

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420439

研究課題名(和文) グレーボックスモデリングに基づくパラメータ依存システムの同定に関する研究

研究課題名(英文) System identification of parameter-dependent systems based on grey-box modeling

研究代表者

田中 秀幸 (Hideyuki, Tanaka)

広島大学・教育学研究科(研究院)・教授

研究者番号：90303883

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、部分空間同定法の考え方とホワイトボックスモデルを併用することで、パラメータ依存システムに対する高精度で実用的なグレーボックスモデリングアルゴリズムを開発するための基礎を構築することである。主な研究成果は、機械系のグレーボックスモデリングに対し初期モデルを改善する2段階アルゴリズムの提案、パラメータ依存システムの局所構造可同定性、グレーボックスモデリングとパラメータ依存システムに基づく倒立振り子の同定である。回転型振り子を用いて、グレーボックスモデリングに関して具体的な考察を行った。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to develop theoretical basis for effective and practical grey-box modeling algorithms for parameter-dependent systems. The main results of the research are the following: A two-step grey-box modeling algorithm for mechanical systems is developed, in which the state of the grey-box model is estimated by an initial model and an improved model is then computed from the state. Local structural identifiability for parameter-dependent systems is proposed. The rotary-type inverted pendulum system is moreover modeled by taking a grey-box approach based on a parameter-dependent system. Researches have been done by using a rotary-type pendulum system.

研究分野：制御工学

キーワード：システム同定 グレーボックスモデリング 可同定性 回転型倒立振り子 部分空間同定法

1. 研究開始当初の背景

環境やパラメータに依存して変化する、いわゆるパラメータ依存システムは現実によく存在する。これに対し、ゲインスケジューリング制御等による効率の良い制御系設計法が開発されているものの、制御モデルを求める段階が効率性の上でボトルネックとなっている。

制御のための高精度なモデルを求めるためには、実験データだけでなく運動方程式等による第一原理の適切な利用が有効である。実験データ(ブラックボックスによる方法)と第一原理(ホワイトボックスによる方法)の両方に基づくモデルはグレーボックスモデルとよばれる。グレーボックスモデリングによる利点として、「有限個の動作点における実験データ」と「第一原理」に基づく適切な補間により、パラメータ依存システムのモデルを効率良く求められる可能性がある。

研究開始以前、線形システムの同定法である部分空間同定法を拡張するために線形パラメータ変化(LPV: Linear Parameter Varying)システムに着目し、事前情報として第一原理を用いることで非線形なシステムの同定への拡張を試みた。ツインロータMIMOシステムを対象とし、運動方程式に基づく状態空間表現の状態を用いて、有限個の動作点でのブラックボックスモデルから整合性のとれる状態を求め、LPVシステムを求める方法を提案した(図1)。しかし、提案するグレーボックスモデリングはある程度は満足できるモデルを与えていたものの、ホワイトボックスモデルを求める際に見落とした不確かさが大きな影響を与えることがわかってきた。さらに実用的な方法とするためには、パラメータ依存システムに的を絞り、ホワイトボックスモデルの不確かさを考慮したプレーボックスモデリングについて研究する必要があると考えるに至った。

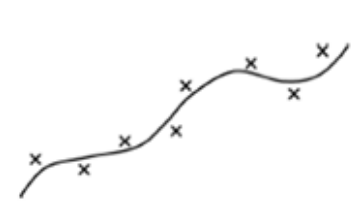


図1: 実験データとパラメータ依存システム の概念図(x: 局所点(同定実験による結果), 実線: 局所点をつなげて一つのパラメータシステムとしたもの)

2. 研究の目的

本研究の目的は、部分空間同定法の考え方とホワイトボックスモデルを併用することで、パラメータ依存システムに対する高精度で実用的なグレーボックスモデリングアルゴリズムを開発することである。運動方程式等の第一原理に基づくホワイトボックスモ

デルには意図せず抜け落ちた不確かさがあることを考慮し、部分空間同定法によるブラックボックスモデルを効果的に利用することで、実用的なアルゴリズムを開発することを目指す。

3. 研究の方法

グレーボックスモデリングでは、ホワイトボックスモデリングにおいて近似により抜け落ちる部分があるため、実用性の観点から簡単な装置でも良いので実験装置が必要不可欠であると考えられる。このため、機械的な制御実験装置として回転型振子を用いて実験と考察を進める。また、以下の方法により研究を進める。

- (1) これまでの研究で機械系を対象にグレーボックスモデリングを行ってきたが、全ての位置が観測できる場合という仮定をおいていた。しかし、ホワイトボックスモデルに不確かさがある場合に次数が増える可能性があるため、この仮定はかなりの制約になると考えられる。したがって、この制約を外すための方法について研究を進める。
- (2) 数値的に精度よくモデルを求めるためのグレーボックスモデリングアルゴリズムを求めるための考察。
- (3) 不安定なシステムへの拡張
これまで、安定なシステムを対象に研究を行ってきたが、不安定なシステムへの拡張をすることにより、より一般的な理論の構築を目指す。
- (4) パラメータ依存システムを大別すると、パラメータを振りながら同定実験を行う大域的方法および、パラメータを固定させて局所点をつなげてモデルを得る局所的方法が存在する。局所的アプローチだけでなく、大域的方法に関する考察を行う。
- (5) グレーボックスモデルの新しい利用法の考察。グレーボックスモデリングに関して、新しい利用法について探る。

