

令和元年6月20日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K00038

研究課題名(和文) 入力サンプリングに制約をもつ不安定多入出力マルチレート系の閉ループ同定法の開発

研究課題名(英文) On closed-loop system identification of MIMO unstable multirate systems with constraint in input sampling

研究代表者

奥 宏史 (Oku, Hiroshi)

大阪工業大学・工学部・准教授

研究者番号：20351455

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、不安定なMIMOマルチレート系を対象とする閉ループシステム同定法の開発を目的とする。研究成果は以下の通りである。(1) 同定対象の極が部分的に既知という事前情報を利用する不安定系に対する閉ループシステム同定法を提案した。(2) 閉ループ同定と制御系設計を繰り返し実施による制御性能向上について、小型RCヘリコプタのホバリング飛行制御系設計における実機実験から実証した。(3) 閉ループ部分空間同定法CL-MOESPにリフティング技術を組み込んだマルチレート系に対する閉ループ部分空間同定法を提案し、提案手法をクワッドロータヘリのホバリング飛行制御系に実装した実機実験により有効性を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マルチレート系に対するシステム同定の従来研究は、単入出力系に対する閉ループ同定または多入出力系に対する閉ループ同定を扱っていた。本研究では、不安定多入出力マルチレート系に対する閉ループシステム同定法を提案しており、従来法では未解決な問題に一つの解を与えたと考えられる。システム同定法の研究における提案手法の有効性の確認は数値シミュレーションにとどまることがほとんどである。しかしながら本研究では、ドローンのホバリング飛行制御系設計を通じた実機実験による検証まで行っており、提案手法の実応用に期待が持てる。

研究成果の概要(英文)：The goal of this study is to develop closed-loop system identification methods for unstable MIMO multirate systems. The contributions are follows: (1) A gray-box closed-loop system identification method has been proposed, making use of the prior information of that some of poles of a system to be identified are known. (2) In terms of improvement of control performance, iterative implementation of system identification and controller design has been studied. its effectiveness has been demonstrated by an experiment of hovering flight of a miniature helicopter. (3) A closed loop system identification method for unstable MIMO multirate systems has been proposed. The proposed method is derived by integration of the so-called lifting technique into CL-MOESP, which is a closed-loop subspace model identification method. Its practical effectiveness has been demonstrated by controller design of hovering flight of a quadrotor drone.

研究分野：制御工学

キーワード：システム同定 閉ループ同定 マルチレート系 ドローン フィードバック制御 部分空間法

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

システム同定は、対象とする動的システムの入出力の測定データから、対象と入出力関係の意味で同一とみなせるような数学モデルを構築することである。フィードバック補償の下で操業されるプラントや、本質的にフィードバック構造を内在する対象など、いわゆる閉ループ系のシステム同定は注意が必要である。ブロック線図で表現すると、図1において、 $P$ が同定対象で $K$ がフィードバック補償器としたとき、入力 $u$ や出力 $y$ 、外部励振信号 $r^1$ 、 $r^2$ などの観測データより $P$ のモデルを求める場合である。

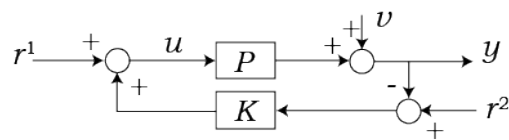


図1: フィードバック制御系

アクチュエータの仕様や制御信号の伝送速度などの原因により、制御対象への入力の変動に制約がある場合、制御系設計におけるモデルの精度はより重要性を増す。ところが、シングルレートのサンプリングに基づくシステム同定では、サンプリング間隔の制約は同定モデルの精度向上の足枷となる。この問題を回避するためにはオーバーサンプリングによるマルチレートシステム同定法が有効である。先行研究では、図1における $u$ と $y$ のみを用いて外部励振信号を必要としない直接同定法による手法が提案されているが、同定対象は単入力単出力(SISO)系に限られる。

