

氏 名	小 鹿 丈 夫 お じか たけ お
学位の種類	工 学 博 士
学位記番号	工 博 第 438 号
学位授与の日付	昭 和 50 年 9 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 5 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	工 学 研 究 科 電 気 工 学 専 攻
学位論文題目	Decomposition and Coordination Algorithms for the Optimal Control of Nonlinear Dynamical Systems (非線形動的システムの最適制御における分割と統合のアルゴリズム)
論文調査委員	教 授 西 川 禪 一 教 授 近 藤 文 治 教 授 得 丸 英 勝

論 文 内 容 の 要 旨

この論文は、多変数非線形動的システムの最適制御に対して、干渉ベクトル調整法と呼ばれる新しい手法に基づく、多重レベル計算法の適用を検討したものである。そしてシステムのサブシステムへの分割及びその統合を達成するための、いくつかのアルゴリズムを構成し、それらの収束性等の数字的性質と具体例への応用について考察している。論文は4つの章と付録から成る。

第1章は序論で、多重レベル法の基本概念について説明し、また論文内容の概要を述べている。

第2章では、サブシステム間の結合及び非線形性を表わすパラメータ ε が小さい動的システムにおいて、積分形の評価指数を最小にする制御問題を考察している。そのために、システム方程式においてパラメータ ε を含む結合及び非線形項を干渉ベクトルで置換する2重レベルのアルゴリズムを提案した。それによれば、下位の第1レベルでは第2レベルから与えられた干渉ベクトルのもとに、比較的少変数低次元に分割された線形サブ問題を解く。第2レベルでは干渉ベクトルを直接に調整変数とし、近似的な最急勾配法による統合の計算を行う。この2重レベルアルゴリズムを干渉ベクトル調整法と呼び、これについて繰返し計算が収束するための十分条件を詳細に論じている。また応用の具体例を示して、アルゴリズムの有効性を実証している。

第3章では、パラメータ ε が比較的大きな場合を考察している。第2章の方法では、 ε が大きくなるにつれて求解過程の収束性が劣化する。そこで、干渉ベクトルを用いて予め評価指数の表現形式を適当に変形した後、第2章のアルゴリズムを適用することにより、収束性の改良を行った。その際評価指数に重みと呼ぶ2個のパラメータを導入しており、それらの値を適当に定めることによって収束性が著しく改善されることを、いくつかの数学的定理の形で明らかにし、また具体例によって実証した。

第4章は、パラメータ ε がさらに大きな場合、或いは制御時間がかかなり長い場合を考察している。そのような場合には、第3章の拡張された干渉ベクトル調整法を用いても、計算の打切り誤差或いは丸め誤差のため、収束性が劣化することが多い。そこで、全体の制御時間帯を部分時間帯（サブアーク）に分割

し、各サブアークに対して第3章の方法を適用するアルゴリズムを提案している。各サブアークの接続点においてシステム変数の連続性を保つ必要があるため、アルゴリズムは3重レベル構造となる。

論文では、第3レベルにおいて連続条件を調整して、第2レベル以下では必ずしも連続性を保たずに計算を進める不連続時間分割法と、サブシステム間の調整を第3レベルで行い、第2レベルで連続性を常に満たすようにする連続時間分割法とを構成している。それぞれについて収束の十分条件の吟味を行い、また具体例に適用して検討した。その結果、連続時間分割法の方が収束性、適用範囲の広さ等の点において、概して優れていることを明らかにしている。そして従来方法では求解が極めて困難であった強い非線形システムにおいても、比較的簡単に良好な制御を得ている。

以上の一連のアルゴリズムについては、それぞれについて明確な数学的検討を行い、また相互の関連、長短を明らかにしている。具体例としては宇宙空間飛しょう体の姿勢制御及び軌道移行の問題を考察し、本論文のアルゴリズムが従来用いられた代表的な方法に比して、多くの場合に優れた結果を与えることを数値的に示している。

