

報告番号 ※ 甲 第 2637号

# 主論文の要旨

題名

非線形連続系の同定法に関する研究



氏名 神谷 恵輔

# 主論文の要旨

報告番号	※甲第	号	氏名	神谷恵輔
<p>近年、大型構造物から電子機器に至る各種機械、構造物は、性能向上のために高速化、軽量化の傾向が著しい。これに加えて耐久性・安全性の向上、振動・騒音の低減なども同時に要求されている。このような高度化した要求に対処するため、実働時における機械や構造物の動的挙動を設計の段階で正確に予測することが必要不可欠となっており、対象物の動特性を表現する数学モデルを構成する、いわゆる同定の精度向上が大きな課題となっている。</p> <p>同定のための手段として、有限要素法や境界要素法などの解析的な方法があるが、これらの方法は動的問題、特に減衰が大きい影響を持つ動的挙動の問題に対しては必ずしも有力な手段とはなり得ていない。そこでこの欠点を補うための手段として、実験データから対象とする系の同定を行う実験モード解析法と呼ばれる手法が登場してきた。この手法は、振動計測技術と高速フーリエ変換(FFT)などのデータ処理技術の進歩を背景にして実用化の域に達し、今日では、航空機、自動車、工作機械、磁気ディスクなど多くの機械や構造物の解析、設計に応用されている。</p> <p>現在のモード解析法は、対象とする系が線形系であるという仮定のもとに成り立っている。ところが実際の機械や構造物には、大変形、がた、クーロン摩擦、材料特性などに起因する非線形性がしばしば見られる。このような系に通常の実験モード解析法を適用しても、得られるモデルは実際の系の動特性を表現するモデルとしては不十分であり、それから得られる応答予測も誤差を含むことになる。このため機械や構造物の使用条件が厳しい先端的な分野では、系を実際の姿に近い非線形系として取り扱うことが重要な課題となってきている。最近、このようなことを考慮して、非線形振動系の同定法に関する研究が国内外の多くの研究者によって試みられ、多数の報告がなされている。</p> <p>しかしながら、それらの報告に見られる同定法のほとんどは一自由度系もしくは多自由度系を対象とした同定法である。実際の機械や構造物は一自由度系や多自由度系と見なせるようなものばかりではなく、連続系として取り扱う必要のあるものが多い。また一自由度系や多自由度系と見なし得るようなものであっても厳密には</p>				

# 主論文の要旨

報告番号	※甲第	号	氏名	神谷恵輔
<p>連続系である。このように、非線形連続系の同定法は実用的には極めて重要な技術でありながら、振動の分野においてはこの研究に関する報告は見あたらない。制御の分野では、非線形連続系の同定法に関する研究報告は見られるが、そこで提案されている同定法は制御を目的としたものであるため、振動の分野の問題にそのまま利用することは困難であると思われる。</p> <p>そこで本研究では、非線形連続系の同定法を開発するための基礎的な検討を目的として非線形連続系の簡単な例を取り上げて、その同定法を提案する。</p> <p>本論文の第2章で、非線形連続系のもっとも簡単な例である両端単純支持の一様なはりを取り上げてその同定法を提案する。このはりは大きな振幅で振動するとき、その張力が振幅によって変化するため非線形振動系となる。このような非線形連続系の振動解析において、未知量であるたわみを、対象とする系に対応する線形非減衰系のモード関数とモード座標と呼ばれる時間の関数の積の級数の形に変数変換し、モード関数の直交性を利用して非線形偏微分方程式で記述される運動方程式をモード方程式と呼ばれる常微分方程式に変換するという手法がよく用いられる。本研究ではこの解析手法に基づき、たわみと外力の振動データからモード方程式を定めるという考え方で非線形はりの同定法を提案する。提案する同定法の主な手順は、①はりに周期外力を作用させ、いくつかの測定点において定常状態のたわみ振動と外力を測定する。②測定したたわみの振動データと外力データから、モード座標とモード毎の外力を求める。③得られたモード座標とモード毎の外力データから、ハーモニクバランスの原理に基づいてモード方程式の未知パラメータを定める、の3つである。ただし提案する同定法ではモード関数は既知であるという条件が必要である。ここで取り上げている一様なはりの場合にはモード関数は解析的に容易に求められるもので、提案する同定法ではこれを利用する。提案した同定法の有効性を検討するため数値シミュレーションを行い、提案した方法で一様な非線形はりが精度よく同定できることを示した。</p> <p>第3章では、一様とは限らない一般のはりを対象として、提案した同定法の一般</p>				

