

氏 名	さわ だ ゆう いち 澤 田 祐 一
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	博 甲 第 65 号
学位授与の日付	平成 6 年 7 月 21 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研 究 科・専 攻	工芸科学研究科情報・生産科学専攻
学位論文題目	Studies on Active Control of Flexible Structures Subject to Random Disturbances (不規則外乱を受ける柔軟構造物の制御に関する研究)
審 査 委 員	(主査) 教 授 大 住 晃 教 授 三 宮 信 夫 教 授 山 本 鎮 男

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、不規則外乱を受ける柔軟構造物の振動を抑制する制御系について理論的な側面から研究したものである。

制御対象として柔軟構造物をみた場合、次のような特徴がある。すなわち、(1)柔軟構造物は無限の自由度を持つ分布定数系（無限次元システム）であり、したがって(2)無数の固有振動数を持ち、さらに低い周波数帯域においてはその固有振動数が密集して存在する。また、(3)振動減衰力が非常に小さく、(4)地震や風、あるいは物体の衝突や重力傾斜等による様々な不規則外乱を受ける。このような特徴を持つ柔軟構造物のアクティブ制御は、有限個のセンサーと、有限個の制御器で制御しなければならないが、(1)、(2)の理由から柔軟構造物のすべての状態を完全に制御することは難しい。

柔軟構造物は外界より様々な外乱（風、地震、物体の衝突、搭載機器から発生する振動等）を受けるにもかかわらず、これまでの研究では、外乱の存在は意識されても外乱自身を柔軟構造物の数学モデルに取り込み、制御系にまで反映させた例は非常に少ない。不規則な外乱を受ける柔軟構造物の振動は同じく不規則であり、このような振動を確定過程として取り扱うには、厳密には数学的に無理がある。すなわち、不規則な外乱を受ける柔軟構造物の振動は確率過程として捉えなければならない。さらに、高層建築物等においては地震外乱と風による外乱は不規則振動を引き起こす最大の原因であるが、それぞれ異なる統計的性格を持つため双方を同様に扱うことは危険である。

本論文は、柔軟構造物の不規則振動を支配する重要な要素である不規則外乱を数学モデル中へ明確に記述し、確率システム理論の立場から、モード制御にもとづいたアクティブ制御系の構築を行っている。さらに、このアクティブ制御を行うことで生じるスピルオーバー現象が制御系に及ぼす影響を最小にする手法についても確立している。

本論文は7章から構成されている。

第1章では、問題の記述と過去の研究についての概要を述べ、ついで第2章では、力学におけるハミルトン原理が確率システムのモデリングに対しても適用できるものとして、柔軟構造物の運動を記述する数学モデルを導出している。ここでは、2種類の柔軟構造物のモデルを導出している。ひとつは一次元の構造物であり、実際には全体に分布不規則外乱を受ける柔軟な梁を考え、そのラグランジュ運動方程式をハミルトン原理を用いて求めている。また具体例として、超高層ビルに代表されるような、片持ち梁とみなせかつ梁全体に風（分布不規則外乱）と、固定端より地震外乱を受ける柔軟構造物の数学モデル（オイ

ラー・ベルヌーイ型確率偏微分方程式)を得ている。もうひとつは、衛星に取り付けられた太陽電池パドルなどを想定した2次元柔軟構造物の簡単な例として、表面に分布不規則外乱を受ける柔軟矩形板の数学モデルを、梁のモデルと同様にしてハミルトン原理を用いて導出している。

第3章では、第2章で求められた分布不規則外乱と地震外乱を受ける柔軟片持ち梁の有限次元アクティブ制御問題について考察している。外乱を受ける柔軟片持ち梁のダイナミクスは、1次元の確率偏微分方程式で記述される。固有関数展開法を用いて分布定数系である数学モデルを有限次元の伊藤型確率微分方程式によって近似し、これをシステム方程式とする。本章では、柔軟構造物の有限次元制御を行う際に発生する制御スปีルオーバーと観測スปีルオーバーの存在、およびシステムに対するそれらの影響を確率システムの立場から明らかにし、さらに観測スปีルオーバーを有色観測雑音とみなすことによって制御モードの状態推定器を構築している。また、状態推定量にもとづき、制御モードの振動エネルギーを最小にする確率最適制御量を導出する。制御系の有効性は実地震データを用いた数値シミュレーションによって検証されている。

