

# 次世代型スタートラッカの研究

Study on Next Generation Star Tracker

誘導・制御技術グループ

Spacecraft Guidance, Control and Dynamics Engineering Group

松本秀一、鈴木秀人、川井洋志

Shuichi Matsumoto, Hideto Suzuki, Hiroshi Kawai

## Abstract

Scientific satellites have been utilizing first generation star trackers that have only star imaging function. Recent technological advances on computer enable second generation star trackers that have autonomous star identification and attitude estimation functions without any a priori information. Based on requirements of future satellite programs and technological trends of overseas, we have been studying “Next Generation Star Tracker” which categorized in the second generation star tracker. This paper presents system study results and trial manufacture results of the next generation star tracker, explains a new star simulator for second generation star trackers, and shows our research and development roadmap of star tracker.

### 1. はじめに

これまで、科学衛星を中心に、恒星の撮像のみを行うスタートラッカ(第1世代STT)が使われており、その計測データを元に、地上処理による姿勢決定や姿勢制御用オンボード計算機での姿勢決定が行われてきた<sup>[1],[2]</sup>。今後の高精度な地球観測ミッションや科学ミッションなどの高度で多様なミッション要求に対応するためには、衛星の自律性の向上や地上運用負荷軽減のために、以下の特徴を持ったスタートラッカが求められている<sup>[3],[4]</sup>。

- ① 自律的な姿勢決定
- ② 高い姿勢決定精度
- ③ 制約の少ない運用性(幅広い使用温度範囲、高い機械環境耐性、狭い妨害光回避角)
- ④ 小型・軽量
- ⑤ 低消費電力
- ⑥ 低コスト
- ⑦ 長寿命

海外においても、上記の特徴を持つ自律的に姿勢決定までを行うスタートラッカ(第2世代STT)が開発され、使用され始めている<sup>[5],[6]</sup>。

わが国においても、今後の衛星における要求と海外の動向を踏まえて、第2世代STTに分類される「次世代型スタートラッカ」の研究開発を実施している。本論文では、次世代型スタートラッカのシステム検討、B/BM(試作モデル)の試作試験結果、及び、第2世代STTの END-TO-END 試験や閉ループ試験で使用する恒星模擬装置、スタートラッカ研究開発のロードマップについて報告する。

### 2. 次世代型スタートラッカのシステム検討

#### (1)機能要求検討

次世代型スタートラッカが、所定のタイミングで星を撮像し、内蔵する恒星カタログを用いて、自律的に星同定・姿勢決定を行い、その結果を、テレメトリとして出力する一連の動作を実現するために、Table 1のように次世代型スタートラッカが持つべき機能を設定した。

Table 1 次世代型スタートラッカの機能要求

機能要求	機能詳細	機能要求	機能詳細
(1) STT 自動制御機能	自動モード移行機能	(6) 星同定機能	全天星同定機能
(2) 環境計算機能	軌道計算機能		エリア星同定機能
	太陽・惑星・月計算機能		直接星同定機能
	惑星識別機能	(7) 姿勢決定機能	姿勢決定機能
	姿勢予測機能		共分散行列計算機能
	視野内星予測機能		姿勢レート検出・計測機能
(3) 星撮像機能	地球・月妨害光判定機能	(8) AOCs I/F 機能	時刻同期機能
	自動露光機能		軌道要素入力機能
	自動スレッシュホールド機能		星データ出力機能
(4) 画像処理機能	自動星トラッキング機能	(9) STT メインテナンス機能	姿勢決定値出力機能
	CCD 迷光計測・除去機能		恒星カタログ管理機能
	CCD ノイズピクセル除去機能		STT 軌道上セルフチェック機能
	ピクセルグルーピング機能	STT 軌道上 CCD 特性評価機能	
(5) 星位置判定機能	CCD ピクセルレベル補正機能	(10) 異常処理機能	FDIR 機能
	ブライトオブジェクト判定機能		ソフトウェア処理異常判定
	宇宙線／デブリ識別機能	(11) 地上 I/F 機能	テレメトリ・コマンド機能
	セントロイド演算機能		メモリロード／ダンプ機能
	星位置補正機能(内部補正)		CCD 画像転送機能
星位置補正機能(天文学補正)			

(2) 性能要求検討

第1章で述べた次世代型スタートラッカに求められる特徴は、相互に関連し、中には、相反する要素もある。たとえば、高い姿勢決定精度を出すためには(ランダム誤差の低減)、レンズの口径を大きくして感度を上げるのが有効であるが、その分、スタートラッカの重量が大きくなる。また、バイアス誤差と温度範囲は相関があるが、バイアス誤差は小さくする要求があり、温度範囲は広くする要求があり、相反する要求となっており、設計ポイントをどこに取るかという難しさがある。

これまで実施してきた次世代型スタートラッカのシステム解析や要素試作試験の成果、及び、今後の衛星の要求や海外の動向を踏まえて、早期の実現可能性とリスクを評価して、次世代型スタートラッカの性能要求案を Table 2 のように設定した。第1章の次世代スタートラッカに要求される特徴の中で、「①自律的な姿勢決定」は前提として、「②高い姿勢決定精度」と「③制約の少ない運用性」を優先し、「④小型・軽量」、「⑤低消費電力」については、少し緩和した開発仕様案となっている。なお、「⑥低コスト」と「⑦長寿命」については、引き続き、検討していく必要のある課題である。

(3) 次世代型スタートラッカの構成

スタートラッカの星を撮像する光学部と、STT 全体の制御と星同定・姿勢決定を行う電気回路部を一体とするか、分離するかについて、検討を実施した結果、現在は、高精度化と開発の容易さから、多少重量は大きくなるものの、分離型を次世代型スタートラッカのベースラインとしている。次世代型スタートラッカのシステム構成を Fig. 1 に示す。

Table 2 次世代型スタートラッカの主な性能要求案

	仕様案
ランダム精度 (3σ)	3 arcsec 以下(*1)
バイアス精度 (3σ)	4 arcsec 以下(*1)
最大追尾可能レート	2 deg/s 以上
更新周期	4 Hz 以上
消費電力(ペルチェ込み)	25 W 以下(*2)
質量(フードなし)	4.5 kg 以下(*2)
耐振動環境	20Grms
耐衝撃環境	1000Gsrs
使用温度範囲	-30℃ ~ 50℃
妨害光回避角(太陽)	25度
フードの大きさ	φ 200mm x 400mm

(\*1) 姿勢レートが 0.3deg/s 以下の時

(\*2) 光学部と電気回路部の合計

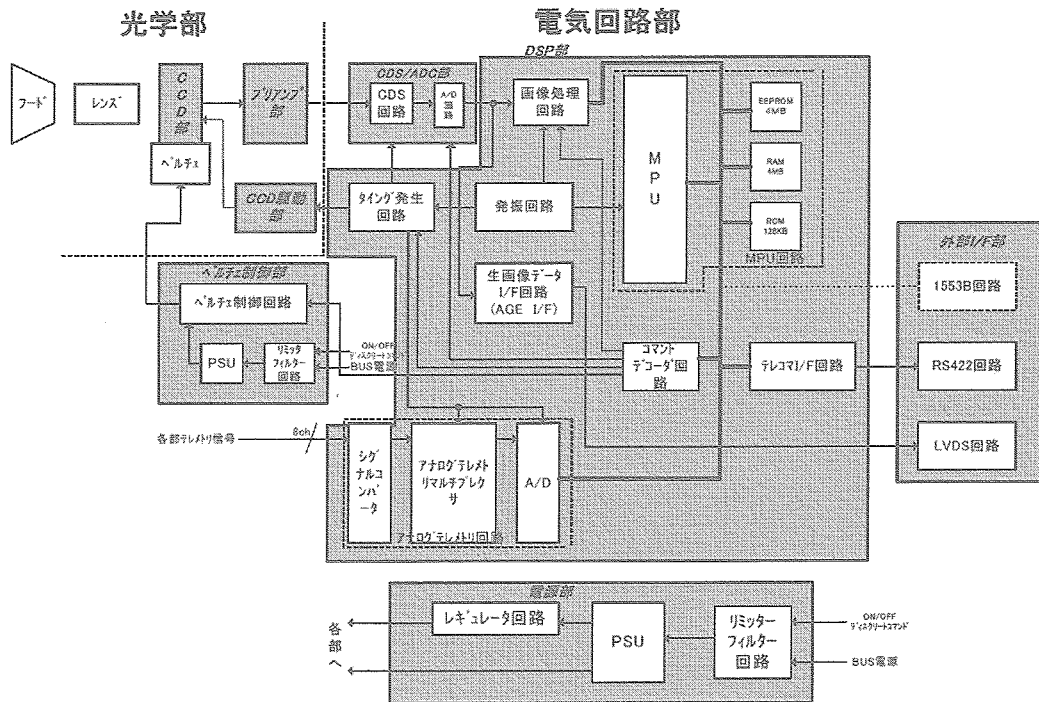


Fig. 1 次世代型スタートラッカのシステム構成

### 3. 次世代型スタートラッカ要素試作結果

次世代型スタートラッカの機能・性能を確認するために、以下の各要素試作を実施した。

- ・試作モデル光学部
- ・試作モデル電気回路部
- ・試作モデル搭載ソフトウェア(星撮像)

#### (1) 試作モデル光学部の試作結果

試作モデル光学部は、レンズ、CCD、周辺回路 (CCD 駆動回路、プリアンプ等) から構成される。電気回路部から入力されるタイミング信号に従い、CCDで恒星を撮像し、その結果を電気回路部に伝送する機能を有している。Fig. 2 に試作モデル光学部の断面図を、Fig. 3 に実際に製作した試作モデル光学部の写真を示す。また、Table 3 に、光学部の要求仕様と実際の設計結果の対比を示す。

Table 3 試作モデル光学部の主な設計結果

	要求仕様	設計結果
有効口径	Φ35mm 以上	Φ37mm
焦点距離	47.4mm ± 2%	47.36mm
歪曲収差許容値	±3% 以下	-1.6%
視野角	16deg × 16deg	16deg × 16deg
周辺光量	中心光量の75% 以上	中心光量の76.8%
倍率色収差	±1.2 μm 以下	±1.02 μm 以下
撮像素素数	1000 × 1000 以上	1024 × 1024 画素

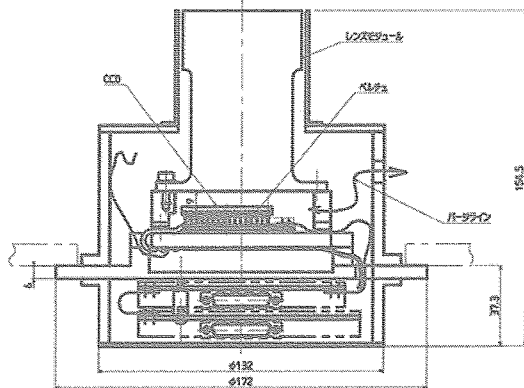


Fig. 2 試作モデル光学部の断面図

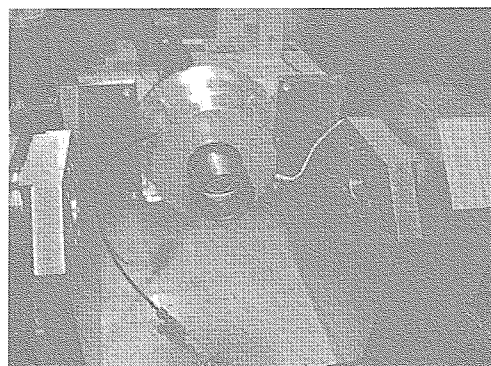


Fig. 3 試作モデル光学部の写真

(2) 試作モデル電気回路部の試作結果

試作モデル電気回路部は、CDS/ADC 部、画像処理部、MPU 部、電源部から構成される。試作モデル電気回路部の主な機能を Table 4 に、主要緒言を Table 5 に示す。また、組み立て前の、各部の写真を Fig. 4 に示す。

(3) 試作モデル搭載ソフトウェアの試作試験

次世代型スタートラッカの各モードを Table 6 に示す。また、モード遷移図を Fig. 5 に示す。搭載ソフトウェアは、星撮像機能まで完成しており、星同定/姿勢決定機能を現在作成中である。

Table 4 電気回路部の主な機能

CDS/ADC 部	撮像データを画像処理部からのアナログ信号処理タイミング信号によりサンプリングし、AD 変換して、画像データとして出力する。
画像処理部	画像データをスレッショルド処理、迷光処理、ノイズ処理、グルーピング処理等を行い、画像情報として、メモリ(スタック)に書き込む。 また、MPU 部からのコマンド情報に従い、CCD 駆動タイミング信号、アナログ信号処理タイミング信号を生成する。
MPU 部	画像処理部で前処理された画像情報を元に、セントロイド演算、星同定処理、姿勢決定処理を行う。また、外部とのテレメトリ/コマンドのインターフェース機能を持つ。
電源部	光学部、電気回路部の各部に、電源を供給する。

Table 5 電気回路部の主要仕様

画像処理部	撮像周期	4Hz~10Hz
	撮像方式	ノーマル、ビニング 2x2
	撮像シーケンス	CRM[連続読み出しモード] TRM[トリガリードモード]
	ウインドウ数	最大で20
MPU 部	CPU	宇宙用 200MIPS MPU
	PROM	128kByte 以上 ECCなし
	EEPROM	4MByte 以上 ECCなし
	SRAM	4MByte 以上 ECCあり
	外部インターフェース	コマンド/テレメトリ:RS-422 デバック:RS-232C 1ch
その他	ソフトウェアリセット ウォッチ・ドック・タイマー	

Table 6 次世代型スタートラッカのモード

モード	主な内容
イニシャルモード (IPL)	立ち上げ時の初期モード
スタンバイモード (STBY)	星カタログの RAM 上への展開 各モードへの移行
星捕捉モード (ACQ)	星像のセントロイド計算 星同定/パターンマッチング
トラックモード (TRK)	追尾中の星のセントロイド計算 星同定/ダイレクトマッチング 姿勢決定
視野干渉待機モード (WT)	視野干渉中の待機モード
エマージェンシーモード (EMM)	異常時に、状況分析のためのデータをテレメトリに出力
セルフチェックモード (SCK)	各種セルフチェック (暗電流レベル、アナログオフセット等)
エリアデータ出力モード (ADO)	CCD のエリアデータを出力
地上試験用モード (GDT)	地上試験用動作を実行し、チェックアウトに必要なデータを出力

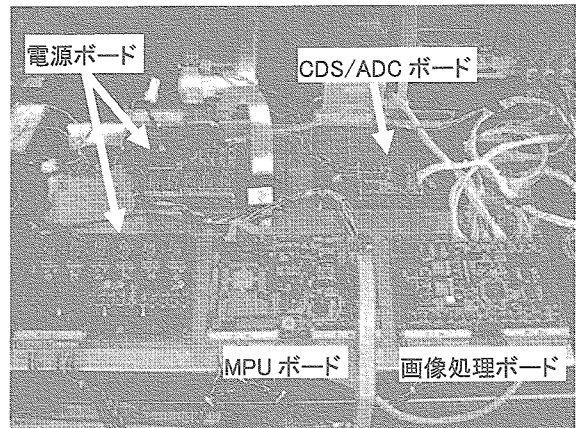


Fig. 4 電気回路部の各ボードの写真

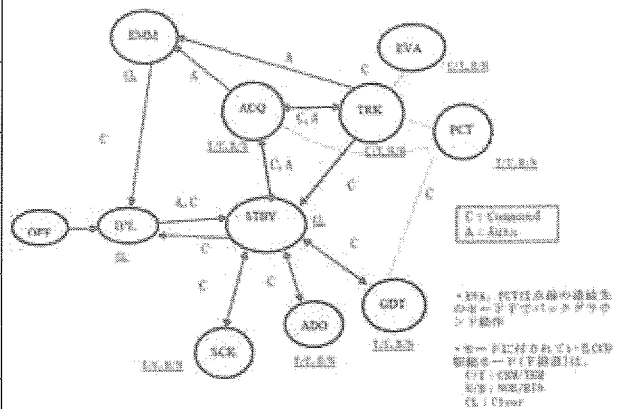


Fig. 5 次世代型スタートラッカのモード遷移図

#### 4. 第2世代STT対応恒星シミュレータ

第1世代のスタートラッカ(第1世代STT、ALOS や ASTRO-EII に搭載)は、姿勢制御系から教えられた姿勢角を元に、限られた領域で恒星を同定し、恒星の位置を高精度で出力するため、その評価も、限られた領域で少数の恒星を模擬するシミュレータで実施している。

