

令和 5 年 5 月 16 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17H03281

研究課題名(和文) 不確かなネットワーク内に存在するシステムの同定

研究課題名(英文) Identification of systems in uncertain networks

研究代表者

杉江 俊治 (Sugie, Toshiharu)

大阪大学・大学院工学研究科・特任教授

研究者番号：80171148

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：制御器や外部信号情報に関して不確かな情報しか利用できない閉ループ環境内に存在する動的システムを対象として、対象システムの入出力データのみからその数学モデルを構築する閉ループシステム同定に関する研究をおこない以下の成果を得た。対象システムの「安定・不安定」や「線形・非線形」にかかわらず、制御器の不確かな情報下で同定ができるシステム同定の新たな枠組みを提案し、その有効性を詳細な数値例により例証した。対象システムが線形系の場合には、モデル次数を系統的に決定できる手法を提案した。また、線形スカラー系の場合には、制御器情報が全く無い場合にも、連続時間系のモデルを高精度に構築できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

閉ループ環境下にあるシステムの同定は、従来より産業界において重要な問題であったが、近年では、人間がドローンを操縦するマン・イン・ザ・ループや、ネットワークで構築される大規模システムなどが増え、本課題の対象とする不確かなネットワーク下にあるシステムの同定法がますます重要となっていた。本課題の成果によって、このような問題に対応できる、実用性の高いシステム同定手法が与えられた社会的意義は大きい。学術的にも、不安定系のモデリングに対して、連続時間系・離散時間系を含め、入出力データのみから高精度モデルの構築を可能にした点は意義が大きい。

研究成果の概要(英文)：We have conducted research on closed-loop system identification, in which a mathematical model of a dynamic system that exists in a closed-loop environment with uncertain information about the controller and external signals is constructed from only the input-output data of the system. We proposed a new framework for system identification that enables identification under uncertain controller information regardless of whether the target system is stable or unstable, linear or nonlinear, and demonstrated its effectiveness through detailed numerical examples. When the target dynamical system is linear, we proposed a method that can systematically determine the model order. In the case of a linear scalar system, it is shown that a continuous-time system model can be constructed with high accuracy even when there is no controller information at all.

研究分野：制御工学

キーワード：システム同定 線形システム 非線形システム

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 閉ループ同定の必要性: システムの入出力データからその動特性モデルを構築するシステム同定は、システム制御分野における重要な基盤研究の一つである。従来研究は「安定」な線形離散時間システムを対象とした開ループ環境下(すなわちフィードバックループがなく当該システム単体)での同定がほとんどであり、これに関しては成熟した研究分野であるといえる。一方で、閉ループ環境下でのシステム同定が、近年、ますます重要となっている。たとえば、ヒューマンインザループ、すなわち人間自身が制御器となって対象システム(たとえばビークルやドローン)を操縦している場合は、その一例である。また、近年注目されるネットワーク化システムでは、その中の一つのサブシステムに着目すると、一般には、この出力は他のサブシステム群のネットワークを介してフィードバックされる。すなわち、当該サブシステムをモデル化したい場合、閉ループ環境下で同定をおこなうこととなる。また、同定対象システム自身が「不安定」な場合、これを何らかの制御器で安定化した上で、データを取得することが必要となり、閉ループ環境下でのシステム同定が必須となる。

(2) 既存研究の現状: 閉ループ環境下でのシステム同定は出力に加わる雑音と入力信号に相関があるため開ループの場合とは異なる困難性があることはよく知られている。閉ループ同定の手法も多く提案されているものの、まだまだ実用上使えるほど成熟しているとはいえない。たとえば、同定対象システムとそれを安定化する制御器から構成される閉ループシステムの同定において、制御器は既知であると仮定されることがほとんどであるが、実用上、制御器の正確なモデルが得られない場合も多い。前述のヒューマンインザループの場合は、まさしくこれに該当する。また、大規模ネットワーク化システムにおいても、制御器に相当するのは、当該サブシステム以外の大規模ネットワーク部分となり、その正確なモデルを既知とすることはとうてい現実的でない。さらには現実の産業機器においても、PID(比例積分微分型)制御を基本としながら飽和要素や積分器リセット等の非線形操作を含む場合が多い。そのような場合は制御器のおおよその線形近似の情報しか得られない。

