

内 96-7

早稲田大学大学院理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

2足歩行ロボットの安定歩行
に関する研究

申 請 者

山 口 仁 一

Jinichi Yamaguchi

機械工学専攻・生物制御研究

1996 年 11 月

本論文では、2足歩行ロボットの安定な動歩行の継続を保証する歩行制御方式、ならびに2足歩行ロボットのシステム構成法について論じた。

現在までに2足歩行ロボットの動歩行制御に関する研究報告は多数あるが、いずれの方式も、現実とは程遠い環境での歩行実現を目標としており、以下のような実環境で満たすことが困難な条件の上で成立するものであった。

- (1) ロボットの足底接地点における並進に対する摩擦係数は十分に大きく、ロボットのヨー軸(鉛直軸)回りの運動は歩行の安定性に関係しない。
- (2) ロボットの下肢軌道偏差は十分に小さく、その影響は無視できるほど小さい。
- (3) 歩行を行う前に路面の形状は厳密に既知である。

しかし、実際の機械モデルを用いた歩行においては上記前提条件の成立が困難なため、従来から提案されてきた歩行制御方式では安定で継続的な2足動歩行の実現は極めて難しい。

そこで本研究においては、

- 1) 実環境で安定な2足動歩行を実現するため、実環境で成立することが困難な条件を前提としない2足動歩行制御方式および2足歩行ロボットシステムの構成法を提案する。
- 2) 実際に2足歩行ロボットシステムを開発し、提案した2足動歩行制御方式および2足歩行ロボットシステムの構成法の有効性を歩行実験を行うことにより実証する。

ことを目的とした。なお、本研究は人間の2足歩行メカニズムの解明(人間科学)と住環境で人間と協調的に行動するヒューマノイドロボットの移動機構への応用を目指して行ったため、研究対象とする2足歩行ロボットは等身大とした。

以下、順に各章ごとの概要を述べる。

第1章では、これまでの2足歩行ロボット研究の流れと主要な成果を概観し、本研究で目標とした2足歩行ロボットによる安定な2足動歩行に関する研究が行われていなかったことを示し、本研究の目的と位置付け、そして方法を明らかにした。

第2章では、従来の2足動歩行制御方式の前提条件の1つである「ロボットの足底接地点における並進に対する摩擦係数は十分に大きく、ロボットのヨー軸回りの運動は歩行の安定性に関係ない」を不要とするため、上体運動によりピッチそしてロール軸モーメントに加えて、ZMPにおけるヨー軸モーメントをも補償する歩行制御方式を提案した。具体的には、まず、動的な2足歩行の安定性を力学的視点から判別するZMP規範について考察した。次に研究対象とする2足歩行ロボットと路面についての仮定条件を設定した。そして、2足歩行ロボットを質点系としてモデリングを行い、動歩行の安定条件をZMP規範に基づいて定式化した。しかる後に、3軸モーメントを発生する上体機構部について述べ、ZMPにおける

3軸モーメントを補償することで歩行の安定化機能を担う上体補償運動の算出アルゴリズムを、周波数領域におけるフーリエ係数の比較法を用いた繰返し計算法により導いた。最後に、コンピュータシミュレーションを用いて、繰返し計算の回数と補償モーメントの誤差の収束性および算出された上体補償運動について検討した。その結果、高い収束性があること、および歩行が高速になるにしたがってその運動の軌跡が小さくなっていくことを確認した。

第3章では、安定した動的立脚切替を実現できるメカニズムを提案した。現状のハードウェア技術では従来の2足動歩行制御方式の前提条件の1つである「ロボットの足底軌道偏差は十分に小さく、その影響は無視できるほど小さい」が成立可能な程の下肢軌道の制御精度を確保することはほとんど不可能である。そこで、足首部アクチュエータに直接取り付けられる上部足底板、路面と直接接地する下部足底板、そしてそれらの間に取り付けられる衝撃緩衝材料から、粘弾性特性を有する並進と回転の受動的自由度を持ち、接地状況に応じてメカニカルに剛性が変化する足底機構を構成することで、現状のハードウェア技術で実現できる下肢軌道精度でも安定した動的立脚切替を実現できるメカニズムを提案した。さらに、形状に偏差がある路面に対する実時間適応2足動歩行実現の前段階として、同足底部に各種センサを搭載することで着地路面検知機構を構成する方法を提案した。具体的には、まず、2足歩行ロボットWL-12R IIIを用いた歩行実験結果を基に問題の整理を行い、従来の歩行制御方式では2足動歩行継続を保証できない原因は、立脚切替期の下肢軌道偏差にあることを明らかにした。そしてその問題解決方法として、粘弾性特性を有し足底の接地状況に応じてメカニカルに剛性が変化する並進と回転の受動的自由度を足底部に導入する方法を提案した。次に、提案した方法を2足歩行ロボットの足部に適用するにあたり、導入する受動的自由度の目標仕様を決定した。しかる後に、実際に開発した足底機構WAF-3の概要を述べ、本機構の要となっている衝撃緩衝機構、剛性調節機構、動的閉合誤差調整機構、そして着地路面検知機構についてその詳細を述べた。

