

平成 22 年 6 月 1 日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2008～2009  
 課題番号：20760167  
 研究課題名 (和文) 受動走行現象の力学原理に基づいた走行ロボットの開発  
 研究課題名 (英文) Development of running robot based on a principle of passive running phenomenon  
 研究代表者  
 池俣 吉人 (IKEMATA YOSHITO)  
 名古屋工業大学・工学研究科・特任研究員  
 研究者番号：70467356

## 研究成果の概要 (和文)：

受動走行は、アクチュエータ、センサおよび制御を一切用いずに、重力のみによって走ることができる。本研究ではまず、受動走行を低次元化したバネ付きリムレスホイール (リムなしの車輪) を実験とシミュレーションから解析を行う。次に、従来のホッピングロボットのような脚の伸展運動 (バネ要素) ではなく、走行速度を利用した身体の起こし回転運動に注目し、当該運動に基づいた受動走行の実験および解析を行う。最後に、これらの研究結果を踏まえて、2脚受動走行機を試作開発および検証実験を行う。

## 研究成果の概要 (英文)：

Passive running can run by interaction between machine dynamics and environment only. First, we demonstrate a passive running of rimless wheel with spring. Secondly, we demonstrate a passive running based on hinged-movement. Finally, a passive biped running based on the hinged-movement is demonstrated by experiments.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：ロボティクス

## 1. 研究開始当初の背景

現代のロボットは、高精度なセンサ、高性能なアクチュエータおよび高度な制御からなる、最先端テクノロジーの結晶である。これらの高度なテクノロジーによって、歩行や走行を実現させている。その要になっているのが、ZMP (Zero Moment Point) である。ZMP は姿勢安定性 (歩行や走行時に限らな

い) に関する力学的に重要な指標である。しかしながら、ZMP 規範の制御方法では、高いエネルギー効率を実現することは困難である。また、その歩行や走行は自然さに欠ける。一方、受動走行 (Passive Running) は、アクチュエータ、センサおよび制御を一切用いずに、走行機のもつダイナミクスと環境 (ここでは、床面) との相互作用のみによっ

て下り斜面を走ることができる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、以下の三つからなる。

(1) 受動走行の力学的原理を理解する上で、実験・解析モデルを低次元化して、その特徴を知ることは重要である。例えば、受動歩行の研究では、低次モデルのリムレスホイール (Rimless Wheel) が解析でよく用いられる。また、受動走行の解析は多くあるが、実験とシミュレーションの両側面からの解析は少ない。そこで、本研究では、受動歩行を低次元化したバネ付きリムレスホイールに注目し、当該受動歩行を実験とシミュレーションから解析する。

(2) 平坦な床面に対してバーを適切に投射すると、バーは回転しながら跳ね上がる。「起こし回転」と呼ばれる現象で、高飛びの選手はこの原理を巧く利用して跳躍している。本研究では、ホッピングロボットのような脚の伸展運動 (バネ要素) ではなく、走行速度を利用した身体の起こし回転運動に注目した。本研究では、当該運動に基づいた受動歩行を実現し、さらに、平衡点とその安定性を明らかにする。

(3) 連続起こし回転型受動歩行に基づいた2脚受動歩行機を開発する。

## 3. 研究の方法

(1) ①本研究で用いたリムレスホイールの実験機を図1に示す。8本の脚が等間隔で腰部に固定されており、股角度は45 degとなる。各脚の先端にはバネが取り付けられている。バネ係数および自然長は、それぞれ0.7kN/mおよび50mmである。なお、バネの換装は容易に可能である。全長は45cm、全質量は0.95kgである。また、トレッドミル

(SportsArt 製: TR-20F) を用いて実験を行った。走行面の長さおよび幅は、それぞれ1.5および0.5mである。

走行現象の計測方法に関しては、各足および腰の中心にマーカーを貼付けて、高速度カメラ (Photron 製: Fastcam-512PCI 32K) を用いて、これらのマーカーを同時に撮影した。なお、フレームサイズは512×512pixels、撮影速度は250frame/sとした。

