

## 次世代型スタートラッカの研究

### Development of the New Generation Star Tracker

システム誘導技術グループ 川井洋志、関口毅、稲場典康、小松茂則、鈴木秀人

Spacecraft Guidance Control and Dynamics Engineering Group

Hiroshi Kawai, Takeshi Sekiguchi, Noriyasu Inaba, Shigenori Komatsu and Hideto Suzuki

#### Abstract :

JAXA has been developing Next Generation Star Tracker (STT). STT is the attitude sensor, which consists of hood, lenses, CCD, and some electric circuits. In acquisition mode, images of stars detected by CCD are compared with a star catalogue to determine the absolute orientation of a spacecraft without a-priori attitude information. STT is more accurate attitude sensor than earth sensor plus sun sensor system.

Advanced Land Observation Satellite (ALOS) mounts large size Star Tracker to fulfill its high attitude accuracy requirement. On the other hand, we have been developing an autonomous Star Tracker whose size, power and mass is smaller than ALOS/Star Tracker.

#### 1. はじめに

近年では、ミッションの高精度化/高機能化に伴い、人工衛星の姿勢センサとしてスタートラッカ (STT) が標準になりつつある。STTは CCD カメラで恒星を撮像し、その画像から取り出した恒星パターンとセンサ自身もつ恒星カタログを比較することで、慣性空間におけるカメラの姿勢を検出するセンサである。従来から人工衛星の姿勢センサとして広く使われている地球センサや太陽センサと比較すると、STTは1台で3軸姿勢決定が可能であり、また、高精度な姿勢検出が可能な反面、アルゴリズム負荷が大きくシステムが複雑であるので開発要素が大きい。

平成17年度に打ち上げ予定の陸域観測技術衛星 (ALOS) にはわが国が独自に開発した STT が搭載されている。この ALOS 搭載用 STT は厳しい指向決定精度を満足するために、高精度に姿勢計測が可能な反面、大規模な構造になっている。

それに対して、次世代型 STT は高精度なミッションに対応できる精度を満足しつつ、なおかつ高機能・小型軽量化を目標として開発を進めている。

なお、本研究は平成13年度より開始している。

#### 2. 研究の概要

次世代型 STT の目標スペックを Table1 に、構成案を Figure1 に示す。

Table 1 Target Specification

恒星同定率	99.9%以上
静止時 位置検出精度 (arcsec $3\sigma$ )	ランダム 3以下 バイアス 4以下 トータル 5以下
トラッキング可能恒星数	20個以上
更新可能出力周期	10[Hz]以上
トラッキング可能姿勢レ ート	2[deg/s]以上
質量[kg]	フード無しで3以下
消費電力[W]	10以下 (温度制御なし)

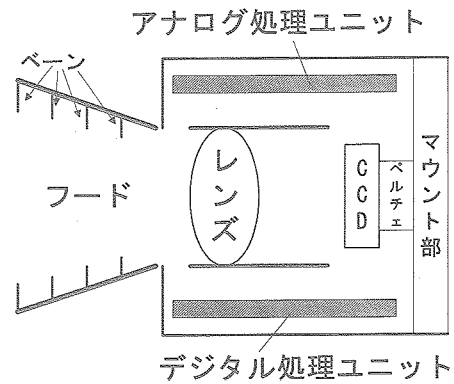


Figure 1 STT Configuration

次世代型 STT は、アприオリな姿勢情報なしで姿勢計測が可能であり、その恒星同定率は全天の任意の姿勢で 99.9% を目標としている。また、衛星が静止している状態での恒星位置検出精度は、トータルで 5[arcsec] 以下であり、海外一般の STT と比較して十分な精度である。10[Hz] での更新周期は衛星のジャイロレス化をにらんだ設定を意味する。さらに、今後の想定される高速マヌーバミッションに対応するため、2[deg/s] のトラッキング可能姿勢レートを目標としている。そして、軽量かつ低消費電力を考えて目標スペックをまとめた。これらのスペックを満足させる構成案を Figure1 に示す。

衛星軌道から計測可能な可視光は恒星光だけでなく、さらに明るい光源として太陽や月、地球アルベドなどが存在する。それらの光が CCD へ照射されると撮像画像から恒星を抽出することが困難となり、姿勢計測不可能となる可能性がある。そこで、センサ正面にフードを取り付ける。フードは妨害光回避角以上から入ってくる光を、黒色処理したフード内部及びベーンで散乱・吸収させて減衰させることで、CCD への迷光を防ぐ役割をもつ。

レンズには、視野内の恒星を歪むことなく CCD へ集光することが求められる。歪む原因としては、色収差やコマ収差のようなレンズ特有の光学的な原因と、熱歪みによる焦点距離のずれ等という外部からの熱的要因などがある。

CCD は入射された光量に応じてピクセルごとに電荷を発生する。CCD 素子のピクセル分解能より高い精度での恒星位置検出を行うため、レンズの焦点距離からずらした位置に CCD を設置し、デフォーカスさせてセントロイド計算で星像中心を求める。10[Hz] でのデータ更新のため早い読み出し速度が必要であり、また、S/N を改善するためペルチェ素子を使って CCD を冷却する。

CCD 撮像画像から得られたデータは、アナログ処理ユニットとデジタル処理ユニット内で姿勢計測処理が行われる。そのため、FPGA を利用して高速でノイズ処理とセントロイド計算を行い、恒星同定に必要な情報を取り出す。恒星同定は、モード毎にアルゴリズムを切り替える。アприオリな姿勢情報がない時は、恒星離角などのパターンと STT 内部にもつ全天恒星カタログを比較するマッチング処理を行い、それ以降は、エリアを予測して同定するダイレクト・マッチング処理を高速で行う。センサからは姿勢値の他に姿勢レートも姿勢制御系 (AOCS) へ出力する設計である。デジタル処理ユニットでは総合技術研究本部が開発している 200MIPS 級 MPU の搭載を前提としている。デジタル処理ユニットの高い計算処理能力を生かすことで、従来の STT と比して、精度向上、自動自律化を目指している

ところに特徴がある。

平成16年度に実施した主な開発項目を以下に列挙する。

- ① CCD 駆動評価ボード試作及び基本特性評価
- ② 月干渉回避アルゴリズムの検討
- ③ 角速度推定アルゴリズムの検討

### 3. 成果の概要

#### 3.1 CCD 駆動回路評価装置

次世代型 STT にとって、CCD 及び CCD 駆動回路は精度と信頼性を決める大きな要因となる。そのため次世代 STT では人工衛星搭載用 CCD として実績のある E2V 社製品を採用した。CCD 駆動回路には、低ノイズでありながら高速駆動できる機能が求められる。平成15年度までに検討してきた CCD 駆動回路の動特性を調べるため、CCD 駆動評価ボードを試作した。

