（**Fig. 18** 2 [s]ごとに撮影）．また0.9 [m]間隔で置かれたポールを0.3 [m/s]程度の速度でスラローム走行する実験にも成功した.

ローラーウォーカー実験機は加減速・操舵の急変動に対しても非常によく追従し, 駆動車輪による移動と比しても全く遜色のない操縦性を有していることが確認された.

また同様の実験をアスファルト路面上で行なった. アスファルト上では路面の凹凸により各脚に働く摩擦力は大きく変動し, 左右の力のキャンセルは完全でないことが容易に予想されるが, 推進速度は低下するものの, ビニル床シート上と同様の安定した推進と操舵を確認した. この結果から, 直進・旋回動作に関して多少の凹凸がある場合でも十分推進できることが確かめられた.

10. ま と め

本論文ではローラーウォークによる直進・超信地旋回・旋回・斜行動作についてその運動生成法を提案するとともにシミュレーション・実験の両側面からその実証を行った. またシステムを自立化し無線による操縦実験を行い, 十分な運動性能があることを確認した. これにより一見複雑に思われたローラーウォーク推進も, 単純な関数で表される脚軌道で自動車と同様の操作系を構築できることが確かめられた.

ここでは脚軌道の最適化の評価関数を定常推進速度としたが, 今後はエネルギ効率の側面からの考察が必要不可欠である．シミュレーションによりパラメータを最適化したのち, 実機の消費電力を測定することで歩行とローラーウォークの移動仕事率を比較し, ローラーウォークの有効性を検討していく. また路面の傾斜や摩擦力の変化に対して, 速度・移動仕事率を評価基準として対地適応的に脚軌道・移動形態を選択していく運動生成法を順次検討していく. さらに遊脚や動的効果を考慮した歩容とローラーウォークの融合を検討していく.

謝 辞 本研究は文部省科学研究費（COE 形成基礎研究費スーパーメカノシステムおよび特別研究員奨励費）を使用して行われました.

参 考 文 献

[1] N. Kimura,T. Kamigaki, N. Suzuki, A. Nishikawa and N. Yama-moto: “Locomotion Mechanism and Control Architecture for Disaster Preventing Robot,” ’91 ISART, pp.375–380, 1991.

[2] Ichikawa: “Development of 5 legged Machine,” SICE 1st Intelligent Mobile Robot Symposium Proc., pp.107–112, 1982.

[3] H. Adachi, T. Arai and K. Homma: “Study on Underground Space Excavating Machine,” The 9th International Symposium on Automation and Robotics in Construction June3–5, Tokyo, pp.751–758, 1992.

[4] H. Adachi, N. Koyachi, T. Arai, A. Shimizu and Y. Nogami: “Mechanism and Control of a Leg–Wheel Hybrid Mobile Robot,” International Conference on Intelligent Robots and Systems Proc., pp.1792–1797, 1999.

[5] 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.

[6] 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”，62–599，日本機械学会論文集，C 編，pp.242–248, 1996.

[7] K. Arikawa and S. Hirose: “Development of Quadruped Walking Robot TITAN VIII,” International Conference on Intelligent Robots and Systems Proc., pp.208–214, 1996.

[8] 遠藤，広瀬：“ローラーウォーカーに関する研究 第3報：足首可変機構を有するシステムの構成”, ロボティクス・メカトロニクス講演会98予稿集, pp.1CIII1-2, 1998.

[9] 広瀬，竹内，遠藤：“ローラーウォーカーに関する研究—移動制御方法ローラーウォークについて—”, 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp.799–800, 1995.

[10] 広瀬，遠藤：“ローラーウォーカーに関する研究—直進ローラーウォークの実験的検討—”，第 15 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp.443–444, 1997.

[11] 遠藤，広瀬：“ローラーウォーカーに関する研究 第４報：直進ローラーウォークの4脚軌道”, 第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.207–208, 1998.

[12] 遠藤，広瀬：“ローラーウォーカーに関する研究 第５報：旋回ローラーウォークとシステムの自立化”, ロボティクス・メカトロニクス講演会99予稿集，pp.2A1–43–101, 1999.

遠藤 玄（Gen Endo）
1972 年 10 月 20 日生．1998 年東京工業大学機械物理工学専攻博士前期課程修了. 現在, 同専攻博士後期課程に在籍．ヘビ型移動ロボット，脚–車輪型移動ロボットの研究に従事．1998 年より日本学術振興会特別研究員． （日本ロボット学会学生会員）

広瀬茂男（Shigeo Hirose）
1947 年 12 月 6 日生．1976 年東京工業大学制御工学専攻博士課程修了. 同年, 同大学機械物理工学科助手，1979 年同大学助教授，1992 年同大学教授，現在に至る．ロボットの機構, センサ, 制御の研究に従事．工学博士． （日本ロボット学会正会員）