# 主論文の要旨

報告番号	※甲第	号	氏名	神谷恵輔
<p>化を行う。第2章で提案した同定法では対象とするはりに対応する線形はりのモード関数が既知であるという条件が必要がある。しかし非一様なはりの場合にはモード関数を解析的に求めることは一般に困難である。そこで有限要素法や通常のモード解析と組み合わせ、数値的あるいは実験的に求めたモード関数を用いて非一様なはりを同定する方法を提案する。ここでは有限要素法によってモード関数を求める場合を示す。提案した同定法の有効性を数値シミュレーションによって検討し、提案した方法で非一様なはりを精度よく同定できることを示した。</p> <p>第4章では、第2章および第3章で提案した非線形はりの同定法を実際のはりに適用し、同定実験を行った。その結果、得られた同定結果は実験データをよく再現すること、同定に用いた外力と異なる外力に対する応答をもよく予測し得ることを確かめ、提案した同定法は実際に実験データを用いる場合にも適用可能であることを明らかにした。また同定に用いたデータとは異なる振動が発生する場合にはその予測はやや精度が悪いことも示した。</p> <p>第5章では、二次元の非線形連続系である非線形板を取り上げてその同定法を提案する。非線形板の場合、運動方程式が連立非線形偏微分方程式となる。ここでは例として長方形板と円板を取り上げ、対応する線形非減衰板のモード関数を用いて未知量を変数変換すれば、これらの場合にも連立非線形偏微分方程式で記述される運動方程式を常微分方程式であるモード方程式に変換できることを示す。そして非線形はりの場合と同様に、周期外力に対する定常状態のたわみの振動データからモード座標を求め、ハーモニクバランスの原理に基づいてモード方程式の未知パラメータを定める方法を提案する。提案した方法に従って数値シミュレーションを行い、提案した方法で長方形と円形の非線形板が精度よく同定できることを示した。</p> <p>第6章では、第2章から第5章までに提案した同定法が必要とする、対象とする系に対応する線形系のモード関数が既知であるという前提条件を取り除いた同定法を提案する。第2章から第5章で提案した同定法ではあらかじめ解析的、数値的あるいは実験的に線形のモード関数を求めておく必要があった。しかしながら実用性</p>				

# 主論文の要旨

報告番号	※甲第	号	氏名	神谷恵輔
<p>を考えれば、対象とする系のもつ非線形性の影響を受けた実験データのみから一連の手順で同定できることが望ましい。そこで、ここではモード関数が未知の場合でも同定が可能な同定法を提案する。提案する方法は、線形系に対する実験モード解析法においてVold, H. とLeuridan, J. が提案した方法を応用して、いくつかの測定点において測定した定常状態の振動データからその振動データに大きく寄与する成分を取り出し、この成分に関する方程式の未知パラメータをハーモニックバランスの原理に基づいて定めるものである。提案した方法の有効性を検討するため、非線形はりおよび長方形と円形の非線形板を取り上げて数値シミュレーションを行い、提案した方法でこれらの非線形連続系が精度よく同定できることを示した。</p> <p>第7章では、統計的手法を導入して、比較的大きなノイズを含むデータに対しても精度のよい同定結果が得られるように改良した同定法を提案する。第2章から第6章までに提案した非線形連続系の同定法は、ハーモニックバランスの原理に基づいて系の運動を決定する方程式の未知パラメータを定める方法であった。ところがこの方法では、測定データに含まれるノイズが大きくなるにしたがって同定精度が急速に悪化することがわかった。そこでここでは、統計的手法を導入してロバスト性を高めた同定法を提案する。提案する方法は、測定データは混入するノイズのため確率的に得られると仮定し、その確率密度を最大にするような測定データの真の値と運動方程式の未知パラメータを求める方法である。ここでは基礎的な検討を目的として、同定の対象を多自由度非線形系とし、測定データに含まれるノイズは正規分布に従う偶然誤差であるとした。提案した手法の有効性を検討するため、いくつかの代表的な多自由度系を取り上げ、数値的に求めた振動データにノイズを加えたデータを実験データと見なし、提案した方法に従って同定を行った。その結果、ここで提案した同定法は比較的大きなノイズを含む測定データに対しても精度のよい同定結果が得られることを示した。</p>				