

光ファイバジャイロの特性

木 谷 博*

Examination of Optical Fiber Gyroscope

Hiroshi Kitani

Gyroscope is one of the interesting devices in application of optical fiber. Rotation of an optical fiber loop causes phase difference between the light propagation in the fiber clock-wise and counter clock-wise. Several types of detection of the phase difference are in use. Phase modulation method is a simple method.

Despite the name, single-mode fiber transmits two orthogonal eigenmodes or polarizations. Mode coupling due to circularity imperfection and longitudinal uniformity of the fiber causes propagation distortion. The cost of gyroscope using the single-mode fiber is lower than that using phase maintaining fiber. However, the accuracy of the latter type is lower due to the distortion.

The gyroscope using the single-mode fiber with the phase modulation method is tested. The system design, its configuration and test the results are reported.

1. 序論

光ファイバジャイロは1976年その原理が提案されて以来、多くの研究がなされ、実用化されている。光ファイバを扱う者にとっては、原理に基づき光部品と電子回路などからなる物を実際に作り上げ、どの程度の特性が得られるか興味があるところである。今回長さ200mのシングルモード光ファイバを用いて光ファイバジャイロを組立て、その性能を調査した。なお、回転によって発生する光の位相差を検出する方法として位相変調法を用いた。

2. 光ファイバジャイロの原理

2.1 Sagnac効果

図1に示すように、ループ状に巻かれた光ファイバの端に分配器をとりつけ、レーザからの光を分配器を通して光ループに入れ、光ループを通過して戻って来た光はフォトダイオードに達する光回路を考える。光ファイバループを回転するとレーザからフォトダイオードに達する光は、光ループを右回りに伝播する光と左回りに伝播する光との間に、回転に比例した位相差が生じる。

この位相差は次式⁽¹⁾で与えられる。これがSagnac効果である。

* 電気工学科

$$\Phi = \frac{4\pi a l}{c\lambda} \Omega$$

c : 光速度

λ : 光の波長

a : 光ファイバループの半径

l : 光ファイバループの長さ

Ω : 光ファイバループの角速度

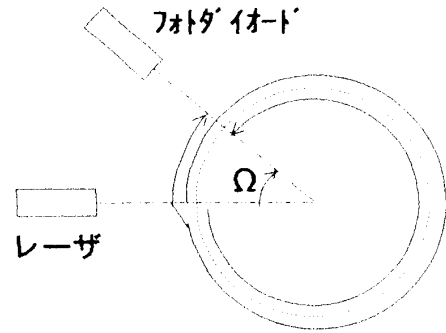


図1 S a g n a c 効果

なお、 Φ は右回りの光と左回りの光の位相差である。

2. 2 光の位相差の検出方法

光の位相差を検出する方法の1つは位相変調法である。その方法の回路図を図2に示す。光ファイバループの端に光の位相変調器を置き、光を角周波数 ω_m の電気信号で変調すると時刻 t における時計回りの光と反時計回りの光には $k \sin \omega_m t - k \sin \omega_m (t - \tau)$ の位相差が生じる。この位相差をフォトダイオードで検出する（ここで、 k は比例定数、 τ は光が光ファイバループを伝播する時間）。この光ファイバループを回転すると上記の光の位相差に、さらにS a g n a c 効果による位相ずれ Φ が加わる。

図2に示す光回路のフォトダイオードには時計回り光と反時計回り光が到達する。フォトダイオードの受光電流は時計回り光の電界と反時計回り光の電界との和の自乗で与えられる。

計算の結果、受光電流は次式のように直流成分、ならびに角周波数 ω_m とその高調波成分の交流から成る。

$$I \propto I_0 + J_0(h) \cos \Phi + 2 \cos \Phi \sum (-1)^k J_{2k}(h) \cos \{2k(\omega_m t + \phi)\} - 2 \sin \Phi \sum (-1)^{k-1} J_{2k-1}(h) \cos \{(2k-1)(\omega_m t + \phi)\}$$

