

高性能姿勢制御技術の研究

Study of High Performance Satellite Attitude Control System

高精度ファイバージャイロ IRU の研究

Study of High Performance Fiber Optic Gyro Inertial Reference Unit

総合技術研究本部システム誘導技術グループ 巳谷真司, 鈴木秀人, 川井洋志
 Institute of Space Technology and Aeronautics,
 Spacecraft Guidance Control and Dynamics Engineering Group
 Shinji Mitani, Hideto Suzuki, Hiroshi Kawai

Abstract

Aiming for the application to the future spacecraft attitude control system, we are studying the high performance Fiber Optic Gyro Inertial Reference Unit (FOG-IRU). To fulfill the requirements of low noise, stable bias and stable scale factor, we adopt the high power Fiber Light Source, a long fiber coil (several kilo-meters) and the digital serrodyne closed loop configuration. This paper outlines the result of our FOG-IRU development during FY16 such as evaluation of the FOG Pre-EM model, evaluation of the temperature characteristics of the Pre-EM model, evaluation for the optical error factor, designs and re-fabrication for the performance improvement, and evaluation of the Pre-EM re-fabrication model.

1. はじめに

原理的に長寿命・高信頼性が期待される衛星搭載用 FOG-IRU の開発を日本航空電子工業株式会社との共同研究のもと実施している。本研究の目標は、従来よりも高精度の FOG(Fiber Optical Gyro : ファイバージャイロ)による衛星搭載用 IRU(Inertial Reference Unit : 慣性基準装置)を開発することである。

ファイバージャイロは光学式ジャイロのひとつであり、機械式の衛星搭載用ジャイロ(例えば、TDG : Tuned Dry Gyro, FRIG : Floated Rate Integrating Gyro)に比べて、可動部が無く原理的に高信頼性を有し、無擾乱振動、広ダイナミックレンジ、瞬時起動可能などの有利な性質を持つ。宇宙適用例もあるが、精度が現時点では機械式のものに及んでいない。高精度化の要求が厳しくなる将来の地球観測、天体観測に適用可能な機器にするために本研究では高精度化を指向している。長寿命・高信頼性の特徴を生かしつつ、高性能姿勢制御システムの構成要素の標準とするのが本研究の狙いである。

FY13 より研究を開始し、東京大学の保立和夫教授(宇宙科学研究所でロケット用 FOG-IRU(Fiber Optic Gyro Inertial Reference Unit)を開発)に客員として助言を頂きつつ、宇宙科学研究所の橋本樹明教授、戸田知朗助手らと共同で開発を進めている。

高精度 FOG-IRU の具体的な目標仕様をTable 1に挙げる。将来の観測衛星などの高精度姿勢決定要求を考慮して設定した。特に角度ランダムウォーク(ARW)とは角速度計測値に含まれるランダムノイズ成分の大きさを表す指標であり、姿勢決定精度を左右するもので、小さいことが望ましい。IRU と恒星センサからなる標準的な姿勢決定系構成において、ランダムノイズ 1arcsec(1σ)の恒星センサの信号をフィルタ処理して 0.1arcsec(1σ)の姿勢決定精度を達成できることを目標に、高精度 FOG-IRU の角度ランダムウォーク 0.0005deg/ \sqrt{h} の値を設定した。またこの値は海外の高性能姿勢センサと比べても世界水準のスペックである。

本研究では、平成 22 年度の軌道上実証実験を目指して、設計要求値を満たすために高出力光源やクロ

ーズドループ方式であるデジタルゼロダイン方式等の要素技術を適用する^[1]。現在開発中の FOG-IRU EM 予備検討モデルの機能系統ブロック図を Fig. 1 に示す。複数年にわたり計画されている本研究の主な実施内容を以下に列挙する。

