

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—

遠藤 玄* 広瀬 茂男*

Study on Roller-Walker

— System Integration and Basic Experiments —

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 on each leg 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 lightweight, 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 2 leg trajectory for straight roller-walking is optimized in order to achieve the maximum constant velocity. Also a changeable ankle mechanism was integrated into the Roller-Walker system. Experiments were performed to demonstrate the validity of the concept of Roller-Walker and the results of straight roller-walk experiments are compared with those derived through simulation.

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

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、これまで幾つかなされてきた。

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。

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まった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 (Fig. 1)。

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、最もシンプル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。

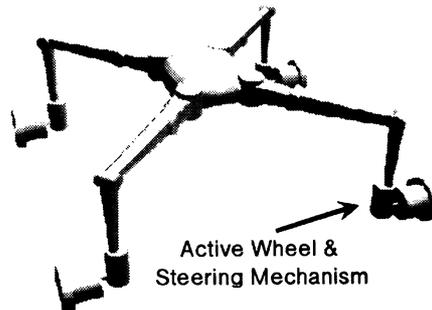


Fig. 1 Conventional type of hybrid vehicle (Heavy leg mechanism greatly reduces the mobility of the legs in walking mode.)

原稿受付 1999年1月18日

*東京工業大学工学部

*Tokyo Institute of Technology

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の概念図をFig. 2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の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、従来の歩行機械とまったく同様である。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. 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まった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ある路面でも移動できるようになる可能性がある。

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。

3. シミュレーション

ローラーウォーカーのような受動車輪を用いての移動方法は今までにまったく検討されたことがなく、直進・旋回・制動・加速動作など検討すべき課題は多い。また路面の摩擦係数や凹凸、傾斜などに応じた対地適応的な推進も検討して行く必要がある。

本章ではローラーウォークの最も基本的な動作である水平面上での直進運動に関して、計算機シミュレーションを行い今後の解析の基礎を構築することとする。

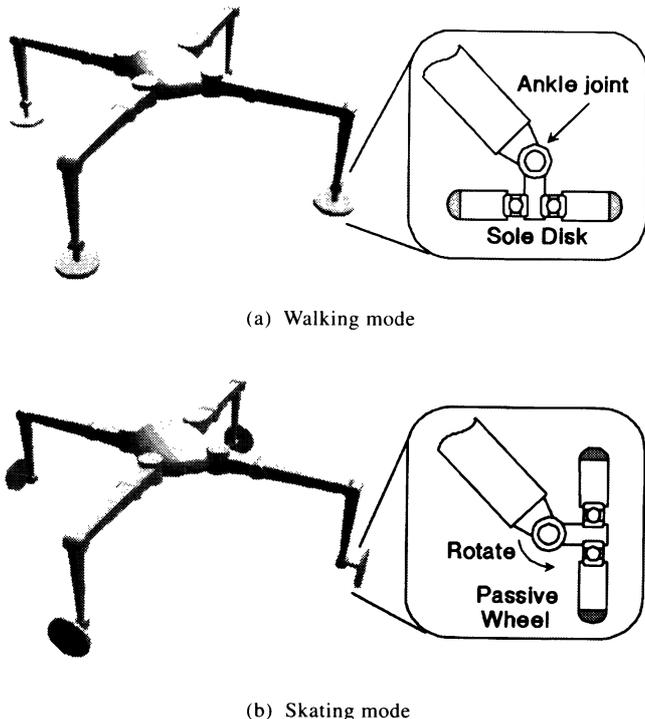


Fig. 2 Basic concept of Roller-Walker in two modes

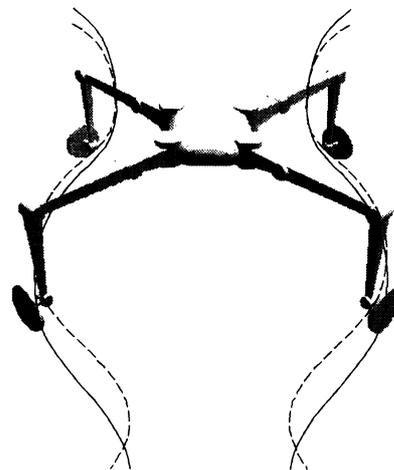


Fig. 3 Roller skating locomotion

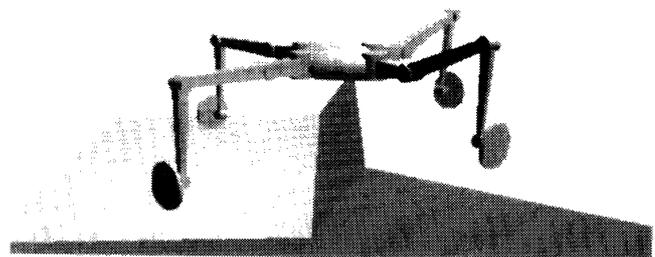


Fig. 4 Roller-Walker on uneven terrain

3.1 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りますが、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としては (1) 安定性が高い (2) 解析が容易である (3) ベイロードに依存しない、などが挙げられる。もちろん、遊脚化しないことにより繰り返し加減速が生じ、移動速度、効率が低下することも考えられるが、本仮定の下に得られる結果はすべてのローラーウォーク解析の基礎として重要であると考えられる。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を行った[4]~[6]。

