

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560255

研究課題名(和文) 制御性能最適化を指向したセミアクティブ制御における低次元モデルと制御則の決定法

研究課題名(英文) Optimal design of the structural model for the semiactive control design and the model-based semi-active control

研究代表者

平元 和彦 (Hiramoto, Kazuhiko)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：00261652

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：セミアクティブ振動制御系設計における制御用モデルと制御則の同時設計問題について研究した。すべてのセミアクティブ振動制御系が、制御対象である減衰を有する機械系の漸近安定性と、セミアクティブ制御デバイスのエネルギー消散特性から、常に漸近安定であることを利用して、制御用モデルとモデルベースのセミアクティブ制御則中に存在する調整可能なパラメータを実装時の(実対象とセミアクティブ制御則から構成される)制御系の性能を指標として同時に最適化する手法を開発した。このとき、制御用モデルと実対象のモデル化誤差は考慮していないことに注意する。いくつかの制御則を前提にシミュレーションを行い、提案手法の有効性を示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, a simultaneous optimal design of a structural model for the semi-active control design and a model based semi-active control law has been studied. All semi-active control systems are essentially asymptotically stable because of the stability of general structural systems with structural damping and the energy dissipative nature of the semi-active control device itself. With the stability nature of semi-active control systems, parameters of the model for the control system design and those in the model-based semi-active control law were optimized simultaneously so that the closed-loop system with the detailed dynamic model that accurately approximates the dynamic behavior of the real structural system and the semi-active control law obtained with the model for the control system design without considering the modeling error. The genetic algorithm was adopted to the optimization. The effectiveness of the present approach was shown with simulation studies.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：セミアクティブ振動制御 低次元モデル 予測型制御 逆リヤプノフ法

1. 研究開始当初の背景

日本は世界有数の地震国であり，東日本大震災以降の近い将来，東海，南海などの巨大地震の発生が危惧されている。

地震の被害の中で，建築構造物の破壊や倒壊によるものは人的・物的両面において甚大である．その対策として，耐震性能の向上や免震構造の導入などが挙げられるが，その上でそれらの構造物の振動を適切に制御することにより，より高い振動抑制性能を実現可能である．よって，地震等の外乱によって発生する構造物の振動制御手法の確立は非常に重要であり，現在まで活発な研究開発が行われている。

本研究課題は，振動制御の手法の中で，MRダンパなどの制御デバイスの可変特性をリアルタイムに調整して制御を行うセミアクティブ振動制御設計に関するものである．セミアクティブ制御は，MRダンパなど，動特性が可変な振動制御デバイスの開発に伴い，そのエネルギー消費量の小ささや，制御系が常に安定性を保つ安全性の面から，パッシブ制御とアクティブ制御の利点を部分的に有し，構造物の制御手法の有効な一手段として注目されている。

セミアクティブ制御手法のほとんどは，制御系設計に構造系の数学モデルが必要である．しかし，一方で，構造系のふるまいを完全に再現するようなモデルを得ることは不可能である。

2. 研究の目的

前述した背景を踏まえ，本研究では，構造系に設置されたセンサで検出された外乱や（部分的な）構造応答データから，上記のセミアクティブ制御則を前提に，構造系の低次元モデルとセミアクティブ制御則の両者を，最終的に得られるセミアクティブ制御系の性能が最適化されるように求めより一層の制御性能改善を実現することを目

的とする．一般の低次元モデルは，実対象と低次元モデルの間の開ループ応答誤差指標を最小化するように求められることが多いが，本研究課題で考える低次元モデルでは，最終的な制御性能の向上が主目的であるので，前述の開ループ応答誤差指標最小化の要件を（必ずしも）考える必要はない。

3. 研究の方法

いくつかのセミアクティブ制御則を前提として，構造系の低次元モデルとセミアクティブ制御則の両者を最適設計するための方法について検討を行う。

低次元モデルの予測出力に基づくセミアクティブ制御則を前提とし，制御性能を改善する低次元モデルと同時に求める。

4. 研究成果

低次元モデルの1ステップ予測出力値のノルムを最小化するようなセミアクティブ制御則を前提に，低次元モデルの質量，減衰，剛性の構造系パラメータとセミア

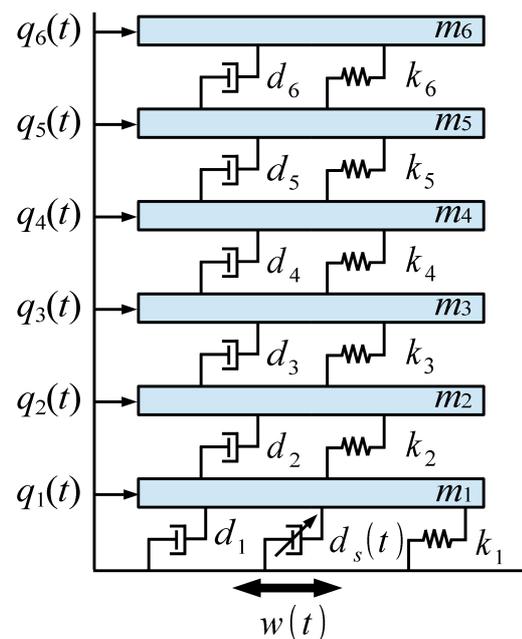


図 1: 6 自由度構造系

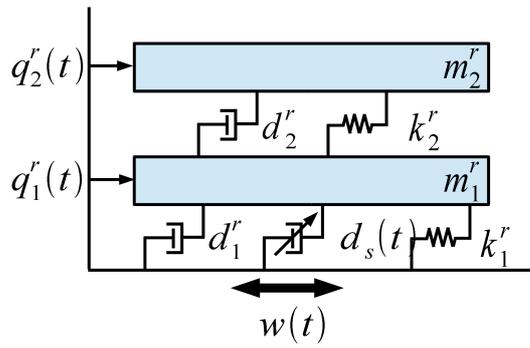


図 2: 2 自由度低次元モデル

クティブ制御デバイスへの指令信号値を決定するための評価関数中の設計パラメータを最適設計した。

評価指標は、低次元モデルに基づいて決定されたセミアクティブ制御則を実構造の

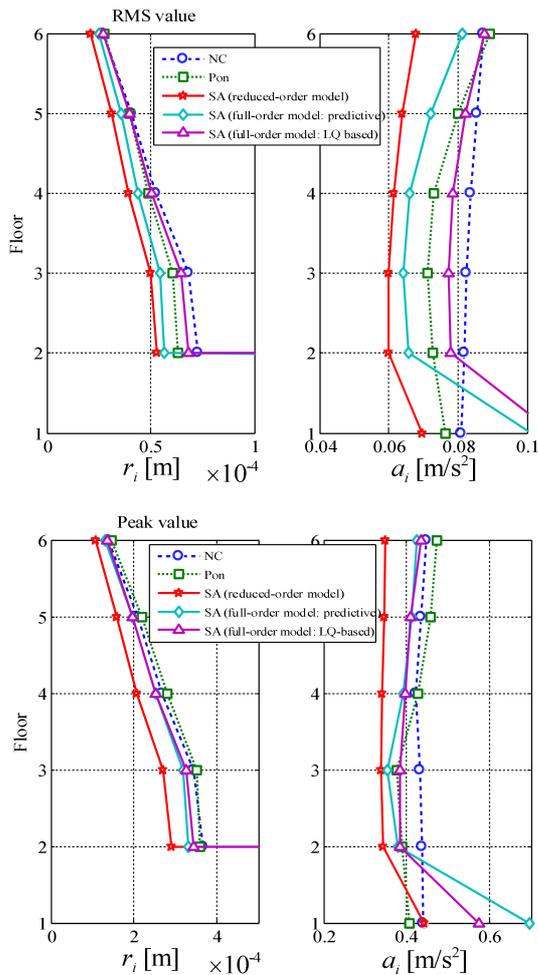


図 3 El Centro NS (1940) 波の結果

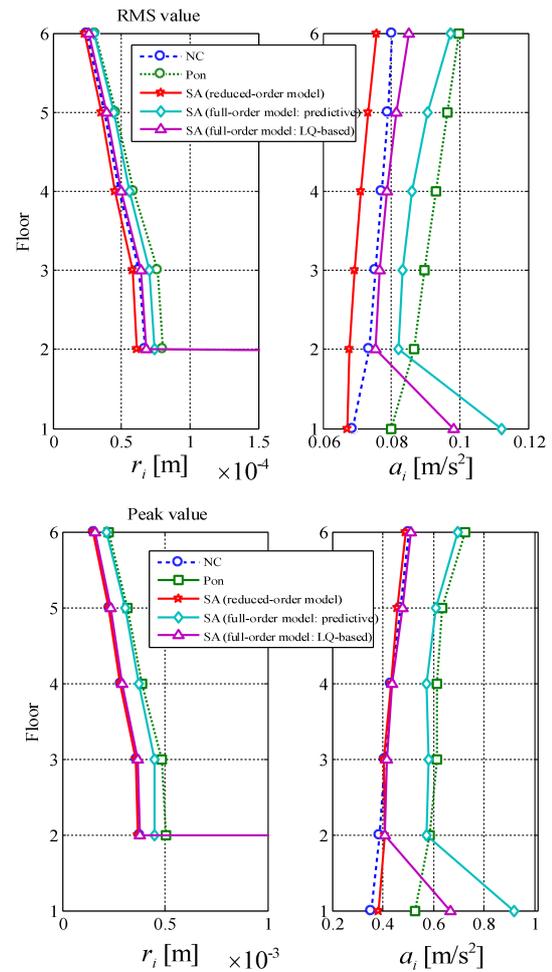


図 4 JMA Kobe NS (1995) 波の結果

振る舞いをできるだけ正確に近似した高次詳細モデルに低次元モデルを基に設計されたセミアクティブ制御則を適用した際の振動制御性能である。設計パラメータである低次元モデルの構造パラメータと予測型制御則を設計する際のパラメータの最適化には、低次モデルにいくつかの地震波を入力したシミュレーションを元にした遺伝的アルゴリズムを用いた。

図 1 に雑誌論文 (1) の設計例で用いた最下層にセミアクティブダンパを設置した 6 自由度免振構造系を示す。この 6 自由度系を高次詳細モデルとして、上記の制御性能を表す指標を最適化するような図 2 に示すようなセミアクティブダンパを設置した 2 自由度低次元モデルの質量