部分空間同定法は多入出力系の有力な同定手法として精力的に研究されてきた。部分空間同定法は、行列分解を用いて観測データを一括処理するため数値的な信頼性が高く、また同定対象の状態空間モデルを求めることができる。近年、閉ループ系の同定が可能な閉ループ部分空間同定法の研究も進み、研究代表者も MOESP 型閉ループ部分空間同定法(CL-MOESP)を提案した。さらに、台車倒立振り子系を用いたラボ実験により CL-MOESP の実用性も示している。相関解析に基づく手法や予測誤差に基づく手法と比較して、CL-MOESP は物理的に意味のあるモデルの次数推定が可能であり、制御系設計のためのモデリングという観点で他の手法より大きな優位性を持つことが示されている。しかし、これらの手法はシングルレートのサンプリングに基づく方法である。

研究代表者らは、小型無線操縦ヘリコプタ(以降、小型 RC ヘリコプタ)のモデリングと自律飛行制御系設計に取り組んできた(図2)。制御対象は操作入力として、エルロン、エレベータ、スロットル、ラダーの4入力、制御量として3次元位置および姿勢の6出力をもつ不安定な MIMO 系である。3次元位置姿勢情報は、モーションキャプチャシステムにより、10ms 以下のサンプリングが可能である。しかし、フィードバック制御系のサンプリング間隔は、最も遅いデバイスである無線操縦機がもつフレーム周期(20ms)による制約を受けるため、他のデバイスの性能を持て余すことになる。一方で、小型 RC ヘリコプタの自律飛行制御において 20ms のサンプリング間隔は十分な早さとは言えず、制御系設計のためには精度の高い数学モデルが必要である。しかし、小型 RC ヘリコプタの複雑な構造のために物理モデリングは容易ではなく、従来のシングルレートによる MIMO 系のシステム同定法では十分な精度をもつモデルを得ることは難しい。

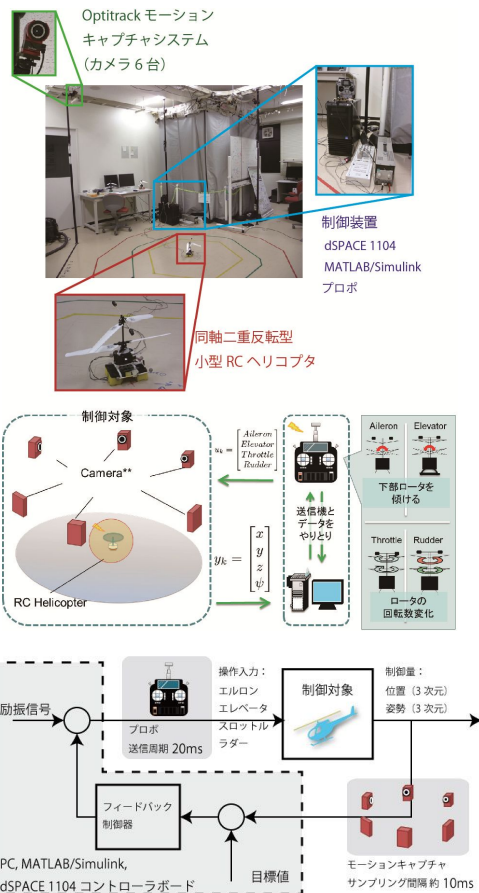


図2: RC ヘリコプタ飛行制御実験系

2. 研究の目的

研究代表者らは、多入力多出力(MIMO)系の閉ループシステム同定法の開発と、その実証として同軸二重反転型小型無線操縦ヘリコプタやクワッドロータヘリの同定モデルを使ったホバリング飛行制御系設計を行ってきた。現在、フィードバック制御系のサンプリング間隔は、入出力デバイスのうち最も遅い無線操縦機のフレーム周期に合わされており、他のデバイスの性能を持て余している。本課題の目的は以下の通りである。

- (1) 不安定な MIMO マルチレート系を対象とする閉ループシステム同定法を開発する。
- (2) 本手法を用いて、シングルレートによる従来のシステム同定法より高精度な6自由度ホバリング飛行モデルを獲得し、同定モデルを用いた制御系設計により制御性能の向上を目指す。

3. 研究の方法

本研究目的を達成するために、次の3つのテーマに分けて研究を進める。

(1) マルチレート閉ループ部分空間同定法の開発

CL-MOESP のマルチレート化を行う。まず、入力信号のサンプリング間隔と出力信号のサンプリング間隔が整数倍という条件下での MIMO マルチレート系の閉ループシステム同定法を導出する。さらに、整数倍でない場合についても検討する。

