

## 学位論文題名

## 予見制御による走行移動体の振動・姿勢制御に関する研究

## 学位論文内容の要旨

近年のメカトロニクス技術の成果によりロボットに様々な可能性を与えることが期待されるようになった。産業用ロボットが一步リードして実用化され現代社会の経済発展に大きな貢献を果たしている。産業用ロボットの成功に刺激されて、ロボットの活動範囲をさらに広げて社会生活の改善や安全に役立つ、いわゆる先端(あるいは極限)ロボットの出現が望まれている。種々開発されている極限ロボットにおいて、その作業目的を果たすために、作業環境に応じて、自律的に移動し作業しなければならないので、自律移動技術は工場外の極限領域で作業するロボットにとって欠かせないものである。

宇宙ロボットにおいて、月や惑星を探索する惑星探査ロボット、農業における農作物収穫と薬剤散布ロボット、森林における搬送ロボットなどの極限ロボットがすでに提案されている。これらの宇宙、農地、森林などの分野での応用を考えたロボットはすべて作業環境が整備されていない不整地としている。ロボットは移動するとき不整地の凸凹による影響を克服しながら作業しなければならない。このような作業環境に対して対応できるのは車輪型移動ロボットが考えられる。

本論文では、上述したような不整地を走行する車輪型移動ロボットを意識して、走行路面の凸凹による移動体の振動および姿勢の制御問題に関して論じている。

不整地走行時にはロボットの機動性を高めるために、また積荷の安全性と環境センサの安定保持のために、路面凸凹の影響によるロボット車体の動揺や上下動を抑制することが重要である。そのためには、従来のばねとダンパのようなパッシブな要素に加え、アクチュエータによって制御された力を発生する能力をもつアクティブサスペンションの使用が提案されている。いかに良いアクティブサスペンション機構の制御系が構成されるかという問題は、いかにより良い移動ロボットの振動・姿勢制御ができるかという問題にとって重要な意味をもっている。

今までのアクティブサスペンション機構の制御に関する研究はほとんど上下方向の自由度しか持たない一輪移動体を制御対象として行われてきた。四輪をもつ移動ロボットの振動および姿勢

制御問題を考えることになると、四輪に対応する四つのサスペンション機構の相互干渉はどうしても存在する。上下方向の振動のみに注目した従来の研究では振動制御の制限性能はいくら良いといっても、四輪をもつ移動ロボットの場合にそのまま適用するとロボット全体の制振性能が必ずしも良いとは言えない。四輪をもつ移動ロボットを制御対象としている研究もあるが、動的モデルを導出せずに四つのサスペンション機構を別々に制御している。本来であれば四輪モデルを導出し、その相互干渉を考慮に入れた上で振動制御問題を扱うべきであると本論文では考えている。

本論文では四輪をもつ移動体に対してアクチュエータを考慮し、路面凸凹による車体の上下、ローリングおよびピッチング方向の変位（あるいは角度）を表せる振動モデルを導出する。さらにこのモデルに基づいて、路面の前方情報を利用するデジタル最適予見サーボ系を構成することによって、各方向の振動を抑制しながら、移動体の姿勢制御もできることを示している。ここで構成される最適予見サーボ系はフィードバック制御とフィードフォワード制御を併合した制御系であり、路面凸凹の影響を積極的に除去することができる。さらに普通のサーボ系やプロセス系において制御目的を達成するためには、必然的にエネルギーを注入することが必要なのに対して、振動制御においては不要な振動抑制が目的であるので、省エネルギーも重要である。とくに、エネルギー補給が困難である極限の状況で利用される移動ロボットでは省エネルギーは極めて重要である。予見制御では未来情報を有効に利用するためアクチュエータの動作に無駄が少なくエネルギーが十分に利用されるという効果が示される。

一方、実際の移動体の振動姿勢制御への応用を考える場合には路面の凸凹変位の計測値はセンサのもつ物理的な制約によって、車輪からの相対変位の形でしか得られないものである。もし、四輪をもつ移動体の一つの車輪にあたる路面の凸凹変位を常に基準変位にすれば、ほかの三つの車輪にあたる路面の変位はこの基準変位に対しての相対変位となる。これで、現在時刻の路面の変位は移動体の姿勢とサスペンション機構の状態により容易に算出することができる。このことを考慮して、本論文ではこのような相互変位を採用した振動モデルを導出し、ローリングとピッチング方向の振動を抑制しながら、姿勢制御ができる制御法も提案している。

また、本論文では、四輪をもつ移動体が不整地走行時に要求される制御指標と特徴などに応じて、どの程度路面情報を利用できるかにより、可能な四つの制御方式を提案している。

- ① 移動体の前輪と後輪の未来路面情報を全部利用する全予見制御方式
- ② 移動体の前輪のサスペンション機構を路面情報のセンサ系とし、それを利用することにより、後輪のサスペンション機構のみに予見フィードフォワード補償を施す部分予見制御方式
- ③ 現在時刻の路面情報のみを利用するフィードフォワード補償制御方式

