

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23560528

研究課題名(和文) 構造を有するシステム同定問題へのロバスト制御理論からの取り組み

研究課題名(英文) Robust Control Theoretical Approach to System Identification

研究代表者

太田 快人(Ohta, Yoshito)

京都大学・情報学研究科・教授

研究者番号：30160518

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：制御対象の動特性をモデリングするためのシステム同定問題に対して、大きく分類すると二つの新しい同定法を提案している。

一つは、ロバスト制御理論で用いらてきた考え方を適用することによって、システム変換を定めることができることを示し、その結果から連続時間システムに対する部分空間法を新規に提案している。

もう一つは、物理法則を考慮することにより、少ない動作点において得られた局所モデルを補間することで全体モデルを構成する同定法を提案している。

研究成果の概要(英文)：This research proposes two new identification methods for modeling of dynamical control systems.

First, a notion from the robust control theory is exploited to define system transformation, which enables to construct a new continuous-time subspace identification algorithm.

Second, an identification method utilizing physical laws is proposed, where local models measured at small number of operating points are interpolated to yield a global model.

研究分野：システム制御理論

キーワード：モデリング 制御システム システム同定

1. 研究開始当初の背景

- (1) 線形時不変系に対するシステム同定理論は、予測誤差法や部分空間同定法の研究が整備されている。しかし連続時間部分空間同定法については、離散時間系にはない困難さがある。それは一般的に信号に対しては微分が取れないので、微分に相当する演算を考慮する必要性である。この問題に対して、以下の対策が考えられる。

- ① ロバスト制御理論、特に H 無限大制御理論においては、全域通過特性をもつ伝達関数（インナー関数）が大きな役割を果たす。特にインナー関数が定めるシフト不変部分空間を用いて H 無限大ノルム制約を満たす補償器の設計法が議論されている。これは自乗可積分な入出力を考えると、連続時間系を等価な離散時間系に変換するリフティングという手法と関係しており、むだ時間系制御やサンプル値制御で応用されている。
- ② 上記のことから、連続時間系の離散時間系への変換を用いて、連続時間系の部分空間法を構成できるのではないかという展望ができる。その理論的基盤と、その方法の有効性を確認することは重要な課題である。

- (2) 線形パラメータ変化システム (LPV システム) の同定法は、LPV 制御理論の成功に比して整備が遅れている状況であった。スケジューリングパラメータを固定して、局所モデルを同定し、それらを補間するためには、それぞれの局所モデルの状態を整合性のあるものにしないといけないが、それは容易ではない状況である。

2. 研究の目的

- (1) 連続時間システム同定問題に対して、システム変換を用いた部分空間同定法が成立するための理論的根拠を示すとともに、実際に適用したときの有効性を数値的ならびに実験的に示す。
- (2) LPV システム同定問題に対して、局所モデルを補間するための方法を提案する。制御システムが従うべき物理的法則を利用して、グレイボックス同定の手法を用いることができることを示すとともに、実験的に有効性を示す。

3. 研究の方法

- (1) システム変換に関しては、以下の方法を用いて研究をすすめている。
- ① ロバスト制御におけるリフティングなどのシステム変換では、自乗可積分な信号を対象にしている。この変換には関数解析の方法を用いて、理論的根拠が与えられる。それに対

してシステム同定のためには、確率過程を入出力とするときの変換理論を作らなくてはならない。そのためには確率論に基づいた考察を行う。

- ② 提案する同定手法について、数値的な実験を行い、従来法との比較を行う。またラジコン飛行を行うクアドロータを用いて、実験的な検討を行う。

- (2) LPV システム同定問題に対しては、以下の方法をとる。

- ① 物理的法則を2階の線形微分方程式として記述できる機械システムを対象とする。周波数領域での部分空間同定法と物理法則を記述した微分方程式から、グレイボックス同定として局所モデルの状態空間表現が求められることを示す。
- ② 局所モデルを補間する問題は、凸最適化問題になることを示す。
- ③ 提案方法を確認するために、回転型振り子システムとツインロータシステムを用いて、実験的に有効性を確認する。

4. 研究成果

- (1) インナー関数が定めるシフト不変部分空間を用いた連続時間系から離散時間系への変換は、対象系が不安定であっても定義することができることを示した (学会発表⑧)。これは閉ループ同定を行う場合の理論的根拠を与える結果である。なお本手法は、インナー関数が1次の場合にはラゲール基底、有理関数の場合には一般化正規直交基底を用いた Hambo 変換と解釈することもできる (引用文献①)。
- (2) 本研究の主要結果の一つとして、入出力が確率過程となる場合においても、一般化正規直交基底を用いたシステム変換が成立することを、連続時間系と離散時間系の解の間の一対一対応を導くことによって示した (雑誌論文①)。この結果によって、システム変換を介して部分空間法を適用することの正当性を与えていることになる。
- (3) システム変換を用いて、連続時間系の同定問題を離散時間系の同定問題とするときに、PO-MOESP 法を適用すると、観測データが増えるにつれて一致性をもった同定ができることを示した (雑誌論文①)。また閉ループ同定への適用可能性を PBSID 法を用いたシミュレーションならびに実験によって考察した (学会発表⑦)。
- (4) 類似する手法としてラゲールフィルタを用いた同定方法 (引用文献②) がある。ラゲールフィルタを用いた場合、ラゲール極と対象システムの極が近い位置に

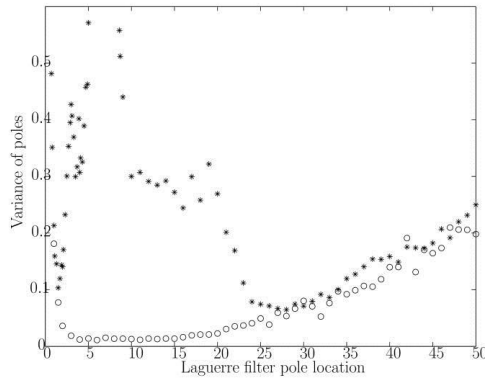


図 1. ラゲル極と極推定自乗誤差

あると、数値的に不良な結果となることが知られていた。本研究での提案手法を用いた場合には、逆にそれらの極が近いときには、数値的に良好な結果となることをシミュレーションによって示した。図 1 はシミュレーション結果である。横軸にはラゲル極  $-p$  とするときの  $p$  の値、縦軸には 200 回試行したときの推定極の真値との差の自乗平均値をとっている。ラゲルフィルタを用いた方法を\*で、提案方法を $\circ$ で示している。シミュレーションの用いた対象系の極は  $\{-6, -7\}$  にとっている。提案方法は、ラゲル極を対象極近くにとった場合に、誤差の自乗平均値が小さくなり、正確に同定できていることがわかる（雑誌論文①）。さらに提案法をラゲルフィルタを用いた同定方法は異なるものであることもわかる。

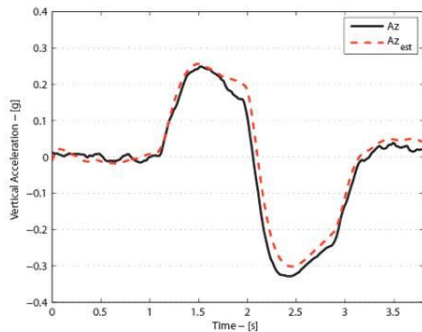


図 2. 垂直加速度

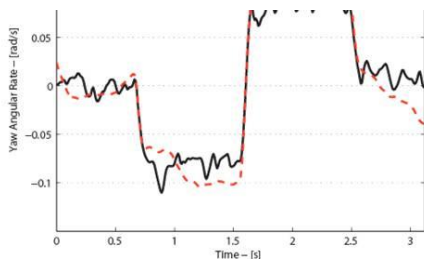


図 3. ヨー角速度

- (5) PBSID 法を用いてシステム変換方法を閉ループ同定への適用してみた。ラジコン

ヘリコプターであるクアッドロータを用いた実験で検討した結果、閉ループ同定に対しても適用できることがわかった（学会発表⑦）。同定モデルによるシミュレーションを破線で、実験結果を実線で示す。図 2 は垂直加速度、図 3 はヨー角速度の応答を示している。特に垂直方向の運動はよく再現できるモデルが得られている。

- (6) 係数行列がスケジューリングパラメータを含む 2 階の線形微分方程式で記述される機械システムを考える。物理パラメータは、係数行列にアファインに含まれているものとする。このとき周波数応答にもとづいた部分空間法を適用して、局所モデルの状態空間表現を求め、局所モデルとの誤差基準として物理パラメータを求めることによって補間を実行することを、本研究の提案方法としている。物理パラメータを求める問題は、線形行列不等式によって記述されることを示すことができる（雑誌論文②, 学会発表④, ⑥）。

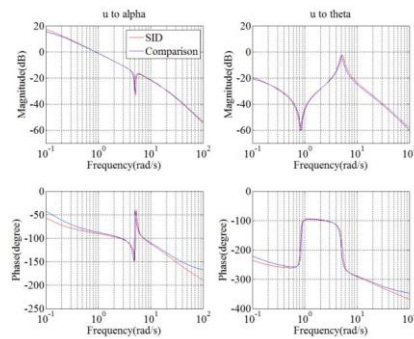


図 4. 平衡実現を用いた補間

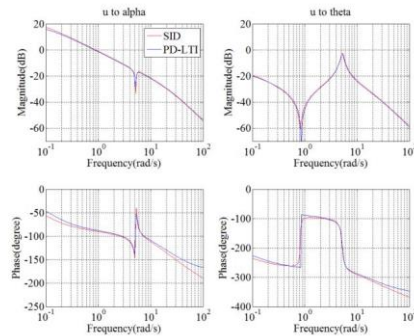


図 5. 提案法を用いた補間

- (7) LPV 同定の提案法が有効であることを実験的に検証している。一つは、回転型振り子システム（学会発表⑤）、もう一つはツインロータシステムへの適用実験である（雑誌論文②, 学会発表⑥）。回転型振り子システムの振り子に錘を取り付け、その位置をスケジューリングパラメータとして局所モデルからグレイボックスの考えを用いて補間モデルを求める。局所モデルを平衡実現で表して

