

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2021

課題番号：17K06495

研究課題名（和文）統計データに基づく補間によるパラメータ依存システムの同定

研究課題名（英文）Identification of parameter-dependent systems by interpolation based on statistical data

研究代表者

田中 秀幸（Tanaka, Hideyuki）

広島大学・人間社会科学研究科（教）・教授

研究者番号：90303883

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、パラメータに依存する動的システムのモデリングとして、統計的な方法により補間を行うためのアルゴリズムの開発を行うことである。この問題に対し、整合性の取れた状態を見つけることが一般には非凸問題になることや、雑音や数値的誤差に脆弱な場合があることが特徴として挙げられる。本研究に関して得られた主な成果は以下のとおりである。パラメータ依存システムに対し与えられた局所点におけるモデルのインパルス応答を求め、カーネル法を使って局所点を補完する方法を提案した。また、線形時不変モデルに対し、不安定な多入力多出力系の同定や雑音に関するさまざまな知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

制御を行う場合に、パラメータに依存して変化する動的システムのモデリングが必要とされる場合がある。パラメータが固定されたもとでシステム同定によって得られたデータに対し、効率良くパラメータ依存システムを求める方法について考察した。データに基づく補間の観点から動的システムのモデリングの考察を進めることで、統計的学習理論等と動的システムのモデリングを融合した新しいシステム同定理論を構築するための第一歩とする。また、局所点におけるモデルの精度も重要であるため、線形時不変系の同定や雑音共分散に関する知見を蓄えるための研究を行った。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research project is to develop identification algorithms for parameter-dependent systems based on data at local parameter points using statistical methods and to study closed-loop identification of linear time-invariant systems and noise covariance. We think that there exist two major difficulties in developing efficient algorithms for this problem: First, it is difficult to find a consistent state from the local points because the problem fall into a non-convex optimization problem in general. Secondly, the models may be highly sensitive to noise and numerical errors, and it is important to develop efficient identification algorithms for linear-time-invariant systems and to study noise covariance. In this project, we proposed an algorithm for interpolating impulse responses of the systems operated by freezing the parameter using a kernel method, developed closed-loop identification algorithms for linear-time-invariant systems, and studied noise covariance.

研究分野：システム同定

キーワード：制御理論 システム同定 パラメータ依存システム カーネル法 閉ループ同定 雑音共分散

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

スケジューリングパラメータに依存して変化するシステムはパラメータ依存システムとよばれ、動作点が変わることによってダイナミクスが変化するシステムや非線形システム等、様々なシステムをモデリングすることができる。パラメータ依存システムの同定には大きく分けて、パラメータを振って同定する大域的な方法とパラメータを止めて同定して得られる局所点の間を補間する局所的な方法がある。

本研究を行うまでに、物理的な情報を用いるいわゆるグレーボックスによる研究を行ってきた。しかし、機械系出力フィードバックの場合に非凸問題となって解を求めることが難しいことや、雑音や数値的誤差にきわめて脆弱な場合があることを経験していた。

これに対し、統計的学習理論の分野で用いられるカーネル法等を用いることで非凸最適化問題に落ちず、数値的にも安定に計算できるのではないかと考え、本研究を行うこととした。また、雑音や数値的誤差にきわめて脆弱な場合があるため、局所点におけるモデルの精度も重要である。このため、線形時不変系に対する同定や雑音共分散について知見を蓄える必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、パラメータ依存システムの局所的方法によるモデリングとして、局所点から統計的な方法により補間を行うためのアルゴリズムの開発を行うことである。データに基づく補間の観点からモデリングに関して考察を進めることで、統計的学習理論等と融合した新しいシステム同定理論を構築するための第一歩とする。また、閉ループ同定や多入力多出力系の表現や同定法についての考察も同時に進める。

3. 研究の方法

線形パラメータ変化(LPV)システムに対し統計データによって補間するためのモデルを開発する。また、実応用の観点から LPV システムの局所点の選択やスケジューリングパラメータが複数ある場合についても考察する。不安定なシステムのモデリングについて考察することで、閉ループ同定や数値的安定性の観点からも考察する。また、多入力多出力系について雑音に対するモデリングに関する知見を蓄える。

4. 研究成果

4. 1: 線形パラメータ変化システムに関する研究について

局所的なシステム同定を行い、補完によりパラメータ依存システムのモデルを得るいわゆる局所同定法では、どの局所点においてシステム同定を行うかは重要な問題である。なぜなら、システム同定において良いモデルを得るためには数値的に安定な計算を行うことが重要であり、必ずしもこの問題は自明ではないためである。図 1 に、パラメータ依存システムの例として、振り子システムに二つの重りを付けたものを示す。二つの重りの位置がパラメータとなった動的システムとなっている。機械系におけるパラメータ依存システムの同定法に基づいて、可同定性に関する行列の条件数を比較することでこの問題に対する一つのアプローチを示した。実験を行い、この結果を第 7 回制御部門マルチシンポジウムで発表した。

