

光ファイバージャイロの現状と将来展望

保 立 和 夫

慣性空間に対する回転を計ることができるセンサーをジャイロと呼ぶ。従来、このジャイロ機能は、こまの回転軸が慣性空間上一定方向を向き続ける性質（回転角運動量の保存則）を原理とした機械式センサーとして実現されてきた。しかし、機械式ジャイロでは、こまの起動に時間がかかる、保守が必要等、扱いにくい面があって、また高価でもあったことから、航空、宇宙、船舶などの限られた分野でのみその利用が図られてきた。

しかし、最近になって、サニヤック効果という原理に基づく光ジャイロが実用化されている。中でも光ファイバージャイロ (fiber optic gyro: FOG) は、可動部分が皆無な光ジャイロであり、瞬間起動が可能、メンテナンスフリー、ダイナミックレンジが広い、扱いが容易等の特長を有して、ジャイロ技術分野に革新をもたらしつつある。

本稿ではまず、この光ファイバージャイロの第1世代である干渉方式の実用化状況を概観する。その応用は、航空機の慣性航法装置やロケットの制御等の従来からのジャイロ適用分野に限られず、さまざまな民生応用をも開拓している。続いて、上記第1世代方式の今後の技術展開に必要な最新の研究動向を紹介し、さらに、次世代方式光ジャイロとして、共振方式やブリュアン方式等の研究動向も概観する。

1. 光ファイバージャイロのジャイロ技術における位置づけとその分類

ジャイロの応用分野と要求性能を図1に示す。時々刻々の機体の姿勢変化をジャイロで計測し、加速度計で速度と移動量を求めて航法を行う航空機においては、長い航続時

間内での誤差の蓄積を抑えるために、このジャイロには $0.01^{\circ}/h$ (地球の公転速度相当) というきわめて高い分解能が要求される。機械式ジャイロによりこの性能が達成されてきたが、こまの均一性へのきわめて高い要求、軸受けへの特別な工夫、保守作業が必須、起動に時間を必要、等の問題を有していた。さらに航空機の転回の速さは上記分解能より7桁も大きく、通常の機械式ジャイロではこのように広いダイナミックレンジを達成できない。そこで、3次元的に自由に動ける台（ジンバル）の上にジャイロと加速度計を設置し、ジャイロの出力が常にゼロになるようにジンバルを機械的に駆動するという複雑な機構が必須であった。

もしジャイロ単体で7桁というダイナミックレンジが得られれば、ジャイロを機体に直接固定でき、ジンバル機構が不要となる。これはストラップダウン方式と呼ばれる。光ジャイロなら、この方式が実現できる。最初にこの目的で開発された光ジャイロが、リングレーザージャイロ (RLG) である¹⁾。RLGもFOGも、その原理は同じでサニヤック効果と呼ばれる¹⁾。閉じた光路を伝搬する光波がこの光路を一周するのに要する時間は、この光波が慣性空間に対して回転すると変化する。この効果により、光路を左右逆回りに伝搬する2光波間の伝搬時間差は回転に比例する。サニヤック効果の感度は光路が取り囲んだ面積に比例するが、きわめて小さい。

RLGでは、閉光路をレーザー媒質 (He-Ne) で満たしリングレーザーとした。左右逆回りの2つの発振周波数差が回転に比例する。元来レーザー周波数は $\sim 10^{14} \text{ Hz}$ ときわめて大きいので、サニヤック効果の微小な感度でも十分な周波数差がとれる。すでに $0.001^{\circ}/h$ にも及ぶ感度が速成されていて¹⁾、ボーイング 747, 757, 767 等の航空機に用いられているほか、わが国の H II ロケットの制御にも利用され

東京大学大学院工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)
E-mail: hotate@sagnac.t.u-tokyo.ac.jp

