

氏 名	高 橋 隆 行
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 5 年 2 月 10 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 62 年 3 月 東北大学大学院工学研究科機械工学 専攻前期課程修了
学 位 論 文 題 目	振り子の非線形運動制御に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 猪岡 光 東北大学教授 中野 栄二 東北大学教授 長南 征二 東北大学教授 谷 順二

論 文 内 容 要 旨

第 1 条 序 論

一般に制御対象は、(a)系が線形とみなせる、(b)系の挙動を支配する方程式は明らかであるが線形とはみなせない、(c)系の挙動を支配する方程式を明らかにするのが困難、の三つのタイプに分類できる、(a)の系に対する制御系設計法は体系化が進んでおり、比較的容易に取り扱うことができる。一方(b)の、いわゆる非線形系の解析的な取り扱いが煩雑であり、特別の場合を除いて解くことが難しいとされている。しかしながら、工学的に重要な機械システムのほとんどは非線形であり、より効果的な制御を実現するために、系の大域的な特性を考慮に入れた設計法の開発が望まれている。また、(c)の系に対する解析的なアプローチは極めて困難であるから、多くの場合、試行錯誤的な要素を含む方法により設計が行われている。

本研究の目的は、(b)あるいは(c)のような機械システムに関する有効な制御系の構成法を提案することであり、機械システムの基礎的モデルとして広い応用範囲を持つ、単振り子および台車振り子系の非線形運動の制御に対して、(1)運動方程式の第一積分を用いた動特性の解析と制御軌道の計画、(2)熟練した人間オペレータが生成した制御操作を利用する制御法、の二つの観点からのアプローチの成果をまとめたものである。

第 2 章 単振り子の運動の解析

本章では、単振り子の運動について、エネルギー式に基づく解析法を提案した。エネルギー式は運動方程式の第一積分であり、これを図式的に表現したエネルギー線図を用いることで、単振り子の非線

形運動を容易に解析できることを明らかにした。図1に、提案したエネルギー線図を示す。これは、振り子の全エネルギーおよび位置エネルギーをプロットしたものであり、特に、粘性減衰が無視できる場合には、全エネルギーの推移を直線で表せるため、厳密な振り上げ経路を容易に決めることができる。また粘性減衰が小さい場合には、本方法で得た経路を初期値として用いることで、目的の経路の探索を簡単化できる。そして、この方法により求めた経路を用いて振り上げ実験を行い、倒立点および適当な角度へ、十分小さい速度で到達させられることを確認した。

第3章 台車振り子の運動の解析

本章では、台車振り子運動方程式の第一積分を求め、それに含まれる積分定数に着目することで、系の運動を解析できることを示すとともに、系の制御則を求める方法を導いた。まず、振り子が水平面内を回転するものとして第一積分を求めると

$$\dot{\theta} = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa - \cos^2 \theta}} \cdot \dot{\theta}_0 \quad \dot{\chi} = -\frac{\dot{\theta} \cos \theta}{\kappa} + \dot{\chi}_0 \quad (1)$$

となった。ここで θ は振り子の角度、 χ は台車の位置、 κ は系全体と振り子の質量比、上付きのドットは時間 τ に関する微分を表す。これらの式に含まれる $\dot{\theta}_0$ 、 $\dot{\chi}_0$ は系の自由運動を決める定数であり、軌道パラメータと呼ぶ、軌道パラメータは、振り子に作用するトルク α および台車に作用する水平力 β により、次のように変化することを明らかにした。

$$\dot{\chi}_0(\tau) = \int \frac{\beta}{\kappa} d\tau + c \dot{\chi}, \quad \frac{1}{2} \dot{\theta}_0(\theta)^2 = \int \left(\alpha - \frac{\beta \cos \theta}{\kappa} \right) d\theta + c \dot{\theta} \quad (2)$$

