デシメーションを用いたロバスト同定法[†]

—— 大型柔軟衛星への適用 ——

足 立 修 一*・須 永 義 弘*

Robust Identification by Using Decimation

—— Application to Large Flexible Satellite ——

Shuichi ADACHI* and Yoshihiro SUNAGA*

Design and analysis of robust control systems, especially the H_∞ control, have been studied actively and many application examples have been reported in various areas. However, in order to apply the robust control theory to a real plant, it is necessary to evaluate model uncertainty or unmodeled dynamics. Therefore, research on robust identification which means system identification for robust control has become one of the hottest topics in system identification. Roughly speaking, there are two types of robust identification methods, that is, deterministic one and stochastic one. In both methods, some a priori information about model uncertainty is assumed, and sometimes unrealistic assumptions are included. In this paper, a large space structure (LSS) is chosen as an identification object. On the assumption that physical structure of an LSS is known a priori, a new practical robust identification method based on the least-squares estimation in cooperation with decimation is proposed. Effectiveness of the method is examined through experimental data.

Key Words: system identification, robust control, least-squares estimation, decimation, large space structure

1. はじめに

近年、制御系設計の分野ではロバスト制御に関する研究が盛んに行われているが¹⁾、この理論を実際のプラントに適用するためには、モデルの不確かさを評価する必要がある。ここで、観測雑音などの確率的外乱に起因するモデルの不確かさは分散誤差と呼ばれ、従来から推定誤差共分散行列や推定値の信頼区間などで評価されていた²⁾。一方、真のシステムは一般に制御系設計に利用される数学モデル(これをノミナルモデルと呼ぶ)より構造が複雑であるため、その間にはシステムティック誤差と呼ばれる一種のバイアス誤差が生じる。したがって、分散誤差とシステムティック誤差の双方よりなるモデルの不

確かさを考慮したロバスト制御のためのシステム同定(以下では、ロバスト同定と略記する)に関する研究が、現在活発に行われている^{3),4)}。

しかしながら、理論研究とは対照的に実際に適用された報告はわずかしかない⁵⁾。また、ロバスト同定では不確かさに関する何らかの事前情報が必要となるが、実際の場で適用するには十分であるとはいえないものも含まれている。たとえば、Kosut らにより提案されたセットメンバーシップ同定法に基づくロバスト同定法⁶⁾は、ノミナルモデルのパラメータの存在領域を同定できる先駆的な研究であるが、そこでは乗法的な不確かさを規定する重み関数が事前に既知であるという仮定を用いている。当然、この重み関数が既知であれば、乗法的な不確かさを考慮したロバスト制御系が設計可能ならずである。

そこで本論文では、低周波数帯域に主要なダイナミクスが集中するメカニカルシステムを同定対象とし、その物理構造が事前情報として与えられる場合、実用的なロバスト同定法を提案することを目的とする。特に、大型

[†] 第 22 回制御理論シンポジウムで発表(1993・5)

* 宇都宮大学工学部 宇都宮市石井町 2753

* Faculty of Engineering, Utsunomiya University,
Utsunomiya

(Received July 21, 1993)

(Revised March 11, 1994)

柔軟衛星を具体的な同定対象と想定し、加法的(あるいは乗法的)な不確かさを規定する周波数重み関数を、デシメーション⁷⁾と呼ばれる信号処理を用いて簡便に決定する方法を提案する。この重み関数が同定されれば、ロバスト制御系設計法を適用することが可能になる。また、前述した Kosut らの方法で仮定されていた事前情報を求める前処理としても利用できる。

さらに、提案する不確かさの同定法を大型柔軟衛星の地上実験装置を用いて行った同定実験データに対して適用し、その有用性を明らかにする。

2. 問題の説明

本論文では、低域に主要なダイナミクスが集中するメカニカルシステム、特に大型柔軟衛星を具体的な同定対象とする。そこで、以下では大型柔軟衛星のモデルについて簡単に述べる。

2.1 不確かさの記述

入力トルクから出力姿勢角までの伝達関数が、次式のように剛体モードと振動モードとの和として表現できる大型衛星⁸⁾を同定対象とする。

$$G_{true}(s) = \frac{1}{Is^2} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\phi_i^2}{s^2 + 2\zeta_i\omega_i s + \omega_i^2} \quad (1)$$

ただし、 I は衛星本体の慣性モーメント、 $\{\omega_i\}, \{\zeta_i\}, \{\phi_i\}$ はそれぞれ、 i 次振動モードの固有振動数、減衰比、トルクアドミタンスである。

大型衛星は本来分布定数系であるため、(1)式のように無限個の振動モードを含んでいるが、一般に制御系設計は、それらの振動モードの中で低域に存在する支配的でないいくつかのモードを含むモデルに対して行われる。しかしながら、そのモデルに対して設計された制御系が、もし無視された高次の振動モードを励振するような場合、いわゆるスピルオーバー不安定が生じてしまう。このような問題点に対処するために、無視した高次振動モードを不確かさとしてロバスト制御系を構成する方法がしばしばとられる⁹⁾。

さて、(1)式のプラントに対しては、高次振動モードがアンモデルダイナミクスとしてノミナルモデルに加法的に加わっていると考えることが自然であり、次式のように表現できる。

$$G_{true}(s) = G_{nom}(s) + \Delta_A(s)W_A(s) \quad (2)$$

ただし、 $G_{nom}(s)$ はノミナルモデル、 $\Delta_A(s)W_A(s)$ は加法的な不確かさを表わし、それぞれつぎのように与えられる。

$$G_{nom}(s) = \frac{1}{Is^2} + \sum_{i=1}^m \frac{\phi_i^2}{s^2 + 2\zeta_i\omega_i s + \omega_i^2} \quad (3.a)$$

Fig. 1 Plant representation in terms of additive uncertainty

$$\Delta_A(s)W_A(s) = \sum_{i=m+1}^{\infty} \frac{\phi_i^2}{s^2 + 2\zeta_i\omega_i s + \omega_i^2} \quad (3.b)$$

ここで、 Δ_A は $\|\Delta_A\|_{\infty} := \sup_{\omega} |\Delta_A(j\omega)| \leq 1$ を満足する安定伝達関数、 W_A は安定な重み関数である。このブロック線図を Fig. 1 に示す。図において、 $d_s(t)$ は確率的な観測雑音である。たとえば、確定的ロバスト同定では、加法的な不確かさ $\Delta_A(s)W_A(s)$ からの出力 $d_d(t)$ を大きさが有界な確定的外乱とみなしている⁴⁾。

さて、(1)～(3)式ではシステムの連続時間表現を用いたが、システム同定は、通常、離散時間同定モデルに基づくため、次節以降は離散時間表現を採用する。

2.2 離散時間同定モデル

(1)式の連続時間システムをサンプリング周期 T で離散化すると、離散時間システム

$$A(q)y(k) = B(q)u(k) + e(k) \quad (4)$$

が得られる。ただし、 $u(k)$ は入力、 $y(k)$ は出力であり、シフトオペレータ q の多項式 $A(q), B(q)$ は、それぞれつぎのように与えられる。

$$A(q) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_nq^{-n}, \\ B(q) = b_1q^{-1} + \dots + b_nq^{-n}$$

一般に、利用できるデータはサンプリングされた離散時間信号であるので、サンプリング周期に対応するナイキスト周波数より高い周波数に存在するダイナミクスに関する情報は、同定実験からは得られない。そのため、(1)式では無限のモードを仮定したが、実際に入手できる情報は有限のモードに対応するものだけになるので、本論文ではその際に無視した高次モードに起因する不確かさは考慮しない。したがって、(4)式中の $e(k)$ は、ナイキスト周波数までに含まれるモードに対する打ち切り誤差と観測雑音より構成される。

さて、(4)式は線形回帰モデル

$$y(k) = \theta^T x(k) + e(k) \quad (5)$$

に変形できる。ただし、

$$x(k) = [-y(k-1), \dots, -y(k-n), u(k-1), \dots, u(k-n)]^T$$

$$\theta = [a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_n]^T$$

ここで、 θ が同定される未知パラメータである。本論文では、(5)式の線形回帰モデルに対して最小2乗法を適用し、未知パラメータを推定し、それよりパルス伝達関数の推定値

$$\hat{G}(q) = \frac{\hat{B}(q)}{\hat{A}(q)} \quad (6)$$

を構成する。さらに、 $q = \exp(-j\omega T)$ を(6)式に代入することにより、周波数特性の推定値を得る。

2.3 大型衛星の地上実験装置

本論文で具体的に同定対象とする大型衛星の地上実験装置⁹⁾について簡単に説明する。

この地上実験装置は、衛星の姿勢運動を1軸エアテーブルで模擬したものであり、その略図を Fig. 2 に示した。大型太陽電池パドルに相当する柔軟構造模型としては、2枚のCFRPパネルをヒンジで結合したものを使用し、これらが中心剛体に相当するテーブルに取り付けられている。テーブルの回転角は非接触磁気回転計で計測し、ブラシレスDCトルクモータをアクチュエータとする collocate した入出力構成となっている。