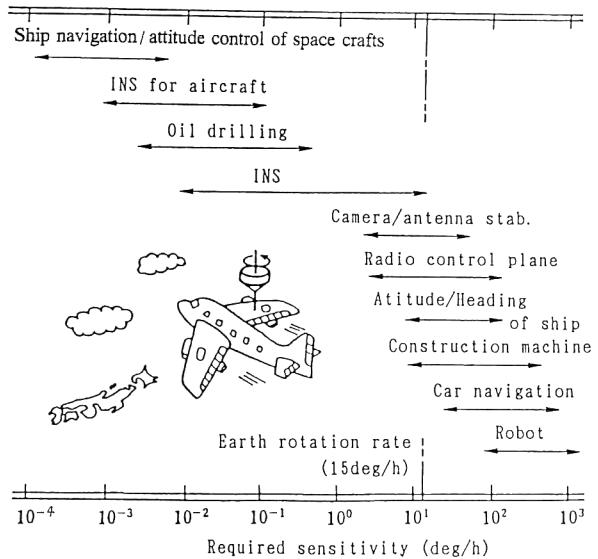


図1 ジャイロの応用分野と要求性能。

ている。

しかし、RLGには大きな問題がある。光路中の鏡等から生じる後方散乱のために左右両回り光に結合が生じ、入力回転が小さくなると両発振周波数が同一となってしまうという問題である¹⁾。このロックイン現象への対策として広く実用化された技術は、RLGに比較的速い機械的回転振動を加え、その際のジャイロ出力の平均値をとる手法である¹⁾。つまり、RLGは光ジャイロではあるものの、機械的可動部分を有している。

RLGのもつ上記の問題を解決した光ジャイロが、光ファイバージャイロである²⁻⁷⁾。FOGは、後述するように、大別して3種の方式が研究されてきた。第1世代の干渉方式(I-FOG: interferometer fiber optic gyro)は、図2に示すように、数百m~1kmという長尺光ファイバーコイルによりサニヤック効果の感度向上を図ったものである。コイル直径は5~10cm程度である。光ファイバー中を左右逆回りに伝搬した2光間の位相差が回転に比例して変化するのを両光の干渉現象により求める。本方式の理論的感度限界は、受光器からの出力電流のショット雑音で決まる。これは十分に小さく、地球の公転を上回る回転検出能力に相当する。

しかし、この限界は両光間の位相差にすると1μradオーダーに過ぎず、実際には光ファイバー中で生じる、後方レーリー散乱、光カーポー効果、偏波変動、地磁気によるファラデー効果、温度分布の時間変動等により、これを上回る雑音が生じる。しかし、光源として低コヒーレンスな特殊なものを用いる等の比較的簡便かつ効果的な対策が考案されて、I-FOGは現在すでに実用期に到達している²⁻⁷⁾。