(2) マルチレート閉ループ部分空間同定法の同定性能解析

導出されたマルチレート閉ループ部分空間同定法の漸近的性質やモデル次数推定の同定性能の解析を行う。

(3) 小型 RC ヘリコプタの多入出力系閉ループシステム同定実験および 3 次元ホバリング飛行制御系設計

研究代表者らはモーションキャプチャシステムとデジタル信号処理ボード dSPACE システムによる小型 RC ヘリコプタの 3 次元 6 自由度実時間計測制御可能な環境を有している。マルチレートサンプリング環境下での閉ループシステム同定実験を実施するための準備として、マルチレートサンプリングが可能な環境を整える。具体的には、マルチレート閉ループ同定実験を実施するための初期制御器として、マルチレート環境下での PID 制御器を試行錯誤によって設計し、フィードバック制御によって RC ヘリコプタをホバリング飛行させる。

4. 研究成果

(1) 同定対象の小型 RC ヘリコプタは操作量として角速度指令入力をもつ。すなわち、動作点近傍で線形化されたヘリの動特性を考えたとき、ヘリの入出力関係のうち角速度指令入力からヘリ位置までの伝達特性に積分要素を含む系と考えられる。このことからグレーボックスモデリングに関して、同定対象の極が部分的に既知という事前情報を利用する不安定系に対する閉ループシステム同定法を提案した。提案法では、まずシステム同定実験より得られた入出力データより連続時間状態空間モデルを得たのちに、モデルマッチング問題に帰着して  $H_\infty$  ノルムの意味で同定モデルから非常に近い既知の極をもつ状態空間モデルを求める。具体的には、有界実補題より行列不等式が導かれるので、それを数値的に解く。

(2) 閉ループ同定と制御系設計の繰り返しによる制御性能の向上について検討した。具体的には、既存のフィードバック制御器の性能が劣る場合、まずその制御器の下で閉ループ同定実験を実施し同定モデルを得て、得られたモデルを用いて制御器を再設計する。つぎに更新された制御器の下で閉ループ同定を行い、得られた同定モデルによりさらに制御器を再設計するというプロセスを繰り返すことにより制御性能の向上を達成する。このことを小型 RC ヘリコプタのホバリング飛行制御系設計における実機実験により揺動幅の減少が確認されたことにより有効性が実証された(図 3~5)。

