氏　名	中　野　統　英（なかの　のぶひで）
学位(専攻分野)	博　士　(工　学)
学位記番号	博　甲　第　247　号
学位授与の日付	平成13年3月26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 Soft Sensors for Identifying Unknown Physical Parameters Involved in Dynamic Flexible Structures
審査委員	(主査) 教授 大住　晃 教授 森　武宏　教授 曽根　彰　神戸大学大学院教授 小島史男

論文内容の要旨

近年機械工学や宇宙工学、あるいは土木工学など様々な分野において、軽量で弾性をもったはり材料を使用した、あるいは組み合わされたいわゆる柔軟構造物（例えば、ロボットアームや宇宙ステーションのアンテナ、あるいは高層ビルや長大橋など）が数多く構築され、実用に供されている。これら柔軟構造物は軽量であり、運搬が容易であったり構造物自体を可動させるときに少ない駆動力ですむなど多くの利点を有する。しかし、同時に柔軟であるが故に不必要な振動が生じやすく、また変形も起こりやすいので、使用する際にはこれらの影響を抑えるための高度な抑制が不可欠になってくる。柔軟構造物の制御問題が近年重要なトピックとして注目されているが、このような制御問題を解決するためには柔軟構造物の各種の物理パラメータを正確に求めることが必要不可欠であることは論をまたない。

本論文は、柔軟構造物としてもっとも基本的な片持ちはりを研究対象とし、その振動減衰に関するパラメータ（空気減衰と材質の内部減衰係数）と材質の経年変化や加工硬化などによって構造物に実際に使用されている材料の曲げ剛性（ヤング率）が工学便覧等に掲載されている値と異なってくることに着目し、これら物理パラメータを求める同定問題についてその方法論を確立したものである。本研究で提案する物理パラメータの同定法は、直接に計測できない物理量を動的な測定データ（本研究でははりの変位の振動データ）から非破壊的かつ間接的に求める数理アルゴリズムを構成する方法であり、計測器で対象とする物理パラメータを直接的に計るハードな計測に対して、いわばソフトな計測法である。本論文では、計測データからこのような物理パラメータを同定する数理アルゴリズムを構成して求める手法をソフトセンサー（soft sensor）と呼称している。

上述のように考察の対象は片持ちはりであり、その振動データを非接触かつ非破壊的に計測し、その情報をもとにはりの材質や形状に関連する物理パラメータであるヤング率、材質の内部減衰係数および空気減衰係数の三つを同時に同定する数理アルゴリズムを構築しようとするものである。本論文では、はりは形状および材質が一様かあるいは空間変数に依存するか、また取得データを一旦得てから同定するか、あるいは時々刻々得ながらオンラインで同定するか、さらに計測データが不規則雑音を含むか否か、といった種々の観点から研究を行っている。

第1章では、導入部として本研究を行うに至った背景と過去になされた研究を紹介して、本研究の意義を確認している。

第2章では、まず断面形状の均一な片持ちはりの数学モデルとしてオイラー・ベルヌーイ型偏微分方程式によって記述し、それを有限要素法の一種であるガラーキン法によって有限次元近似を行い、さらに最

小自乗法の一種であるガウス・ニュートン法を導入することによって3種類の未知パラメータを決定するアルゴリズム（ソフトセンサー）を導出している。2種類の減衰係数を分離して同定できるだけでなくヤング率についても正確に同定できる有効なアルゴリズムであることをシミュレーションによって検証し、さらに実験を行って実用性についての検討を行っている。

第3章では、断面形状が一様でない片持ちはりの空間に依存する物理パラメータ関数について同定を行うアルゴリズムを導出している。これら未知パラメータは空間に依存する関数であるので、まず適当な基底関数を導入することによって有限次元（多項式）近似を行い、未知パラメータ関数を（既知の）基底関数と（未知の）係数とで表わすことによって（関数）同定問題を多項式の係数を決定する問題に帰着させている。シミュレーションによりアルゴリズムの収束の様子や有効性を検証している。

