

高速スピン飛翔体のオンボード三軸軸姿勢決定・制御系の試み (S-520-29 号機の飛翔結果)

福島洋介, 志田真樹, 中塚潤一, 阿部琢美 (ISAS/JAXA), 角田竜也, 宮原秀行 (パロン電子)

Onboard Real-time Attitude Determination and Control of a Highly Spinning Sounding Rocket, S-520-29
Yosuke Fukushima, Maki Shida, Junichi Nakatsuka, Takumi Abe (ISAS/JAXA), Tatsuya Tsunoda, and
Hideyuki Miyahara (Baron Electric Corp., Ltd)

概要

本発表では、観測ロケットの特徴の一つである高速スピン状態での姿勢制御（スピン軸制御）について、姿勢決定原理、センサデータの使い方などについて、S-520-29号機で試みた結果を示しながら紹介する。

1. はじめに（目的および背景）

観測ロケットは打ち上げ後スピニアップし、搭載された観測機器の要求に合わせてスピンレートを調整し、弾道飛行しながら観測データを取得してテレメトリデータを地上に送信する。その際のスピンレートは 1Hz～2Hz、つまり 360 (degree/sec)～720 (degree/sec)であり、通常の衛星と比較するとかなり高速なスピンを行っている。

ミッションが微小重力環境を要求している場合にはスピンレートをゼロに近づける制御を行うが、観測装置の視野をスキャンさせる場合にはスピンを維持し、その運動を積極的に利用する（高速スピンを保ったままの姿勢運動が要求される）。そのようなミッションは少なくなく、観測ロケットの姿勢運動の特徴の一つとなっている。

本発表では、観測ロケットの特徴の一つである高速スピン状態での姿勢制御（スピン軸制御）について、センサデータの使い方や演算速度などについて S-520-29号機で試みた具体例を示しながら紹介する。

2. 姿勢決定・姿勢制御の概要

スピンレートが 1Hz 程度そのまま姿勢を変更する（具体的にはスピン軸を変更する）制御を以下で紹介する。この制御は一般的にはラムライン制御と呼ばれる。

スピンレートは 1Hz と高速なために、センサデータ処理およびアクチュエータをリアルタイムで処理するには、その運動に見合った時間管理が必要になる。スピン軸の変更方向を地球固定座標で指定され

る場合には、センサデータ処理はリアルタイム性が必須になる。姿勢決定精度を数 degree に維持するためには、msec でのセンサ取得タイミングとアクチュエータ動作タイミングを実現する必要がある。

S-520-29 号機で実施したスピン軸制御について、利用した機能ブロックを図 1 に示す。利用した姿勢センサは、スピン型太陽センサ (SAS)、三軸地磁場センサ (GA)、姿勢レートセンサは MEMS ジャイロを使った。SAS の視野は上下角±60degree、スリット幅は±10degree であるため、常時データが得られるのではなく、スピニング中一時的にしかデータが出力されないことに注意する。また、GA の計測ではバイアス値の推定が問題になる。フライト状態との誤差が地磁場ベクトルの誤差に直接反映されてしまう。

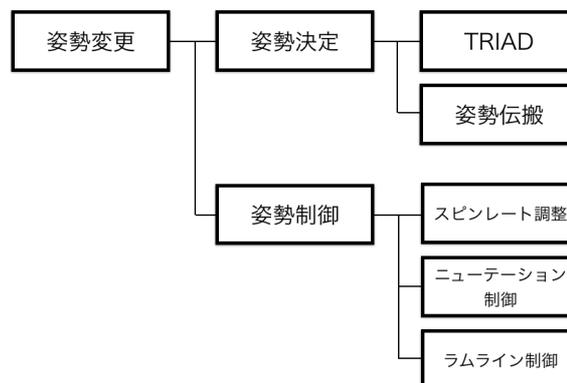


図 1 機能ブロック図

3. 姿勢決定について

S-520-29号機では、SASとGAとから絶対姿勢を求める搭載アルゴリズムにTRIAD法(図2)を利用した。SASはスピン中の短時間(10msec以下)のみしかデータが取得されず、他の時間の姿勢決定値はジャイロデータから姿勢伝搬計算を行ってもとめている。

