

令和 4 年 6 月 28 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01619

研究課題名(和文) 振動の完全予測を可能にする準能動制振と予測制御の統一制御理論に向けた研究

研究課題名(英文) Unified Control Theory of Semi-Active Vibration Suppression and Predictive Control to Enable Complete Prediction of Vibration

研究代表者

榎原 幹十郎 (MAKIHARA, Kanjuro)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：60392817

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙構造物の制振研究は重要であり、高性能な制振の要求は高い。本研究では、準能動制振の【低エネルギー消費】と【高制振性能】の達成を目指して、「準能動制振と予測制御を融合した統一制御理論」の創成に取り組んだ。本研究グループが研究を進めてきたエネルギー回生型準能動制振と、将来の振動状態を予測する予測制御を統一した。従来の概念では統一理論の構築は難しかったが、準能動制振の将来状態が予測でき、統一制御理論を構築できた。本研究では、構築する「準能動制振と予測制御を融合した統一制御理論」の制振・予測性能を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は以下の4つの学術的意義や社会的意義を有する。

(1) 準能動制振の将来の振動状態を完全に予測する研究は、世界初の先駆的な新規学術研究である。(2) 圧電素子を用いた振動発電の研究分野でも、本提案手法を応用することが出来る。(3) 制振の将来状態を完全に予測できれば、制御遅れを予め補償できる。制御遅れの大きな制振システムにも応用できる。多様な制御補償器の学術研究が創成される。(4) 航空機・電車・自動車・橋梁・防音壁などにも広範囲に応用できるので、社会的インパクトや波及効果も大きい。

研究成果の概要(英文)：Vibration control for space structures is important, and the demand for high-performance vibration control is high. In this study, we worked to create an integrated control theory that combines semi-active vibration control and predictive control, with the aim of achieving [low energy consumption] and [high vibration control performance] of semi-active vibration control. The energy-recycling semi-active suppression, which the research group has been conducting, and the predictive control for predicting future vibration states were integrated. Although it was difficult to construct an integrated theory in the conventional concept, the future state of semi-active vibration control can be predicted, and an integrated control theory can be constructed. We clarified the vibration control and prediction performance of the constructed the integrated control theory combining semi-active vibration and predictive control.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：振動制御 準能動制振 予測制御 圧電 宇宙構造物

1. 研究開始当初の背景

(1) 宇宙構造物の制振研究は、長期ビジョンに立って理論研究を重ねるべき重要分野である。高性能な制振は宇宙工学と宇宙物理学の発展に欠かせない。観測衛星の展開アンテナが10メートルを越す程に大型化しながらも、更なる観測精度が求められる。高性能な制振の要求は益々高まっている。ASTRO-H衛星のように振動擾乱が解決し難い宇宙機も多くなっている。宇宙構造物で要求される制振の要件は、地上構造物で要求される要件とは異なる。制御に費やすエネルギーの使用量が非常に限られ、打ち上げ時の軽量化から宇宙構造物は非常に柔軟で振動が収まり難い。宇宙環境の極限的なエネルギー制約の下では、従来の発想に基づいては、効率良い制振を達成することは出来ない。エネルギー収支を常に考慮しながらエネルギー消費を劇的に低減する高度な制振概念が必要である。受動制振は安定だが非弱であり、能動制振は強力だが多大のエネルギーが必要でスピルオーバー等の不安定性に悩まされる。そこで、受動制振の安定性を保ちつつ制振効果を向上させようとする準能動制振が研究されている。申請者は、準能動制振の長所は保持しつつ制振性能を大幅に高める「エネルギー回生準能動制振」を提案した。構造物に圧電素子を組み込み、スイッチ付電気回路を繋ぐ。電気スイッチを振動に応じてオン・オフするだけで制振する。「電流を流す」と「電流を流さない」の2状態を切り替える制振手法である。振動エネルギーが次々と回生され、制振効果が漸次大きくなる。高い制振性能を持ちながらも絶対安定である。

(2) 申請者は、セルフパワー制振にまで価値を高め、制振回路の性能向上に邁進した。各種実験系で性能を実証して高い評価を受けてきた。しかし、まだ【低エネルギー消費】と【高制振性能】に大いに改善余地がある。準能動制振の将来の振動状態が予測できないので、準能動制振の性能は不十分であり、抜本的解決は手つかずである。

2. 研究の目的

(1) 「将来の振動状態を完全に予測するために、準能動制振と予測制御を融合した統一制御理論」の学術的研究及び実証が研究目的である。圧電素子とスイッチ回路を用いたエネルギー回生準能動制振が【低エネルギー消費】と【高制振性能】の2つ価値・特徴を獲得するために、準能動制振の将来の振動状態を予測する新規制御理論を提案する。従来の概念では統一制御は困難だったが、「圧電電荷は【不変量】になる」という観測事実を見出した。この事実を用いることで統一制御理論を構築できる。

