

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760204

研究課題名(和文)一般化仮想インピーダンス回路を用いたスマート制振

研究課題名(英文) Smart Vibration Suppression Using Generalized Virtual Impedance Circuit

研究代表者

高木 賢太郎 (Takagi, Kentaro)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：60392007

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：圧電素子や電磁アクチュエータを単一で利用しセンサレス制振を行うことを考え、回路(シャント回路)の開発とソフトウェア制御による高機能化について研究を行った。その結果、センサレスパラメータ推定手法の提案、仮想インピーダンス/アドミタンス回路の開発とそれらの特性の考察、非線形シャントコントローラや適応シャントコントローラの提案をすることができた。さらに、新しいアクチュエータであるIPMCについてもその駆動方法の検討や、イオン交換によるIPMCアクチュエータの変形量増大手法についても発見した。

研究成果の概要(英文)：This theme has studied a sensor-less damping method using piezoelectric actuators or electromagnetic actuators, especially aiming at developments of shunt circuits and proposals of advanced control laws. The obtained results include a new sensor-less parameter estimation technique, a comparison of synthetic impedance and synthetic admittance, and a proposal of a nonlinear shunt controller and an adaptive shunt controller. Furthermore, this study discusses a driving method of an IPMC, which is a relatively new actuator. A finding for obtaining large deformation of an IPMC by ion-exchange has been also reported.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械力学・制御

キーワード：機械力学・制御 スマート構造 振動制御 圧電素子 電磁アクチュエータ 高分子アクチュエータ

1. 研究開始当初の背景

スマート構造と呼ばれる研究分野において、PZT や PVdF といった圧電素子は振動制御のための代表的な材料として用いられている。スマート構造は航空宇宙分野のみならず身近な製品への適用も期待される概念であり、とくに昨今の省エネルギー化への要求のため軽量化が進む輸送機械(自動車、列車、航空機等)において振動制御ならびにノイズリダクションは今後必要不可欠な技術になると予想される。その際、制振デバイスを取り付けただけで動作し、コントローラの調整は不要であることが期待されている。

従来、圧電材料を用いた制振では、センサ用とアクチュエータ用の圧電素子をそれぞれ別々に用意し、制御器と増幅器を用いて振動制御を行うことが一般的であった。ところが近年、一片の圧電素子をセンサとしてもアクチュエータとしても同時に用いる手法が注目されている。センサとアクチュエータをひとつにできれば、制御の観点からはセンサ・アクチュエータの完全なコロケーションが実現され、また実用上の観点からはコストの削減にもつながる。そういった手法のひとつはセルフセンシングアクチュエーションと呼ばれる手法であり、もうひとつはシャントダンピングと呼ばれる手法である。図1はシャントダンピングの概念図を示しており、圧電素子に回路を取り付けることでエネルギーが消散されることを表している。とくに、シャントダンピング手法は圧電素子に適切な電気回路を取り付けるだけで効果を発揮するため、電気的エネルギーを機械的エネルギーを相互に変換できる圧電材料の特長を巧みに利用した制振手法といえる。通常のセルフセンシング手法で用いるブリッジ回路は不要である。海外では、SPIE Smart Structures といったスマート構造に関する会議や、雑誌では ASME Vib. and Acoust., J. Sound and Vib., Smart Mater. Struct. などにおいて研究が進んでいる。国内では、主に日本機械学会の講演会ならびに論文集において研究が進んでいる。

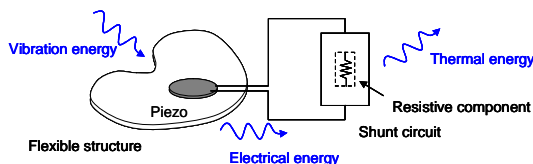


図1:シャント制振の概念図

2. 研究の目的

シャントダンピングで用いる外付けの電気回路を、シャント回路と呼ぶ。最も単純な回路は抵抗素子を用いる場合であるが、効果は小さい。そこで、適切に調整したインダク

タと抵抗を用いることで、特定の振動モードに大きな制振効果を与えられることが Hagood と von Flotow によってモデルと実験から示された。しかしながら、制振性能がパラメータ変化に対して敏感であり、調整がずれると制振効果がほとんどなくなるという問題が知られている。

研究代表者はこれまでに、シャントダンピングの高機能化をめざして、ロバスト性能指標による最適化や、スイッチングシャント回路の解析などに取り組んできた。また、シャント回路のインピーダンスを電圧源とアナログ演算器やデジタル計算機を用いておきかえ、インピーダンスを計算によって作り出す、いわゆる仮想インピーダンス回路の研究に取り組んできた。本研究課題はさらに一般化し、自動調整かつ、任意のトランスデューサーに適用可能な回路を目指すものである。