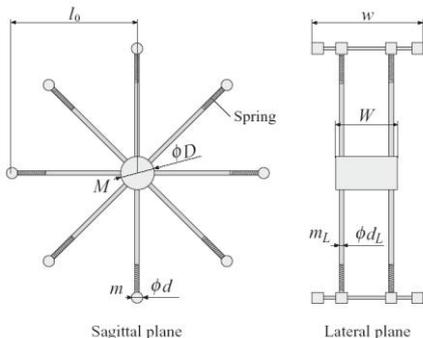


図1 バネ付きリムレスホイールの実験機

②本研究で用いたバネ付きリムレスホイールのモデルを図2に示す。Mおよびmはそれぞれ腰および足の質量、lはバネが自然長のときの脚長、Iは重心まわりの慣性モーメントである。γはスロープ角度、αは股角度である。θは支持脚の角度であり、両脚支持期では前脚の角度とする。xおよびyは当該脚の足の座標である。kはバネ係数であり、バネの減衰を考慮して粘性係数cのダンパーがバネと並列に取り付けられている。z<sub>1</sub>は支持脚のバネの長さであり、両脚支持期では前脚のバネの長さとなる。z<sub>2</sub>は両脚支持期における後脚のバネの長さである。なお、モデルパラメータは、実験機を参考にして決めた。当該モデルを用いて、バネ付きリムレスホイールの受動歩行の安定性解析を行う。

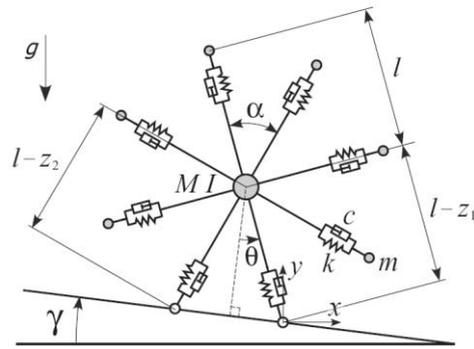


図2 バネ付きリムレスホイールのモデル

(2) ①起こし回転用バーは、図3に示すような走り高跳び用のグラスファイバー製クロスバーを適当な長さに切断して用いた。起こし回転用バーは、長さを短くし、回転を抑えるためにバーの中に重りを詰めた。全長0.57m、質量0.46kg、重心まわりの慣性モーメントは0.0125kgm<sup>2</sup>である。なお、バーを鉛直の姿勢で自由落下させて、床面に衝突させると跳ね返ることはほとんどない。さらに、バーの両端にウレタンキャップを装着した。

本研究では受動歩行のようにスロープ上で実験を行うことにした。実験スペースの制約上、トレッドミル上で実験を行うことにした。ベルトの長さおよび幅は、それぞれ1.3および0.5mである。また、ベルト速度は一定である。以上の実験装置を用いて、起こし回転の受動歩行実験を行う。

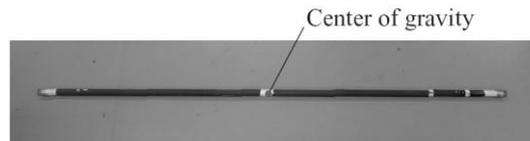


図3 起こし回転用バーの実験機

②起こし回転運動のモデルを図4に示す。Mは質量、Iは重心まわりの慣性モーメント、 $\gamma$ はスロープ角度、 $\theta$ は姿勢角度、lは重心から足先までの距離である。また、重心の水平および垂直位置はそれぞれxおよびyである。

バーと床面の衝突を観察すると、着地時間は8msと非常に短いことから、本研究では着地の瞬間にバーが軸方向に跳ね返ると仮定した。このとき、着地前後において、着地点まわりの角運動量が保存され、バーの軸方向跳ね返りが生じるとして、衝突現象をモデル化した。当該モデルを用いて、起こし回転型受動走行の平衡点とその安定性の解析を行う。

