

氏 名 ジャーファー ハッサン モハンメド ユースフ アルムタワ
Jaafar Hasan Mohamed Yusuf ALMutawa
 学位(専攻分野) 博 士 (情 報 学)
 学位記番号 情 博 第 202 号
 学位授与の日付 平成 18 年 3 月 23 日
 学位授与の要件 学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
 研究科・専攻 情 報 学 研 究 科 数 理 工 学 専 攻
 学位論文題目 **Subspace Identification of Linear Systems in the Presence of Outliers**
 (異常雑音の加わる線形システムに対する部分空間同定)

(主 査)
 論文調査委員 教授 福 嶋 雅 夫 教授 酒 井 英 昭 教授 杉 江 俊 治

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、観測データに異常雑音 (outliers) が存在する場合の線形システムの同定問題に関して、ロバスト統計的手法と部分空間同定法を組み合わせるいくつかの方法を提案したものであり、本文7章と付録から成っている。各章の内容は以下の通りである。

第1章は序論であり、部分空間同定理論の展開と、本論文で取り扱う同定問題とその背景について述べ、さらに各章の内容を要約している。

第2章では、観測データに異常値を含む場合の推定問題をいくつかの例題を用いて説明し、ロバスト推定においてはデータの平均や標準偏差ではなくデータのメディアン (median; 中央値) が重要な役割を果たすことを説明している。さらに本論文で利用するロバスト推定法として、LTS (Least-Trimmed-Squares; 最小トリム2乗) 法および EM (Expectation Maximization) アルゴリズムを詳しく紹介している。

第3章では、データの直交分解に基づく部分空間同定法である ORT (ORTogonal decomposition method) 法と重み付き LQ 分解を利用した異常雑音を含む線形システムの同定法を提案している。まず異常雑音を含むデータを用いて状態空間モデルの初期推定値を得、それから求まる出力の予測誤差 (残差) のメディアンを利用することにより、異常雑音のロバスト検出を行う。さらに LQ 分解の重みを自動的に修正する方法を考案し、メディアンを利用した異常雑音の検出と重みの修正を繰り返して、ORT 法による同定結果を改良する方法を提案している。

第4章では、LTS 法による異常値を含むシステムの部分空間同定法について考察している。最初に Bai による LTS 法を多変数回帰モデルに適用できるように拡張し、その結果を用いて多変数状態空間モデルの出力データから異常雑音を検出する2つの方法を提案している。検出された異常雑音を出力値のメディアンで置き換え、異常雑音をデータから除去して得られたデータに ORT 法を適用することにより、異常雑音にロバストな部分空間同定法を提案している。

第5章では、部分空間同定法で得られた推定値を初期推定値として、EM アルゴリズムを用いて推定値を改良する方法を提案している。まず異常雑音が存在しない場合に EM アルゴリズムによって状態空間モデルを同定する従来の方法について述べた後、完全対数尤度関数の観測データに関する条件つき期待値を計算することにより、異常雑音が存在する場合の同定法に拡張している。

第6章では、有色観測雑音の中に異常値を含むような状態空間モデルに対して、k 点排除診断法 (Leave-k-Out Diagnostics) を用いた同定法を提案している。まず結合状態空間モデルを導入することにより、有色観測雑音を含むシステムの異常値検出問題を確率サブシステムの出力観測雑音、プロセス雑音のロバスト推定問題に帰着できることを示している。つぎに、k 点排除統計を利用した異常雑音の検出法を考案し、それを用いてデータの前処理を行い、ORT 法により状態空間モデルを同定する方法を提案している。

第7章では論文のまとめを行うとともに、将来の研究課題について言及している。

論文審査の結果の要旨

近年多くの関心を集めた部分空間同定法は、基本的に最小2乗法のアプローチに基づいているため、観測データに存在する異常雑音の影響を受けることが指摘されている。このことに着目して、本論文ではロバスト推定・検定の方法を援用した異常雑音を除去するアルゴリズムを組み込むことにより、部分空間同定法の適用範囲を広げることを目的としたいくつかの検討を行っており、その主な成果は以下のとおりである。

1. まず異常雑音を予測誤差のメディアンを利用したロバスト推定法により検出し、それに基づいて自動的にLQ分解の重みを決定する方法を考案した。さらに、この重みつきLQ分解とORT法と組み合わせることにより、異常雑音が存在する場合にも部分空間同定法の適用を可能にした。
2. 従来のLTS法を多変数回帰モデルに拡張し、状態空間モデルを同定する2つの部分空間同定法（確定法とランダム法）を提案した。これらの方法は、異常雑音が出現する確率が低い場合にも適用でき、また出力の残差を計算するための初期推定値を必要としないという特長がある。
3. 部分空間法による状態空間モデルの初期推定値を最尤推定の立場から改良する方法を提案した。初期推定値から異常値を検出し、それをデータ欠損（missing data）とみなすことにより、EMアルゴリズムを用いて初期推定値を改良する方法を提案した。またMOESP（Multivariable Output Error State sPace）法とORT法を用いた比較シミュレーションによって提案手法の有効性を確認した。
4. 有色観測雑音の中に異常値を含むような確率状態空間モデルに対して、k点排除診断法を用いたロバスト同定法を新たに提案した。k点排除診断法とカルマンフィルタおよびスモータから計算される統計量を用いたF分布検定法を結合して効率のよいアルゴリズムを与えた。さらにシミュレーションによって、提案手法の有効性について確認した。

以上要するに、本論文はロバスト推定・検定の理論を援用することにより、異常雑音を含む線形システムの部分空間同定法に関連する幾つかの新しい方法を提案したものであり、その成果は学術上、実際上寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（情報学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成17年11月24日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。