(3) 既存研究の問題点: 制御器の正確な情報が不要な閉ループ同定手法もいくつか存在するが、既存の同定手法は粗く言って、「予測誤差法」と「出力誤差法」に分けられる。前者は、原理的には同定対象が不安定システムであっても適用できるものが存在するが、雑音のモデルが必要で、低次システムが対象の場合でも高次モデルとなる傾向にある。また、同定精度が雑音モデルの正確さに大きく依存するという根本的な問題が残る。これに対して、後者は、詳細な雑音モデルが不要であり、この点で実用上重要といえる。しかし、同定対象システム自身が不安定な場合、現実に存在する外乱やシステム雑音が、出力に大きく影響するため、これを扱うことができない。すなわち、本来閉ループ同定が必要となる不安定システムを扱えないという大きな問題が残る。

(4) 本研究課題が解決すべき点：以上述べたことを要約すれば、不確かなネットワーク内(制御器、雑音モデル、当該システム以外のネットワーク内のシステム等の正確な情報が得られない閉ループ環境)に存在するシステムの同定問題は、その重要性にも拘わらず、実用上解決する方法が見当たらないといえる。さらにいえば、先のヒューマンインザループや大規模ネットワーク化システムにおいては、制御器や同定対象が非線形システムの場合にも適用できることが実用上重要となるが、既存の閉ループ同定手法はいずれも線形システムに限定したものであり、それを非線形システムに拡張することは極めて難しい。また、既存の大多数の同定手法は対象システムの離散時間モデルを求めるものであるが、現実の物理システムは連続時間システムとして記述するのが自然であり、種々の制御手法とも整合性が良い。この観点からすれば、連続時間モデルも扱える閉ループ同定法の開発が望まれる。

## 2. 研究の目的

上記の研究背景の下、本研究では不確かなネットワーク内に存在するシステムを同定する基礎的な枠組みを構築することを目的とする。具体的には、下記の要件を満たす実用性の高い閉ループ同定手法を確立することを目指す。

- 同定対象として安定システム・不安定システムを統一的に扱える。
- 対象システムの入出力データのみを用いる。
- 制御器の詳細情報が不要。
- 雑音の精密なモデル化が不要。
- 非線形システムへの拡張性がある。
- 連続時間モデルも扱える。

## 3. 研究の方法

(1) 安定化出力誤差法の確立：申請者らは、「不安定」なシステムを同定する際には、出力誤差をフィードバックして対象システムのモデルを安定化することが必要であることに気づき、これに基づく「安定化出力誤差」法の基本的なアイデアを本研究の申請時点で有していた。本研究の開始時点では、まだアイデアの初期段階であったが、対象システム自身の「安定・不安定」にかかわらず、閉ループ系の内部にある対象システムの「入出力データのみ」から、対象システムのモデルが構築できる一つの手法として期待される。より精密な解析と詳細なシミュレーションおよび基礎実験を通じて、この手法の適用範囲を明確にしつつ、実用性のある同定手法として確立していく。

(2) システム次数最小化に着目した部分空間同定法の拡張：離散時間線形系を対象とした手法として部分空間同定法があるが、その中でもシステムモデルの次数最小化を目的とするものに着目する。これは、他の多くの同定手法と異なり、多入出力系を自然に扱えることおよびシステ

ムモデルの次数を決定しやすいという利点を持つ。既存手法は対象システムが安定な開ループ同定に関するものであるが、これを閉ループ系に拡張する。また、入出力データの射影などを適用することによりモデルの高精度化をはかる。

(3) 機械学習的手法の応用：近年のシステム同定においては、機械学習分野の「カーネル法」を用いた同定法が注目されている。少ないデータからでも比較的高精度なノンパラメトリックモデルを得られる点が大きな利点である。この手法も安定系を対象とした開ループ同定手法であるが、閉ループ同定や制御応用への展開を試みる。

(4) ネットワーク化システムへの応用：本課題の応用として、今日的な重要性を有するのが、ネットワーク化システムの信号処理や制御への応用である。不確かなネットワーク化システムや各サブシステムの利用できる情報に制約がある場合などについて検討を進める。

