

HTV 用ランデブレーザーセンサの研究

Study on the Navigation Laser Sensor for HTV Rendezvous Mission

誘導・制御技術グループ

Spacecraft Guidance, Control and Dynamics Engineering Group

小田 光茂、石島 義之、小松 茂則、山元 透、巴谷 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. 研究の背景、目的

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する。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。米国の DART 実験の失敗は記憶に新しい[1]。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。

上記のような「ランデブ・ドッキング技術」および「衛星間測距技術」の重要性に鑑み、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、ランデブレーザー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。


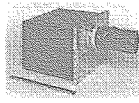
2. センサシステム設計

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 730m～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表 1 に示す。表 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。

表 1 ランデブセンサの主要諸元（左 新規開発品、右 ETS-7 搭載品）

	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(O-P)	0.1[m]	0.1[m]
Random(3σ)	0.011[m] (R < 6.1[m])	0.006[m] (R < 40[m])
LOS		
Bias(O-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、測距精度がやや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化され、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、次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。平成 16 年度には、ひととおりのセンサシステムとしての機能を備えた BBM を試作した[2]。次項でその概略を述べる。

3. BBM モデル試作

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、単独で測距・測角センサの機能を果たす「ランデブレーザーセンサ BBM」を製作した（以下単に BBM と呼ぶ）。図 1 に BBM の概観を示す。また、その構成要素である走査部を図 2 に、光学部を図 3 にそれぞれ示す。

BBM は、パルスレーザー送信部、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、「レーザーの送信」⇒「走査部によるエリアスキャン」⇒「レーザーリターンの受信」⇒「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」の一連の動作を自動で実行できる。既に、測距・測角センサとして、ひとつおりの機能を備えたシステムである。

一方で、搭載性を考慮していない設計となっている部分がある。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、文字通りの BBM であり、開発用テストベッドとして製作したものである。

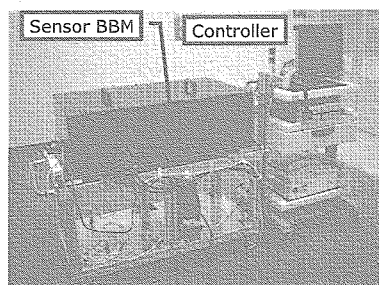


図 1 ランデブセンサ
BBM の概観

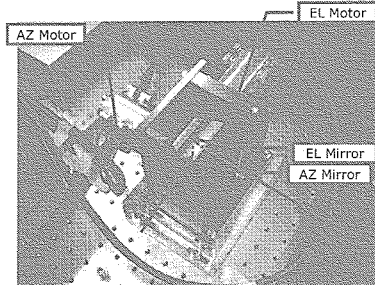


図 2 走査部
(ガルバノスキャン方式)

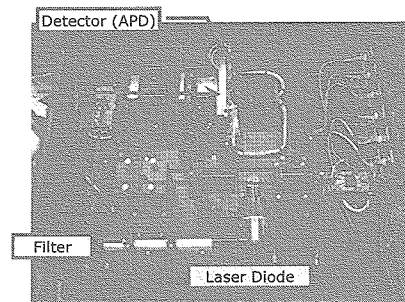


図 3 光学部
(送信部及び受信部)

4. RDOTS での性能評価試験

筑波宇宙センターに設置されているランデブ・ドッキングシステム開発試験設備（中距離用）(RDOTS(M): Rendezvous and Docking Operation Test System (Middle range type))にて、試作したセンサ BBM の機能・性能評価試験を実施した。試験コンフィギュレーションを図 4 に示す。

RDOTS は 6 軸および 2 軸のサーボテーブルで構成されるモーションシミュレータである。宇宙機のランデブ・ドッキングシステムの開発に必要となるシミュレーション試験を実施するための設備である。本試験においては、BBM を 6 軸テーブルに、ターゲットとなるレーザーリフレクタを 2 軸テーブルに設置した。RDOTS を運転することで、ランデブセンサを搭載した宇宙機が、位置や姿勢を制御しながら、リフレクタを装着したターゲット宇宙機に接近する状況を模擬することができる。

