

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560965

研究課題名(和文)宇宙機の姿勢制御性能に影響を与える衛星内部状態量の高精度推定と軌道上推定の研究

研究課題名(英文)Dynamics Estimation on the Sensor Error and Disturbance Source

研究代表者

齋藤 宏文(SAITO, HIROBUMI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号：80150051

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円、(間接経費) 660,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙機の姿勢制御性能に影響を与える衛星内部状態量の高精度推定の研究として、カルマンフィルタと呼ばれる推定フィルタの主要な行列項を適応的に調整あるいは動的に変化させる新たな手法を見いだした結果、磁気センサ・ジャイロセンサのバイアス誤差および残留磁気モーメントを軌道上で同時に推定する手法を提案した。加えて、姿勢センサに用いられる光ファイバージャイロ(FOG)のバイアスレートの変動をARXモデルで表現し、周囲温度が変動した場合のバイアスレートを予測する手法を開発した。これらは、特に超小型衛星の姿勢制御における主要な誤差・姿勢外乱源であるので、今後の高機能な超小型衛星開発に大きく貢献しうるものである。

研究成果の概要(英文)： Dynamics estimation on the sensor error and disturbance source was studied for the spacecraft attitude control. The theoretical basis of this research was the novel adaptive algorithm for the unscented Kalman filter, and as the fruits of this research, magnetic sensor bias error, gyro sensor bias error and the residual magnetic dipole moment can be estimated by one integrated estimator, in real-time and simultaneously. These sensor errors and disturbance source are dominant especially for nano-satellites, thus the results of this research can be a powerful tool to produce practical and advanced nano-satellites in near future.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：誘導・航法・制御 人工衛星姿勢制御

1. 研究開始当初の背景

研究代表者と分担者らは、重量 72kg の小型科学衛星れいめいをインハウス体制により開発し、軌道上で 9 年以上にわたり現在まで運用している。特に、姿勢制御精度が 0.1° 以下の 3 軸姿勢制御を軌道上にて達成させた実績を持ち、姿勢系パラメータの推定に関して、軌道上での衛星の残留磁気モーメントを、スタートラッカー、FOG による絶対姿勢の決定値と、リアクションホイール制御トルク、磁気トルカ制御トルクの値から、制御工学で用いられるオブザーバーの手法を用いて地上にて推定し、磁気トルカの駆動則にフィードフォワード制御として組み入れる事で、姿勢制御精度を 0.2° から 0.05° (1σ) に改善した実績を持つ。

このような経験から、衛星や搭載機器の磁気モーメント、磁場センサやジャイロセンサのバイアス、姿勢系機器のアライメント等の状態パラメータや動特性は軌道上で変化しやすいにもかかわらず、これらのパラメータや動特性を推定する実際的な手法がほとんど提案されていない事に着目した。この点を改善するための研究に着手しようと思立った。

2. 研究の目的

人工衛星の姿勢制御系の性能に大きな影響を与える、衛星や搭載機器の磁気モーメント、センサバイアス、姿勢系機器のアライメント等のさまざまな状態パラメータや動特性は、軌道上で変化しやすい。本研究では、リソースが限られた小型衛星の姿勢系の高性能化や、中大型衛星のさらなる姿勢系の高性能化のために、打ち上げ後のパラメータや動特性を高精度に地上で推定する手法、及び、軌道上で推定する手法を可能な限り体系的に研究することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 姿勢制御系の誤差外乱要因の動的推定
人工衛星の姿勢制御における誤差・外乱要

因の動的推定手法について研究を行う。人工衛星の姿勢制御性能に大きく影響し、かつ軌道上で動的に変動する状態パラメータ・特性として、1. 周辺機器の電流等によって磁気センサに加わる磁気バイアス誤差、2. ジャイロセンサに生じる角速度バイアス誤差、3. 搭載機器の電流ループ等により生じる残留磁気モーメントの 3 つを代表的な変動パラメータとして抽出し、これらを軌道上でリアルタイムに推定するための手法を検討・提案する。提案手法の評価に際しては、実際の軌道上データを踏まえたシミュレーションモデルを適用する。

(2) 姿勢センサの軌道上環境によるバイアスの動的推定

小型衛星の姿勢センサーに広く使用されている光ファイバージャイロ (FOG) のバイアスレート (角速度入力がない状態でセンサー出力に現れるバイアスレート) は、従来は、姿勢センサ出力に加わる雑音、あるいは、バイアス変動として扱われていた。しかし、その一部は軌道上環境により決定論的に変動する成分であることに着目し、FOG の温度変動から FOG のバイアスレートを精密に推定してそれを出力レートから差し引くアルゴリズムを提案し、シミュレーションと地上試験にてその効果を確認する。