- 1) 高精度化を具現するジャイロに関する技術要素を取り込んでハードウェア化すること
 - 2) IRU コンポーネント全体としての成立性の検討
 - 3) 試作品等の設計・製作・試験・データ評価
 - 4) 実験機器として軌道上実証するのに適切な EFM(Engineering Flight Model)の設計・製作
- FOG-IRU の原理等は割愛する。本研究での高精度化等を具現するための技術要素を以下に挙げる。
- 1) EDF 光源：高出力光源のため S/N 比が向上し、ランダムウォーク低減。耐放射線性向上。
 - 2) シングルモード(SM)ファイバ：測定原理式に基づく感度向上。通信用で安価で入手容易。
 - 3) オクタポール巻き：ファイバの物理的・光学的特性の偏在を打ち消して、バイアス安定性を確保。
 - 4) RIN 補正回路：光源ノイズを低減し、ランダムウォーク低減。
 - 5) デジタルゼロダイン方式：左右両周り光の位相差を補償する位相変調を行う帰還により、良好なスケールファクタ特性，広ダイナミックレンジ確保。
 - 6) 光 IC，ツインデポライザ：消光比 60[dB]以上の偏光素子の特性を生かし，偏波面保存ファイバである必要を無くし，安価で入手容易に。

Table 1 Target performance of FOG-IRU

Item	Target value	Design value
Angular Random Walk (ARW)	0.0005deg/ \sqrt{h} (1 σ)	0.00022deg/ \sqrt{h} (1 σ)
Bias Stability (Short Term)	0.002deg/h (1 σ)	0.002deg/h (1 σ)
Dynamic Range	± 10 deg/sec	± 10 deg/sec
Scale Factor	0.1arc-sec/pulse	0.1arc-sec/pulse
Scale Factor Stability	10ppm(1 σ)	10ppm(1 σ)
Mass, Electric Power (of an IRU)	Should be smaller, but not specified explicitly in this study.	

