

宇宙インフラストラクチャーの研究

HTV ランデブレーダの研究

Study on HTV Rendezvous Navigation Sensors

システム誘導技術グループ

Spacecraft Guidance, Control and Dynamics Engineering Group

小田 光茂、石島 義之、浅野 貢、山元 透

Mitsushige Oda, Yoshiyuki Ishijima, Mitsugu Asano, Toru Yamamoto

Abstract

A rendezvous navigation sensor, which measures and estimates relative range and LOS (Line Of Sight) angle, is critical components for on-orbit service missions. In this study, as the first step, the medium-range navigation sensor using scanning-laser for HTV (H-IIA Transfer Vehicle) is investigated. A range measurement circuits and a scanning driver modules are so critical elements that these are manufactured, tested, and evaluated to get valuable knowledge to design BBM of this sensor system.

1. はじめに

ISS を始めとする宇宙インフラが整備されるにつれて、様々な宇宙機や飛行体に対してサービスを提供する、軌道上サービス・ミッションが重要となる。想定される軌道上サービス・ミッションとしては、機器交換や推薬補給等による衛星長寿命化やミッションの発展、運用終了・不具合衛星の投棄、ロケットにより打ち上げに失敗した衛星のレスキュー、ISS 近傍におけるサービスの提供等が考えられる。これらの軌道上サービス・ミッションを実現する上で、確実なランデブ・ドッキング技術は重要な基盤技術のひとつであり、特に対象宇宙機との相対位置を計測するランデブ用航法センサは鍵となるコンポーネントである。

2. 研究の概要

以上の背景から、本研究では、軌道上サービス・ミッションに必要であるランデブ用航法センサの研究を実施する。

実用的な研究を指向するために、H14 年度より、HTV (H-IIA Transfer Vehicle) 用ランデブレーザセンサを具体的な開発ターゲットとして、早期の軌道上実証を視野に入れて研究を進めている。HTV のコストの低減化に寄与するため、現在使用されている高価な輸入品に替わる低コストの国産ランデブレーダを研究開発することが具体的目標である。センサの HTV における使用イメージを Fig.1 に、センサシステム外観を Fig.2 に、センサシステム設計結果を Table1 に示す。



Figure 1 HTV rendezvous sensor

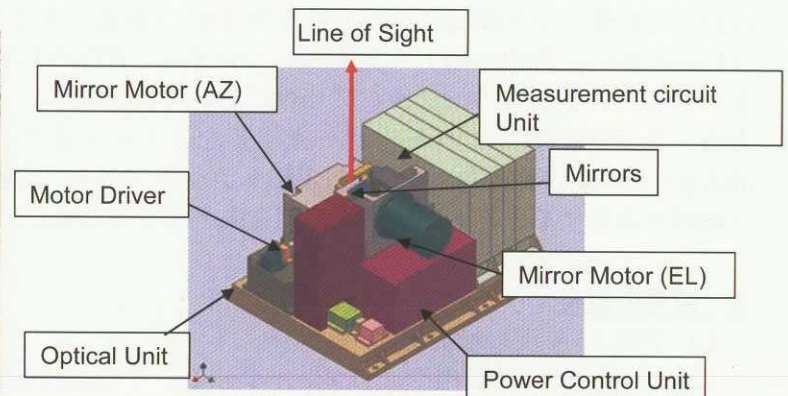


Figure 2 Sensor system layout drawing

Table 1 Specification of the laser sensor

| | Design results |
|--------------|--|
| Laser module | LD Pulse (Emission power 30W、Pulse energy 0.3 μ J) |
| Scanning | Azimuth /Elevation 2 mirrors |
| Range | 730m \sim 3m (Output : Range and LOS angle to LRR on ISS) |
| Weight/Power | <20 kg < 60W |
| Remarks | <ul style="list-style-type: none"> • 1 Package • CCD sensor for re-acquisition |

ETS-VII で開発したランデブレーダ (スタティック型) の成果を生かすとともに、ミラー走査部及びターゲットマーカからの反射レーザー光の処理部を追加することにより、広画角 (捕捉時: 40deg \times 40deg) のスキャン型レーザレーダを実現する。必要十分な性能と低コスト化に重点を置くのがポイントであり、既開発品のレーザー測距回路と、ハードウェア的にシンプルなスキャン機構 (2 軸ミラー・ガルバスキャン方式) を適用する方針である。