#### ④ 路面情報を一切利用しないフィードバック制御方式

本論文は次のような構成となっている。第1章では、研究の背景、現状および本研究の特徴について述べている。第2章ではまず、アクティブサスペンション機構の構造について検討し、設計したアクティブサスペンション機構に基づいて、移動体の振動・姿勢制御を実現するための移動体の上下、ローリングおよびピッチング方向の変位を表せる振動モデルを導出している。また、路面変位の計測の作業を容易にする移動体の姿勢制御に注目した相対変位を採用したもう一つの振動モデルを導出している。第3章と第4章では後述する内容の基礎として、エラーシステムを用いた最適サーボ系と最適予見サーボ系などの構成について述べている。第5章では上述した移動体の前輪のサスペンション機構を路面情報のセンサ系とし、それを利用することにより、後輪のサスペンション機構のみに予見フィードフォワード補償を施す部分予見制御方式を実現するために、必要とする最適部分予見サーボ系の構成法を開発し、その具体的な構成について述べている。また、係数行列の理論計算によって、新しく開発された最適部分予見サーボ系は今まで構成されている最適予見サーボ系との間に統一性を有していることを明らかにしている。第6章では移動体の振動・姿勢制御における四つの制御方式についてそれらの二次形式評価関数値を比較することによってそれぞれの制振性能を評価している。第7章では数値実験により、それぞれ二つの振動モデルを用いて構成された制御系の移動体の振動と姿勢制御への有効性が示されている。第8章では本論文全体に関する結論や今後の課題などについて述べている。

## 学位論文審査の要旨

主査	教授	土谷	武士
副査	教授	長谷川	淳
副査	教授	島	公侑

近年、宇宙、農地、森林などの分野での応用を考えた極限作業ロボットが提案されている。これらのロボットは作業環境が整備されていない不整地としている。このような作業環境に対して対応できるものとして車輪型移動ロボットが考えられる。

不整地走行時にはロボットの機動性を高めるために、また積荷の安全性と環境センサの安定保持のために、路面凸凹の影響によるロボット車体の動揺や上下動を抑制することが重要である。

本論文では、不整地を走行する車輪型移動ロボットを意識して、走行路面の凸凹による移動体の振動および姿勢の制御問題に関して論じている。

今までのアクティブサスペンション機構の制御に関する研究のほとんどは上下方向の自由度しか持たない一輪移動体を制御対象として行われてきた。四輪をもつ移動ロボットの振動および姿勢制御問題を考えることになると、四輪に対応する四つのサスペンション機構の相互干渉はどうしても存在する。本研究は四輪モデルを導出し、トータルシステムの観点からその相互干渉を考慮に入れた上で、制御問題を扱うべきであるという立場に立っている。

本論文では四輪をもつ移動体に対して、路面凸凹による車体の上下、ローリングおよびピッチング方向の変位（あるいは角度）を表せる振動モデルを導出している。さらにこのモデルに基づいて、路面の前方情報を利用するデジタル最適予見サーボ系を構成することによって、各方向の振動を抑制しながら、移動体の姿勢制御をできることを示している。ここで構成される最適予見サーボ系はフィードバック制御とフィードフォワード制御を併合した制御系であり、路面凸凹の影響を積極的に除去することができる。エネルギー補給が困難である極限作業環境で利用される移動ロボットでは省エネルギーは極めて重要である。予見制御では未来情報を有効に利用するためアクチュエータの動作に無駄が少なくエネルギーが十分に利用されるという効果が示される。

一方、実際の移動体の振動・姿勢制御への応用を考える場合には路面の凸凹変位の計測値はセンサのもつ物理的な制約によって、車輪からの相対変位の形でしか得られないものである。もし、四輪をもつ移動体の一つの車輪にあたる路面の凸凹変位を常に基準変位にすれば、ほかの三つの車輪にあたる路面の変位はこの基準変位に対しての相対変位となる。これにより、現在時刻の路面の変位は移動体の姿勢とサスペンション機構の状態により容易に算出することができる。本論文ではこのような相対変位を採用した振動モデルを導出し、ローリングとピッチング方向の振動を抑制しながら姿勢制御ができる制御法も提案している。

また、本論文ではどの程度路面情報を利用できるかによって、可能な四つの制御方式を提案している。

- ① 移動体の前輪と後輪の未来路面情報を全部利用する全予見制御方式
- ② 移動体の前輪のサスペンション機構を路面情報のセンサ系とし、それを利用することにより、後輪のサスペンション機構のみに予見フィードフォワード補償を施す部分予見制御方式
- ③ 現在時刻の路面情報のみを利用するフィードフォワード補償制御方式
- ④ 路面情報を一切利用しないフィードバック制御方式

本論文では部分予見制御方式を実現するために、必要とする最適部分予見サーボ系の構成法を開発し、その具体的な構成について述べている。また、係数行列の理論計算によって、新しく開発された最適部分予見サーボ系は今まで構成されている最適予見サーボ系との間に統一性を有していることを明らかにしている。

移動体の振動・姿勢制御における四つの制御方式についてそれらの二次形式評価関数値を比較することによってそれぞれの制御性能を評価している。最後に数値実験により、それぞれ二つの振動モデルを用いて構成された制御系の移動体の振動と姿勢制御への有効性を示している。

これを要するに、著者は不整地走行移動体の振動・姿勢制御に関する研究において制御対象のモデリングや制御系構成などの面で貢献するところ大なるものがある。

よって、著者は博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。