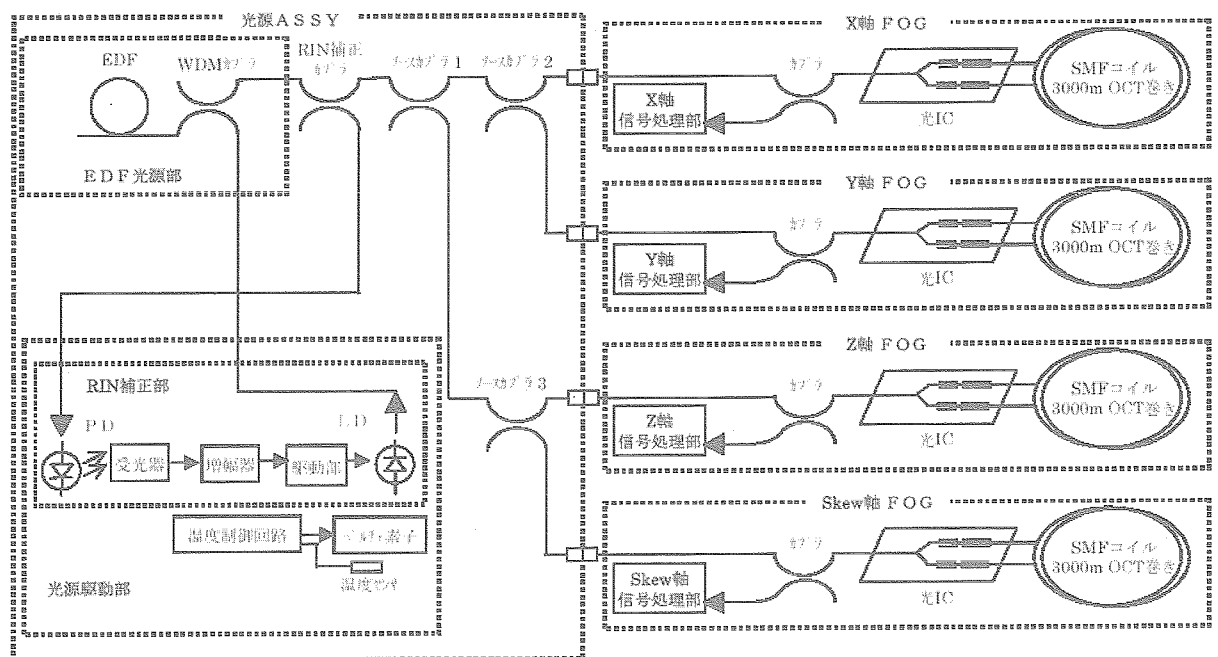


Fig. 1 Functional Brock Schematics of Pre Experimental Model

2. 研究の概要

平成 16 年度の研究概要を述べる。ファイバージャイロの高精度化に必要な誤差要因の特定と改善を実施すべく、平成 15 年度に試作した EM 予備検討モデル(Fig. 2)を用いて、性能(ランダムウォーク、バイアス安定性など)並びにそれらの温度依存性といったデータを取得した。さらに、そのデータを評価し、同モデルを改修した。そして再試験を実施し、改修効果を評価した。その他、誤差発生メカニズムの理解に資する検討も実施した。もって、高精度 FOG-IRU の EM 設計に必要な設計開発情報の取得を行った。

平成 16 年度に実施した研究項目を以下に挙げる。

1) 基本性能評価及び温度特性試験

部分試作モデル(ファイバ長 6km)及び EM 予備検討モデル(ファイバ長 3km)について、ランダムウォーク係数に関する比較試験を実施した。また基本性能の EM 予備検討モデルについて、自己発熱及び周囲温度の変化に対する、バイアスドリフト、及びランダムウォークの挙動を評価した。

2) EM 予備検討モデル光学誤差要因の解析

1 節の結果を受けて性能改善のための要因分析を行い、特にデポライザの性能向上について検討を行った。

3) EM 予備検討モデルの改修設計・改修後の基本性能評価

FOG 全体設計において EM 検討モデルに最適な構成の検討、及び性能解析に基づき改修内容を検討した。また光学設計において性能改善の検討、特にデポライザの性能向上について改修設計を実施した。そして改修設計に基づき改修した EM 検討モデルについて、基本性能の評価を実施した。

4) FOG 光学部の耐放射性試験

宇宙機器としての新規採用部品の以下の 2 項目に関して放射性に対する影響を評価した。

SM コイルの放射線試験：SM コイルのドーズレート依存性を評価するため 3km SM コイルに γ 線(コバルト 60)を照射し、伝送損失を評価した。

EDF 放射線試験後の特性調査：一昨年前に実施した EDF(ASE 光源)の放射線試験品について一年経過後の発光特性を調査し減衰復帰度を計測した。

3. 成果の概要

2 章の項目に対応して平成 16 年度成果を述べる。

1) 基本性能評価及び温度特性試験結果

一昨年度、部分試作モデルのランダムウォークを測定すると温度変動時にランダムウォーク特性が悪化する事象が確認された。このランダムウォーク変動の原因を調査するため要因分析を実施した結果、光学部に要因のあることを突き止めた。更に詳細な試験により、外乱感受性のファイバ長依存性を確認しコイル部周辺の外乱感受性を低減する実装方法改修を行った結果、ランダムウォーク変動は解消された。しかし今度は温度上昇時にバイアスのうねりが発生する事象が見られた。

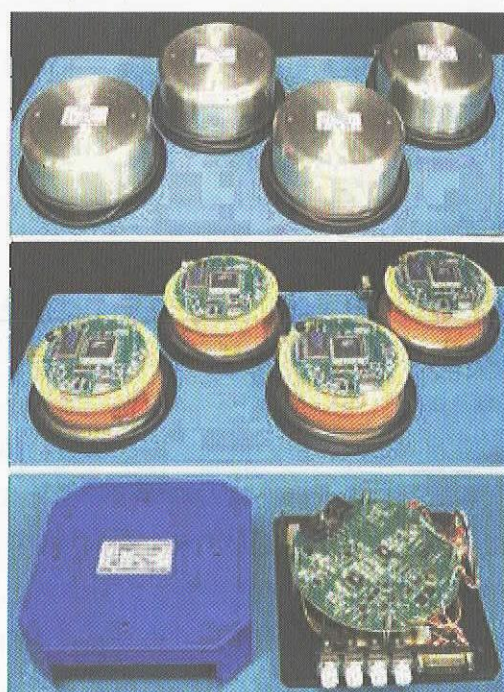


Fig. 2 Pre-Experimental Model

Upper: Coil (4 sets),
Middle: Coil (Inner side, 4 sets),
Lower: Light Source (1set for 4 coils)