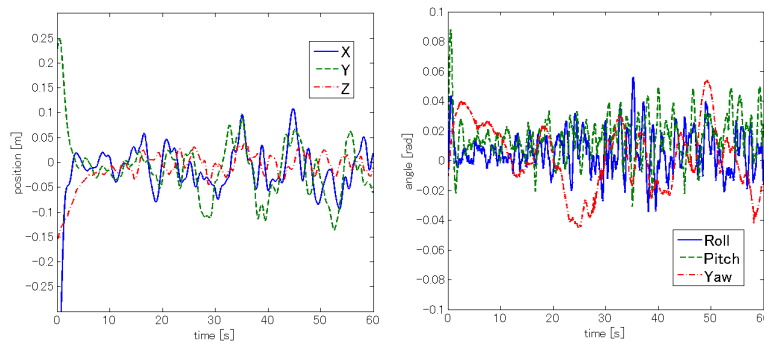


図 3: 初期制御器によるホバリング飛行

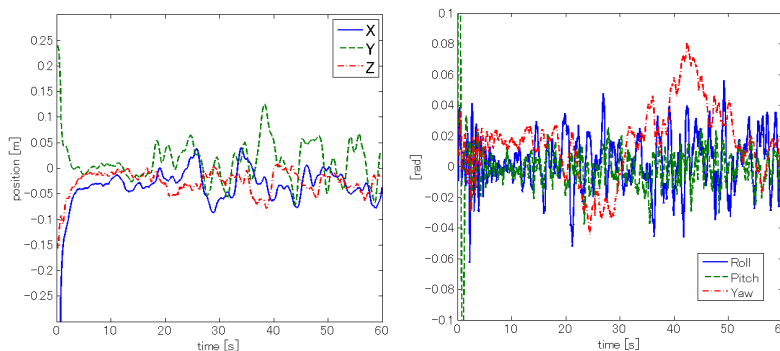


図 4: システム同定(1 回目)後に再設計された制御器によるホバリング飛行

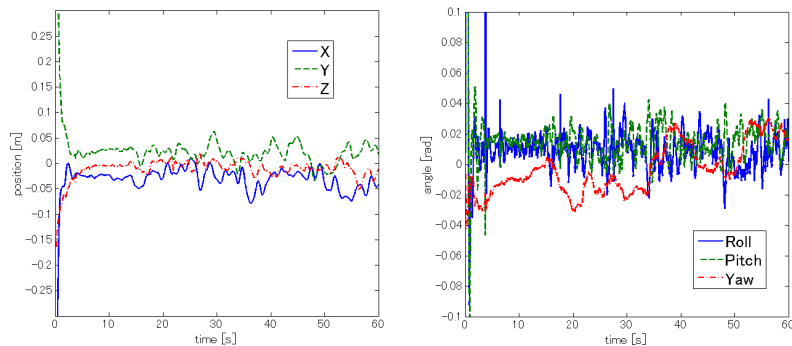


図 5: システム同定(2 回目)後に再設計された制御器によるホバリング飛行

(3) 入力と出力で異なるサンプル周期をもつ多入出力デュアルレート系に対する閉ループ同定法を開発した．なお実機実験における制御対象として，研究計画段階において想定された小型無人ヘリコプタが生産中止のため調達不可能となったため，クワッドロータヘリの AR Drone 2.0 に変更した．ここで，対象は出力アンダーサンプリングなデュアルレート系である．つまり，対象の観測出力である位置姿勢情報をモーションキャプチャシステムにより 10ms 間隔でサンプルし，5ms 毎の制御入力指令値を対象に与える(図 6)．

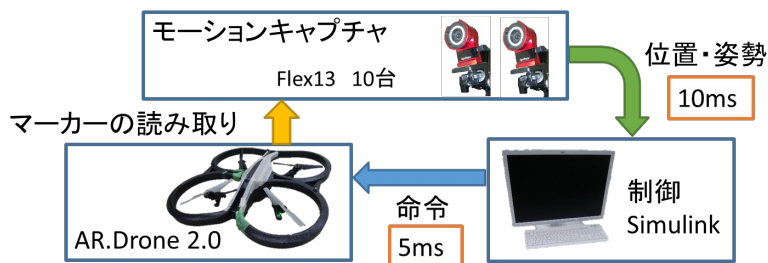


図 6: ドローンのホバリング飛行のためのデュアルレート制御実験環境

研究代表者の既存の研究成果である閉ループ部分空間同定法 CL-MOESP にリフティング技術を組み込んだマルチレート系に対する閉ループ部分空間同定法を提案した。出力アンダーサンプリングなデュアルレート系で，入力と出力のサンプリング間隔をそれぞれ  $T_1$ ， $T_2$  としたとき，ある自然数  $p$  に対して， $T_2 = pT_1$  が成り立つとする．例えば，上述のクワッドロータヘリの場合， $T_1=5\text{ms}$ ， $T_2=10\text{ms}$  であり， $p = 2$  である．提案手法では，サンプリング間隔  $T_1$  で採取された入力データについて，連続する  $p$  個の入力を一つの  $p$  次元ベクトルにまとめ，リフティングモデルと呼ばれるサンプリング間隔  $T_2$  の同定モデルを CL-MOESP により同定する(図 7)．さらに，リフティングモデルから連続時間モデルに変換する方法や，リフティングモデルから直接フィードバック制御器の設計法についても提案した．