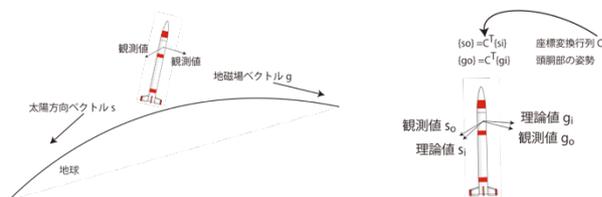


図2 TRIADによる三軸姿勢決定

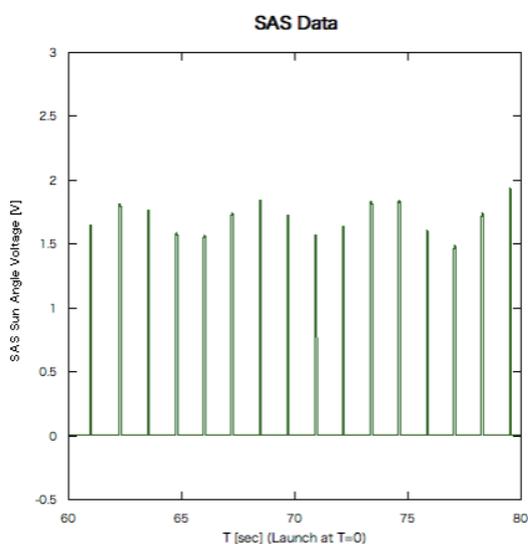


図3 SASの時系列データ(楯状のデータ)

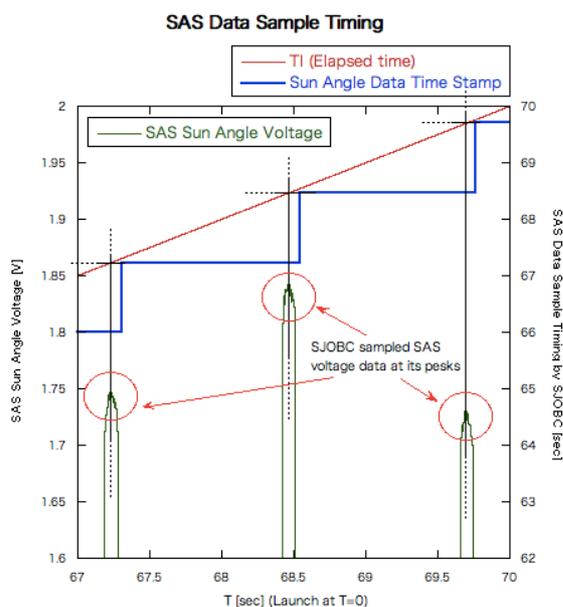


図4 SASのデータ拡大図(サンプルのタイミング)

スピレートが高速なため、SASデータのサンプルするタイミングには注意が必要となる。図3はSASで取得した太陽角データの時系列グラフである。リアルタイム性を追求するために、図4に示すように、波形判定からサンプルポイントまでをCPUではなくFPGAで実施している。

図5にTRIAD法によってオフライン(Reference)とリアルタイム(Onboard)で姿勢決定結果の比較を示す。この違いはGAのバイアス補正值の違いに起因している。角度にして5-10(degree)の誤差が発生している。

Attitude Parameter Estimates (Reference and Onboard)

