中・高精度光ファイバジャイロの価格低減技術とその応用

大野 有孝, 岡田 健一, 鈴木 和夫, 佐久間 一浩

日本航空電子工業(株) 航機事業部 第2技術部 (〒196-0021 東京都昭島市武蔵野 3-1-1)

Low Cost Fiber-Optic Gyroscope for Industrial Application

Aritaka OHNO, Kenichi OKADA, Kazuo SUZUKI, and Kazuhiro SAKUMA

2nd Engineering Department, Aerospace Division, Japan Aviation Electronics Industry Limited

3-1-1 Musashino, Akishima, Tokyo 196-0021

(Received January 19, 1998)

Middle and high grade Fiber-Optic Gyroscopes (FOG) have been developed aiming for industrial applications such as Auto-guided-vehicle, Angular rate stabilizer etc. Those FOGs are based on the minimum reciprocal configuration with single mode fiber coil which reduces the production cost. This paper describes the low cost configuration of FOG and its applications.

Key Words: Fiber-optic gyroscope, Depolarizer, Single mode fiber

1. はじめに

干渉型光ファイバジャイロ (Interferometer Fiber-Optic Gyro: I-FOG) は1976年に米国ユタ大学がその原理を提案して以来、20年以上にわたり各国で研究開発が続けられてきた。この努力の結果、今日ではI-FOGの実用製品の生産が開始され、ロケット制御や民間航空機慣性装置等の航空宇宙分野から自動車ナビゲーション、無人走行車の方向制御等の産業機器分野においてI-FOGは実用期に入っている。

従来コマ式ジャイロに代表されるジャイロ技術及びその応用は航空宇宙用途を中心に欧米がリードする技術分野であったが1996年に開催されたI-FOG20周年記念国際会議の各国発表からI-FOG技術及びその産業機器応用分野に関しては日本が欧米と同等以上の技術を有する時代に入った感が強い¹⁾。

日本におけるI-FOG技術の例として、航空宇宙分野では1990年に宇宙開発事業団のTR-1A型ロケットの姿勢制御に当社のI-FOGが世界に先駆けて使用され、以降5回の打ち上げに全て成功している²⁾。また、自動車ナビゲーション用として量産型I-FOGが開発されI-FOGが身近なものになったと共に、無人走行車、カメラスタビライザ、無人ヘリコプタ等の一般産業機器分野でのI-FOG応用も始まっている^{3,4)}。

今後、I-FOGのさらなる発展のためには従来のジャイロが成し得なかった低価格化を実現し、広く一般産業分野に应用分野を広げることが重要である。この点から本論文

ではI-FOGの価格低減の要素技術とその応用に関して概説する。

2. I-FOG の価格低減技術

I-FOGはFig.1に構成を示すように、ループ化された長尺(性能によって異なるが一般的に数百メートル以上)の光ファイバと外部からループに光を注入するための光源(半導体光源が一般的)が必須である。光ファイバ中の偏波変動は零点ドリフトの要因となることが知られており、I-FOGで使用する光ファイバは偏波維持光ファイバの使用が一般的であった。また、偏波維持光ファイバはその偏波維持性から磁気の影響であるファラデー効果による零点ドリフトの抑制にも効果的である^{5,6)}。

一方、I-FOGは後方散乱光対策、光カー効果対策等で低コヒーレンス光源を必要とし、半導体レーザー(LD)の発光量と発光ダイオード(LED)の低コヒーレンス性を合わせ持つSuper Luminescent Diode: SLDを使用することが一般的である⁷⁾。

これら2大構成要素の内、光ファイバは長尺の使用となることから特にコスト面が重要である。本稿では偏波維持光ファイバに比べコスト的に1/10~1/100である単一モード光

Fig.1 I-FOG minimum configuration.

ファイバを用いたI-FOG構成の技術的ポイントを述べる。

2.1 無偏光の採用

Fig.1に示した構成はI-FOGのMinimum Reciprocal Configurationと呼ばれ性能保証に最低限必要な構成として知られている⁷⁾。特に重要なのはFig.1の(A)で示した部分で、コイル入射/出射光が単一モードかつ単一偏波で(A)を通過することが性能保証上のキーとなっている。Fig.1の構成を用いてもセンシンググループに単一モード光ファイバを用いた場合は光ファイバループ中の偏波変動により左右両周り光の位相差を生じ、結果として零点ドリフトの原因となる。これは(A)を通過して直線偏光としてコイルに入射された左右両周り光が、単一モード光ファイバ中にランダムに存在する複屈折により偏波状態を乱され非相反な位相差を生じるからである。偏波維持光ファイバは(A)を通過した直線偏光をそのまま維持し伝播させる性質を有するためこの非相反な位相差の発生を防ぐ事が出来る。また加えて偏波状態変動、即ち伝播モードから直交モードへのカップリングがおこってもその特徴で有る大きな複屈折性により、伝播モードと直交するモードの群遅延によりカップリング光が元の信号光に対してインコヒーレントとなり信号光に対する位相誤差を最小限にする効果を合わせ有する。

単一モード光ファイバでセンシンググループを構成し、偏波状態変動の影響を抑えるために、コイル伝播光を無偏光にすることが効果的である。無偏光は一般的に以下の2つの条件を満足する光と定義される。

- ① 直交モード間の光量が等しい。
- ② 直交モード間の光がインコヒーレントである。

この条件はFig.2に示す偏波解消器(デポライザ)により作り出すことが出来る。デポライザは2ピースの複屈折材料(複屈折光ファイバ=偏波維持光ファイバ等)で構成される。2つの部分の光ファイバの長さ L_1 , L_2 の比は1:2となっていて、その複屈折軸(固有軸)を 45° 捻じって接続することで実現出来る。この際、複屈折材料の単位長さ L_1 は直交する2つの固有軸間の伝播時間差(距離差)を光のコヒーレント時間(コヒーレント長)より長く設定する⁸⁾。

以上の原理によるFig.2のデポライザはリオ型デポライザと呼ばれ、左右どちらから入射しても又どのような偏光状態の光が入射しても無偏光を出射する。デポライザのメカニズムについて物理的な描写をすると以下の様になる。

Fig.2 Configuration of Lyot-depolarizer.

- ・固有軸を 45° 捻じって接続する事でデポライザ出射光の直交モードの光量が等しくなる。
- ・デポライザの固有軸の伝播時間差がコヒーレント時間以上となることで、直交成分間の位相差はランダムな関係となる
- ・即ち、デポライザ出射光は特定の偏光状態が光の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コヒーレント時間区切りとは相関の無い偏光状態となる。
- ・以降、光のコヒーレント時間毎にデポライザ出射光の偏光状態はランダムに変化する。

コヒーレント時間だけ継続する個々の偏光状態に対してI-FOG左右両周り光はそれぞれ位相差を持つ事となるが、統計学の中心極限定理からランダム事象の無限回の重ね合わせにより左右両周り光の位相差は零を中心とするガウス分布を持つ事となる。

SLD出射光のコヒーレント時間は概ね $10^{-13} \sim 10^{-14}$ secであるが、受光器の応答時間と2乗特性から個々のコヒーレント時間区切りの偏光状態を観測することは不可能であり、我々が観測しうる(I-FOGに影響を与える)のはコヒーレント時間に比べ十分長い時間での偏光状態の平均値である。従って左右両周り光の位相差はガウス分布の中心値“零”として観測される事となる。

2.2 0.83 μ m帯光源と1.3 μ m帯シングルモードファイバの採用

前項で述べたセンシンググループのシングルモード化に加え、本項では波長0.83 μ mの半導体光源と1.3 μ m帯シングルモードファイバの組合せについて述べる。

一般的に波長0.83 μ m帯には低価格な半導体光源が多い。これはCD/VD等のディスク応用分野用に半導体レーザーが量産されているためで、これらの多くはディスク面からの反射干渉によるノイズ除去のためマルチモード発振の低コヒーレンス光源である。また近年、0.83 μ m帯のSLDも量産が開始され低価格化が図られている⁹⁾。