#### 4. 研究成果

(1) 安定化出力誤差法（一般的な枠組みの確立）：非線形系を含む一般的な閉ループ同定の非常にシンプルな枠組みを確立した。それは、既存の出力誤差法を拡張した形式であり、対象システムの「不安定/安定」に依存せずにその「入出力データのみ」から同定が可能な枠組みである。また、制御器の詳細な情報を必要とせず、モデルのパラメータが与えられたときに出力データがシミュレーション等で生成さえできれば同定が可能となるもので、「線形系/非線形系」に関わらず適用できる。さらには「連続時間系/離散時間系」のどちらにも適用できる。既存手法では、制御器に関する情報が不確かな場合、たとえば不安定な非線形系を同定することは不可能であったが、それが可能となる。制御対象の一部が既知のグレイボックスモデルの同定、現実的な複雑さを有する外乱の存在下での同定、人間が操作するドローンの非線形モデルの同定など詳細なシミュレーションにより、その有効性を検証した。基礎実験として、人間が操作するドローンの線形モデルを同定し、そのモデルを用いた高精度制御の実現を確認している。そして、多変数線形システムを対象とするものであるが、同定されたモデルが正確になるための条件も解析によって明示している。この手法は、対象システムの構造が既知、すなわちシステムパラメータさえ分かれば、対象システムが完全に記述できることを仮定しており、この仮定を緩和することが今後の課題としてあげられる。また、同定には数値最適化を用いるが、一般には非凸最適化問題となるため、計算負荷の軽減も課題大きさも課題の一つとなる。

(2) システム次数最小化に着目した閉ループ同定法：離散時間線形システムを対象として、制御器の情報をいわずに、閉ループ環境内にある対象システムの「入出力データのみ」を用いて、最小次数のモデルを同定する手法を部分空間法の枠組みで確立した。システム次数の最小化には、核ノルム最小化が有効であることは知られているが、これは計算負荷が高く、短い入出力データしか利用できない。一方で、長いデータを扱うことができれば観測雑音に対する耐性が期待

できる。このため、入出力データを適切な空間に射影して圧縮した後、核ノルム最小化を用いる手法を提案した。詳細なシミュレーションにより、その有効性を検証している。この手法の最大の特長は、システムの動特性と雑音の特性が明確に分離でき、モデル最小次数の決定が非常に容易な点にある。これは既存手法と大きく異なる。

(3) 連続時間線形システムの閉ループ同定：1入力1出力の線形システムを対象として、制御器や外部励起信号の情報を全く用いることなく、閉ループ環境にあるシステムを同定する手法を与えた。オブザーバを利用して、その出力誤差を最小化するものであるが、凸最適化問題に帰着でき、計算負荷は非常に小さい。安定化出力誤差の枠組みに属するものであり、耐雑音性や対象システムの「安定/不安定」に関わらず適用できるなどの安定化出力誤差法の利点を有している。さらには、入出力データに一定値外乱が加わる場合にも対応可能であり、既存手法とは一線を画したものとなっている。

(4) 機械学習的手法の同定および制御への応用：システム同定に関しては、カーネル法に着目した同定用入力信号の設計法、得られたノンパラメトリックモデルをパラメトリックモデルに変換する手法などについて検討した。そしてカーネル法を不安系の閉ループ同定に適用する簡単な手法を提案した。一方で、制御応用に関しては、フィードフォワード項を閉ループ系のデータから再調整する手法や、PID制御のパラメータをベイズ推定の考え方を利用して自動調整する手法などを与えた。

