

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：13601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2021

課題番号：19K23511

研究課題名（和文）動的システムの制御に資する簡便なパラメータによるモデル表現およびデータ駆動推定

研究課題名（英文）Model representation and data-driven estimation with simple parameters for control of dynamic systems

研究代表者

種村 昌也（Tanemura, Masaya）

信州大学・学術研究院工学系・助教

研究者番号：10846885

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では未知の線形システムに対して、数学モデルを求めることなく、システムの入出力データに基づきシステムのパラメータを求める手法を提案した。具体的には、システムの受動性、安定余裕の下界情報を推定できることを示した。また、人間とロボット群の協調制御系へ本手法が有効であることを示した。そこでは、人間の受動性推定を行うことで協調制御系の安定性を判別する手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
制御系設計を行う場合、一般には制御対象の数学モデルが必要となる。しかし、大規模なシステムにおいて正確な数学モデルを求めることが難しい場合が多い。本研究では、数学モデルを用いずに入出力データのみを用いて、システムのパラメータを推定し、その値に基づいて安定化制御器の設計を可能にした。これにより、データ駆動制御の有効性の拡大に成功したと考えている。

研究成果の概要（英文）：For unknown linear systems, we proposed a method to obtain system parameters based on the input-output data of the system without obtaining a mathematical model. Specifically, we show that the method can estimate the level of the passivity and the lower bound of stability margins of the system. We also show that our method is effective for cooperative control of humans-robot networks. We developed a method to discriminate the stability of the cooperative control system by estimating the passivity of the human.

研究分野：データ駆動制御

キーワード：データ駆動制御 受動性 安定余裕 人間とロボット群の協調制御系

1. 研究開始当初の背景

近年、システムの複雑・大規模化といったことから正確なモデルを得ることが困難な場合がある。こういった背景から、システムをある簡便なパラメータにより特徴づけ、そのパラメータから制御系設計を行うという研究が進められている。ただし、これらの研究では、そのパラメータをどのように求めるかについては議論されていない。本研究では、近年の情報インフラ技術の向上に伴い大量のデータ（ビッグデータ）が扱えるようになってきていることに注目し、数式モデルが未知という状況の下で、システムの入出力データからシステムを特徴付ける簡便なパラメータを推定することが目標である。本研究では特にシステム制御理論の観点から重要となるシステムの安定度合いを特徴付け、入出力データからそのパラメータを推定することを目指す。この研究によって、複雑なモデリングを回避したシステムの特徴づけが可能となり、現代の社会とマッチした次世代の制御理論の基礎となると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では特にシステム制御理論の観点から重要となるシステムの安定度合いを特徴付け、入出力データからそのパラメータを推定することを目指す。システムの安定度合いが推定できれば、システムを安定化するフィードバック制御器のクラスを知ることができ、実応用の際に大変有用な手法となる。本研究では以下の課題に取り組む。

1. データ駆動型受動性推定手法におけるデータ数の削減
2. 受動性推定手法の人間のロボット群の協調制御系への応用
3. 安定余裕の推定手法の構築

安定性の度合いを測るひとつの指標として受動性という概念があり、システムの受動性の度合いがわかれば、受動定理により安定化制御器のクラスを測ることができる。そこで、現在までに入出力データから受動性を推定する方法論が議論されている。本研究では、推定に必要なデータ数を削減した受動性推定手法の構築である。

さらに、人間とロボット群の協調制御系へデータ駆動型受動性推定手法を応用する。人間とロボット群の協調制御系において、人間が受動性を有していれば閉ループ系を安定化するロボット群を構成できることが知られている。しかし、人間の正確なモデル化は難しい場合が多い。そこで、データ駆動型受動性推定手法を活用し人間の受動性を推定する。

また、より直接的に安定度合いを測る指標として安定余裕という概念がある。安定余裕はゲイン余裕と位相余裕という二種類の概念に分けられ、それぞれの安定余裕を推定することができれば安定化制御器の設計が可能となる。しかし、これまでに入出力データから安定余裕を推定するという方法は確立されていない。そこで本研究では、システムの数式モデルなしで入出力データから安定余裕を推定することを目指す。

3. 研究の方法

従来の受動性推定手法では、受動性の度合いを推定する問題を最適化問題に定式化し、入出力データを活用し、勾配法に基づいた最適化手法により受動性を推定している。本研究では、基本的に勾配情報を活用するが、共役勾配法の考え方を活用し、過去の探索空間において最適な入力列を決定する方法を構築する。

また、データ駆動型受動性推定手法を人間とロボット群の協調制御系における人間の受動性の推定問題に適用し、入出力データから人間の受動性を推定する。ただし、データ駆動型推定手法をそのまま適用すると人間が正常に反応できない高周波な入力が入加されてしまう可能性がある。そこで、入力の高周波数成分を限定したデータ駆動型受動性推定手法の構築をする。

