



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Vibration Control for Nonlinear Mechanical Systems with Relative Information [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	Hao, Sheng
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第15084号
Issue Date	2022-03-24
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/85483
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Sheng_Hao_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (情報科学) 氏名 Sheng Hao

審査担当者 主査教授 山下裕
副査教授 小野里雅彦
副査教授 金井理
副査准教授 小林孝一

学位論文題名

Vibration Control for Nonlinear Mechanical Systems with Relative Information

(非線形メカニカルシステムに対する相対情報を用いた制振制御)

本学位論文は、非線形機械システムに対する相対情報に基づく振動制御を提案している。振動の抑制は、機械システム設計における重要な要件となっている。近年、社会の情報化の進展に伴い、情報技術に対する振動制御の要求が高まっている。これまで、数十年にわたり、機械システムには能動的な振動低減技術の採用が進んできている。しかし残念ながら、ほとんどのアクティブ振動制御のアプローチは、すべての状態が正確に把握されていることを前提にしている。基準面との相対的な情報であれば、センサーが状態を観測するのは簡単であろう。一方、基準面が振動している場合、手頃なセンサーでは絶対的な位置と速度を決定することは不可能である。

提案しているコントローラのキーとなる考え方は、機械系の受動特性を利用すること、およびスカイフック手法である。Interconnection and damping assignment passivity-based control (IDA-PBC) 法は、非線形システムのエネルギー整形と安定化に関する理論的利点があり、本学位論文において主に採用されている手法である。IDA-PBC 法はハミルトン系の漸近安定化のために主に用いられているが、本学位論文ではそれを外部振動源がある場合の効果的な振動抑制に用いることができることを示している。具体的には、いくつかの問題設定において、IDA-PBC 法により設計した相対情報のみのフィードバックで、スカイフックダンピング—固定床とのダンピング—を仮想的に実現していることが、本学位論文の主要な結果である。

本学位論文の内容は以下の通りである。

第1章では、本研究の背景と問題提起を説明している。

第2章では、外的制御力を持つ系の振動制御問題を考えている。ここで考えている系は、バネとダンパーを持つ任意の浮動非線形機械構造として表現することができるものである。そして、制御される系と所望の系との間のマッチング条件を導出している。また、自由パラメータを含む制御則を導出し、いくつかの制約条件を与えている。この制御則は、測定が容易な相対的な情報のみを用いている。さらに従来よりも一般化された非線形被制御体のための新しいパラメータ設計法を提案しており、所望の閉ループシステムの慣性行列を決定する偏微分方程式が導かれている。IDA-PBC 法により、非線形閉ループシステムの安定性が理論的に保証されている。さらに、良好な振動抑制効果を達成する効率的なパラメータ選択スキームを提案しており、提案したパラメータ選択方式の下では、提案制御則が相対情報のみを用いて仮想スカイフックダンパを実現していることが示された。また、提案制御の良好な振動抑制効果を検証するために、例題を用いたシミュレーションを行っている。

第3章では、内部制御力を持つシステムの振動制御問題を考えており、世界座標情報によらない情報を用いたコントローラによる非線形アクティブ DVA 制御系を提案している。提案手法は、力擾乱と速度擾乱によって励起される振動を同時に制御することができ、センサで容易に計測できる振動系の相対変位と相対速度のみを用いている。提案している制御系設計の主な考え方は、非線形 DVA システムを複数の仮想バネとダンパーを持つ所望のシステムに変換することである。実際の系を所望の系に一致させるための等式・不等式制約を明らかにしているが、第2章の場合と異なり、偏微分方程式の数値解法は不要である。また、所望のシステムのパラメータの選択指針を導出している。パラメータ設計は線形化に基づいているが、受動性に基づく制御理論により大域的な漸近安定性は自動的に保証されることが示されている。

第4章では、複数の外乱を持つ非線形システムに対する ISS 解析手法が提案されている。力の外乱と速度の外乱を持つ非線形機械ハミルトンシステムのクラスに対して、ISS リアプノフ関数を構築できることを示している。力外乱を持つ系と、フィードバック入力と速度外乱を持つ系の2つの場合を考えており、これら2つの系に対して、それぞれ ISS リアプノフ関数を構成している。この ISS リアプノフ関数構築手法は、システムパラメータに関するいくつかの仮定に基づいているが、それらは実際の応用において容易に満たすことができるものである。

第5章では、車の 1/4 モデルに対し、非線形アクティブサスペンションシステムに対する新しい IDA-PBC 設計を提案している。これまでの研究の多くが絶対値データに依存していたのに対し、サスペンションシステムの相対的な変位と速度のみに基づく制御則を開発しており、低コストなセンサを用いることができることを主張している。サスペンションシステムの動特性を表現するポートハミルトン形式を求め、それを相対座標を用いて書き換えることで制御対象を求めている。非線形バネ、非線形ダンパー、質量の不確かさを持つアクティブサスペンションの IDA-PBC ベースのコントローラ設計手法が示されている。他の IDA-PBC の実装とは異なり、振動抑制性能に着目した望ましい線形システムに等価変換し、仮想的な車体・バネ下重量、仮想ダンパー、仮想スカイフックダンパーの係数を設計している。モデル誤差や外乱がない場合にサスペンションシステムの大域的漸近安定性を保証する要件を確立し、制御対象の質量・スプリング・ダンパーのパラメータが不確かな場合にロバスト安定性を保証できるパラメータ選択案を提示している。これらの不確かさは、乗客数や車体荷重のばらつき、サスペンション部品の経年劣化、センサー誤差によるものである。

第6章では、本論文の結論について述べている。

これを要するに、著者は、IDA-PBC 法を新たに非線形機械系の振動抑制制御に応用し、相対情報のみから絶対位置を基準とするスカイフックダンパーを仮想的に追加する非線形制御手法を提案しており、制御理論・制御技術・情報科学に貢献するところ大である。よって著者は北海道大学博士(情報科学)の学位を授与される資格があるものと認める。