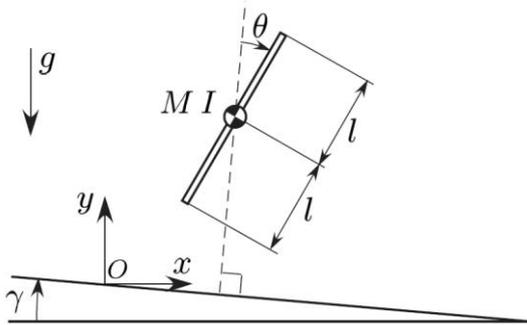


図4 起こし回転型受動走行のモデル

(3) 本研究では、連続起こし回転の実機実験の結果を踏まえ、図5に示すような2脚受動走行機を試作開発した。

機構としては、起こし回転と同じグラスファイバー製のロッドを2本用意し、単純に腰軸に接続しただけである。ここで、4脚では構造が複雑化すると、2本の同一脚の衝突が同時に起こらない可能性があるため、2脚とした。脚長は36.5cm、全質量は2.8kgである。腰部の前後には、脚の振り角度を制限する衝撃吸収材(ソルボセイン)付きのストッパーが取り付けられている。また、過度の起こし回転を抑制するために、0.45kgの脚質量に対して、腰質量を1.9kg(1.25kgのバーベルを腰上部に水平配置)とし、さらに脚先端には柔らかいウレタンキャップ(シヨアA50)を装着した。

走行実験で重要となるのが、脚下部で前方下向きに突き出した足先部である。足先部はアルミプレートでできており、先端にソルボセインが張ってある。連続起こし回転の場合と同様に、着地時の脚姿勢が重要となる。この足先部によって過度な前傾を抑制している。

以上述べた走行機を用いて、2脚受動走行の実験を行う。



図5 2脚受動走行機

#### 4. 研究成果

(1) ①スロープ角度を変えた場合の平均速度を図6に示す。ただし、定常状態の速度である。なお、前方に倒れるために必要なスロープ角度は、それぞれ2deg以上となる。

スロープ角度が大きくなると平均速度は増加し、スロープ角度が3.5deg以上になると、支持脚の足が床面から離れて、歩行から走行へと遷移した。なお、歩行には二つの定常状態が存在した。

走行になるとスキップのように、支持脚(後脚)の足が床面から一旦離れて再び着地し、その後遊脚(前脚)が着地する。本研究では、この走行を「スキップ走行」と呼ぶことにする。スキップ走行における浮遊期の様子を図7に示す(トリミング有)。ただし、スロープ角度は8degである。このときの周期は0.22s、浮遊時間は0.12sとなり、周期の半分以上(55%)が空中に浮いている。

スロープ角度が8.5deg以上になると、トレッドミルのベルト速度を最大(約4m/s)にしても、ボールが転がるように加速していき、定常状態は見られなかった。本研究では、この走行を「転がり走行」と呼ぶことにする。

以上のように、バネ付きリムレスホイールには、歩行、スキップ走行および転がり走行の三つの移動形態が存在する。

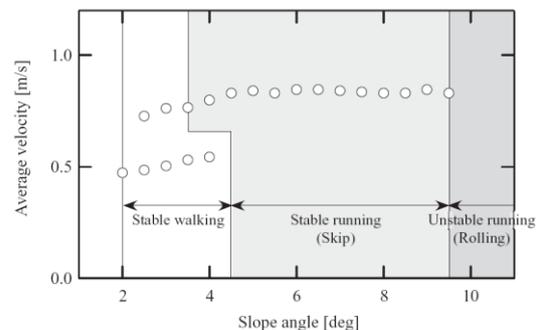


図6 スロープ角度と移動形態

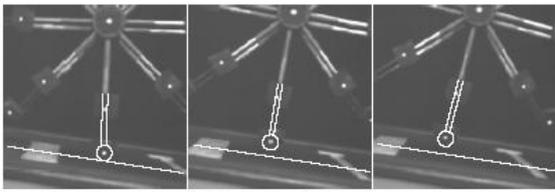
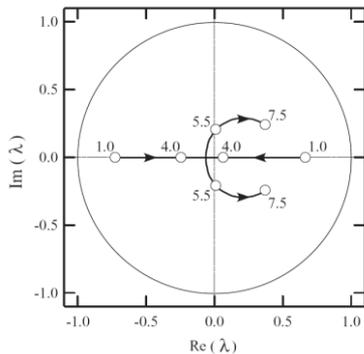