4. 研究成果

(1) 人工衛星の姿勢制御における誤差・外乱要因の動的推定

① 軌道上の人工衛星に対して、カルマンフィルタの 1 種である UKF (Unscented Kalman Filter) を用いて、ジャイロセンサの角速度バイアス誤差と、磁気センサの磁気バイアス誤差とを同時に推定する手法を提案した。同様の研究は従来からなされていたが、本研究による大きな成果は、カルマンフィルタにおいて推定対象のノイズ特性を示す重要なパラメータであるプロセスノイズ

行列 (Q 行列) の設定が、この同時推定問題の場合には理論的・解析的には定めがたいこと指摘した上で、推定誤差に基づく適応型 UKF を応用することで、この Q 行列の適切な値を定める手法を提案した点にある。

② ①項に述べた成果である角速度バイアス誤差と磁気バイアス誤差の同時推定手法に対して、搭載機器の動作状態等により生じる瞬間的で大きなノイズに対して強い耐性を持たせる手法 (“Robust UKF”) を新たに提案した。具体的には、カルマンフィルタにおいてセンサノイズ強度を示すパラメータ行列 (R 行列) に対して、その係数行列を適応則により動的に調整する手法である。

③ 軌道上で、特に小型衛星の場合に主要な姿勢外乱源となる残留磁気モーメントを推定する新たな手法を提案した。従来手法では時不変と仮定して残留磁気モーメント推定を行っていたのに対し、提案手法は、残留磁気モーメントが時変の場合にも適用可能な手法となっている。搭載機器の電源 ON/OFF 等に伴う残留磁気モーメント変動は多くの場合ステップ状であるため、素早い推定性能が求められるが、提案手法では、残留磁気モーメントの急変をカルマンフィルタの推定状態から検出し、これに応じてカルマンフィルタの内部状態である共分散行列 (P 行列) を適応的に調整することを提案しており、新規性の高い手法となっている。

④ ①～③項の個別の推定則を統合し、ひとつの推定フィルタとする手法について提案を行った。すなわち、この統合されたフィルタを人工衛星上に実装することで、軌道上の人工衛星に対して磁気バイアス誤差、角速度バイアス誤差、および残留磁気モーメントといった誤差・外乱要因を、人工衛星の姿勢と同時にリアルタイムに推定することが可能となる。統合されたフィルタは、過去の小型衛星の実際のセンサパラメータなどに基づいたシミュレーションにより、その有効性が

定量的かつ現実的に確認されている。

⑤ 以上の通り、本研究では軌道上の人工衛星に生じる、姿勢制御性能に重要な影響を及ぼす複数の誤差・外乱要因について、個別に、あるいは同時に推定する動的な推定フィルタを提案することができた。カルマンフィルタによる推定問題としての理論的な背景としては、カルマンフィルタにおける3つの主要な行列 (P, Q, R 行列) について着目し、それぞれ適応性を与えるものとなっている点で、これら提案手法は理論的に体系だったものとなっている。また、各種の誤差要因を同時に推定するための統合型フィルタは、実用的な観点での体系的な手法となっている。提案手法の評価に際しては、実際の軌道上で観察された特性を反映した評価によってその有効性が確認できている点で、有効性の実証も十分になされていると考えている。これら磁気バイアス誤差や残留磁気モーメントは、特に機器間の距離が小さく衛星慣性モーメントの小さい超小型衛星で顕著な問題となる要因であり、現在盛んに開発が行われている実用的な超小型衛星の実現に大きく貢献しうるものである。

(2) 姿勢センサーのバイアス量の推定と補償

① 小型衛星に適する小型な FOG を対象に、そのバイアスレートを、温度の時間変化に比例するシュッペ効果の項、基準温度からの温度差に比例する線形温度依存項の和としてモデル化した。そして、温度を外部入力とする自己回帰モデル (ARX モデル、autoregressive model with exogenous input) を適用した。FOG の近傍にヒータを設置して、ヒータのパルス的な熱入力を M 系列で変調することで、ARX モデルのパラメータを効率的に推定する方法を提案して、シミュレーションで確認した。その結果、約 20% の誤差で ARX モデルのパラメータが推定できた。

