

機関番号：12608

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560213

研究課題名 (和文) 革新的機械構造物特性同定法の開発

研究課題名 (英文) Innovative identification of mechanical structures

研究代表者

大熊 政明 (OKUMA MASAOKI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：60160454

研究成果の概要 (和文)：

第1に、機械の動特性を把握するための振動試験において最適な加振点の探索から必要最小限の追加測定点の示唆などを行うインテリジェントナビゲータの研究を実施し、理論的研究および適用事例研究にてその有効性を確認でき、動特性同定法との融合化によりの確な動特性同定の信頼性と精度を向上させた。第2に、動特性とともに重要な剛体特性同定については、従来の方法よりも格段に高精度な誤差1%以下となる同定が可能で、実工程的にもほぼ自動化ができる新しいアルゴリズムを開発でき、実際にプロトタイプのプロトタイプシステムを具体的に開発して基礎検証計測によって検証した。

研究成果の概要 (英文)：

The first successful result is the development of a newly innovative intelligent navigator system that can inform the best excitation point on test structure in vibration testing with the minimum effort of additional measurement. The testing is very important to find out the dynamic characteristics of mechanical structures. The reliability and accuracy of structural dynamics identification has been improved by integration of the navigator, modal testing and identification methods. The second successful result is the invention of a new algorithm for rigid-body property identification which is also very important as well as dynamic property. The invention has remarkably improved the identification accuracy. A prototype system was developed and the accuracy improvement was verified.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、機械力学・制御

キーワード：振動解析・試験、振動学、動的設計、運動力学、運動制御、実験同定法

## 1. 研究開始当初の背景

高速精密位置決め運動機構の機械や高速移動体の開発においてそれらの運動性能を

安定性、高速性、安全性や信頼性および静粛性や快適性を満足させながら最大化するためには構造動力学の観点での機械性能を高

めることが最重要である。システムチックな設計開発支援を支える工学技術の中に、様々な複雑形状や構造の実機機械の剛体運動特性と構造振動特性を実験的にモデル化同定するための研究がある。ところが、剛体運動特性と構造振動特性を実験的に適切な自由度で統一的にモデル化表現できる同定法が望まれているが、現在までのところ、本研究に繋がる本申請者のこれまでの独自研究以外にはそのような統一モデル化同定の手法は、一時期米国大学での研究実施はあったものの、実現されておらず、別々の同定として研究されてきている。そのために、実験計測方法から同定解析までかなり煩雑な工程をそれぞれ個別に行う必要があり、その同定結果を設計支援解析に利用するときにも様々な制限をうける場合がある。

本申請者は、実験的に統一モデル化同定を行う基礎技術として独創的な実験的特性行列同定法をすでに提案して研究を続けてきた。この手法は、単点加振多点応答計測の周波数応答関数から全測定点自由度に対応した自由度を持つ質量行列、減衰行列および剛性行列を同定し、静力学特性は剛性行列に、動力学的剛体特性については質量行列、構造動特性（振動特性）については質量行列、減衰行列および剛性行列を組み合わせた運動方程式として統一的に表現できる基礎を築き上げた。それに関する研究論文の一例としては、

・Masaaki Okuma, Ward Heylen, Hisayoshi Matsuoka and Paul Sas, "Identification and Prediction of Frame Structure Dynamics by Spatial Matrix Identification Method", Transactions of ASME, Journal of Acoustics and Vibration, Vol. 123 pp. 390-394, 2001. がある。この手法を中心に置いて次のように独創的および革新的にさらに発展させる研究をすることによって、工学的実用性を拡大したモデル化同定法として発展させることが本研究の目的であり、工学の学術発展と産業界における革新的性能の機械設計における強力な支援解析技術の一翼を担う革新的基盤工学技術として工業的および工学的に重要と考えられ本研究を遂行する構想が研究背景である。

## 2. 研究の目的

本研究は、振動試験で得る周波数応答関数と測定点座標データを基本入力データとして用いて実験的に機械や機械部品の構造力学特性である静剛性特性、剛体特性さらには動特性までを統一的にモデル化同定する革新的同定法を開発することを目的とした研究である。この同定法は、特性行列の形式の非常にコンパクトな表現で結果をデータベース化することができ、設計解析上任意に設定

