

機関番号：34406

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20760285

研究課題名(和文) 高速逐次部分空間同定法によるフィードバック系の実時間変化検出法の開発

研究課題名(英文) Research on a real-time change detection method for feedback systems using the fast recursive algorithm of subspace model identification

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

研究成果の概要(和文)：

本研究は、フィードバックループ内に接続された対象を監視し故障などの動特性変化を実時間で検出するオンライン変化検出法の開発を目的とする。本研究では、対象の監視に用いる閉ループ部分空間同定法の漸近性と最適性を明らかにした。本研究成果について実機実験による検証を行い、台車系の変化検出、倒立振り台車系の同定実験や、無線操縦ヘリコプタの飛行高度制御系を用いた実験から、理論の実用性を示した。さらに、理論的解析と実機実験の両方で先行研究との比較を行い、提案手法の有効性を示した。

研究成果の概要(英文)：

The goal of this research is to develop on-line change detection methods which are useful for real-time surveillance and early warning of dynamical changes, e.g., machine faults, of a system connected into a feedback loop. In this research, it has been clarified that the asymptotic properties and the optimality of a closed-loop subspace model identification which is used for surveillance of a system. Several experiments on real-life systems, such as a cart system, a cart-inverted pendulum system and an altitude control system of a radio-controlled helicopter, have been performed to show usefulness and effectiveness of proposed methods.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：制御工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：制御理論，システム同定，閉ループ同定，変化検出，故障診断，オンライン推定

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 観測された信号の時系列データから信号源の変化を検出する技術は、例えば、プラント異常の早期検出や、適応制御におけるコントローラのゲイン調整などにとって必要

不可欠な技術である。特に故障検出は、プラントの安全操業および重大事故防止の観点から、「安全・安心」に関わる重要な課題の一つとして近年注目を集めている。

(2) 検定論をベースとした変化検出法では、

検定信号として主に白色性信号を取り扱う。従来、逐次最小2乗法や逐次 LMS 法が観測信号から検定信号を生成するフィルタとして現在まで広く使われている。しかし、これらのアルゴリズムは誤差や雑音の影響や観察対象への入力信号の性質の影響を受けやすい。また、モデル構造の誤った選択による推定精度の劣化が誤検出や検出漏れを生じさせる。したがって従来は、逐次アルゴリズムそのものの改良よりも、CUSUM 法のような誤検出や検出漏れを防ぐ手法の開発に注力されてきた。

(3) システム同定の分野では部分空間同定法が脚光を浴び、近年目覚ましい発展を遂げた。開ループ系に対する部分空間同定法の逐次化について、研究代表者も含めいくつかの成果が報告された。逐次部分空間同定アルゴリズムが生み出す副産物の変量の中には、線形システムの動特性変化だけに敏感に反応するものがあることは部分空間同定法に携わる研究者の中で知られている。また、部分空間同定法は、拡大可観測性行列を推定する際に元々冗長なパラメトリゼーションを与えているので、モデル構造の選択が推定精度に影響を与えるという問題を緩和できる。これらの長を考慮して、開ループ系について監視対象の動特性変化だけを的確に検出できる逐次部分空間同定法を使った変化検出法が研究代表者によって開発された。さらに逐次部分空間同定法で生成されるある変量が漸近的白色性をもつことを証明し、その変量が監視対象の動特性変化の際に顕著なピークを生じること示した。提案の変化検出法は、統計学における尤度比検定法に基づいたもので、カイ2乗分布を使ったしきい値の導出方法も示された。

(4) 現在操業しているプラントは何らかの制御動作をもつものが多い。そのようなプラントは信号のフィードバック構造をもつ閉ループ系として取り扱われる必要がある。試験のための製造プラントの操業停止は望ましくない場合が多く、さらに変化検出では操業中のデータを用いた実時間オンライン監視が求められる。

(5) 閉ループ系より観測される信号からその動特性を推定するための閉ループ部分空間同定法の研究が盛んであるが、それらはデ

ータのバッチ処理によるオフライン同定法がほとんどである。研究代表者によって、QR 分解に基づく数値的に頑健な閉ループ部分空間同定法 (CL-MOESP 法, Closed-Loop Multivariable Output Error State sSpace method) の提案、および、その同定法の逐次化が行われており、オンライン型の逐次閉ループ部分空間同定アルゴリズムが利用可能である。