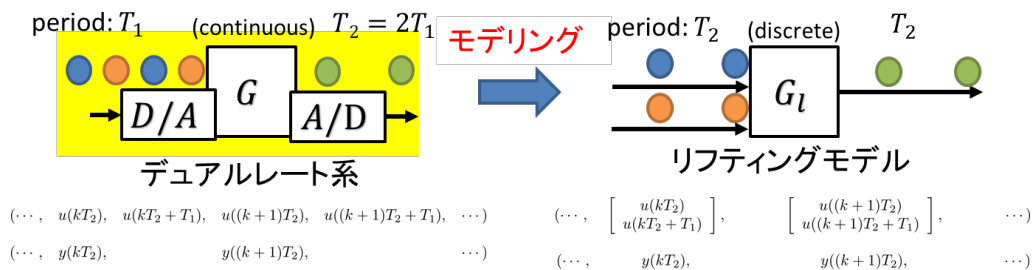


図 7: ドローンのホバリング飛行のためのデュアルレート制御実験環境

得られたマルチレート系に対する閉ループ部分空間同定法をクワッドロータヘリのホバリング飛行制御系に適用し，提案手法の有効性を実証した．同定対象であるクワッドロータヘリの位置姿勢 6 自由度をモーションキャプチャにより 10ms 毎に観測する．つまり，6 出力である．制御入力エレベータ，エルロン，ラダー，スロットルの 4 入力で，制御間隔は 5ms である．実施したシステム同定実験では，外部励振信号を印加しながら 300 秒間実施した．外部励振信号と入力それぞれ 60,000 点，出力 30,000 点のデータを採取した．CL-MOESP によって得られたリフティングモデルの次数は 13 次で，物理モデリングの見地からも妥当な次数をもつモデルが得られたと考えられる．同定モデルを用いてオブザーバと最適レギュレータを設計し，ホバリング飛行のためのフィードバック制御系設計

し、その制御器を実験環境に実装しホバリング飛行実験を行い安定な飛行が確認された(図 8)。

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Mitsuhiro Nakayama, Hiroshi Oku and Shun Ushida, An Experiment on Closed-loop System Identification of UAV Using Dual-rate Sampling, IFAC-PapersOnLine, 査読有, Vol. 51, 2018, 598-603, 10.1016/j.ifacol.2018.09.226

〔学会発表〕(計 7 件)

Mitsuhiro Nakayama, Hiroshi Oku and Shun Ushida, An Experiment on Closed-loop System Identification of UAV Using Dual-rate Sampling, 18th IFAC Symposium on System Identification (SYSID 2018), 2018

Mitsuhiro Nakayama, Hiroshi Oku, and Shun Ushida, Closed-loop identification for a continuous-time model of a multivariable dual-rate system with input fast sampling, 9th Vienna International Conference on Mathematical Modelling (MATHMOD 2018), 2018

Mitsuhiro Nakayama, Hiroyuki Takaoka, Hiroshi Oku, Shun Ushida, Closed-loop Subspace Model Identification of Dual-rate Systems with Input Fast Sampling, SICE Annual Conference 2017

中山 光紘, 高岡 洋之, 牛田 俊, 奥 宏史, 閉ループ同定と制御系設計の繰り返しによる制御性能の向上についてのケーススタディ, 第 60 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2016

奥宏史, 牛田俊, 既知の極をもつ不安定系の LMI による状態空間モデル同定, 第 3 回制御部門マルチシンポジウム, 2016

Hiroshi Oku, Shun Ushida, Gray-box state-space model identification of a system with one known pole using LMIs, The 47th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications, 2015

奥 宏史, 牛田 俊, 一つの既知の極をもつシステムの LMI による状態空間モデル同定, 第 58 回自動制御連合講演会, 2015

## 6 . 研究組織

(1)研究分担者

(2)研究協力者

研究協力者氏名：牛田 俊

ローマ字氏名：(USHIDA, Shun)

研究協力者氏名：中山 光紘

ローマ字氏名：(NAKAYAMA, Mitsuhiro)

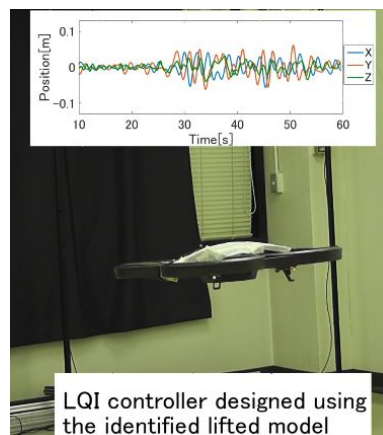


図 8: クワッドロータヘリのホバリング飛行実験

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。