ここで $h = -2k \sin(\omega_m \tau)$ 、 $\phi = -\omega_m \tau / 2$ 、 k は正整数。

上式の低次の成分のみを記述すると下記が得られる。

$$I \propto I_0 + J_0(h) \cos \Phi - 2J_1(h) \sin \Phi \cos \omega_m t - 2J_2(h) \cos \Phi \cos 2\omega_m t + 2J_2(h) \sin \Phi \cos 3\omega_m t + 2J_4(h) \cos \Phi \cos 4\omega_m t$$

S a g n a c 効果 Φ は $\cos \Phi$ と $\sin \Phi$ で出ているが、微小量の Φ に対しては $\cos \Phi$ より $\sin \Phi$ の方が敏感に把握できる。したがって角周波数 ω_m の基本周波数成分のみを取り出し、その \sin^{-1} を求めれば良い。

上記の式における h は光の位相変調度である。位相変調はピエゾ素子に光ファイバを巻き、電圧を印加するとピエゾ素子の直径すなわち光ファイバの長さが変化するのを利用している。しかしながらその位相変調度は時間的に変化する欠点⁽²⁾がある。この欠点は2次の高調波成分 Y_2 、4次の高調波成分 Y_4 をモニターし、 Y_2 と Y_4 から変調 h を算出する方法で取り除かれる。

すなわち

$$Y_1 = -J_1(h) \sin \Phi$$

$$Y_2 = -J_2(h) \cos \Phi$$

$$Y_3 = J_4(h) \cos \Phi$$

とおくと S a g n a c 効果 Φ は

$$\Phi = \tan^{-1} \left[\frac{Y_1 J_2(h)}{Y_2 J_1(h)} \right]$$

で求められ、変動を伴う $J_1(h)$ はベッセル関数に関する漸化式⁽³⁾を使って、 $J_2(h)$ 、 $J_4(h)$ 、すなわち Y_2 成分と Y_4 成分から求められる。

$$J_1 = J_2 \left(\frac{4}{h} - \frac{h}{6} + \frac{h Y_4}{6 Y_2} \right)$$

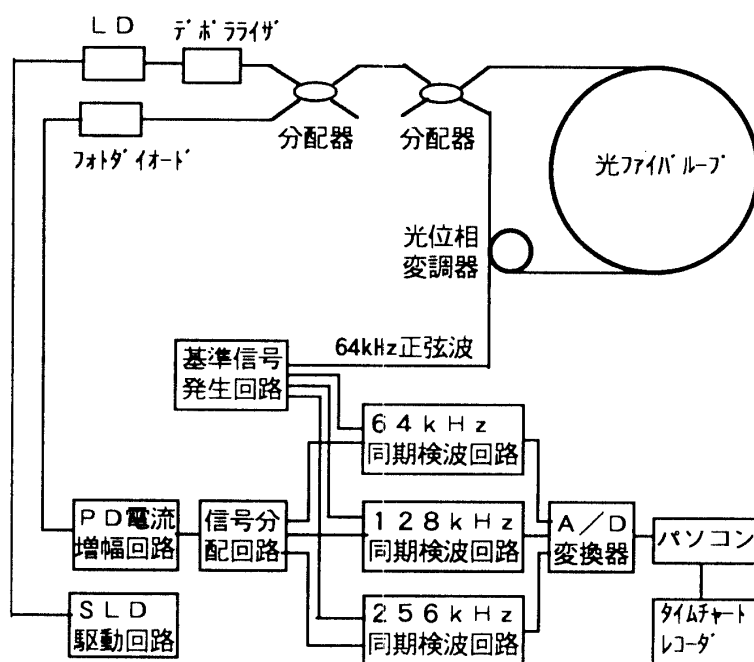


図2 光ファイバジャイロ全体構成

なお変調度 h も $J_2(h)/J_4(h)$ すなわち Y_4 と Y_2 の比から求められる。

2. 3 光回路

安定な伝送が必要なことから光ファイバはシングルモードファイバを使用し、 $0.84 \mu\text{m}$ で実験を行った。光ファイバループの直径は 6 cm 、長さ 200 m である。レーザである SLD (Super Luminescent Diode) の出力にはデポラライザを挿入して無偏光とし、シングルモードファイバの偏波変動の影響を小さくした⁽⁴⁾。2個の分配器はSLDからダイオードに到る2つの光の行路長を等しくするためである。

