

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K04217

研究課題名(和文) 不安定系に対する出力誤差型閉ループ部分空間同定法の誤差分散解析

研究課題名(英文) On error covariance analysis of an output-error type closed-loop subspace model identification method for unstable systems

研究代表者

奥 宏史 (Oku, Hiroshi)

大阪工業大学・工学部・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)：本研究では、閉ループ系に対する出力誤差モデルに基づく部分空間同定法の一つであるMOESP型閉ループ部分空間同定法(CL-MOESP法)の特性解析に取り組んだ。主要な研究成果は以下の2つに集約される。(1)従来の「同定対象は安定」という仮定について、本研究を通して「CL-MOESP法は不安定な同定対象にも適用可能」であることの理論的正当性を与えた。(2)CL-MOESP法の推定値の一致性や誤差分散解析について理論的解明を行い、同手法の同定精度について定量的な評価を与えた。これは漸近的一致性をもつ予測誤差型の部分空間同定法に対するCL-MOESP法の優位性を示している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今までは相関法を用いた出力誤差モデルに基づく部分空間同定法の漸近特性の解明は未解決であった。しかし、本研究を通してCL-MOESP法の推定値の一致性が示された。これは予測誤差型部分空間同定法がもつ漸近的一致性よりも強い性質であり、CL-MOESP法の持つ優位性の一つである。また、CL-MOESP法の誤差分散解析に関する一定の成果が得られ、将来的にCL-MOESP法から得られる同定モデルの定量的な精度評価法の開発につながり得ると考えられる。最後に、CL-MOESP法が不安定な同定対象にも適用可能であることの理論的保証が得られたため、今後本手法が広く実システムへ適用されることが期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we analyzed the characteristics of the MOESP-type closed-loop subspace model identification method (CL-MOESP method), which is one of the subspace identification methods based on the output error model in closed-loop. The main research results can be summarized in the following two points. (1) This study gave the theoretical basis that "the CL-MOESP method can be applied to unstable objects to be identified" as opposed to the conventional premise that "objects to be identified are stable". (2) We theoretically clarified the consistency and error covariance analysis of the estimated values of the CL-MOESP method, and quantitatively evaluated the identification accuracy of the method. This indicates that the CL-MOESP method outperforms the prediction-error-based subspace identification methods that have the asymptotical consistency in their estimates.

研究分野：制御理論

キーワード：システム同定 閉ループ系 不安定系 誤差分散解析

1. 研究開始当初の背景

システム同定の分野では、部分空間同定法が多入出力線形時不変系に対する強力な同定法として広く普及している。さらに変数変化系や静的非線形をもつ系、閉ループ系などへ適用範囲が拡張され、近年目覚ましい発展を遂げている。概して、部分空間同定法は動的システムより観測される入出力からデータ行列を構成し、行列計算を駆使して状態空間モデルを求める方法である。部分空間同定法を大別すると、予測誤差に基づくアプローチによる方法と出力誤差モデルに基づくアプローチによる方法に分類できる。

部分空間同定法の一般的な手順は大まかに以下の通りである。まず入出力データそれぞれからハンケル行列構造をもつデータ行列を構成する。つぎに入力データ行列の行空間への出力データ行列の直交射影を求めることでマルコフパラメータをブロック要素にもつ行列を求める。最後にその行列を行列分解することにより、モデルの次数決定と状態空間モデルの係数行列を決定する。なお、図1のように、予測誤差によるアプローチと出力誤差モデルによるアプローチでは係数行列の決定に用いる行列が異なる。

