レーザーオリジナル

小型光ファイバジャイロ

西浦 洋三*・西川 満**
大岡 明裕*・高阪 悠二*

(1987年 8 月20日 受理)

Compact Fiber-Optic-Gyroscope

Yozo NISHIURA*, Mitsuru NISHIKAWA**
Akihiro OOKA* and Yuji KOHSAKA*

(Received August 20, 1987)

We have studied the way to miniaturize optics, fiber-coil and electronics for a compact fiber-optic-gyroscope (FOG). The optics were miniaturized by using small bulk optic parts, and hybrid integrated circuits were developed for the electronics of the FOG. To compensate for the reduction of the Sagnac phase shift due to the small diameter of the fiber coil, a small diametered polarization maintaining single-mode fiber (PMSF) was developed. Long lengths of the fiber could be wound around a small sized coiling space. By using these components, a compact FOG with outer diameter of 60 mm and height of 50 mm was developed. Sensitivity of 0.8 deg/hr and drift of 3.6 deg/hr/hr were observed.

Key Words: Compact fiber optic gyroscope.

1. はじめに

光ファイバジャイロは従来の機械式ジャイロ等と比べて、可動部分が無いため寿命が長い、起動時間が短い、等の特長に加えて、高性能のジャイロが比較的低価格でできるということも期待され、活発に研究が行われている。

光ファイバジャイロはFig.1のように、Sagnac効果により生じる時計回り(CW)光と反時計回り(CCW)光の間の位相差を、干渉によ

Fig.1 Sagnac effect¹⁾.

*住友電気工業株式会社研究開発本部情報電子研究所 (〒554 大阪市此花区島屋1丁目1番3号)

**住友電気工業株式会社研究開発本部開発企画部

* Information and Electronics Technology Laboratories, R&D Group of Sumitomo Electric Industries LTD., (1-1-3 Shimaya Konohana-ku, Osaka 554)

** Development Planning Department, R&D Group.

って検出する回転角速度センサである。コイル状に巻かれたファイバ中を伝搬する両回り光間の Sagnac 位相差 ϕ_r は、ファイバコイルの直径を a 、ファイバ長を L とすると回転角速度 Ω に対して、

$$\phi_r = \frac{4\pi La}{c\lambda} \Omega \quad (1)$$

で表される¹⁾。ここに c は真空中の光速、 λ は光の波長である。位相差 ϕ_r をもった 2 つの光の干渉強度は $\cos \phi_r$ に比例し、光ファイバジャイロはこの強度変化を検出して角速度を測定することを基本原理としている。

しかし $\cos \phi_r$ のままでは ϕ_r の正負に対して同じ出力であるため回転の方向が不明である、 ϕ_r の小さいところでは ϕ_r に対する $\cos \phi_r$ の変化率が小さいため、低速回転域での感度が低い、等の問題があるため、これを $\sin \phi_r$ や直線的な出力に変換する方法として、位相変調方式、周波数変化法等の各種の信号検出方式が提案されている。

これらの方式検討を含め、光ファイバジャイロの主な性能制限要因及びその対策については 1980 年前後を中心に研究され、最小検出角速度、ドリフト等の基本的な性能の面では、ほぼ理論限界に近い値が報告されている^{2,3)}。しかし、これらは大きなファイバコイルを用いていたり、光部品を微動台に載せたままの仮固定である等、実験室レベルでの結果である。これらの結果をもとに、現在はメーカーを中心として、光ファイバジャイロの実用化に向けて装置化、小型化の研究が行われている。その 1 例として、我々

が行っている小型光ファイバジャイロの開発状況を報告する。

2. 光ファイバジャイロの小型化の方策及び試作

光ファイバジャイロはファイバコイルの他に、光源、受光素子、分岐等を含む光学系部、及び光源の駆動、受光素子出力の増幅、信号処理等を行う回路部の 3 つの部分から構成される。したがって光ファイバジャイロを小型化するためには、これらのすべてについて小型化を行う必要がある。以下にそれぞれの小型化の方策及びそれに基づく試作例について述べる。

2.1 光学系の小型化

前述の各種信号検出方式の中で、位相変調方式は Fig. 2 のようにファイバコイルの一端付近に設けた位相変調器を用いて、右回り光と左回り光の間に等価的に $\pi/2$ の位相バイアスを与え、 $\sin \phi_r$ の形で出力を得る方式である。位相変調方式はコイル中を伝搬する右回り光と左回り光の経験が同じであり、最も低ドリフトが期待される方式である¹⁾。また周波数変化法のように音響光学変調器等の大型の光部品を必要としないため、小型化にも適している。一方、位相変調方式は光量の変化を直接の計測対象とするオープンループであるため、零位法が可能な周波数変化法等に比べてスケールファクタの安定性が悪い、Sagnac 位相差 ϕ_r に対して $\sin \phi_r$ の形で出力されるためダイナミックレンジが狭い、という問題があるが、これらについても種々の補

Fig. 2 Structure of the phase modulated FOG¹⁾.

