

氏 名	カ 何 シン ソウ 信 宗
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 1986 号
学位授与の日付	平 成 12 年 9 月 25 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 学 研 究 科 精 密 工 学 専 攻
学位論文題目	圧電素子による機械構造物の振動制御

論文調査委員 (主 査) 教 授 松 久 寛 教 授 垣 野 義 昭 教 授 久 保 愛 三

論 文 内 容 の 要 旨

圧電素子をアクチュエータおよびセンサとして利用し、機械構造物の低振動化、低騒音化を軽量、小型な装置で実現しようというのが本研究の目的である。本研究で行った圧電素子による電気系と機械系を結合したメカトロニクスの特性解明と、受動制振、能動制振、ハイブリッド制振の手法は基礎的かつ本質的な特性を明らかにしており、本論文で得られた技術は、光装置、精密計測と精密加工分野の微振動対策、宇宙構造物航空機の制振、遮音のための壁の振動制御などさまざまな応用領域に適用されうる。その内容の要旨を以下に記す。

第1章は緒論であり、研究の背景と目的を記している。

第2章では、圧電素子とはりの力学的な関係を解明し、圧電素子によるはりの曲げ振動の受動制振の解析を行い、その振動応答の計算法を定式化した。また、制振の重要なパラメータである装置結合係数、付加損失率、最適抵抗値を求める式を導いた。はりに電氣的減衰を付加する手法は電気回路設計と構造設計に分けられる。はりに電気減衰を付加し、系の損失率を大きくするには装置結合係数を大きくすればよい。また、装置結合係数を大きくするには、圧電素子の材料結合係数、圧電素子とはりのモードばね定数の比を大きくすればよい。なお、ここで求めた振動応答の計算法は電気抵抗だけではなく、任意の電気回路を圧電素子に結合した場合にも利用できる。

第3章では、圧電素子は機械系の材料特性と電気系の回路素子の特性を理解し効果的な受動制振を得るために、圧電素子・はり系の電気エネルギーと機械エネルギーとの転換メカニズムを解明し、電気機械結合系の力学モデルを数式で導き出した。

電気機械結合系の類似回路によって、外部電気回路を取り付けた圧電素子・はり系の考察を行うために、まず任意の電気回路に適用できる等価機械インピーダンスを導き出し、そして、この等価機械インピーダンスを利用して電気と機械の両回路からなる結合回路のモデルを作り、電気回路を繋いだ圧電素子・はり系の運動方程式を導出した。そして、この理論より、次のような実用上の知見を得た。すなわち、電気回路を繋いだ圧電素子による受動制振では、通常に市販されている電気回路部品を利用することが実用上重要である。この通常の電気回路部品を使用するには、電気機械転換係数を大きくする必要がある。また、この転換係数は圧電素子の静電容量、材料電気機械結合係数、圧電素子のモードばね定数からなる関数であり、この三つを大きくすればよい。特に、圧電素子の静電容量を大きくするには圧電素子同士を並列で接続すればよい。

二種類の実験装置を用いて、電気機械転換係数と最適抵抗値の関係を検討した。その結果は、理論解析結果と一致しており、電気機械結合系の類似回路の妥当性を実証している。

第4章では、受動制振、能動制振、センサレスの三つの方法を組み合わせたセルフセンシング・ハイブリッド制振を一次元一自由度のはりに適用した。受動制振は、電気回路の最適抵抗で系の振動エネルギーを受動的に最大消散させることによって制振効果を得る。また、二つの圧電素子で、ブリッジ回路によるセルフセンシング・アクチュエータを構成し、制御用の電圧信号をブリッジ回路から抽出する。したがって、制御系のセンサの必要がなくなる。このように、ブリッジ回路から

の信号を増幅して制御電圧として圧電素子に印加することによってセルフセンシング・ハイブリッド制御を実現する。また、このハイブリッド制振回路は、受動制振の最適抵抗を用いるために位相遅れを生じるが、一次移相回路によりそれを補償する方法を提案した。そして、これらをはりを使った実験で検証した。

この受動制振回路と能動制振回路が同時に存在するハイブリッド制振装置では、能動制振が作動しない場合でも受動制振効果が常に確保され、能動制振によってさらに大きな制振効果がもたらされる。また、圧電素子とハイブリッド制振回路を構造中に埋め込むことによって、軽量、低振動のインテリジェント構造が得られる。

第5章では、はりの複数モードを考慮し多自由度系とした場合のハイブリッド制振について論じている。まず抵抗回路を取り付ける圧電素子・はり系の運動方程式を導き出した。すなわち、ハミルトンの原理よりアクチュエータ方程式とセンサ方程式を求め、キルヒホッフの法則より圧電素子電極の電圧と制御電圧との電気関係式を求めた。そして、運動方程式を状態方程式に変換することによって各制御理論を適用した。また、このはりのハイブリッド制振を設計するにあたっては、系の受動制御では最適抵抗を採用し、能動制御は最適制御理論に基づいたLQレギュレータを採用した。したがって、系は最適抵抗により受動形の減衰付加が得られ、LQレギュレータの制御電圧を加えればさらに能動的な制振効果が得られる。

また、この多自由度のハイブリッド制御の電気回路は、最適抵抗と圧電素子コンデンサでローパス・フィルタを構成するので、高周波数領域の影響を抑えることができる。このローパス・フィルタの遮断周波数は最適抵抗と圧電素子の静電容量から決まる。例えば、はりの2次モードの最適抵抗を採用する場合には、2次モードの固有振動数がローパス・フィルタの遮断周波数となるので、3次モード以上の振動に対してスプルオーバを抑制できる。

第6章では、圧電素子による平板の制振とそれを利用した遮音板の能動制御について検討した。ここで、圧電素子を平板の振動制御のアクチュエータとして使用するために、周辺が固定された平板の振動モードと曲率を検討し、より大きな制御力を発揮する圧電素子の使用法について検討した。さらに、圧電素子を用いた平板の振動制御によるアクティブ遮音法として、速度フィードバックによる能動形減衰付加の振動制御法について検討した。ランダムな外乱に対して平板の振動制御が効果的に得られることを実験的に確認した。さらに、圧電素子による平板の振動制御によってランダム騒音源に対しても遮音性能の向上することを実験で検証した。

第7章は結論であり、本論文を総括している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、圧電素子の機械／電気変換機能を利用し、圧電素子を受動的な減衰付加のダンパ、能動的な振動制御のアクチュエータおよび振動センサとして利用して、セルフセンシング・ハイブリッド制振装置を構成し、機械構造物などの低振動化、低騒音化、軽量化、小型化を実現しようとするものであり、得られた成果の主たるものは以下のとおりである。

1. 圧電素子を受動制振装置として使うとして、圧電素子をはりに貼り付けた場合の力学的な関係を定式化した。また、圧電素子につないだ電気抵抗回路による減衰付加におけるはりの振動の損失率およびそのときの抵抗の最適値を求める式を導いた。
2. 電気機械結合系の相似関係を導き、電気系と機械系のエネルギーの変換を数式でもって解明し、質量、減衰、剛性の機械系構成要素とコイル、抵抗、コンデンサの電気回路構成要素の関係を明らかにした。そして、はりに貼った圧電素子にコイル、抵抗、コンデンサなどをつないだ場合の制振法について論じた。
3. はりの受動および能動のハイブリッド振動制御を提案した。アクチュエータとして利用している二つの圧電素子でブリッジ回路を構成して、能動制振におけるフィードバック信号を得るための振動を検出した。すなわち、圧電素子をセルフセンシングアクチュエータとして利用した。また、それを具体化した振動制御装置によるはりの制振実験で実用可能性を検証した。
4. 電気抵抗回路を繋いだ圧電素子・はり系の運動方程式から状態方程式を導き、主系が多自由度系の場合に適用できる最適制御理論を導いた。この理論を、複数モードを考慮したはりの制振に適用し、その有効性を検証した。
5. これまでの一次元構造物の制御理論を二次元に拡張し、板の制振に適用した。また同時に平板の遮音特性について検討した。板振動の速度フィードバックの能動制御により、各モードの板振動および透過音は10dBほど低減し、ランダムな騒

音源に対しても板振動および透過音は半減されることを実証した。

以上、本論文は、圧電素子の機械と電気エネルギーの変換機能を利用し、圧電素子を受動的な減衰付加のダンパ、能動的な振動制御のアクチュエータおよび振動センサとして利用し、機械構造物などの低振動化、低騒音化を小型、軽量の装置で実現する道を開くものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成12年8月11日、論文内容とそれに関連した事項について諮問を行った結果、合格と認めた。