そして、これを使って系の運動経路を容易に計画できることを示した。

例えば、制御器としてデジタルコントローラを想定して β が区分的に定数であるとし、かつ有限個の値をとるものと仮定すると、振り子の運動経路を図2のように計画することができる。これは $\alpha = 0$ で β が0, 1, -1の三値をとる場合の例であり、点Aで正方向に運動している振り子を原点Fで速度がちょうど0になるように運動させる経路を示している。本章ではさらに、台車の位置と振り子の角度との関係を求め、台車と振り子を同時に希望する軌道を運動させるための制御則を求める方法を導いた。同様にして、振り子に重力が作用する場合に、振り子を安定な平衡点から倒立点まで振り上げる制御について考察した。この場合も、提案した方法により必要な制御則が、例えば図3のように求められることを示した。

第4章 手動制御に基づく振り上げ制御

本章では、単振り子の振り上げ運動に関する制御則を得るために、熟練した人間オペレータの制御能力を利用する方法を提案した。これは、解析的な取り扱いが困難なシステムに対する制御系の構成法として応用することを目的としたものである。

はじめに、手動による単振り子の振り上げ実験を行い、それを最短時間制御の場合と比較して人

間の制御能力を調べた。その結果、十分に練習を積んだ熟練オペレータは、表1に示すように、最短時間に近い良好な制御操作を行えることが明らかになった。次に、得られた制御操作をコンピュータに記憶し、実時間で再生して用いる方法について検討した。記憶した制御操作をそのまま再生するだけでは、外乱などの影響により制御の再現性は良くない。そこで、再生時に弱いフィードバックをかける方法、およびオペレータに振り子の目標位置を生成させる方法の二つを提案し、その有効性を実験により確認した。

ところで本章で提案した方法は、目的のシステムをオペレータが制御可能であることを前提としている。この条件を満たすために、(1)制御対象の特性を人間が操作しやすいように設定する。(2)オペレータの制御能力を高める。などの対策が必要となる。本章の後半では、オペレータの制御能力をシミュレータを使って効果的に高める方法について提案した。すなわち、制御対象の特性を容易なものから徐々に本来の特性になるように変化させて練習を行うことで、最終的に目的の制御操作を得る方法である。この方法により、動きの速い振り子の制御操作を得ることに成功した。

第5章 HSICを用いた振り上げ制御

本章では、熟練した人間オペレータが行った手動による単振り子の振り上げ制御操作を解析し、それを模倣するようなコントローラの設計法を提案した。このコントローラ (HSIC) の基本的な構成は、Q.J.Zhouらによって提案されたものである。まず制御対象の状態空間をいくつかの領域に分割し、分割した各々の領域に適切な制御則を対応づける。本章で提案する設計法の特徴は、この領域分割および各制御則に含まれるパラメータの決定を、オペレータの制御操作の解析結果に基づいて行うということである。結局、単振り子の振り上げ制御操作は三つの領域に分けられることが明らかになり、そのときの熟練オペレータの制御操作を分析して、コントローラを構成した。そして、設計したコントローラの性能を、数値シミュレーションおよび実験により検討した結果、系のパラメータ変動に強い良好な特性を示すことが明らかになった。固定パラメータのコントローラで、単振り子の振り上げという非線形性の強い運動が制御可能であることは、この種のアプローチの有効性を示すことといえる。

表1 手動制御実験において振り上げに要した時間

	Potentiometer			
	$\alpha^* = 0.577$		$\alpha^* = 0.450$	
	beginner	expert	beginner	expert
Time	11.54	9.08	—	12.12
Δ (%)	56.0	19.0	—	17.5

	3 level switch			
	$\alpha^* = 0.577$		$\alpha^* = 0.450$	
	beginner	expert	beginner	expert
Time	—	7.97	—	12.12
Δ (%)	—	5.2	—	17.5

— : not available

第6章 結論

本章では、本論文の各章の結果を総括し、まとめを述べた。本論文で取り上げた二つのアプローチ、すなわち、第一積分を用いた解析に基づく方法と手動制御に基づく方法は、いうならば互いに非線形制御という山の頂をはさんで正反対の位置にある登山入口である。本文中で述べたように、どちらの方法とも、振り子の非線形運動の制御に対して良好な結果を示し、新たな入口を明らかに

