

宇宙インフラストラクチャーの研究

## ランデブレーザセンサの研究

### Study on the Navigation Laser Sensor for Spacecraft Rendezvous Missions

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、小松 茂則、山元 透、巳谷 真司

Mitsushige Oda, Yoshiyuki Ishijima, Komatsu Shigenori, Mitani Shinji, Toru Yamamoto

#### Abstract

A rendezvous navigation sensor, which measures and estimates relative range and LOS (Line Of Sight) angle, is a critical component for on-orbit servicing missions and inter-satellite ranging for formation flying. The medium-range rendezvous laser sensor for a rendezvous mission in LEO has been investigated in JAXA. The results of the sensor BBM performance test are reported on this paper.

#### 1. はじめに

本報告では、対象物体の「距離」および「方向」をレーザーによって計測する、「ランデブレーザセンサ」の研究開発状況について述べる。本ランデブレーザセンサは、ISS へのランデブを目標とし、さらに将来の軌道上サービスミッション、複数衛星システム用の衛星間測距装置等への応用を視野に入れて研究を実施している。平成 16 年に BBM の製作・試験・評価を行い、良好な結果を得ている。

#### 2. 研究の概要

##### (1) 研究の背景

宇宙における活動において、今後、ランデブ・ドッキング技術の重要性はますます増してくるものと考ええる。軌道上における宇宙機の搭載機器交換や推薬補給、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 近傍における宇宙飛行士に代わる作業サービスの提供などの、いわゆる「軌道上サービス・ミッション」が構想されて久しいが、これらのミッションは、ISS 以降の宇宙活動において、いよいよ本格化してくる。ランデブセンサはこれらのミッションのキーコンポーネントであり、主要国が凌ぎを削って開発競争をしている項目のひとつである。米国の DART 実験の失敗は記憶に新しい。わが国は、ETS-VII のランデブ・ドッキング実験において、世界に先駆けてこの分野の経験を積んでいる。

一方、衛星間の相対的な位置関係（距離および方向）を高精度に計測するという機能は、ランデブ・ドッキング以外であっても、一般的に多くのミッションが必要とする、いわば基本機能であるという側面がある。

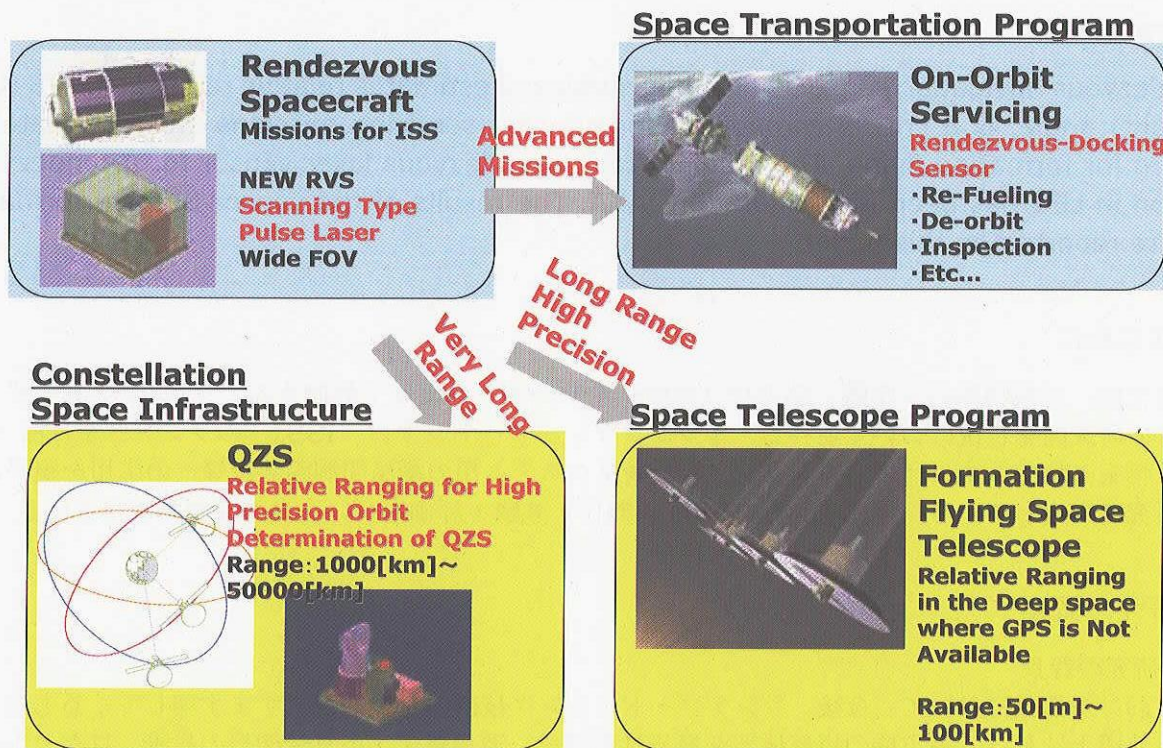
たとえば、L2 点における科学ミッションとして、近年複数の「フォーメーションフライト観測ミッション」構想が検討されている。これらのミッションでは、数 cm～数 mm の精度（精度は波長や観測方式に依存する）にて相対測距を行う必要があり、測距装置が必要である。