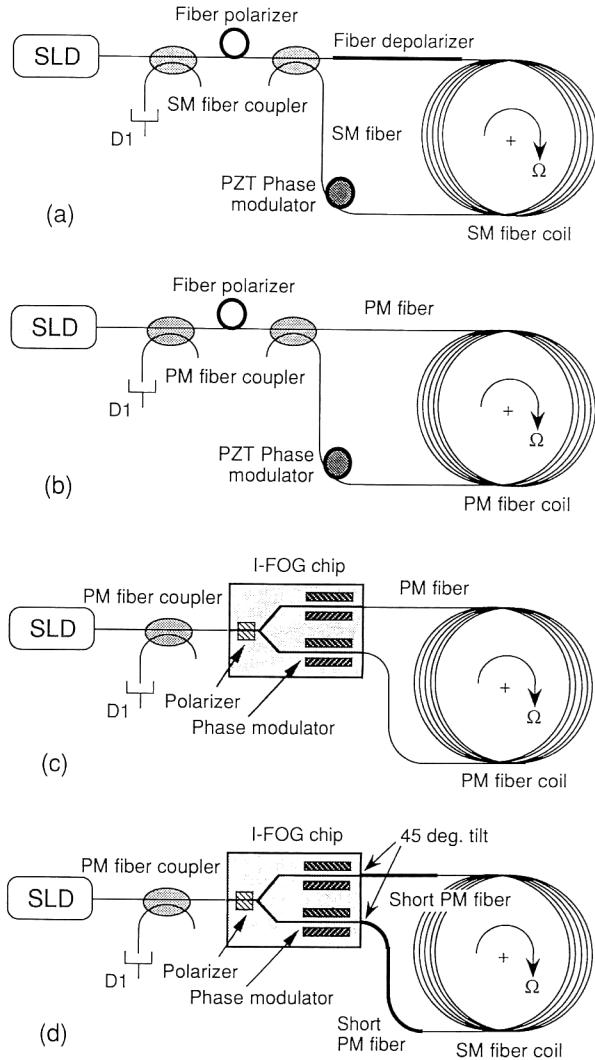


図2 干渉方式光ファイバージャイロの各種構成法。

FOGをより高性能化する、あるいは低価格化するには、後述するように、上記の特殊光源へのさらなる工夫、長尺となる光ファイバーコイルの巻き方の工夫や低価格化の工夫が要求されている。これに対し、光源として高コヒーレンスなレーザーを用い、光ファイバー長も~10mと短尺化できる別の構成も研究されている。その第1は共振方式(R-FOG: resonator FOG)であり²⁻⁸⁾、光ファイバーリング共振器の鋭い共振特性によって感度向上を図る方式で、基礎研究が蓄積されている。もうひとつは光ファイバー共振器中で生じる誘導ブリュアン散乱によりレーザー発振を得て、その発振周波数変化から回転を検出する方式(B-FOG: Brillouin FOG)である⁹⁾。RLGの光ファイバ版といえる。これらについては第3章で述べる。

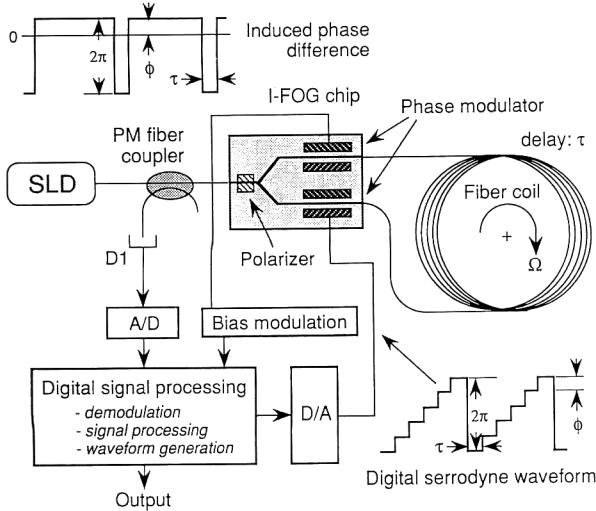


図3 クローズドループ型干渉方式光ファイバージャイロ—デジタルセロダイイン方式—.

2. 干渉方式光ファイバージャイロの基本構成と実用化動向

2.1 I-FOG の基本構成

I-FOG の主たる雑音要因のひとつに、センシング光ファイバーコイル中の偏波変動の影響がある。これへの対策として、光回路中に偏光子を置くことが必須となる。单一モード光ファイバーをセンシングコイルとした場合には、コイル中で偏波がどのように変形するか予測できない。そこで、デポラライザーにより偏光を解消しておき、偏光子により所望の成分のみ取り出す必要がある。図2(a)がそのための基本構成で、すべての要素が光ファイバー型素子となっている。この構成は安価ではあるが、不要偏波成分が多く、低精度用に対応する。コイル部に偏波維持光ファイバーを用いると、偏波変動に伴う雑音が低減できる。図2(b)はこの構成で、中精度対応である。