安定余裕は周波数領域で定義された概念であり、時間領域の入出力データを用いて直接推定することができない。本研究では、周波数領域の概念と時間領域の概念をつなぐ重要な数学的ツールである KYP 補題を活用することで、安定余裕を入出力データから推定できる形に変換し、推定手法の構築を行う。

4. 研究成果

(1) データ駆動型受動性推定におけるデータ量の削減と収束性の証明

データ駆動型受動性推定において、少ないデータ数で正確な受動性インデックスを推定することは重要である。従来の勾配法に基づく方法を改善し、過去の探索空間の中で最適な入力列を生成し、受動性インデックスを推定する方法を提案した。そして、提案手法において、勾配がゼロにならない限り有限回数で最適解（受動性インデックス）を推定できることを示した。さらに本手法を多入出力系へ拡張することで、適用範囲の拡大に成功した。本手法を電力系とシステムへ適用し、数値シミュレーションにより、少ないデータで受動性インデックスを推定できることを示した。

(2) 受動性推定手法の人間とロボット群の協調制御系への応用

データ駆動型受動性推定手法を人間とロボット群の協調制御系（図1）へ応用した。人間とロボット群の協調制御系において、人間が受動性を有していれば閉ループ系を安定化するロボット群を構成できることが知られている。しかし、人間の正確なモデル化は難しい場合が多い。そこで、データ駆動型受動性推定手法を活用し人間の受動性を推定することを試みた。ただし、データ駆動型受動性手法をそのまま活用すると人間への指令値信号が高周波成分を含み、人間が正常に反応できない場合がある。そこで、人間が正常に反応できる信号の周波数範囲を推定した。そこでは、人間が指令値信号を目視してからロボット群への指令値を生成するまでの動作において、正常な動作を線形性の高い動作として仮定し、人間の動作の線形性をデータから推定した。推定結果を図2に示す。その結果、低い周波数の入力信号には人間の動作は高い線形性を有していることを実験的に示した。さらに、入力の周波数範囲を限定した受動性推定手法を提案し、実験により人間の受動性インデックスの推定を行った。

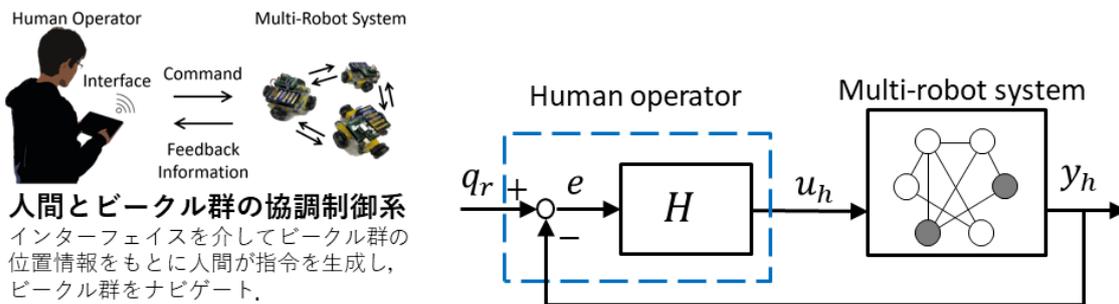


図1 人間とビークル群の協調制御系

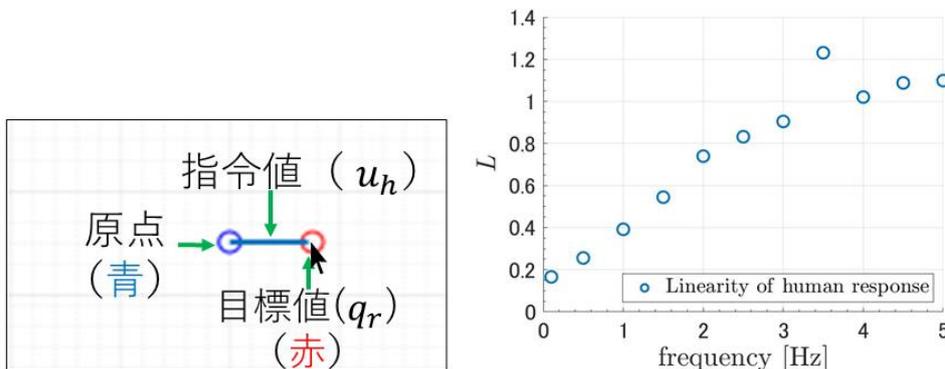


図2 人間の線形性推定結果（左図：実験の様子。人間は表示される赤い丸に追従するようにマウスポインタを移動させる。右図：線形性推定結果。縦軸が評価関数を表しており、評価関数の値が小さいほど高い線形性を有することを意味する。）