またもうひとつの例としては、準天頂衛星に代表される測位衛星コンステレーションシステムがある。測位衛星システムにとって、軌道決定精度は、測位精度に直接影響を与える重要な性能である。軌道決定精度を高めるための一手法として、衛星間距離を継続して精密測距し、そのデータを軌道決定の一助として用いる方法がある。

## (2) 研究の内容

以上の例に見るように、「ランデブ・ドッキング技術」および「衛星間測距技術」の重要性は高い。そこで、JAXA は、まず近い将来行われる予定のランデブミッションを想定した、ランデブレーザセンサの研究開発を実施している。この研究は、ETS-VII における成果を反映しつつ、直近のランデブミッションへの適用を第一目標とする方針で進めている。さらに、衛星間測距への応用も視野に入れた測距方式を採用しており、上記で述べた長期的なシナリオへの対応も考慮した内容となるよう、留意している。

Figure 1 に、開発中のランデブセンサの開発構想を示す。



**Figure 1 A Pilot Plan of Rendezvous Laser Sensor Development**

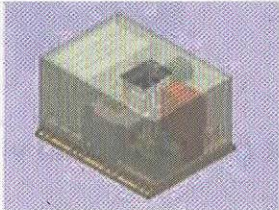

具体性のある研究開発を進めていくために、本研究ではまず、現在進行中のランデブ技術を必要とするプロジェクトへの適用を狙って進める方針をとっている。そのために、次のような前提条件をセンサに対する要求として設定し、センサの設計仕様を検討した。

- ・ 計測域は約 700m～約 3m（中距離用）
- ・ ターゲット宇宙機は専用のレーザーリフレクタを有する
- ・ ターゲット宇宙機及びチェイサー宇宙機の姿勢は 3 軸制御されている

上記の要求項目から検討したセンサの設計仕様の概略を Table 1 に示す。Table 1 には、ETS-VII にて開発したランデブセンサについても比較のために概略を併記した。



Table 1 Specifications of Rendezvous Laser Sensor, Comparison with ETS-VII

	New Rendezvous Laser Sensor	ETS-7
Scanner Type	Galvano Mirror Type Scanner	Static Type
Measurement Type	Time of Flight Measurement	AM Modulation
Laser Type	Pulse Laser (Peak Power = 30W, 30kHz)	CW Laser
FOV	40[deg]×40[deg]矩形	6[deg] Conical
Measurement Range	3[m]~730[m]	0.3[m]~600[m]
Accuracy		
Range		
Bias(0-P)	0.1[m]	0.1[m]
Random(3σ)	0.011[m] (R < 6.1[m])	0.006[m] (R < 40[m])
LOS		
Bias(0-P)	0.1[deg]	0.05[deg]
Random(3σ)	0.06[deg]	0.02[deg]
Description	Wide FOV (Galvano Mirror Scanner) Potential for Long Range Measurement (Pulse Laser) Middle Accuracy (Time of Flight Measurement)	Narrow FOV (Static Type) Short Measurement Range High Accuracy (AM Modulation)
Image		