## 2. 研究の目的

(1) 閉ループ部分空間同定法の漸近的性質を解析する。

(2) その高速逐次アルゴリズムの収束性に関する解析を行い、推定値の真値への漸近収束性に関する条件を明らかにする。

(3) 変化検出に利用可能な推定誤差系列または十分統計量を見出し、その統計的性質を明らかにする。

(4) 閉ループ系内に接続された監視対象の変化検出法を開発を行う。検定論に裏打ちされた、合理的なしきい値の設定方法を導出する。

(5) 操作者支援制御系における操作者の状態異常検出法を開発する。操作者と装置の相互作用のダイナミクスを無視した従来法と異なり、上述の閉ループ系変化検出法を応用することでフィードバック支援制御環境下での操作者に注目した精度の高い状態異常検出を実現する。

## 3. 研究の方法

(1) 本研究課題は理論研究を中心とするものであり、行列解析、推定論、検定論、システム理論、逐次アルゴリズムに関連する文献調査を行い、理論解析およびアルゴリズムの開発を行う。

(2) 解析結果や開発手法の正当性および有効性の検証のために、MATLAB などの制御系設計 CAD ソフトウェアを利用して数値シミュレーションを適宜行う。

(3) 開発手法の実用性を示すために、台車系、台車倒立振子系 (図 1)、無線操縦ヘリコプタの飛行高度制御系 (図 2) などの実験装置を準備し、実証実験を行う。



図 1. 台車倒立振り子系実験装置

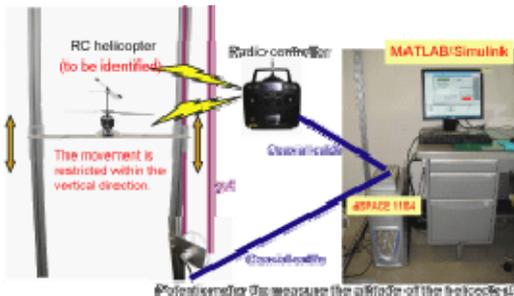


図 2. 無線操縦ヘリコプタの飛行高度制御系

#### 4. 研究成果

(1) 閉ループ部分空間同定法(CL-MOESP法)の漸近的性質の解析.

① 閉ループデータから同定対象の開ループ特性の抽出について、外生信号同士の無相関性の利用とフィードバック制御器の状態空間表現の擬似的な逆表現を求めることが重要であることを明らかにした.

② CL-MOESP法の漸近的性質について閉ループ同定のいわゆるTwo-stageアプローチの観点から明らかにした. 詳細には、同定対象を含む閉ループ系に雑音と無相関な外部励起信号を印加してシステム同定を行い、同定対象の入出力をその外部励起信号からなる空間へ直交射影することにより、フィードバックの影響を除去できて推定値が漸近的に一致することを示した.

③ CL-MOESP法について、同定対象の次数推定の意味で確度の高いモデルが得られることを示した.

④ CL-MOESP法について、有限個のサンプルデータを用いたときのC推定値の最適性に関する諸性質について導出し、CL-MOESP法が重みつき行列最小2乗推定に帰着できることを示した.

(2) 閉ループ部分空間同定法の実システムへの応用と検証実験

① 台車位置のフィードバック制御系に対して閉ループ同定実験を行い、閉ループ部分空間

同定法を適用して良好な結果を得た.

② 台車系の同定モデルと振子の物理モデルより倒立振子のフィードバック制御系を設計し、そのコントローラを用いた倒立振り子制御系に対して閉ループ同定実験を行い、閉ループ部分空間同定法より倒立振り子系の同定モデルを求めることに成功した. なお、倒立振り子系は、不安定な劣駆動系の典型例として同定が難しいことで知られている.

③ 無線操縦ヘリコプタの飛行高度制御系の閉ループ同定実験を実施し、理論の有効性を実証した. さらに、閉ループ同定実験により得られた同定モデルに基づき制御系設計を行い、開ループ同定を基にした制御器と比較して、制御器の再設計による制御性能の改善に有効であることを実証した.

④ 変化検出に利用できる統計的性質の解析に関連し、CL-MOESP法の漸近性と最適性について検証した. CL-MOESP法がフィードバックの影響を受けることなく同定対象に対応するある推定値が漸近的に一致することと、同定対象の次数推定の意味で確度の高いモデルが得られることについて、他の研究者の先行研究であるPBSID法やSSARX法とシミュレーションおよび複数のシステム同定実験を通して比較した. 台車系の変化検出、倒立振り子台車系の同定実験や、無線操縦ヘリコプタの飛行高度制御系の閉ループ同定実験のすべてについて実験を積み重ね、結果として提案手法がモデルの次数推定の点において優れた性質をもつことを実証した.

(3) 開ループ系に対する高速逐次部分空間同定法による変化検出法を図3の台車系に実装し実験を行った. 図4に監視対象である台車系の入出力信号の計測値を示す. 入力として台車を駆動するDCサーボモータへの入力電圧値、出力として台車の位置計測用ポテンシオメータの電圧値を用いる. 検出すべき変化として、モータドライバのサーボロック切替スイッチの手动操作とする. 図4と図5から、変化から7サンプル後に変化を検出しており、速やかな変化検出が達成されている.