Table 2 に、本研究で開発対象としている HTV ランデブレーザセンサと ETS-VII 用のランデブ用レーザセンサの比較を示す。HTV 用は、広視野であることが特徴である。また、ETS-VII 用が CW レーザーであるのに対し、HTV 用はパルスレーザーであり、レーザーの大出力化が可能で、将来のレンジの長距離化、非協力ターゲットへの適用等の拡張性が期待できるのも長所である。

Table 2 Comparison of rendezvous sensors between ETS-VII and HTV

| | Sensor System Type | FOV | Measurement Specification (Random: 3 σ) | Characteristics |
|---------|---|-------------------------|--|--|
| ETS-VII | Static Type Laser Larder (AM CW laser) | 6deg Conical | <ul style="list-style-type: none"> • Range Measurement Range: 600m\sim0.3m Bias: 0.1m Random : 0.006m(R<40m) • LOS Measurement Bias: 0.05deg Random: 0.02deg | <ul style="list-style-type: none"> • High Range Accuracy due to AM modulation • Consume much resources • Narrow FOV |
| HTV | Scanning Type Laser Larder (Pulse Laser) | 40deg \times 40deg | <ul style="list-style-type: none"> • Range Measurement Range: 730m\sim3m Bias: 0.1m Random: 0.011m(R<6.1m) • LOS Measurement Bias: 0.1deg Random: 0.06deg | <ul style="list-style-type: none"> • Relatively Low Range Accuracy • Pulse laser is Efficient, consume less resources • Relatively easy to raise the power of laser pulse to use for uncooperative targets in the future • Widely used system in commercial laser range sensor |

レーザー方式は、計測距離域が 730m と比較的遠距離であるため半導体パルスレーザーを選定した。回線設計の結果、全計測域に渡って十分な S/N が確保できることを確認している。ターゲットとなる LRR (Laser Retro Reflector) の反射率については、ETS-VII 開発試験において確立した CCR モデルに基づき検討している。このモデルの妥当性については試験等により確認する必要がある。また、測角要求は、走査・走査駆動部によりレーザー光学系をスキャンさせることにより実現する。初期捕捉においては 40deg \times 40deg の範囲をサーチし LRR トラッキング後、定常追尾モードに遷移する。定常時は最小スキャン範囲を追尾するとともに、測距精度を向上させるため同一点の測距値を平均化する処理を追加する。

3. 成果の概要

(1) 平成 15 年度の検討範囲

平成 14 年度の HTV 用ランデブレーザセンサの設計検討結果を受け、平成 15 年度は、特にクリティカルと考えられる測距回路部・走査駆動部の部分試作試験を実施し、設計の妥当性を確認した。

(2) 測距回路部の試作試験

測距回路部は、スタートパルスを送信し、受光素子からストップパルスを受信して、その間の時間差から距離を測定する回路部である。CFD回路 (Constant Fraction Discriminator、受信波に反転/位相遅れさせた受信波を加えてゼロクロスを検出することにより波形の中央を検出する回路)により、受信レーザパルスのレベルが大きく変動しても、確実に受信タイミングを検知できる設計としているのが特徴である。

時間差の測定は、60MHzのクロックを刻みとして大つかみにカウントし、クロック間に残る量子化誤差分の時間差については、クロックと同じ周波数の「のこぎり波」を利用したアナログ回路にてパルス受信タイミングをピックアップして測定し、クロック間の補間処理を行って高精度化を図る。

また、パルスの強さに応じて CFD 回路に生じる遅れを補償するために、パルスのピーク値をホールドしてサンプリングするピーク検出回路を実装し、ピーク値を用いた補償を行う。また、温度補償回路も付加する。

本試作試験においては、上記のピーク検出回路、温度補償回路を含む測距回路部の試作を行い、測距に係る基本的機能・性能評価を実施した。ピーク検出回路および温度補正回路の評価も実施した。Fig.3 に測距回路部を、Fig.4に本測距回路の要である CFD 回路の特性を、Fig.5に測距回路測定データを示す。

今回の試作データより、測距回路、ピーク検出回路、温度補償回路の基礎データが取得できた。このデータより、ランダムノイズに関しては、目標仕様を満足する目処を得た。

今回の試作における問題点は、回路の調整不測から 10[mV]以下の低いレベルでのデータが取得できなかった点、アナログ補間回路の調整不足のためリニアリティが大きく出てしまい、レンジバイアスが目標仕様を逸脱している点である。これらの問題は原因と対策が明確に判明しており、次年度以降の開発で克服していく予定である。

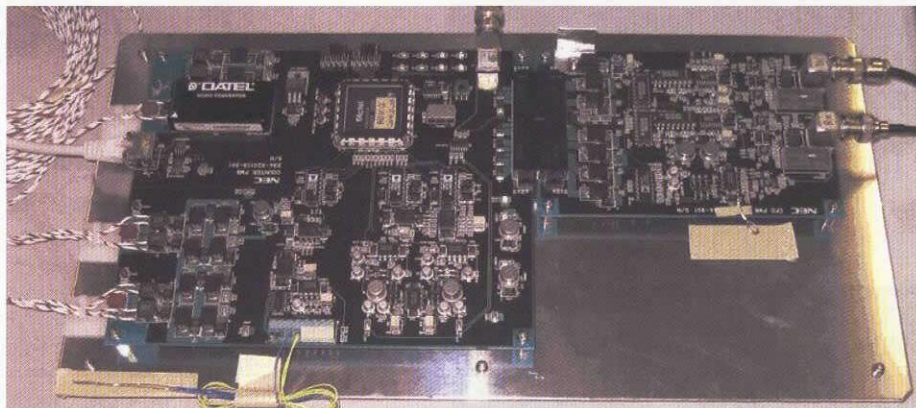


Figure 3 Measurement circuit

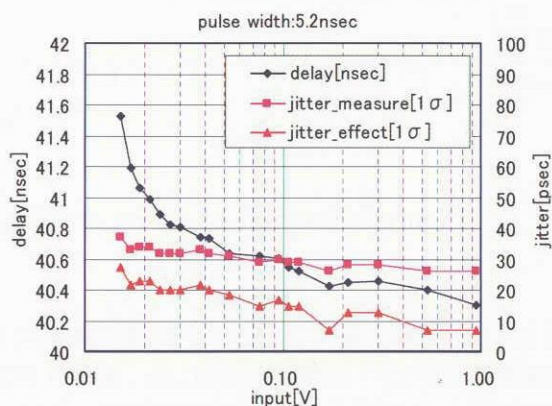


Figure 4 Characteristic of CFD circuit

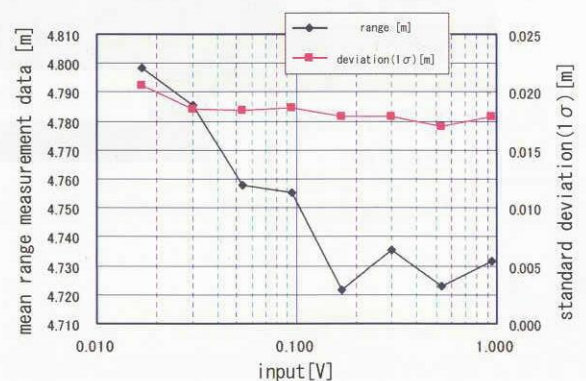


Figure 5 Range data measurement result

(3) 走査部・走査駆動部の試作試験

走査部・走査駆動部は、ミラーを動かすことでレーザーによるスキャンを実現するための機構である。本センサでは $40[\text{deg}] \times 40[\text{deg}]$ の広範囲のスキャンが必要である。また、初期に ISS を発見し捕捉する「捕捉モード」から、スキャン範囲を絞り高レートで ISS のレーザーリフレクタを追尾する「追尾モード」まで、複数の走査モードに関して、直線性および追従性の要求を満たす必要がある。