本研究は、大きく分けて次の3つの課題に取り組む。

・高精度センサレスパラメータ推定

これまでに、電気的なインピーダンス計測だけから、機械的パラメータ(固有角振動数、減衰比)、電気的パラメータ(モードキャパシタンス)、モード電気機械結合係数を周波数領域のデータから推定する手法を提案している。この手法を拡張し、オンラインで推定できるように、時間領域の最小2乗法等の適用を試みる。

・制御理論を用いた適応的仮想インピーダンスの設計

シャント回路のインピーダンスを自動調整するために、適応制御の導入を行う。1つ目の課題である、高精度センサレスパラメータ推定によって得られたパラメータを元に制御器を調整できると予想している。さらに、ロバスト性を得るための検討も行う。

・他のトランスデューサーへの適用

圧電素子は電気的エネルギーと機械的エネルギーを相互に変換するトランスデューサーの一種であり、圧電素子で得られた知見は他のトランスデューサーへ応用することが可能であると考えられる。本研究では、ボイスコイルモータや直流モータなどに代表される電磁アクチュエータを用いたエネルギー変換型制振へ、仮想インピーダンスを応用する。さらに、近年注目されている新しい材料、電場応答性高分子についても適用可能性を探る。

本研究の目的をまとめた図を、図2に示す。図は、(1)圧電素子に対して制振を行うこと、(2)ボイスコイルモータ、(3)電場応答性高分子へ適用すること、そして、一般化された仮想インピーダンス回路と制御アルゴリズムを設計することを示している。

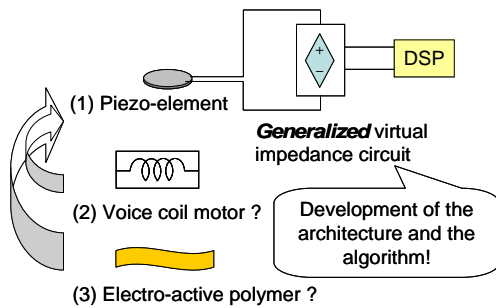


図 2：本研究の目的の概念図

3. 研究の方法

以下に、研究の目的に沿って、研究の方法を述べる。

・高精度センサレスパラメータ推定

単一の圧電素子をアクチュエータかつセンサとして同時に機能させた際のモデル化と、パラメータをオンラインで電気的インピーダンスだけから高精度に推定する手法を開発する。すでに、電気的なインピーダンス計測だけから、機械的パラメータ(固有角振動数, 減衰比), 電気的パラメータ(モードキャパシタンス), モード電気機械結合係数を周波数領域の最小 2 乗法によって推定する手法をこれまでに提案している。しかし、適切に推定が行われないことが実験から明らかになったため、その原因を明らかにして新たなモデルを構築するとともに、センサレス推定手法の開発を行う。また、この手法はインピーダンスアナライザを用いてオフラインで推定する方法のため、オンラインで推定できるように、時間領域の最小 2 乗法等の適用を試みる。

・制御理論を用いた適応的仮想インピーダンスの設計

デジタル制御された、仮想シャント回路を製作する。シャント回路の実現方法として、制御電圧源によってインピーダンスを実現する方法と、制御電流源によってアドミタンスを実現する方法がある。それぞれの特徴を比較し、どちらが適しているかについて検討を行う。また、これまでに接地型の回路について詳細が述べられた報告がない。そこで接地型回路を作製する。

制御アルゴリズムとして、いくつかの手法について検討を行う。ひとつは、従来研究がほとんど行われていない、非線形な手法を用いるものである。非線形なシャント回路を用いることで、従来の線形なシャント回路にはない特性によって、制振性能が向上する可能性がある。もうひとつは、適応制御理論に基づき、適応的に振動を抑制できるような制御系設計を行う。パラメータ推定によって求めた値をもとに、セルフチューニングレギュレータによる制御を目標とする。

実験では、仮想シャント回路を製作ならび

に圧電材を用いた制振を行い、有効性を確認する。従来の最適調整された LR 回路による制振結果と同等の制振効果が得られることを目標とする。

・他のトランスデューサへの適用

圧電素子との類推を用いて、電磁アクチュエータの場合に対してシャント制振の手法を拡張し、電磁アクチュエータに対応した仮想インピーダンス回路の製作を行う。また、安定余裕など、電磁アクチュエータを用いた場合のシステムの徴について調査する。

また、電場応答性高分子アクチュエータについて、手法の適用を拡大する。まず、電場応答性高分子の、電気機械変換特性のパラメータ推定が可能かどうかを駆動実験により確かめる。そして、さまざまなスマートトランスデューサに一般化された制振用シャント回路の開発を目指す。