ETS-VII で開発したレーザーセンサは、AM 変調による CW (Continuous Wave, 連続波) レーザーによる測距と、CCD センサによる測角を行う、スタティック型レーザーセンサであった。長所として、測距精度が高いことが挙げられる。一方で、CW レーザーである制約から、計測レンジおよび視野範囲の拡大が望めず、将来展開に限界がある、という短所がある。

そこで、本研究では、将来の高度なミッション要求に応えるため、パルスレーザーによる測距と、独立した 2 軸ミラーによるガルバノスキャン方式による測角を組み合わせたセンサシステムとした。パルスレーザーの場合、レーザーのピーク出力を高出力化することで、測距レンジを伸ばすことが可能である。また、走査機構を採用することで捕捉範囲が広視野可され、初期捕捉の際の運用上の制約条件を緩和することができる。

レーザーは、半導体パルスレーザーを選定した。要求測距レンジが 730m と比較的短く、かつレーザーリフレクタを持つターゲットを想定しているため、レーザーのピークパワーは 30W、繰り返し周波数は 30kHz が選ばれた。将来、短パルス化とピークパワー増加によって、適用対象にあわせて容易に長距離化が可能である。方式として将来のポテンシャルに留意した設計となっている。

本センサの動作は、以下のような流れとなる。まず、初期捕捉モードにおいて 40deg×40deg の範囲を走査し、ターゲットであるレーザーリフレクタを検出する。次に、ターゲットを中心に視野の絞り込みを行い、計測を徐々に高頻度にしてゆく。最終的に 0.6deg×0.6deg の範囲を高速でスキャンしターゲットを追尾するトラッキングモードに移行して、2Hz の計測頻度にて測距・測角を行う。



本センサの研究開発は平成 14 年度に開始した。この年はセンサの設計検討を行った。ついで平成 15 年度にはクリティカル要素である測距回路部および走査部・走査駆動部の部分試作・試験を実施した。プロジェクトと調整しつつ、平成 22 年の軌道上実証を見込んで、開発を続けているところである。

### 3. 成果の概要

本節では、平成 16 年度の研究成果について報告する。

#### (1) ランデブレーザースセンサ機能モデルの製作

平成 15 年度の測距回路部・走査部・走査駆動部の開発成果を活用し、平成 16 年度は、単独で測距・測角センサの機能を果たす「ランデブレーザースセンサ BBM」を製作した。Figure 2～Figure 3 に BBM の写真と、その構成要素である走査部および光学部の写真を示す。

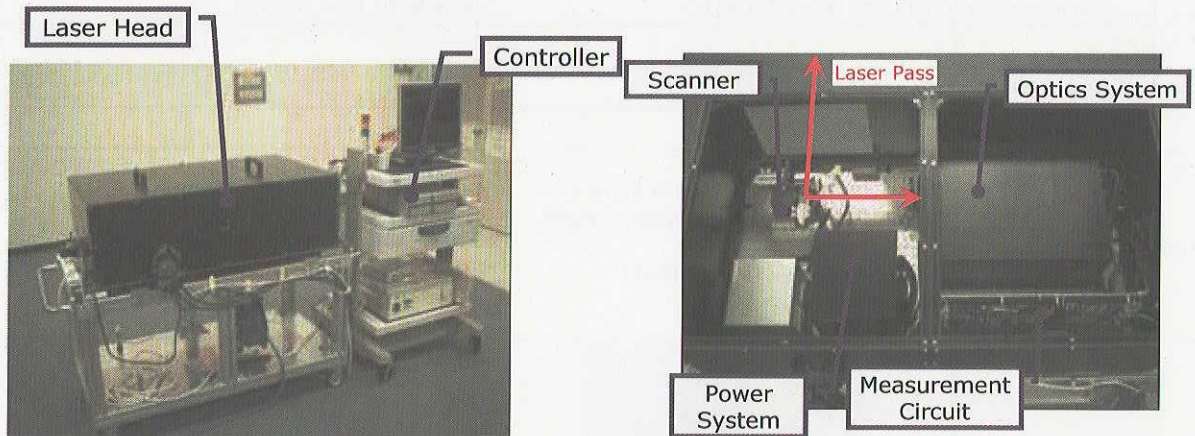


Figure 2 Rendezvous Laser Sensor BBM (left: external view, right: inside view)

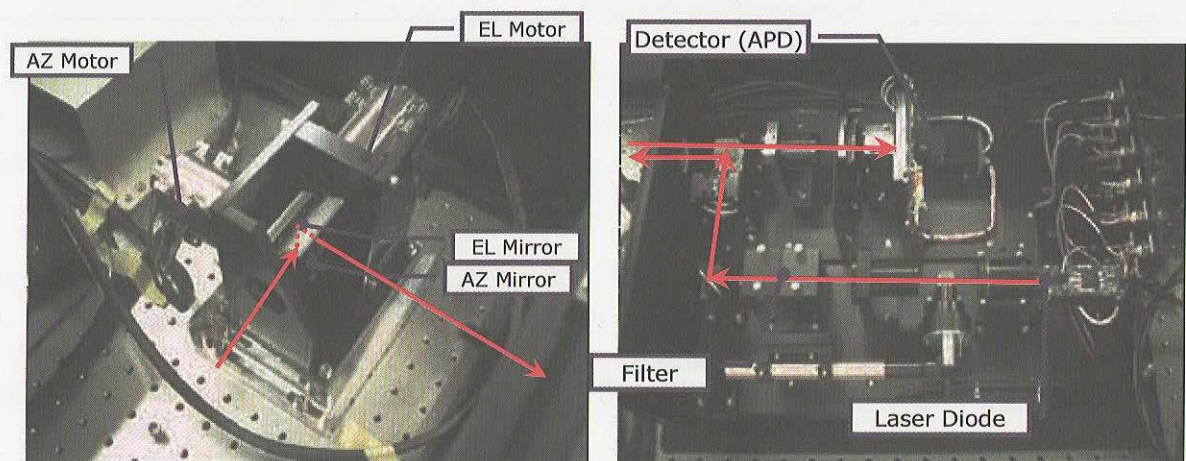


Figure 3 Scanner (left) and Optical System (right)

BBM は、パルスレーザ送信部、送受信光学部、受信部 (APD)、測距回路部、走査部、走査駆動部、制御部 (PC) で構成されている。PC のソフトウェアを操作することで、[レーザの送信]→[走査部によるエリアスキャン]→[レーザリターンを受信]→[測距/測角データ処理]→[結果の画面表示およびデータの保存]に至る、一連の動作を自動で実行できる。すなわち、測距・測角センサとして、ひと通りの機能を備えたシステムとなっている。

一方で、搭載性を考慮していない設計となっている部分もある。光学部、走査駆動部を構成する部品は一般品である。また、試験のしやすさを重視し、センサのアセンブリは搭載性を考慮していない。セン

