

氏 名	つじ た かつ よし 辻 田 勝 吉
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	論 工 博 第 3809 号
学位授与の日付	平 成 16 年 9 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学位論文題目	Research on Locomotion Control of Legged Robots (脚式ロボットの歩行制御に関する研究)

論文調査委員	(主 査) 教 授 土 屋 和 雄	教 授 吉 川 恒 夫	教 授 樺 木 哲 夫
--------	----------------------	-------------	-------------

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、移動機能としての脚型リンク構造を持つ機械システムの運動制御に関する研究である。この種の機械システムは、脚先の接地点回りに重力による倒れ運動を引き起こす直接制御できない静的に不安定なモードを持つシステムである。このようなシステムの運動制御とは、重力に抗して本体を支持し、かつ倒れ運動のモードを何らかの方法で制御することにより系全体として動的な安定を実現することである。このような制御系の開発方法としては、大きく二種類が考えられる。一つはシステムの力学モデルに基づき、静的に不安定な倒れ運動を相殺するように内部自由度を制御することにより系を安定化する方法であり、モデルベースト制御と呼ばれている。もう一つは力学モデルを直接用いることなく系のリズム運動を支配するパラメータを調整することで系全体のリミットサイクルを実現する制御系であり、リミットサイクル制御と呼ぶ。本論文では、両方の制御系設計手法により脚式ロボットの歩行運動制御を行なう制御系の開発を行なっている。本論文は7章から構成されており、それぞれの章の概要は次のようになる。

1章は序論であり、これまでに行なわれてきた脚式移動ロボットの運動制御に関するサーベイと、その中での本研究の位置付けをまとめてある。

2章では、ロボットのモデルを扱うため、剛体多体系のモデリング手法についてまとめている。ここでは、系の並進速度と回転角速度、ならびに各リンクの相対角速度を状態変数として、擬座標に対する Lagrange 形式を用いて定式化している。その際、脚式ロボットの各関節自由度の拘束条件を縮約法により導入し、脚式ロボットが地面に接地する際の幾何学的拘束条件を Lagrange の未定乗数法および粘弾性モデルの両方を用いて導入している。定式化されたモデルは、脚式ロボットが断続的に足先を地面に接地させながら歩行する挙動を正確に数値計算することができることを示している。

3章において2脚ロボットを取り上げ、定常歩行するための周期境界条件を厳密に満足する脚の軌道を最適化手法を用いて求めている。手法としては腰の運動軌道を元にして各関節軌道をフーリエ級数により表現する。これらの運動軌道を実現する関節トルクを逆動力学により計算し、評価関数としてのトルク二乗和積分と着地による撃力の和を最小化する軌道を求めている。得られた結果は遊脚の着地による撃力の効果が重要であり、撃力を許す場合は弾道軌道型、撃力を小さくする場合は等ポテンシャル型の軌道が得られている。

4章では、2脚ロボットに対するモデルベースト制御系の開発を行なっている。すなわち、脚先の接地点回りの静的に不安定なモードを相殺するための内カトルカーとしての冗長自由度を設け、逆動力学を用いた非線形フィードバック則を用いて系の姿勢運動を安定化制御している。その際、3章における知見を用いて、系の運動不安定化につながる着地における撃力の効果を考慮し、着地時における脚軌道のリセットという概念を導入することにより歩行運動のロバスト性を向上させている。

5章においては4脚ロボットに対するリミットサイクル制御系の開発を行なっている。ここで用いた制御原理は非線形振動子群のダイナミクスとロボット自身の機構の持つダイナミクス、およびロボットが置かれた環境変動のダイナミクスとの間の力学的相互作用を通した引き込み現象を用いたロバスト性と適応性である。提案した制御系を用いて歩行速度、歩行面

傾斜、ペイロードなどの歩行条件に応じて多様な歩行パターンが適応的に発現し、安定な歩行を実現することが確認されている。

6章においては5章で提案している制御系の振動子位相から運動軌道への写像におけるパラメータを実現したい運動に応じて調整することにより、様々な歩行速度、旋回半径に対して安定な旋回を実現する制御系を提案している。

7章は結論であり、本研究で得られた成果についてまとめている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、移動機能としての脚型リンク構造を持つ機械システムの運動制御に関する研究である。運動制御の手法としてモデルベース制御法とリミットサイクル制御法の両方の制御系設計手法により脚式ロボットの歩行運動制御を行なう制御系の開発を行なっている。本論文の主要部分の概要は次のようになる。

2章において、ロボットのモデルを扱うため、剛体多体系のモデリング手法についてまとめている。

3章では、2脚ロボットを取り上げ、脚軌道の最適化問題を取り扱っている。手法としては腰の運動軌道を元にして各関節軌道をフーリエ級数により表現する。これらの運動軌道を実現する関節トルクを逆動力学により計算し、評価関数としてのトルク二乗和積分と着地による撃力の和を最小化する軌道を求めている。得られた結果は遊脚の着地による撃力の効果が重要であり、大きな撃力を許す場合は弾道軌道型、撃力を抑制する場合は等ポテンシャル型の軌道が得られている。

4章では、2脚ロボットに拘るモデルベース制御系の開発を行なっている。すなわち、脚先の接地点回りの静的に不安定なモードを相殺するための内カトルカーとしての冗長自由度を設け、逆動力学を用いた非線形フィードバック制を用いて系の姿勢運動を安定化制御している。その際、3章における知見を用いて、系の運動不安定化につながる着地における撃力の効果を考慮し、着地時における脚軌道のリセットという概念を導入することにより歩行運動のロバスト性を向上させている。

5章では、4脚ロボットに対するリミットサイクル制御系の開発を行なっている。ここで用いた制御原理は非線形振動子群のダイナミクスとロボット自身の機構の持つダイナミクス、およびロボットが置かれた環境変動のダイナミクスとの間の力学的相互作用を通した引き込み現象を用いたロバスト性と適応性である。提案した制御系を用いて歩行速度、歩行面傾斜角、ペイロードなどの歩行条件に応じて多様な歩行パターンが適応的に発現し、安定な歩行を実現することが確認されている。

本論文は、脚式移動ロボットの運動制御、特に環境変動に対するロバスト性および適応能力を持った制御系の開発を行っており、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成16年8月2日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。