

平成 27 年 5 月 26 日現在

機関番号：37102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23760210

研究課題名(和文) エネルギー回生アクティブ振動制御に適した制御器の開発

研究課題名(英文) Development of controllers suitable for energy regenerative active vibration control systems

研究代表者

中原 健志 (Nakahara, Takeshi)

九州産業大学・工学部・准教授

研究者番号：00334516

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：アクティブ振動制御用の従来の制御器設計では、振動抑制性能と制御入力の大さのトレードオフの下で最適化を考えることが多い。しかし、これは制御系による継続的なエネルギー消費を前提とした考えであり、制御対象となる振動系から取り除いたエネルギーを回生できる系に対しては適切でない。そこで、本課題ではエネルギー回生アクティブ振動制御系に適した制御器の設計問題を制御入力の飽和とエネルギー収支という2つの制約条件の下で制御性能を最大化する問題と考え、これに沿った制御器として適応ゲインモード制御器と調和入力を用いたモデル予測制御器の2つを提案した。そして、これらの基礎的有効性を数値シミュレーションにより示した。

研究成果の概要(英文)：Conventional controller design problems for active vibration control are often treated as trade-off problems between vibration suppression performance and control input amplitude. This idea is based on an assumption that active vibration control systems consume power continuously and the assumption is not suitable for vibration control systems which can regenerate power removed from the controlled systems. Therefore, the conventional approaches are not suitable for the energy regenerative systems.

In this study, the controller design problems suitable for the energy regenerative systems are treated as optimization problems that maximize vibration suppression performance under the following two constraints. The constraints are saturation prevention and balance of regenerated and loss power. Adaptive gain modal controller and model predictive controller using harmonic input are proposed for the novel problems and the basic validity is shown by numerical simulations.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：エネルギー回生アクティブ振動制御 モード制御 ゲイン適応 モデル予測制御 D級増幅器 圧電アクチュエータ

## 1. 研究開始当初の背景

機械構造物の振動を抑制するための振動制御手法は、大きく分類するとパッシブ、セミアクティブ、アクティブの3つに分類できる。パッシブ制御は、バネやダンパなど外部からのエネルギーを必要としない要素の組み合わせにより振動を抑制する手法であり、構造が簡単で常に安定性が保障されることがメリットである。アクティブ制御は、外部からのエネルギーで駆動される電磁アクチュエータや圧電アクチュエータなどを用いて振動を抑制する手法であり、一般にパッシブ制御よりも高い振動抑制効果を得ることができる。しかし、外部からのエネルギーを使用するため、安定性に注意する必要があるとともに、制御のためのエネルギー消費が問題と考えられてきた。セミアクティブ制御は、パッシブ制御同様にバネやダンパなど外部からのエネルギーを必要としない要素を使用するが、これらの特性を可変とすることで振動抑制効果の向上を図った手法である。この手法はアクティブ制御に比べると一般に性能が劣るものの、外部からのエネルギー供給が必要なく安定性の問題も少ないことから、アクティブ制御よりも実用化しやすい手法である。

以上が振動制御手法に関する概観であり、アクティブ制御が一般的に最も優れた振動抑制効果を持っているが、エネルギー消費や安定性の問題等が幅広い実用化を図る上での阻害要因であることが分かる。しかし、アクティブ振動制御の問題であると考えられてきたエネルギー消費は、振動制御をエネルギーの観点で捉えると必ずしも本質的な問題ではないことが分かる。振動現象は振動系内の弾性エネルギーと運動エネルギーの循環現象であり、振動の振幅が大きいほど循環するエネルギーの大きさも大きくなる。したがって、振動を抑制するためには振動系内で循環しているエネルギーを何らかの方法で外部に取り出して振動系内のエネルギーを減らす必要がある。アクティブ振動制御の場合には各種アクチュエータが振動系からエネルギーを回収していると考えられ、振動抑制のために外部からのエネルギーを消費するという従来の認識とはエネルギーバランスの点で矛盾が生じる。本課題の研究代表者は、この点に注目して研究を行い、