(2) 本研究の具体的な大目標

- 理論・計算により、エネルギー回生型準能動制振の【不変量】の変動幅を明らかにする。
 - 比較実験により、制御理論の予想原理と予測性能を定量的に明らかにする。
 - 大規模実験により【制御エネルギー消費の減少】と【制振性能の向上】を明らかにする。
- 【準能動制振と予測制御を融合した統一制御理論】の確立は、制振研究分野のエポックメイキングな先進学術研究になる。

3. 研究の方法

(1) 申請者らが培ってきた準能動制振と予測制御の研究に基づき発展・融合させ、従来よりも高度かつ高性能な統一制御理論を提案し、その有効性を大規模実験により実証する。

本研究での留意点は、【不変量】となる「圧電素子内に蓄えられる電荷」は簡単に観測できないことである。カルマンフィルタ観測器や高精度電流計を使って電荷を推定するなどの工夫が必要となる。課題全体を具体的な3つの大項目、7つの小項目に分割する。

●エネルギー回生型準能動制振の【不変量】に関する説明

(A) カルマンフィルタ観測器で不変量を推定することによって、不変量の基本的特性（不変性の精度・電気漏れの影響・温度依存性）を明らかにする。

(B) 高精度計測電流の積算値によって、不変量の基本的特性を明らかにする。

●統一制御理論の予測性能に関する説明

(A) 予測値と実測値を定量的に比較することによって、予測精度（予測誤差・予測間隔の影響・温度依存性・計算負荷への影響）を明らかにする。

(B) パラメータ探索によって、予測精度のパラメータ感度を明らかにする。

●統一制御理論の制振性能に関する説明

(A) エネルギー回生型準能動制振の制御エネルギー消費の減少量を定量的に明らかにする。

- (B) エネルギー回生型準能動制振の制振効果の向上量を定量的に明らかにする。
- (C) 様々な外乱入力・ノイズに対するロバスト性を定量的に明らかにする。

4. 研究成果

(1) 多自由度系の振動抑制実験

提案した PSHI 手法の制振効果を調べるために実験を行った。図 1 に実験における実験装置を示す。実験システムは、片持ち梁、圧電アクチュエータ、パンタグラフ型変位拡大機構、圧電センサ、振動加振器、質量、および実験プラットフォームにより構成されている。圧電アクチュエータとパンタグラフ型変位拡大機構は、プラットフォーム上部と梁の間に取り付けられている。1 方向の 2DOF バネマス系を構成している。構造物の等電荷 1 次振動数は 19.4 Hz であり、等電荷 2 次振動数は 33.0 Hz である。予測ホライズンの長さは $h=400$ (0.2 s) に設定した。

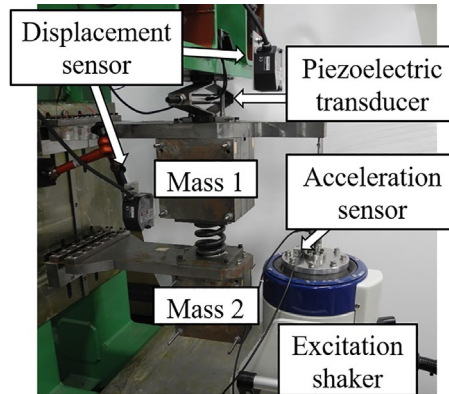


図 1 実証実験に用いる 2 自由度振動系

まず、共振を引き起こす 1 次振動モード外力を付加して構造の振動を励起する。図 2 に、制御有り無しの変位の時間履歴を示した。PSHI 手法は十分に振動を抑えていることが確認される。表 1 に振動エネルギーの RMS 値を示す。予測制御に基づく PSHI 制御から十分な制振効果が得られることを示している。

次に、2 つの共振を同時に引き起こす 1 次モードと 2 次モードの混合外力を加えた。表 1 に振動エネルギーの RMS 値の比較を示す。提案した PSHI 手法は従来手法より良好である。変位の将来予測と外力の将来予測は複雑な振動に有効であることが示された。