本章ではシミュレーションの一例として特に、後脚受動車輪を進行方向に固定し、前2脚のみで推進するときの定常推進速度を最大化する脚軌道パラメータの導出を行う。

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。またキャンパー角は常に 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のように正弦波を用いて定める。

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

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

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。なお開発する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。

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

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

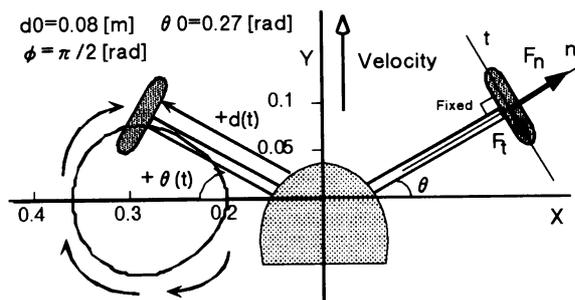


Fig. 5 Simulation model and parameters

ここで転がり方向の摩擦係数 μ_t , その粘性摩擦を μ_{ic} , 軸方向摩擦係数 μ_n とおき、後述する摩擦係数測定実験より得られた以下の値を用いる。

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

$$\mu_n = 0.56 \quad (|V_n| \geq 0.01 [\text{m/s}]) \quad (6)$$

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。

3.2 最適化

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、以下のことがわかった。

- (1) $\phi = \pi/2$ のとき前進速度は最大化される。
(このとき一周内の加減速が最小.)
- (2) d_0 は大きいほど良い。
- (3) θ_0 は 0.3 付近で最大値となる。

得られた結果を Fig. 6, Fig. 7 に示し、その軌道を Fig. 5 の第二象限に示す。このとき、定常状態での速度の平均値は脚先最大速度 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ことが確認された。

なお本章では平地上での前2脚による推進を扱ったが、同様の手法により後脚も含めた4脚での推進や傾斜面の登坂、加速動作などのシミュレーションも行うことが可能であると考えられる。

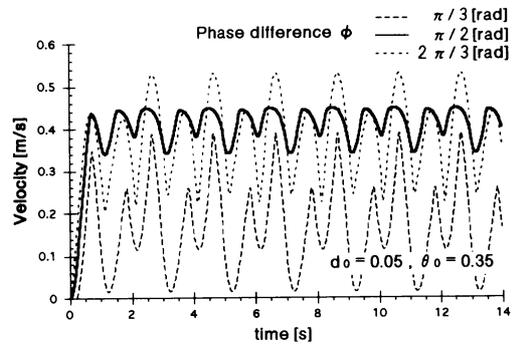


Fig. 6 Simulation result of velocity vs. phase difference ϕ

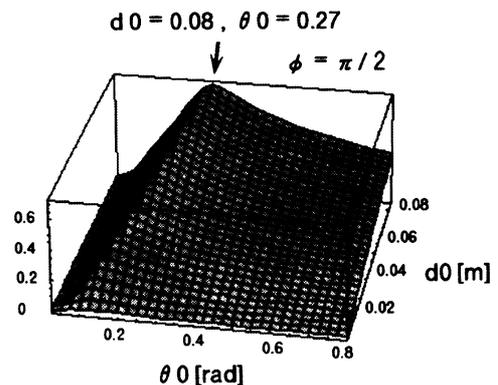


Fig. 7 Optimization of d_0 and θ_0

4. 実システムの構成

本章ではローラーウォーカーの概念を実際のシステムとして構築するための問題点を論ずる。

構成するローラーウォーカー実験機は普及型4脚歩行機械TITAN VIIIをベースとして開発を行った。TITAN VIIIはワイヤとプーリを用いた駆動系とモジュール化された脚機構により、脚としての高い機能性だけでなく、低価格・扱い易さ・高い拡張性などを同時に兼ね備えている [7]。

ローラーウォーカーを構成するにあたって機構的に改良した点は (1) 足首可変機構の付加 (2) 受動車輪の装備 (3) 胴体部の延長である [8]。

4.1 足首可変機構

TITAN VIIIの足首関節には、足裏が常にボディと平行になるように平行リンク機構が導入されている。これはFig. 8に示すように三つの回転自在な同径のプーリとワイヤから構成されており、そのワイヤは脚の旋回軸Zに巻き付けるように固定されている。