第4章では片持ちはりの有する物理パラメータについてオンライン計算で計測できるソフトセンサーを提案している。そのアイデアは2章で構築された（オフライン同定）アルゴリズムの同定計算を行う時間区間と振動データが得られる時刻とをリンクさせることであり、それによってアルゴリズムのオンライン化を行っている。シミューレーションにより同定値の精度や同定時間などを検証し、さらに実験データを用いてコンピュータ上でオンライン同定試験を行ってその実用性を検証している。

第5章では、構造物に加わる不規則外乱とセンサー雑音を考慮して、確率システム理論に基づいた同定アルゴリズムを導出している。同定規範を変形することにより、本同定問題を状態量推定問題と最小自乗パラメータ同定問題を交互に解く問題に帰着させている。すなわち、状態推定問題はカルマン・フィルタを用いて解くことができ、その結果パラメータ同定問題については第2章で提案しているアルゴリズムをそのまま用いることができる。シミュレーションにより本アルゴリズムの有効性を検証し、さらに、ヤング率については引張試験の結果と比較することにより同定値の正確さを実証している。そして材質の異なる二通りの実験によって実用性の検討を行い、実験によって得られた同定値が十分実用に耐え得ることを実証している。

第6章では、ガウス・ニュートン法では必ずしも保証されていなかった非線形最小二乗法の収束性について研究を行い、収束性および未知パラメータの独立性について考慮したアルゴリズムを提案した。これについてもシミュレーションおよび実験によって有効性および実用性を確認している。

第7章では、本研究で得られた結果がまとめられている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、柔軟構造物の直接には計測できない物理パラメータを間接的に得たダイナミックなデータを用いてそれらを求める同定アルゴリズムの構成法を確立したものであり、その有効性をシミュレーションと実験を通して検証している。

本論文で提案されたソフトセンサーを用いて構造物の未知物理パラメータを同定することが可能となり、それによって構造物の特性を正確に把握でき、さらにより高精度な構造物の制御器設計に貢献することができる。非破壊的かつ非接触的手段で得られる振動計測データから構造物の直接には計測不可能な物理パラメータを求める有効な手段を確立したことは工学上意義があり、応用範囲は広い。

以上により本論文内容は学術性と実用性の両面を備えており、本論文を学位論文としての水準を満していると判断した。

なお、本論文の内容は以下の、レフリー制のある学術論文誌、国際会議録および著書にすでに公表されている。

1．N. Nakano, A. Shintani, and A. Ohsumi: Identification of Spatially-varying Physical Parameters Involved with Flexible Beams, *Proceedings of the 2nd World Conference on Structural Control* (Eds: T. Kobori, et al.), vol.3, John Wiley, New York, June, pp.2241-2248, 1998.

2. A. Ohsumi, N. Nakano, A. Shintani, and N. Ohse: Identification of Physical Parameters in Structure Models, *Proceedings of the 3rd Asia-Pacific Conference on Control & Measurement, (APCCM '98)*, Dnhuang, China, August, pp.53-57, 1998.

3. A. Ohsumi, N. Nakano, and A. Shintani: Identification of Spatially-invariant/varying Physical Parameters of Dynamic Beams, *Proceedings of the 3rd Japan-Central Europe Joint Workshop on Modeling and Simulation of Non-Linear Engineering Systems and Related Phenomena*, Bratislava, Slovakia, September, pp.335-338, 1998.

4. N. Nakano, A. Osumi, A. Shintani, and K. Yoshida: Identification of Physical Parameters of Flexble Beams Uslng On-line Algorlthm, *Proceedings of the 15th World Congress of International Measurement Confederation (IMEKO-XV)*, Osaka, June, vol 5, pp.131-138, 1999.

5. N. Nakano, A. Osumi, and A. Shintani: Algorithms for Identification of Spatially Varying/Invariant Stiffness and Dampings in Flexble Beams, in *Inverse Problems and Related Topics* (Eds. G. Nakamura, et al.), Chapman & Hall/CRC, London, February, pp.97-113, 2000.

6. 中野統英・新谷篤彦・大住晃：振動計測データを用いた片持ちはりの物理パラメータの同定，日本機械学会論文集（C編）、vol.66, no.643, pp.744-752, 2000.

7. 中野統英・大住　晃・芳田勝史：雑音の影響を受けた振動データに基づく片持ちはりの物理パラメータの同定、日本機械学会論文集（C編），vol.67, no.653, pp.43-50, 2001.