一方で、ジャイロ系中の受光器の出力変化そのものをジャイロ出力とすると、分解能や零点安定性の向上は図れても、広いダイナミックレンジは得られない。航空機の慣性航法用等に要求される7桁というダイナミックレンジや、数ppmというジャイロ出力の直線性の実現には、入力回転に比例した周波数出力が必須となる。図3はこれらの要求を満たす手法として開発されたデジタルセロダイイン方式である¹⁰⁾。

光ファイバーコイルの一端に設けた位相変調器により図中に示した階段状の位相変化を光波に与える。階段一段の時間は光がファイバーコイルを伝搬する時間となっているので、左右両回り光間には一段の高さに相当する位相差が与えられる。これによりサニヤック位相を打ち消すよう一段の高さに帰還がかけられる。この階段波形の振幅が 2π

になったところでリセットすると、この鋸歯状波形の周波数は入力回転に比例し、RLGと同等の周波数出力が得られる。 2π 条件の自動設定法を含む巧みな信号処理法が発明されていて¹⁰⁾、中ないし高級グレードに採用されている。

ここでは、周波数特性に優れた光位相変調器が必要で、光分岐と一体化した光集積回路がニオブ酸リチウム結晶を基盤にしてつくられ、I-FOGチップと呼ばれている。このような手法を一般にクローズドループ(closed-loop)方式と呼び、受光器出力をそのままジャイロ出力とする方式をオープンループ(open-loop)方式と呼ぶ。図2(c)は、ジャイロチップと偏波維持光ファイバーによる構成で、もつとも高位のグレードに対応する。なお、図2(d)はもっとも新しい構成であり、第3章で説明される。

2.2 I-FOG の実用化の進展

表1は、I-FOGの開発・実用化状況をまとめたものである。ジャイロの分解能(resolution)/零点の安定性(bias)で大別すれば、 $200^\circ/h$ 程度のグレード、 $1^\circ/h$ 近辺のグレード、 $0.01^\circ/h$ ないしはそれ以上のグレードがそれぞれ開発され、低精度、中精度はすでに多方面での実用化が進んでいる²⁻⁷⁾。

最新鋭旅客機ボーイング777の慣性航法装置には米国ハネウェル社製のI-FOGが採用されている¹¹⁾。航空機の慣性航法には安全性(冗長性)を確保するために、分解能 $0.01^\circ/h$ グレードのジャイロが9つ用いられてきた。これに対してボーイング777では、このグレードのRLG 6つと $0.5^\circ/h$ グレードのI-FOG 4つで同等の性能を達成し、全システムとして低価格化が図られている¹¹⁾。光ファイバージャイロが、ジャイロ応用分野の中心である航空機に使用され始めたことの意義は大きい。米国では、航空機用に $0.01^\circ/h$ グレードのI-FOGを量産する技術を磨くことを目的に研究開発費が醸出されており、GPS(global positioning system)と $0.01^\circ/h$ グレードI-FOG 3つを組み合わせた慣性航法パッケージの開発も推進されていた。このグレードのI-FOGが実用されるのも近い。わが国でも、このグレードの開発が進められている^{12,13)}。

1997年2月に打ち上げられた文部省宇宙科学研究所のロケットMV-Iには、I-FOGを用いた慣性航法装置が搭載されている。また、このロケットで打ち上げられた人工衛星Muses-B(はるか)にもその制御用にI-FOGが用いられている。宇宙開発事業団のTR1-Aロケットの制御にも、I-FOGが1991年以来使用されている。このロケットの目的は微小重力下での実験で、サイレントジャイロとしてI-FOGが必須であった。1991年の実験は、世界で最初のI-FOGの宇宙応用である。さらに、国内他社では $0.003^\circ/h$ と