論文審査の結果の要旨

多変数非線形動的システムの最適制御には、今日なお多くの困難な問題が存在する。この論文はそのようなシステムをいくつかのサブシステムに分割し、制御の決定方法に階層構造を与えて、下位のレベルでは比較的簡単な線形サブ問題を解き、上位レベルでサブシステムの統合をはかる、多重レベル法について研究したものである。そのために、著者は従来用いられていた計算法よりも簡便で、かつ計算効率の優れた干渉ベクトル調整法と呼ぶ新しい手法を提案し、それについて数学的検討を加えると共に、具体例に適用して有効性を実証したものである。

著者の得た主な成果を要約すれば、次の通りである。

- (1) まずシステムが互いに弱く結合したいくつかのサブシステムより成り、また各サブシステムに含まれる非線形性も微小である場合を考察し、干渉ベクトル調整法と呼ぶ新しい2重レベルのアルゴリズムを提案した。それによれば、結合及び非線形性に対応する変数の決定はすべて上位のレベルにゆだねる。その結果下位の第1レベルは、最適性の必要条件として、比較的少変数低次元の線形2点境界値問題を解けばよく、第2レベルでの決定は結合及び非線形変数を直接に調整変数として、一種の勾配法を用いて行われるので、全体として効率のよい計算アルゴリズムが構成される。
- (2) サブシステム間の結合や非線形性が大きくなるにつれて、一般に(1)の求解過程の収束性は劣化する。それへの対応策として、干渉ベクトルを用いて予め制御の評価指数の見かけ上の形を変形し、その上で干渉ベクトル調整法を適用する手法を提案した。そこでは重みと呼ばれる2個のパラメータを導入しているが、その値を適当に選ぶことにより、収束性が著しく改善できることを定理の形で明確に述べると共に、パラメータ値の実験的な決定法をも示した。
- (3) (2)の方法によれば、1個のパラメータ値を十分大きく選ぶことにより、理論上はかなり大きな結合あるいは非線形性のある場合をも処理できる。しかし実際計算上は誤差の累積のために、収束性が劣化することがあり、その傾向は制御に要する時間が長くなるにつれて顕著になる。それへの対応策として、全体

の制御時間帯をいくつかの部分時間帯（サブアークと呼ぶ）に分割し、各サブアークに対して(2)の方法を適用する方法を提案した。そのとき各サブアークの接続点におけるシステム変数の連続性を考慮する必要が生じ、そのために制御アルゴリズムは3重レベル構造となる。著者は、不連続時間分割法及び連続時間分割法なる2つの手法を考案し、それぞれについて詳細に検討した。その結果適当な時間分割を行えば、相当大きなサブシステム間の結合や非線形性にも有効に対処できることを、理論的並びに実証的に明らかにした。

(4) (1)～(3)で提案し、構成したアルゴリズムに対しては、すべてその収束性について詳細な数学的検討を加え、十分条件を与えるいくつかの定理を導いた。それらの定理は定量的には完全なものとは言えないが、それぞれのアルゴリズムに一定の保証を与えると共に、アルゴリズム間の差異、優劣、実際適用上のめやすについて、有用な示唆を与えるものである。

(5) 宇宙空間飛しょう体の姿勢制御問題、軌道移行問題を具体例として、著者のアルゴリズム及び従来からある代表的なアルゴリズム、例えばラグランジュ乗数を調整変数とする方法、ニュートン・ラフソン法等、について数値実験を行い、実用上の簡易さ、収束性、適用範囲の広さ等を比較検討した。その結果著者の方法が多くの場合に優れた結果を与えることを確かめ、特に(3)の連続時間分割法によって、従来求解不可能とされた強い非線形性のある場合にも満足な解を得ている。

以上を要するに本論文は、多変数非線形動的システムの最適制御に、干渉ベクトル調整法の考え方を導入し、分割と統合の基本的手法を確立すると共に、いくつかの補助的手段を加えて、適用範囲の広い一連のアルゴリズムを提示したものである。複雑な非線形性の取扱い等にはなお検討の余地はあるが、著者の方法は本論文に述べられた最適制御問題以外にも、静的システムの最適化、一般の非線形多点境界値問題等に応用が可能であると考えられ、学術上ならびに實際上寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として価値あるものと認める。