一方、光ファイバは1.3 μ m帯シングルモードファイバが光通信幹線網に使用され大量に生産・販売されているため最も低価格である。この両者の組合せでI-FOG構成が実現出来れば最も低コストな構成となる。一般的に1.3 μ m帯シングルモードファイバに0.83 μ mの光を伝播させた場合はシングルモード伝播条件が保証されない為、マルチモードで伝播することが知られている。I-FOGのセンシンググループがマルチモードになった場合は左右両周り光に複数の光路が存在するため左右両周りの光の精密な位相差検出が出来なくなり誤差要因となる。ところがI-FOGのセンシンググループは適切な径で曲げ、コイル化した構造であるため、コイルの曲げにより高次伝播モードは比較的容易に漏洩し、基本モードのみがコイルを伝播することとなる。

Fig.3にコイル化した1.3 μ m シングルモードファイバに0.83 μ m光を伝播させた時の出射光のモードパターンを示す。この図から曲げにより高次モードの除去が図られ、基

Fig.3 Mode field pattern of 1.3 μ m SM fiber.

本モードが伝播していることがわかる。

3. 低価格光ファイバジャイロの構成

Fig.4に当社が開発した低価格光ファイバジャイロの構成を示す。Fig.4 (a)はニオブ酸リチウム導波路(光集積回路)を用いたクローズループI-FOG, Fig.4 (b)はオールファイバ構成によるオープンループI-FOGを示す。いずれの構成もセンシングループはシングルモードファイバを使用している。ニオブ酸リチウム導波路はプロトン交換法で製作した場合、非常に高い(-50dB以上)消光比が得られ、良質な偏光子としても機能する。また、その高い電気光学定数から電界入力により光波の位相に変調を印加すること

Fig.4 Configuration of low cost I-FOG.
(a) Close loop I-FOG, (b) Open loop I-FOG.

Fig.5 Bias drift of low cost close loop I-FOG.

Fig.6 Earth rate response of low cost open loop I-FOG.

が容易で、回転に対する左右両周光の位相差をフィードバック信号により零位相に戻す光学的クローズループの構成が実現出来る。これらの特性を利用し、当社では高精度領域のI-FOGをクローズループで構成している。Fig.4 (a)の構成の特徴は左右両光を無偏光で伝播させ再び干渉させるもので、コイル両端(光集積回路両端)にデポラライザを配した点にある。無偏光方式では偏光成分が存在した場合は誤差要因となる。このため、両デポラライザの長さを意図的に変え、左右両光が無偏光のまま干渉するようにしてある。Fig.5に本構成によるクローズループI-FOGのドリフトのデータを示す。中～高精度領域で要求される1時間当たり0.5°以下の零点ドリフトが達成されていることが判る。

一方、オープンループI-FOGは安価なオールファイバ構成により、価格低減を最重点とした。このため、前述の0.83 μ m光源と1.3 μ mシングルモードファイバの組合せを採用すると共に、シングルモードカプラを使用して構成したものである。Fig.6に本構成による微小角速度に対する応答のデータを示す。Fig.6のデータは地球自転を利用して1時間当たり11°(1秒あたり0.003°)の微小角速度を印加して取得したもので、価格低減を最重点とした構成のI-FOGで地球自転の検出が出来ることを示したものである。

4. 低価格光ファイバジャイロの応用例

前述のとおりI-FOGの価格低減技術が確立し、従来の航空宇宙分野以外にもジャイロ応用が盛んになりつつある。Fig.7, 8に応用例を示す。Fig.7は当社が開発したヘリコプター搭載用カメラスタビライザーである。I-FOGを3

Fig.7 Camera stabilizer for helicopter.