表1 干渉方式光ファイバージャイロの実用化動向。# 従来からの応用分野, + 新規応用分野。

Moderate grade: Open-loop, resolution/bias: ~200 deg/h, scalefactor: ~1%
+ Car navigation
+ Antenna/camera stabilizer
+ Navigation of autonomous vehicles
+ Cleaning robots
+ Forklifts
+ Unmanned dump trucks
+ Crane control
+ Control and navigation of agricultural machines
+ Bore hole routing
+ Motion monitoring of automobile, train and human body etc.
Intermediate grade: Open or closed-loop, res./bias: ~1 deg/h, scalefactor: ~0.1%
Aircraft navigation (AHRS):
Boeing 777
Dornier 328
Rocket navigation
NASDA TR-1A rocket
+ Control of radio controlled helicopter
+ Antenna/camera stabilizer
+ Navigation of autonomous vehicles
+ Cleaning robots
+ Crane control
+ Control and navigation of tractors
+ Navigation of lawn mowers
+ Pipe-mapping (gas, power, communication, cables)
+ Motion monitoring of automobile, train and human body etc.
High grade: Closed-loop, resolution/bias: ~0.01 deg/h, scalefactor: ~10 ppm
Gyro compass (north finder, open-loop)
Aircraft navigation
Rocket navigation
ISAS M-V rocket (with radio wave guidance)
Ship navigation (higher bias stability)
Gyrocompass
Navigation and/or attitude control of space crafts (~: 0.001 deg/h)
ISAS MUSES-B satellite (open-loop: 0.05 deg/h)

いう分解能のジャイロを船舶用ジャイロコンパスを目的に開発している¹⁴⁾。このように、航空、宇宙、船舶といった従来からジャイロを必要としてきた分野への I-FOG の浸透は着実である。

このほかにわが国では、メンテナンスフリー、瞬間起動が可能等の I-FOG の特徴を生かして、表1に示したように、ジャイロ技術領域に新たな応用分野を創造している。カーナビゲーション用の I-FOG は、現在およそ 2,500 台/月のペースで生産され高級セダンの純正カーナビ用に販売されている¹⁵⁾。カーナビはいくつかのグレードに分類できる。そして、最も高性能なカーナビに I-FOG が採用されている。このシステムでは I-FOG が主たるセンサーであり、GPS は誤動作が生じた際の補正手段的に用いられる。I-FOG を含むカーナビは、GPS が動作できない場所、地図情報に誤りがある場所等、いかなる場所においても十分な機能を発揮する。筆者もこのカーナビ搭載車を愛車とし、ドライブを楽しんでいる。パトロールカー等の特殊車両用の