(a) All-fiber implementation (courtesy of Stanford University)

(b) Integrated optics implementation

(c) Bulk optics implementation.

Fig.3 Three types of implementation of FOG⁶⁾.

正方法が研究されている^{4,5)}。

また光ファイバジャイロの光学系を構成する方法はFig.3のようにオールファイバ型、光IC型、バルク型、あるいはこれらを組み合わせた方法が考えられる⁶⁾。バルク型に比べると、オールファイバ型や、光IC型の方が、高性能が期待

されるときにも、小型化に適すると考えられており、光ファイバジャイロ用の導波型コンポーネントの研究も盛んである^{7,8)}。しかしまだ、これらのコンポーネントは特性、寸法面で十分なものとは少なく、現状では、バルク型で構成する方法がより小型化、高性能化が期待できると考え

られる。

以上の観点から小型光ファイバジャイロの光学系として位相変調方式をバルク型光学素子で構成することとした。光学系を小型化するためには、使用する光部品として小型のものをを用いるとともに、これらを高密度に実装する必要がある。また光源の干渉性、偏光子の消光比等、個々の光部品の特性については、光ファイバジャイロの性能に与える影響を考慮して選択する必要があるが、ここでは小型化の要求と相容れないものについては、小型化を優先して部品の選択を行った。

小型光ファイバジャイロの光学系は、分岐素子として無偏光のビームスプリッタを、偏光子には偏光ビームスプリッタを、ファイバへの光の結合には直径1～2mmのレンズをそれぞれ使用して構成した。ビームスプリッタの寸法は3～5mm角である。また、光部品端面での反射光やファイバ中のレーリ―散乱光が信号光と干渉してノイズとなるのを防ぐため、光源にはスーパーミネッセントダイオード (General Optonics社製GOLS-3000, 中心波長 817 nm, $\Delta\lambda=17\text{nm}$) を使用した。受光素子にはSiフォトダイオードを用いた。これらの部品を用いて、位相変調方式光ファイバジャイロの光学系をFig. 4に示すように、光源部と分岐部に分けて

それぞれ28mm×18.5mm及び22mm×14mmの金属基板上に構成した。基板の厚みを含めた光学系部の高さは15mmである。光部品は光源側から順次、微動台に取り付けて光軸調整を行った後、それぞれ基板に接着固定した。使用するファイバがシングルモード (あるいは定偏波) 光ファイバであることから、低損失の光学系を構成するために光部品、特にファイバの位置決め固定は1μmオーダーの精度で行っている。

2.2 ファイバコイルの小型化

ファイバ中での偏波結合や、ファラデー効果による非相反性を低減するためにはコイル用のファイバとして定偏波光ファイバを使用することが効果的である⁹⁾。さらに小型の光ファイバジャイロに使用する観点からは、小径のコイルに巻いたときの損失の増加、クロストークの劣化が小さい定偏波光ファイバが必要である。

また(1)式のように光ファイバジャイロの性能はファイバコイルの径とファイバ長の積に比例するため、ファイバコイルの小型化は最も大きな課題である。コイル径 a を小さくしつつ同じ大きさのSagnac位相差を得ようとすれば、ファイバ長 L を長くする必要がある。ところがコイルの外径が小さくなると巻きとり可能なファイバ長は短くなる。コイルの大きさ (最内径 d_i ,

Fig. 4 Optics with small parts.