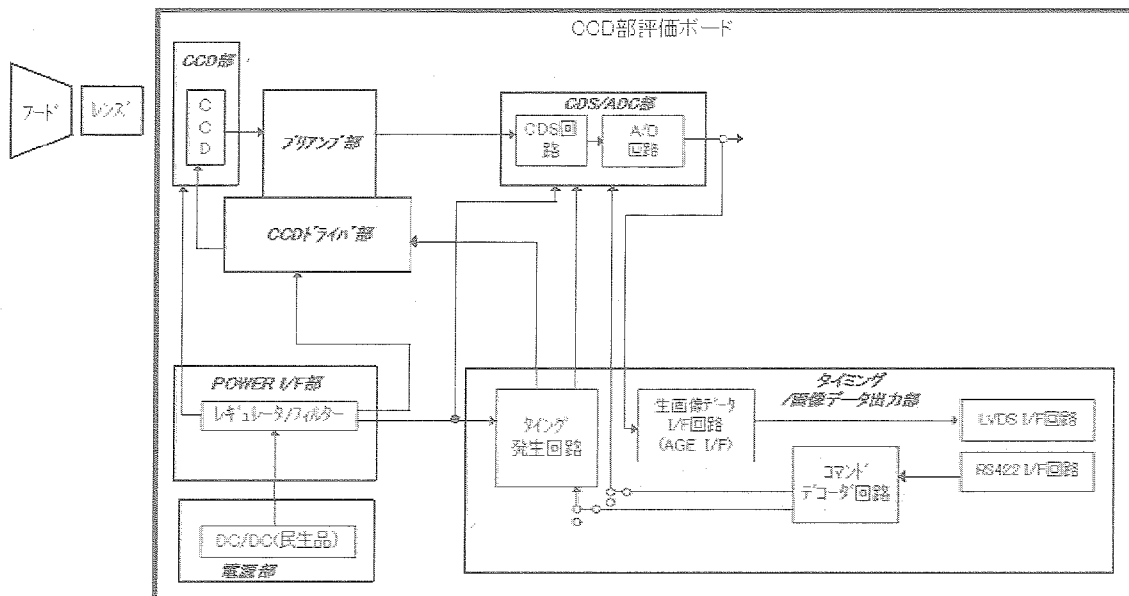


Figure 2 CCD 駆動評価装置



Figure 3 CCD 駆動評価ボード外観

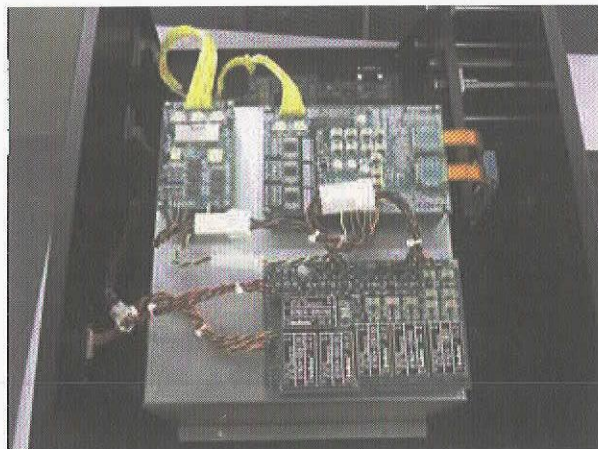


Figure 4 CCD 駆動評価ボード基盤

平成 16 年度は、試作した CCD 駆動評価装置の基本特性を確認した。その結果、ダンプ機能、ビニング機能、撮像時間切り替え機能、CRM/TRM 切り替え機能を確認できた。

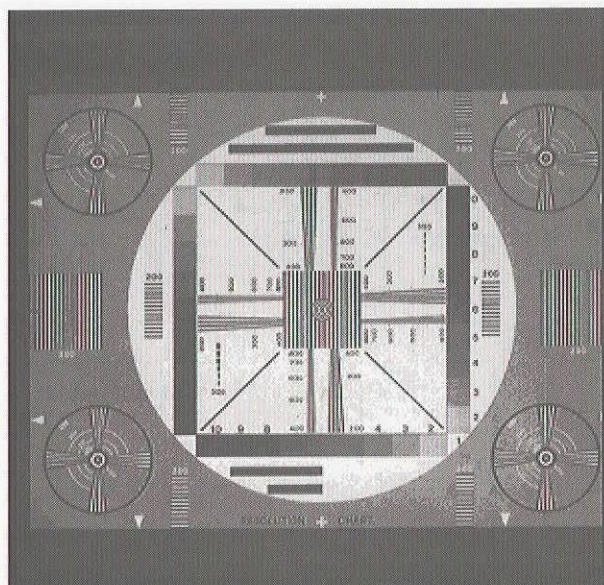


Figure 5 CCD 駆動評価装置撮像画像例

性能評価は平成 17 年度に実施する予定である。

### 3.2 月干渉回避アルゴリズムの検討

次世代 STT の特徴のひとつが、自動自律機能によるロバストな姿勢検出である。平成 15 年度までに恒星同定機能など、さまざまな自動自律機能を検討してきた。平成 16 年度は月回避アルゴリズムについての検討を行った。

Table 2 のような解析条件において、CCD 撮像画像がブルーミングを起こすかどうかを解析にて確認した。

Table 2 解析パラメータ

STT レンズ口径	35mm
CCD 画素数	1024×1024[pix]
撮像時間	0.194[s]
月等級	-12.6 等級

ブルーミング現象が、CCD 面上で縦の帯状に生じると仮定するならば、その場合の拡散列数は 2109 列と試算された。CCD の列数が 1024 なので、月からの光によって、上記の撮像条件では画面全体を覆いつくすブルーミングが生じることが分かる。したがって、通常運用モードでは月干渉中は STT により姿勢決定はできない。

月干渉時においても、姿勢決定を行うためには、以下の処理が必要である。

- ① 月干渉の事前検出
- ② ブルーミング影響の低減駆動モードへの移行
- ③ ブルーミングエリア外の星データによる姿勢決定

これらの処理アルゴリズム案を以下に説明する。

月干渉を事前に検出する方法としては、衛星軌道情報より予測する方法と、干渉直前の迷光増加の兆候を捉える方法が考えられる。前者を実現するには STT に軌道情報を持たせる方法と AOCS から STT へ情報を貰う方法が考えられる。後者の具体案としては月が妨害光回避角に入ったことによるバックグラウンドレベルの変化を常時モニタする方法が考えられる。この手法の方が STT の自動自律化という点で優れている。

続いて、月干渉モードでブルーミングを避けるためには撮像時間を短くするのが最も簡単な方法である。例えば、撮像時間を 10 分の 1 の 20ms 程度に短くした場合、ブルーミング列数は 200 列程度まで抑えることができる。しかし、星の検出等級が 2.5 等級低下し、検出エリアが 4/5 に狭くなるため、星の平均検出個数が 1/12 まで落ち込む。姿勢決定を行うための必要な恒星数が確保できるかが今後の検討課題である。