第4章においては、第3章と同様の柔軟片持ち梁をモデルとし、状態フィードバック制御だけでなく、地震計より得られる地震外乱の加速度データを用いたフィードフォワード制御を併用したアクティブ制御問題を考えている。フィードフォワード制御量は柔軟構造物に印加される地震の力なるべく相殺するように生成され、同時に、フィードバック制御により分布外乱が励起した振動を抑えるようにシステム全体の制御系が構築される。本方式による制御系が有効であることが、第3章で確立した方式との比較において示されている。

第3章、第4章における柔軟構造物の数学モデルはKelvin-Voigt型減衰項を有するオイラー・ベルヌーイ型確率偏微分方程式で記述された。第5章では、より一般的にアクティブ制御問題を考えるために、柔軟構造物の数学モデルを構造減衰と分布不規則外乱項を持つ2階分布定数系として記述している。構造減衰はKelvin-Voigt型減衰と同様に低次モードにおいてはその減衰力は殆ど無い。一方、高次モードにおいてはKelvin-Voigt型減衰ほど急激に減衰力が増大しない。本章では、このような2階分布定数系として一般化された柔軟構造物モデルに対してもモデルの低次元化およびアクティブ制御系の構築が可能であることが示されている。また、数値シミュレーションによって制御系の有効性と制御スปีルオーバーの影響が検証されている。

第6章では、2次元柔軟構造物のアクティブ制御問題を取り扱っている。第2章において導出された3端が自由、残る1端(制御端)に制御力および制御トルクを受ける柔軟矩形板の数学モデルを、制御端の状態と把持された矩形板のモデルに分離し、これに対して梁の場合と同様に固有関数展開を用いて低次元化が図られている。本章における矩形板は境界において観測のみならず制御をも行うため、システム方程式に制御項が陽に現われず、さらに状態量が観測システムに陽に現われないといった通常の制御問題の型にはまらない問題が発生する。そこでこの問題を解決するために、制御力に制御端における速度フィードバック項を含めることで、制御境界の状態を記述する1階微分方程式を新たに得、これを用いることで制御問題を標準LQG問題に帰着させることが可能であることが示されている。また、確立した制御システムが良好に作動することは数値シミュレーションにより確認されている。

第7章では、本論文の全体のまとめが与えられている。

論文審査の結果の要旨

本研究は、不規則外乱をうける柔軟構造物の振動抑制のための制御システムの構成法を確率システム理論の立場から確立したものである。すなわち、風や地震外乱をうける高層ビルや搭載機器から不規則雑音をうける人工衛星用太陽電池パドルなどを想定した1次元および2次元柔軟構造物を制御対象とし、まずそれらのダイナミクスを記述する偏微分方程式によるシステムモデルを導出し、ついで最適制御系構成の

ために有限次元近似モデルを伊藤型確率微分方程式に書改めることから出発して、有限次元近似によって発生する制御および観測スピンオーバー現象に対処する方法を開発しながら不規則外乱による力学エネルギー散逸のアクティブ制御システムの設計法を与えた。さらに、確立したアクティブ制御法が有効であることを実地震データを用いた数値シミュレーションにより示した。

確率過程論分野で提案されている確率微分方程式が工学的にも有用なモデルを与えるものであることを実証したのは、本申請者の業績でもある。一連の研究成果は国内外の学術誌に公表されており、学術的にも体系付けられている。本研究の成果は、今後土木・建築分野への応用をも含めて大型構造物の制振法の発展に大いに寄与するものと認められる。