

機関番号：14603

研究種目：基盤研究（C）一般

研究期間：2008～2010

課題番号：20560419

研究課題名（和文） 非同期ICAフィルタとセンサネットワークによる移動体の状態推定

研究課題名（英文） State estimation of vehicles via asynchronous ICA filtering and sensor networks

研究代表者

杉本 謙二（SUGIMOTO KENJI）

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：20179154

研究成果の概要（和文）：多数のセンサがネットワークを介して連携し、それらが一時的に異常な値（外れ値）を示しても他の情報によって補い、常に正しい状態推定を続けるという機構を提案し、有効性をシミュレーションや実験によって検証した。切替え状態推定器の設計に共通リアプノフ関数や切替えリアプノフ関数を採用することによりロバストな推定を達成できた。また多変量解析の手法を応用した熱容量のロバスト推定に関しても実用性の観点から進展させることができた。

研究成果の概要（英文）：This work proposes a design method for state estimation where many sensors collaborate via networks but some of them indicate outliers from time to time. In this method, we propose a mechanism called switching observer that continues correct state estimation by complimentary use of other sensor signals. We have examined its effectiveness by means of both simulation and experiment. A robust estimation is achieved by setting a common Lyapunov function and switched Lyapunov functions for designing the switching observer. Furthermore, we have also made a progress in heat capacity estimation by making full use of multivariate analysis techniques from a practical point of view.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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：状態推定、切替えオブザーバ、ロバスト推定、センサ異常、外れ値

## 1. 研究開始当初の背景

インターネットの爆発的な普及に伴い、制御工学でもネットワークを経由したシステムの設計問題が近年、ますます活発に研究されるようになってきた。中でも、伝送遅延、パケット損失、通信路の情報量制約など、これまで制御理論で扱われたことのない新たなテーマに注目が集まっている。

研究代表者のグループも長年、制御と通信の融合領域に挑戦して来た。以前は倒立振子をネットワーク経由で制御するなどの実装面や通信方式に取り組んだが、本研究の開始直前には伝送遅延の下での状態推定問題に注力した。

インターネットは共有資源を用いてBest effort型の通信を行なうため極めて不規則

な伝送遅延が発生する反面、パケット送信の際にタイムスタンプを付与できるため、受信時には遅延の長さが判明する。我々はこの点に着目し、不規則な遅延を補償する切替え型オブザーバの設計法を開発し、シミュレーションと実験により有効性を検証した。

これとは別に、画像処理の高速化によってカメラ画像からリアルタイムで位置を計測してフィードバック制御に利用することが可能となり、それを実用化する試みが各地で行われるようになった。幾つかの研究室では高速で動作する視覚サーボロボットを開発している。これらは素晴らしい性能を有するが、結果として高価なシステムにならざるを得ない。一方、我々の研究室では汎用の（安価な）カメラを用いた実装を試み、不十分な処理速度を制御技術で（つまりソフトウェアによって）カバーする試みが、主として研究分担者の平田によって進められてきた。

一方、研究代表者は独立成分分析（ICA）やフィードバック誤差学習（FEL）など学習に基づく信号処理・制御の技術に関心を持ち、これまでも幾つかの成果を得てきた。前者は統計的独立性に基づくブラインド信号分離の技術であり、後者は生体の運動学習モデルを元にした適応制御手法である。さらに、共同研究者の鈴木を中心に、調理家電における熱容量推定や調理材料の温度推定などにも取り組んでいた。

## 2. 研究の目的

前項で述べたネットワーク通信／非接触センサ／ICA・学習などの研究テーマを有機的に結合させ、有用なシステムとして提案することが本研究の大きな目的である。

カメラ画像によるセンシングは専用のセンサの取付けを要しないため、将来のユビキタス社会の実現に向けて不可欠な要素技術の一つである。先に述べたネットワークと組み合わせることで集中／分散処理することにより幅広い応用が期待できる。しかし、非接触センサはその手前に障害物が来れば見えなくなり計測が不可能となることは当然である。また、（条件の整った実験室でなく）実環境で利用するには、照度が激しく変化して正しい座標のトラックに失敗する（対象を見失う）ことも十分に想定すべきである。これらの障害はほとんどが一時的なものと考えられるが、それでも正しい状態の続行は難しいという問題があった。

そこで、本研究ではまず、カメラなどの非接触センサを含む複数の計測値がネットワークを経由して得られるとき、一部のセンサが一時的に異常値（本来得られるはずのない値で外れ値と呼ばれる）を示しても、ほかの計測データに基づいて総合的に正しい状態

推定を続けることができるようなオブザーバ（一種のソフトウェア）を開発することを目的とする。言わばエラーをしたセンサを他のセンサ達がチームワークによってカバーするという機構である。エラーをするセンサがあまり多くなければ、正しく推定を続けることができる。

移動体では位置と速度が状態となるので、その一部（例えば特定方向の座標）のみを測定することにより状態を推定する。将来の応用としてはフィードバック制御だけでなく、乗り物やロボットの状態を離れた所からリアルタイムで知ること、近い将来の状態を予測して（危険なら）警告を発するなど考えられ、情報技術を実環境に適用するための基盤技術の一つになることが期待される。