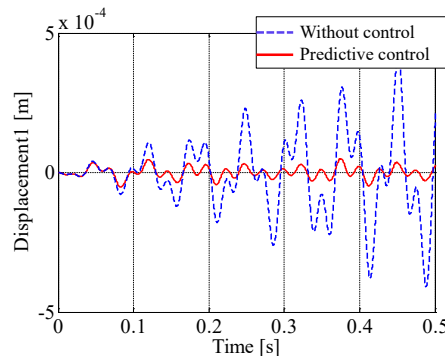


図 2 提案 PSHI 手法に基づく変位履歴

表 1 振動エネルギーの RMS による性能比較

Disturbance type	Control type	RMS energy [J]
1st mode only	Without	1.90×10^{-3}
	Conventional	1.04×10^{-3}
	Proposed PSHI	9.80×10^{-4}
Multiple-mode	Without	2.33×10^{-3}
	Conventional	1.67×10^{-3}
	Proposed PSHI	1.43×10^{-3}

図 3 に振動エネルギーの実効値分布を示す。予測ホライズンが大きい領域では、提案 PSHI

手法による振動エネルギーの RMS は、従来手法の値より低い。これは、振動波形の概要を把握することが長時間の予測で可能なためである。予測ホライズンが 400 に近い領域で、振動エネルギーの RMS は低くなる。従って、パラメータが適切に設定されている限り、提案方法が従来方法よりもはるかに優れた性能を発揮することを示している。

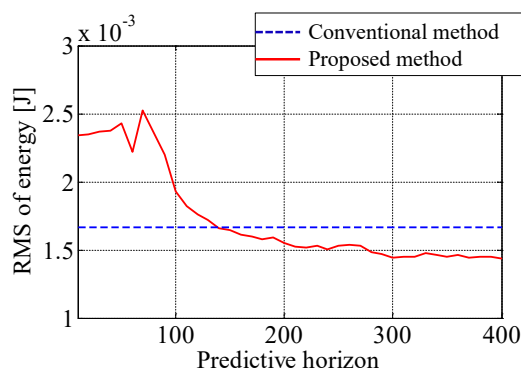


図3 振動エネルギーの RMS と予測ホライズンの関係

(2) 数値解析による提案手法のロバスト性検証

本研究では、オブザーバにより現時刻の状態量を推定している。モデル誤差による推定精度の低下は、制振性能に影響を及ぼす可能性がある。提案手法のロバスト性を数値解析により検証する。コントローラ的设计誤差を想定し、コントローラをノミナルなパラメータで設計する一方、系のパラメータをノミナルな値から変動させる。バネ1の剛性 k_1 を意図的に変動させる。ロバスト性比較のために LQG 制振と比較する。ノミナルなパラメータ値でコントローラを設計する際に、提案手法と性能が同等となるように LQG のゲインを設計した。指標は正規化した RMS 値とする。加振条件は混合モード加振とする。図4にロバスト性の検証結果を示す。制振性能が右肩上がりになるので、剛性が大きくなるにつれて制振性能が低下することが分かる。全ての領域で、提案手法は高いロバスト性を持つことが示された。