Fig. 5 Structure of small diametered PMSF

Table I Parameters of small diametered PMSF

被 覆 径	125μm
ガ ラ ス 径	75μm
コ ア 径	4.1μm

Table II Characteristic of the small diametered PMSF

カットオフ波長 (λ_c)		0.67μm
ビート長 (LB)		1.16mm
複屈折率 (B)		6.7×10^{-4}
クロストーク (C. T.) ($\lambda = 0.78\mu\text{m}$)	ボビン径 $\phi 150\text{mm}$	-13.9dB/600m
	ボビン径 $\phi 50\text{mm}$	-15.0dB/600m
ロス (α) ($\lambda = 0.78\mu\text{m}$)	ボビン径 $\phi 150\text{mm}$	3.0dB/km
	ボビン径 $\phi 50\text{mm}$	5.0dB/km

最外径 d_2 , 高さ W) が決まれば, 整列巻きを行ったときの巻き取り可能なファイバ長 L は, 概ね(2)式で表されるように, ファイバの外径 d_f のみに依存する。

$$L = \frac{\pi W (d_2^2 - d_1^2)}{4 d_f^2} \quad (2)$$

したがって, 小型光ファイバジャイロ用の定偏波光ファイバとしては細径であることが必要である。例えば $d_1 = 48\text{mm}$, $d_2 = 54\text{mm}$, $W = 28\text{mm}$ とすると, 外径が $400\mu\text{m}$ の通常のファイバ素線では 84m 程度しか巻き取れないのに対し, 外径が $125\mu\text{m}$ の細径のファイバであれば約10倍の 860m まで長く巻くことができる。

一般には細径化, 小径巻きともに定偏波光ファイバの損失の増加, 及びクロストークの劣化につながるものであるが, この2つの特性はファイバの比屈折率差 Δn を大きくすることにより改善されることが明らかになってきている¹⁰⁾。これに基づき, 小型光ファイバジャイロ用の細径定偏波光ファイバとして, Δn を通常のファイバに比べて大きくしたファイバを試作した。試作したファイバの構造及び設計パラメータを Fig. 5 及び Table I に示す。75μm のガラスに UV 被覆を施し, 被覆を含めた最外径は $125\mu\text{m}$ である。また応力付与部の構造は数値解析の結果, 最も大きな複屈折率が得られるように設計した。

ファイバの特性を Table II に示す。複屈折率が大きく, ビート長が短い定偏波光ファイバが得られている。ただしクロストークについては直径 150mm のボビンに巻いた場合でも, 通常の定偏波光ファイバに比べると比較的大きな値である。これはファイバが細径であるために, 巻き取り時にねじれ等が起こり易くなり, 不均一な外部応力が加わったためであると考えられる。

今回試作した細径定偏波光ファイバ 600m を, 最内径 48mm , 最外径 54mm , 高さ 28mm に整列巻きして小型光ファイバジャイロ用のファイバコイルを構成した。コイル化したときの特性は Table II に示すように, クロストーク $-15\text{dB}/600\text{m}$, 損失 $5\text{dB}/\text{km}$ であり, クロストーク, 損失と

Fig.6 Electronics for the phase modulated FOG.

もに、直径150mmに巻いた場合に比べて大きな劣化はみられていない。またファイバコイルの一端付近を、直径15mm、高さ5mm、共振周波数70kHzの圧電振動子に巻き付け、位相変調器としている。

2.3 電子回路の小型化

位相変調方式光ファイバジャイロの受光素子からの出力 $I(t)$ は(3)式のように表わされる。

$$I(t) = P_0 J_1(k) \sin \omega_m t \cdot \sin \phi_r + (\omega_m \text{ 以外の周波数成分}) \quad (3)$$

ここに P_0 は光量等により決まる定数、 J_1 は1次の第1種ベッセル関数、 k は位相変調に関するパラメータ、また ω_m は位相変調の角周波数である。Sagnac位相差 ϕ_r は $\sin \phi_r$ の形で、位相変調周波数成分の振幅として受光素子の出力に現れる。したがって位相変調方式光ファイバジャイロの動作には受光素子の出力から信号を検出するための同期検波回路が必要である。同期検波回路は受光素子の出力中に含まれる位相変調周波数成分の掘幅を、極性を含めて検出し、 $\sin \phi_r$ に比例した出力を得るためのものである。実験室ではこの信号処理はロックインアンプ等の測定器で行われるが、装置化のためにはこれを専用回路化する必要がある。同期検波回路を含めた、位相変調方式光ファイバジャイロの駆動回路をFig.6に示す。またこれらの回路を小型化するにはH-IC (ハイブリッドIC) 化が簡

