

## 学位論文題名

## 対象の物理的な構造を利用した制御に関する研究

## 学位論文内容の要旨

1960年頃からR.E.Kalmanらによって研究・開発されてきた線形系に対する時間領域の設計法は、基本的には、制御対象のダイナミクスを状態変数という互いに独立な座標軸上にとられた点の動きに分解して表現し、その軌跡をすべての状態変数をフィードバックすることによって望ましい軌跡に変えようとする。制御対象が可制御な構造を持ち、状態変数もすべて観測が可能か、あるいは可観測の条件が満たされるならば、この手法によってすべての状態変数を制御することが可能であり、それゆえ質の高い制御が実現できる。しかしながら、自由度の数だけの状態変数を使ってダイナミクスを表現するので、分布定数系などの制御では無限大次元の状態方程式を扱わなければならない、漸近安定な制御系を構成するためには有限次元近似に伴う観測スビオーバの問題や制御スビオーバの問題を議論しなければならないという難点がある。一方、周波数領域における設計法ではボード線図等で制御対象の特性を調べた上で好ましくない周波数特性を改善するように有限次元の補償器を構成するので、分布定数系に対しても集中定数系の場合と同様な考え方で設計を進めることができ、無限大次元という困難は現われない。これは制御対象の特性を全周波数領域にわたって巨視的に同定してから設計を進めるためであり、守備範囲を広げるためには時間領域の設計法においてもこのような巨視的な視点を導入する工夫が求められる。本論文は時間領域の設計法に巨視的な視点を持ち込む手段として、制御対象の物理的な構造が利用できることを明かにしたものであり、全8章から構成されている。各章の概要は以下の通りである。

第1章は序論であり、本論文の位置づけを明かにした上で、以降に続く各章の構成とその簡単な説明が与えられている。

第2章はメカニカルシステム一般に見られる構造を利用する方法を統一的に述べたもので、力学的エネルギーという巨視的な指標を採用すると、制御対象のダイナミクスをハミルトンの正準運動方程式の形でモデリングでき、レギュレータ問題はすべてこの力学的エネルギーを散逸化させることと関連づけて定式化できることが示される。この定式化の過程では制御対象のダイナミクスを具体的に書き下さなくても済み、非線形な特性をもつ系であっても線形化の近似を持ち込む必要はない。また、分布定数特性を含む系の場合にも有限次元化の近似を持ち込む必要がないという特徴をもつ。したがって、ここで導かれる制御則を用いると制御器を含めた全系の漸近安定性が厳密に証明できる。ここで与えられる議論は続く第5章までの議論の基礎となるものである。

第3章は分布定数特性と集中定数特性を含むメカニカルシステムの例として1リンクのフレキシブルアームの制振と位置制御の問題を取り上げ、エネルギー散逸化制御として定式化できることを具体的に示した上で、現実の制御にも有効であることを実験結果を通して明かにする。従来のフレキシブルアームの制振制御の研究では状態方程式モデルが具体的に導けるように均一な断面をもち、弾性分布、質量分布が均一なアームに限定して議論されてきたが、本研究で用いる手法では状態方程式を導かなくても漸近安定な制御則を導く

ことができるので、扱えるアームの条件が広がられている。また、関節駆動部の集中定数特性と弾性リンク部の分布定数特性を分離してモデル化する方法を新しく提案し、このモデルを使って従来から知られていたPDS制御の意味を明かにすることにも成功した。本手法を用いることにより、無限大次元の状態方程式を有限次元近似することによって生じる観測スピルオーバーの問題と制御スピルオーバーの問題が根本的に解決された。

第4章は、2章で提案した方法が状態方程式モデルが導けないほど複雑な系の制御に対しても有効であることを示すために、1リンクのフレキシブルアームの先端におもりを吊し、このおもりを旋回移動させる制御に適用した結果について述べている。モデリングの過程と制御則の導出の過程を示し、実験を通して理論の正当性を検証している。

第5章はクレーンの吊り荷の搬送制御に適用した結果を述べたもので、吊り荷の振れの角度を使わなくても振れを抑制しながら荷を目的の位置まで搬送する制御が実現できることが示される。この手法では、トロリーと比較して軽い荷の搬送する場合には重い荷を搬送する場合よりも荷の制振性能が悪化するという問題が生じるが、重い荷を搬送するときの荷の振れを記録しておき、トロリーの駆動力にフィードフォワードで加えることによりこの悪化が改善できることが明かにされる。モデルクレーンを使った検証実験の結果も示し、現実の搬送作業にも有効なことを確認している。