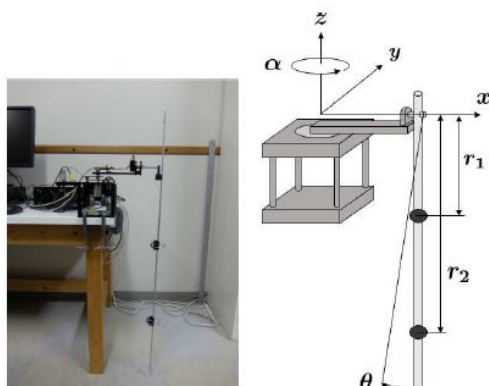


図 1: 振り子システム

つぎのパラメータ r によって係数が表される連続時間系を考える。

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A(r)x(t) + B(r)u(t) \\ y(t) &= C(r)x(t)\end{aligned}$$

ただし、 $u(t), y(t), x(t) \in \mathbb{R}^n$ はそれぞれシステムの入出力および状態である。システム同定に基づいてこのシステムをモデリングすることを考えると、状態を整合性の取れたものにする必要があり、補完により簡単にモデルが得られるとはいいたい。そこで、与えられた局所点が線形時不変系になることを利用し、この点におけるモデルのインパルス応答を求め、カーネル最小二乗法により局所点を補完する方法を提案した。パラメータの局所点 $r_i (i = 1, \dots, g)$ におけるインパルス応答がモデルとして、以下のように与えられているとする。

$$\{y(0, r_i), y(1, r_i), \dots, y(2\tau, r_i)\} \quad (\tau > n)$$

ただし、 $y(k, r_i) (k = 0, 1, \dots, 2\tau)$ は $r = r_i$ における線形時不変系のインパルス応答であり、サンプリング時間は T_s とする。カーネル最小二乗法により、局所点以外のインパルス応答を推定し、次のように得られたとする。

$$\{\hat{y}(0, r), \hat{y}(1, r), \dots, \hat{y}(2\tau, r)\}$$

$r = a$ の場合にハンケル行列をつぎのように構成する。

$$H_\tau(a) := \begin{bmatrix} \hat{y}(1, a) & \cdots & \hat{y}(\tau, a) \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \hat{y}(\tau, a) & \cdots & \hat{y}(2\tau - 1, a) \end{bmatrix}$$

このハンケル行列の特異値分解から、拡大可観測行列および拡大可到達行列を求め状態空間行列を求める。具体的にカーネル最小二乗法を用いるために、つぎのように関数 $f(x)$ を考える。

$$\hat{y}(k, r) = f(x), \quad x = \begin{bmatrix} k \\ r \end{bmatrix}$$

また、 $f(x) = w^\top \phi(x)$ と表されるとし、 $\phi(x) \in \mathbb{R}^{2\tau g}$ は与えられた非線形関数、 $w \in \mathbb{R}^{2\tau g}$ はデータに基づいて決める変数である。局所点の数が g 個与えられていることと、それに対しインパルス応答のデータがそれぞれ 2τ 個ずつ与えられていることから、データ数は $2\tau g$ である。また、非線形関数 $\phi(x)$ はガウシアンカーネルによって以下のように定められるとする。

$$\begin{aligned}\phi(x) &= [k(x_1, x) \quad \cdots \quad k(x_{2\tau g}, x)]^\top \\ k(\xi, x) &:= \exp(-\beta(\xi - x)^\top (\xi - x))\end{aligned}$$

ただし、 β はハイパーパラメータである。したがって、 $y_j = f(x_j)$ とおいて ($j = 1, \dots, 2\tau g$)、 $Y := [y_1 \quad \cdots \quad y_{2\tau g}]$ および $K := [\phi(x_1) \quad \cdots \quad \phi(x_{2\tau g})]$ とおくと、 $Y = wK$ を得る。正則化パラメータ $\lambda > 0$ を用いることにより、 $w = YK^\top(KK^\top + \lambda I)^{-1}$ を得る。

提案法に対し、図 1 において重りが一つの振子システムをパラメータ依存システムとしたものを考え、シミュレーションを行ってその妥当性を調べた。重りの場所が 4 点の局所点が与えられたとし、与えられていない点のモデルを求めた。その結果の一つを図 2 に示す。青い点線が理論値であり、赤い実線が提案法により求めたものである。インパルス応答についてはよく一致していることが分かる。ゲイン線図については周波数 10^0 rad/s 付近に現れている零点による谷について誤差はあるが、それ以外の 20rad/s 以下の周波数では良い結果が得られている。状態を一致させるという方法ではないものの、局所的な方法の利点を生かし比較的シンプルな方法で良い結果が得られたので、この結果を SICE2019 で発表した。

