

審査の結果の要旨

氏名 サンタクルス カルロス フェリペ

本論文は、人型で二足歩行をするヒューマノイドロボットの歩行時系列パターンの生成法について研究を行った成果をまとめたものである。本文は全7章から成る。ヒューマノイドロボットを含む脚式移動機構は浮遊基礎リンクをもつ力学系であり、運動を記述する一般化座標の数に比べて入力である駆動力の数が少ない劣駆動系をなしている。この系では動力学と整合した運動時系列パターンを求める問題は大規模な非線形最適化問題となることが知られている。歩行の安定な継続を担保するために、外乱が加わった際に歩行時系列パターンを修正して新たな動力学条件をみだす歩行時系列パターンを生成する効率的な方法が必要とされている。本研究では、身体を構成する各剛体リンクを質量中心に置かれた質点として近似したものに等価な、線形倒立振子モデルを用いて、外乱が加わった瞬間を含む一步の残りの歩行時系列パターンを修正し、第二步目からの調和的歩行時系列パターンに接続する時系列パターンを生成する新たな生成法の提案から始まり、時系列パターンの解析的解法、時系列パターンの外乱吸収性、ヒューマノイドロボットを用いた実験による検証までを行った研究の成果を報告している。

第1章は「Introduction」であり、ヒューマノイドロボットの運動に関して、非線形な劣駆動系であること、拘束条件の単方向性があること、接触によるインパクトが生じることなど、歩行運動に関する動力学的な性質と課題についてまとめ、本研究の目的を与えている。さらに、二足歩行の運動制御について関連する先行研究の成果を説明している。

第2章は「Constant Orbital Energy System」と題し、先行研究の成果である線形倒立振子モデルの力学的な性質について論じ、ヒューマノイドロボットの歩行力学系の線形倒立振子による近似が歩行運動の特徴を零入力に対する自然ダイナミクスとして保持していることなどを説明している。

第3章は「Closed Form Solution for Minimal Energy Control」と題し、遊脚期の初期状態から任意な終端状態へ向かう軌道を、ゼロモーメントポイントの移動量の2乗として定義したエネルギーコストを最小化する問題とし、解を線形倒立振子の有限時間区間の可到達性グラミアンを用いて解析的に計算する方法を示した。これを用いて歩行運動の時系列パターンを高速に変更する場合の、ヒューマノイドロボットの歩行挙動をシミュレーションにより明らかにした。

第4章では、第3章の結果に基づいて、歩行中に加わるインパクト外乱に対して境界条件を緩和して歩行の持続性を維持することを「Relaxing Boundary Condition for Disturbance Compensation」と題して論じた。ここでは、二歩目の調和的歩行時系列の初期速度をパラメータとして自由に設定することを許して一步目の軌道を修正するニュートラルポイント法と、調和的歩行時系列を仮定せずに全歩行区間での目標軌道との誤差をLQR問題とし、これを用いて一步目の区間の軌道を修正する方法を提案している。前者は、解析解を用いてより高速に計算できることが特徴であり、後者は、計算時間は長くなるもののより大きなインパクト外乱に耐えることができることが特徴である。前者は、全歩行軌道の目標最終状態を念頭に入れず、後者は、目標最終状態からの誤差を評価関数に含めて最適化している点も両者の違いである。

第5章は、歩行軌道の修正の問題に関連してヒューマノイドロボットの運動方程式が重力に関連して相似変換を可能にするという性質を持つことを指摘し、「Similarity Transformation of Dynamics」と題して論じている。重力の異なる環境に置かれた同じヒューマノイドロボットの二つの運動方程式の間で、重力比の

平方根によって時間軸変換を行うことで、完全に等価な空間軌道が動力的に実現可能である。地上で計算した歩行軌道は、時間軸変換を行うことで、そのまま月面でも実現可能軌道となる。

第6章は「Experiments」であり、第3章、第4章で提案した歩行時系列パターンの生成法ならびにインパクト外乱に対する軌道修正法を、ヒューマノイドロボット HRP4 に実装して、その性能の評価を行っている。インパクト外乱への歩行持続性の高性能化には、倒立振子モデルの状態とゼロモーメントポイントの推定精度の重要性を実験結果から指摘している。

第7章は「Conclusion」であり、以上説明した本論文の成果をまとめ、結論を述べている。

以上を要するに、本論文は、二足歩行を行うヒューマノイドロボットの歩行時系列パターンの計算を、調和的歩行運動に接続する過渡的運動を求める問題と置き、エネルギーコスト最小化問題として定式化することによって、歩行時系列パターンが解析解として高速計算できることを示し、外乱に反応する時系列パターンの生成によって歩行の持続性を高められることを実験によって検証したものであり、知能機械情報学に貢献するところが大きい。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。