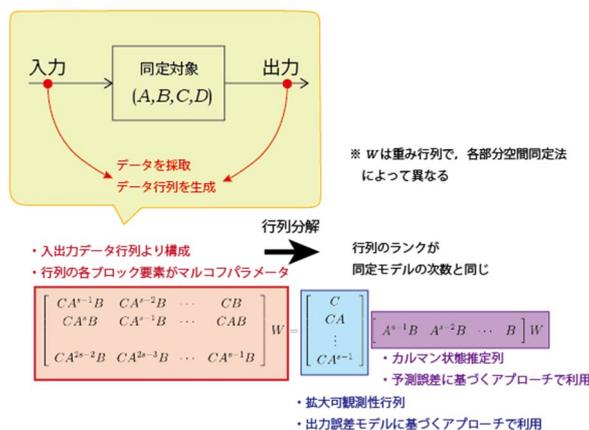


図1 部分空間同定法における行列分解

研究代表者は、後者に分類される方法の一つとして、閉ループ系(図2)に対する出力誤差モデルに基づく部分空間同定法として、MOESP型閉ループ部分空間同定法(以下、CL-MOESP法と呼ぶ)を提案し、その漸近的性質の解析を行った。さらに、実応用例として台車倒立振り子系の閉ループ同定や、同軸二重反転型小型無線操縦ヘリコプタの閉ループ同定および同定モデルを使ったホバリング飛行制御系設計を実施し、不安定な系に対して有効性を実証した。以上の研究成果において、一方では理論的には同定対象の安定性の仮定が必要であったが、他方では数値シミュレーションや実機実験においては不安定系に対してもCL-MOESP法が適用可能であることを例証してきており、理論と実験結果の間に矛盾が生じていた。

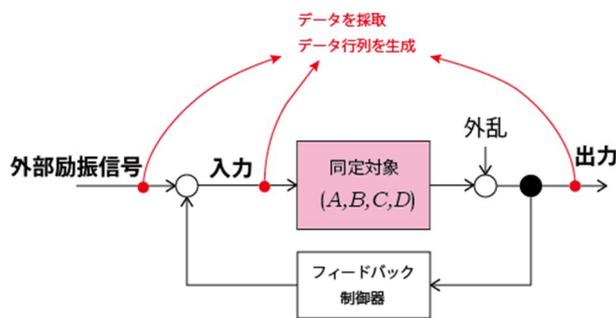


図2 CL-MOESP法における問題設定

予測誤差に基づくアプローチによる閉ループ部分空間同定法では、不安定な同定対象にも適用可能であることを理論的に保証している。さらに、予測誤差法に基づく閉ループ部分空間同定法の推定値の一致性や誤差共分散行列についての理論的解析はすでに行われており、推定値の一致性より弱い漸近的 consistency が示された。それらはシステム外乱についてもモデル化しその構造を取り込むことにより達成している。しかしながら、このことは無相関性を利用して外乱を除去するCL-MOESP法とは理論的観点からは相容れない。CL-MOESP法の一致性や誤差分散解析は未解決問題として残されている(表1)。

表1 部分空間同定法の漸近特性解析

	予測誤差		出力誤差	
	一致性	誤差分散解析	一致性	誤差分散解析
開ループ系	○	○	○	○
閉ループ系	○(漸近的一致性)	○	未解決(本課題)	未解決(本課題)

2. 研究の目的

相関法に基づく閉ループ部分空間同定法であるCL-MOESP法に関して、次の二つの未解決問題について理論解明することが本研究課題の目的である。

- (1) MOESP型閉ループ部分空間同定法(CL-MOESP)の適用に関して、従来の「同定対象は安定」という仮定を緩和し、適用可能な不安定な系のクラスを明らかにする。CL-MOESP法

が不安定系にも適用可能であることの理論的正当性を与える。

- (2) CL-MOESP 法の漸近特性を明らかにする．具体的には，推定値の一致性或誤差分散解析について理論的解明を行い，同手法の同定精度について定量的な評価を与える．