今回、静的（相対静止中）および動的（相対運動中）環境下におけるセンサの機能・性能評価試験を実施した。図 5 に RDOTS におけるセンサ試験の状況を示す。

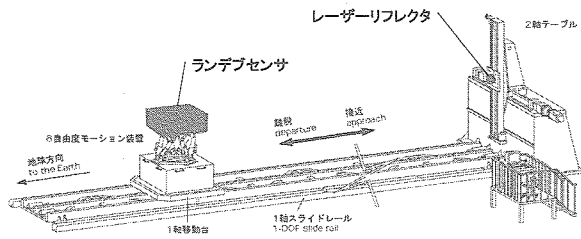


図 4 RDOTS 試験コンフィギュレーション



図 5 RDOTS での試験の写真

(1) 静的機能・性能評価試験

静的機能・性能評価試験の主目的は、リフレクタに対して想定的に静止した状態において、測距・測角精度の評価を行うことである。BBM をリフレクタに正対させ、距離を約 5[m] から 25[m] まで変化させて、測距性能を評価した。図 6 に測距ノイズ評価結果を、図 7 に測距バイアス評価結果を示す。

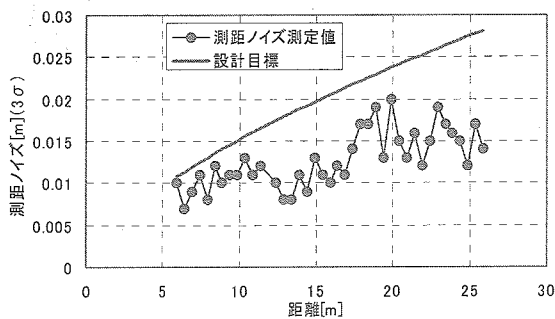


図 6 測距ノイズ評価結果

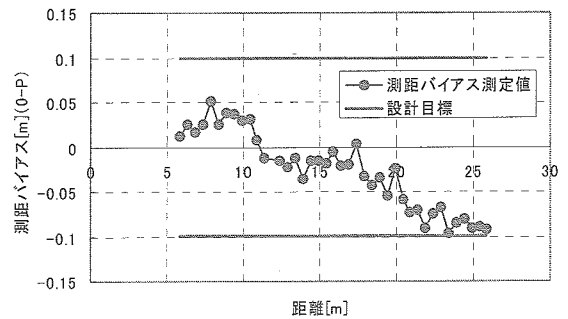


図 7 測距バイアス評価結果

測距ノイズ、測距バイアスともに、約 5[m]~25[m]の範囲においては、設計目標を達成することができた。測距精度要求達成が最も困難な近距離域における性能には目処がついたと考えている。

次に、BBM をリフレクタから約 2.3[m]の近距離に移動し、リフレクタを装着している 2 軸サーボテーブルを上下左右に動かして、測角精度の評価試験を行った。リフレクタ位置の移動位置を図 8 示す。測角性能評価の結果をまとめたものが表 2 である。表中の No.は図 8 のリフレクタ位置の識別番号である。

