

審査の結果の要旨

氏 名 カロン ステファン

本論文は、ヒューマノイドロボットが全身を使って環境と接触しながら運動を行う際の制御系の設計法を計算論的に扱った研究をまとめたものである。一般に、移動ロボットの運動、特に脚型ロボットの移動の特徴は力学的な非ホロノミック性を利用する点にある。車輪の回転のように、最も単純な場合には内部変数の周期軌道によって持続的な移動を生み出すことができる。しかしながら不整地での移動や接触時の衝撃による不確定性が存在する状況では、安定化に必要な推力を地面や接触点から受けるように内部変数の軌道を生成することが優先されるため軌道は非周期的になる。非周期的であっても運動を持続させるためには、軌道は擬周期的な再帰性を保つことが必要になる。このことが、高速で実行される安定化制御のフィードバック系は、その中に緻密な運動計画系を持たなければならないという困難な問題を生じさせる。本論文は、このような制御系を構成するために必要な最適化の数学的基盤を扱ったものである。

第1章は序論であり、ヒューマノイドロボットの運動制御系が、非ホロノミックな拘束条件によって運動計画をフィードバックループに含む構造を有していることを指摘したうえで、確率的な運動計画法を中心とした運動計画法に関する関連研究の概観と、ヒューマノイドロボットの運動制御に関する先行研究について述べ、本研究の目的とその位置づけを明確に与えている。

第2章では、ロボットの運動学と動力学を扱う運動計画の問題を記述したうえで、確率的運動計画法が確率的完全であるための条件を与え定理1としている。これは探索を無限に続けられれば、解のある問題では必ず解に到達できることを保証するものであり、本研究の全体の基礎になる定理である。

第3章では、はじめに、運動経路が与えられた場合に経路に沿った最短時間制御を計算するBobrowやShin and McKayによる先行研究であるTime-Optimal Path Parameterization (TOPP)法を、確率的運動計画法の補間軌道の生成に利用する方法を提案する。さらに、ロボットの運動学と動力学を完全に考慮したTOPPに基づくAdmissible Velocity Propagation法をRapidly-exploring Random Trees法の枝の伸延に採用したAVP-RRT法が確率的完全性を満たすことを証明する。さらに、これを二重倒

立振子の例題に適用した結果を示している。

第4章では、接触と摩擦の問題を扱っている。摩擦あり面接触を接触面の凸多角形の各角に頂点をもつ摩擦多面錐で近似し、多数の摩擦多面錐で表された接触力の集合がヒューマノイドロボットの重心に作るレンチ（力とモーメント）の許容多面錐集合として表されることを示した。

第5章では、ヒューマノイドロボットの全身運動の運動方程式と全身の各部に分散した多点接触の一般的な問題を議論し本研究の中心的な章を形作っている。接触力を用いたTOPPを、接触力と重力と慣性力を統合したレンチ多面錐の許容集合の中で論じることによって、ヒューマノイドの接触条件と運動学と動力学をすべて考慮に入れた確率的に完全な運動計画法を開発した。比較的的非力なヒューマノイドロボットであるHRP4の準静的な階段の昇段動作の生成を行い、HRP4の昇段が可能であることを実験により検証した。HRP4のモデルを用いて多点接触が必要な全身の動的運動計画問題を解く例を示した。

第6章では、摩擦を考慮した多点接触運動の力学的条件をレンチ多面錐の集合で表した上で、これを任意な面で切断しレンチベクトルがその断面点を通る点を多点接触ZMPと提案する。ヒューマノイドロボットの歩行制御ではゼロ・モーメント・ポイント（ZMP）を指針とする実時間運動制御が議論されてきた。しかし、ZMPは摩擦条件などの拘束条件を含んでいない。ZMPは段差のある地面や、足と手の多点接触を議論できないなどの課題があった。本章の成果は、多点接触条件、運動学動力学条件をすべて考慮した上での従来のZMPの一般化となっている。

第7章は、これらの成果をまとめて結論としている。

以上、これを要するに本論文は、TOPPを確率的運動計画に採用することで高速計算が可能で、確率的完全性をもつ運動計画法を構築し、全身多点接触条件を表したレンチ多面錐条件の下でこれをヒューマノイドロボットの動的運動制御系の制御ループの中に入れることによって非ホロノミックな二足歩行制御の困難な問題を抜本的に解決するための計算論的基盤を与え、全身型ヒューマノイドの全身多点接触動作の各種シミュレーションやヒューマノイドロボットHRP4を用いた実験によってその有効性を評価したもので、知能機械情報学に貢献するところは少なくない。

よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。