一方、今後、主流となる自律的に姿勢決定値を出力する第2世代のスタートラッカ(第2世代STT、SELENE や GOSAT に搭載)は、視野角が10度以上と広く、また、10個以上の恒星を使い、より高精度の姿勢決定を行う。現在、第2世代STTに対しては、固定の恒星パターンでの簡易的な光学部の評価と、光学部の後段から恒星模擬信号を入力する電気回路部のみの評価を行っているが、自律的に姿勢決定を行う第2世代STTを効率的に開発し、フライトモデルに対して衛星の姿勢運動を模擬した状態での評価試験を行うためには、第2世代STTに対応した恒星シミュレータを開発し、評価技術を確認することが必要である。

第2世代STT対応恒星シミュレータには、Table 7のような課題があり、各課題に対応した設計を実施した。現在、第2世代STT対応恒星シミュレータ(恒星模擬装置 III)を試作・評価を実施している。恒星模擬装置 IIIの全体構成をFig. 6に、主な要求仕様をTable 8に、写真をFig. 7に示す。

Table 7 第2世代 STT 対応恒星シミュレータの課題

課題	課題を解決する設計結果
高精度な恒星模擬光表示技術	フル HDTV 対応の液晶パネルを2枚重ね合わせることで、約 2000×2000 画素の超高精細表示を実現
高精度な恒星位置表示を可能とする恒星模擬光計算技術	逆セントロイド技術により、数画素分解能の1/10以上の恒星位置表示精度を実現
高精度コリメーション技術	小型液晶パネル使用によるレンズの小型化と、歪みを恒星模擬光計算機で補正することにより、高精度コリメーションを実現

Table 8 恒星模擬装置 III の主な要求仕様

	項目	仕様
本体	解像度	1920×2150 画素 以上
	階調	255階調 以上
	更新レート	60Hz 以上
	射出瞳径	51mm 以上
	射出瞳距離	70mm 以上
	射出視野角	12 度以上
演算部	最大歪み	0.3%以下
	恒星像の作成	3msec 以内
	像の量子化誤差	1 arcsec 以下
機能要求	機能要求	<ul style="list-style-type: none"> <li>・衛星姿勢模擬</li> <li>・閉ループ試験への対応</li> <li>・光学部の誤差の補正</li> </ul>

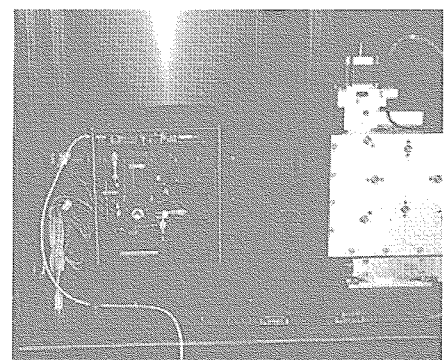
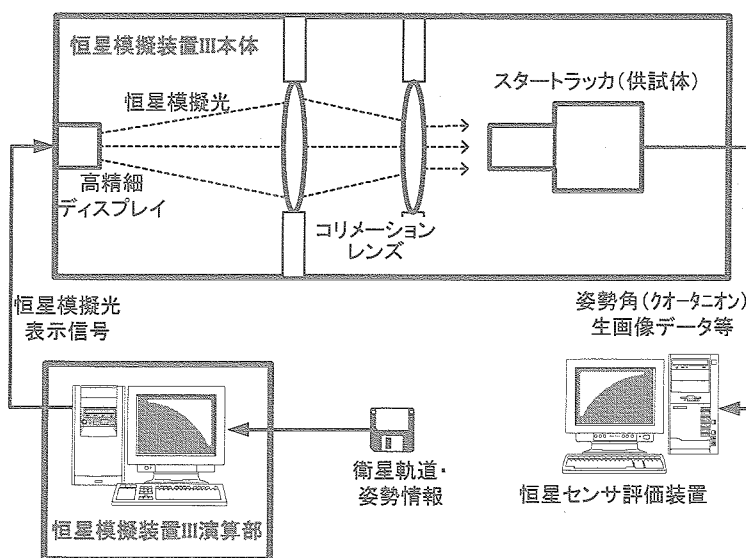