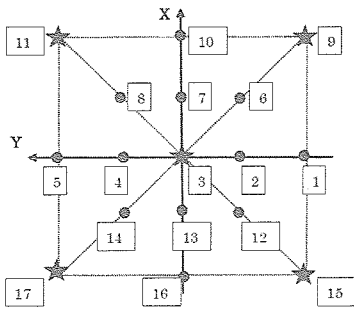


図 8 測角評価時のリフレクタ移動位置

表 2 測角性能評価結果（下線、斜体が要求逸脱）

No.	反射ターゲット		AZ誤差[deg]		EL誤差[deg]	
	AZ[deg]	EL[deg]	NOISE(3σ)	BIAS(0-P)	NOISE(3σ)	BIAS(0-P)
ST1_SH#01	20.394	-0.055	0.004	<u>-0.190</u>	0.005	-0.006
ST1_SH#02	10.329	-0.058	0.006	<u>-0.129</u>	0.006	0.003
ST1_SH#03	0.237	-0.060	0.007	0.000	0.016	0.000
ST1_SH#04	-9.870	-0.059	0.007	0.074	0.008	0.004
ST1_SH#05	-19.978	-0.055	0.005	<u>0.149</u>	0.009	0.008
ST1_SH#06	10.328	-10.145	0.007	-0.001	0.031	-0.032
ST1_SH#07	0.237	-10.156	0.009	0.066	0.028	-0.003
ST1_SH#08	-9.868	-10.160	0.006	0.070	0.027	0.004
ST1_SH#09	20.391	-20.182	0.007	<u>0.123</u>	0.014	-0.022
ST1_SH#10	0.238	-20.235	0.007	<u>0.108</u>	0.031	-0.012
ST1_SH#11	-19.974	-20.234	0.008	0.092	0.030	0.092
ST1_SH#12	10.332	10.034	0.013	<u>-0.254</u>	0.052	-0.018
ST1_SH#13	0.239	10.043	0.007	-0.087	0.052	-0.034
ST1_SH#14	-9.864	10.048	0.003	0.034	0.004	-0.056
絶対値の平均			0.007	0.098	0.022	0.021
最大			0.013	0.149	0.052	0.092
最小			0.003	-0.254	0.004	-0.056
設計目標			0.100	0.100	0.100	0.100

測角ノイズについては、全ての場合において目標性能を満たすことができた。一方で、測角バイアスに関しては、いくつかの補正を試みた後でも、大きく目標性能を超える結果となった。この測角性能の逸脱は今後の課題である。走査部アライメントの補正方法の改善や、走査部のミラー回転角度計測部の精密調整により、精度向上を図る予定である。

次に初期捕捉機能の確認試験について述べる。本センサは、まず 40[deg]×40[deg]の広い矩形領域を「サーチ」し、ターゲットを発見する。次にそれを逃さないように「ポインティング 0」⇒「ポインティング 1」⇒「ポインティング 2」と徐々に捜査範囲の狭いスキャンモードに移行しながら追い詰め、最終的に高周波（2Hz）の「トラッキング」モードにて追尾に入る。この初期捕捉シーケンスの確認試験を、静止したリフレクタに対して行った結果を図 9 に示す。

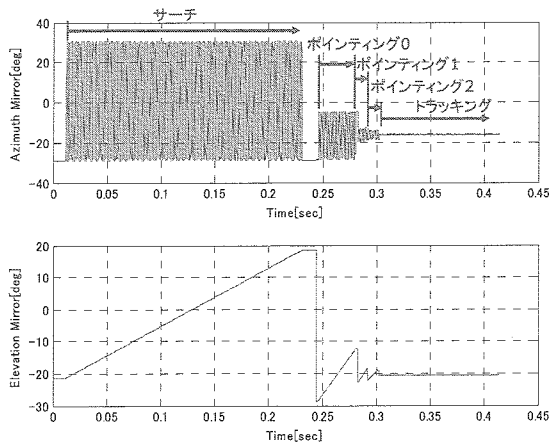


図 9 初期捕捉シーケンスの確認（上段ミラーAZ 角度、下段ミラーEL 角度）

まず、40[deg]×40[deg]の矩形領域走査（「サーチ」）を 1 フレーム行い、リフレクタを発見している。次に、徐々に走査範囲を狭めながらトラッキングに至っている状況が把握できる。AZ 角度が±20[deg]を超えているが、高速往復運動しているミラーの線形動作領域の外側に線形性を保てない折り返し運動部分が必要なためであり、実効上は±20[deg]の走査領域となっている。