- アクティブ振動制御において外部から供給されて消費されるエネルギーは、振動制御そのものではなくアクチュエータ駆動用増幅器などの内部損失を補うために使用されている。
- 内部損失が小さい圧電アクチュエータとD級増幅器を組み合わせることにより、振動を抑制するために振動系から回収したエネルギーで内部損失を補い、外部からのエネルギーを継続的に消費することなくアクティブ振動制御を実現できる。

ということ解析、シミュレーション、実験により明らかにしている。この結果は、アクティブ振動制御に対する従来の認識を改めるだけでなく、エネルギー消費が問題という従来の認識を暗黙の前提とした制御器設計手法にも変革を迫っている。

従来から振動制御に用いられることの多いLQR、LQG、 $H_2$ 、 $H_\infty$ 制御では、制御入力の大さを制御性能とのトレードオフの中で抑制しようとしており、このように制御入力の大さを抑制する背景としては、

- エネルギー消費の抑制
  - 増幅器、アクチュエータの飽和の防止
- が考えられる。しかし、圧電アクチュエータとD級増幅器を組み合わせた系のように振動系のエネルギーを回生して利用可能な系では、大きな制御入力が必要でも大きなエネルギー消費を意味せず、単純に制御入力の大さを評価するだけでは不十分である。エネルギー回生を考慮した最適制御手法として、制御性能とのトレードオフの中で回生エネルギーを最大化しようとする研究も行われているが、振動制御において回生エネルギーは増幅器などの内部損失を補う量があれば十分であり最大化する必要は無く、場合によっては必要以上の回生エネルギーを得ようとして制御性能が悪化する可能性がある。また、増幅器、アクチュエータの飽和の防止については、線形制御の範囲では困難であり、飽和を評価関数の一部ではなく制約条件として考慮し、何らかの適応性をもつ制御器の使用が必須と考えられる。以上より、エネルギー回生アクティブ振動制御に適した制御器を得るためには、新たな制御問題の枠組みが必要なが分かる。

## 2. 研究の目的

上記の背景を踏まえて、本研究ではエネルギー回生アクティブ振動制御に適した理想的な制御器を、

- 少なくとも時間平均では回生エネルギーが増幅器等の損失よりも大きく、外部からの継続的なエネルギー供給を必要としない。
- 制御入力は増幅器やアクチュエータを飽和させない。

の2つの制約を満たす中で、制御性能を最大化するものであると考える。しかし、このような制御器の設計問題を一般的に解くことは極めて困難と考えられるので、本研究の段階では

- 制御器の構造を限定して(例：モード制御)、制約条件の下で限られたパラメータ(例：フィードバックゲイン)を設計する問題に対して解を見出す。
- エネルギー収支に関する制約条件の表現およびシミュレーションに必要なD級増幅器の損失モデルを作成する。
- 損失モデル作成の過程で得られる知見を活用してD級増幅器の損失低減を図

り、エネルギー回生アクティブ振動制御系の性能を向上させる。  
の3点を目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) D級増幅器の損失要因を含む制御対象のモデル作成

制御器の設計とシミュレーションによる検証のためには、D級増幅器の損失要因を含む制御対象のモデルが必要となるため、これを作成する。当初はD級増幅器を構成する各部品の損失をモデル化し、これを積み上げることでD級増幅器全体の損失モデルを作成することを考えていた。しかし、各部品の損失が予想以上に複雑であったため、半導体素子のスイッチング時に寄生容量により生じる損失を理論的に考察し、等価的な抵抗として簡易的にモデル化した。