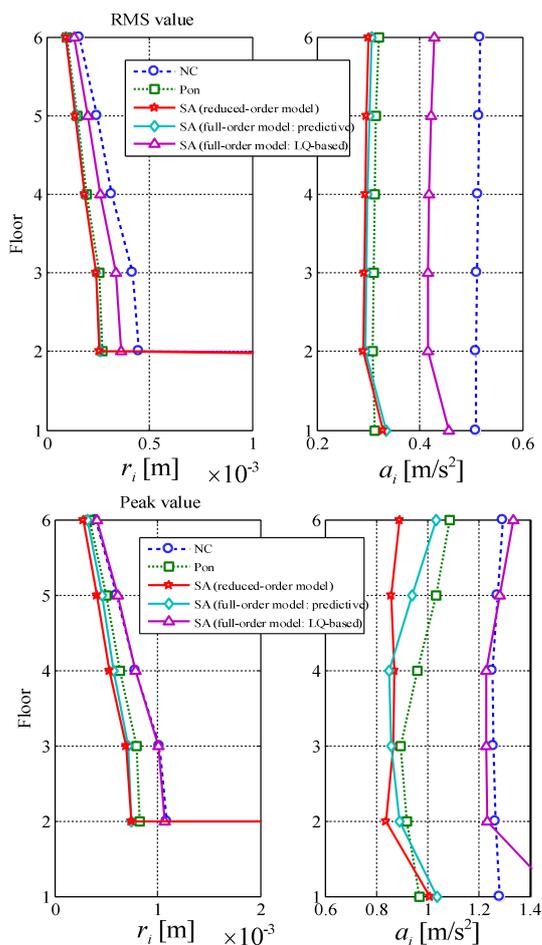


図 5 TaftNS (1952) 波の結果

m_1^r, m_2^r , 減衰 d_1^r, d_2^r , 剛性 k_1^r, k_2^r を求める。

最適化に用いた地震波は、El Centro NS (1940), BCJL1 (仮想地震), Hachinohe NS (1968), JMA Kobe NS (1995) の 4 種である。

最適化に用いた地震波の結果として、El Centro NS 波と JMA Kobe NS (1995) の隣接階層間の相対変位と各層絶対加速度の

RMS 値およびピーク値を図 3, 4 に示す。

さらに、未知の地震波に対する提案手法の有用性を示すため、最適化に用いていない Taft NS (1952) 波の結果を図 5 に示す。

提案手法の結果 SA (赤線: reduced-order model) は、NC (青線: 無制御時), Pon (緑線: 最大減衰固定時), SA (水色線: full-order model: predictive → 高次詳細モデルに基づく予測型セミアクティブ制御), SA (紫線: full-order model: LQ based → 高次詳細モデルを用いて最適レギ

ュレータを基準アクティブ制御として用いたセミアクティブ制御) と比較された。

図 3-5 より、提案する低次元モデルと制御則の同時設計手法が、パッシブ制御だけでなく、高次詳細モデルを直接用いて設計されたセミアクティブ制御の結果を上回る制御性能を達成していることが示され、本研究課題の着想の有効性が示された。この手法による制御系設計については、雑誌論文 (1) のほか、学会でも発表した (学会発表 (7), (9), (10))。

本研究課題に関連した研究として、逆リヤプノフ法によるセミアクティブ制御手法 (雑誌論文 (5), 学会発表 (8)), セミアクティブ振動制御と構造系の統合化設計 (雑誌論文 (3), (6), 学会発表 (1), 図書 (1)), セミアクティブ制御デバイスの特性に関する研究 (学会発表 (4)) および設計されたセミアクティブ制御デバイスを台湾 NCREC ベンチマーク構造に適用した実験的研究 (雑誌論文 (2)), 振動制御のためのモデルと制御則の同時最適化 (雑誌論文 (4)), 基準アクティブ制御の予測制御出力に着目したセミアクティブ振動制御系設計 (学会発表 (2), (5), (6)), アクチュエータとセミアクティブ制御デバイスの両者を有する系の制御系設計問題の問題設定とその解法 (学会発表 (3)) について研究を行い発表した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- (1) K. Hiramoto, T. Matsuoka and K. Sunakoda, Simultaneous Optimal Design of the Structural Model for the Semi-active Control Design and the Model-based Semi-active Control, Structural Control and Health Monitoring, 21 巻, 2014, 521-541.

DOI: 10.1002/stc.1581 (査読あり)

(2) Y. Nakamura, A. Fukukita, K. Tamura, I. Yamazaki, T. Matsuoka, K. Hiramoto, K. Sunakoda, Seismic Response Control using Electromagnetic Inertial Mass Dampers, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 43 巻, 2014, 507-527.

DOI: 10.1002/eqe.2355 (査読あり)

(3) K. Hiramoto, T. Matsuoka and K. Sunakoda, Simultaneous Optimal Design of the Lyapunov-Based Semi-Active Control and the Semi-Active Vibration Control Device: Inverse Lyapunov Approach, Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, 134 巻, 2012, 061211-1-13.

DOI: 10.1115/1.4007033 (査読あり)

(4) K. Hiramoto, Iterative System Identification and Controller Design with an LMI-Based Framework: Windsurfer-Like Approach, Journal of Applied Mathematics, 2012 巻, 2012, 328186.