### 3. 研究の方法

本研究目的を達成するために，以下の順序で研究を進める．

- (1) 同定対象を含む閉ループ系を定数ゲインフィードバックにより安定化された閉ループ系(図3)に問題を限定して CL-MOESP 法の漸近特性の理論解明に取り組む．  
これについて，開ループ系の部分空間同定法では，理論的観点からは予測誤差に基づくアプローチと出力誤差モデルに基づくアプローチでは両者は全く異なるが，入出力データ行列の数値処理の観点から見ると両者の違いは行列分解における重み行列(補助変数)の違いで説明できることが知られている．この知見を閉ループ部分空間同定法に拡張して適用できるか検討する．  
さらに，閉ループ部分空間同定法において，相関法を用いて導出された CL-MOESP 法と予測誤差法に基づく手法との間に，行列分解による入出力データ処理のプロセスにおける類似性が示唆される研究結果が報告された．予測誤差法からのアプローチによる手法には，同定対象が安定であるという制約がないことに注目し，CL-MOESP 法に対しても安定性の仮定が不要となることが期待できる．
- (2) フィードバック制御器が一般の線形時不変系の閉ループ系(図4)に対して結果を拡張する．
- (3) 上記について得られた理論結果の正当性を裏付けるために MATLAB/Simulink による数値シミュレーションを実施する．

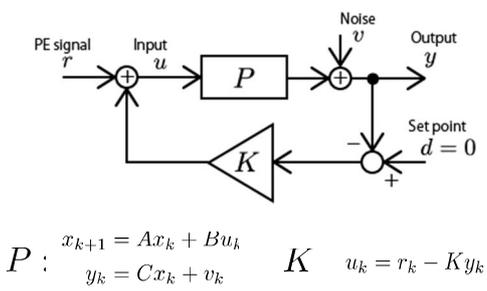


図3 定数ゲインフィードバック系

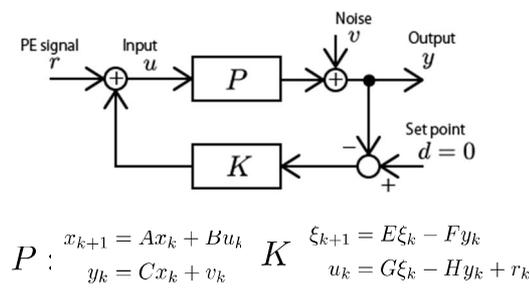


図4 一般の線形時不変フィードバック制御器をもつ閉ループ系

### 4. 研究成果

- (1) 同定対象を含む閉ループ系を定数ゲインフィードバックにより安定化された閉ループ系(図3)に問題を限定して CL-MOESP 法の誤差解析に取り組んだ．CL-MOESP の手順(図5)におけるデータハンケル行列の QR 分解は，膨大なデータ空間から同定対象の特徴を抽出する重要な手順である．研究の目的(2)について，その QR 分解から得られる三角行列の誤差解析を行った．とくに三角行列の行列要素のうち同定対象の係数行列の推定に利用される要素に着目し，それらの信号成分と雑音成分それぞれのデータハンケル行列による表現を導出した．研究成果として，それら信号成分と雑音成分それぞれの漸近的性質を明らかにした．詳細には次の三つの結果を得た．信号成分が同定対象の係数行列から構成されるある定数行列に確率収束することを示した．雑音成分については 0 に確率収束することを示した．雑音成分の誤差分散を陽に導出した．研究の目的(1)については，研究の目的(2)の研究成果の導出過程において同定対象の安定性の仮定は必要ないことがわかり，CL-MOESP が不安定な同定対象にも適用可能であることの理論的正当性を示した．また，得られた理論的成果の正当性を数値シミュレーションにより例証した．