(2) 動的機能・性能評価試験

動的機能・性能評価試験は、BBM のリフレクタに対する相対位置・相対姿勢が動的に変化している状況における機能性能を評価することを目的としている。ランデブセンサは実際には相対運動している状況下で使用するので、実環境に近い試験となる。

図 10 に、BBM がリフレクタに対して正弦波的な軌跡で前後(図 4 の 1 軸スライドレールに沿って)に移動している状況下にて、リフレクタをトラッキングさせ、測距データを評価した結果を示す。相対距離に応じた測距バイアスが見られるが、測距バイアス 0.1[m]の目標性能を満たしている。20[m]程度の近傍域における動的測距性能に関しては、目処が立ったと考える。次に、6 軸モーションテーブルを三角波状の軌跡で首振り運動(傾ける動きの往復)させた状態にて、BBM にリフレクタをトラッキングさせ、測角データを評価した結果を図 11 に示す。

目標性能 0.1[deg]は達成できていない。また、時折突発的に大きな誤差が生じることがある。上記の突発的な誤差については調査中である。次に、複数リフレクタの認識・分離機能について述べる。ISS のように、近距离に二つのリフレクタが配置されている場合がある。このリフレクタに接近していく場合、遠距離においてリフレクタは一つに見えるが、ある距離よりも近くなると、リフレクタが二つに見える始める。その距離はセンサの角度分解能に依存する。本センサは、接近に従って適切にリフレクタを分離し、複数リフレクタを認識する機能を有している。二つのリフレクタを 2 軸テーブルに設置し、この機能を試験した結果を図 12 に示す。

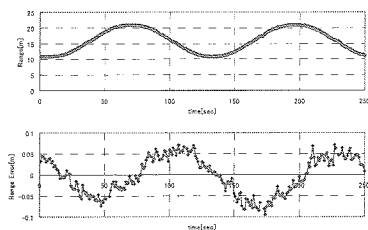


図 10 追尾機能・性能試験
(距離方向)
(上段 相対距離、下段 測距誤差)

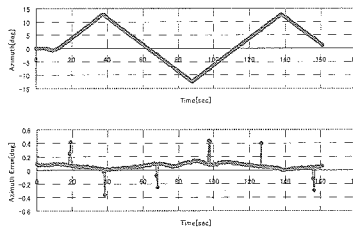


図 11 追尾機能・性能試験
(AZ 角方向)
(上段 AZ 角度、下段 AZ 測角誤差)

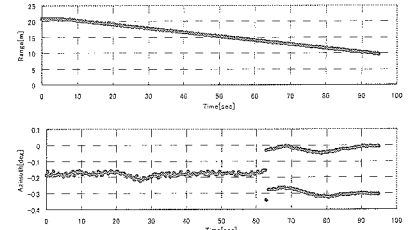


図 12 複数リフレクタの認識・
分離機能
(上段 距離、下段 AZ 方向測角)

始めリフレクタは一つに見えている。そして距離 13[m]付近から、リフレクタの分離に成功し、二つのリフレクタを認識、トラッキングできている。

5. 今後の課題

今回の BBM の試験において、今後への課題がいくつか抽出された。基本性能という観点では測角性能が目標性能に達していないことが第一に挙げられる。また、今回の試験は設備の制約で 25[m]までの短距離域に限られたものだが、750[m]の遠方から数[m]の近傍までを包含するダイナミックレンジに関しては未達成である。今後、特にこの二点の課題を達成すべく開発を進めていく予定である。

参考文献

- [1] "Overview of the DART Mishap Investigation Results For Public Release," URL: http://www.nasa.gov/mission_pages/dart/main/index.html
- [2] 石島, 山元, 小田, 植田, 加瀬, 村田, "ランデブ用レーザーセンサの研究開発", 第 49 回宇宙科学記述連合講演会, 1H11, 2005