次に、状態推定やシステム同定のもう一つの応用例として熱容量のロバスト推定に取り組む。ITの急速な発展を踏まえ、センサの不足やモデルの不確かさを計算機によってカバーする機構の開発が待たれている。前者には（ハードウェアとしてのセンサに対しITを援用した計測という意味の）ソフトセンサが含まれ、またICAも有望視される。後者にはオンライン学習によるモデルレス制御が有効であると期待される。

## 3. 研究の方法

上記の目的を達成するため、次のような状態推定手法を開発した。今、もし正しい状態（移動体の場合なら位置と速度）が推定できていれば、それにより出力も推定でき、計測された出力との差を調べて現時点での誤差が得られる。もしこれが十分に大きければ、ノイズとは見なさず障害物などによる計測の失敗（外れ値）であると判断する。

一方、このような外れ値を取り除いても状態推定を正しく続けるには、切替え型推定器（オブザーバ）を用いる。これは以前、不規則遅延に対処するためのアイデアとして提案したものを外れ値にも拡張して用いる。つまり、（外れ値でない）正しいと判断される出力が時々刻々変化しても、状態の推定を続けることができる機構を開発する。そのためには最近、ハイブリッド動的システムの理論で確立されている共通リアプノフ関数の手法を採用する。これは線形行列不等式（LMI）を連立させ、全ての不等式を共通に満足する解を求めるという数値最適化の手法を援用したもので、推定器の切替えに対処できる。ただし保守性があることが指摘されているため、本研究の後半では協力者（中村）の意見に基づいて切替えリアプノフ関数に拡張して設計を行なった。この結果、保守性が改善された。

実証実験は次のようなものを計画した。

種々の事情から移動体ではなく2慣性系（2枚の円盤が取り付けられた軸が応力によりたわみ、振動する機械）に提案手法を適用し、カメラとエンコーダによって振動を測定した。実験室の窓のブラインドを開閉したり懐中電灯を当てたりすると、カメラ画像は座標を見失って一時的に外れ値を示す。このとき提案法で正しく状態推定を続けられるかどうかを確認する。

一方、熱容量のロバスト推定についてもICAや上記の切替え推定の発想をヒントにして数理的に体系化する試みに取り組む。

また、モデルレスで応答を改善する制御手法として有力なフィードバック誤差学習の性能をさらに向上させるべく設計法の精密化をはかる。

#### 4. 研究成果

外れ値にロバストな切替え状態推定器は安定性を証明し、またシミュレーションでも期待通りの動作を確認した。実験による検証は若干の時間を要したものの、有効性の確認に成功した。これらの結果は幾つかの国内・国際会議において中間発表した後、雑誌論文にまとめたものが平成22年度に掲載された。同年度に国際会議（SICE Annual Conference）で発表した際には、筆頭著者の中村がInternational AwardおよびYoung Author's AwardのFinalistに選ばれるなど、大きな反響を得ることができたものと自負している。

また上記の研究の過程で多入出力（MIMO）フィードバック誤差学習の新たな進展を着想した。具体的には、フィードフォワード信号を生成するフィルタの次数を削減し、さらに学習則も線形誤差モデルに基づくものに修正できた。これらは実装実験には至らないものの、シミュレーション結果をCDCという斯学で最も権威の高い国際会議で発表するなど海外でも定評を得ることができた。FELの制御応用については今後さらなる発展が期待される。さらに、熱容量のロバスト推定には多変量解析の手法を用いて実験に成功し、実用性の簡単から大きく進展した。

その反面、非同期ICAフィルタについては今のところ大きな進展は達成できていない。また、所期の目的であった移動体の状態をセンサネットワークで得ることは今後の課題として残された。これらには今後ぜひ取り組み、結果を出したいと考えている。

#### 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) 中村幸紀, 長井健祐, 杉本謙二, 外れ値

を伴う環境下での切替え型オブザーバによる状態推定, 計測自動制御学会論文集, Vol. 47, pp. 81-89, 2011, 査読有

2) 野口慎, 杉本謙二, 正実性によらない多入出力フィードバック誤差学習—プレフィルタ統合型学習則の改善—, システム制御情報学会論文誌, Vol. 24, pp. 61-72, 2011, 査読有

3) 野口慎, 杉本謙二, プレフィルタの状態を利用したフィードバック誤差学習, システム制御情報学会論文誌, Vol. 23, pp. 105-110, 2010, 査読有

4) 鈴木新, 杉本謙二, 熱システムの負荷推定と擬似データを用いた基準群作成法, 計測自動制御学会産業論文集(Web掲載), Vol. 8, pp. 47-53, 2009, 査読有

〔国際会議論文〕（計7件）

1) Y. Nakamura, K. Sugimoto, K. Nagai, and S. Wakui, Gain Switching Observer for Compensating Outliers --- Experimental Validation with Non-contact Sensor ---, SICE Annual Conference 2010, pp. 1749-1754, 査読有 (International AwardおよびYoung Author's AwardのFinalist論文)

2) K. Sugimoto and M. Noguchi, Further Results on Feedback Error Learning Control: Partially Known Plant and General Response Model, 49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), pp. 66-71, 2010, 査読有