2) 光学誤差要因解析結果

実装方法改修で解消し切れなかったバイアス変動の原因を突き止めるために光学系の誤差解析を行った。

本研究の技術的特長としてコイル両端にデポラライザを配して左右両周り光を無偏光で伝搬させるツインデポラライザ FOG を採用している(Fig. 3)。無偏光の場合のバイアス誤差はデポラライザ出射光は特定の偏光状態がコヒーレント時間だけ継続し、次のコヒーレント時間の区切りでは前の状態とは相関の無い偏光状態となる。個々の偏光状態に対して FOG は左右両周り光それぞれに位相差を持つ事になるが、ランダムに変化する位相差の平均値は中心極限定理を用いて考えると 0 になる。すなわち左右両周りの光路長が等しくかつ無偏光の場合のバイアス誤差 $\Delta\Omega_e$ は

$$\Delta\Omega_e = \varepsilon \cdot \text{Pi} \cdot \text{Pd} / \text{Ks} \quad (1)$$

と表せる。ここで ε は偏光子振幅消光比、Pi は入射光偏光度、Pd はコイル伝搬光の偏光度、Ks はサンヤック係数である。つまりデポラライザで解消し切れなかった偏光成分が誤差を生じている可能性がある。

本検討結果を基に偏光度を精密管理することによりデポラライザの試作を行った結果、EM 予備検討モデルのジャイロ 4 機ともに温度変化に対するランダムウォークドリフトのうねりを抑制することが可能となった。精密管理による偏光度改善後のランダムウォークを Fig. 4 に示す。この図から温度変動時のバイアスのうねりが解消されているのが分かる。また、偏光度誤差を大きくすると温度変化時のバイアスが再現することも確認された。本解析と試験結果から、温度変化中にバイアスのうねりが生じる原因がデポラライザの偏光度にある事が判明した。

3) EM 検討モデルの改修設計

前節の温度特性試験と光学系誤差解析の結果を受けて、FOG 全体構成を再設計し、EM 予備検討モデルに最適な構成の検討、及び性能解析に基づき改修内容を検討した。特に光学設計において、性能改善の検討、特にデポラライザの性能向上について改修設計を実施した。

4) 改修後の基本性能評価試験

EM 予備検討モデルの改修後のバイアス性能改善に関してその挙動をアラン分散(AVAR)により評価した²⁾。AVAR は時系列データを解析する手法で時間平均をすることによりシステム固有のノイズを顕在化させることができる。3km コイルと 6km コイル各々に対して偏光度改善前後の AVAR を示したものが Fig.5 である。AVAR で評価することにより種々のノイズ成分が明確になる。 $\tau < 3600\text{sec}$ の領域の下降傾斜部は角度ランダムウォーク(ARW)成分の影響であることを表す。 $\tau > 3600\text{sec}$ の領域で AVAR が上昇傾斜し始めるがこれは角速度ランダムウォーク(RRW)成分の影響を表す。ARW 目標達成のためには広領域 τ での AVAR の全体的な低減が必要になる。Fig. 5 より明らかなように偏光度改善効果によって長周期のバイアスの変動が抑圧され、バイアス安定性のみならず ARW の改善が図られていることが分かる。