この機構に対し、脚を固定しワイヤのみを駆動すれば足首角度を能動的に変化させることが可能になる。ワイヤ駆動機構を脚旋回軸とともに動くベース部に組み込むことにより、アクチュエータを駆動すれば足首角度を変化させ、駆動しなければ平行リンク機構が働くよう、機構的分離がなされている。また足裏を受動車輪として用いる場合、平行リンク機構によりキャンバー角は常に一定に保たれている。

足首の切替は遊脚時のみ行うとすれば必要なアクチュエータは小型のもので十分であるが、受動車輪がプーリ中心からオフセッ

トを持って取り付けられているため、垂直抗力を含めた路面からの反力がそのままアクチュエータ出力に働くことになる。この反力によるバックドライブを防ぐためウォームギアにより機構的に反力を受ける構造とした。この機構により装備したアクチュエータの出力は2.7 [W]と小型のもので十分であり、足首可変機構全体をTITAN VIIIの脚機構内部に組み込むことが可能になった。

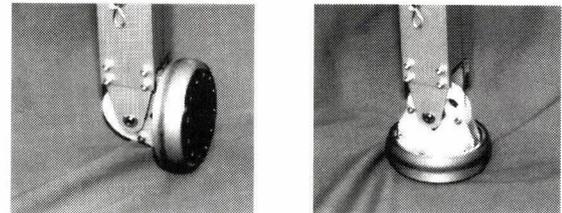
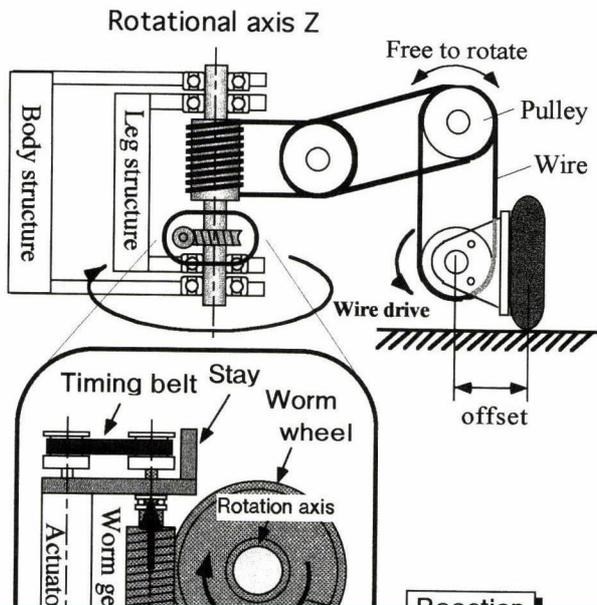
4.2 受動車輪

装備する受動車輪の摩擦特性はローラーウォーカーの運動に直接大きな影響を与える。したがってその摩擦特性を正確に把握しておくことは非常に重要である。

一般にゴムタイヤの摩擦特性はクーロン摩擦の仮定に従わないことが知られている [9][10]。一例としてインラインスケート用の中実ゴムタイヤについて摩擦係数を実験的に求めた (付録参照)。

しかしながらクーロン摩擦の仮定との不一致は主に、タイヤ表面のゴム材と、タイヤの構造部材そのものが軸方向へ大変形することによって生じるものである。したがってゴム材をより硬いものに変更し、タイヤそのものも構造的に軸方向への剛性を向上させれば、これら的大変形を抑制することが可能となり、その結果クーロン摩擦の仮定を成立させることができると考えられる。

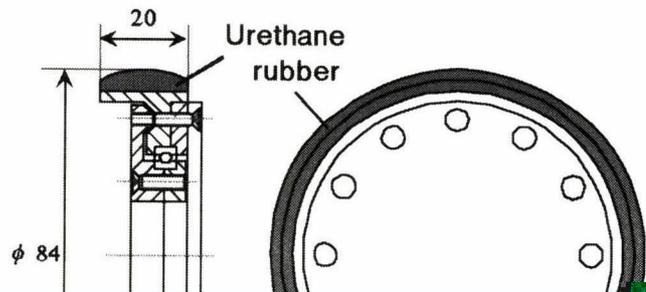
以上の考察から強化アルミ製のホイール表面に薄くウレタンゴムを焼き付けた Fig. 10 に示す受動車輪を設計した。