3) A. Suzuki and K. Sugimoto, Robust Estimation of Heat Capacity in Cooking Devices, The 2010 IEEE Multi-Conference on Systems and Control (MSC), pp. 1374-1378, 査読有

4) K. Sugimoto and M. Noguchi, Improved Feedback Error Learning with Prefilter State Variables and RLS Criterion, The 2010 IEEE Multi-Conference on Systems and Control (MSC), pp. 41-46, 2010, 査読有

5) K. Sugimoto and H. Kondo, Multivariate Time Series Prediction by Blind Signal Deconvolution, ICROS-SICE International Joint Conference 2009, Fukuoka, 査読有

6) K. Nagai, Y. Nakamura, and K. Sugimoto, Robust State Estimation for Systems with Irregular Sensing Failure, IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, pp. 43-48, 2009, 査読有

7) K. Sugimoto and J. Even, Semi-blind Technique for Non-stationary Noise Cancellation in System Identification, 40th ISICIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications, pp. 14-15, 2008, 査読有

〔学会発表〕(計 10 件)

- 1) 松原大和, 野口慎, 佐藤淳, 杉本謙二, フィードバック誤差学習による実験用ヘリコプタモデルの姿勢制御, SICE関西支部若手研究発表会, pp. 69-70, 2011年1月18日, 大阪, 査読無
- 2) 杉本謙二, 齋藤紀彦, IIRフィルタによるセミブラインド信号分離とシステム同定, 第53回自動制御連合講演会, 2010年11月5日, 高知, 査読無
- 3) 野口慎, 杉本謙二, 一般の2自由度構造によるフィードバック誤差学習, 計測自動制御学会, 第10回制御部門大会, 2010年3月17日, 熊本, 査読無
- 4) 杉本謙二, 野口慎, プレフィルタの状態変数を利用したフィードバック誤差学習, 計測自動制御学会, 第10回適応学習制御シンポジウム, 2010年1月26日, 沖縄, 査読無
- 5) 近藤祐和, 杉本謙二, 動的ICAによる多変量時系列予測と金融への応用, 第53回システム制御情報学会研究発表講演会, 2009年5月22日, 神戸, 査読無
- 6) 中村幸紀, 長井健祐, 杉本謙二, センサ出力のオンライン選択に基づく状態推定—非接触センサによる検証実験, 第53回システム制御情報学会研究発表講演会, 2009年5月22日, 神戸, 査読無
- 7) 鈴木新, 杉本謙二, 省エネルギーとロバスト性を考慮した制御系設計法, 第53回システム制御情報学会 研究発表講演会, pp. 691-692, 2009年5月22日, 神戸, 査読無
- 8) 長井健祐, 中村幸紀, 杉本謙二, センサ故障にロバストな切替え型状態推定, 第51回自動制御連合講演会, 2008年11月22日, 山形, 査読無
- 9) 杉本謙二, Jani Even, 近藤祐和, 独立性に基づくシステム同定のノイズ除去, 第52回システム制御情報学会 研究発表講演会, 2008年5月18日, 京都, 査読無
- 10) 杉本謙二, Basel Alali, 平田健太郎, 制御工学から見たフィードバック誤差学習, RACOT研究会招待講演 (計測自動制御学会九州支部 制御理論と応用に関する研究委員会 共催), 2008年8月5日, 福岡, 査読無

〔図書〕(計 1 件)

- 1) K. Sugimoto (分担執筆), Blind Identification of Polynomial Matrix Fraction with Applications, Perspectives in Mathematical System Theory, Control, and Signal Processing, J. C. Willems, S. Hara, Y. Ohta, and H. Fujioka (Eds), Lecture Notes in Control and Information Sciences 398, Springer, pp. 379-388, 2010

〔その他〕

アウトリーチ活動

杉本謙二, 平田健太郎, 小木曾公尚, 橋拓至, コンピュータはどうやって学習する?—振れ止めの上達する制御—, 平成 20 年度ひらめき☆ときめきサイエンス—ようこそ大学の研究室へ—KAKENHI, 日本学術振興会・研究成果の社会還元・普及事業, HT20103, 生駒, 2008年10月25日

ホームページ等

<http://genesis.naist.jp/gyoseki/gyoseki2010.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

杉本 謙二 (SUGIMOTO KENJI)  
奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・教授  
研究者番号: 20179154

### (2) 研究分担者

平田 健太郎 (HIRATA KENTARO)  
奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・准教授  
研究者番号: 00293902

橋 拓至 (TACHIBANA TAKUJI)  
奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・助教  
研究者番号: 20415847

小木曾 公尚 (KOGISO KIMINAO)  
奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・助教  
研究者番号: 30379549

### (3) 研究協力者

中村 幸紀 (NAKAMURA YUKINORI)  
日本学術振興会 特別研究員 (DC2, PD) (本学後期課程修了生)

鈴木 新 (SUZUKI ARATA)  
和歌山大学・システム工学部・光メカトロニクス学科・講師 (本学後期課程修了生)

このほか、後期課程学生・前期課程学生や修了生など。