3. デシメーションを用いた不確かさの周波数特性の評価

1章で述べたように、ロバスト同定では不確かさに関して何らかの事前情報が利用できると仮定する。たとえば、乗法的な不確かさの大きさを規定する周波数重み関数が既知であるという仮定⁹⁾や、加法的な不確かさの最大振幅が既知である仮定¹⁰⁾などである。それに対して本論文では、2章で示したような低域に主要なダイナミクスが集中するメカニカルシステムを同定対象とするため、その物理構造が事前に既知であるという事前情報を仮定している。この事前情報は従来のそれと比べると限定的なものであるが、同定対象がメカニカルシステムの場合には妥当な場合が多いと思われる。

以上で仮定した事前情報のもとで、高域に存在するアンモデルダイナミクスと低域に存在するノミナルモデルを、デシメーションと呼ばれる信号処理を用いて周波数分割し、加法的な不確かさの周波数特性を評価する方

法を提案する。

3.1 不確かさの周波数特性の同定手順

同定実験によっては、利用できる入出力データ数あるいはサンプリング周期を自由に設定できない場合がある。たとえば、大型衛星の場合、宇宙への運搬コストの面からその軽量化が図られているため、もはや地上での同定実験は不可能に近い。そのため、軌道上において大型衛星の同定実験を行う必要が生じている。しかし、コストあるいは安全性などの点から同定実験時間は制限され、得られるデータ数には限りがある(現在計画されている軌道上同定実験では、データ数は数百個から多くても千個程度である)。また、サンプリング周期も同定実験の立場からだけでは決定できない。

このような同定実験上の制約のもとで収集されたデータを用いて同定を行った場合、制御系設計で用いるノミナルモデル次数では同定がうまく行えない場合がある⁹⁾。そのようなときに精度良い同定を行うための対応策として、つぎに示す二つの方法が考えられる。

a) 高次同定モデルの利用¹¹⁾

b) デシメーションの利用⁷⁾

a)の方法は、制御系設計で利用するモデル次数よりも高次の同定モデルを用いることにより、周波数領域における同定精度を向上させようとする立場である。一方、b)の方法は入出力データにデシメーション操作を施し、適切なサンプリング周期のデータに変換することによって、着目する周波数帯域における同定精度を向上させようとする立場である。この場合、a)よりも低次のモデルでの同定が可能となる。

そこで、これらを不確かさの周波数特性の同定に利用する。以下に、提案する手順を示す。

【不確かさの周波数特性の同定手順】

Step 1: 高次モデルを用いたシステム同定

高次同定モデルを用いて、同定実験より得られたサンプリング周期 T の離散時間入出力データに対して最小2乗法を適用し、得られた同定結果を真のプラントの推定値 $\hat{G}_{true}(q)$ とする。

(注意) ここでは、高次モデルを用いた最小2乗法を利用しているが、文献5)では地上の柔軟構造物に対してFEM(有限要素法)に基づいた構造解析より、真のプラントを推定している。FEMは地上の構造物に対しては非常に優れた同定法であるが、自由に加振実験が行えない宇宙空間においてはその有効性は未知数である。そのため、本論文ではパラメトリックなシステム同定による方法を利用した。Step 1で行いたいことは、全周波数帯域において、高精度な周波数特性を同定することであり、同定条件によっては、たとえばスペクトル推定法のような

Fig. 2 Flexible apparatus

ノンパラメトリックな同定法を利用してもよい。

Step 2: デシメーションを用いたノミナルモデルの同定

入出力データにデシメーション操作を施し、最小2乗同定を行う。ここでデシメーションとは、対象とする信号に低域通過フィルタを作用させた後、荒いサンプリング周期 $T'=dT$ ($d \geq 2$) でリサンプルする信号処理である。このとき、同定対象のノミナルモデルが含まれるような周波数帯域を考慮して、新たなサンプリング周期 T' を決定する。そして得られたモデルより、ノミナルモデルを構成するモードパラメータを計算し、(3.a)式の連続時間表現を得る⁹⁾。さらに、それをサンプリング周期 T の離散時間モデルに変換し、これをノミナルモデルの推定値 $\hat{G}_{nom}(q)$ とする。

ここで、デシメーション操作を利用することにより、高域に存在するアンモデルダイナミクスの影響を除去することができ、またそれと同時に高域の雑音の影響も除去できる。すなわち、確定的な不確かさと確率的なそれを考慮して、ノミナルモデルを高精度に同定することが可能になる。

(注意1) 前述した文献5)ではFEMより得られたモデルを低次元化することによりノミナルモデルを得ているが、ここではStep1で得られた高次モデルを低次元化しているのではなく、新たにデシメーションを用いてノミナルモデルを最小2乗同定している。

(注意2) デシメーション操作を利用すると、利用できるデータ数が減少するため、パラメータ推定問題が解きにくくなる場合があるが、このようなときには正則化法¹¹⁾が有効である。

(注意3) ここでは、(4)式のARXモデルを用いてノミナルモデルを同定しているが、確定的なロバスト同定ではFIRモデルが仮定されることが多い⁴⁾。しかしながら、ここで取り扱うような減衰比の小さな振動系の場合、FIRモデルを用いるとパラメータ数が非常に増大するので、そのときはKautzモデルの利用が推奨されている¹⁰⁾。ここで、Kautzモデルを規定するパラメータを設定するためには、対象の振動モードに関する大まかな情報が必要であり、従来の方法においても対象の物理的な情報を必要としていることに注意する。

(注意4) T' すなわち d は、システム同定からではなく、利用できるコントローラの次数や制御帯域などを考慮して、ロバスト制御系設計の立場から決定される。

Step 3: 不確かさの周波数特性の決定

周波数領域において、Step1の同定結果からStep2のそれを減じることにより、加法的な不確かさの周波数特性を求める。すなわち、

$$\Delta_A(e^{-j\omega T})W_A(e^{-j\omega T}) = \hat{G}_{true}(e^{-j\omega T}) - \hat{G}_{nom}(e^{-j\omega T}) \quad (7)$$

また、これらの周波数特性を覆うような加法的な不確かさの周波数重み関数 $W_A(e^{-j\omega T})$ を決定する。さらに、乗法的な不確かさは、次式より計算できる。

$$\Delta_A(e^{-j\omega T})W_M(e^{-j\omega T}) = \frac{\hat{G}_{true}(e^{-j\omega T})}{\hat{G}_{nom}(e^{-j\omega T})} - 1 \quad (8)$$

3.2 不確かさの周波数特性の同定結果

大型衛星の地上実験装置を用いて行った同定実験により収集された入出力データ(サンプリング周期 $T=20$ (ms))をFig.3に示した。この入出力データに対して、前節で提案した手順を適用する。

まず、Step1の高次モデルを用いた同定を行う。ここでは、モデル次数を50として最小2乗同定を行い、このときの同定結果をFig.4に示した。図より、1次振動モードが1(Hz)付近に存在することがわかる。この例では、(剛体)+(1次振動モード)の4次系をノミナルモデル

Fig. 3 Input-output data obtained by identification experiment

Fig. 4 Identified gain response of true plant by using 50th order model

ルとして Step 2 へ進む。

Step 1 の結果より、カットオフ周波数が 6.25(Hz) の低域通過フィルタを通した後、 $d=4$ として Fig. 3 の入出力データにデシメーション操作を施す。その結果を Fig. 5 に示した。このデータに対して、モデルの次数を 10 として最小 2 乗推定を行った結果を Fig. 6 に示した。さらに、この結果から 4 次系のノミナルモデルを得るために、剛体モードと 1 次振動モードのモードパラメータを文献 8) の方法を用いて算出し、これらよりサンプリング周期 T の 4 次系を構成した結果、次式が得られた。

$$\hat{G}_{\text{nom}}(q) = \frac{10^{-4}(0.440 q^{-1} - 0.436 q^{-2} - 0.436 q^{-3} + 0.439 q^{-4})}{(1 - q^{-1})^2(1 - 1.977 q^{-1} + 0.995 q^{-2})} \quad (9)$$

また、(9)式より計算されたゲイン特性を Fig. 7 に実線で示した。参考のため、図において Step 1 で同定された 50 次のモデルのゲイン特性を点線で示した。

最後に、Step 3 として、加法的な不確かさとその重み関

Fig. 5 Decimated input-output data for $d=4$

Fig. 6 Identified gain response based on decimated data by using 10th order model

