

氏名	兵藤 和幸
学位名	博士（システム情報科学）
学位記番号	第12号
学位授与年月日	平成21年3月19日
学位論文題目	抑制足形状を有する受動的動歩行を規範とする2足歩行ロボットに関する研究
論文審査委員	主査 三上 貞芳
	副査 大澤 英一
	副査 松原 仁
	副査 鈴木 昭二
	副査 大須賀 公一（神戸大学 教授）
	副査 佐野 明人（名古屋工業大学 教授）

論文要旨

受動歩行は、McGeer(1990)をはじめとして近年研究が進められ、アクチュエータを用いず、重力場のみで歩行が可能であることが知られている。重力場を用いた歩行であるために、エネルギーの効率がよく、多くの研究者が理論モデルやエネルギーモデル等に注目している。理論モデルを使用した受動歩行の分析の多くは、1組2脚の4脚モデルの解析を進められ、足機構の点では十分な分析は遂行されていなかった。足形状における分析の一例として、Collins(2001)らによって安定的に歩行が行える形状として円弧足形状が提案されている。足底の形状は、エネルギーをころがり効果から得るためや支持脚の着地時の床反力を抑えるために重要な要素である。これらの要素と重力場のエネルギーを用いて、脚を動かし歩幅を得る。本研究では、足形状と安定性の関係を分析することに重点を置き、新たな安定性を付加する機構の設計と、安定性を高めた機構を用いた受動歩行規範2足歩行ロボットの開発へ向けた制御について実環境での実験から検証する。2脚の受動歩行機における転倒を引き起こす要因となる左右への過剰な振動状態と進行方向への支持脚の倒れ込みに焦点を当てる。過剰な倒れ込みを簡単でコンパクトな機構で抑制する。抑制を行う機構として足裏形状の設計をLateral平面とSagittal平面に分割し、実験を通して検証を行う。Lateral平面では左右への過剰な振動状態を抑制する設計として2段構造とし、Sagittal平面では進行方向への支持脚の倒れ込みを足先端部分として歩行の安定性を向上させる。本設計に関して、各平面での実機実験から歩行の安定性を検証した。また倒れ込

み抑制要素を3次元的に足裏形状に取り入れることで、シンプルでコンパクトな足形状での歩行の安定性を得られる抑制機構を設計した。倒れ込み抑制機構の欠点として、歩行を継続させるためのエネルギーが増加してしまい、歩行可能な傾斜が一般的な角度より急になるが、利点として、より急な斜面への適用範囲を拡大する機構を足形状のみで実装した。機体を人間サイズし、屋内での整った環境だけでなく屋外環境での歩行が可能であり、安定性の高さを実環境での実験から示すことができた。実環境での実験から、抑制機構の調整により歩行の連続性を高めることが明らかになった。2足歩行機を用いた実験をもとにしたロボットの設計として、倒れ込みの抑制量を制御するメカニズムを含めた受動歩行規範2足歩行ロボットを製作した。製作した抑制機構を有する歩行ロボットの制御として、股関節における変化を用いた手法を提案し、検証を行った。本研究では、受動歩行における倒れ込み現象を2平面に要因を分割し、各平面での倒れ込みを抑制する機構を実験を通して有効性を示し、3次元足形状として、コンパクトな形状で抑制機構を実現した。抑制機構を用いた2足受動歩行機では室内の平滑な斜面だけでなく、屋外環境の斜面においても歩行を実現した。抑制機構が歩幅を容易に制御できることを見だし、抑制足形状を有する2足歩行ロボットの実現可能性を述べ、実験により検証した結果を報告する。

審査結果の要旨

本論文は、ロボティクス分野の最先端テーマの一つである2足歩行ロボットの歩行方式として注目されている「受動歩行」について、さまざまな環境で、安定した歩行を可能とするための手法について論じたものである。

受動歩行は、外部からの制御のための力を加えることなく、受動的な機構のバランスによって歩行を継続する方式であるため、なめらかでエネルギー消費の少ない歩行が実現できる一方、歩行を維持できる環境の範囲が限られたり、路面などの外乱の影響で歩行のバランスがぐずれやすいなどの問題があり、屋外の路上に代表されるような一般的な環境下で利用するための、安定性確保のための手法が求められていた。

本論文では、受動歩行が不安定になる要因を現象面から明らかにし、そこから安定化を実現するための仕組みを提唱している。具体的には、機構の空間的な制約によって安定性を確保させる、抑制効果という仕組みを見だし、この効果を足裏の形状のみで実現させることで、実用的に効果の高い受動歩行安定化のための手法を提案している。さらに、提案した足裏形状による安定化の仕組みを発展させ、外部環境に合わせて少ないエネルギーで能動的に安定性確保と方向転換を実現する方法を展開している。要点は以下の通りである。

1. 受動歩行の不安定化の要因の多くが、2つの方向での過剰な倒れ込みによるものであ

ることを見だし、これらを機構的に抑制することで、急な斜面や粗い歩行面での倒れ込みを押さえ、歩行の安定性を確保できることを示した。

2. 2つの方向の過剰倒れ込み抑制効果を、足裏の3次元形状のみで実現する仕組みを提案し、具体的な設計例を示すことで、実用性の高い歩行安定化の機構が実現できることを示した。
3. 設計した足裏形状の安定性確保の原理を発展させ、左右足の抑制量を独立して制御することで、少ないエネルギーで容易な方向制御を可能にする仕組みを提案した。また抑制量の調節により、幅広い環境・傾斜面での安定性を能動的に確保できることを示した。
4. 粗い屋外路面で、提案した足裏形状を有する受動歩行機により歩行実験を行い、カーブを描く屋外の路上を歩行させることが可能なことを示し、提案した足形状が実用上有用であることを示した。

これらの研究成果は、受動歩行の実用化における有効な技術であり、システム情報科学の分野であるロボット工学の発展に貢献するものである。以上のように、本論文は博士（システム情報科学）の学位授与に値するものと判断する。

る。