第6章と第7章は制御対象の機構的な構造を利用すると状態空間法の一般論が適用できない場合でも制御の目的を達成できることを述べたもので、第6章では直進形クレーンに生じる吊り荷の横揺れ抑制制御の問題を取り上げている。懸垂ロープの長さを入力としてクレーンの揺れをモデル化しても線形な状態方程式モデルは得られず、この制御対象は本質的に非線形な系である。クレーンの場合、制御中にロープの長さが一方向に変化するのはい好ましくないので、振幅値を固定し揺れに伴うエネルギーが減少するようにロープの長さを可変にして振動の抑制を行い、トロリーの移動は横方向の揺れには影響を与えず、ロープの長さの変化は荷の楕円運動の角運動量を変えないという構造を利用して、横揺れを抑制したせいで生じるトロリーの移動方向の揺れの増大をトロリーの運動制御で同時に抑制して目的を達成している。

第7章は移動ロボットの経路追従制御の例を示したもので、車輪を駆動するDCモータの電機子電圧を入力と考えて導いたロボットのダイナミクスの解析から、ロボットの進行スピードと姿勢角に関しては線形な微分方程式で記述できること、ロボットの位置までを一緒に含めると非線形な関係式が現われることを明かにする。線形なダイナミクスに対しては漸近安定性を厳密に保証できる線形制御器が構成できることから、ロボットの進行スピードと姿勢角を指令値とする離散時間線形サーボ系を最初に構成し、経路からの距離偏差に応じてこの進行スピードと姿勢角を自動的に生成する上位の漸近安定な制御ループを導入して目的を達成する。その結果、従来のような直線経路や円弧経路だけに限らず、任意の曲線経路に対して可変速で追従するロバストな離散時間制御系が構成できた。

第8章は、制御モデルと真のモデルを一致させることは難しいという立場からモデル化誤差があっても制御結果に大きく影響しない制御モデルの構造と制御器の組合せを検討し制御器にはLQ最適状態フィードバック制御系を用い、制御モデルとしては値を直接観測できる入力と出力から構成した自己回帰移動平均式を用いることを提案している。モデル化誤差を誤差補償項として扱い、誤差補償項を含めた状態フィードバック制御系の構成法を示して、熱伝達系の制御に適用した数値実験結果から正当性を検証している。

第9章は結論であり、各章で得られた結果をまとめ今後の研究課題について論じている。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 土 谷 武 士  
副 査 教 授 島 公 脩  
副 査 教 授 長 谷 川 淳

学 位 論 文 題 名

## 対象の物理的な構造を利用した制御に関する研究

現代制御理論とよばれる時間領域の制御系の設計法では、制御対象の数理モデルを状態変数に分解して表わし、すべての状態変数をフィードバックで制御するので、理想的な条件が成立するときには質の高い制御が実現できるが、周波数領域における設計法のような制御対象のダイナミクスを巨視的に捉える視点に欠けるため、分布定数系の制御に適用する場合や複雑な系に適用する場合には、すべての状態変数を管理できず、したがって安定性を厳密に保証できないという不都合が生じる。

本論文は、このような問題を解決することを目的とし、時間領域の制御系設計法に巨視的な視点を導入する手段として、制御対象の物理的な構造や機構上の特性が利用できることを事例的にまとめたものであり、主要な結果は次の点に要約される。

- ①メカニカルシステムのレギュレータ問題は、力学的エネルギーという巨視的指標を採用し仮想的なポテンシャルエネルギーを導入することによりエネルギーを散逸化させる制御として定式化できることを示している。その結果をフレキシブルアームという分布定数系の制御に適用し、分布定数特性や境界条件の処理に近似を持ち込むことなく、厳密に制御を取り扱うことに成功している。
- ②ロープの長さと同ローリーの駆動力を制御入力とし、直進形クレーンの吊り荷に発生する横揺れと縦揺れ抑制しながら目的位置まで荷を搬送する制御問題は、線形制御モデルが導出できないので、従来的一般論の適用は難しいと考えられていた。この問題に対し、ロープの長さを変えても角運動量が保存されるという構造上の特性を利用することで制御目的が達成できることを明かにした。
- ③車輪型移動ロボットは特殊な非線形特性に支配されるため、ロバストな経路追従制御の実現が難しかった。この問題に対し、ロボットのダイナミクスを線形サブシステムと非線形サブシステムに分離して扱い、ロボットを経路に沿って定義した仮想的なポテンシャル場の中を移動させることで非線形性を吸収する方法を提案し、なめらかな任意経路にロバストに追従できる制御を実現した。

以上のように本論文は、従来の方法論では取り扱いの困難であった制御問題に対して、構造に着目した巨視的な視点という新たな立場から接近し、理論及び応用上有益な新知見を得ており、制御工学の進歩に寄与するところ大である。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格があるものと認める。