したい様々な境界条件での静剛性解析から応力歪解析、剛体特性解析、各種振動解析（固有値解析、強制振動解析、構造変更解析、部分構造合成解析、Squeal Noise 解析、制振制御設計解析など）、さらには運動制御シミュレーションにまで、幅広く利用可能である構造力学特性を同定するものである。実験的に特性行列の形式で構造力学特性を統一的にモデル化同定する本研究の方法と類似のものはまだ世界的に無く、本研究は独創的で革新的な同定法の開発研究であると考えられる。この同定理論の構築は構造力学における同定技術を飛躍的に発展させ、機械振動・騒音、精密高速運動制御、構造安全・信頼性などに関する幅広い機械設計の統一支援解析に大いに貢献できると考えられる。

具体的に本研究の独創的研究目的は次のとおりである。

(1) 振動試験法のインテリジェント化：複雑な構造・形状の実機機械や機械構造部品の周波数応答関数を得るための振動試験技術について、本申請者が今までに実績を積んできた振動学の理論と実践に基づく試験技術の研究成果をインテリジェントナビゲーターシステムとして組み込んだ振動試験システムを開発することで、だれでもスピーディーに精度の良い実験データを得ることができる革新的システムを開発する。この振動試験システムのインテリジェントナビゲーターの指示に従って振動試験を実施することで、局所共振の発生する実機機械対象物や複雑な構造の実機機械の周波数応答関数を、適切な加振点の探索などに苦勞することなく、高精度かつ短時間で得ることができるようにする。

(2) 力学原理に基づく制約条件を自動生成：多自由度系モデルの運動方程式は質量行列、減衰行列、剛性行列を係数行列とした運動方程式で記述されるのが基本である。本研究では、運動量保存則や剛体運動の力学原理に基づいた力学法則の数学表現から同定法に利用できる必要十分な制約条件を自動生成して本件球により実験的に質量行列、減衰行列および剛性行列を同定できるようにする。

(3) 同定法に最適な最適化法エンジンの開発：古典的各種最適化法から現代に提案されたヒューリスティックな最適化法までを精査し、数理的にアルゴリズム改良研究を行い、本同定法の中の最適化プロセスに用いる最適化法アルゴリズムを最高性能にする。

(4) 仮想測定点設定の概念の導入：実測定点間の構造結合状態に基づく幾何学および力学演算によって実際に設定された測定点間に仮想的に自由度を同定アルゴリズム中において自動生成して、利用価値の最大化をねらった自由度へ自動変更して、合理的なスパー行列として質量行列、減衰行列、剛性行

列の形式でモデル化同定を実現する。

### 3. 研究の方法

その研究目的のために本研究では次の開発研究を行った。

- (1)インテリジェントナビゲータの研究
- (2)仮想測定点の概念の導入の研究
- (3)最適化エンジンの研究
- (4)同定法の全体のシステム化

振動試験におけるインテリジェントナビゲータシステム開発から始まり、特性行列の形式の非常にコンパクトな表現で機械構造物特性結果をデータベース化する方法論を展開し、設計解析上任意に設定したい様々な境界条件での静剛性解析から応力歪解析、剛体特性解析、各種振動解析（固有値解析、強制振動解析、構造変更解析、部分構造合成解析、Squeal Noise 解析、制振制御設計解析など）、さらには運動制御シミュレーションにまで、幅広く利用可能である構造力学特性を同定する新しいシステム化手法を開発した。実験的に特性行列の形式で構造力学特性を统一的にモデル化同定する本研究の方法と類似のものはまだ世界的に無く、本研究はひじょうに独創的で革新的な同定法の開発研究であると考えられる。

本研究は、基本的に申請者の単独研究として研究目的の項に述べた具体的研究活動課題に全責任をもって取り組んだが、教育を含めての研究協力者として申請者研究室所属の大学院生であった Robert Kloeppe (博士後期課程, ドイツからの留学生), Sara Shayanamin (修士課程, イランからの留学生, 博士進学希望) および姜範錫 (修士課程, 韓国からの留学生, 博士進学希望) の3名の研究協力を得て実施した。全員が同一の研究室所属であるので、研究協力者の学生たちとブレイン・ストーミング(brainstorming)と進捗報告、技術課題解決のためのミーティングを自由自在にかつ頻繁に持つことができた考える。

### 4. 研究成果

機械の動特性を把握するための振動試験において最適な加振点の探索から必要最小限の追加測定点の示唆などを行うインテリジェントナビゲータの研究を実施し、理論的研究および適用事例研究にてその有効性を確認できた。すなわち、振動試験現場で初期設定の加振点でのFRF計測から同定困難または測定から欠落する次数のモードをスピーディーに探索して、必要最小限の追加加振点とその最適な場所を教示できるアルゴリズムを開発し、その有効性を基礎的適用事例実験にて明らかにした。