4. 研究成果

- (1) 位置をすべて観測できない場合の機械系のグレーボックスモデリング:

対象として連続時間系の機械システム:

$$M\ddot{\zeta}(t) + H\dot{\zeta}(t) + K\zeta(t) = Ru(t)$$

を考える。ここで、 M , H , K は適切なサイズの行列であり、 ζ は機械系の位置を表す。これまでの研究において、機械系のすべての位置 $\zeta(t)$ が観測できている場合について扱ってきた。この場合で M , H , K に未知係数がアフィンに含まれているときには、効率よく未知係数を求めることができる。しかし、 $\zeta(t)$ がすべて観測できるという仮定は制約としては厳しいため、この制約を外すための方法について考察した。そこで、機械系の一部が観測できる以下の観測出力

について考えた．

$$y(t) = L\zeta(t)$$

問題を定式化して解いた結果，この問題は一般的に非凸問題となり効率よく解けないことが分かった．このため，PSO(Particle Swarm Optimization)のような非凸最適化法により初期値を求め，線形行列方程式によりさらに得られた値を改善する方法を提案した．これを第45回 Stochastic System Symposium (SSS '13)で発表した[11]．この研究により，機械系の出力がすべて観測できない場合のグレーボックスモデリングは一般には非凸最適問題となり，次数が変化するような不確かさを扱うことは難しいことを認識した．また，実験を行うにつれて同定実験によって数値的な不安定性も存在するを経験した．

(2) パラメータ依存システムの局所構造可同定性:

パラメータ依存システムを求める際に，得られた結果が物理的に妥当でないものが得られる場合もあった．そこで，数値的に精度よくグレーボックスモデリングを行うために，システム同定において重要な概念の一つである可同定性の観点から考察することとした．グレーボックスモデリングでは，ホワイトボックスモデルに基づいて同定が行われるが，用いるホワイトボックスモデルが可同定でなければ同定を行う意味をなさないためである．

本研究では具体的な考察を行うため，回転型振子に重りを付けて慣性モーメントを変更することによってパラメータ依存システムとなるシステムを用いることとした．

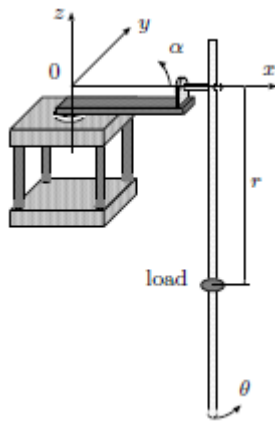


図2: 回転型振子に重りを付けたシステム (重りの位置をパラメータとするパラメータ依存システムとなる)

図2のような対象をパラメータ依存システムとした場合，「重りの位置のような既知のパラメータ()」と，「モデリングで行う際に求めなくてはならない未知の係数()」が存在する．図2のようなシステムを対象とした場合には，は重りの位置 r に相当する．

一方，未知の係数として，機械系の慣性モーメントや摩擦の粘性係数等が相当する．そこで，つぎのようなシステムの可同定性を考えた．

$$M_{\rho,\lambda}\ddot{\xi}(t) + H_{\rho,\lambda}\dot{\xi}(t) + K_{\rho,\lambda}\xi(t) = \Gamma_{\rho,\lambda}u(t)$$

ただし，観測出力は以下の通りであるとする．

$$y(t) = \begin{bmatrix} \xi(t) \\ \dot{\xi}(t) \end{bmatrix}$$

ここで， M や H のついた行列はそれらに依存したものであることを明示している．未知係数に関する局所構造可同定性について定義を行い，その性質を調べた．この結果を，SYSID2015において発表した[4]．

(3) グレーボックスモデリングの不安定なシステムへの適用:

同定実験を行う際，通常は励振信号を加えながら同定を行うことが一般的である．しかし，不安定な対象に励振信号を入力として加えた場合，フィードバックをかけていなければその出力は発散する．このため，一般的には不安定系なシステムを同定する際には，安定化補償器が必要とされる．一方，安定化補償器を設計するためには対象のモデルが必要である．そこで本研究では，グレーボックスモデリングおよびパラメータ依存システムの特徴を生かして，安定な局所点近傍で同定を行い不安定なシステムのモデルを得ることを考えた．



図3: 回転型振子(左側: 安定な平衡点近傍, 右側: 不安定な平衡点近傍)

対象としては，図3のような回転型倒立振子を用いた．回転型振子は振子が下がっているときは安定な平衡点近傍にあり，倒立しているときは不安定な平衡点近傍にある．そこで，運動方程式を用いてこれらの二つの平衡点近傍にあるシステムを一つのパラメータ依存システムとして表現した．具体的にはを既知パラメータとして， $\rho = 1$ のときには安定な平衡点近傍のシステム， $\rho = -1$ のときには不安定な平衡点近傍のシステムとなるパラメータ依存システムとなるように記述した．