Fig.8 Auto-guided tractor by National Agriculture Research Center.

個用いて空間に対してカメラを安定化させるものである⁴⁾。Fig.8は国立農業研究センターで開発した無人走行車の例で、走行方位の制御をI-FOGで行なっている¹⁰⁾。

この様な一般産業機器におけるI-FOGの応用例を以下に要約する。

①回転角速度計測制御 移動体姿勢制御等

この分野ではアナログ角速度出力タイプのオープンループFOGが使用され、性能レベルは零点ドリフトとして $10^\circ/\text{h}$ クラスのものが多く使用される。具体的な応用例としてカメラスタビライザ、無人ヘリコプタ等の姿勢制御に使用されている。

②回転角度計測制御

この分野ではデジタル出力型のクローズループ型FOGが多く使用されている。このタイプのFOGは原理的に回転入力に対する出力の線形性に優れ、特に零点ドリフトが数度/hのものも多く使用されている。具体的な応用例は無人搬送車や土木掘削の方位計測に使用されている。

5. さらなる高精度化の可能性

前述の無偏光構成は偏光状態が完全に解消されれば原理的に航空機の慣性航法装置に使用する超高精度領域の零点安定性能を得ることが出来る。実際に米国ハネウエ

ル社ではFig.4 (a)の構成により零点ドリフトが1時間あたり 0.01° 以下という航空機の慣性航法装置に使用出来るレベルの性能を実現させている¹¹⁾。

また、I-FOGは磁気に対して反応し誤差要因となることが知られているが、Fig.4 (a)の構成は磁気特性面でも有利であることが理論的に検証されている¹²⁾。これらの状況から無偏光構成によるI-FOGが価格低減のみならず、性能向上面でも有効な手法であることが検証されつつあり、近い将来、航空機の慣性航法レベルの無偏光I-FOGが実用レベルになると思われる。

6. 結 び

以上、低価格ジャイロを目標にセンシングコイルをシングルモードファイバで構成する無偏光I-FOGの技術的ポイントとその応用について概説した。本稿で示したように、既に無偏光I-FOGは地球自転を検出できる中～高精度レベルの実用のジャイロとしてさまざまなアプリケーションに適用されている。又、航空機の慣性航法レベルの超高精度無偏光I-FOGの実用モデルの可能性も示唆されており、今後の研究開発の進展が期待される。

参考文献

- 1) *Fiber Optic Gyros: 20th Anniversary Conference*, Aug. 1996, SPIE 2837.
- 2) K. Sakuma: *Fiber Optic Gyros: 15th Anniversary Conference*, Sep. 1991, SPIE 1585, p.8.
- 3) H. Kazioka, T. Kumagai, H. Nakai, T. Dohsho, H. Soekawa, and T. Yuhara: *Fiber Optic Gyros: 20th Anniversary Conference*, Aug. 1996, SPIE 2837, p.18.
- 4) K. Sakuma: *Fiber Optic Gyros: 20th Anniversary Conference*, Aug. 1996, SPIE 2837, p.72.
- 5) 保立和夫: 計測と制御 29 (1990) 68.
- 6) K. Hotate and K. Tabe: IEEE LT-5 (1987) 997.
- 7) H. C. Lefevre: *Fiber Optic Gyros: 20th Anniversary Conference*, Aug. 1996, SPIE 2837, p.2.
- 8) K. Bohm and K. Petermann: IEEE LT-1 (1983) 71.
- 9) T. Oguro, T. Minatoguchi, S. Otake, H. Asano, K. Misa, and Y. Nakano: *Proc. OFS*, Oct. 1997, p.221.
- 10) 井上 慶一, 大塚 寛治, 杉本 光穂, 村上 則幸: 農業機械学会 関東支部講演会 Aug. 1995.
- 11) G. A. Sanders: *Proc. OFS*, Oct. 1997, p.116.
- 12) T. Saida and K. Hotate: *Proc. OFS*, Oct. 1997, p.134.