2. 4 回転角検出

角速度を Ω とすると光ファイバループの回転角 θ はこれを時間積分することによって得られる。

実際の電子回路出力では角速度 $= 0$ でも、電気出力 Ω_k が出てくる。これを時間積分すると積分時間の増加と共に角度が増加する。真の角速度は回転時に現れる電気信号 Ω から片寄りの出力 Ω_k を引いた値であるので、下記のように引き算した値を時間積分する。

$$\theta = \int (\Omega - \Omega_k) dt$$

積分はパソコンによる数値積分とし、電気信号をデジタル値に変える A/D 変換は 16 ビットとした ($1 \text{ ビット} = 0.0004 \text{ V}$)。

2. 5 電子回路

図2には実験のため製作した光ファイバジャイロの電子回路も示している。位相変調器の変調周波数は64kHzとした。電子回路はSLD駆動部、64kHzの正弦波・方形波、128kHzおよび256kHzの方形波を出す基準信号発生回路、PD (Photo Diode) 受光電流増幅回路、信号分配回路、64kHz同期検波回路、128kHz同期検波回路、256kHz同期検波回路よりなる。基準信号発生回路は1つの水晶発振器信号を分周して出力している。同期検波のみでは周波数の充分な選択性が得られないので、各周波数の同期検波回路の入力部には $Q=10$ のバンドパスフィルタ (アクティブフィルタ) を設置した。

2. 6 回転装置

ジャイロは一定の速度で回転しながらその特性を調べる必要がある。低周波発振器の出力をTTLレベルに変え、この信号の1パルス毎に0.0072度ずつ回転するパルスモーターを用いて任意の速度が得られるようにした。

3. 特性

3. 1 位相変調度と相対出力

光位相変調器の印加電圧と同期検波回路の出力との関係を測定した。その結果を図3に示す。曲線はベッセル関数の理論値でこれに実測値を合わせた。傾向的にはほぼ一致している。しかしながら、位相変調度が大きくなるとずれている。これは、光位相変調器の変調電圧の電気位相と同期検波の位相との間にずれが生じるためである。

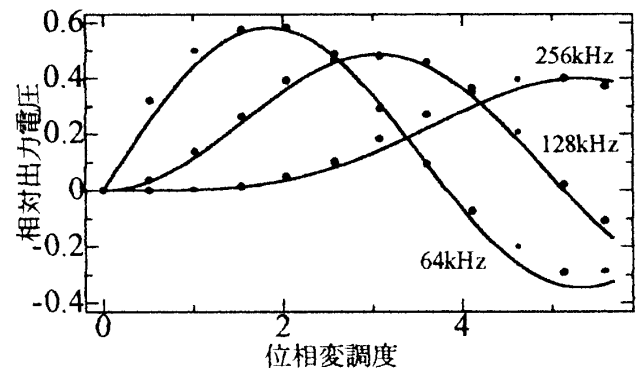


図3 位相変調度と相対出力電圧との関係

3. 2 角速度と相対出力

図4は角速度と64kHz同期検波回路の相対直流出力電圧との関係を示す。角速度は低周波発振器のダイヤル目盛を基準としているためやや正確さを欠くがグラフはほぼ直線である。なお、最大の角速度でのSagnac効果は0.084 rad.なので、 $\sin x \approx x$ の範囲である。