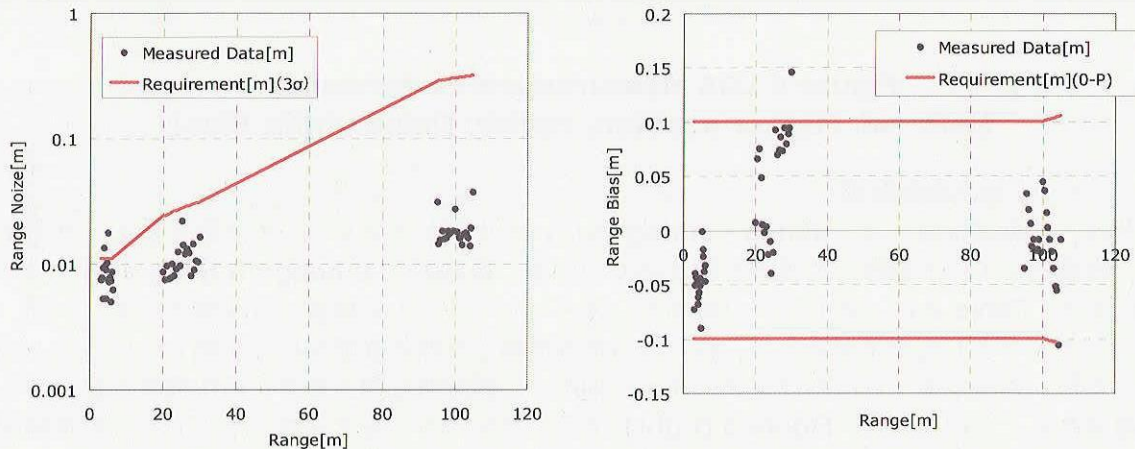


サとしての機能・性能を確認するための、開発用テストベッドとして製作している。

本 BBM の基本性能評価試験を実施した。以下にその内容を報告する。

## (2) 測距性能評価

レーザーダイオードからレーザーパルスを送信し、受光素子 (APD) にてそのリターンを受信して、時間差から距離を測定する原理である。あらかじめトータルステーションを使って距離を精密に測定してある反射シートをターゲットとして、BBM で実際にトラッキングを行い、測距データを取得して、測距性能の評価試験を実施した。Figure 4 に結果の一例を示す。



**Figure 4 Range Measurement Performance (left: Noise, right: Bias)**

Figure 4 は、常温環境下での試験結果である。試験環境の都合で、100m までの距離で実施している。常温時には、おおむね目標仕様を満足できることを確認した。なお、別途実施した測距回路単体での温度特性試験の結果によると、レンジノイズ、レンジバイアスともに、温度変動にともなって目標仕様を逸脱するケースがあることが判明しており、温度補償の方法や温度制御の実施を検討する必要があることが分かっている。

## (3) 測角性能評価

本センサは、アジマスおよびエレベーションの二軸の走査部を備え、二枚のミラーを駆動することでレーザーによるエリアスキャンを実現する。ターゲットの測角は、走査機構の回転角度をレゾルバおよびタコジェネレータにて計測することで、得られる仕組みとなっている。

本年度は、特に高い測角精度が求められる、トラッキング時の評価を行った。既知の位置に設置 (Figure 5 right) した反射マーカーをターゲットとしてトラッキングを行い、測角計測値を取得して、精度評価を行った。結果を Figure 5 (center, left) に示す。図はバブルチャートになっており、円の直径が計測誤差を示す。斜線で塗りつぶされた点は、要求スペックを逸脱した計測値を示している。本年度の測角性能計測においては、測角ノイズに関して目標を満足する目処を得た。一方で、測角バイアスについては、目標値を大きく上回る誤差を示したケースも存在する。本年度の測角バイアスについては、計測系の精度が十分でなかった可能性が高く、今後、試験の改善も含めて再度検討し、対策をとる方針である。