本試作では、特に動作条件が厳しい AZ 軸を対象を絞り、モータ・レゾルバ・タコジェネレータ・ダミーミラーからなる AZ 軸走査部、及び走査駆動回路を製作・試験した。そして、各走査モードの実現性、走査性能（直線性、追尾性等）の評価を実施した。Fig. 6 に走査部の写真を、Fig. 7 に走査部の図面を、Fig. 8 に走査部・走査駆動部の評価試験の写真を、Fig. 9 に走査時の駆動データ例を示す。

本試作により得たデータの解析により、現状設計の問題点が明らかとなった。主な問題点は、捕捉モード時に一部直線性要求を逸脱した制御成績となることである。捕捉モードのスキャンパターンの見直しと、フィードバック系のアナログ化による対策で、BBM において制御性能を改善できる見通しである。



Figure 6 Image of mirror scanner module

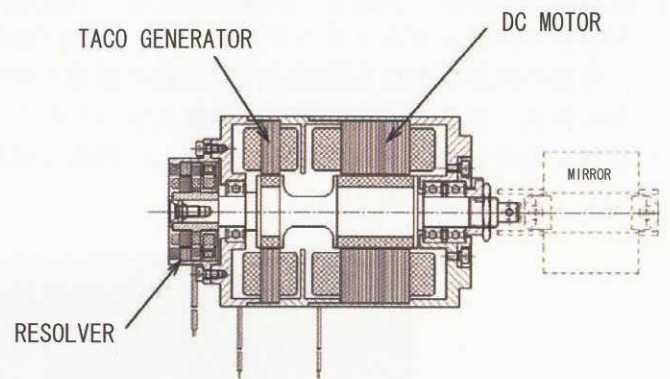


Figure 7 Schematic of mirror scanner module

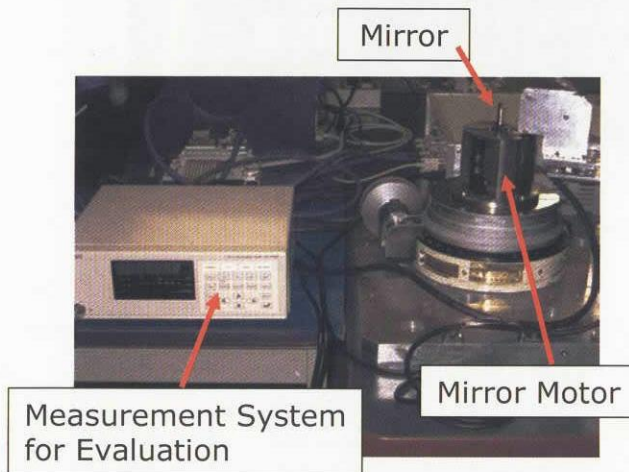


Figure 8 Evaluation test of scanning mechanism

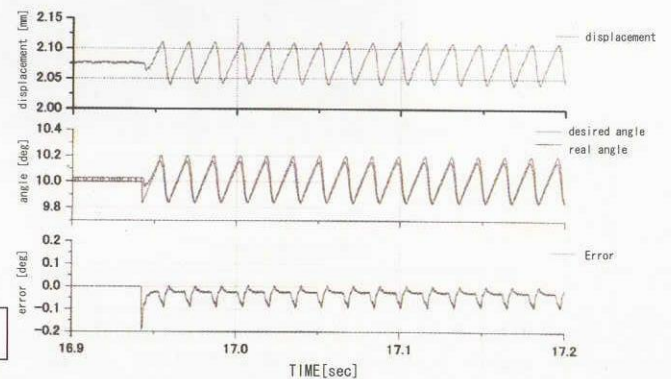


Figure 9 Example of mirror tracking data

4. まとめ

平成 14 年度の HTV 用ランデブレーザーセンサ設計検討の結果に基づき、センサの構成要素の中で最もクリティカルと考えられる測距回路部、走査部・走査駆動部の試作・試験を実施した。試作・試験ともに想定した作業を完了した。測距回路部については、測距カウンタ回路、アナログ補間回路、ピーク検出回路、温度補償回路の動作を確認し、全体動作により測距性能の評価を行った。走査部・走査駆動部については、要求の厳しい AZ 軸の試作・試験を実施した。結果として、現状設計に一部スペックを満たしていない要素があり、今後の対処により克服可能との見通しを得た。