(a) Skating mode

(b) Walking mode

Fig. 9 Ankle mechanism in wheel mode and sole mode



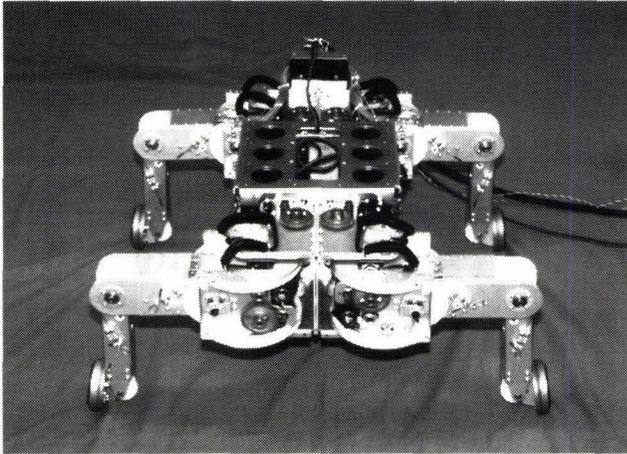


Fig. 11 Roller-Walker by using TITAN VIII

Table 1 Specifications of Roller-Walker

Dimension	470×600×250 [mm]	
Weight	TITAN VIII	22.2 [kg]
	Additional Weight	+1.6 [kg]
	Roller-Walker (Including Battery)	23.8 [kg]
Payload	20~32 [kg]	
Battery	36V - 3.2 Ah	

4.3 ローラーウォーカー実験機

Fig. 11に構成したローラーウォーカー実験機の概観, Fig. 9 (a) (b)に車輪と足裏の二つの状態を示す。胴体部は前後に70 [mm]延長しTitech Robot Driver [12]を本体に内蔵する形となっている。これにより本体上部に制御計算機などの搭載スペースを大きく確保することができた。またこの延長は前後脚の干渉を防ぐ目的もある。装備したバッテリーによる動作時間はおよそ25 [min]程度であり、本体中央の長円形の穴より交換できる仕様とした。

構成されたローラーウォーカーの諸元を Table 1 に示す。ハイブリッド化に伴い増加した質量は機構、制御回路すべてを含めておよそ1.6 [kg]であり、TITAN VIII全重量に比しておよそ7%と著しく軽微な値であった。このことから重量的な面で本概念の有効性を確認することができる。

4.4 制御システム

ローラーウォーカーは歩行に比して高い運動性能を示すものと考えられることから、自由な移動を可能にするため完全自立での制御システムが望ましいが、システム構築の第一段階として有線によるオープンループ制御を行うこととした。ローラーウォーカー本体には各関節への指令値のみを送り、モータドライバ回路により位置制御を行っている。全体のシステムブロック図を Fig. 12 に示す。

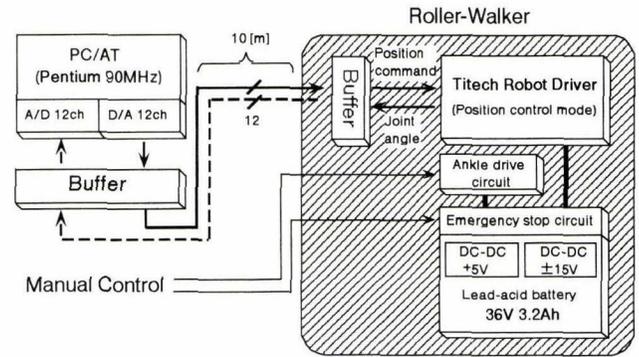


Fig. 12 Configuration of the control system

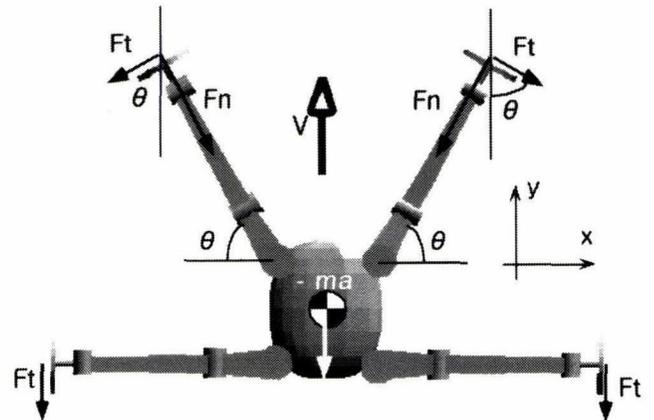


Fig. 13 Posture of the legs in measurement experiment of the friction coefficient

現在は最も基本的な推進運動の確認をする段階であるので、姿勢センサや画像処理などのセンサ系は搭載していないが、今後ローラーウォークに必要な制御系を順次構築して行く予定である。またそのときの拡張性を考慮して各関節角を計算機に取り込めるよう配慮した。