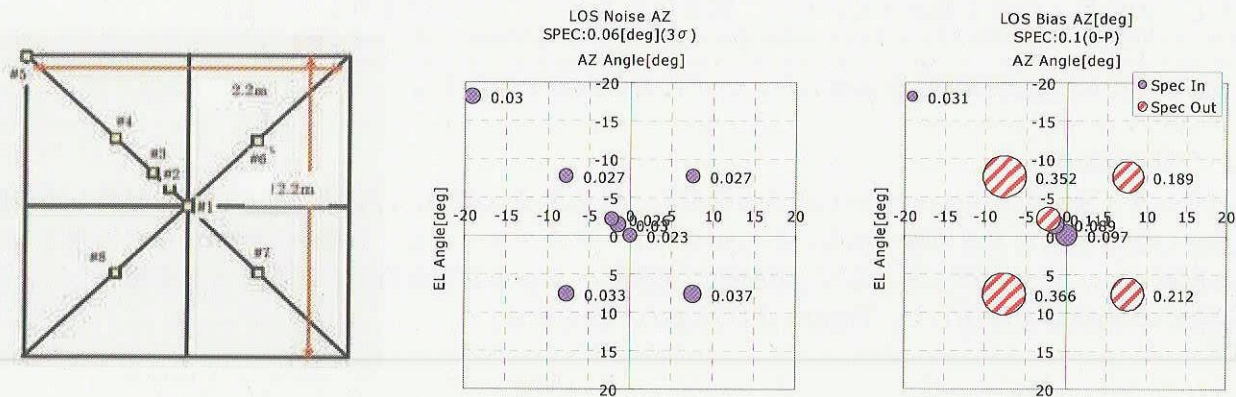


Figure 5 LOS Measurement Performance (left: ref. Marker position, center: Noise, right: Bias)

(4) ターゲット抽出機能評価

本センサは、初期捕捉時には、40deg×40deg の広いエリアをスキャンして対象を検出・抽出する。その後、段階的にモード遷移して視野を絞り込んでいき、最終的に 0.6deg×0.6deg のトラッキングモードに至る。Table 2 に、各モードの名称と、スキャンエリアの目標値・計測値を示す。一部、わずかにスペックアウトした項目があるが、おおむね走査機構は目標走査範囲にて駆動していることが確認された。また、各々のモードにおけるターゲット抽出は、誤認識は発生せず、検出機能が良好であることが確認された。一例として、Figure 5 (right) で示したマーカーをターゲットとして、初期捕捉時のターゲット抽出を試みた結果を Figure 6 に示す。本年度の試験においてはターゲットが静止しており、抽出およびトラッキングは容易であったが、対象が相対的に動いている状況において捕捉し続けることが重要なポイントであり、今後は追尾性能要求に沿った条件での動的環境下での試験を実施していく予定である。

Table 2 Scan Area

Mode	Required Search Area	Results	
		AZ axis	EL axis
Search Mode 0	40deg×40deg	OK	NG (39.95deg)
Pointing Mode 1	16.2deg×16.2deg	OK	NG (16.18deg)
Pointing Mode 2	4.6deg×4.6deg	OK	OK
Pointing Mode 3	3.0deg×3.0deg	OK	OK
Tracking Mode	0.6deg×0.6deg	OK	OK

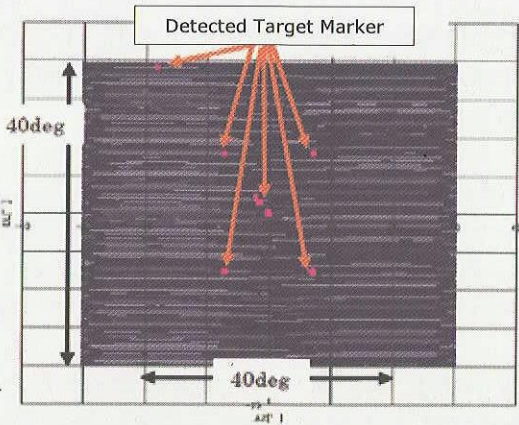


Figure 6 Result of Target Search Test (Search Mode 0)

4. まとめ

本年度、ランデブレーザースенса BBM を製作し、基本的性能について評価試験を実施した。測距・測角・ターゲット抽出機能のそれぞれについて、おおむね良好な結果を得た。一方で目標を満たしていない項目も明らかとなり、個別に対策を考案し、順次適用していく予定である。今後は、BBM の動的環境化における性能試験を実施し、実使用環境に近い状況における機能・性能の評価と改善を進め、次フェーズの開発へ確実に進む方針である。