

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月 8日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540158

研究課題名（和文） 線形確率系のロバストな最適フィルタ

研究課題名（英文） Robust optimal filters of linear stochastic systems

研究代表者

谷川 明夫（TANIKAWA AKIO）

大阪工業大学・情報科学部・教授

研究者番号：00163618

研究成果の概要（和文）：確率系の最適フィルタとしてカルマンフィルタが広く用いられてきたが、残念ながらロバストではなく、状態空間モデルにミスマッチがある場合には良い結果が得られないという重大な欠点があった。そこで、Chen・Patton は状態空間モデルにミスマッチがある場合にも適用可能でロバストなアルゴリズム ODDO を提案した。しかし、彼らのアルゴリズムには誤りがあることを我々は数年前に指摘していたが、本研究においてロバストで最適なフィルタリングの理論を正しく構築することができた。さらに、実際問題に広く適応可能な使いやすいアルゴリズム（逐次解法）を開発することができた。

研究成果の概要（英文）：Although the Kalman filter has been the most popular and widely used optimal filter for stochastic systems in practice, it is not a robust filter and so we cannot have good results often in simulations for the systems with mismatches between the actual systems and their mathematical models (i.e., the systems with modeling errors). Chen and Patton succeeded in proposing a simple filtering algorithm ODDO which is robust and optimal and can be applicable even to the systems with modeling errors. However, we later indicated that the ODDO was derived from their incorrect basic formula. In this project, we have succeeded in establishing a correct theory of robust optimal filters for stochastic systems with unknown disturbances and developing widely applicable algorithms (iterative methods) for practical systems.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	1,500,000	450,000	1,950,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：数学・数学一般（含確率論・統計数学）

キーワード：確率論

1. 研究開始当初の背景

確率系の最適フィルタの理論および実践の歴史は古く、普通 19 世紀初めの Gauss による最小 2 乗法にまで遡ることができる。そ

の後 1940 年代に、定常な時系列に対するフィルタリング理論が独立に Kolmogorov と Wiener により発表されたが、一般の非定常時系列に対する真に実用的なフィルタリン

グ理論は 1960 年代になって初めて、Kalman によって提案された。それは、状態変数の最適な推定値を逐次的に（オンラインに）求める画期的なアルゴリズムとして提案された。しかし、状態空間モデルリングにミスマッチがある問題に対しては良い結果が得られないという重大な欠点があった。1996 年に Chen-Patton はミスマッチ部分を外部入力項とし、この外部入力項を射影行列によりうまく分離し相殺する簡明なアルゴリズム ODDO(optimal disturbance decoupling observer) を提案し、飛行制御問題に適用して ODDO の Kalman フィルタに対する優越性を示した。しかし研究代表者は、彼らが誤った基本公式に基づいて最適フィルタを導出していることを数年前に明らかにした。

2. 研究の目的

Chen-Patton は、状態空間(動的システム)モデルが未知の外部入力項を有するときに、その外部入力項を射影行列によりうまく分離し相殺するアルゴリズム ODDO(optimal disturbance decoupling observer)を提案することにより、Kalman フィルタの重大な弱点を克服し、学会賞を受賞した。しかし、数値実験において、彼らのアルゴリズムでも問題によりあまり良い結果が得られないことがしばしば報告されていた。本研究では、彼らが用いた誤りを含んだ基本公式を正しい公式で置き換えることが第一の目的である。すなわち、状態空間モデルを未知の外部入力項を含む動的システムとして捉え、それに対するロバストで最適なフィルタリングの理論を正しく構築することである。そして、実際問題に適用できる逐次解法(アルゴリズム)を開発することが第二の目的である。さらに数値実験を繰り返すことによりその正しさを確かめ、他の方法との比較を行う。最後に、この最適フィルタをスムージング問題に適用し、外部入力項を含む動的システムに対する最適なスムーザーを導出することが第三の目的である。

3. 研究の方法

本研究の目的は、未知の外部入力項を含む確率システムに対する最適なフィルタリングの理論を構築し、さらに実際問題に広く適用可能な使いやすいアルゴリズム(逐次解法)を開発することである。また、この最適フィルタをスムージング問題に適用し、外部入力項を含む動的システムに対する最適なスムーザーを導出することである。その研究方法は以下の通りであった。

(1) Chen-Patton は未知の外部入力項を含む動的システムに対して、その外部入力項

をうまく相殺する最適なフィルタリング・アルゴリズム ODDO (optimal disturbance decoupling observer) を提案し、シミュレーションによりその有用性を 1996 年の論文で示した。研究代表者は京都工芸繊維大学の澤田祐一氏との共著の論文で、システムの観測方程式が有色ノイズ(雑音)の場合に ODDO を拡張し、シミュレーションにより実用上の有効性も示した。その際に、澤田氏は京都工芸繊維大において、ODDO の数値計算プログラムを MATLAB (PC 版) 用に作成し、その後申請者の研究室の PC 上に移植され使用可能になった。また、理論的な考察により、Chen-Patton が誤った基本公式に基づいて最適フィルタを導出していることを明らかにし、そして特別な場合に、修正された公式を澤田氏との共同研究において発見することが出来た。さらに本研究において、一般的な場合に対して、未知のパラメータを有する線形システムに対する(それらのパラメータに関して)ロバストな最適フィルタの理論を構築した。また、これに関して Chen-Patton の誤った基本公式と比較しながら、最適フィルタ・アルゴリズムおよび時系列の共分散行列の正しい構造を調べた。このような理論の構築のため、京都工芸繊維大学の澤田祐一氏との研究連絡を学会やシンポジウムでの発表を兼ねて行った。

(2) 研究代表者は、未知の外部入力項を含む動的システムの故障探知問題(fault detection)に対して、ロバストな最適フィルタ・アルゴリズム応用することにより、理論的に解決することができた。そして、大規模な最適フィルタ問題および故障探知問題のシミュレーションを行うために、高速 CPU および大容量メモリーをもつ PC (計算機) 2 台と PC 用ソフトウェア MATLAB を購入した。また、京都工芸繊維大学の澤田祐一氏と共同で、大規模な最適フィルタ問題および故障探知問題(fault detection)のシミュレーションを行った。

(3) 研究代表者は、ロバストな最適フィルタの理論を種々のスムージング問題に応用し、外部入力項を含む動的システムに対する種々の最適なスムーザーを導出することができた。研究成果の発表のため、研究代表者はノート型 PC を購入した。

4. 研究成果

(1) 確率系の最適フィルタとしてカルマンフィルタが広く用いられてきたが、残念ながらロバストではなく、状態空間モデルにミスマッチがある場合には良い結果が得られないという重大な欠点があった。そこで、Chen-Patton は状態空間モデルにミスマッチがある場合にも適用可能でロバストなア

ルゴリズム ODDO を提案したが、彼らの理論には誤りがあることを我々は数年前に指摘した。本研究において、彼らが用いた誤りを含んだ基本公式を正しい公式で置き換えることに成功し、ロバストで最適なフィルタリングの理論を正しく構築することができた。すなわち、状態空間モデルを未知の外部入力項を含む動的システムとして捉え、それに対するロバストで最適なフィルタリングの理論を正しく構築することができた。そして、具体的なシミュレーション問題において、我々のアルゴリズム（逐次解法）の正しさを実際に確かめることができた。

(2) 実際問題に広く適応可能な使いやすい我々のアルゴリズムの汎用プログラムを澤田氏と共同で開発することができた。

(3) 研究代表者と澤田氏は、我々のアルゴリズム（逐次解法）をシステムの観測方程式が有色ノイズ（雑音）の場合へ理論的に拡張することに成功した。また、この場合に我々の方法を適用してシミュレーションを行ってみたところ、極めてよい結果が得られた。このことも我々のアルゴリズムの正しさを下支えしてくれるようで、大変心強い。

(4) 研究代表者と澤田氏は、未知の外部入力項を含む動的システムの故障探知問題 (fault detection) に対して、ロバストな最適フィルタ・アルゴリズム応用することにより、理論的に解決することができた。また、シミュレーションにより、我々のアルゴリズムの有効性を確かめることができた。

(5) 研究代表者は、ロバストな最適フィルタの理論をスムージング問題に応用し、外部入力項を含む動的システムに対する最適なスムーザーを導出することができた。

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 4 件)

1. A. Tanikawa, H. Mukai and M. Xu. Local convergence of the sequential quadratic method for differential games, システム制御情報学会論文誌. Vol. 25, No. 12, pp. 349-357, 2012 (査読有) .
2. Y. Sawada, T. Fujimoto, A. Moritani and A. Tanikawa, Collision detection and control of single-link flexible arm using optimal disturbance decoupling and Kalman filters, システム制御情報学会論文誌. Vol. 25, No. 11, pp. 336-342, 2012 (査読有) .
3. Y. Sawada and A. Tanikawa, An improved recursive algorithm of optimal filter

for discrete-time linear systems subject to colored observation noise, International Journal of Innovative Computing, Information and Control. Vol. 8, No. 3, 2389-2397, 2012 (査読有) .

4. Tanikawa, On stability of the values of random zero-sum games, International Journal of Innovative Computing, Information and Control. Vol. 7, No. 1, 133-140, 2011 (査読有) .

[学会発表] (計 5 件)

1. A. Tanikawa and Y. Sawada. Identification of partially unknown system matrix of discrete-time stochastic systems via pseudomeasurement approach. Proceedings of the 44th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and its Applications: 11-18, 国士舘大学 (東京), 2012 年 11 月 1 日.
2. 谷川明夫, H. Mukai, M. Xu, On the rate of convergence of the sequential quadratic method for differential games, 日本数学会秋季総合分科会、統計数学分科会、九州大学 (福岡)、2012 年 9 月 19 日.
3. 谷川明夫, H. Mukai, M. Xu. Local convergence of the sequential quadratic method for differential games. 日本数学会年会、統計数学分科会、東京理科大学 (東京) 2012 年 3 月 27 日.
4. A. Tanikawa, H. Mukai and M. Xu. Local convergence of the sequential quadratic method for differential games, Proceedings of the 43rd ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and its Applications: 11-18, 大津市 (滋賀), 2011 年 10 月 28 日.
5. Y. Sawada and A. Tanikawa. Optimal state estimators for a class of discrete-time linear systems with colored observation noise using improved recursive formula, Proceedings of the 42nd ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and its Applications: 71-75, 岡山理科大学 (岡山), 2010 年 11 月 26 日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

谷川 明夫 (TANIKAWA AKIO)
大阪工業大学・情報科学部・教授
研究者番号：22540158

(2) 研究分担者

なし