# 法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-05-09

## 柔軟構造体のシステム同定とロバスト制御系 の設計

谷口, 大樹 / 阿部, 将英 / 長松, 昭男 / TANIGUCHI, Daiki / 岩原, 光男 / NAGAMATSU, Akio / ABE, Masahide / IWAHARA, Mitsuo

(出版者 / Publisher) 法政大学情報メディア教育研究センター

(雑誌名 / Journal or Publication Title) 法政大学情報メディア教育研究センター研究報告

(巻 / Volume) 21

(開始ページ / Start Page)

35

(終了ページ / End Page) 39

33

(発行年 / Year) 2008-03-31

(URL) https://doi.org/10.15002/00002998

## 柔軟構造体のシステム同定とロバスト制御系の設計

### System Identification and Robust Control for Flexible Structures

阿部 将英<sup>1</sup>) 谷口 大樹<sup>1</sup>) 岩原 光男<sup>1</sup>) 長松昭男<sup>1</sup>) Masahide Abe, Daiki taniguchi, Mituo Iwahara, Akio Nagamatu

1) 法政大学大学院工学研究科機械工学専攻

This paper deals with a vibration control system for a flexible three-story structure with H-infinity controller and surface bonded PZT (lead zirconium titan ate) patches. The plant transfer function is identified by Time Based Prediction Error Method. As a reference model, plant frequency responses given by Experimental Modal Analysis are used to improve the performance of the identified function. We designed H-infinity robust controller based on the identified plant. We implemented the control system by software and hardware to evaluate the performance. The experiments result in significant decays of two modes with our control system. The decay of first mode is 22 dB and the second mode is 15 dB. And, this system is applied using the finite element method.

Keyword : H-infinity robust controller, flexible, identified function, Finite element method

#### 1.1. 緒言

近年、機械構造物は軽量化が進み、また高層 ビルなどの建造物は長大化が進みそれぞれ柔 軟化傾向にある。その結果、外乱により振動が 容易に励起されるため、作業効率の低下ばかり でなく安全性を脅かす原因となっている。この 振動を抑制するために現在アクティブ制振技 術の実用化研究が盛んに行われている。

本研究では、コンピュータシミュレーション 及び制御実験を通して、柔軟構造物における振 動制御問題について H 制御の適用性を検討 した。

#### 2. 制御対象構造物

本研究の制御対象構造物はアルミニウムの 三階建て構造物とした。構造物の概要を Fig.1 に、緒元を Table.1 に示す。



**Fig.1 Plant** 

# 3. モデル化及び制御系設計 3.1 実験によるシステム同定

本研究では実験によるシステム同定により モデルを構築した。入力信号はM系列信号<sup>2)</sup> を用いた。また、システム同定には予測誤差法 を用いた。Fig.2 にシステム同定実験の結果を 示す。50Hz までの周波数応答関数がモデル化 できていることを確認できる。また Table.2 にインパルスハンマによる打撃試験との固有 振動数の比較を示す。1次モード、2次モード における固有振動数はほぼ同じになったが、3 次モードでは 10.5Hz ピークの位置がずれてい る。このことより、本研究では2次モードまで のピークを低減することを目的とした制御設 計を試みた。



Fig.2 Frequency Response of Identified

 Table.2 Comparison between Experimental Peak

 Frequency

	Experimental peak frequency[Hz]	Identified peak frequency[Hz]
First mode	11.5	11.9
Second mode	36.5	36.9
Third mode	65.6	55.1

#### 3.2 制御系設計

本研究では、H 制御理論<sup>3)</sup>を用いて2次モ ードまでの制振を目的にした制御系を設計し た。また、3次モード以降についてはロバス ト安定を考慮した。

H 制御理論はスモールゲイン定理を用い ることでロバスト安定化問題を陽に扱うこと が可能で、感度最適化や外乱抑圧問題などに 有効である。抑えたい物理量を入力外乱や観 測雑音としてモデル化することで、外乱抑圧 問題を定式化することが可能である。今回は Fig.3 のように一般化プラントを構成し制御 系設計を行った。また、簡素化のため1入力 1 出力とする。



Fig.3 Block Diagram of Control System

まず、振動制御を外乱抑圧問題としてとらえ、 制御対象の入力端に加わる外乱 wを出力端 z<sub>1</sub> で抑圧する。すなわち、

$$\left\| W_M \frac{P_r}{1 - P_r K} \right\|_{\infty} < \gamma \tag{1}$$

が可能な限り小さい γ に対して成立するよう に設計を行う。これにより、アクチュエータ によって加えられた外乱が最上階の変位に極 力影響を与えない制御系となることが期待さ れる。なお、 W<sub>4</sub>は重み関数、 P<sub>7</sub>はシステム同 定により導出した制御対象の伝達関数、 K はコントローラとする。

外乱抑圧制御と共通の $_w$ を用い、 $z_2$ へのパスで入力端における乗法的誤差を求めることで、ロバスト安定性を評価した。見積もった 乗法的誤差 $\Delta_w$ に対し、

$$\Delta_m(j\omega) \leq |W_m(j\omega)| \qquad , \quad \forall \omega \tag{2}$$

を満たす*W<sub>m</sub>*を用いて、*w*から*z*2までの H ノ ルムを1未満とすれば、

$$\left\| W_m \frac{P_r K}{1 - PK_r} \right\|_{\infty} < 1 \tag{3}$$

が満たされ、ロバスト安定性が確保できる。 本研究では試行錯誤の結果、以下の重み関数 を設定した。

$$W_M = \frac{12.1}{0.004s+1}$$
  $W_m = \frac{2.5(s+90)}{s+2000}$  (4)

この制御系を用いて制御実験を行った。

#### 4. 実システムへの適用

Fig.4 に示す制御ループを組み、実際に制 御実験を行った。



Fig.4 Configuration of Control System

まず、1階部分に取り付けられているピエ ゾアクチュエータから3秒間、M系列信号に よる外乱を発生させる。その後、センサによ り3階における外乱を計測し、A/D変換器を 介してこれらの情報をLabVIEW<sup>4)</sup>で取り込む。 LabVIEW内にはMATLABによってあらかじめ計 算されたH 制御器が組み込まれており、制 御信号を発生する。この信号をD/A変換器・ パワーアンプを経て、1階部分のピエゾアク チュエータに送ることで、制振力を発生する。 実験結果を以下に示す。



Fig.5(a)は時間応答波形、Fig.5(b)は周波数 応答波形である。Fig.5(a)より時間応答におけ る制振効果が確認できる。また Fig.5(b)より 11Hz 付近のピークレベルは 22dB、36Hz 付近の ピークレベルは 15dB 低減していることがわか る。以上のことより、非制御時に比べ制御時の 応答が改善されており、その制振効果を確認で きる。

また、モデル化において無視した高次のモードが フィードバック制御により不安定となるスピルオー バ現象も見られなかった。このことから、H 制御に よるロバスト安定化の効果を確認することができる。

#### 5. FEM モデルを利用した制御系設計

前章まででは実験的アプローチ、システム同定法 により制御対象モデルを導出し制御系設計を行った 結果を示してきた。本章では解析的アプローチによ り制御対象モデルを導出し制御系設計を行なう方法 について簡単に示す。簡略化のため、制御対象構造 物としては前章まで使ってきた構造物の側面のみを 使用し、センサーにはレーザードップラー振動計を 使用した。

#### 5.1 制御対象構造物

制御対象構造物を Fig.6 に、緒元を Table.3 に示 す。制御対象構造物として、システム同定からの制 御で利用した構造物を利用した。ただし、簡単化の ため今回は Fig.6 のように 1 枚の板を制御対象構造 物とした。



Fig.7 FEM Model

Copyright © 2008 Hosei University

法政大学情報メディア教育研究センター研究報告 Vol.21

#### 5.2 運動方程式によるモデル化

制御対象構造物においては有限要素法により 45 要素に分割し、モード解析により3自由度まで低減 した数式モデルを利用した。有限要素モデルの作成 には、Altair Hyper Mesh を使用し、モード解析に は MSC Nastran を利用した。作成したモデルと実験 値の固有周波数を Table.4 に示す。

	Experimental peak frequency[Hz]	Identified peak frequency[Hz]
First mode	5.4	5.4
Second mode	30.1	30.5
Third mode	86.6	81.2

**Table.4 Compare of natural frequency** 

Table.4 より一次及び二次は近い値になっている ことがわかる。3次モードについては若干異なるも のの誤差は5%以内に収まっている。

#### 5.3 制御系設計

制御系設計を Fig.8 に示す。ここでも 3-2 とト同様 に外乱抑圧問題やロバスト安定化問題を考慮し設計 した。



Fig.8 Block Diagram of Control System

#### 5.4 実システムへの適用

求まった制御器を利用して LabVIEW によりプログ ラミングし Fig.9 に示す制御システムを構成した。



Fig.9 Configuration of Control System

まず、1 階層部分に取り付けられているピエゾア クチュエータにより3秒間の外乱(M系列信号)を発 生させる。その後構造体の振動はレーザードップラ ー振動計により検出され A/D 変換器を経て LabVIEW

Copyright © 2008 Hosei University

内に取り込む。LabVIEW内にはあらかじめMATLABに より計算されたコントローラがプログラミングされ ており、受け取ったデータに対する制御信号を発生 させる。出力された制御信号はD/A 変換器を経て電 圧信号としてパワーアンプに送り出し、ピエゾアク チュエータに送ることで、制振力を発生する。本実 験では 500[Hz]により制御信号を発生させる。

#### 5.5 実験結果



Fig.10 は、制御信号を発生した後の時間応答およ び、周波数応答のグラフである。Fig.10(a)より制御 信号発生後は非制御時に比べ、制御時の応答が大幅 に改善されており制振効果が確認できる。Fig.10(b) より周波数応答において、1次は12dB低減している が、3次では11dB悪化している。これはモデル化時 点での数式モデルにおいて3次モードでのずれが 原因だと考えられる。しかし、モデル誤差及びモデ ル化の際に無視した高次モードがフィードバック制 御により不安定になるスピルオーバ現象はおきてい ない。このことからロバスト安定化の効果を確認す ることができる。

### 6. 結論

- [1] システム同定によって、2 次振動数までの モデルを得ることができた。
- [2] 柔軟構造体において H 制御における制振 効果及びロバスト安定性を確認した。
- [3] 有限要素法により数式モデルを導出し、制御設 計を行った。
- [4] 解析的アプローチから得たモデルを利用し、H ロバスト制御を適応した。

#### 参考文献

- [1] 長松昭男 モード解析入門 (1993)
- [2] 足立修一 制御のためのシステム同定 (1996)
- [3] 西村秀和 平田光男 MATLAB による制御系設計 (1998)
- [4] ロバート・H・ビショップ
   LabVIEW プログラミングガイド (2005)
- [5] V.Sethi and G.Song Multimode vibration control of a smart model frame structure Smart Mater. Struct, 15, 437-479(2006)
- [6] 片山徹 システム同定 (2004) [7] 梶原逸朗
- モード解析による構造系と制御系の最適設計に 関する研究
- [8] 片山徹 システム同定 (2004)
- [9] 渡辺亨
   現代制御・ポストモダン制御の基礎と適用事例
   第三回夏の学校「制御系設計の基礎から応用まで」 (2005)
- [10] MSC NASTRAN 2001 日本語オンラインマニュアル, MSC Software, 2001
- [11] MSC NASTRAN 2004 リリースガイド,
- $[12]\,\text{MSC}$  Software, 2004