

論文の内容の要旨

論文題目 圧電素子を用いた柔軟宇宙構造物の
準能動的制振手法の高度化

氏 名 養 父 拓 也

振動は様々な場面で宇宙ミッションの障害となる。ロケットの打ち上げ時には、搭載した衛星、探査機、ロケット搭載機器などは極めて過酷な振動環境に晒される。これらは、厳しい軽量化が求められるため、この過酷な振動環境に耐えるように設計することは必ずしも容易ではない。また、例えば極めて高い空間分解能の望遠鏡で天体を観測する天文衛星や地上を観測する地球観測衛星などでは、姿勢制御動作やモーメンタムホイール等からの微小擾乱により励起される振動が、微小な振動であっても観測の質を大きく低下させることがある。従って、これらの振動を抑制すること、即ち制振は、宇宙開発にとって極めて重要な課題の一つであり、宇宙ミッションの高度化に伴い、その重要性は益々高まっている。

制振の手法は、おおよそ能動的制振手法、受動的制振手法、準能動的制振手法の 3 種類に分類することができ、それぞれについて今まで多くの研究がなされている。能動的制振手法は、アクチュエイタの規模や必要となるエネルギーの量を問わなければ、受動的制振手法や準能動的制振手法と比較して非常に効果的である。しかし、制御系に不具合が生じた場合や、制御対象の数学モデルが不適切であった場合等により、系が不安定になる可能性がある。受動的制振手法は、粘性や摩擦、電気抵抗などの受動的なエネルギー散逸機構を用いる。外部より系にエネルギーを注入しないため、受動的制振手法を用いた系は常に安定である。しかしながら、その制振効果は能動的制振手法と比較すると低い。

準能動的制振手法とは、系が有する受動的なエネルギー散逸機構による振動エネルギーの散逸が極力大きくなるように制振対象の剛性や減衰特性等を制御するものである。従って、外部からのエネルギー注入はないので、能動的制振手法とは異なり、系は常に安定であり、且つ、受動的制振手法よりも高い制振性能が得られる。しかし、能動的制振手法と比較すると一般的には制振性能が低い。これを向上させる目的で、振動エネルギーを利用可能なエネルギーに変換・貯蔵し、これを制振に再利用するエネルギー回生型準能動的制振手法が提案された。本手法では、通常、振動エネルギーを利用しやすい電気エネルギーに変換する圧電素子が用いられており、数多くの研究がなされた結果、従来の準能動的制振手法より制振効

率が高いことが実証されただけでなく、複数の圧電素子を用いた選択的多モード制振を可能とするエネルギー回生型準能動的制振の制御則も提案されるに至っている。

これらの従来の研究を鑑みると、エネルギー回生型準能動的制振手法の理想形態は、(a)外部からのエネルギー供給を必要とせず、(b)多モード振動の選択的制振など高度な制御ロジックの実現が可能で、かつ、(c)可能な限りシンプルな制振システムの実現であると思われる。なぜなら、一般的に、宇宙機に搭載される種々のシステムには、果たすべき性能が高いだけでなく、限られたエネルギーリソースの消費を極力抑制することと高い信頼性が要求されるからである。

本論文では現状のエネルギー回生型準能動的制振手法を前述の理想形態に近づける為に2つの新しいアプローチを行った。第一の方法は制御ロジック回路駆動などの少量の外部電力は必要とするものの多モード制振能力を堅持したままで、センサを不要としたセルフセンシング法を確立するものであり、第二の方法は、多モード制振能力は諦める代わりに、圧電素子が発生する電力のみで動作する回路に制御機能を持たせることにより、外部からの電力供給が全く不要な制振システムを確立するものである。