その成果を利用した適用事例研究の1例と

して、機械振動騒音で古くから問題視されているスクイーズ騒音発生の有無とその卓越周波数成分を予測する技術確立に向けた研究を計画通りに実施し論文および著書として発表できた。スクイーズ騒音の発生の有無を予測することは現在まで技術的にたいへん難しいと認識されている。

動特性とともに機械設計や安全管理で重要な剛体特性同定については、従来方法よりも格段に高精度な同定が可能で、実工程的にもほぼ自動化ができる新しいアルゴリズムを開発することができた。すなわち、疑似周辺自由となる柔軟支持境界条件を既知化してアルゴリズムに精密に組み込むことを行い、最適化法で同定することで測定誤差はほぼ1%以下となる高精度同定を実現できた。実際にプロトタイプのプロトタイプ計測システムを具体的に開発して基礎検証計測によって確認した。

同定法中に利用する最適化アルゴリズム（非線形最適化）の飛躍的性能向上に関する研究では、剛体特性についての同定法ではその物理的な性質に依存して満足する結果を得たが、動特性まで一括同定する実験的特性行列同定法に組み込む手法としてはまだ理想（究極）には至っていないと考える。この技術課題は数理工学的にもひじょうに有意義な課題であることを新たに見出しており、近い将来の確立を目指したい。

結論としての成果は以下のとおりである。機械の動特性を把握するための振動試験において最適な加振点の探索から必要最小限の追加測定点の示唆などを行うインテリジェントナビゲータの研究を実施し、理論的研究および適用事例研究にてその有効性を確認でき、動特性同定法との融合化によりの確かな動特性同定の信頼性と精度を向上させた。

動特性とともに重要な剛体特性同定については、従来方法よりも格段に高精度な誤差1%以下となる同定が可能で、実工程的にもほぼ自動化ができる新しいアルゴリズムを開発でき、実際にプロトタイプのプロトタイプ計測システムを具体的に開発して基礎検証計測によって検証した。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

① Robert Kloeppe、大熊政明、Experimental identification of rigid body inertia properties using single-rotor unbalance excitation、Proceedings of IMechE, Part K: J. Multi-Body Dynamics、223 (K4) 巻、2009年、293-308頁、査読有

②Robert Kloepper、大熊政明、Elimination of Bias Errors Due to Suspension Effects in FRF-Based Rigid Body Properties Identification、ASME Transaction, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control、131-4 巻、2009 年、041005 より 10 頁、査読有

③ 大熊政明、Low Frequency Noise and Vibration Analysis of Boat Based on Experiment-Based Substructure Modeling and Synthesis、Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics、44 巻Springer、2009 年、203-214 頁、査読有

④Meifal RUSLI、大熊政明、Squeal Noise Prediction in Dry Contact Sliding Systems by Means of Experimental Spatial Matrix Identification、JSME International Journal of System Design and Dynamics、2-2 巻、2008 年、査読有

[学会発表] (計 11 件)

① 大熊政明、Importance of rigid-body property identification、1<sup>st</sup> International Conference on Mechanical Engineering、2010 年 10 月 20 日、タイ

②秋田啓仁、Robert Kloepper、寺田聖一、中園利之、坂本啓、大熊政明、高精度な剛体特定同定法の開発に関する研究、日本機械学会機械力学計測制御部門講演会 2010、2010 年 9 月 14 日、日本

③ 大熊政明、Sara Shayan Amin、A Straightforward Algorithm for the Acquisition of Appropriate set of FRFs by Hammering Test for Modal Analysis、2<sup>nd</sup> International conference on Vibro-Impact Systems、2010 年 1 月 6 日、中国

④大熊政明、Old but Still Hot Research: Rigid-body Property Identification and Squeal Noise Prediction、2<sup>nd</sup> International conference on Vibro-Impact Systems、2010 年 1 月 6 日、中国

⑤Robert Kloepper、坂本啓、大熊政明、Experimental identification of rigid body inertia properties using low-frequency unbalance excitation. In Proc. 50th ASME Structural Dynamics Conference、2009 年 5 月 7 日、アメリカ

[図書] (計 3 件)

①Meifal RUSLI、大熊政明、VDM Verlag、Squeal Noise Analysis in Mechanical Structure with Friction-Prediction by Experiment-based Method of Structural Analysis、2010 年、92 頁

②大熊政明、数理工学社、新・演習 工業力学、2010 年、178 頁

③Raouf A. Ibrahim, Vladimir I. Babitsky、大熊政明、Springer、Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics, Vol. 44、2009 年、288 頁

[その他]

ホームページ等

<http://www.mech.titech.ac.jp/~dosekkei/kuma/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大熊 政明 (OKUMA MASA AKI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：6 0 1 6 0 4 5 4

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：