便でかつ効果的である。

Fig.6の回路の主要部をOPアンプや、アナログ掛け算器等を用いて3枚のH-ICで構成し、相互の接続及びその他の部品の実装を直径45mmのプリント基板上で行った。位相変調器の励振は水晶発振器で行い、出力ゲイン、零点等の調整用ボリュームとともに、同じプリント基板のH-ICと反対側の面に実装した。回路部会体の高さは30mmとし、ファイバコイルの内側に収納可能な寸法としている。外部から回路に供給する電源は直流±8Vであり、回路からは回転角速度に応じたアナログ電圧が出力される。

Fig.7に試作した小型光ファイバジャイロの内部構造を示す。左がケース、中央が光学系(上)とファイバコイル(下)、右がH-IC化された回路部である。またFig.8にこれらをケースに納めたときの断面図を示す。位相変調器は光学系とともにファイバコイルの上に載せ、回

Fig.7 Photo of the compact FOG.

Fig. 8 Arrangement of the components in the compact FOG.

Fig. 9 Drift of the compact FOG.

路はファイバコイル内側の空間に納めている。全体を収納したケースの寸法は外径60mm、高さ50mmである。

3. 小型光ファイバジャイロの性能評価

試作した光ファイバジャイロの性能評価とし

て、ノイズ（最小検出角速度）及びドリフトの測定を行った。角速度に換算したノイズは時定数1秒のとき、 0.8deg/hr r.m.s. であった。

Fig. 9は長時間静止している状態での零点変動を時定数10秒で測定した結果である。スケールとして、測定の最初に時計回り方向と反時計回り方向に 0.02deg/sec の角速度でジャイロを回転させたときの出力を記録しており、これをもとに零点変動を角速度に換算すると、 3.6deg/hr/hr 相当のドリフトとなる。ドリフトの原因は種々考えられるが、その1つに、ジャイロの静止時の出力であるオフセットが、光学系の光量変動や回路のゲイン変動等によって変化するものがある。今回試作したサンプルではオフセットが約 50deg/hr 観測されており、さらにドリフトを低減するためにはオフセットを小さくする対策が必要である。オフセットの原因については現在検討中であるが、今回の試作では小型化を優先した設計を行ったため、位相変調周波数がファイバ長に対して最適化されていない³⁾、偏光子等の光部品の性能が不足している¹⁾、等光学系構成上の問題が残されており、これらがオフセットの原因となっているものと考えられる。

4. 結び

光ファイバジャイロの小型化の方策について検討し、光学系の小型化、専用回路のH-IC化、及び定偏波光ファイバの細径化等の開発を行った。またこれらを用いて信号処理回路を内蔵した外径60mm、高さ50mmの小型光ファイバジャイロを試作した。試作した小型光ファイバジャイロの性能は、最小検出角速度 0.8deg/hr 、ドリフト 3.6deg/hr/hr であった。今後はオフセット原因の検討を進め、さらに性能向上を図る予定である。

謝辞

本研究は通商産業省工業技術院の大型プロジェクト「極限作業ロボット」の一環として行われたものである。

参 考 文 献

- 1) 保立和夫, 東口 實, 丹羽 登: 計測と制御
20 (1981) 937.
- 2) H.C. Lefevre, R.A. Bergh and H.J. Shaw: Opt.
Lett. 7 (1982) 454.
- 3) R.A. Bergh, H.C. Lefevre and H.J. Shaw: Opt.
Lett. 6 (1981) 502.
- 4) Y. Nishiura, K. Ono and S. Hiraoka: OFS '85
(1985) PDS6.
- 5) Y. Nishiura, M. Nishikawa, K. Ono and Y. Kohsaka: OFS '86 (1986) P 9.
- 6) S. Ezekiel: in *Fiber-Optic Rotation Sensors and Related Technologies* ed. S. Ezekiel and H.J. Ardity (Springer Series in Optical Sciences vol. 32, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1982) p.2.
- 7) L.M. Johnson: OFS '85 (1985) WBB4.
- 8) 詫摩勇悦, 山田公道, 熊谷達也, 椎谷則文, 梶岡博: 第5回光ファイバセンサワークショップ講演論文集, (1987年6月) p. 79.
- 9) K. Hotate and K. Tabe: OFS '86 (1986) 8.8
- 10) 菅沼 寛, 笹岡英資, 田中 茂: 電子情報通信学会創立70周年記念総合全国大会 (1987年3月) 1077.
- 11) E.C. Kintner: Opt. Lett. 6 (1981) p.154.