第4章では、従来の2足動歩行制御方式の前提条件の1つである「歩行を行う前に路面の形状は厳密に既知である」を取り除くため、第2章と第3章で提案した歩行安定化方法に加えて、第3章で提案した着地路面検知機構より得られる情報を用いて、路面に対する下肢軌道制御を遊脚着地時に行うことで、形状に偏差がある路面に実時間で適応する2足動歩行制御方式を提案した。具体的には、まず、対象とする路面の前提条件を明らかにした。そして、提案する路面形状の偏差に実時間で適応する適応2足歩行制御方式の概要を述べた。次に、提案する適応2足歩行制御方式の要となっている、着地路面情報の処理方法と下肢軌道の変更方法について述べた。最後に、コンピュータシミュレーションを行い、適応可能な路面形状偏差を推定するとともに、適応歩行時の安定性をZMP安定判別規範を用いて確認した。

第5章では、第2章、第3章、そして第4章で提案した2足歩行ロボットの安定化手法の有効性を実証するために開発した等身大の2足歩行ロボットシステムWL-12R VIIについて機械モデル、制御システム、そして制御プログラムに大別してその構成法を提案した。同方法で開発した2足歩行ロボットは、下肢にピッチ軸の6自由度、上体にピッチ、ロール、そしてヨーの各1自由度を有し、合計9自由度で構成され、全長約1.9[m]、重量約100[kg]であった。このように実際に2足歩行ロボットを開発することで、第2章、第3章、そして第4章で提案した歩行安定化方式の有効性を実証することが可能になった。

第6章では、開発した足底機構WAF-3と2足歩行ロボットシステムWL-12R VIIを用い、高速歩行、着地路面検知、そして形状が未知である路面に対する適応歩行に関する実験を行った。まず、高速歩行実験では従来のピッチとロール軸のみのモーメント補償に比べ、それらに加えてヨー軸モーメントをも補償することでピッチとロール軸のみのモーメント補償においてみられたヨー軸回りの回転運動が収まった。この結果、従来に比べて約1.5倍の歩行速度の高速化(歩幅0.30[m]の場合、0.80[s/step]から0.50[s/step]へ)が可能であることをコンピュータシミュレーションと実モデルによる実験との両面から確認した。次に、着地路面検知実験では、第3章で提案した足底機構は、ロボットにある程度のロバスト性を持たせると同時に、動歩行下で全歩行周期に渡り着地路面に対する相対位置情報(精度 ± 0.10 [mm])と絶対傾斜角度(精度 $\pm 0.50^\circ$)を測定できることを確認した。最後に、形状に偏差がある路面に対する適応歩行実験では、まず、水平面で構成され鉛直方向に偏差がある路面に対して実時間で適応する2足動歩行が可能であることをコンピュータシミュレーションと機械モデルによる実験との両面から確認した。次に、鉛直方向に加えて傾斜角度に偏差がある路面に対して実時間で適応する2足動歩行が可能であることをコンピュータシミュレーションと機械モデルによる実験との両面から確認した。2足歩行ロボットシステムWL-12R VIIが歩幅0.30[m]で1.3[s/step]の動歩行を行う場合、相対高低差 ± 16 [mm]、絶対傾斜角度 $\pm 3.0^\circ$ までの路面形状偏差に適応可能であった。そして、適応可能な最大の形状偏差がある路面上で適応2足動歩行実験を50回程度行い、転倒回数が0回であることを確認し、その安定性が極めて高いことを確認した。また、日本の住居内で特徴となっている畳のように、機械モデルが単脚支持状態で2.0[mm]程度の沈み込みが生じる路面に対しても提案する歩行制御方式が対応可能であることを確認した。

以上の歩行実験により、本研究で提案した歩行制御方式が、従来の歩行制御方式が前提とした条件を要求せず、より実用的かつ有効であることを実証した。

第7章は結論であり、第2章から第6章で得られた成果をまとめた。また、本研究で得られた成果をもとに、今後の研究の発展と展望について述べた。