② 更に、地球周回衛星には、日照日陰期間に応じたほぼ正弦波的な温度変化がある。正弦波的な温度入力を FOG に与え、その温度を入力として、FOG のバイアスレートを上記の ARX モデルから予想した。FOG からのバイアスレート出力から、この予想されるバイアスレートを差し引き、残差を姿勢決定に用いる。この手法の効果を、数値シミュレーションと FOG を用いた地上実験にて、検証した。その結果、FOG のバイアスレートは、シミュレーションでは約 20%、実験では約 50% に低減した。

③ これらの結果は、小型衛星に搭載できる低コストの光ファイバージャイロにおいても、本手法を適用することでバイアスレートの軌道上環境の変化による変動を数分の一に低減でき、小型衛星の 3 軸姿勢制御能力を向上することに貢献できる。

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 2 件）

- ①. H.E. Soken, C. Hajiyev and S. Sakai, Robust Kalman Filtering for Small Satellite Attitude Estimation in the Presence of Measurement Faults, Engineering European Journal of Control, 査読有, vol.20, pp.64-72 2013 DOI: 10.1016/j.ejcon
- ②. H.E. Soken and S. Sakai, Adaptive Tuning of the UKF for Satellite Attitude Estimation Engineering, ASCE Journal of Aerospace Engineering, 査読有, 2013, DOI: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000412

〔学会発表〕（計 10 件）

- ①. H.E. Soken and S. Sakai, A Study on an Accurate yet Simple Attitude Estimation Scheme for Nano-satellites, 5th Nano-satellite Symposium, 2013, 20-22, Nov, Tokyo

- ②. H.E. Soken and S. Sakai, In-Orbit Estimation of Time-Varying Residual Magnetic Moment for Small Satellite Applications, AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, DOI: 10.2514/6.2013-4650, 2013, 19-22, Aug, Boston
- ③. H.E. Soken and S. Sakai, “Adaptive Unscented Kalman Filter for Small Satellite Attitude Estimation”, in. Proc. Of 2012 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, Jeju, Korea, 2012.
- ④. Shin-ichiro Sakai, H.Saito, Fiber Optical Gyros in the Spacecraft Control Applications, 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS-22), FOG Workshop @ OFS22 招待講演, 2012.10.15 ~ 2012.10.19, Beijing, China
- ⑤. H.E. Soken, C. Hajiyev and S. Sakai, Robust Kalman Filtering with Multiple Scale Factors for Small Satellite Attitude Estimation, Itzhack Y. Bar-Itzhack Memorial Symposium on Estimation, Navigation, and Spacecraft Control, 2012.10.14~2012.10.17, Haifa, Israel
- ⑥. H.E. Soken and S. Sakai, Residual Based Adaptive Unscented Kalman Filter for Satellite Attitude Estimation, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2012.08.13 ~ 2012.08.16, Minneapolis, USA
- ⑦. H.E.Soken and S.Sakai, UKF Based On-Orbit Gyro and Magnetometer Bias Estimation as a Part of the Attitude Determination Procedure for a Small Satellite, 11th International Conference on Control Automation and Systems, 2011.10.26-10.29, Seoul (Korea)
- ⑧. 加藤肇, 齋藤宏文, 坂井真一郎, 光ファイバージャイロの動的温度補償による高性能化,

第 47 回 光波センシング技術研究会,
2011.6.14-6.15, 東京, 新宿区

- ⑨. H. Kato, H. Saito, S. Sakai, Improvement of
Fiber Optical Gyroscope Performance by
Dynamic Calibration Against Thermal
Fluctuation for Space Applications, 28th
International Symposium on Space
Technology and Science, 2011.6.5-6.12, 沖
縄県, 宜野湾市
- ⑩. 加藤肇, 齋藤宏文, 坂井真一郎, 光ファイ
バジャイロの動的温度校正, 電子情報通信
学会, 宇宙航行エレクトロニクス研究会,
2011.4.21-4.22, 長野県, 白田

[図書] (計 1 件)

- ①. H.E. Soken, C. Hajiyev and S. Sakai,
Advances in Estimation, Navigation, and
Spacecraft Control Springer, in press

[その他]

- ①. 2013年度 "AIAA Guidance Navigation
and Control Conference"における発表(学
会発表②)は, 学会より"Graduate Student
Paper Finalist Award"として表彰を受けた.
- ②. 2011年度 "11th International Conference
on Control Automation and Systems"におけ
る発表(学会発表⑦)は, 学会より"Student
Paper Award"として表彰を受けた.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齋藤 宏文 (Hirobumi, Saito)
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・
教授
研究者番号: 80150051

(2) 研究分担者

坂井 真一郎 (Shin-ichiro, Sakai)
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・
准教授
研究者番号: 10342619