5. 実験

5.1 摩擦係数の測定

はじめに、装備した受動車輪の摩擦係数を測定するための予備実験を行った。Fig. 13に示すように前2脚をスリップ角 θ だけ傾斜させ、走行路面上をスライドさせる。このときの速度減衰の傾きから摩擦係数を導出することができ、摩擦力の速度に対する変

化も測定できる。また θ を変化させることによりスリップ角の変化による影響を測定し、さらに本体上にペイロードを付加することで垂直抗力への依存性を測定した。 θ は0 [deg]から80 [deg]の範囲で10 [deg]おきに測定し、垂直抗力はペイロードを0 [kgf]から15 [kgf]まで5 [kgf]ずつ変化させて測定した。おのおのの測定は3回行い、その平均値を求めた。

その結果から式 (5) (6) で示される実験値を得た。すなわち、転がり方向に対しては速度に無関係な転がり摩擦と、ベアリング潤滑油による粘性抵抗が測定され、軸方向に関しては、 θ に依存せず一定値とみなせることがわかった。また垂直抗力の変化に

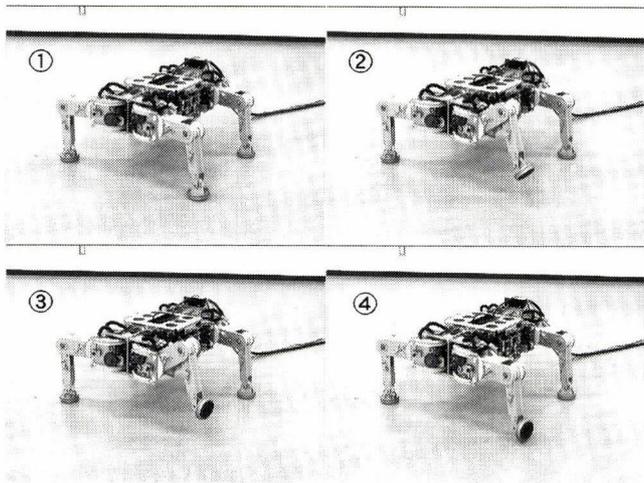


Fig. 14 Sequence of ankle turn over motion

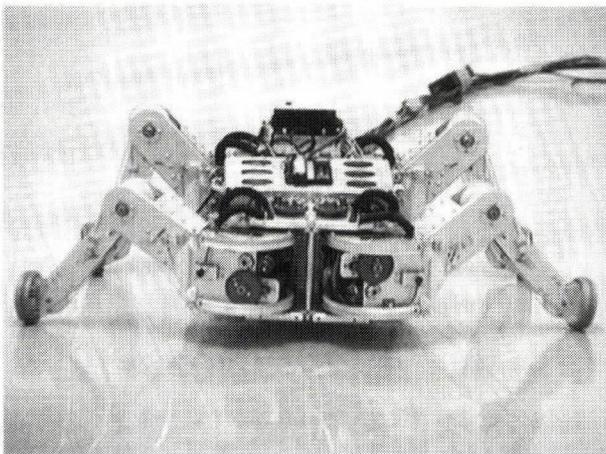


Fig. 15 Straight propulsion experiment

対してもこれら摩擦係数の値はほとんど変化がみられなかった。以上より、装備した受動車輪はクーロン摩擦の仮定が十分に成立することが確認された。

なお、本手法による摩擦係数の同定は本体上に速度センサを装備するだけで、特別な測定装置を必要とせず簡便に行えることから、今後様々な路面上での実験において非常に有用で実際的な方法であると考えられる。

5.2 動作実験

ローラーウォーカーの概念を具現化する動作として行なうため、歩行動作→腳踏み変え→足首切替→直進ローラーウォークという動作シーケンスの制御実験を行った。足首切替動作に関しては1・4・3・2の順で1脚ずつ遊脚化し、足首角度を90度切り替える動作を行った。このとき安定余裕を考慮して重心移動を行い、全脚の切替に要する時間は9.0 [s]である。実験により滑らかな切替動作を確認した (Fig. 14)。