#### (2) 制御器の設計と数値シミュレーションによる有効性の検証

得られたモデルに対して制御器を設計し、モデルと組み合わせてシミュレーションを行うことにより、制御器の基礎的な有効性を検証する。

#### (3) 実験による有効性の検証

数値シミュレーションにより基礎的な有効性が確認された制御器をデジタル制御装置に実装し、期待する性能が現実に得られるか確認する。

### 4. 研究成果

#### (1) 平成23年度

##### 適応ゲインフィードバック機構の提案とシミュレーションによる検討

ゲイン適応形モード制御器の基本となる1自由度系を対象とした適応ゲインフィードバック機構を提案し、数値シミュレーションにより、アクチュエータの飽和制約の範囲の中でフィードバックゲインを最大化できることを確認した。

(学会発表)

##### ゲイン適応形モード制御器の提案とシミュレーションによる検証

上記の1自由度系を対象とした適応ゲインフィードバック制御をモードごとのエネルギーに基づいた切り替え則と組み合わせることで多自由度系に拡張したゲイン適応形モード制御器を提案した。さらに、D級増幅器の損失を等価抵抗で表現した簡易モデルを対象として、ゲイン適応形モード制御器とコンデンサを電源とするD級増幅器を組み合わせることで、飽和およびエネルギー収支に関する制約条件を満たしながらフィードバックゲインを最大化する制御手法を提案し、シミュレーションにより基本的な有効性を確認した。この成果をまとめて平成24年10月の国際会議(MOVIC2012)で発表するための論文原稿を平成23年度中に作成し投稿した。

#### (2) 平成24年度

##### ゲイン適応形モード制御器のメカニズム

##### に関する理解の整理

平成23年度中に投稿した国際会議(MOVIC2012)の論文原稿に対する査読意見を踏まえて、ゲイン適応メカニズムに関する理解を整理し、修正原稿に反映させた(学会発表)。

##### モデル予測制御の適用の検討

本研究課題の1つのポイントである制約状況の考慮においてモデル予測制御が有効であることは従来研究の調査から把握していたが、計算負荷が大きいサンプリング周期の短い振動制御への適用は容易でないという印象があり、当初は検討の中心としていなかった。しかし、上述のMOVIC2012と合同開催されたアメリカ機械学会のDynamic Systems and Control Conference(DSCC2012)での特別講演から、近年のプロセッサの性能向上と計算アルゴリズムの高速化により、モデル予測制御がプラント制御のような遅いダイナミクスの問題だけでなく、運動や振動の制御といった速いダイナミクスの問題にも十分に適用できる段階にあることが分かった。これを踏まえて帰国後にモデル予測制御に関する学習と文献調査を深めた。

#### (3) 平成25年度

##### 調和入力を用いたモデル予測制御の提案とシミュレーションによる検証

モデル予測制御では時間ステップ毎に制約付最適化問題を解いて制御入力を求めるため、飽和などの制約条件を積極的に取り扱うことができるメリットの反面で、従来の制御手法と比較して計算負荷が大きくなるデメリットがある。このデメリットはマイクロプロセッサの高速化に伴い小さくなり、計算処理時間の面では運動や振動の制御といった速いダイナミクスの問題にも十分に適用できる段階になっている。しかし、エネルギー回生振動制御への適用を考えると、高速なマイクロプロセッサの使用は制御器の消費電力を増大させ、制御系全体でのエネルギー効率の低下につながるため、消費電力の小さい低速なマイクロプロセッサにも実装できるような計算負荷の小さい手法が望まれる。

この点を踏まえて、一般的なモデル予測制御手法をそのまま適用するのではなく、制御入力を調和関数の線形和と仮定することにより大幅に計算負荷を低減する手法を提案した。そして、この提案手法の有効性を検証するために1自由度系を対象としたシミュレーションを行い、アクチュエータを飽和させることなく振動を抑制できることを示した。また、この提案手法ではエネルギー収支に関する制約の考慮に必要なアクチュエータの平均回生パワーの予測が容易に得られることも示した(学会発表)。