4. 研究成果

・高精度センサレスパラメータ推定

単一の圧電素子をアクチュエータかつセンサとして同時に機能させた際のモデル化と、パラメータを電気的インピーダンスだけから高精度に推定する手法の開発を試みた。オンライン推定が可能な時間領域の推定手法を試みる前に、確認のため従来の周波数領域の手法で計測実験を行ったところ、従来手法では推定ができない場合があることが明らかになった。そのため、新たに電気的損失を考慮した圧電素子のモデル化を行い、周波数領域のパラメータ推定を行ったところ、提案する推定手法を用いたモデルの応答は実験結果によく適合する結果が得られた。提案手法は電気的計測のみに基づくため、センサが不要で任意の圧電素子や圧電構造物に適用ができるという特長をもっている。この成果は国内学会発表にて公表し、学術論文として投稿し、掲載された。

・制御理論を用いた適応的仮想インピーダンスの設計

仮想インピーダンスシャント回路と仮想アドミタンスシャント回路を製作した。お互いに似た回路であるが、その動きは逆の関係にある。それぞれの特徴を調査し、圧電素子への制振に適した回路と手法を明らかにすることができた。仮想アドミタンスでは電流制御アンプを用いるため、容量性負荷の駆動においてドリフト等の問題が生じる。従来では仮想アドミタンス回路はフローティングされた圧電素子にのみ適用されてきた。そこで、接地された圧電素子に使用できる回路を作製し、その具体的な回路を示した。さらに電流アンプを用いて容量性負荷を駆動する際に必要となるドリフト補償回路について、その物理的な解釈を等価電気回路を用いて示した。そして、開ループ伝達関数を用いて

安定余裕の解析を行うことを提案し、仮想アドミタンス回路を用いて直列 LR 回路を模擬した場合の系の特性について議論した。その結果、仮想アドミタンス回路の場合には安定余裕を確保しやすい特徴をもつ系であることを明らかになった。すなわち、提案する手法によって、任意の動特性をもった回路をソフトウェアによって創り出すことができ、たとえば非線形特性をもったシャント回路の実現も可能となる。この成果は国内学会発表を行い、国内学術誌に論文が掲載された。

仮想アドミタンス回路の応用として、従来ほとんど研究されていない非線形特性をもつシャント回路の実現可能性を調査した。とくに、オートパラメトリック吸振器と呼ばれる非線形動吸振器を模擬する手法を提案した。オートパラメトリック吸振器とは振り子式の動吸振器であり、非線形連成によって制振効果が現れる。制振効果は制振対象の固有振動数付近だけで現れるため、吸振器は他の周波数で影響を及ぼさないという利点がある。この新しい非線形シャント制振手法を提案する回路を用いて実装し、実験によって効果を確認した。この成果は国内学会発表を行い、論文投稿のための準備を行っている。

仮想アドミタンス回路にはこれまで電流アンプを用いていたが、負性キャパシタを実現する際などにはコントローラが厳密にプロパーにならないため、電荷アンプを用いると都合がよいと予想された。接地型電荷アンプを用いた仮想アドミタンス回路の作製ならびに負性キャパシタを用いたシャント回路の安定性について検討を行った。その結果、負性キャパシタを用いた場合には、従来の研究では無視されていた圧電素子の寄生抵抗の影響によって必ず不安定化する場合があります。そして、安定となる負性キャパシタには追加で負性抵抗が必要になることを明らかにした。これらの研究成果は国内学会と国際会議にて報告を行った。また、学術誌に論文投稿の準備を進めている。

そして最後に、シャント回路の適応化を目指して研究を行い、負性キャパシタと適応制御を組み合わせた新たな手法を開発した。提案手法はセルフチューニングレギュレータの枠組みに基づくものであり、学会発表と論文投稿に向けた準備を進めている。

・他のトランスデューサーへの適用

まず、電磁アクチュエータについて研究を行った。電磁アクチュエータのシャント制振のために、接地型仮想インピーダンス回路を設計、製作した。圧電素子に用いる回路と比較すると、大きな電流が流せるようにパワー OP アンプを用いるなど工夫を行った。また、系の特性について解析をおこない、新たに安定余裕についての知見を得た。R シャント回路と CR シャント回路では位相余裕は無限大であり、適切な設計によってロバストな制振

が可能である。この結果は国内学会発表を行うとともに、国内学術論文に掲載された。

また、電磁アクチュエータについては、アクチュエータのパラメータを推定する手法について研究を行い、圧電素子で得られている知見をもとにセンサを用いずにパラメータを推定する手法を開発した。この内容についても学会発表と論文投稿に向けた準備を進めている。

そして、電場応答性高分子のひとつである IPMC アクチュエータについては、PWM アンプを用いた駆動実験を行った。その際、電流が非常に流れるため、その電流を抑止する方法について研究を行い、成果を国際会議にて報告した。