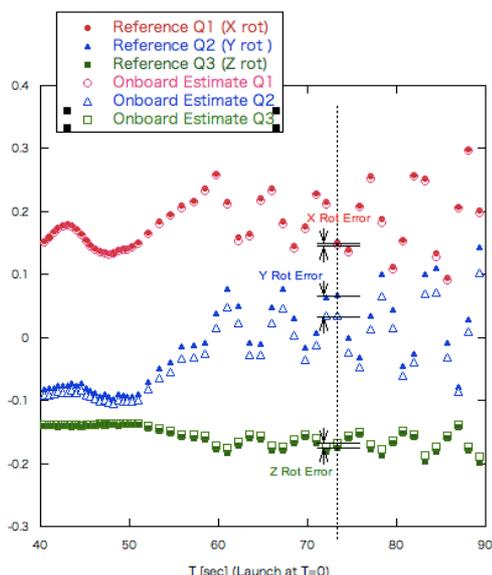


図5 リアルタイム(オンボード)とオフライン解析の姿勢決定値の比較

姿勢決定値はSASデータが有効な瞬間だけ可能であり、それ以外の期間は姿勢レートを使って姿勢伝搬を行う。

姿勢レートジャイロは打ち上げ前の静止時にバイアス値をキャンセルしているが、打ち上げ後にドリフトしてしまう。図6はスピン軸に直交する2成分の時系列グラフである。運動としてはニューテーションなのでSin/Cosの曲線となるはずであるが、ゼロを中心として動作していない。T=70でオンボードでバイアスのキャリブレーションを行い、以後のゼロを中心とした正弦波動的な動作をしていることが確認できる。

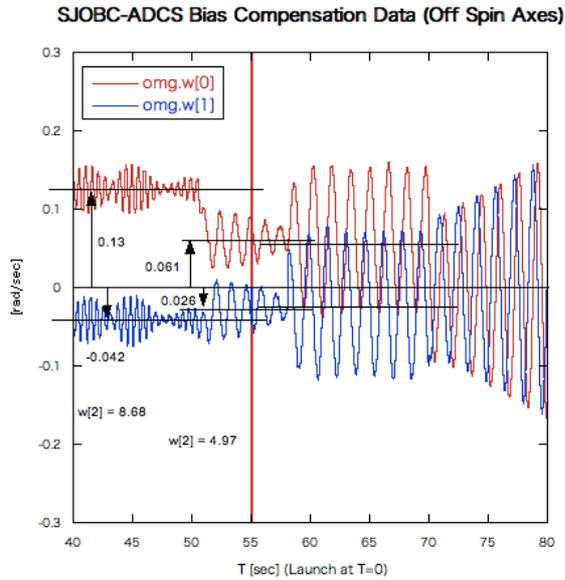


図6 レートジャイロのバイアスをオンラインで補正した様子 (T=50, T=55 でイベントがあり、ニューテーションの様子が大きく変わっているが、バイアスは T=70 でゼロになっている)

観測ロケットのスピン軸はニューテーション運動により局所座標系で確認すると円を描くはずである。オンボードでリアルタイムに姿勢決定を行い、スピン軸の運動を推定した結果を図7に示す。本来ならば閉じた円になるはずだが切れている。この切れ目は、姿勢伝搬が完全ない、姿勢決定ごとに決定に飛びがあることを示す。これのズレがリアルタイムでの姿勢決定誤差そのものを示している。

