

平成 21 年 6 月 10 日現在

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19360115

研究課題名 (和文)

受動歩行原理に基づくより良く歩けるロボット開発とヒト歩行解析

研究課題名 (英文)

Development of Advanced Walking Robot Based on Principle of Passive Walking and Analysis of Human Walking

研究代表者

佐野 明人 (SANO AKIHITO)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80196295

研究成果の概要：

本研究は、動力やコンピュータを持たない歩行ロボットに関するものである。ロボットを歩かせるのではなく、歩けるような脚・足にすることで、ロボット自身が自然かつ滑らかに歩行することができる。開発したロボットは、約 2 時間歩き続けたり、時速 3.3[km/h] で素早く歩いたりすることができ、しかも歩く姿はヒトそっくりである。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2008年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
年度			
年度			
年度			
総計	9,700,000	2,910,000	12,610,000

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：知能ロボティクス、受動歩行、歩行原理、ヒト歩行、力学メカニズム

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 受動歩行は、歩行機のもつダイナミクスと環境（ここでは、スロープ）との相互作用のみによって、理想とする自然な歩容を形成する。特に、安定したリミットサイクル（閉軌道）が存在するという重要な特徴をもつ。すなわち、ある状態から定常歩行に収束する一種の引き込み現象が見られる。歩行の原理を考える上でとても重要なのは「平衡点」である。平衡点とは、リミットサイクルの一断面の点であり、着地直後の状態といった離散的な状態であるが、この平衡点の安定性を見るだけで歩行全体の安定性が示せる。

(2) 受動歩行の研究はすでに 15 年を越えて

いる。多くの研究がより高次のモデルを対象としている。また、平地歩行を目指したり、より複雑なカオス現象などに興味を持たれている。受動歩行の研究を創始した McGeer の研究以降、詳細な安定性解析が行われた。これら解析において、特に注目すべきは、Rimless spoked wheel の安定性解析において導かれたヤコビ行列を基に、ヤコビ行列の固有値の解析的な近似式が導かれた点である。しかしながら、この解析的な近似式あるいは式導出の過程から平衡点の安定メカニズムを知ることは難しい。これまでは、ヤコビ行列から制御理論的な発想に基づいた歩行制御の有効性が検証されるに留まっていた。

(3) 研究代表者らは、複雑に考えず単純明快に考える立場から、最も簡単な歩行モデルからスタートし、理論と実験の両面で研究を行ってきた。そして、受動歩行の原理（歩ける原理）に関わる主要な研究成果を挙げている。これらの研究成果をさらに発展させることで、受動歩行に関わる他の力学的原理・メカニズムの解明、また原理原則に則した必然性の高いシステム設計を様々に展開できるとの考えに至った。さらに、従来はその動きを観測し解析することが多かったヒトの歩行に関しても、受動歩行の原理と照らし合わせることで、その優れた特徴が明らかになると考えた。

## 2. 研究の目的

(1) 受動歩行は、制御やアクチュエータを用いずに、脚のダイナミクスだけで遊脚の振り抜きを行える。すなわち、遊脚の膝が自然に曲がり、その後伸びながら支持脚を振り抜いていく。そこで、本研究では、第1に受動歩行における脚の振り運動の力学的メカニズムを明らかにする。

(2) 第2に受動歩行原理に基づいて、より良く歩けるロボットの開発を行う。原理原則に則した必然性の高いシステム設計を様々に展開し、その有効性を実証するためにも高性能な歩行ロボットの開発が不可欠である。膝ありタイプの受動歩行は極めて困難とされ、実験において安定した歩行の実現が困難であった。しかし、研究代表者らは理論と実験の両面で研究を行ってきた。現在、4,010歩（歩行時間約35分）の連続歩行記録を樹立した受動歩行ロボットのプロトタイプを保有している。この現有ロボットをベースに、力学原理に則した改良を施し、より良く歩ける高性能な受動歩行ロボットを2年の研究期間内に完成させる。目標として数万歩を目指す。

(3) 受動歩行はヒトの歩行に近いとよく言われる。したがって、受動歩行原理はヒトにも同様に働き、ヒトはそれを巧く使って楽に（高エネルギー効率）歩いていると予想される。そこで、第3に受動歩行原理に基づきヒトの歩行解析を行う。これにより、ヒトとロボットの共通する点を見出し、またヒト固有の特色を明らかにする。

## 3. 研究の方法

(1) 本研究では、歩行を自然が織りなす力学現象と捉えており、現象そのもののロバスト性（頑健性）の向上が大切だと考えている。言い換えれば、より良く歩けるようにダイナミクスを設計し、その有効性は連続歩行記録で評価できると考えている。そこで、実験環境としては、データ記録装置に画像データが蓄積可能なビデオカメラシステムを選定する。さらに無線システムを使ってセンサデー

タを受信する。また、環境側であるスロープ（トレッドミル）の傾斜角度、速度、歩行面の振動状態などをモニタするトータル的な実験環境を構築する。これにより、安定な定常歩行、不安定現象、失敗に至るパターンなど、貴重な実験データを膨大に収集することができ、統計学的手法も含めてデータ解析を行う。そして、理論解析、実証実験にその結果をフィードバックしていく計画である。

(2) これまで、受動歩行の解析が最も容易となるモデルとして、コンパスタイプの一種である Simplest walking model を用いてきた。これは、腰の質量が脚の質量に比べて十分に大きいとの仮定を置いている。また、足底も点接地を仮定している。しかし、受動歩行ロボットは脚に質量をもち、足底は円弧となっており、モデルと実機間に大きな隔たりがあった。現実の脚の質量分布や足底の円弧形状は、脚の振り運動に影響を与える。足底形状は、その円弧中心が膝関節前方に来るように設定し、支持脚期での膝折れを抑制しているものの、基本的に試行錯誤的に決められているのが現状である。そこで、大腿部と下腿部の脚長比、質量配分、重心位置および足底形状などの最適化を念頭に、脚の振り運動の力学的メカニズムを明らかにする。

(3) 受動歩行の原理と脚の振り運動の力学的メカニズムに関する研究成果を基に、まず質量配分ならび足底形状を中心とした歩行ロボットの設計法を検討する。質量配分は歩行ロボット全体に関わる問題であるために、まず先にその設計方針を決定する。次いで足底形状に関しては、ラビッドプロトタイプングにより足部を作成し、効率的に実機実験ならびにその妥当性の検証を行う。

また、ヒトと同様な膝ありタイプでは、膝関節部の挙動が最も歩行に影響し、実験の再現性、成功率の低下などを引き起こしている。膝は、遊脚期には曲がることを、支持脚期には真直ぐに伸びていることが要求される。そこで、歩行時の主要部の力を計測し、設計パラメータの最適値を導出し、材質・機構を含め最良の膝部の設計を行う。これにより、実験の再現性が格段に増し、理論・シミュレーション結果との比較検討が容易になる。さらに、実験にトレッドミルを使用しているために、ロボットは直進安定性が低下すると歩行面から脱落する。これは、2次元平面（矢状面）内での歩行安定性ならびに脚の振り運動とは別問題であるが、連続歩行においては大きな障害となっている。そこで、直進安定性に関しても何らかの方策を検討する。

(4) ヒトは、日常生活において必要に応じて速度を切り換えるが、歩幅と歩行率（歩数/分）を意識することはない。このような歩行を自由歩行と呼ぶ。本研究では、この自由歩行に注目して、脚の振り運動を計測して、受

動歩行における脚の振り運動と比較してその特徴を明らかにする。

#### 4. 研究成果

(1) 受動歩行における脚の振り運動の力学的メカニズムを明らかにした。具体的には、遊脚膝の屈曲・伸展のメカニズムを見出した。さらに、円弧足の力学的効果およびそのメカニズムを明らかにした。円弧足は、支持脚膝を真直ぐに保持する働きがあり、さらに常に遊脚膝を屈曲させる作用を持っていることを示した。

(2) 受動歩行原理に基づいて、より良く歩ける小型の受動歩行ロボットの開発を行った（図1参照）。具体的には、脚が本来有しているダイナミクスを最適化し、よりロバスタな脚運動を実現した。その有効性は、連続歩行実験により実証された。支持脚が折れ曲ったり、遊脚が床面に接触したり、後方に倒れることが少ないより良く歩けるロボットとなった。また、受動歩行機に最適な無線式センサシステムを構築した。加速度センサ、角速度センサおよびポテンショメータを搭載し、種々の衝突現象を含む受動歩行の様子をより的確に捉えることができた。さらに、進行方向制御を目的として方向転換システムを構築し、約16,000歩（歩行時間約2時間10分）の連続歩行記録を樹立した。

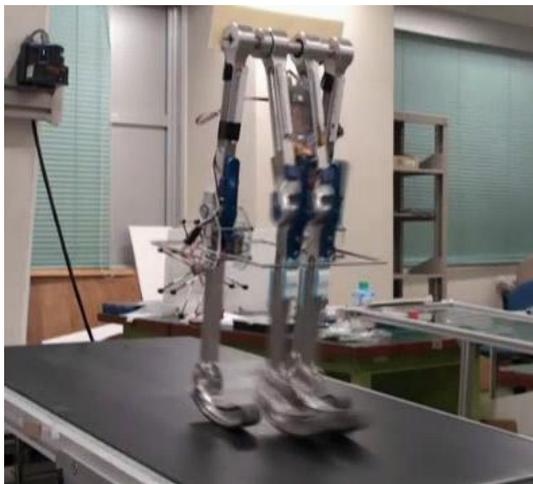


図1 小型の受動歩行ロボット

(3) 本研究では、受動歩行原理に基づいた、より良く歩ける大人サイズの受動歩行ロボットを設計・製作した（図2参照）。本ロボットにおいて、歩行安定化のための股角度拘束機構は、フレームを大腿部の前後に配置し、着地時の股角度を $28\sim 34$  [deg]に調整できるようになっている。また、外脚下腿部同期機構は、カーボンロッドを使った平行リンク機構を外脚内側に配置（転倒時の保護）した。

歩行実験の結果、スロープ角度 $6.3$  [deg]にて、歩行速度 $3.3$  [km/h]の受動歩行を実現した。脚長の違いはあるが、現在最先端の歩行

ロボット（ $2.0\sim 2.7$  [km/h]）と比べても速い歩行速度となっている。また、股関節軸の両端に自重と同じ総重量 $10$  [kg]の負荷ウェートを付け、機構上特段の変更は行わず歩行実験に成功した。これは、受動歩行ロボットの優れた特徴の一つである。



図2 大人サイズの受動歩行ロボット

実現した歩行は、ヒトの歩行とほぼ同等な歩容となっている。ここで重要なのは、脚軌道をヒト歩行に合わせているのではなく、歩行ロボットのもつダイナミクスと環境との相互作用のみによって、ヒトに近い歩容が生成されていることである。しかし、細部に注目すると、ヒト歩行では、大腿部の角度が $-20$  [deg]程で変化せず下腿部の角度が減少、すなわち遊脚膝が伸展している点が異なっていることも明らかになった。

#### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計5件）

① 池俣吉人, 佐野明人, 安原潔志, 藤本英雄, 受動歩行の脚運動に対する円弧足の力学的効果, 日本ロボット学会誌, 27, 印刷中, 2009, 査読有

② Yoshito IKEMATA, Kiyoshi YASUHARA, Akihito SANŌ, Hideo FUJIMOTO, Dynamic Effects of Arc Feet for Leg Motion of Passive Walker, Proc. of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1, pp.2755-2760, 2009, Full paper review

③ Yoshito IKEMATA, Kiyoshi YASUHARA, Akihito SANŌ, Hideo FUJIMOTO, A Study of the Leg-swing Motion of Passive Walking, Proc. of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1, pp.1588-1593, 2008, Full paper review

④ 池俣吉人, 佐野明人, 藤本英雄, 平衡点の大域的安定化原理に基づくロバストな受動歩行, 日本ロボット学会誌, 26, pp.178-183, 2008, 査読有

⑤ 池俣吉人, 佐野明人, 藤本英雄, 受動歩行における脚の振り運動に関する基礎的研究, 日本機械学会論文集C編, 74, pp.365-371, 2008, 査読有

〔学会発表〕(計18件)

① 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, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2009年5月26日, 福岡

② 田部井聡, 佐野明人, 池俣吉人, 林祐史, 藤本英雄, 受動歩行機のアシスト平地歩行の実現, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2009年5月26日, 福岡

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, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2009年5月26日, 福岡

④ 佐野明人, 丸山信太郎, 池俣吉人, 宮本裕貴, 藤本英雄, 受動走行を目指した起こし回転運動の研究, 第9回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, 2008年12月5日, 岐阜

⑤ 池俣吉人, 佐野明人, 藤本英雄, 受動歩行原理の探究, 第9回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, 2008年12月5日, 岐阜

⑥ 森本健嗣, 佐野明人, 池俣吉人, 藤本英雄, 可変スロープ機構を用いた受動歩行の環境適応性の検討, 第9回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, 2008年12月5日, 岐阜

⑦ 佐野明人, 池俣吉人, 大友隆洋, 田部井聡, 藤本英雄, 大人サイズの受動歩行とヒト歩行との類似性, 第29回バイオメカニズム学術講演会, 2008年10月25日, 広島

⑧ 佐野明人, 池俣吉人, 大友隆洋, 藤本英雄, 大人サイズの受動歩行機 BlueBiped の開発, 第26回日本ロボット学会学術講演会, 2008年9月11日, 神戸

⑨ 山中恵一朗, 佐野明人, 林祐史, 池俣吉人, 藤本英雄, 受動歩行における進行方向制御, 第26回日本ロボット学会学術講演会, 2008年9月11日, 神戸

⑩ 池俣吉人, 安原潔志, 佐野明人, 藤本英雄, 受動歩行機の円弧足の力学的役割とそのメカニズム, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2008年6月6日, 長野

⑪ 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, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2008年6月6日, 長野

⑫ 佐野明人, 大友隆洋, 池俣吉人, 藤本英雄, 大人サイズの受動歩行機の開発とヒト歩行との類似性, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2008年6月6日, 長野

⑬ 佐野明人, 山中恵一朗, 森本健嗣, 池俣吉人, 藤本英雄, 受動歩行における方向転換機構と可変スロープ機構の開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2008年6月6日, 長野

⑭ 小川佳輝, 佐野明人, 池俣吉人, 藤本英雄, 受動歩行機のセンシングシステムの開発, 第8回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, 2007年12月20日, 広島

⑮ 佐野明人, 森本健嗣, 池俣吉人, 藤本英雄, 受動歩行機の進行方向制御のための可変スロープ機構の開発, 第8回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, 2007年12月20日, 広島

⑯ 佐野明人, 山中恵一朗, 池俣吉人, 藤本英雄, 受動歩行原理の獲得に関する基礎的研究, 第28回バイオメカニズム学術講演会, 2007年11月11日, 岐阜

⑰ 安原潔志, 池俣吉人, 佐野明人, 藤本英雄, 受動歩行の遊脚膝運動における円弧足の役割, 第25回日本ロボット学会学術講演会, 2007年9月13日, 千葉

⑱ 山下親大, 佐野明人, 池俣吉人, 藤本英雄, 受動歩行機の膝関節構造と運動, 第25回日本ロボット学会学術講演会, 2007年9月13日, 千葉

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕(計9件)

① 解説: 佐野明人, 池俣吉人, 藤本英雄, 歩行力学とロボティクス, 計算工学, 13, pp.1860-1863, 2008, 査読無

② 受賞: 佐野明人, 池俣吉人, 藤本英雄, 受動歩行ロボット(ブルーバイペッド), 2008年度グッドデザイン賞, 2008年11月6日

③ 招待講演1: 佐野明人, ヒトに近い歩行ロボットとその衝突現象, 科学技術交流財団第3回「人体損傷に基づく衝撃力測定・評価システムの開発に関する研究会」, 2007年11月20日

④ 招待講演2: 佐野明人, 人とロボットが共に歩む技術, 名工大テクノフェアメインテマ(異分野融合)講演会, 2007年11月1日

⑤ イベントデモ1: GOOD DESIGN EXPO(2008年8月22日~24日, 東京)において, 大人サ

イズの受動歩行ロボットによる、のべ約3万歩の歩行デモを実施し、4万人の来場者に大きな感動とインパクトを与えた。この模様は、テレビ東京「ワールドビジネスサテライト」(8月22日放送)で紹介された。

⑥ イベントデモ 2:「キッズ・サイエンス・パーク」(2007年8月20日,愛知)において、小型の受動歩行ロボットによるデモを実施し、多くの子供たちに理科への興味と夢を与えた。

⑦ 新聞掲載 1: 日刊工業新聞「ICRA2009 受動歩行ロボなど実演」(2009年5月15日掲載)

⑧ 新聞掲載 2: 日刊工業新聞「動力なしで4010歩,名古屋工大,性能アップ,膝付き受動歩行ロボ開発」(2007年12月7日掲載)。

⑨ 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

佐野 明人 (SANO AKIHITO)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 80196295

### (2) 研究分担者

藤本 英雄 (FUJIMOTO HIDEO)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 60024345