

IRU の高信頼性化の研究

The development of High-reliable Inertial Reference Unit

里 誠、大谷 崇、川井 洋志

Makoto Sato, Takashi Otani, Hiroshi Kawai

総合技術研究本部誘導・制御技術グループ

Spacecraft Guidance, Control and Dynamics Engineering Group

Institute of Space Technology and Aeronautics

Abstract

Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) developed Tuned Dry Gyroscope (TDG), as supreme precision rate sensor for satellite attitude control. JAXA also developed Inertial Reference Unit (IRU) using TDG. This IRU is used on every JAXA satellite. It has passed over fifteen years since the development. It is difficult to purchase some kind of electronics parts nowadays. Meanwhile, satellite system requires higher accuracy, more operation flexibility and so on. So, we decided to redesign IRU. Aiming is high-reliability and high-accuracy. The study has started in FY 2001. In FY 2005 IRU redesign was completed and we prepared every document needed for Flight Model (FM) production.

1. はじめに

本研究は業務委託の形態で三菱プレジジョン株式会社との共同研究で進めている。

宇宙研究開発機構(JAXA)は衛星用の高精度角速度センサとしてチューンド・ドライ・ジャイロ(TDG)を国産開発した。ついで、このジャイロを使用した慣性基準装置(IRU)を開発し、衛星 JERS-I から実用に供した。以後この IRU は JAXA 実用衛星の殆どすべてに搭載され姿勢制御用機器として重要な役割を担っている。

IRU には今までにいくつかの不具合あるいは異常が発生した。その都度解析し、処置を施してきたが信頼性の観点から再検討を要すると判断した。IRU の開発時点は 15 年以上前であり、使用部品や使用素材の性能が現在のものに比較すれば劣っており、不具合の発生は当時の技術ではやむを得ない部分もあったと考えられる。したがって、現在入手し得る部品あるいは素材を基にして再設計することにより、より高信頼性の機器とすることが可能であると考えた。一方すでに入手が難しくなりつつある部品もあり生産性の観点からも設計の見直しを迫られていた。さらに衛星システムからは、より安定した高精度での計測要求が出ており、TDG の持つ性能を最大限に引き出せるような高精度化が必要と考えられた。これらの点から、既存の IRU の設計を見直して、高信頼性化と高精度化を図ることとした。

機械式ジャイロである TDG は、いずれ光学式ジャイロ (FOG) に置き換わると考えられているが、ずば抜けた高精度と、放射線に強い利点があり、ここしばらくは、衛星用 IRU の主役を務めるものと考えられる。

2. 研究の概要

2.1 経緯

平成 13 年度

設計検討を実施した。高信頼性化に対しては、回路構成の検討、部品置換候補の選定、機械式リレーの電子回路への置換の検討、緩衝系の見直し、衛星システムインタフェースの変更案の設定等を実施した。高精度化に対しては、最大計測角速度の拡大、ダイナミックレンジ拡大を検討し、最大計測角速度は現行の二倍、ダイナミックレンジは現行の約一桁下迄可能との見通しを得た。あわせて VF コンバータの分解能向上を検討した。VF コンバータは部分試作を行い、目標数値を達成することは出来なかったが問題点を明確にした。

平成 14 年度

再構築に際してのクリチカル要素である、緩衝系と VF コンバータの試作評価を行った。緩衝系は新しいゴム素材を評価し、温度感度、加速度感度の鈍い緩衝系の実現可能性を得た。VF コンバータは目標としている現行の 40 倍の分解能の実現可能性を得た。

平成 15 年度

IRU モデルの基本設計と詳細設計とを行い基本設計審査を実施した。同時に EM 相当の IRU 研究モデルの基本設計と製造設計を行った。また研究モデル作成に必要な部品と材料を調達した。衛星搭載が目標であるので設計には実機並みのコンフィギュレーション、信頼性および品質プログラムを適用した。

平成 16 年度

平成 15 年度までに実施した設計及び製造設計に従って IRU 研究モデルと、研究モデルの製作に必要な専用治工具を製作し、機能、性能評価を行った。機能、性能は予定したとおりの結果が得られたと同時に製作期間の短縮も達成できた。

平成 17 年度

対環境特性の評価を実施。環境条件は在来の様々の衛星システムからの要求をすべて包含するように設定。レベルは認定試験レベルとした。試験結果は予期どおり良好であった。これで当初の目的を達成できたと考えているが、一部に若干改善の余地が残った。

平成 18 年度以降

平成 18 年度に電源の改善を行う。以降は TDG IRU の維持設計的な考えのもとに部分的な改善を順次加えて行く計画である。

2.2 高信頼性化と高精度化の実現

高信頼性化と高精度化を狙うのが主眼であるが、同時にバリエーションモデルの設定、注文から引き渡しまでの期間短縮等、よりユーザ側に立った目標も設定した。以下に考え方を記す。

(1) 在来モデルとの互換性

前提として IRU の構成は在来と同じとした。TDG を 3 台実装し、TDG 毎に完全に独立し

た電子回路を持ち、衛星システム側で自由に選択運用できる形態を踏襲し、角速度の計測軸は直交三軸の各々の軸に異なる TDG の入力軸を平行に配置する形態も踏襲した。角速度検出のジンバルサーボの特性も踏襲した。つまり衛星システムユーザが在来型と全く同じ考え方で扱えるように配慮した。

(2) バリエーションモデルの提供

様々のユーザを想定したバリエーションを用意。ジャイロを温度制御した超高精度モデル、温度補正校正データ付きの高精度モデル、さらには校正データなしの中精度モデルまで、精度によるバリエーションを提供可能。部品の信頼度要求は、トップクラスから下位クラスまでユーザの指定に自在に応えられるバリエーションを用意。

(3) 電子回路のダイナミックレンジ拡大

高利得、低雑音の新型アンプに置き換え SN 比を向上する。これにより、最大計測角速度を在来の倍に引き上げるとともに、レンジ切替え無しで全角速度計測範囲をカバーする。観測衛星では頻繁に姿勢変更する。在来型 IRU で抱えていた頻繁なレンジ切替えによる運用の煩雑化やレンジ切替えリレーの寿命の問題を解決する。

(4) 高信頼性電子部品の選定

部品の選定には、最高級のグレードから下位のグレードまで入手可能であること、放射線に対する保証が得られること、入手が容易であること、生産の継続性等を前提とした。高信頼性を得ると同時に、衛星システムの信頼性設定に応じたグレードの IRU を提供すること、また製作工期の短縮が狙いである。

(5) 高分解能 VF コンバータ

角速度出力は、単位角度増分のパルス列である。このために VF コンバータを用意する。これは、ジャイロとともに IRU の精度を決定する要素である。ダイナミックレンジ拡大にあわせて在来の 40 倍の分解能のコンバータを開発した。同時に角速度出力インタフェースを RS422 に変更し高速転送に伴うパルス波形の劣化防止を図った。

(6) 機械式リレーの全廃

在来型では、電源とレンジ切替えに機械式リレーを使用していた。機械式リレーの問題は寿命と接点である。IRU では過去に異物混入で動作不良を起こした経緯もあり、全廃することとした。

(7) 耐機械環境特性の強化

打上時の機械的環境からジャイロを守るために緩衝系を用意している。素材はゴムであるので温度と加速度によって特性が大きく変化する。感度の鈍い材質が入手可能になったので、これにより耐環境特性の許容範囲を広げることとした。

(8) 工期の短縮

作りやすい、調整しやすいということは翻って高信頼性を得やすいということである。筐体の素材を、在来のマグネシウムから加工が容易なアルミニウムに変更する。調整はジャイロ周辺に集中するので、ジャイロ近傍へのアクセス性を第一前提にパッケージングを行い、また調整用治具を整備した。在来ハイブリッド IC を使ってきたが、最近の部品の小型化によりハイブリッド IC 化は必ずしも必要ではないと判断し、工期短縮を優先しハイブリッド IC 使用を止めた。

3. 成果の概要

(1) 角速度計測機能、性能

在来モデルと同等あるいはそれ以上が前提であるが、すべての面で目標をクリアした。次表に結果を示す。

Table3.1 Major Performance

Item	Unit	Conventional	Target	Result
Short term Bias stability	°/h	below 0.006(3σ)	below 0.006(3σ)	below 0.005(3σ)
Resolution	arc_s	0.05	0.05	0.05
	%	±5(Lo mode)	±5	-0.32~0.29
Noise Equivalent Angle	arc_s pp	below 2.0 (Lo mode)	below 2.0	below 0.321
Range	Polarity	°/s	above ±10	above ±10.1
	Linear	°/s	above ±2	above ±4
		°/h	above ±400	---
Scale Factor Linearity	Hi mode	%	±0.17	---
	Lo mode	ppm	500	260

スケールファクタ直線性はVFコンバータで決定される。VFコンバータの分解能を40倍に引き上げたにも関わらず在来モデルの性能を綺麗に満たしている。さらに高い直線性を狙ったが、耐放射線性を保証している素子を使う限りは結果に示す範囲に留まった。使用素子により100ppm以下を満足させることが可能である。残念なことに、100ppmの直線性を得られる素子には耐放射線性データのあるものがなかった。精度が必要な場合は、素子の耐放射線性を実測した上で、必要な放射線防護措置を施して使うこととし、精度を要求するユーザ向けのオプション設定とした。

(2) 消費電力

Table3.2 Power Consumption

Item	Unit	Conventional	Target	Result
Power Consumption	Run up	W	below 50.8	<---
	Stationary	W	below 36.0	<---

回路が高速化されたので在来型より必要とする電力は必然的に増大する。電源の高効率化で吸収して在来型の範囲に留める予定であったが、ごく僅かに目標を超えた。原因は推定がついており改善する。

(3) 外形寸法、質量

Table3.3 Dimension, Mass

Item	Unit	Conventional	Target	Result
Dimension (Feet not included)	mm	225x297.5x171	364x257x121	364x257x115.6
Mass (GSO model)	kg	10.3	10.1	10.2

外形では底面を在来より大きくしている。これは、超高精度モデルで温度制御する場合の

放熱面積を稼ぐためである。ただし、高さは大きく削減し、容積は在来と比較して8%も小さい。

質量は、在来モデルと同等となった。筐体の素材をマグネシウムからアルミニウムに替えたので実質的には軽量化されているのだが、当初は現行モデルと比較して、もう少し軽量化したいと考えていた。

(4) 耐環境特性

評価対象項目は、正弦波振動、ランダム波振動、衝撃熱真空及び電磁適合性である。設定仕様は、過去の衛星システムから提示された環境条件をすべて包含するものである。在来は、プロトフライトモデル試験(PFT)レベルを課して提供するのが普通であったが、今後は受け入れ試験(AT)レベルで提供する前提で、すべての項目で認定試験(QT)レベルを適用して評価した。結果は、全く問題なく予期どおりの成果であった。

(5) 工期

工期は、顧客への提供を早くするという点と生産効率の向上で重要なファクタである。在来の標準工期18ヶ月に対して12ヶ月と大幅な短縮が可能という結果を得た。

以上の成果から、衛星システムユーザは新設計のIRUにより次のような利点が得られる。

温度制御付きの超高精度型と温度制御なしの高精度型さらには中精度も選択できる。

計測レンジ切替不要

最大計測角速度は在来の2倍。

最小計測角速度は在来のLoレンジの最小計測角速度と同じ。

出力の角速度分解能は在来の40倍

角度増分パルス出力はケーブル長を問わず波形歪を生じないRS422インタフェース。

部品の信頼性レベルはクラス1相当、クラス2相当、その他いずれにも対応可能。

耐放射線性保証。トータルドーズで1000Gy。

新設計の緩衝系によりジャイロの耐機械環境性マージン、使用温度範囲、が向上。

全電子リレー化により、機械式リレー固有の接触の問題から逃れると共に長寿命。

高さは108mm。在来の160mmより大幅に低い。

容積は在来より8%も小さい

製造期間は約12ヶ月。在来の約18ヶ月から短縮。

次に外観を示す。

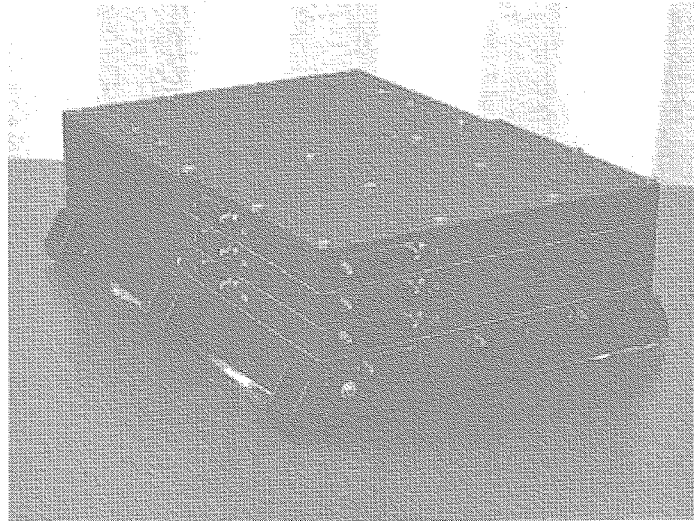


Fig.3-4 IRU Outlook

4. まとめ

平成 17 年度(FY2005)までの作業で IRU の高信頼性化の研究は一段落したと考える。当初予定した目標は、少なくとも機能性能に関する限りすべてクリアした。耐環境特性も良好であり、問題なく実用になるレベルにある。電源系は、IRU の商品価値をより高めるために若干改善を要すると考えており、平成 18 年度に消費電力の削減、突入電流の削減等の改修を行う。

本研究の遂行における最大の特徴は、衛星搭載用モデルの製作をターゲットに設定したことである。単に研究モデルを試作したのではなく、実用モデルを前提として必要な文書一式を本研究の中で製作、維持している。

製造図面、購入仕様書、作業手順書、検査規格、試験仕様書等の製造に必要な文書
信頼性設計、信頼性解析、品質保証、安全管理等の製造に付随する解析文書
開発仕様書、インタフェース管理図、カタログ

等々である。

さらに基本設計審査、詳細設計審査を実用機とまったく同じに行って設計内容の点検を受けている。

したがって、今すぐにでもフライトモデル(FM)の製造にとりかかれる状態にある。研究モデルの評価結果からみて FM の製造に気がかりな点はまったくない。

今後の衛星の姿勢制御用 IRU としてこの高信頼性モデルを採用されることを切に望む。