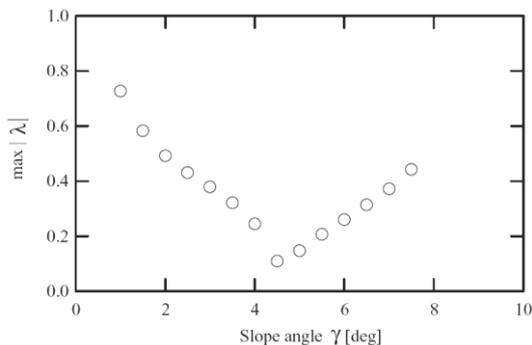
図7 バネ付きリムレスホイールの浮遊期

②本研究では、スキップ走行における平衡点の安定性をモデルから解析する。スロープ角度 $\gamma$ に対する固有値軌跡は図8(a)のようになる。すべての固有値が単位円内にあるため、平衡点は局所漸近安定となる。なお、固有値は数値シミュレーションから求めた。

次に、固有値の絶対値の最大値 $\max|\lambda|$ を図8(b)に示す。 $\max|\lambda|$ が小さければ、平衡点近傍における収束が速くなる。すなわち、少ないステップ数で収束する。図からわかるように、スロープ角度が4から5degの間に最適なスロープ角度が存在する。このときの $\max|\lambda|$ の値は0.08となっており、平衡点近傍の安定性(収束性)が非常に高い。制御を一切用いず、機体のもつダイナミクスだけで、これほどの安定性が実現できることはスキップ走行の大きな特徴である。



(a) 固有値軌跡



(b) 固有値の最大値

図8 平衡点の安定性

(2) ①連続9回の起こし回転運動、すなわち一種の受動走行に成功した。図9にその様子を示す(トリミング有り)。このときのトレッドミルのベルト速度は約14.5km/h(トレッドミルの限界速度)であった。なお、最適なスロープ角度は試行錯誤的に探し、約18.5degとなった。

姿勢の時間変化を図10に示す。ただし、横軸は時間、縦軸は姿勢角度を採っており、着地時に姿勢角度が $-90 < \theta < 90$  degとなるように変換している。図からわかるように、着地時の姿勢はほぼ鉛直となっており、適切な着地姿勢が存在することがうかがえる。なお、最後は-44degと後傾し過ぎて後ろ側に跳ね返ってしまい転倒した。

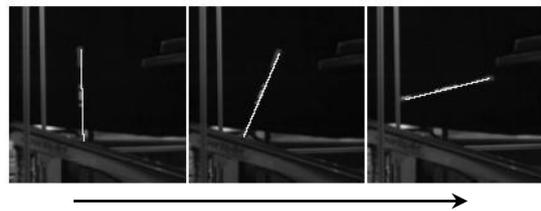


図9 起こし回転型受動走行

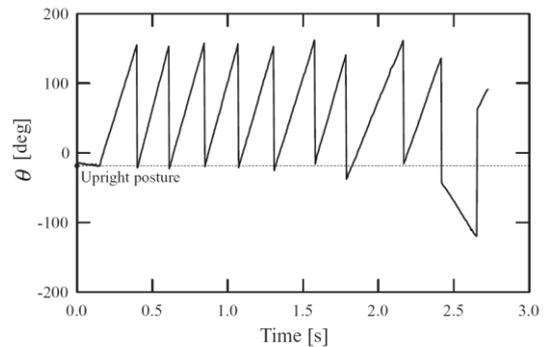


図10 バーの姿勢角度

②平衡点は次式のように導くことができる。

$$\theta_f^+ = -\gamma$$

$$\dot{\theta}_f^+ = \sqrt{\frac{(1-e)\pi g}{2(1+e)l \tan \gamma}}$$

$$\dot{L}_f^+ = \sqrt{\frac{2e^2 \pi l g \tan \gamma}{(1+e)(1-e)}}$$

跳ね返り係数が $0 < e < 1$ の場合、一つの平衡点が存在することになる。上式の第1式は、平衡点では着地時の姿勢が鉛直となることを示している。図10の実験結果をみると、着地時の姿勢はほぼ鉛直となっており、本解析と一致した結果となっている。