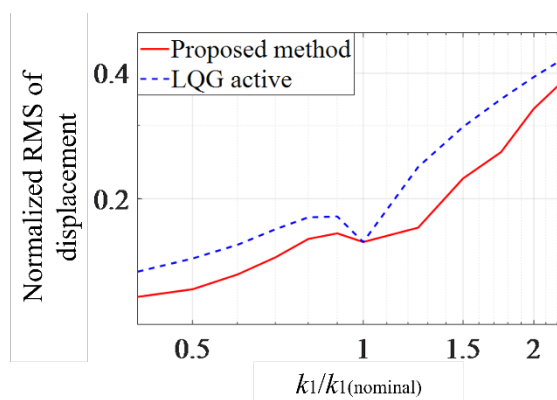


図4 モデル誤差に対するロバスト性比較

(3) まとめ

セミアクティブ制振に適した予測制御理論を提案した。変位・速度だけでなく外力の将来状態までも予測して制振に用いる特長を有する。従来制振手法と比較して良好な制振性能が示された。予測ホライズンの長さや振動エネルギーの RMS 値の関係について検討した。また、予測制御理論を多自由度へと理論を拡張して MIMO 制御理論を構築した。その結果、多自由度振動系でも良好な制振効果が得られた。提案手法は従来手法に比べて高いロバスト性を持つことも実証した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hara Yushin, Yamamoto Yuta, Makihara Kanjuro	4. 巻 31
2. 論文標題 Self-sensing state estimation of switch-controlled energy harvesters	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Intelligent Material Systems and Structures	6. 最初と最後の頁 2326 ~ 2341
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/1045389X20943944	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Takamoto Ikuya, Abe Mizuki, Hara Yushin, Nakahara Takeshi, Otsuka Keisuke, Makihara Kanjuro	4. 巻 315
2. 論文標題 Predictive Switching Vibration Control Based on Harmonic Input Formulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators A: Physical	6. 最初と最後の頁 112271 ~ 112271
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sna.2020.112271	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hara Yushin, Zhou Meng, Li An, Otsuka Keisuke, Makihara Kanjuro	4. 巻 30
2. 論文標題 Piezoelectric energy enhancement strategy for active fuzzy harvester with time-varying and intermittent switching	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Smart Materials and Structures	6. 最初と最後の頁 015038 ~ 015038
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-665X/abca08	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hara Yushin, Otsuka Keisuke, Makihara Kanjuro	4. 巻 21
2. 論文標題 Adaptive and Robust Operation with Active Fuzzy Harvester under Nonstationary and Random Disturbance Conditions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 3913 ~ 3913
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s21113913	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Takamoto Ikuya, Abe Mizuki, Hara Yushin, Otsuka Keisuke, Makihara Kanjuro	4. 巻 33
2. 論文標題 Comprehensive predictive control for vibration suppression based on piecewise constant input formulation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Intelligent Material Systems and Structures	6. 最初と最後の頁 901 ~ 917
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/1045389X211038703	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 榎原 幹十郎	4. 巻 68
2. 論文標題 宇宙構造物のためのセルフパワード制振	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本航空宇宙学会誌	6. 最初と最後の頁 205 ~ 209
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14822/kjsass.68.7_205	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hara Yushin, Saito Kensuke, Makihara Kanjuro	4. 巻 299
2. 論文標題 Compact, digital and self-powered piezoelectric vibration energy harvester with generation control using voltage measurement circuit	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators A: Physical	6. 最初と最後の頁 111609 ~ 111609
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sna.2019.111609	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kameyama Masaki, Kasahara Naoya, Ishikawa Koji, Makihara Kanjuro	4. 巻 66
2. 論文標題 Optimal Placement of Piezoelectric Element for Energy Harvesting from Supersonic Panel Flutter Oscillation of Plates	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JOURNAL OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES	6. 最初と最後の頁 47 ~ 52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/jjsass.66.47	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Hara, Y., Saito, K., and Makihara, K.
2. 発表標題 Sensor-Less Energy Harvester Based on Voltage Measurement for Space Structures
3. 学会等名 32nd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Makihara, K., Takamoto, I., and Nakahara, T.
2. 発表標題 New Approach to Semi-Active Vibration Control Based on Disturbance Prediction
3. 学会等名 70th International Aeronautical Congress (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Saito, K., Hara, Y., and Makihara, K.
2. 発表標題 System Identification of Piezoelectric Dynamic System for High-Efficiency Vibration Control
3. 学会等名 16th International Conference on Flow Dynamics
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤健祐, 原勇心, 楨原幹十朗
2. 発表標題 圧電素子を内包する振動系への部分空間システム同定手法の適用
3. 学会等名 日本機械学会東北支部第54期総会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中原健志, 榎原幹十朗
2. 発表標題 圧電アクチュエータを用いたセミアクティブ振動制御のための低計算負荷モデル予測制御器
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤健祐, 原勇心, 榎原幹十朗
2. 発表標題 未知外乱を受けるセミアクティブ制御系の宇宙構造物を対象とするシステム同定
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中原健志, 榎原幹十朗
2. 発表標題 圧電アクチュエータを用いたセミアクティブ振動制御のためのモデル予測制御器の制御ホライズンのブロッキングによる計算負荷低減
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ueno, M., Takemoto, I., Otsuka, K., and Makihara, K.
2. 発表標題 Semi-Active Vibration Suppression Using Predictive Theory
3. 学会等名 15th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hara, Y., Saito, K., and Makihara, K.
2. 発表標題 Switch Control with Adaptive Threshold for Effective Vibration Energy Harvesting
3. 学会等名 15th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上野真澄, 朝比奈慧, 大塚啓介, 槇原幹十朗
2. 発表標題 多自由度宇宙構造物の予測セミアクティブ制振
3. 学会等名 日本航空宇宙学会北部支部2018年講演会ならびに第19回再使用型宇宙推進系シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 原勇心, 齋藤健祐, 山本雄大, 槇原幹十朗
2. 発表標題 セルフパワード・デジタル制御器を組み込んだ圧電振動発電装置の評価
3. 学会等名 IIP2018情報・知能・精密機器部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 原勇心, 齋藤健祐, 槇原幹十朗
2. 発表標題 ファジィ制御を用いた高効率圧電振動発電のための適応スイッチ制御則
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2018
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	中原 健志 (Nakahara Takeshi) (00334516)	九州産業大学・理工学部・准教授 (37102)	削除：2020年9月2日
研究 分担者	亀山 正樹 (Kameyama Masaki) (30302178)	信州大学・学術研究院工学系・准教授 (13601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------