(3) 安定余裕の下界情報の推定

図3のフィードバック結合において、制御対象 $P(z)$ は未知という状況下で、安定化制御器 $C(z)$ のクラスを求めることを目的とする。まず、安定余裕の下界情報をデータ駆動により推定する方法を提案した。具体的には図4（左図）のように複素平面上において制御対象のナイキスト線図に接する円を推定し、その円の中心と半径の情報からゲイン余裕と位相余裕の下界が得られることを示した。円の推定にはデータ駆動型受動性推定手法の方法を拡張することにより、入出力データを繰り返し取得することで推定できる。また、推定した安定余裕の下界情報をもとに消散理論を活用することで、閉ループ系を安定化する制御器のクラスを明らかにした（図4（右図））。これにより、制御対象の詳細なモデル構築することなく、安定余裕という簡便な特徴を用いて制御系設計ができる。

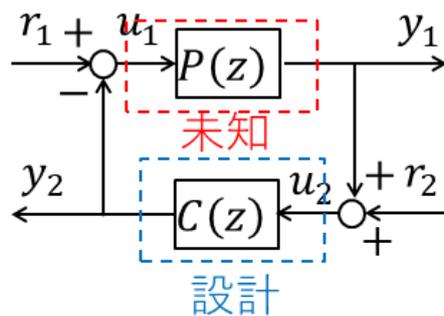


図 3 フィードバック結合

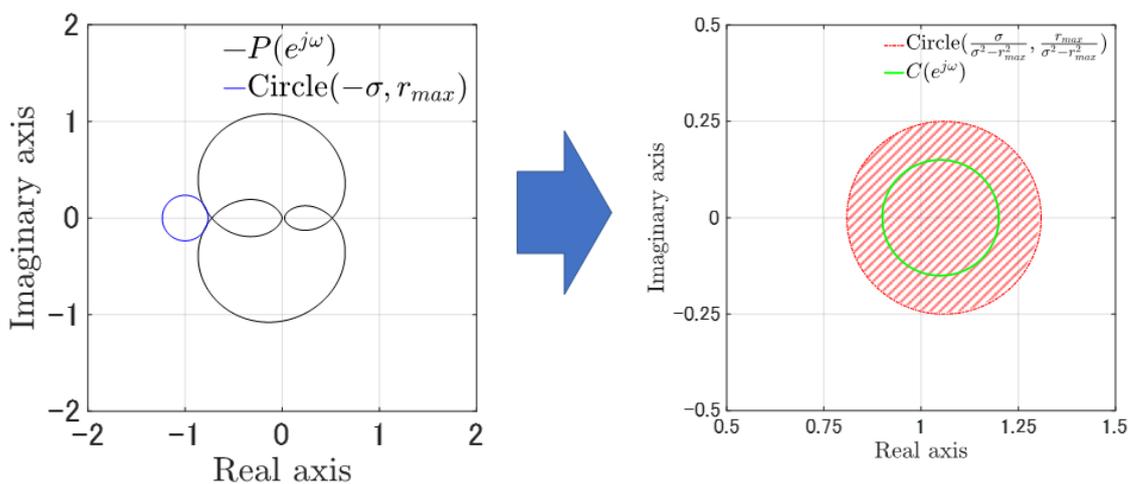


図 3 安定余裕の推定結果および安定化制御器のクラス (左図: 制御対象のナイキスト線図に接する円をデータ駆動により推定. 右図: 推定された円から安定化制御器を求めることができる. ナイキスト線図が赤斜線部の内部に存在する制御器が安定化制御器となる.)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 飯島奏望, 種村昌也, 千田有一, 東俊一	4. 巻 -
2. 論文標題 MIMO系に対するデータ駆動型受動性推定のデータ量削減と収束性	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 五十嶋 洸人, 種村 昌也, 千田 有一
2. 発表標題 データ駆動に基づく安定余裕の推定
3. 学会等名 第65回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 五十嶋 洸人, 種村 昌也, 千田 有一
2. 発表標題 未知プラントの安定余裕の下界情報に基づく制御器設計
3. 学会等名 第9回 制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 飯島奏望, 種村昌也, 千田有一
2. 発表標題 SISO閉ループ系におけるデータ駆動型受動性推定のデータ数の削減
3. 学会等名 SICE中部支部シンポジウム&若手研究発表会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 信太雄乃介, 種村昌也, 千田有一, 東俊一, 畑中健志
2. 発表標題 人間の線形性推定に基づくデータ駆動型受動性推定
3. 学会等名 第8回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 種村 昌也, 東 俊一, 白井 美晴, 畑中 健志
2. 発表標題 入力の更新周期を制限した閉ループ内のサブシステムに対するデータ駆動受動性推定手法
3. 学会等名 第63回自動制御連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kanami Iijima, Masaya Tanemura, Shun-ichi Azuma, and Yuichi Chida
2. 発表標題 Reduction in the Amount of Data for Data-driven Passivity Estimation
3. 学会等名 2020 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯島奏望, 種村昌也, 東俊一, 千田有一
2. 発表標題 データ駆動型受動性推定における収束性の改善
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

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

学術情報オンラインシステムSOAR
<http://soar-rd.shinshu-u.ac.jp/profile/ja.ZpyeZUUAU.html>

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

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