

氏 名	たか かつ とも じ 高 津 知 司
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	博 甲 第 3 0 3 号
学位授与の日付	平成 15 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規程第 3 条第 3 項該当
研 究 科 ・ 専 攻	工芸科学研究科 情報・生産科学専攻
学 位 論 文 題 目	An Approach to Inverse Problems for a Class of Noisy Dynamical Systems : Construction of Soft Sensors (主査)
審 査 委 員	教 授 大住 晃 教 授 三宮 信夫 教 授 森 武宏

論文内容の要旨

近年、機械工学、建設工学あるいは環境工学など様々な分野において、直接的には計測できない諸物理量を間接的な方法により測定しなければならない状況が多々生じてきている。例えば、機械工学においては、軽量で弾性をもったはり材料を使用した、あるいは組み合わされた、いわゆる柔軟構造物（例えば、ロボットアームや宇宙ステーションのアンテナ）等の制振、建設工学においては、高層ビルや長大橋などの施工中や供用後の維持管理、環境工学においては、河川浄化プラントの経済的運転などにおいて、物理定数や化学物質の濃度など直接的または非破壊的に計測できない諸量の測定が必要になっている。

これらの諸量を求める方法については、物理定数などの測定はパラメータ同定、濃度などの測定は状態推定などと呼ばれているが、これらはとりも直さず逆問題に対する数理的解決法を示している。直接的には計測できない、あるいは測定された物理量から二次的に求める計算アルゴリズムを構築し、それによって求めるべき物理量を推定する方法は、物理量を直接計器により計測するハードな方法に対して、しばしば“ソフトセンサー” (soft sensor) と呼称されている。

本論文では、構造物や化学プラントなどその動特性が微分方程式で記述されるシステムのもつ種々のパラメータを、数理モデルから得られる出力と測定データから得られる出力との誤差を最小にすることによって未知パラメータを決定する計算アルゴリズムを構築し、ソフトセンサーを実現している。

このような問題に対しては、最小自乗推定アルゴリズムが有効であることは知られており、すでにそのようなアルゴリズムは存在するが、真値への収束性が理論的に保証されていないことからアルゴリズムが数値的に不安定になるなどの不都合が指摘されている。そこで、本論文では、真値への収束性を理論的に保証するために、正則化項と摂動項を導入することによって計算アルゴリズムが関数空間上で不動点を持つように改良している。このことにより、理論的な収束解の保証を与えたソフトセンサーが構築でき、従来の最小自乗法や正則化最小自乗アルゴリズムなどを網羅した一般化最小自乗アルゴリズム (generalized least-squares algorithm) として提案している。

ここで提案した一般化最小自乗アルゴリズムは、動的システムに不規則雑音が介入する場合、すなわち確率システムの未知パラメータ同定にも効力を発揮する。このような未知パラメータ同

定問題に対しては、システムの状態量に対する推定問題を交互に解くことで実現することを提案し、システム状態量の推定にはカルマンフィルタを、またパラメータ同定に対しては本申請者の提案した最小自乗アルゴリズムを使用し、パラメータ同定と状態推定とを同時に解決することによって、不規則雑音が介入するシステムに対するソフトセンサーを提案している。

本申請者が提案したソフトセンサーが有効であることを、河川浄化プラントや柔軟構造物のパラメータ同定を例にとってシミュレーションによって示し、さらに片持ちはりのヤング率と空気減衰係数の同定については実物実験により実証している。

第1章では、導入部として本研究を行うに至った背景と過去になされた研究を紹介して、本研究の意義を確認している。

第2章では、線形作用素方程式で記述されるシステムダイナミックスを持つ物理現象の逆問題の解決に対して、従来の最小自乗法や正則化最小自乗アルゴリズムを発展させることによって真値への収束性が常に保証されるように正則項と摂動項を加え修正ガウス・ニュートンアルゴリズムを提案している。これら3つの手法を理論的に比較検討し、提案アルゴリズム手法の優位さを示している。さらに、提案手法適用時の留意点にも言及している。

第3章では、不規則雑音をうけるダイナミカルシステムの未知パラメータを同定する問題を、確率システムに対するひとつの逆問題として捉え、同定規範を変形することによって同定問題と状態量推定問題とにわけ、それらを交互に解くことによって未知パラメータを決定するソフトセンサーを構築している。シミュレーションでは、河川浄化プラントの動特性を近似したむだ時間を含む一次遅れ系のパラメータ同定を行っている。その結果、提案手法の妥当性と第2章で導出した諸性質を確認している。

第4章では、その動特性が偏微分方程式で記述される片持はりの材質のヤング率と空気減衰係数を、はりの振動データから決定する問題に対するソフトセンサーを構築している。システムダイナミックスは無限次元となるが、これに固有関数展開法を導入して有限次元化することによって第3章で述べた方法に帰着させている。シミュレーションにより本アルゴリズムの有効性を検証し、さらに、ヤング率については引張試験の結果と比較することにより同定値の正確さを実証している。そして材質の異なる二通りの実験によって実用性の検討を行い、実験によって得られた同定値が十分実用に耐え得ることを実証している。