スロープ角度  $\gamma$  に対するヤコビ行列の固有値の最大値  $\max |\lambda|$  を図 11 に示す。ただし、固有値は数値シミュレーションから求めた。図からわかるように、 $\max |\lambda|$  は 1 よりも大きくなり、平衡点は不安定となる。スロープ角度  $\gamma$  が上がると不安定性は減少する。実験では、スロープ角度を大きくすると成功回数が増えるという傾向にあり、解析結果に近いものとなっている。

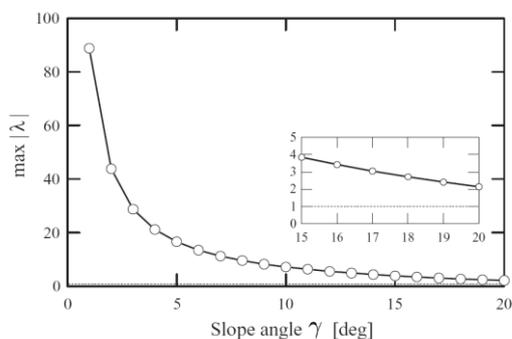


図 11 平衡点の安定性

(3) 図 5 に示す 2 脚受動走行機を用いて実験を行った結果、図 12 に示すような 2 脚受動走行を実現した。前脚の着地により後脚が高速に前方へと振り出されており、腰ばね（股関節の巻きばね）を使わずに、脚の切換えおよび高速な振り運動が行える。現段階では、安定性・再現性はまだ低いが、平均速度は 7.9km/h、フルード数は 1.16 を達成した。



図 12 二脚受動走行

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- ① 佐野明人, 池俣吉人, 宮本裕貴, 丸山信太郎, 藤本英雄, “起こし回転型受動走行と平衡点解析”, 日本機械学会論文集 (C編), 2010, 査読有 (印刷中)
- ② 池俣吉人, 佐野明人, 宮本裕貴, 大竹朋生, 藤本英雄, “バネ付きリムレスホイールによる受動走行の基礎的研究”, 日本機械学会論文集 (C編), 2010, 査読有 (印刷中)

〔学会発表〕(計 6 件)

- ① 丸山信太郎, 佐野明人, 廣間靖典, 宮本裕貴, 池俣吉人, 藤本英雄, “バウンシ

ング・ロッド・ダイナミクスに基づく 2 脚受動走行”, 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門 講演会, 東京, 2009/12/25.

- ② H. Miyamoto, Y. Ikemata, A. Sano, and H. Fujimoto, “Passive Running of Rimless Wheel with Springs,” The 12th Int. Conf. on Climbing and Walking Robot and the Support Technologies for Mobile Machines, Istanbul, 2009/9/9.
- ③ 宮本裕貴, 池俣吉人, 佐野明人, 藤本英雄, “バネ付きリムレスホイール運動の平衡点解析”, ロボティクス・メカトロニクス講演会’09, 神戸, 2009/5/26.
- ④ 宮本裕貴, 佐野明人, 池俣吉人, 丸山信太郎, 藤本英雄, “起こし回転型受動走行の平衡点とその安定性”, ロボティクス・メカトロニクス講演会’09, 神戸, 2009/5/26.
- ⑤ 宮本裕貴, 池俣吉人, 佐野明人, 藤本英雄, “リムレスホイールの受動走行のモデル化とその解析”, 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門 講演会, 岐阜, 2008/12/5.
- ⑥ 池俣吉人, 大竹朋生, 佐野明人, 藤本英雄, “リムレスホイールによる受動走行の実験的基礎研究”, ロボティクス・メカトロニクス講演会’08, 長野, 2008/6/6.

〔その他〕

ホームページ:

[http://drei.mech.nitech.ac.jp/~fujimoto/sano/walk\\_jpn.html](http://drei.mech.nitech.ac.jp/~fujimoto/sano/walk_jpn.html)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

池俣 吉人 (IKEMATA YOSHITO)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・特任研究員

研究者番号: 70467356