Fig. 7 恒星模擬装置 III の写真

Fig. 6 第2世代 STT 対応恒星シミュレータ(恒星模擬装置 III)構成

## 5. おわりに

次世代型スタートラッカのシステム検討、BBM(試作モデル)の試作試験、及び、第2世代STT対応恒星シミュレータの試作を通じて、次世代型スタートラッカを実現する目処をつけた。Fig. 8 にスタートラッカの研究開発ロードマップを示すが、次世代型スタートラッカが実現すると、標準的な地球観測衛星や科学衛星には、そのまま対応でき、さらに、高精度や高姿勢レートが要求されるミッションに対しても、マイナーチェンジで対応できる。さらにその先の計画として、小型衛星や惑星探査など、小型軽量化が重要視されるミッションへも、最新のエレクトロニクス技術を取り込みながら、対応することを計画している。

## 参考文献

- [1] 東野勇, 他: あかり搭載スタートラッカのインフライトデータ評価、第50宇宙科学連合講演会講演集、2E03、北九州、2006
- [2] 岩田隆敬, 他: 恒星センサを用いた閉ループ姿勢制御試験、第45宇宙科学連合講演会講演集、01-1C5、浜松、2005
- [1] 鈴木秀人, 他: 高性能姿勢制御システムの研究、第48宇宙科学連合講演会講演集、2H10、福井、2004
- [3] 関口毅, 他: 次世代型スタートラッカ開発の現状、第48宇宙科学連合講演会講演集、2H12、福井、2004
- [5] Schmidt, U., "Intelligent Modular Star and Target Tracker - Presentation of the First Test Results," International Workshop Spacecraft Attitude and Orbit Control, ESA WPP-129, Noordwijk, Netherlands, 1997
- [6] Pochard, M., "NEW IN-FLIGHT RESULTS OF SED16 AUTONOMOUS STAR SENSOR," Proc. of 54<sup>th</sup> International Astronautical Congress, IAC-03-A.5.01, Bremen, Germany, 2003

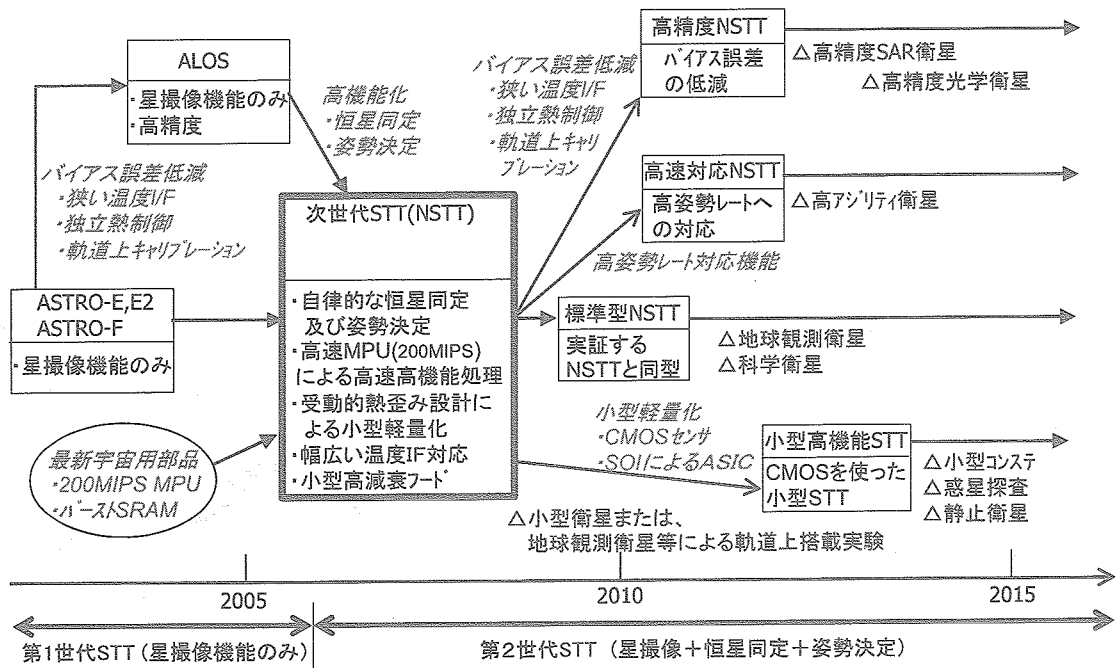


Fig. 8 スタートラッカの研究開発のロードマップ