第5章では、オンライン・ソフトセンサーを、観測データの更新とオフライン・ソフトセンサーの繰返し計算を同期することで構築している。最小自乗アルゴリズムから導出されるガウス・ニュートンアルゴリズムによるソフトセンサーは不安定なのに対し、本申請者が提案するアルゴリズムによるソフトセンサーは安定している。さらに、内部減衰率が穏やかに変化する場合でも良好に同定が可能であることが示されている。

第6章では、本研究で得られた結果がまとめられている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、直接的または非破壊的な方法で計測できない物理パラメータを間接的あるいは非破壊的な方法で得た計測データを用いて、それらを求めるオフラインおよびオンライン・アルゴ

リズムの構成法を確立したものであり、その有効性をシミュレーションと実験を通して検証している。

本論文で提案されたソフトセンサーを用いて緩やかに変化する未知物理パラメータを同定することも可能となり、それによって時変系の物理特性を正確に把握でき、さらにより高度な制御システムの設計に貢献することが期待できる。間接的または非破壊的な方法で得られる観測データから物理パラメータを決定する有効な手法を確立したことは工学上意義があり、応用範囲は広い。

以上により、本論文内容は学術性と実用性の両面を備えており、本論文は学位論文としての水準を満たしていると判断した。

本学位論文の内容は、以下のレフリー制のある学術論文誌、国際会議録および著書にすでに公表および掲載決定されている。

1. A. Ohsumi and T. Takatsu: Minimum Variance Unbiased Estimators for a Class of Nonhomogeneous Random Fields, *Analysis and Control of Nonlinear Systems* (Eds: C. I. Byrnes, C. F. Martin, R. E. Saeks), North-Holland, Amsterdam, pp.263-270, 1988.
2. T. Takatsu, A. Ohsumi and A. Nakagawa: Parameter Identification of Stochastic Uncertain Systems Using a Modified Gauss-Newton Method, *Proceedings of 32nd ISCIE International Symposium on Stochastic System Theory and its Application*, Tottori, pp.225-230, 2000.
3. 高津 知司、大住 晃、中川 敦史: 修正 Gauss-Newton 法による確率システムの未知パラメータ同定、システム制御情報学会論文誌、vol.15, no.7, pp.359-367, 2002.
4. 高津 知司、大住 晃: 不規則雑音をうける計測データからのオンラインパラメータ同定とその応用: オンライン・ソフトセンサの構築、日本機械学会論文集 (C 編)、2003 (掲載決定)

なお、本申請者は、本学位論文の基礎となった上記論文以外にも、下記の学術論文を公表している。

1. T. Takatsu, H. Takeda, and K. Cho: A Cocept of Strategy for a Standard in the Micr-Tunnelling System, *Proceedings of 1990 Japan-USA Symposium on Flexible Automation-A Pasific Rim Conference*, Kyoto, pp:493-496, 1990.
2. K. Cho, T. Takatsu, and H. Takeda: In Case of Standard on Control System for Micro-Tnnelling, *Proceedings of 6th International Conference(NO-DIG'90)*, Osaka, pp. K.1.1-K.1.7,1990.
3. T. Takatsu, M. Nomura, and A. Sugiyama: Study on Method Improvement for

Construction Work in Civil Engineering, *Proceedings of 9th Symposium on Automatic and Robotics in Construction* (9th ISARC), Tokyo, pp.83-88, June 1992.

- 4 . T. Takatsu, H. Takeda, S. Ohsumi, J. Nishio: Department of a Measuring System for the Underground Pipelines, *Proceedings of 9th Symposium on Automatic and Robotics in Construction* (9th ISARC), Tokyo, pp.767-775, June 1992.
- 5 . T. Takatsu, H. Takeda, and A. Sugiyama: On a Common Fuzzy Control System for the Micro-Tunnelling: Introduction of Control Configured Construction Machine, in *No Trenches in Town* (Eds: Henry and Mermet), Balkema, Rotterdam, pp.31-38, 1992.
- 6 . T. Takatsu, S. Mimura, and T. Yoshida: Stochastic Modeling for the Steering Control of the Micro-Tunnelling System, *Proceedings of 25th ISCIE International Symposium on Stochastic System Theory and its Application*, Osaka, pp.81-86, 1993.
- 7 . A. Ohsumi, Inoue, T. Takatsu, and S. Shiomi: Estimation and Identification of Nonhomogeneous Geological Vector Random Fields, *Proceedings of 12th IFAC World Congress*, Vol.7, Sydney, Australia, pp.133-138, July 1993.