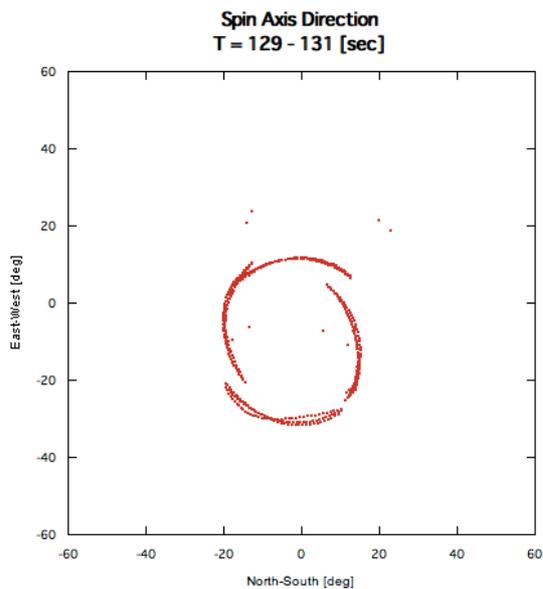


図7 姿勢伝搬計算の連続性の確認

4. 姿勢制御について

高速スピンしたままスピン軸を移動させる制御を行った結果を示す。図8は局所座標系で表現したスピン軸先端の軌跡である。完全ではないが円を描いている。

図9はスピン軸を移動させる制御を実施したときのスピン軸先端の軌跡である。制御目標先端を原点方向に一致させることであるが、確かに原点方向に移動できている様子が確認できる。

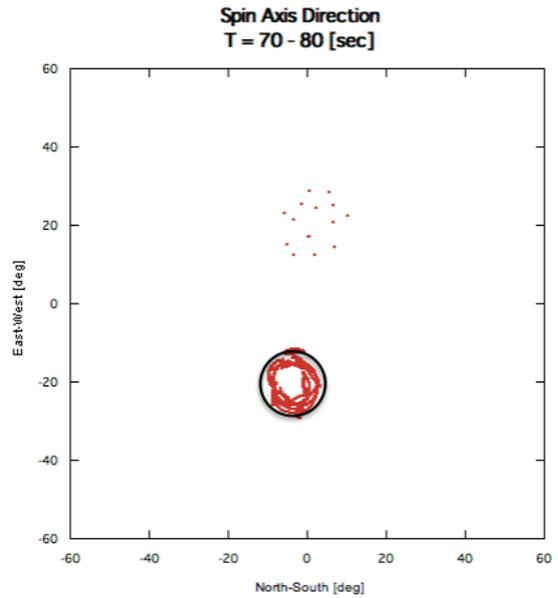


図8 スピン軸先端軌跡 (局所座標系でのプロット)

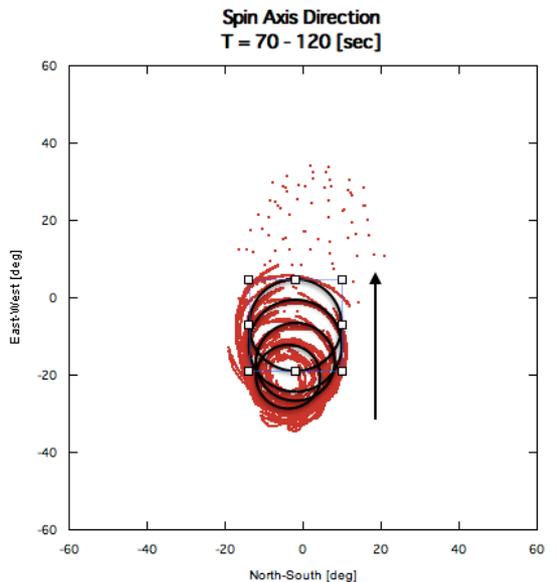


図9 スピン軸制御中の先端軌跡 (局所座標系でのプロット)

5. おわりに（結論）

本稿では、高速スピンの観測ロケットの姿勢制御結果について、原理、センサデータの利用の注意点、また S-520-29 号機のフライトデータをつかって具体的な制御結果を示した。

スピンレートが速いため、センサ取り込みのタイミング誤差、計算速度のズレが全体の制御精度に影響を与えることを示した。また、タイミングだけでなく、センサのバイアス値が支配的な影響を及ぼすことを示し、リアルタイム推定が必要となることを確認した。

今後は、高速スピンだけでなく、ゼロスピンの場合の姿勢制御についても観測ロケットの制約条件を満たしつつ、どの程度のことのできるかを低呂的に検討し、機会があればフライト試験を行ってゆきたい。