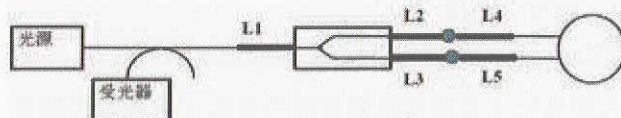


Fig. 3 Twin-depolarizer configuration

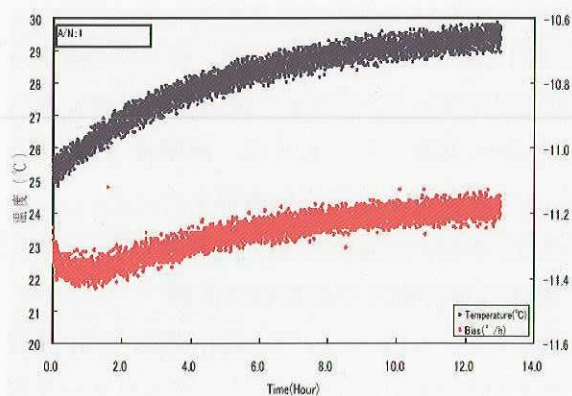


Fig. 4 after modifying polarization degree

同様に改修後の EM 予備検討モデルのコイル4機について評価したものが Fig.6 である。4機とも ARW 性能が改善され同性能を発揮していることが分かる。

本評価によりデポライザの性能とジャイロ性能の関係が明らかになり、改修結果、温度変化中のバイアスのうねりが抑圧され、ARW 性能として $0.0007^\circ/\sqrt{h}$ を実現することができた。

また本年度の達成結果として基本性能の評価を実施し再度取得した基礎データを Table 2 に示す [3]。

5) FOG 光学部の耐放射性試験結果

SM コイルの放射試験結果を Fig.7 に示す。SM コイルにはドーズレート依存性が見られるが、実際の軌道上で予想されるドーズレートに対して十分な放射線耐性がある。よって耐放射線シールド材料低減化により、FOG-IRU の重量を削減できる見込みである。

また、EDF 放射線試験後の特性調査結果を Fig. 8 に示す。3 サンプルに対して放射線試験後 1 年経過した EDF の出力光量を計測した結果を示す。内 2 サンプルはアニーリング効果により極めてゆっくりとした復帰が見られるが完全には戻らない。このことは光源部に耐放射線シールドを必要とすることを示し、今後の課題としてシールド量軽量化のため EDF 部のみのシールド構造を検討する。

4. まとめ

本研究の結果、FOG 光学系の性能とジャイロ性能の関係が明らかになり、偏光度を改善することによりバイアスうねりが抑圧され、角度ランダムウォーク性能に関して $0.0007\text{deg}/\sqrt{h}$ を達成することができた。

平成 16 年度で達成された成果と課題を基に、主に以下の研究を次年度引き続き実施する予定である。

1) ランダムウォークの改善

Table 2 に示すようにまだ目標が達成できていない ARW に関して光学的誤差要因の検討を散乱光の影響等に対する観点から再検討する。また光学部のみでなく信号処理回路部に関して信号入力部のノイズがランダムウォーク性能に与える影響を評価し、ハードウェア部分の EMC 対策も見直す。また、デジタ

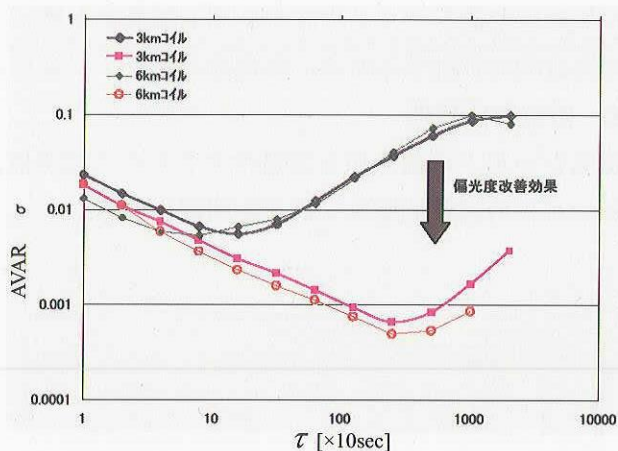


Fig. 5 Allan variance plot, BBM model (6 km) and Refabrication Pre-EM model (3 km)