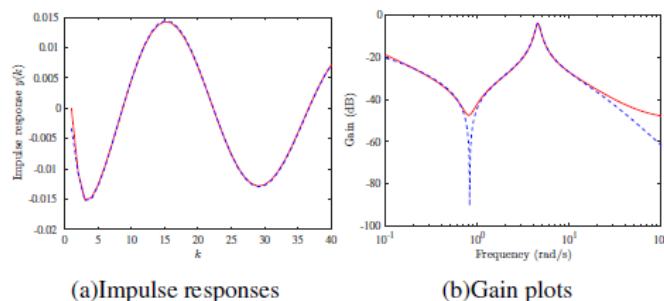


図 2: インパルス応答とゲインプロットの比較

4. 2: 多入力多出力システムや雑音に関する知見の蓄積

4. 2. 1: 単位円周上に近い零点を持つ確率系について

部分空間同定法を行う際に確率系の初期値の影響が残るため一致推定が得られない問題について、知見がいくつか得られた。つぎのシステムを考える。

$$\begin{aligned}\hat{x}_{t+1} &= A\hat{x}_t + \hat{K}e_t \\ y_t &= C\hat{x}_t + e_t \\ E\{e_s e_t^\top\} &= \hat{\Omega}\delta_{st}\end{aligned}$$

ただし、 y_t は確率系の出力であり \hat{x}_t は状態、 e_t は期待値 0 の白色雑音である。このとき、 e_t から y_t までのシステムにおける零点、すなわち、 $A - \hat{K}C$ の固有値が単位円周に近いものがある場合について考える。このとき、 $(A - \hat{K}C)^\tau$ に対し τ があまり大きくないと、この行列が 0 に収束せず、確率系のシステム同定をする際に初期値の影響が残り零点が正しく同定できない。従来の部分空間同定法ではこれに対処する方法がまったくなかったが、徳島大学の池田により凸最適化により初期値の影響に対処する方法が提案されたため研究協力をあおいだ。初期値の影響および正実性を考えた上で状態と白色雑音入力の共分散行列を推定する方法について研究を進め、IFAC2020 World Congress で発表した。

4. 2. 2: 閉ループ同定について

同定対象の入出力のみを観測する閉ループ同定においても、確率系と同様に閉ループ系の初期状態の影響が出る。同定する対象の状態がモデルに与える影響について考察し、SYSID 2018 において発表した。また、閉ループ下にある線形時不変系について有限区間上の実現を行い、初期値の影響を除去する方法について考察を行った(SICE 2018)。また、初期状態を考慮した部分空間同定法のためのもう一つの半正定値計画問題についても結果が得られ、研究協力者(徳島大学池田)による発表が行われた(第 61 回自動制御連合講演会)。さらに、研究協力者(徳島大学池田)とともに提案した凸最適化に基づくカルマンゲインとイノベーションの共分散行列の推定によって、閉ループ同定のバイアスを減らすことが可能であることを示した。この結果について、研究協力者(徳島大学池田)と共著で IFAC2020 World Congress で発表した。

結合入力出力アプローチに基づく不安定系の閉ループ同定に関する考察も進めた。線形時不変システムの積と対応するブロックテプリッツ行列の積について考察した。それに基づいて、OKID と呼ばれる閉ループ同定手法(Juang ら 1993)とこれまでに提案した閉ループ同定手法との比較を行った。この結果を SICE 2021 で発表した。

4. 2. 3: 雑音共分散について

雑音共分散について、ガウス・マルコフモデルにおけるプロセスノイズと出力ノイズの共分散行列の推定値について、研究協力者(徳島大学池田)と解析した。いくつかの数値シミュレーションから、これまでに提案した CCA (正準相関分析) 重み付け行列を用いたノイズ共分散推定法が良い性能を示すことが示された。対応する問題に対する BLUE (best linear unbiased estimate) が導出され、提案手法の推定値と BLUE を比較し、第 64 回自動制御連合講演会で研究協力者(徳島大学池田)が発表した。また、BLUE における重み付け行列のランクについて数値的に解析した結果について、研究協力者(徳島大学池田)が MSCS 2022 で発表した。