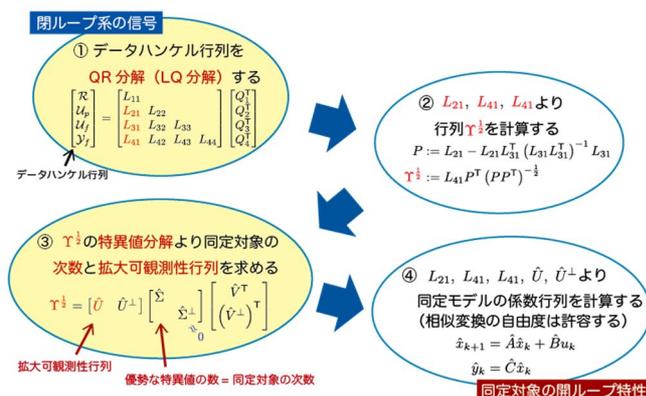


図5 CL-MOESP 法の手順

- (2) 一般の線形時不変フィードバック制御器をもつ閉ループ系(図4)に対して研究成果(1)の結

果が拡張できること示した。すなわち，一般のフィードバック系に対しても，データ行列の分解より得られる信号成分の同定対象の特徴量から構成されるある定数行列への確率収束性，雑音成分の0への確率収束性（図6），および，雑音成分の誤差分散行列を導出した。さらに，信号成分の極限值から同定対象の拡大可観測性行列の相似変換の自由度の範囲内での一致推定値が得られることを示した。上述の一致性に関する理論結果について数値シミュレーションを実施し，その理論的正当性を例証した。

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} L_{21} \\ L_{31} \\ L_{41} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathcal{O}_u \\ \mathcal{O}_u \bar{A}^s \\ \mathcal{O}_y \bar{A}^s \end{bmatrix} \mathcal{Z}_p \mathcal{R}^T L_{11}^{-T} + \begin{bmatrix} \mathcal{T}_u & 0 \\ \mathcal{O}_u \mathcal{L}_r & \mathcal{T}_u \\ \mathcal{O}_y \mathcal{L}_r & \mathcal{T}_y \end{bmatrix} L_{11} + \begin{bmatrix} \mathcal{H}_u & 0 \\ \mathcal{O}_u \mathcal{L}_e & \mathcal{H}_u \\ \mathcal{O}_y \mathcal{L}_e & \mathcal{H}_y \end{bmatrix} \mathcal{E} \mathcal{R}^T L_{11}^{-T} \\
 &\qquad\qquad\qquad \text{信号成分} \qquad\qquad\qquad \text{雑音成分} \\
 \frac{1}{\sqrt{N}} S_N &\longrightarrow \begin{bmatrix} \mathcal{T}_u & 0 \\ \mathcal{O}_u \mathcal{L}_r & \mathcal{T}_u \\ \mathcal{O}_y \mathcal{L}_r & \mathcal{T}_y \end{bmatrix} \bar{L}_{11} \text{ i.p.} &\qquad\qquad\qquad \frac{1}{\sqrt{N}} \mathcal{N}_N \longrightarrow 0 \text{ i.p.}
 \end{aligned}$$

図6 信号成分と雑音成分の確率収束性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Oku Hiroshi, Ikeda Kenji	4. 巻 54
2. 論文標題 On error analysis of a closed-loop subspace model identification method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine	6. 最初と最後の頁 701 ~ 706
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ifacol.2021.06.132	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 Oku Hiroshi, Ikeda Kenji	4. 巻 54
2. 論文標題 On consistency of output-error closed-loop subspace model identification for systems compensated by general LTI controllers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine	6. 最初と最後の頁 767 ~ 772
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ifacol.2021.08.454	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8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Hiroshi Oku and Kenji Ikeda
2. 発表標題 On Error Analysis of a Closed-Loop Subspace Model Identification Method
3. 学会等名 25th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroshi Oku, Kenji Ikeda
2. 発表標題 On consistency of output-error closed-loop subspace model identification for systems compensated by general LTI controllers
3. 学会等名 The 19th IFAC Symposium on System Identification (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 奥宏史
2. 発表標題 CL-MOESP法の一貫性に関する数値的検討
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 奥宏史
2. 発表標題 閉ループ部分空間同定法の可同定性について
3. 学会等名 第9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 2022年

1. 発表者名 Hiroshi Oku, Kenji Ikeda
2. 発表標題 Consistency Analysis of the Extended Observability Matrix of Output-Error Closed-Loop Subspace Model Identification
3. 学会等名 IFAC 2020 World Congress (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroshi Oku, Kenji Ikeda
2. 発表標題 A Numerical Study on Convergence Property of a Closed-Loop Subspace Model Identification Method
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 奥宏史, 池田建司
2. 発表標題 出力誤差型閉ループ部分空間同定法の拡大可観測性行列の一致性について
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 奥宏史
2. 発表標題 閉ループ部分空間同定法の誤差解析について
3. 学会等名 計測自動制御学会第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〕

-

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)		

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