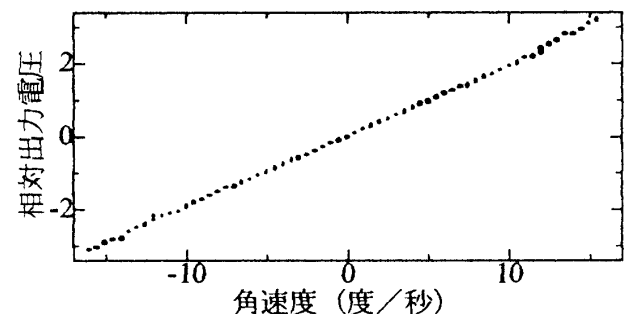


図4 角速度と相対出力との関係

3. 3 90度回転時の応答特性

図5は横軸に経過時間をとって、縦軸に1.5度/秒の回転を60秒実施したときの64kHz同期検波出力

(遮断周波数2Hzの2次ローパスフィルタ使用)、およびこれを時間積分した回転角度を表したものである。

64kHz同期検波出力がマイナス値になっているときは反時計方向、プラス値は時計方向の回転を表す。

1.5度/秒の回転を60秒実施すると90度の回転は表示されるが7分後に0度に戻ると約10度のずれが生じた。

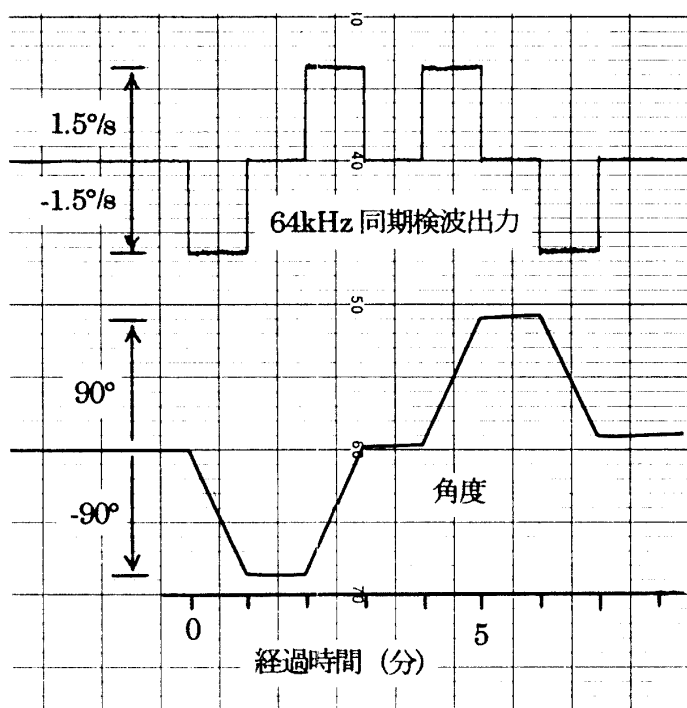


図5 90度回転時の応答特性

3. 4 低速度回転の検出

図6に0.1度/秒で反時計方向と時計方向に回転したときの64kHz同期検波回路の出力を示す。ローパスフィルタの遮断周波数をさらに低くしてみないと分からないが、このデータから判断する限り、地球の回転(0.004度/秒)の検出は困難なようである。

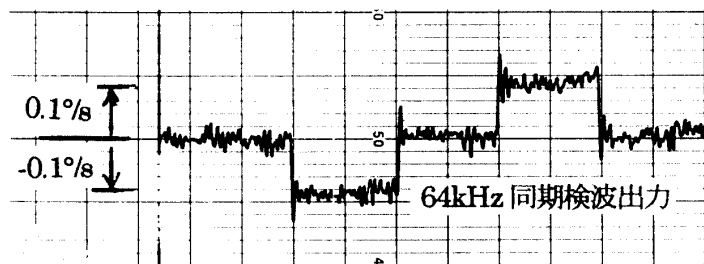


図6 低速度回転の検出

3. 5 静止状態の特性

図7に静止状態における64kHz同期検波出力、ならびにこれを積分した回転角度を示す。

64kHz同期検波出力は短時間では0.03～0.04度/秒程度の変動であるが、1時間では0.3度/秒の変動が生じている。1時間以内の積分では-70度から、+60度の角度表示となった。