4. 3: まとめ

パラメータ依存システムに対して局所法による同定するために、カーネル最小二乗法を用いることにより、局所点で得られていないパラメータに対するインパルス応答を推定する方法を提案した。また、局所点におけるモデルの精度も重要であると考え、線形時不変系に対する同定や雑音共分散について研究を行った。本研究課題について、研究協力者(徳島大学池田)との共同研究により、線形時不変系に対する同定について、本研究開始当初に想定していたよりも多くの結果が出た。しかし、この知見により不安定系の同定パラメータ依存システムの同定についての理解が進み、研究が進むものと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 H. Tanaka and K. Ikeda	4. 巻 53(2)
2. 論文標題 Subspace Identification Algorithm for Stochastic Systems Equipped with Zeros Close to Unit Circle	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine	6. 最初と最後の頁 2429-2434
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ifacol.2020.12.046	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 K. Ikeda and H. Tanaka	4. 巻 53(2)
2. 論文標題 An Estimation Method of Innovations Model in Closed-Loop Environment with Lower Horizons	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine	6. 最初と最後の頁 889-894
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ifacol.2020.12.848	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Hideyuki Tanaka and Kenji Ikeda	4. 巻 51
2. 論文標題 Closed-loop subspace identification taking initial state into account	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine	6. 最初と最後の頁 604-609
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ifacol.2018.09.229	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 K. Ikeda and H. Tanaka	4. 巻 -
2. 論文標題 An SDP formulation for consistent estimate of innovations model	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. of the 2017 Asian Control Conference (ASCC2017)	6. 最初と最後の頁 1772-1777
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ASCC.2017.8287442	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Hideyuki Tanaka and Kenji Ikeda
2. 発表標題 A closed-loop subspace identification algorithm based on finite-interval realization
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2018, September 11-14, 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenji Ikeda and Hideyuki Tanaka
2. 発表標題 On the uniqueness of spectral density function in an SDP problem for the estimation of innovations model
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2018, September 11-14, 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hideyuki Tanaka and Kenji Ikeda
2. 発表標題 Product of block Toeplitz matrices from the viewpoint of closed-loop identification
3. 学会等名 Proceedings of the SICE Annual Conference 2021 (SICE 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池田 建司, 田中 秀幸
2. 発表標題 雑音共分散行列の推定値の分散解析
3. 学会等名 第64回 自動制御連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池田 建司, 田中 秀幸
2. 発表標題 BLUEにおける重み行列のランクに関する数値解析
3. 学会等名 第9回 制御部門マルチシンポジウム(MSCS 2022)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Ikeda and H. Tanaka
2. 発表標題 On the Uniqueness of the Estimate of Innovations Model
3. 学会等名 2019 12th Asian Control Conference (ASCC), Kitakyushu-shi, Japan (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenji Ikeda and Hideyuki Tanaka
2. 発表標題 Covariance of the Coefficient of the Transfer Function Estimated Via PO-MOESP Method
3. 学会等名 the SICE Annual Conference 2019 September 10-13, 2019, Hiroshima, Japan (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideyuki Tanaka and Kenji Ikeda
2. 発表標題 Modeling of Parameter Dependent Systems Using the Impulse Response and the Kernel Method
3. 学会等名 the SICE Annual Conference 2019 September 10-13, 2019, Hiroshima, Japan (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中 秀幸, 太田 快人
2. 発表標題 可同定性に基づくパラメータ依存システムに対する同定実験設計 - 回転型振子系を用いた考察 -
3. 学会等名 第7回 制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 池田 建司, 田中 秀幸
2. 発表標題 初期状態を考慮した部分空間同定法のためのもう一つの半正定値計画問題
3. 学会等名 第61回自動制御連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 池田 建司, 田中 秀幸
2. 発表標題 不可到達な確率系をもつ安定限界なシステムの同定
3. 学会等名 第6回 制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideyuki Tanaka, and Kenji Ikeda
2. 発表標題 Identification of linear stochastic systems taking initial state into account
3. 学会等名 Proceedings of the SICE Annual Conference 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 池田 建司, 田中 秀幸
2. 発表標題 変数変換を用いたイノベーションモデル推定問題の定式化
3. 学会等名 第60回自動制御連合講演会, SuF3-4
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田中 秀幸, 池田 建司
2. 発表標題 半正定値計画問題により初期状態を考慮した確率部分空間同定法
3. 学会等名 第60回自動制御連合講演会 SuF3-5
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 池田建司, 田中 秀幸
2. 発表標題 イノベーションモデル推定のためのSDP問題における可同定性について
3. 学会等名 第5回 制御部門マルチシンポジウム Sa43-3
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中 秀幸
2. 発表標題 Granger causality とシステム同定
3. 学会等名 第5回 制御部門マルチシンポジウム, Fr43-2
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	池田 建司 (Ikeda Kenji)	徳島大学 (16101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------