(5) ネットワーク化システムへの応用：信号処理への応用としてグラフ信号の復元手法を提案した。制御への応用として、マルチエージェントのフォーメーション制御について検討し、大規模システムに対応できる分散的な制御手法を提案し、その解析を進めた。制御プロセスが階層的に構成されている点が特長であり、フォーメーションが大域的に実現できる条件などを明らかにしている。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6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 I. Maruta and T. Sugie	4. 巻 10
2. 論文標題 Closed-Loop Subspace Identification for Stable/21413 Unstable Systems Using Data Compression and Nuclear Norm Minimization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 21412/21423
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2022.3154017	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 I. Maruta and T. Sugie	4. 巻 10
2. 論文標題 A Simple Framework for Identifying Dynamical Systems in Closed- Loop	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 31442/31453
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2021.3060153	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 中野、藤本、杉江	4. 巻 55
2. 論文標題 ベイズ最適化を用いた制御器チューニング -- 提案と実験検証 --	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 269/274
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.9746/sicetr.55.269	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Z. Sun and T. Sugie	4. 巻 9
2. 論文標題 Identification of Hessian Matrix in Distributed Gradient-Based Multi-Agent Coordination Control Systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Numerical Algebra, Control and Optimization	6. 最初と最後の頁 297/318
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3934/naco.2019020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Fujimoto, W. Kasai, T. Sugie	4. 巻 11
2. 論文標題 Informative Input Design for Bayesian Identification of LPV Systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration	6. 最初と最後の頁 214-220
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/jcmsi.11.214	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 芋田 総之, 東 俊一, 杉江 俊治	4. 巻 54
2. 論文標題 ARモデルと行列ランク最小化によるグラフ信号の修復	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 737-744
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.54.737	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27件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 T. Sugie
2. 発表標題 Direct closed-loop identification of continuous-time systems using fixed-pole observer model
3. 学会等名 61st IEEE Conference on Decision and Control (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Sugie
2. 発表標題 On an observer-based approach for continuous-time closed loop identification, -- Convexity and numerical evaluation ----
3. 学会等名 The SICE Annual Conference 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Sugie
2. 発表標題 Joint input-output identification of unstable systems with Kernel regularization
3. 学会等名 The SICE Annual Conference 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Sugie
2. 発表標題 Continuous-time system identification in uncertain closed loop
3. 学会等名 10th IFAC Symposium on Robust Control Design (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Sugie
2. 発表標題 Kernel based parametric modeling with accurate step responses
3. 学会等名 21st IFAC World Congress (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Sugie
2. 発表標題 Numerical evaluation on frequency domain nonparametric modeling for stable/unstable systems with I/O noise
3. 学会等名 21st IFAC World Congress (国際学会)
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 T. Sugie
2. 発表標題 On global convergence of area-constrained formations of hierarchical multi-agent systems
3. 学会等名 59th IEEE Conference on Decision and Control (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 村里直樹
2. 発表標題 正規化パラメータ感度に基づく大規模システムのパラメータ推定のための最適センサ配置
3. 学会等名 第8回計測自動制御学会制御部門 マルチシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Cao
2. 発表標題 Almost Global Convergence for Distance and Area Constrained Hierarchical Formations without Reflections
3. 学会等名 IEEE 15th Int. Conf. on Control and Automation (ICCA) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 丸田
2. 発表標題 安定化出力誤差法による閉ループシステム同定におけるノイズモデルの同定
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 W. Kasai
2. 発表標題 Update of Feedforward Compensation with Experimental Data Based on Kernel Regularized Identification
3. 学会等名 The 18th IFAC Symposium on System Identification (SYSID2018 (国際学会))
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 I. Maruta
2. 発表標題 Stabilized Prediction Error Method for Closed-Loop Identification of Unstable Systems
3. 学会等名 The 18th IFAC Symposium on System Identification (SYSID2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Sugie
2. 発表標題 On a Hierarchical control Strategy for Multi-Agent Formation without Reflection
3. 学会等名 IEEE Conference on Decision and Control (CDC2018), (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山岸 拓司
2. 発表標題 GRUニューラルネットワークを用いた非線形システム同定に関する考察
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 平尾 拓也
2. 発表標題 ノルム最小化を用いた連続時間閉ループ同定
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 河西 航
2. 発表標題 カーネル正則化法を用いたフィードフォワードチューニングの実験検証
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 冬 菲
2. 発表標題 フリッピングを許容しない階層型フォーメーション制御に関する考察
3. 学会等名 第6回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 堀 勇貴
2. 発表標題 ステップ応答を考慮したカーネル法に基づくパラメトリックシステム同定
3. 学会等名 第6回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Khurewattanakul
2. 発表標題 On Nonparametric Modelling in the Frequency Domain
3. 学会等名 第6回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 C. Tsvonnorov
2. 発表標題 Kernel based approach for PID controller tuning of nonlinear systems
3. 学会等名 第6回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Sugie
2. 発表標題 Closed-loop Subspace Identification with Long Data based on Nuclear Norm Minimization
3. 学会等名 56th IEEE Conference on Decision and Control (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Fujimoto
2. 発表標題 Goal-Oriented Input Design for Kernel-Based System Identification
3. 学会等名 56th IEEE Conference on Decision and Control (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Sugie
2. 発表標題 On Noise Tolerant Closed Loop Identification of MIMO systems
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 原田健太郎
2. 発表標題 クワッドコプターの閉ループ同定実験に関する考察
3. 学会等名 第5回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山西利和
2. 発表標題 多チャンネル信号の線スペクトル推定とその応用
3. 学会等名 第5回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 河西航
2. 発表標題 カーネル法を用いた二自由度制御器チューニング
3. 学会等名 第5回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三田拓也
2. 発表標題 個体差を考慮したAGVの高速走行制御
3. 学会等名 第5回制御部門マルチシンポジウム
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
研究分担者	丸田 一郎  (Maruta Ichiro)  (20625511)	京都大学・工学研究科・准教授   (14301)	
研究分担者	東 俊一  (Azuma Shun-ichi)  (40420400)	名古屋大学・工学研究科・教授   (13901)	

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
---------	---------