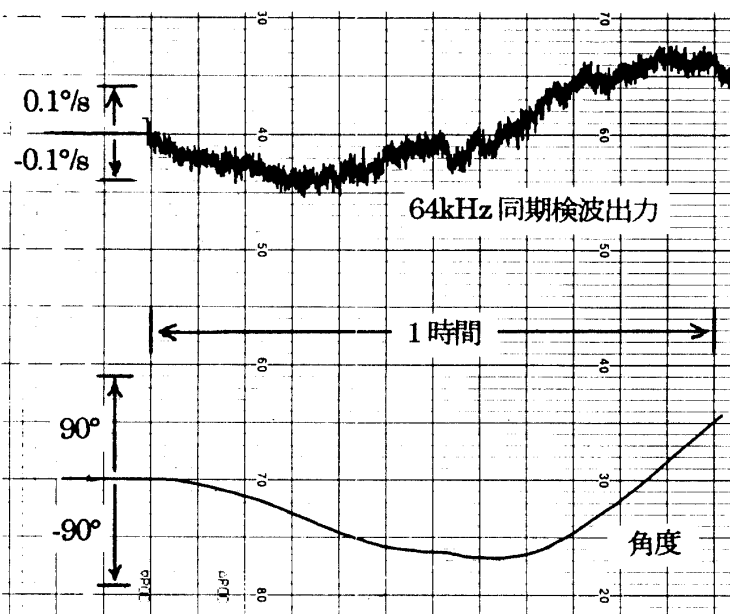


図7 静止状態での特性

3. 6 128kHz、256kHz出力の利用

前節までは64kHz同期検波回路の出力のみを使ったデータである。

計画では基本波(64kHz)、2次、4次の3つのデータを使う予定をしていたが、2次、4次の同期検波出力が回転方向により相違が見られた。3つのデータを使う実験はこれを解消してから実施することにし、ここに報告することはできなくなった。

4. 結言

シングルモードファイバを使った光ファイバジャイロを製作し、その特性を調査した。

その結果一通りのデータが得られ、64kHz出力の安定度は0.03~0.04度/秒程度であることが分かった。ジャイロは最終的には角度表示が大切である。今回実験した例では稼働1時間以内では数10度のずれが生じている。したがって航空機など高精度が必要なものには不可能で、回転角の補正が短時間に行えるようなものへの適用、例えば自動車ナビゲーションシステムなど⁽⁵⁾、⁽⁶⁾などが考えられる。

さらに精度の良いものにするためには、電子回路の温度補正やシングルモードファイバの偏波を規制する偏光子の採用が必要であろう。また、極めて高価であるため採用を見送った偏波保持ファイバや位相変調方式に代わる光の位相変化の検出方式の採用が必要であろう。

参考文献

- (1) 大越孝敬, ほか: “光ファイバセンサ” オーム社, 1986年
- (2) H.Kajioka et al; Fiber optic gyro production at Hitachi”, OE/FIBERS '91,15th Anniversary Conf, SPLE Vol,1585,pp17-27,3-6 Sept,1991,Boston
- (3) 城憲三: “応用数学解析”, 養賢堂
- (4) 日原弘, ほか: “デポライザを用いた光ファイバジャイロの特性”,1989年, 信学秋全大 C-336
- (5) Y.Nishi et al; “Single Mode Fiber Based Fiber Optical Gyroscope for Automobile Navigation System ,9th Optical Fiber Sensors Conference ”, OFS-9,109-112,Firenze,1993
- (6) 保立和夫: “光ファイバジャイロセンシング技術の動向” 信学誌, pp806-813,1996,No.8

(平成10年12月7日受理)