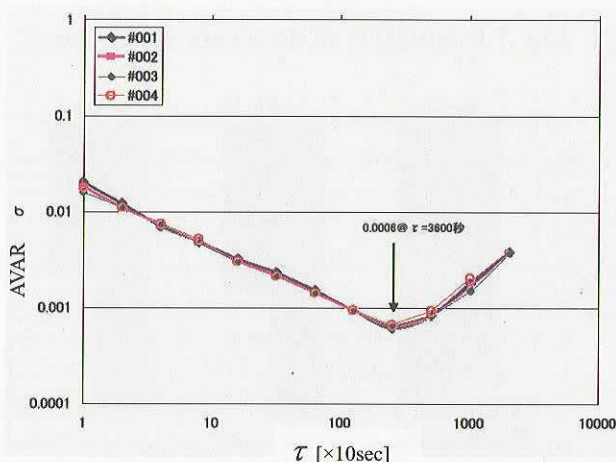


Fig. 6 Allan variance (4 set data of Prefabrication Pre-EM model)

Table 2 Evaluation of Pre-EM re-fabrication model

Item	Result	Target value
Angular Random Walk (ARW)	$0.0007\text{deg}/\sqrt{h}$ (1 σ)	$0.0005\text{deg}/\sqrt{h}$ (1 σ)
Bias Stability (Short Term)	$0.003\text{deg}/h$ (1 σ)	$0.002\text{deg}/h$ (1 σ)
Scale Factor Stability	10ppm (1 σ)	10ppm (1 σ)

ル処理分解能とパルスウェイト高分解能化を検討する。また、FOGの温度特性に関して、SHUPE効果を定量的に評価するため、温度変化とランダムウォークの関係を評価する。

2) 磁気特性評価

磁気シールドの要求値を定量化するために磁気感度試験を行い、偏光度と磁気感度の定量化により磁気シールドの具体的厚み・構造を明確化する。

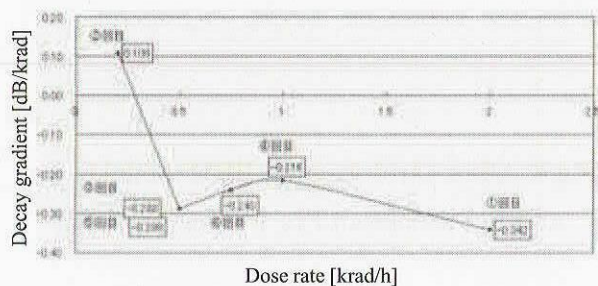


Fig. 7 Evaluation of dose rate dependency

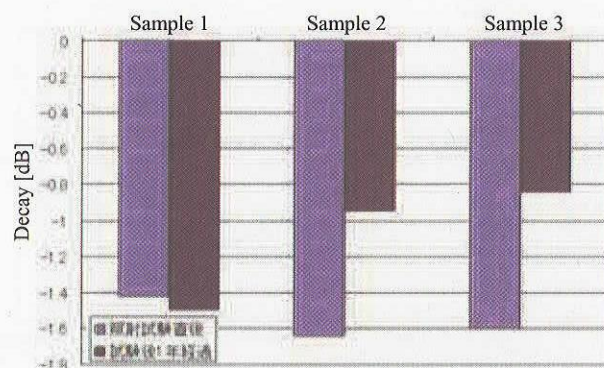


Fig. 8 Evaluation of EDF characteristic



Fig. 9 Radiology examination of SM Coils (3set)

[参考文献]

- [1]Herve Lefevre, "The Fiber Optic Gyroscope", Artech House Inc., 1993, ISBN 0-89006-537-3
- [2]David W. Allan, Neil Ashby, Cliff Hodge; "Science of Timekeeping; Hewlett-Packard Application Note 1289"; 1997.
- [3]IEEE Std 952-1997, "IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros"