

技術紹介

12 FOG 高精度化要素技術開発

Development of Elemental Technology toward High-Accurate FOG

大野 有孝	Aritaka Ohno	航機事業部	第二技術部	シニアマネージャー
臼井 竜治	Ryuji Usui	航機事業部	第二技術部	主任
門田 光輝	Mituteru Kadota	航機事業部	第一設計部	

キーワード：FOG、無偏光、サニャック効果

Keywords : FOG, non-polarization, Sagnac effect

要 旨

光ファイバジャイロ (FOG) はリングレーザジャイロ (RLG) に続く第 2 世代の光学式ジャイロとして 1990 年代から実用期に入り、当社では中精度レベルの FOG 製品を航空宇宙から一般産業機器まで幅広く展開しています。一方で更なる高精度化を目指した要素技術開発を進め、光学系を伝播する光を無偏光にすることで高精度レベルの FOG を実現可能な要素技術確立しました。本稿では FOG 高精度化の光学系技術について概説します。

SUMMARY

Practical application of fiber optic gyro (FOG) started in the 1990s as the second generation optical-type gyro following the ring laser gyro (RLG). JAE is now offering a wide range of FOGs for application ranging from aerospace to industrial equipment. On the other hand, we are undertaking elemental technology development toward high-accurate FOG. Lately we developed an elemental technology to realize such FOG by making light running through optical system of FOG non-polarization. This report outlines the optical system technology for the high-accurate FOG.

1 まえがき

航空電子では 1980 年代から FOG 及び関連する光技術の開発を進め、1991 年には世界に先駆けて宇宙開発事業団（現宇宙航空研究開発機構）の TR-1A 型ロケットの姿勢制御に FOG を適用して航空宇宙分野での FOG 実運用に先鞭をつけると共に、1990 年代前半に低コストのファイバを使用した一般産業機器用の FOG を開発し、カメラスタビライザ、無人搬送車、ロボット等の分野でジャイロ応用を広げてまいりました。現在は航空宇宙用を含めて中精度レベルの FOG 製品は全てコイル部分の光ファイバに安価な通信用のシングルモードファイバを使用するために、センシングコイルを伝播する光を無偏光（光波の振動があらゆる方向に存在する状態）にする構成を採用しております。この低コストを前提にした構成で高精度レベルの FOG の実現に向けた技術開発を進め、国内外でもトップクラスの性能を実現することが出来ましたのでそのキーとなる光学系構成について概説致します。

2 FOG の概要

FOG は RLG に続く第 2 世代の光学式ジャイロで、RLG 同様に相対論から導かれるサニャック効果を基本原理としています。サニャック効果は図 1 に示す様に左右両周り光が伝播する円形光路に回転角速度が加わった場合、左右両周り光が出発点に戻る時間にずれが生じる現象で、相対論の光速度一定の原理により導かれるものです。FOG は光源、光ファイバコイル等の光学系と信号処理回路で構成され、出発点に戻る時間のずれを光の位相の変化として検出しています。信号処理の方式により位相の変化をそのまま電気信号で出力するオープンループ型と、変化した位相を元の状態に戻すようにフィードバックをかけるクローズループ型に大別されます。

クローズループ型はニオブ酸リチウム (LiNbO_3) 結晶をベースにした光集積回路を使用し、光の位相へのフィードバック機能を実現していますが、合わせて光集積回路が非常に良質な偏光フィルターとして機能するので FOG の高精度化にも有利な構成です。

今回の高精度化の光学系は光集積回路を使用したクローズループ型の FOG で実現致しました。

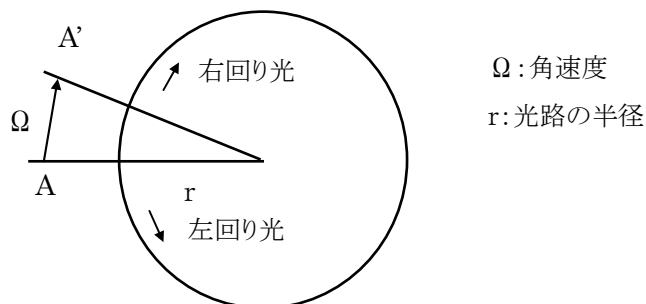


図1 サニャック効果

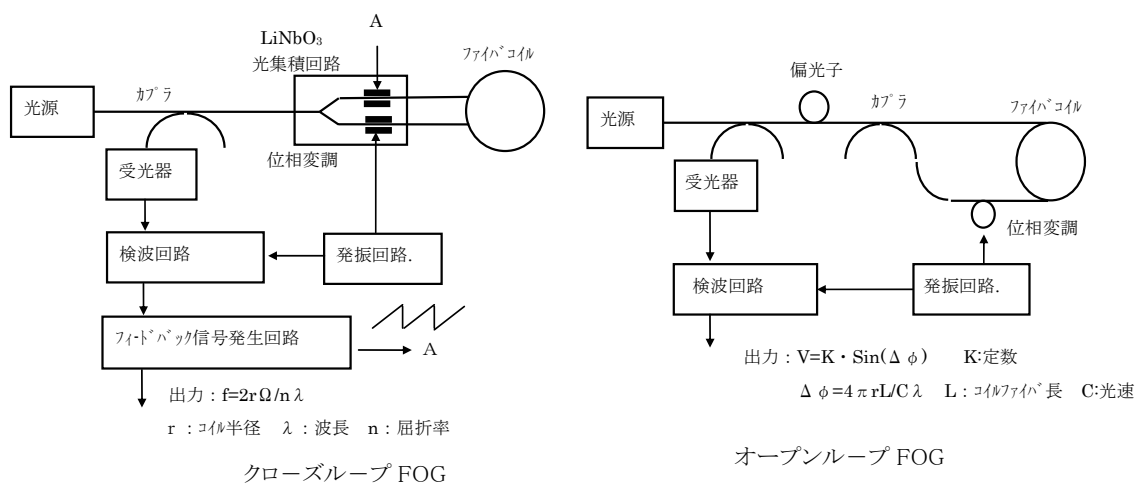


図2 クローズループ FOG とオープンループ FOG の構成

3 無偏光を使用した光学系と高精度化のポイント

FOG はコイルを伝播する光の偏光状態が変動すると出力の変動（ドリフト）が発生します。この為、センシングコイルには光通信で使用されているシングルモードファイバではなく、光ファイバセンサ用途に開発された偏波面保存光ファイバを使用するのが一般的な手法です。偏波面保存光ファイバは光の偏光面を常に一定の状態に保って伝送する性質を有するもので FOG の性能向上の面では有利なのですが非常に高価であり、特に高精度な FOG を考えた場合はセンシングコイルのファイバを非常に長尺（例えば 1000m 以上）で使用するためコスト面が課題でした。

前述の通り、当社の製品化されている中精度 FOG は低コスト化を図るためにセンシングコイルを伝播する光を無偏光にして、コイル部分の光ファイバに安価な通信用のシングルモードファイバを使用しております。前述の様に FOG では光の偏光状態の変動がドリフトになるので、偏光を解消して無偏光にすることで偏光状態の変動に起因するドリフトを抑えるのがねらいです。

この為に光集積回路とセンシングコイルの間に光の偏光状態を解消するデポライザを配置して、左右両周り光を無偏光のまま干渉させるようにしています。デポライザは光を無偏光にする機能を偏波面保存光ファイバの固有軸を 45° 捻って接続することで実現したもので、下記に無偏光の条件とその実現手法を記載します。

①電界の直交成分間が無相関

⇒偏波面保存ファイバにより直交成分間にコヒーレント長（光波の継続する長さ）以上の位相差を与える

②電界の直交成分の強度が等しい

⇒偏波面保存ファイバの固有軸を 45° 捻って接続し、直交成分の強度を等しくする

デポライザを使用した FOG の構成を図 3 に示します。

デポライザを使用した FOG で性能向上するポイントは左右両周り光が無偏光の状態を保ったままコイルを伝播して干渉させることです。デポライザは前述の通り偏波面保存光ファイバで構成し、偏波面保存光ファイバの複屈折性（直交方向で屈折率が異なる性質）により直交する方向で光路の長さが異なる性質を利用して直交成分の光波に位相差を与えて無偏光を作り出します。

下記の構成ではデポライザが 2 箇所あるので、L1-L2 のデポライザで生じた直交成分間の位相差が L3-L4 のデポライザで元に戻り、偏光成分が生じて FOG の零点のドリフトが生じてしまう可能性があります。この問題を解決する為に、デポライザを構成する偏波面保存光ファイバに次の条件を与えて常時無偏光で光を干渉させる様に致しました。