現在、圧電素子を用いたエネルギー回生型準能動的制振は、制御対象となる構造物の変位・速度(以下、状態量と言う)に基づき、構造物に取り付けた複数の圧電素子のシャント回路の各スイッチを適切に切り替えることにより、多モード振動を制振するまでに至っている。本論文の第一の方法は、この制御に必要な構造物の状態量を、センサにより測定するのではなく、アクチュエイタとして用いられる各圧電素子をセンサとしても用いるセルフセンシングを行うことにより、センサを省略する手法である。この場合、本来、構造物の状態量は各圧電素子の電荷量とその端子間電圧の情報から求められるが、現実的には、各圧電素子の電荷量を計測することは困難である。そこで、構造物の状態量だけではなく圧電素子の電荷量をも含めた拡大状態量ベクトルを、圧電素子の端子間電圧の情報に基づいてカルマンフィルタにより推定する手法を考案した。カルマンフィルタの設計にあたっては、ここで前提としたシャント回路のスイッチ切り替えによるエネルギー回生型準能動的制振の場合には、スイッチ切り替え直後の極短時間を除き、圧電素子の電荷量が一定となる事実を利用し、その適用もこの期間に限る事により、本手法の実装を容易にした。圧電素子からシャント回路に電流が流れる極短時間は、直前の拡大状態量ベクトル値が正しいとの仮定の下、圧電素子の端子間電圧値を用いて状態量方程式を積分して拡大状態量ベクトルを求めた。

このセルフセンシング法が期待通りに作動することを確認するために、トラス構造物に対して単一モード振動及び多モード振動の制振シミュレーションを行った。その結果、本方法が正しく状態量を推定すること、及び、その推定値を用いた制御により、センサを用いた場合とほぼ同様に振動が抑制されることを確認した。次に単一モード振動の制振シミュレーションを用いて、圧電素子の圧電定数、等歪静電容量、剛性の変動に対する制振性能のロバスト性について検討を行った。その結果、最も感度が高い等歪静電容量について、

その値が 20%変化しても制振効果が 1.3 倍程度、悪化するに留まることが判明した。その値が 1%変化するのみで系が不安定化するとの報告すらある能動的制振のセルフセンシング法と比較して、本方法のロバスト性が極めて高いと結論づけた。また、実際のトラス構造物に対して単一モード制振実験と多モード制振実験を行い、本方法が現実の構造物に対しても予期した効果を示すことを実証すると共に、制振シミュレーションとの比較を行い、両者がよく一致していることを確認した。

準能動的制振手法では能動制御のようにアクチュエータの駆動に電力等のエネルギーの供給を要さない。しかし、制御のための情報を得るセンサや、制御ロジックの計算を行うプロセッサを用いれば、大きくはないにしても電力を必要とする。第一の手法により、センサを不要としてもプロセッサやスイッチの駆動電力は依然として必要である。この電力をも不要とすれば、系の簡略化のみでなく、保守の観点からも大きなメリットとなる。本論文の第二の方法は、この実現を目指したものである。

単一モード振動の制振を前提とする場合には、圧電素子の発生する電圧が正または負の極値となった時点でシャント回路のスイッチを切り替えることにより、エネルギー回生型準能動的制振が行われることが知られている。そこで第二の方法では、単一モード振動の制振を前提に、圧電素子が発生する電力のみによって駆動され、かつ上記のシャント回路のスイッチ切り替え動作を行う、アナログ回路を考案し、無電力制振系の実現を図った。提案したアナログ回路はピークホールド回路とコンパレータ回路により電圧の極値を検出し、半導体スイッチを駆動する簡単な制振回路である。

考案した制振回路の性能を確認するために、トラス構造物の制振実験を実施したところ、大振幅振動時には高い制振効果が得られるものの、振幅が微小となると制振効果が有意に低下することを確認した。この制振効果の低下は、使用した半導体のオフセット電圧やフォワード電圧などの閾値により生じることを明らかにすると共に、本手法を用いた制振系の設計の指針として、一定振幅の正弦波振動に対する本手法の制振効果を示す式を求め、それが実験結果と概ね一致することを示した。

更に、本制振系を過去に打ち上げられた人工衛星の構造モデルの制振実験と、ロケットフェアリングを模した供試体の音響低減実験に予備的に適用し、それぞれ有効に適用できる可能性を確認した。

以上のように、本研究では、宇宙構造物の制振に関して 2 つの新たな手法を考案し、その有効性を確認した。これらの手法はともにエネルギー回生型準能動的制振手法の理想形態の実現に向けたアプローチであり、その実現により得た知見は、今後、前述の理想形態の実現に資すると考えられる。同時にこれらは理想形態に一步近づいた制振手法を現時点で提供するものである。それぞれ前述の様な改善を目指したものであるため、適用対象に応じて選択されるべきものであり、両者が互いに相補い合うことにより、より優れたエネルギー回生型準能動的制振の適用範囲の拡大が達成できる。これにより、圧電素子を用いたエネルギー回生型準能動的制振手法の適用の柔軟性と範囲を大きく改善することが出来た。