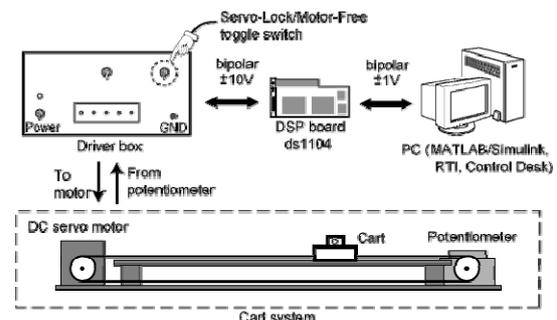


図 3. 台車系制御実験装置

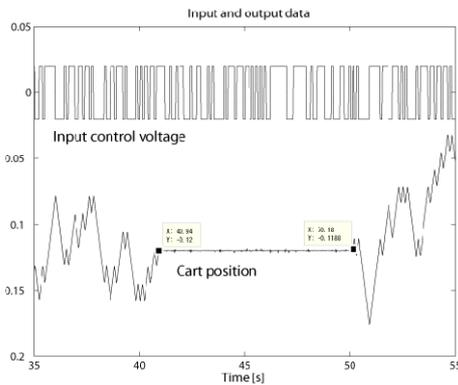


図4. 監視対象の入出力信号

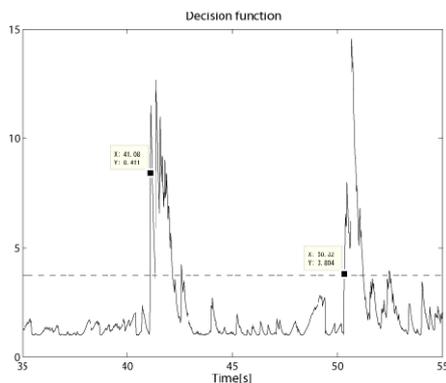


図5. 変化の有無を判断する決定関数

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① 奥宏史, MOESP型閉ループ部分空間同定法の漸近的性質について, 計測自動制御学会論文集, 査読有, 46巻, 2010, 511-518.
- ② Hiroshi Oku, On asymptotic properties of MOESP-type closed-loop subspace model identification, Proceedings of MTNS 2010, 査読有, 1巻, 2010, 1015-1022.
- ③ 奥宏史, 逐次部分空間同定法に基づくオンライン変化検出法と台車系による実機実験, システム/制御/情報, 査読無, 54巻3号, 2010, 92-97.
- ④ 奥宏史, 牛田俊, 閉ループ部分空間同定法による倒立振り子の同定実験と制御系設計, 計測と制御, 査読無, 49巻7号, 2010, 457-462.
- ⑤ Hiroshi Oku, A Change Detection Algorithm based on Recursive Subspace Identification and its Application to a Cart System, Proceedings of SYSID 2009, 査読有, 2009, 982-987.
- ⑥ H. Oku and S. Ushida, Experiment on closed-loop subspace model identification of

an unstable underactuated system, Proceedings of ICCAS-SICE 2009, 査読有, 2009, 4902-4907.

[学会発表] (計6件)

- ① 奥宏史, 制御のための閉ループ部分空間同定法, 「高品質・安定生産・環境調和を達成する先端のプロセス制御」第1回公開フォーラム「実データに基づくシステム同定の最先端」(招待講演), 2010年11月29日, (株)神戸製鋼所大阪支社(大阪府).
- ② 奥宏史, 同定モデルの次数決定に関する閉ループ部分空間同定法の比較 --モデル構造推定におけるCL-MOESP法の優位性--, 第39回制御理論シンポジウム, 2010年9月29日, ホテルコスモスクエア国際交流センター(大阪府).
- ③ 奥宏史, RCヘリコプタの閉ループ部分空間同定とホバリング制御系設計, 第54回システム制御情報学会研究発表講演会, 2010年5月21日, 京都リサーチパーク(京都府).
- ④ 奥宏史, 閉ループ部分空間同定におけるモデルの次数決定について --RCヘリコプタの閉ループ同定の事例研究より--, 第1回プラントモデリングシンポジウム, 2010年4月16日, 電気通信大学(東京都).
- ⑤ 奥宏史, MOESP型閉ループ同定法の漸近的性質について, 第10回計測自動制御学会制御部門大会, 2010年3月18日, 熊本大学(熊本県).
- ⑥ 奥宏史, 閉ループ部分空間同定法による台車系の同定実験, 第51回自動制御連合講演会, 2008年11月22日, 山形大学工学部(山形県).

## 6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者 無し

(3) 連携研究者 無し