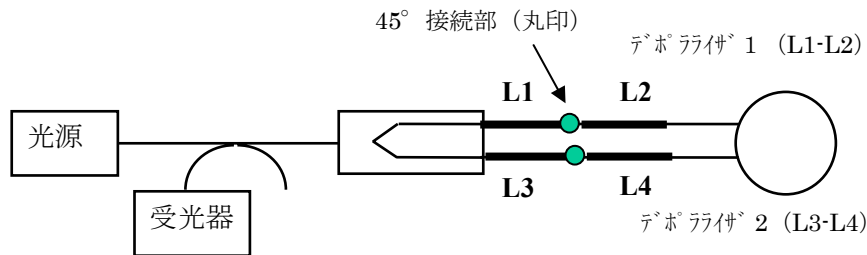


図3 無偏光を用いた FOG の構成

(a) 偏波面保存ファイバ (L1) 通過後、直交成分間にコヒーレント長以上の位相差が生じる

$$L1 \lambda / Lb > Lc \quad Lb: \text{ビート長} \quad Lc: \text{コヒーレント長}$$

(b) L1 ~ L4 の長さは下記の条件を満たす

$$Ln = L1 \times 2^n \quad n: \text{各区間の識別番号}$$

従来の中精度 FOG では上記 (a) の条件と L2, L4 の部分に 1:2 の長さの比率を持たせることで無偏光を実現しておりました。今回開発した光学系では従来の条件に加え、L1, L2 の長さも考慮して、コイルを伝播する光を無偏光にするとともに、前述した L1-L2 のデポライザで生じた直交成分間の位相差が L3-L4 のデポライザで元に戻り、偏光成分が生じてしまう現象を発生させないように長さの比率を設定致しました。この結果、左右コイル伝搬光が無偏光のまま干渉する事が保証される事になり、零点ドリフトの発生を極限まで抑えることが出来るので、従来の偏波面保存光ファイバと同等以上の高精度 FOG が実現出来る様になりました。

4 確認試験結果

3 項で述べた無偏光で光を干渉させる構成を採用して試作した FOG の外観を図 4 に示します。

図 4 の FOG はクローズループ方式の FOG で高精度を実現する為にコイルにシングルモードファイバを 3000m 使用し、コイルと光集積回路の間には 3 項で述べたデポラライザが配置されています。この FOG は宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 殿の受託研究で将来の衛星用高精度 FOG のプロトタイプとして試作したもので、その零点安定性のデータを図 5 に示します。

図 5 から零点の安定性は $0.003^{\circ}/h$ 、ジャイロのノイズ成分であるランダムウォークは $0.0005^{\circ}/\sqrt{h}$ という高精度レベルの性能を実現していることが判ります。



図 4 試作 FOG の外観

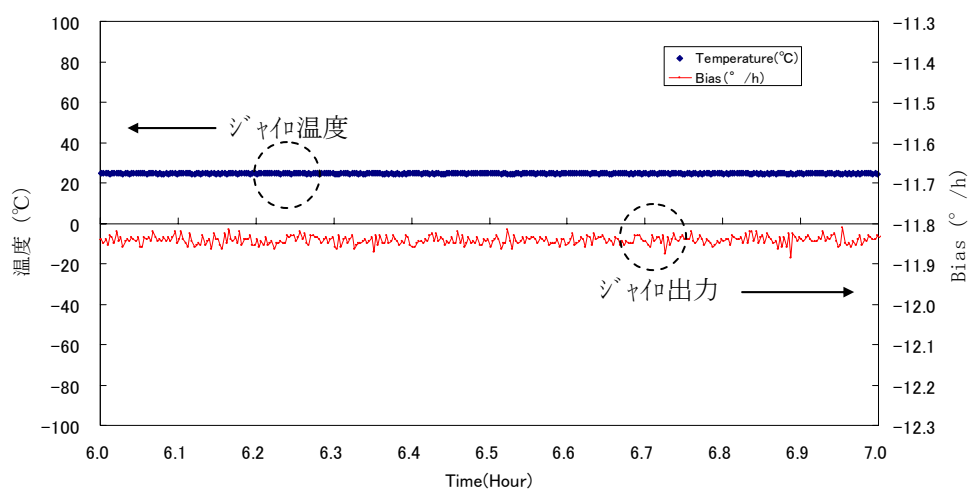


図 5 試験結果

5 むすび

航空電子が独自に開発して確立した本光学系の技術を適用した高精度 FOG は将来の衛星用の高精度姿勢制御用センサとして使用されることが期待されます。