

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 17 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560245

研究課題名（和文） ZMP 理論に基づく歩行が可能な足形状を有する受動歩行規範型  
二足歩行ロボットの開発研究課題名（英文） Development of passive biped robot with sole shapes that can walk  
based on ZMP theory

研究代表者

古屋 信幸 (FURUYA NOBUYUKI)

山梨大学・医学工学総合研究部・教授

研究者番号：50126653

研究成果の概要（和文）：

二足歩行ロボットの工学的応用を考えた場合、エネルギー効率を向上させる必要がある。そこで、本研究では、人を模擬した足形状の踵、足趾を持つ受動歩行を実現する二足歩行ロボットの開発を目的とした。シミュレーションにより提案する足形状を持つ受動歩行機の有効性を示し、実機によって周期的な歩行が可能であることを示した。マルチボディダイナミクス系ソフトウェアを用いて準受動歩行制御系を構築し、その有効性を示した。

研究成果の概要（英文）：

In engineering application, it is necessary to improve the energy efficiency of biped robot. Therefore, in this study, we aimed to develop a biped robot to achieve the passive walking with the heel and the toes that simulates the human foot shape. The effectiveness of the passive walking machine with the proposed foot shape is shown by simulation and the experimental results by the real machine. And, by using multibody dynamics software, we constructed control system of quasi passive walking and verified its effectiveness.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：受動歩行，歩行ロボット

## 1. 研究開始当初の背景

ゼロモーメントポイント（以下、ZMP）理論により実現された二足歩行ロボットが開発されて数年が経過しているが、実際の応用に関しては、いまだ未知の状態であるといえる。ZMP は姿勢安定性(歩行時に限らない)に関する重要な指標であり、ロボットを「歩

かせる」のに最も強力なツールであるが、エネルギー効率が高いとは言い難い。人と比較した場合、成人の一日の摂取エネルギーは 2000kcal 程度であるが、長時間歩行することが可能である。それに対して現在の二足歩行ロボットは、重量は人とそれほど変わらないほどに改善されているが、人間ほど効率的に

は歩行できていない。これは、一重に歩行のエネルギー効率の悪さに起因していると考えられる。つまり、二足歩行ロボットにおいても省エネルギー化を行う必要があり、省エネルギー化できなければ工学的応用が広がることは考えられない。

## 2. 研究の目的

二足歩行ロボットの工学的応用を考えた場合、エネルギー効率を向上させる必要がある。そこで注目されている歩行形態が受動歩行であるが、平らで滑らかな面しか安定歩行できない上、直立静止、歩行速度の加減速など安定歩行以外の様々な動作を制限するという欠点を持つ。そこで、ZMP理論に基づく二足歩行ロボットにも使用でき、その上、受動歩行も行うことのできる足形状を有する二足歩行ロボットが必要不可欠である。そこで、本研究では、図1に示す人の足形状の踵、足趾に注目し、地面に力を伝達できる足形状を持ちながら、受動歩行を実現する二足歩行ロボットの開発を目的とすることで、人の歩行の巧みさを二足歩行ロボットに適用させることを試みることを目的とした。

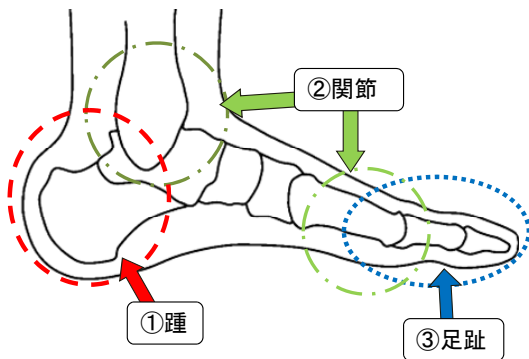


図1 人の足形状

## 3. 研究の方法

### (1) 人の足形状を模擬した受動歩行機

本研究では、図2に示す人の足形状を模擬した足形状として踵・足首・足趾を有した足形状を想定し、この足形状を有する受動歩行のシミュレーションを行う。そして、安定な周期歩行が可能であることを確認する。更に、踵・足趾関節が歩行に与える影響についても検討し、提案した足形状の有効性を検討する。シミュレーションの結果をもとに実機の作製を行い、開発した受動歩行機の有効性を検証する。

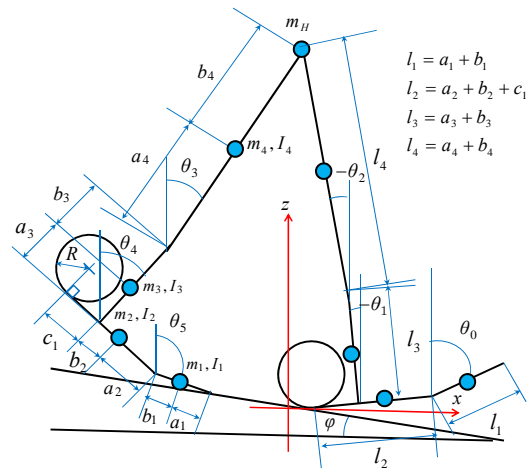


図2 受動歩行機のモデル

### (2) 準受動歩行制御系の構築

マルチボディダイナミクス系ソフトウェアを用いて受動歩行モデルを作成し、準受動歩行制御系の開発を行う。受動歩行シミュレーションの研究においては、衝突現象を完全非弾性衝突と仮定することが多い。しかし、実機での衝突現象では、完全非弾性衝突ではなく、滑りや跳ねが生じる。そこで、本研究では、完全非弾性衝突ではなく、平面足が床と衝突する際の滑りや跳ねを考慮し、バネダンパモデルによる床反力モデルを組み込んでシミュレーションモデルを構築する。

以上より、より実機の状態に近いシミュレーションモデルを用いて、準受動歩行制御系の開発を行う。

### (3) 空気圧人工筋の制御

実機のアクチュエータとしては、モータに比べ出力/重量比が高く、安全性の高い空気圧人工筋を使用することが有効である。しかし、空気圧人工筋は、ヒステリシス特性を有しており、発生力に応じてヒステリシス特性が変化する。従って、アクチュエータとして使用するには、精度が良いとは言えない。そこで、本研究ではヒステリシス補償を組み込んだ制御系を提案し、その有効性を実証する。

## 4. 研究成果

### (1) 人の足形状を模擬した受動歩行機

人の足形状を模擬した足形状として踵・足首・足趾を有した足形状を有する受動歩行のシミュレーションを行った。接地状態は滑りを生じないと仮定し、ホロノミック拘束を考慮した運動方程式を数値的に解くことにより、シミュレーションを行った。シミュレー

シミュレーション結果より、安定した歩行が可能であり、足趾関節を有することにより面接地となる期間が増え、外乱に対し不安定になりやすいつま先での線接地期間が減少することを明らかにした。

得られたシミュレーション結果から、図3に示す実機を作成し、図4のように周期的な歩行が実現できることを確認した。また、図5に示すように、蹴りだしが行われ、足趾が有効に使用されていることを実験により確認した。

得られた成果は、山梨大学大学院医学工学総合教育部修士課程修士論文に纏めるとともに、D&D2010、山梨講演会、Robomec2012にて発表した。今後は、衝撃力を緩和する役割を持つアーチ構造など、より複雑な人の足の役割を再現できる足形状を持つ受動歩行機の開発を進めていく予定である。

## (2) 準受動歩行制御系の構築

マルチボディダイナミクス系ソフトウェアを用いて受動歩行モデルを作成し、準受動



図3 試作した受動歩行機

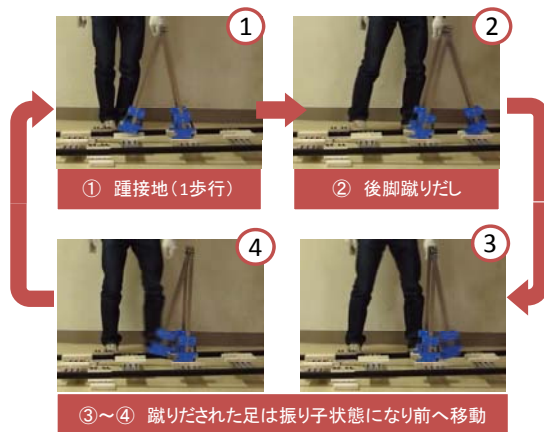


図4 歩行実験結果

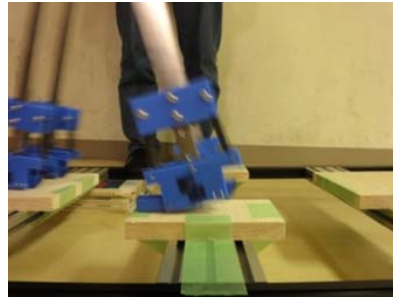


図5 足趾の有効性

歩行制御系の開発を行った。受動歩行機と床との接地条件を完全非弾性衝突とせず、滑り、跳ねを考慮した床反力モデルとしたシミュレーションモデルを構築した。そのうえで、準受動歩行制御系を構築した。

制御則は Spong の制御手法を応用した手法であり、歩行機が実際に歩行する環境において、規範とした受動歩行の運動を再現可能とする制御入力を歩行機に加えることで歩行生成する。本研究で提案した受動歩行機は、足趾を有することにより蹴りだしを行える期間が長く、つま先接地期間の減少により、劣駆動状態となる期間が非常に少なくなる利点がある。つまり、準受動歩行の実現に適している形状であることがわかる。