数を求めた結果を Fig. 8 に示した。ここで、加法的な不確かさの重み関数を

$$W_A(s) = \frac{0.0628(0.0159s+1)^2(1.592s+1)^2}{s^2(0.1592s+1)^2} \quad (10)$$

として点線で示した。また、(8)式を用いて計算された乗法的な不確かさを Fig. 9 に示した。図において点線で示した重み関数は

$$W_M(s) = \frac{0.3162(1.592s+1)^2}{(0.0796s+1)(0.1592s+1)} \quad (11)$$

と設定した。図より、乗法的な不確かさは 1(Hz) 付近の共

Fig. 7 Identified gain responses of nominal model $\hat{G}_{\text{nom}}$ (solid line) and true plant $\hat{G}_{\text{true}}$ (dashed line)

Fig. 8 Identified additive uncertainty (solid line) and weighting function W_A (dashed line)

Fig. 9 Identified multiplicative uncertainty (solid line) and weighting function W_M (dashed line)

振点においてピークをもち、さらに高域になるにつれて不確かさの大きさが増加していくことがわかり、乗法的な不確かさの周波数特性として妥当なものであるといえる。

4. ま と め

本論文では、低域に主要なダイナミクスが集中するメカニカルシステムを同定対象とし、その物理構造が事前に既知であるという仮定の下で有効なロバスト同定法を提案した。本方法では、デシメーションを用いてノミナルモデルを高精度に同定し、その結果より不確かさの周波数特性を簡便に求めている。この方法が適用できる対象は限定されるが、実用的な方法であることを大型衛星の地上実験装置より得られた実データから明らかにした。

さて、本論文で取り扱った大型柔軟衛星のような振動系の場合、モデルの不確かさの周波数特性(すなわちノンパラメトリックな不確かさ)と同様に、モードパラメータが存在する領域も重要な意味をもつ。人工衛星の姿勢制御系の現場では、固有振動数、減衰比などの物理パラメータが存在する範囲において安定となるようなロバストな制御系を、ボード線図上で設計する場合が多いからである。そのようなとき、モデルパラメータの存在する領域を同定することができるセットメンバーシップ同定法は有効である。いま、本方法により同定された乗法的な不確かさの周波数重み関数は、文献6)のKosutらのセットメンバーシップ同定法で事前情報として利用することもでき、パラメトリックな不確かさの同定が可能になる。したがって、本方法はセットメンバーシップ同定法を利用するための前処理としても有効である。

参 考 文 献

- 1) J. C. Doyle, et al.: Feedback Control Theory, Macmillan Publishing Co. (1992)
- 2) L. Ljung: System Identification-Theory for the User (chapter 9), 239/273, Prentice Hall (1987)
- 3) Special Issue on System Identification for Robust Control Design, IEEE Trans., AC-37-7, 899/1008 (1992)
- 4) 佐野, 足立: システム同定—入門から最近の話題まで—[3], シミュレーション, 12-3, 211/219 (1993)
- 5) G. J. Balas and J. C. Doyle: Identification of Flexible Structures for Robust Control, IEEE Control Systems Magazine, 51/58, June (1990)
- 6) R. L. Kosut, et al.: Set-membership Identification of Systems with Parametric and Nonparametric Uncertainty, IEEE Trans., AC-37-7, 929/941 (1992)
- 7) 足立修一: デシメーションを用いたシステム同定法, システム/制御/情報, 35-12, 739/747 (1991)
- 8) 足立, 重政, 山口, 木田: 大型宇宙構造物の同定実験, 計測自動制御学会論文集, 26-11, 1275/1282 (1990)
- 9) 木田 隆: 大型人工衛星のモデリングとロバスト制御, システム/制御/情報, 37-2, 720/727 (1993)
- 10) B. Wahlberg and L. Ljung: Hard Frequency-Domain Model Error Bounds from Least-Squares Like Identification Techniques, IEEE Trans., AC-37-7, 900/912 (1992)
- 11) 足立修一: ユーザのためのシステム同定理論, 計測自動制御学会 (1993)

[著 者 紹 介]

足 立 修 一 (正会員)

1986年、慶應義塾大学大学院工学研究科博士課程修了(工学博士)。同年(株)東芝に入社。90年宇都宮大学工学部電気電子工学科助教授。93年より航空宇宙技術研究所客員研究官を併任。本学会創立30周年記念著述賞1等受賞。システム同定理論とその応用に関する研究に従事。システム制御情報学会、電子情報通信学会、IEEEなどの会員。

須 永 義 弘 (学生会員)

1994年、宇都宮大学大学院工学研究科修士課程修了。同年(株)本田技術研究所に入社。和光研究所に勤務。在学中、ロバスト制御のためのシステム同定理論に関する研究に従事。