補間する方法（引用文献③）との比較を行った。3箇所て局所モデルを得て補間した結果と、それとは別にブラックボックス同定を行って得たモデルを比較している。平衡実現を用いた補間を図4に、提案法を用いた補間を図5に示す。いずれも左はモータ指令入力からアーム角、右はモータ指令入力から振り子角への周波数特性である。赤線は補間モデル、青線は別途求めたブラックボックスモデルである。いずれの補間法も反共振周波数、共振周波数を再現している。モータ指令入力から振り子角度までのゲイン特性の共振点付近を拡大したのが図6である。左に提案法、右に平衡実現を用いた補間法による結果を示す。提案法のほうが、共振周波数を正確に現していることがわかる。

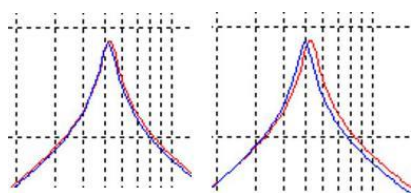


図 6. 共振周波数付近の拡大，提案法(左)と平衡実現による方法(右)

#### <引用文献>

- ① Yoshito Ohta, Realization of input-output maps using generalized orthonormal basis functions, *Systems & Control Letters*, vol.54, no.6, pp.521-528, 2005.
- ② B. R. J. Haverkamp, C. T. Chou, M. Verhaegen, and R. Johansson, Identification of continuous-time MIMO state-space models from sampled data in the presence of process and measurement noise, *The 35th IEEE conference on Decision and Control*, pp.1539-1544, 1996.
- ③ M. Lovera and G. Mercere, Identification for gain scheduling: a balanced subspace approach, *2007 American Control Conference*, pp.1374-1377, 2007.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

##### [雑誌論文] (計 2 件)

- ① Yoshito Ohta, Stochastic system transformation using generalized orthonormal basis functions with applications to continuous-time

system identification, *Automatica*, vol.47, no.5, pp.1001-1006, 2011, 査読有.

- ② 田中秀幸, 太田快人, 沖村祐亮, 第一原理モデルと同定モデルの状態に基づくツインロータ MIMO システムのモデリング 計測自動制御学会論文集, vol.47, no.6, pp.253-261, 2011, 査読有.

##### [学会発表] (計 8 件)

- ① 太田快人, 制御理論屋が見るシステムモデリング, 計測自動制御学会関西支部特別講演会(招待講演), 常翔学園大阪センター(大阪府大阪市), 2015年1月27日.
- ② 太田快人, キャリブレーションのためのパラメータ変動線形モデル, パワートレインキャリブレーションカンファレンス(招待講演), アキバホール(東京都千代田区), 2014年11月5日.
- ③ Marco Bergamasco, Marco Lovera, Yoshito Ohta, Bootstrap-Based Model Uncertainty Assessment in Continuous-Time Subspace Model Identification, *52nd IEEE Conference on Decision and Control*, Florence, Italy, pp.5840-5845, December 10-13, 2013,
- ④ Hideyuki Tanaka, and Yoshito Ohta, Grey-box modeling for mechanical systems in frequency domain, *The 45th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications*, Okinawa, Japan, November 1, 2013,
- ⑤ Xin Tan, Hideyuki Tanaka, and Yoshito Ohta, Grey-box Modeling of Rotary Type Pendulum System with Variable Load, *16th IFAC Symposium on System Identification*, Brussels, Belgium, pp.1263-1268, 11-13 July, 2012.
- ⑥ Hideyuki Tanaka, and Yoshito Ohta, A local approach to LPV-identification of a Twin Rotor MIMO System, *18th IFAC World Congress*, Milan, Italy, pp.9029-9034, August 28 to September 2, 2011.
- ⑦ Marco Bergamasco, Marco Lovera, and Yoshito Ohta, Recursive continuous-time subspace identification using Laguerre filters, *The 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, Orlando, pp.6469-6474, December 12-15, 2011.
- ⑧ Yoshito Ohta, System transformation of unstable systems induced by a shift-invariant subspace, *The 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control*

Conference, Orlando, pp. 1201-1206,  
December 12-15, 2011.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

太田 快人 (OHTA, Yoshito)

京都大学・大学院情報学研究科・教授

研究者番号：30160518