最後に、IPMC アクチュエータについて、駆動中に銅電極から水中に溶け出した Cu イオン交換によってアクチュエータが大きく変形するという現象を発見した。これは振動制御に直接関連する成果ではないが、高分子アクチュエータの電気機械変換に関わる現象についての新たな知見であり、論文として成果を報告した。

・まとめ

本研究は、センサとしてもアクチュエータとしても同時に働く圧電素子を単一で利用し、取り付けただけですぐに動作して調整が不要な制振デバイス（電気電子回路とソフトウェアシステム）を実現することを目的とした。さらに、圧電素子のみならず、センサ（発電）機能を有している電磁アクチュエータに対するセンサレス制振や、電場応答性高分子といった新しいタイプのアクチュエータのひとつである IPMC の駆動に関する初期的な検討も行った。

成果として、センサレスパラメータ推定手法の開発、仮想インピーダンス/アドミタンスの比較検討、非線形シャントコントローラ、適応シャントコントローラ、電磁アクチュエータへの手法の適用、IPMC アクチュエータの駆動方法への適用、IPMC アクチュエータのイオン交換による特性改善について知見を得た。

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)

高木賢太郎、井上剛志、宮地智也、デジタル仮想インピーダンス回路を用いた電磁シャント制振、日本機械学会論文集 C 編、査読有、78 巻、2012、474-488
doi:10.1299/kikaic.78.474

高木賢太郎、山田靖高、井上剛志、内部抵抗を考慮した圧電素子のインピーダンス計測のみに基づくセンサレスパラメータ推定、日本機械学会論文集 C 編、査読有、78 巻、2012、2808-2823

doi:10.1299/kikaic.78.2808
高木 賢太郎, 松井 徳志, 井上 剛志,
接地型仮想アドミタンス回路の開発と
仮想直列 LR 素子を用いた圧電シャント
制振, 日本機械学会論文集 C 編 査読有,
79 巻, 2013, 1305-1316
doi: 10.1299/kikaic.79.1305
K. Takagi, N. Tomita, K. Asaka, A
Simple Method for Obtaining Large
Deformation of IPMC Actuators
Utilizing Copper Tape, Advanced
Robotics, 査読有, 28 巻, 2014, 513-521
doi: 10.1080/01691864.2013.876939

〔学会発表〕(計 7 件)

高木賢太郎, 井上剛志, 宮地智也, ディ
ジタル仮想インピーダンス回路を用い
た電磁シャントダンパ, 日本機械学会
Dynamics and Design Conference 2011,
2011 年 9 月 5 日, 高知工科大
山田靖高, 高木賢太郎, 井上剛志, イン
ピーダンス計測による圧電構造物の抵
抗変化を考慮したパラメータ推定, 日本
機械学会 Dynamics and Design
Conference 2011, 2011 年 9 月 5 日, 高
知工科大
K. Takagi, N. Yamaguchi, K. Asaka,
Driving Ionic Polymer Actuators by
Switching Amplifiers (招待講演),
ISGMA2012, 2012 年 08 月 27 日~2012 年
08 月 29 日, Jeju, Korea
小川 真史, 高木 賢太郎, 齋藤 紘平,
井上 剛志, 非線形連成を利用する動吸
振器を仮想的に実現した圧電シャント
ダンピング, 日本機械学会 Dynamics and
Design Conference 2013, 2012 年 09 月
18 日~2012 年 09 月 22 日, 慶応大
高木 賢太郎, 松井 徳志, 井上 剛志,
仮想アドミタンス回路による圧電シャ
ント制振, 日本機械学会 Dynamics and
Design Conference 2013, 2012 年 09 月
18 日~2012 年 09 月 22 日, 慶応大
奥村 建斗, 高木 賢太郎, 井上 剛志, 電
荷アンプを用いた仮想アドミタンス回
路による圧電シャント制振, 日本機械学
会 Dynamics and Design Conference 2013,
2013 年 8 月 26 日~2013 年 8 月 30 日,
九州産業大
K. Okumura, K. Takagi, T. Inoue, I.
Jikuya, Instability Caused by
Parasitic Resistances in
Piezoelectric Shunt Damping System
with Negative Capacitor, SPIE Smart
Structures/NDE 2014, 2014 年 3 月 9 日
~2014 年 3 月 13 日, San Diego, USA

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高木 賢太郎 (TAKAGI, Kentaro)
名古屋大学・大学院工学研究科・講師
研究者番号: 60392007

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

井上剛志 (INOUE, Tsuyoshi)
名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 70273258

安積欣志 (ASAKA, Kinji)

産業技術総合研究所・健康工学研究部門・

グループ長

研究者番号: 10184136