直進ローラーウォーク動作は、左右の摩擦力の不釣り合いから推進方向が乱れるのではないかと予想されたが、それが起こるの

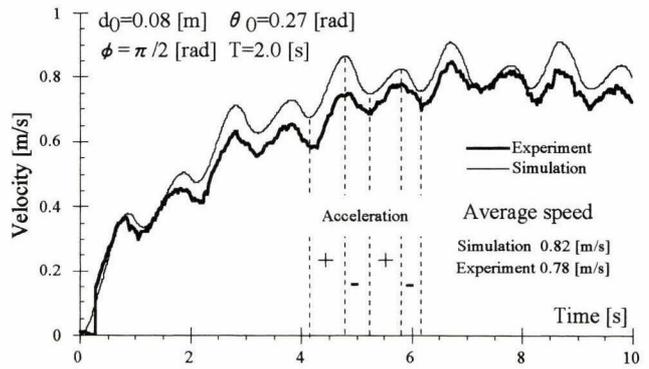


Fig. 16 Measured velocity in optimized trajectory of constructed model

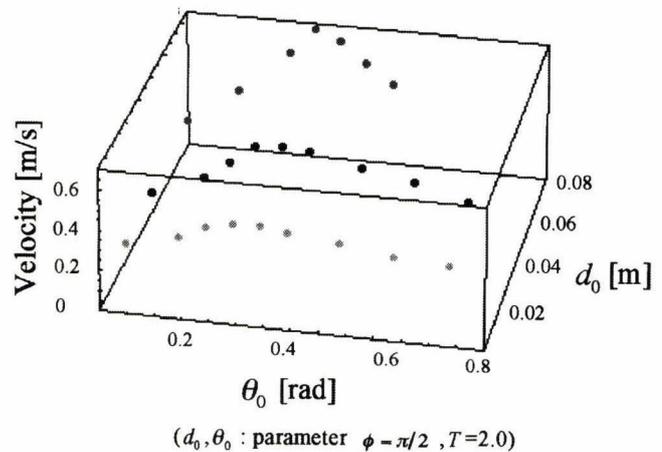


Fig. 17 Velocity measured in the experiment

は停止状態から加速するごく初期の時間だけで、あとは定常的に直進していくことが確認された。推進開始時の方向の乱れは、左右の脚の静止摩擦力の不釣り合いによるものであると考えられる。また、その後安定して直進する理由としては、後脚がガイドのような役割になって左右方向への移動を拘束しているのではないかと考えられる。

前章で最適化された脚軌道を描かせた場合の速度変化の様子をシミュレーション結果と合わせて Fig. 16 に示す。また、Fig. 15 はそのときの推進の様子を示している。このとき脚の可動範囲を最大化するためボディ高さを低く設定している。測定は実験機後端のケーブルが影響を与えないよう、注意深く行った。実験値はシミュレーション値と比べて実およそ5%小さくなっているが加減速の様子も含め、良好な一致を確認した。

また、 $\phi = \pi/2$ に固定し、 d_0 、 θ_0 を変化させたときの定常速度を測定した結果を Fig. 17 に示す。各条件ごとに3回の測定を行いその平均値をプロットした。Fig. 7 と比較して全体の傾向が良く一致していることが確かめられる。

以上の結果より直進ローラーウォークが実現可能であり、またシミュレーションモデルも妥当であることが確認された。

また次の三つの基本的動作について定性的に確認した。

(1) 推進速度は脚軌道周期を変化させることで調節することが可能であった。また脚軌道を描く向きを反対にすることで前進とまったく同様に後退できることも確認した。

(2) 旋回動作に関しては対角の2脚である1・3脚にボディ中心に対して対称的な軌道を描かせることにより実現可能であることを確認した。このときの旋回速度は通常の循環歩容を用いた旋回歩行に比して高速であった。

(3) 制動動作に関しては、脚の角度 θ を変えることにより車輪の転がり方向を推進方向に対して傾けることで、通常のブレーキ機構と同様に十分な制動力を得られることを確認した。

6. おわりに

本論文では歩行機械の脚先に足裏と兼用となる駆動力を持たない受動車輪を取り付けた新しい脚-車輪型ハイブリッド移動体ローラーウォーカーについてその概念と特徴を述べた。本概念は従来の脚-車輪型ハイブリッド移動体とは大きく異なり、多くの歩行機械に対して適用できる、簡便で実際的な手法である。今後様々なタイプのローラーウォーカーを検討することができ、その可能性は十分に大きなものであると考えられる。

次に歩行のための脚の自由度をそのまま用いて、受動車輪により推進するローラーウォークをシミュレーションにより検討し、前2脚を用いて定常速度を最大化する脚軌道を導出した。その結果歩行に比して十分高速な移動が実現可能であることが確かめられた。今回行ったシミュレーションは簡単のため多くの仮定を用いており、限定された脚軌道のみについて考察したに過ぎないが、今後の検討の基礎となる重要な結果を得ることができた。

続いてTITAN VIIIを改良することによって4脚型ローラーウォーカーの実験システムを構成し、その概念を現実のものとして構築した。またシステムを構築する過程で、簡便にハイブリッド化が行え、かつそれに伴う重量増加を著しく抑制できるという本概念の有効性を確かめた。現実の機械モデルに対して十分に適用可能であることが実証された。