さらに、撮像した画像からブルーミングの影響を受けていないエリアの星を姿勢決定に使用する場合、画像処理において、ブルーミングエリアの画素データを処理対象外として計算処理負荷が大きくなるような対策が必要である。

### 3.3 角速度検出機能

次世代型 STT では、近年注目されている高速マヌーバミッションへの対応のために、最大 2deg/s の姿勢レートでの恒星追尾を目標としている。そのためには、衛星の角速度を推定し、CCD 上での恒星像位置を予測する必要がある。角速度計測方法として、出力周期ごとの姿勢値(クォータニオン)から計算する方法と、撮像毎の恒星像の移動量から計算する 2 つの方法が考えられる。このうち、STT の自動自律化の観点から、星同定を経ずして角速度が検出できる後者の方法について特に解析した結果を記す。特に、今回は、角速度と角加速度を推定する手法と、角速度のみを推定する手法の 2 つを検討し、解析にて精度を比較した。



STT の撮像周期を  $\Delta t$ 、視野内に  $n$  個の恒星像が確認できたとする。時刻  $t=0$  における  $n$  番目の恒星の CCD 撮像画像上での位置を  $[x_{n,0} \ y_{n,0}]$  とする。そして、時刻  $p \cdot \Delta t$  までに、 $[\Delta x_{n,p} \ \Delta y_{n,p}]$  だけ移動したとする。時間内の角速度を  $\omega$ 、角速度を  $\dot{\omega}$  とするなら、線形化した結果次式が成り立つ。

$$A_{(x_{n,0} \ y_{n,0})} \cdot \left( p \cdot \omega \cdot \Delta t + p^2 \frac{1}{2} \dot{\omega} \cdot \Delta t^2 \right) = b_{(\Delta x_{n,p} \ \Delta y_{n,p})} \quad (1)$$

そのため、角速度—角加速度推定方式とは

$$L = \sum_p \sum_n \left\{ A \left( p \cdot \omega \cdot \Delta t + p^2 \frac{1}{2} \dot{\omega} \cdot \Delta t^2 \right) - b \right\}^T \left\{ A \left( p \cdot \omega \cdot \Delta t + p^2 \frac{1}{2} \dot{\omega} \cdot \Delta t^2 \right) - b \right\} \quad (2)$$

で定義する評価関数  $L$  を最小とする角速度と角加速度を求める方法である。

また、角速度推定式とは撮像期間内での角速度が一定であるという前提の基で、(2)式から角加速度項を除いた式、

$$L = \sum_p \sum_n \left\{ A(p \cdot \omega \cdot \Delta t) - b \right\}^T \left\{ A(p \cdot \omega \cdot \Delta t) - b \right\} \quad (3)$$

で定義される評価関数を最小とする角速度を求める方法である。

シミュレーション条件として、STT 座標系  $xy$  軸周りに角速度が  $1.5\text{deg/s}$ 、角加速度が  $0.03\text{deg/s}^2$ 、恒星数が 5 個を設定した。

Table 3 角速度推定アルゴリズムの解析による比較

	$\omega_x$ [deg/s]	$\omega_y$ [deg/s]	$\omega_z$ [deg/s]	$\dot{\omega}_x$ [deg/s <sup>2</sup> ]	$\dot{\omega}_y$ [deg/s <sup>2</sup> ]	$\dot{\omega}_z$ [deg/s <sup>2</sup> ]
真値	1.061	1.061	0	0.0212	0.0212	0
角速度—角 加速度推定	1.0999	1.1025	0.1666	-0.5315	-0.2405	-1.925
誤差	0.0389	0.0415	0.1666	-0.5527	-0.2617	-1.925
角速度推定	1.0521	1.0808	-0.0066			
誤差	-0.089	0.0198	-0.0066			

Table 3 から、角速度推定アルゴリズムの方が、角速度—角加速度推定アルゴリズムよりも真値に近い結果が得られていることが分かる。角加速度が大きくなるとこの結果は変わる可能性があるが、角加速度が  $0.03\text{deg/s}^2$  程度では妥当と判断している。

#### 4. まとめ

平成 16 年度では、STT としての精度への影響の大きい CCD 駆動回路の試作と、自動自律アルゴリズムの検討を行った。CCD 駆動回路では次世代 STT として要求される高速駆動、低消費電力、低ノイズのバランスを勘案した回路で試作し、基本動作を確認できた。平成 17 年度で性能評価を実施する。自動自律アルゴリズムは、月干渉回避アルゴリズムと角速度推定アルゴリズムの検討を中心に実施した。そして、解析にてその有効性を確認している。今後は、フィールド試験などでそのアルゴリズムの妥当性を確認する予定である。