#### (4) 平成26年度

##### 調和入力を用いたモデル予測制御での最適性の検証

前年度(平成25年度)に提案した調和入力を用いたモデル予測制御では、飽和制約の扱い

が調和入力の変幅の打ち切りというヒューリスティックな扱いであり、飽和制約時の制御入力の最適性に関する考察が不十分であった。この点を解決するため、制御性能の評価関数として振動系のエネルギーを用いた場合について、評価関数の等高線の形状から幾何学的に考察を行い、制御ホライズン長が固有周期の半周期の整数倍となる場合には、調和入力の変幅の打ち切りで得られる解が制約条件下での最適解となることを示した。(学会発表)

調和入力を用いたモデル予測制御での回生パワー予測精度の改善

調和入力を仮定したモデル予測制御器では、エネルギー収支に関する制約の考慮に必要なアクチュエータの平均回生パワーの予測が容易に得られるという優れた特性があるが、実際の回生パワーよりも予測が小さくなる傾向が見られた。その原因としては、予測の際に外乱入力を考慮していないことが考えられ、正弦波外乱モデルを予測のためのモデルに導入し、その状態をオブザーバにより推定することで外乱入力を考慮して予測精度の改善を図った。

(雑誌論文、学会発表)

(5) 今後の課題等

調和入力を用いたモデル予測制御では、本研究課題の目的であげた2つの制約条件の中でアクチュエータ飽和に関する制約条件しか考慮できておらず、得られた回生パワーの予測値とD級増幅器等の内部損失を比較して2つ目の制約条件であるエネルギー収支に関する制約条件も考慮することが今後の課題である。また、全ての検討が数値シミュレーションのみであり、当初に計画していた実験による検証はまだ実施できていない。今後、期待する性能が実際に得られるかを実験により検証する必要がある。

なお、当初の目的に含まれていた損失モデル作成時の知見に基づいたD級増幅器の損失低減については、損失モデルが簡易的な等価抵抗モデルにとどまったため、十分に行うことができなかった。

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 1件)

中原健志、藤本孝、エネルギー回生振動制御のための調和入力を用いたモデル予測制御器への外乱モデルの導入、日本機械学会論文集、査読有、Vol.81、No.824、2015、pp.1-16  
DOI:10.1299/transjsme.14-00545

[学会発表](計 5件)

中原健志、藤本孝、外乱モデルを含むモデル予測制御器を用いたエネルギー回生振動制御における回生パワーの予測、Dynamics and Design Conference 2014、2014年8月

26日~2014年8月29日、上智大学(東京都新宿区)

Takeshi NAKAHARA、Takashi FUJIMOTO、Model predictive controllers for energy regenerative active vibration control systems using piezoelectric actuators and class D amplifiers、The 12th International Conference on Motion and Vibration Control、2014年8月3日~2014年8月7日、札幌コンベンションセンター(北海道札幌市)

中原健志、藤本孝、調和入力を仮定した予測制御によるスマート構造のエネルギー回生振動制御、第13回「運動と振動の制御」シンポジウム、2013年8月27日~2013年8月30日、九州産業大学(福岡県福岡市)

Takeshi NAKAHARA、Simon Chesné、Luc Gaudillier、Takashi Fujimoto、Adaptive Gain Modal Control for Energy Regenerative Vibration Control Systems Using Piezoelectric Actuators and Class D Amplifiers、The 11th International Conference on Motion and Vibration Control、2012年10月17日~2012年10月19日、フォートローダーデール(アメリカ合衆国)

中原健志、吉田光宏、藤本孝、スマート構造の振動制御系の飽和防止のための適応ゲインフィードバック制御、Dynamics and Design Conference 2012、2012年9月18日~2012年9月21日、慶應義塾大学(神奈川県横浜市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中原健志 (NAKAHARA Takeshi)

九州産業大学・工学部機械工学科・准教授  
研究者番号：00334516