さらに基本的な動作実験として有線による制御実験を行い、歩行動作および足裏・受動車輪切り替え動作を実現したのち、前2脚を用いた直進動作を行った。またその結果をシミュレーションと比較することでモデルの妥当性を確かめた。最後に旋回・制動動作の定性的な実験を行い、今後、高い移動性能を発揮しうることを確認した。

今後の課題として、4脚すべてを用いての直進・旋回・加速動作など検討していく必要がある。また、シミュレーションの評価関数は達成速度のみならずエネルギー的な考察が必要不可欠である。これらの課題を順次明らかにした後、ローラーウォーカー独特の高い適応性と多様性を持った総合的な移動方式を検討して行く予定である。

謝辞 実システムの構築と制御プログラムの開発において多大なご協力をいただいた有川敬輔氏に感謝いたします。なお、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. Yamamoto: "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] 広瀬, 竹内: "ローラーウォーカー 新しい脚-車輪ハイブリッド移動体の提案", 機論 62-599, C, 2758, 1996.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 広瀬・有川: "普及型歩行ロボット TITAN VIII の開発", ロボティクス・メカトロニクス講演会97講演論文集 (vol.A), pp.275-278, 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.1C111-2, 1998.
- [9] 酒井秀男: タイヤ工学, pp.163-165, グランプリ出版, 1987.
- [10] G. Gim and P.E. Nikravesh: "An Analytical Model of Pneumatic Tyres for Vehicle Dynamic Simulations, Part 1: Pure Slips," Int. J. of Vehicle Design, vol.11, no.6, pp.589-618, 1990.
- [11] 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.
- [12] 福島, 妻木, 広瀬: "PWM制御方式DCサーボモータ駆動回路の開発", 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1153-1154, 1995.

付録 中実ゴムタイヤの摩擦特性

タイヤの摩擦特性に関しては自動車産業の発展とともに多くの研究がなされており文献も数多い。しかしながらそれらの多くは実車用のタイヤを対象としており、その構造も中実のゴムタイヤとは大きく異なっている。また摩擦特性は走行する路面状態によって大きく変化することが予想されるため、実験的に特性を把握することは定量的な議論をする上で必要不可欠である。その予備実験としてインラインスケート用の中実ゴムタイ

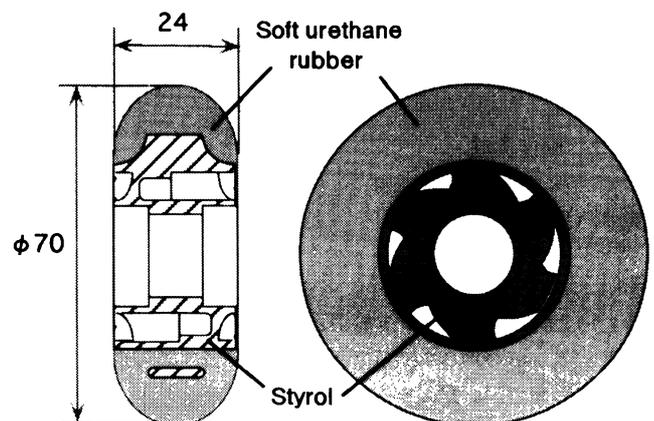


Fig. 18 Geometry of the wheel used for measurement

ヤについて実験を行った。

タイヤはローラーウォーカー実験機の大きさ、耐荷重・耐摩耗性を考慮してKRYPTONICS社 70 mm/78 Aを実験に用いた。この中実タイヤのゴム材は比較的柔らかいポリウレタン製で、スチロール樹脂のリムに接着されている (Fig. 18)。

一般にタイヤの摩擦係数は滑り速度 V 、スリップ角 θ 、垂直抗力 N 、温度 T などの関数であることが知られているが、ここではローラーウォーカーの脚運動により最も大きく変化するとと思われる V 、 θ に対する摩擦係数の変化を調べた。

実験はタイヤをスリップ角 θ だけ傾けて固定し、路面 (織布積層ビニル床シート, JIS-A-5705) 上を一定速度 V で牽引車により滑らせる。そのときに生じる摩擦力 F_n , F_t を独立にひずみゲージによる力センサで測定する。垂直抗力はカウンターウェイトにより一定になるように調整することで摩擦係数を導出する。Fig. 19 に製作した実験装置の概観を示す。

θ は 15 ~ 90 [deg] の範囲で 15[deg] おき、 V は 0.05 ~ 0.23 [m/s] の範囲でおよそ 0.05 [m/s] おきに測定を行った。ばらつきを考慮して各 5 回の測定を行い、平均値をデータとした。

その結果、まず転がり方向に関しては受動車輪として軸をベアリングで支持していることから、条件によらず $\mu_r = 0.002$ とほぼ一定であった。本来ならベアリングの潤滑油による粘性摩擦が見られるはずであるが、本実験の場合、 V そのものが小さい値であったため測定できなかったものと思われる。