図6に本シミュレーションにより得られた結果を示す。黒色のグラフが規範とした受動歩行の位相線図であり、赤、青、緑のグラフが準受動歩行で得られた位相線図である。赤線が支持脚時を表し、青線が遊脚時、緑色が両足支持期を示している。両脚支持期に蹴りだしを行うことにより、平地歩行を実現している。

得られた成果は、山梨大学大学院医学工学総合教育部修士課程修士論文に纏めた。今後は、膝ありモデル、上体を有する受動歩行機などに制御系を適用していく予定である。

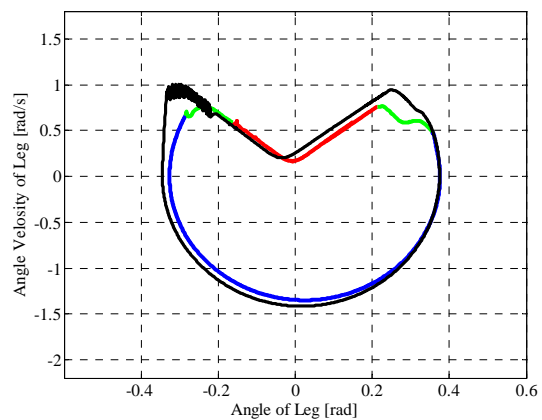


図6 受動歩行(黒)と準受動歩行の位相線図

### (3) 空気圧人工筋の制御

本研究ではヒステリシス補償を組み込んだ制御系を構築するために、発生力に応じて変化するヒステリシスモデルを提案した。提案したヒステリシスモデルの形状は、図7のようになる。本モデルをフィードフォワード型で制御系に組み込むことにより、空気圧人工筋のヒステリシス特性を補償し、空気圧人工筋の制御性能を向上させることが可能であることを示した。

得られた成果は、山梨大学大学院医学工学総合教育部修士課程修士論文に纏めるとともに、D&D2011, D&D2012にて発表した。国際会議論文としてRobio2010, Robio2011(査読有)にて公表し、いずれも十分な評価を受けた。今後は、ヒステリシスモデルをフィードバックループ内に組み込み、空気圧人工筋の応答性能を改善していく予定である。

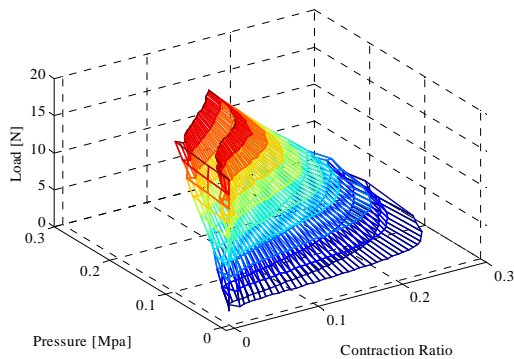


図7 提案したヒステリシスモデル

### 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2件)

- ① Akihito Ito, Naohiko Washizawa, Koh Kiyoto, Nobuyuki Furuya, Control of Pneumatic Actuator in Consideration of Hysteresis Characteristics, Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2011), Phuket, pp.2541-2546, 査読有.
- ② Akihito Ito, Koh Kiyoto, Nobuyuki Furuya, Motion Control of Parallel Manipulator Using Pneumatic Artificial Actuators, Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2010), pp.460-465, Tianjin, 査読有.

[学会発表] (計5件)

- ① 伊藤彰人, 鷲澤直彦, 古屋信幸, ヒステリシスモデルを用いた空気圧人工筋アクチュエータの制御, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2012, 2012年9月18日, 慶應義塾大学(神奈川).
- ② 伊藤彰人, 前川裕, 古屋信幸, 大房剛, 足首・足趾を有する受動歩行機の歩行解析, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会'12, 2012年5月28日, アクトシティ浜松(静岡).
- ③ 大房剛, 伊藤彰人, 古屋信幸, 踵・足首・足趾を有する受動歩行機の安定性解析, 山梨講演会, 2011年10月22日, 山梨大学(山梨).
- ④ 伊藤彰人, 古屋信幸, ヒステリシス特性を考慮した空気圧人工筋マニピュレータの制御, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2011, 2011年9月5日, 高知工科大学(高知).
- ⑤ 花澤雄太, 伊藤彰人, 古屋信幸, 踵・足首・足趾を有する受動歩行ロボットによる歩行の実現, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2010, 2010年9月14日, 同志社大学(京都).

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

古屋 信幸 (FURUYA NOBUYUKI)

山梨大学・大学院医学工学総合研究部・教授

研究者番号: 50126653

#### (2) 研究分担者

伊藤 彰人 (ITO AKIHITO)

山梨大学・大学院医学工学総合研究部・助教

研究者番号: 60516946

#### (3) 連携研究者

(なし)

研究者番号: