

## 論文の内容の要旨

論文題目	多重軌道推移制御を用いた劣駆動二足歩行モデルの運動生成と制御
学 位 申 請 者	宮 腰 清 一

二足歩行ロボットの研究・開発は、ロボットの研究・開発の歴史の初期から行われてきており、近年では、企業を含むいくつもの大学や研究機関において、ヒューマノイド・ロボットが開発されてきている。狭隘部の移動、障害物の踏み越え・乗り越え、数メートル程度の高さへの到達を含む作業が、環境を荒らさずに行えると期待されている。

二足歩行の系は、不安定性(重心が高く、基底面が狭く、転倒しやすい)、劣駆動性(接地点周りの回転に直接トルクを掛けられない)、ハイブリッド性(単脚/両脚支持期に開/閉リンクが切り替わる)と呼ばれる特徴を持つ。こうした制御困難な系に対し、ダイナミクス・ベースト制御として提唱されている、物理系が固有に持つ性質を発見、改変・強化、利用する理念に則り、制御系を構築する。

まず、系の劣駆動性を意識して、足先が点形状の矢状面内二次元に運動を限定単純化したコンパス状二足歩行モデルを対象とした。上体は質点、脚は線状の分布質量と直動関節を持つ。最初に、系の受動特性を見るために、直動関節を固定し、股関節を自由関節として、一步分の踏み出し動作を調べた。適切な初速度を上体部に与えると、弾道歩行と呼ばれる対称形の踏み出し運動が生起する。この時の歩幅と初速度との間の比例的関係を確かめた。次に、余弦関数で目標軌道を与える形で股関節にサーボを導入した。パラメータ(振幅: $a$ や周波数: $f$ )を合わせると、自由運動を規範とした近似動作が行え、パラメータを変化させると、自由運動に相似な形で、歩幅や歩行周期を変えられる。オフセットのパラメータを加えると、対称のみならず非対称な歩容が生成でき、歩幅変更が可能になる。準受動モデル(劣駆動)の一步の踏み出し運動での歩幅と初速度の関係は、受動モデルと類似の関係が成立する。

一方、股関節の駆動・非駆動に関わらず、脚振り周波数の3倍の周波数の正弦波で脚伸縮を行わせる事で、foot clearanceの確保・蹴り出し(push-off)・軟着

地の条件を満たす連続歩行が可能になる。歩幅と上体初速度の関係に対応する歩幅と脚伸縮量の比例的関係を動力学シミュレータを使って実験的に確認した。

以上に述べた系の受動・準受動特性を利用する、メモリ・ベースト手法で実装した制御法を提案する。まず、メモリ形成の段階において、歩行生成が可能な全てのパラメータの組のそれぞれに対する対称歩容での一步分の支持脚の角度と角速度を、必要な時間刻みで動力学シミュレータにより求めておき、パラメータとの対応付けが保たれた状態で、全てメモリしておく。これは順動力学が解けた事、解空間が求められた事に相当する。次に、制御の段階において、サーボの周期毎に、センサ等より得られた支持脚の角度と角速度から、メモリ内で最も近い軌道を検索すると、パラメータと一步の開始からの経過時間とが逆引きできる。これを目標値としてサーボを掛け、遊脚振り出しを制御すると、結果としてバランスが維持された対称歩容が得られる。逆動力学が解けた事と現状態が解として存在するかの判別ができる事に相当する。この制御系は、特定の単一目標軌道に沿わせる従来型ではなく、状態空間内で隣り合う軌道に可能であれば移行する事を許す制御方式であり、多重軌道推移制御と名付けた。

さらに、階層構造を導入し、軌道メモリの冗長性を利用して、歩幅/接地タイミングを上位層から随意的に変更可能とし、また、幅広い環境に対応できるよう、運動パターンと補助的制御系の組を複数用意し、環境に応じて上位層から切り替えられる構造とした。

動力学シミュレータを用いて、検証を行った。外乱に対してどの程度耐性があるかを調べ、物体と衝突するような突発的外乱、地震のような連続的外乱、不整地上の歩行においても、転倒せず歩行が行える事が分かった。モデル化誤差に対するロバスト性を調べ、質量配分を変えた場合、脚長を変えた場合、直動型の脚構造から回転型の膝関節を持つ脚構造へと変えた場合、上体を質点状から分布質量を持つ線形状へと変えた場合、足先を点状から点列による折線断面形状に変えた場合でも、歩容は変化するが転倒する事はなく、ロバストである事が分かった。目標値に対する追従性を調べ、一步の内での一時的な歩幅の変更、一步の内での定常的な歩幅の変更(歩行速度の変更)が行える事が分かった。

今後の課題としては、3次元化、実機の制御を行い性能の検証を行う事が残されている。

# 論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 宮腰 清一

審査委員主査 高瀬 國克

委員 木田 隆

委員 出澤 正徳

委員 木村 浩

委員 明 愛国

委員

委員

第1章では、序論として、研究の動機、二足歩行の制御問題、従来研究、本論文の貢献、適用手法、論文構成などについて示した。劣駆動・受動歩行ベースロボットにおける、平衡維持と目標追従制御の問題を扱い、提案する多重軌道推移制御が、大きな外乱や環境変動の存在する条件化でも高いバランス維持性能と速度可変性を有することを、システム実装とシミュレーションによる検証を通して示すことを目的としていることを述べた。

第2章では、劣駆動性が露わであるような簡素なコンパス状の機構をヒトのような二足歩行のための機械的モデルとして採用し、動力学シミュレータDADSを用いて構成した。その上で、単脚支持期の始まる直前の歩幅と初速度設定の関係、両脚支持期の始まる直前の運動速度と接地歩幅の選択の関係によって二足歩行の成否が決まることを、受動モデルを用いて示した。次に、受動モデルにおける特性を保存したまま、受動ダイナミクス（自由運動）規範で股関節のみ能動化して、歩幅と歩行周期をパラメータとして、対称歩容（一定速度）と非対称歩容（速度変更）を実現できることを示した。さらに、歩行継続の推進力を発生させるため、両脚支持期において、後脚の蹴り出しと前脚の沈み込みを脚伸縮により行う方法を提案した。脚伸縮の基本運動パターンとして脚の振りの3倍の周波数を持つ正弦波を与えた場合、固定脚長モデルの場合の歩幅と初速度の関係と類似したものになることを示した。

第3章では、多重軌道推移制御と名付ける、メモリ・ベースト運動制御手法による二足歩行のバランス維持を主目的とした運動生成・制御法を提案した。これは、1.（準備時）様々な歩容パラメータにおいて、周期軌道をシミュレーションにより求め蓄積（メモリ）する、2.（制御時）測定した状態量をキーに、対応する軌道と歩容パラメータをメモリ中から探し再生する、という2段階からなる。データベース中の軌道は、全て成功した試行の軌道であり、これを参照・再現することで、データベース内の複数軌道を渡り歩くことを許し、それにより広い安定化可能領域を持つことを示した。

第4章では、二足歩行のバランスを維持しながら、目標追従を行うために、階層的制御構造を導入した。これにより、バランスを維持する下位層の自律系を誘導して、上位層の提示する目標値に向かうよう仕向けられることを示した。角運動量変更のため、着地タイミングを変更する場合、遊脚を制御するばよく、それが制御の比較的容易な股関節の角度制御によって実現されることを示した。また、

環境変動の幅が広がる場合、脚伸縮の運動パターンを運動目的や環境に応じて、数種類用意しておくことで、運動性能やロバスト性を強化できることを示した。

第5章では、動力学シミュレータを用いて、第3章と第4章に示した制御系を実装した結果のシミュレーションを示し、有効性を検証した。異なる脚伸縮パターンでの平地上での定常的歩行を行い、惰性歩行により、バランス制御と目標値追従制御の独立性を示した。また、外乱対応用の脚伸縮パターンを用いて、突発的／連続的外乱（水平衝撃力、不整地、地面の揺れなど）の下での安定化を行い、安定な歩行が可能であることを示した。その他、直動膝関節からヒト型回転膝関節への改変、脚長の大幅な変更、足裏形状の変更、質量分布の変更などパラメータの構造的変更に対しても、同じ歩行制御アルゴリズムで対応できることを示し、そのロバスト性を示した。一方、歩幅と初速度との関係の中に含まれる冗長性を利用することで、1歩での歩幅の一時的変更、定常歩行の歩幅を1歩で拡大／縮小して変更した歩幅での定常歩行を引き続き行えることを示した。

第6章では、本研究で得られた結論・成果・今後の課題を総括している。また付録には、ヒト類似の歩行特性、坂道の歩行、異なる足裏形状での歩行、上半身の付加など本文では十分な記述が出来なかった事項をまとめている。

本研究は、従来の二足歩行研究の2つの流れである、制御ベースと力学ベースの中間に行く新しいアプローチを与えている。一部の自由度を硬く制御することで、前者の頑健性の低さと、後者のパラメータ設定の困難性を回避している。具体的には多重軌道推移制御を提案し、外乱やパラメータ変動に強い二足歩行を実現している。またシミュレーションによるデータ取得や検証を通し、歩行の非定常状態の解析を可能にしている。三次元化や実機化、より自然な歩行の追及などは今後の課題として残されたが、それらに対する見通しを与えており、基盤研究としての意味は大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として十分な価値があるものと認める。