これに対し μ_n は、 μ_r 同様速度に対する依存はみられなかったが、 θ に対しては大きく変化するような結果が得られた。実験式とあわせて Fig. 20 に示す。この結果は以下のように定性的に説明することができる。

タイヤがスリップ角 θ を保ちながら転がりつつ接地する場合、接地開始点からしばらくの間は地面に沿ってタイヤが軸方向に倣いながら変形することで静止摩擦状態となる。しかし変形量が大きくなるとなるとそれ以上変形しきれずに接地面は滑りはじめ、動摩擦状態となる。つまり接地面においては静止摩擦と動摩擦の二つの領域が存在しており、その両者の面積比を表す関数は θ をパラメータとして含んでいる [9]。

一例を Fig. 21 に示す。 $\theta = 0$ [deg] では接地面では静止摩擦状態であるが、このとき F_n は生じない。また $\theta = 90$ [deg] のときはタイヤが回転しないことから動摩擦状態であり、このときの反力はすべて F_n として表れる。(最大静止摩擦 > 動摩擦) の関係と、 F_n の向きを考慮すると、ある θ で F_n が最大値となるような特性が表れることが定性的に理解できる。

もしタイヤの軸方向の剛性が高くなると変形が起らないとすると、 $\theta (\neq 0)$ の値に依らず接地面全体にわたって常に動摩擦状態になり、 μ_n の値は一定値を取るようになる。この状態はすなわちクーロン摩擦の仮定が成立している状態である。

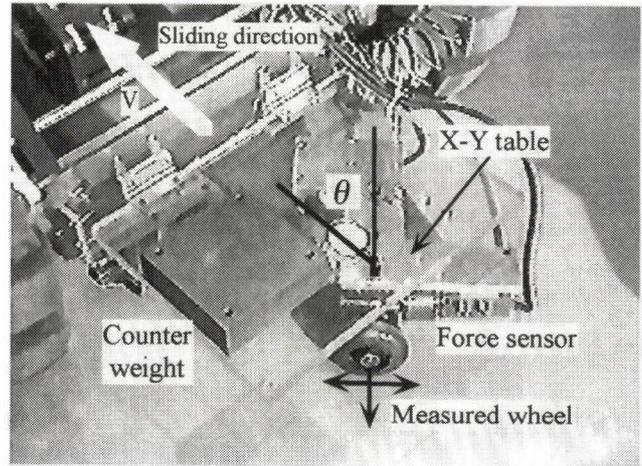


Fig. 19 Measurement system of the friction coefficient

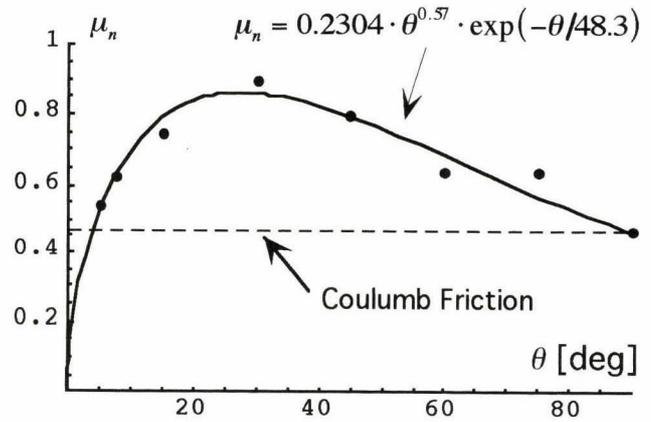


Fig. 20 Experimental result of μ_n vs. slip angle θ

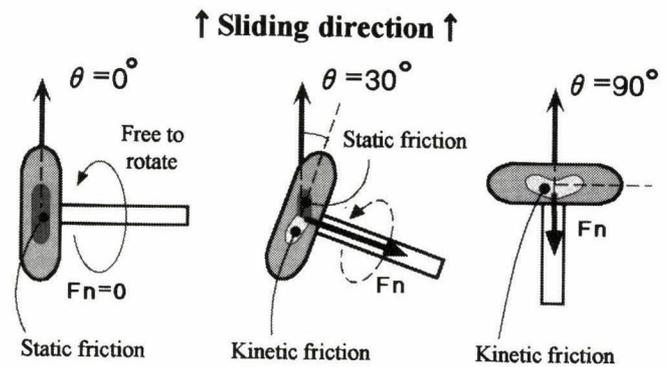


Fig. 21 Static/kinetic friction state at the contact point



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、同学機械物理工学科助手、1979年同学助教授、1992年同学教授、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)