機械系のパラメータ依存システムの結果を利用して，同定対象の安定な平衡点近傍 ($\rho = 1$)で未知係数 $M_{\rho,\lambda}$ が局所構造可同定であ

ることを確かめた．未知係数を求め $=-1$ として得られた不安定系のモデルを用いて安定化補償器を設計し，モデルの有効性を検証した．この結果を第 47 回 Stochastic System Symposium (SSS '15) で発表した[3]．
(4) パラメータ依存システムに対する大域的アプローチ：

LPV 部分空間同定法において大域的アプローチを行うと，システムの次数や入出力ベクトルの次元の増加とともにデータ行列のサイズが急激に大きくなるという次元の呪いが知られている．これに対し，Verdult と Verhaegen はカーネルアプローチによりこの問題を回避する方法を提案した．これに関して，双対問題の観点から考察を行った．これらの結果を第 56 回自動制御連合講演会 [10] および第 1 回制御部門マルチシンポジウム [9] で発表をした．なお，双対問題との関係について考察を行ったもののカーネル法に比較して優位な結果は得られなかった．ただし，その際に得られた大域的アプローチに関する知識をシステム制御情報学会誌における解説を行う際に利用している [1]．

(5) グレーボックスモデルの新しい利用法の考察：

グレーボックスモデリングに関して，新しい利用法について探った．一つ目は制御教育の観点から教材を製作しグレーボックスの観点からモデリングを行った．二つ目は可同定性に基づいて，数値的な観点から考察を行った．

制御教育の観点から，対象はホワイトボックスやブラックボックスから見ても妥当なものが望ましい．制御教育で使用される安価で小さな対象を扱う場合には，しばしばマイコンからモーターへの指令電圧は PWM 信号によって行われる．PWM 信号に基づいてホワイトボックスを求め，部分空間同定法に基づくブラックボックスモデリングを行い比較・検証した．この結果を第 57 回自動制御連合講演会で発表した [7, 8]．

局所構造可同定性に基づいて，グレーボックスモデルにおける変数選択に関して数値的検証を行った．局所構造可同定性は行列の正則性によって判定できるが，これを特異値に関する数値に基づいて，グレーボックスモデリングにおいて良い結果の得られる変数の選択方法について考察した．得られた結果について，第 58 回自動制御連合講演会 [5] や第 3 回制御部門マルチシンポジウム [2] において発表した．なお，この研究に先立って閉ループ同定の実験を行うため，その内容に関して SCI '15 で発表した [6] ．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

[1] 田中：LPV システムの同定手法，システム/制御/情報(システム制御情報学会誌)，Vol. 59, pp 174-175 解説 (2015) (査読無)

〔学会発表〕(計 10 件)

[2] 田中：回転型倒立振り子系に対するグレーボックスモデリング，第 3 回制御部門マルチシンポジウム，南山大学名古屋キャンパス (2016 年 3 月 8 日) (査読無)

[3] H. Tanaka and Y. Ohta: Grey-box modeling of an inverted pendulum system via identification of a PD-LTI system, Procs. of the 47th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications (SSS'15), Hawaii, USA, pp. 112-117 (2015 年 12 月 7 日) (査読有)

[4] H. Tanaka and Y. Ohta: Local structural identifiability for a class of parameter-dependent mechanical systems, Preprints of the 17th IFAC Symposium on System Identification (SYSID 2015), Beijing, China, pp. 1403-1408 (2015 年 10 月 21 日) (査読有)

[5] 田中，太田：グレーボックスモデリングの変数選択に関する数値的検証，第 58 回自動制御連合講演会，神戸大学 六甲台第 2 キャンパス(工学部) (2015 年 11 月 14 日) (査読無)

[6] 田中：スペクトル解析法に基づく機械系の閉ループ同定，システム制御情報学会講演会予稿集 (SCI'15)，大阪市北区 中央電気倶楽部 (2015 年 5 月 21 日) (査読無)

[7] 田中：教材用モーター制御系の開発，第 57 回自動制御連合講演会，群馬県伊香保 (2014 年 11 月 11 日) (査読無)

[8] 田中：教材用モーター制御系のシステム同定，第 57 回自動制御連合講演会，群馬県伊香保 (2014 年 11 月 11 日) (査読無)

[9] 田中，太田，奥：LPV 部分空間同定法の最小二乗問題に対する双対問題，第 1 回制御部門マルチシンポジウム，電気通信大学，(2014 年 3 月 7 日) (査読無)

[10] 田中，奥：最近の部分空間同定法における最小二乗法について，第 56 回自動制御連合講演会，新潟大学(工学部) (2013 年 11 月 16 日) (査読無)

[11] H. Tanaka and Y. Ohta: Grey-box modeling for mechanical systems in frequency domain, Procs of the 45th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems, Theory and Its Applications, pp. 149-154 The 50th Anniversary Memorial Hall, University of the Ryukyus (2013 年 11 月 1 日) (査読有)

6 . 研究組織

(1)研究代表者 田中 秀幸

(TANAKA HIDEYUKI)

広島大学・教育学研究科(研究院)・教授

研究者番号：90303883