したという意味で、この分野の発展に寄与するものとする。

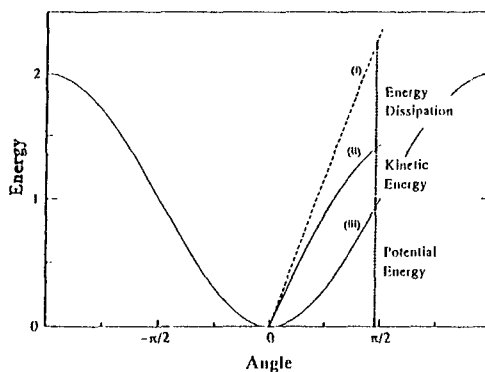


図1 単振り子のエネルギー線図

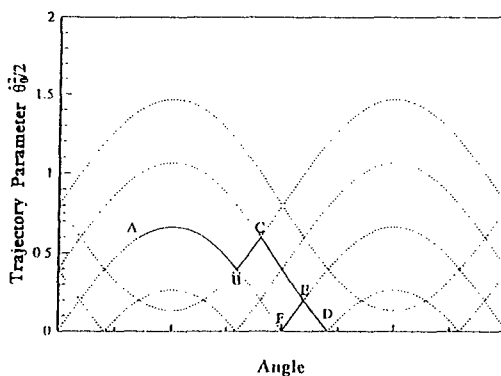


図2 水平面を回転する振り子の運動計画

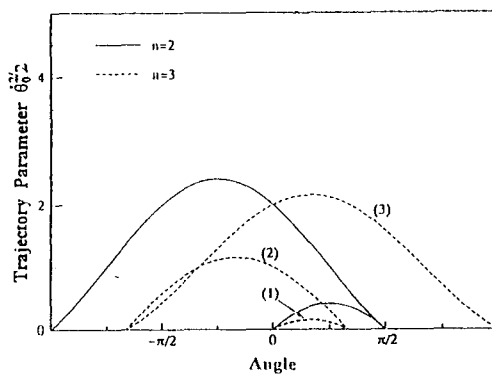


図3 垂直面を回転する振り子の運動計画

論文結果の要旨

制御工学は、これまで主として線形システムを対象とした理論を中心に発展してきた。しかしながら、工学的に重要な機械システムの多くは非線形であり、その高速かつ高精度な動作に対する要求に伴って、非線形制御系の構成法に対する関心が益々高まりつつある。

著者は、機械システムの基礎的モデルとして広い応用範囲を持つ単振り子および台車振り子の非線形運動に対し、複数の観点から制御系の構成を試みている。本論文は、その結果をまとめたものであり全編6章より成る。

第1章は序論である。

第2章では、運動方程式の第一積分であるエネルギー式を用いて、単振り子の非線形運動を容易に解析できることを明らかにしている。特に粘性減衰が無視できる場合には、エネルギー式を図で表現することによって希望の振り上げ経路を厳密に求めている。

第3章では、台車振り子の運動方程式の第一積分を導き、それを用いた系の運動の解析法と制御軌道の計画法を提案している。この方法は、運動方程式の第一積分に含まれる二つの定数が外力により変化することに着目して系の様々な条件下での運動を解析するものであり、興味深い成果である。また、制御器として操作量が区分的に定数でかつ有限個の値をとるデジタルコントローラを仮定し、先の解析結果を用いて系の運動経路を計画する方法を導いている。

第4章では、熟練した人間オペレータの制御操作を利用した単振り子の振り上げ制御について論じている。まず手動制御実験を行い、人間オペレータが有効な振り上げ制御則を生成できることを確認し、得られた制御則を利用したプレイバック制御について考察を行っている。この成果は、従来オペレータを必要としたシステムの自動化を行う上で有効に利用できる。

第5章では、人間オペレータの制御操作を模倣するコントローラ（HSIC）を振り子の制御に用いることを試み、その効果的な設計法を提案している。この方法は、熟練オペレータが生成した制御操作から必要な制御ルール等を決定するため、制御対象の数字モデルを必要としないという特徴を持つ、更に設計したコントローラの性能を数値シミュレーション及び実験により検討し、制御対象のパラメータ変動に極めて強い良好な特性を示すことを明らかにした。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、非線形機械システムの新しい解析法と制御系の構成法を提案したものであり、制御工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。