DOI: 10.1155/2012/328186 (査読あり)

(5) K. Hiramoto, T. Matsuoka and K. Sunakoda, Inverse Lyapunov approach for semi-active control of civil structures, Structural Control and Health Monitoring, 18 巻, 2011, 382-403.

DOI: 10.1002/stc.375 (査読あり)

(6) K. Hiramoto, T. Matsuoka, A. Fukukita and K. Sunakoda, Integrated Design of Structural and Semi-active Control Systems: Inverse Lyapunov Approach, Journal of System Design and Dynamics, 5 巻, 2011, 665-680.

DOI: 10.1299/jsdd.5.665 (査読あり)

[学会発表] (計 10件)

(1) 吉田直樹, 平元和彦, セミアクティブ振動制御を前提とした建築構造系と制御系の統合化設計, 第 56回自動制御連合講演会, 2013年11月 16, 17 日, 新潟大学 (新潟県)

(2) K. Hiramoto, T. Matsuoka and K.

Sunakoda, Semi-active Vibration Control for

Approximating the Targeted Active Control Output, SICE Annual Conference 2013, 2013 年 9 月 14 日～17 日, 名古屋大学 (愛知県) .

(3) K. Hiramoto, Active/Semi-active Hybrid Control for Motion and Vibration Control of Mechanical Systems, SICE Annual Conference 2013, 2013 年 9 月 14 日～17 日, 名古屋大学 (愛知県) .

(4) Y. Sato, K. Sunakoda, H. Sodeyama and K. Hiramoto, Investigation on the detailed resistance force of MRF damper, SICE Annual Conference 2013, 2013 年 9 月 14 日～17 日, 名古屋大学 (愛知県) .

(5) 富井啓輔, 平元和彦, 松岡太一, 砂子田勝昭, 目標制御出力に着目したセミアクティブ振動制御, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2013, 第13回「運動と振動の制御」シンポジウム, 2013 年 8 月 28 日～30 日, 九州産業大学 (福岡県) .

(6) K. Hiramoto, T. Matsuoka and K. Sunakoda, Semi-active Control of Structural Systems Aiming to Approximate the Performance of the Targeted Active Control law: Output Emulation Approach, 2013 Pressure Vessels & Piping Conference, 2013 年 7 月 14 日～18 日, Paris Marriott Rive Gauche Hotel (フランス共和国) .

(7) K. Hiramoto, T. Matsuoka and K. Sunakoda, Simultaneous Design of the Low Order Structural Model and the Inverse Lyapunov Semi-Active Control Law, 15th World Conference on Earthquake Engineering, 2012 年 9 月 24 日～28 日, Lisbon Congress Centre (ポルトガル)

(8) 平元和彦, 外山遼太, 松岡太一, 砂子田勝昭, セミアクティブ制御におけるモデルと目標制御則の最適化, 日本機械学会 D&D 2012 Conference, 2012 年 9 月

18日～21日，慶應義塾大学（神奈川県）

(9) 平元和彦，松岡太一，砂子田勝昭，制御性能向上のための低次構造モデルとセミアクティブ制御則の同時設計，日本機械学会D&D2011，2011年9月8日，高知工科大学（高知県）。

(10) K. Hiramoto, T. Matsuoka and K. Sunakoda, Semi-active Control of Civil Structures with a Simultaneous Reduced-order Modeling and a Tuning of the Control Law, 2011 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, 2011年7月21日，Baltimore Marriott Waterfront Hotel（アメリカ合衆国）。

〔図書〕（計1件）

(1) K. Hiramoto, T. Matsuoka and K. Sunakoda, "Semi-Active Control of Civil Structures Based on the Prediction of the Structural Response: Integrated Design Approach" in Vibration Analysis and Control - New Trends and Development, Intech, 2011, 22頁。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平元 和彦 (HIRAMOTO, Kazuhiko)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：00261652

(2) 研究分担者

松岡 太一 (MATSUOKA, Taichi)

明治大学・理工学部・講師

研究者番号：80360189