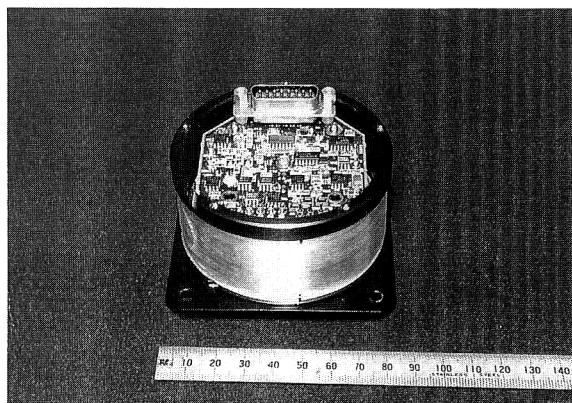


図4 干渉方式光ファイバージャイロの内部の様子(日本航空電子工業株式会社のご好意による)。

高性能なカーナビには光ファイバージャイロが必須である。また、携帯電話用アンテナのパターン自動測定車両にも I-FOG が利用されている。

ヘリコプター搭載用のカメラ安定台も I-FOG により制

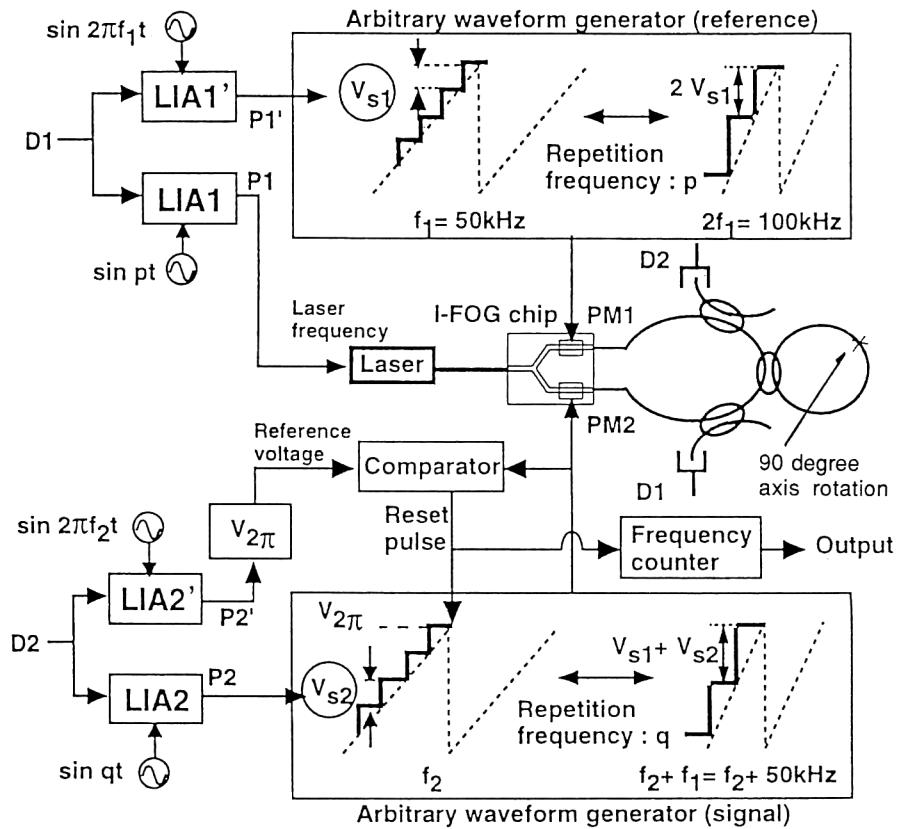


図5 デジタルゼロドイン型共振方式光ファイバージャイロの基本構成²⁸⁾.

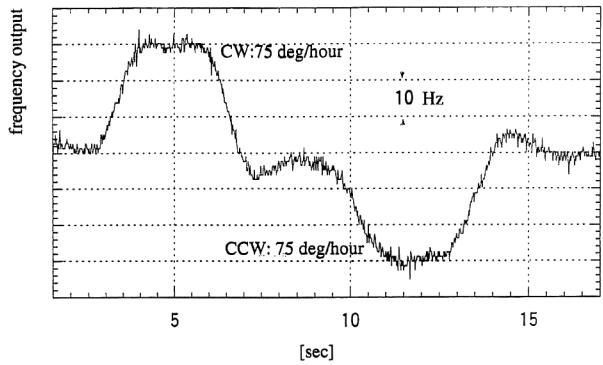


図6 デジタルゼロドイン型共振方式光ファイバージャイロによる回転検出実験²⁹⁾.

御されている。農薬散布およびレスキュー用ラジコンヘリコプターの制御にも I-FOG が活躍し、数千台/年の生産が続いている^{12,15)}。

このような民生用の応用開拓では、わが国が先頭を切っていて、米国、ヨーロッパでは、主に従来からのジャイロ応用分野における I-FOG の導入が進められている。図4に、I-FOG の内部の様子の一例を示す。

3. 機能向上に向けた研究動向

3.1 干渉方式光ファイバージャイロの高性能化

I-FOG のさらなる高性能化に向けた研究面では、エルビウムドープ光ファイバー (EDF) を用いた低コヒーレント光源の検討が重要である^{16,17)}。宇宙望遠鏡の方向制御用等に必要な数 ppm を超える高いスケールファクターの安定性の実現には、現在用いられている半導体スーパールミネセントダイオード (SLD) では波長の温度安定性が不十分である。また、この用途には 0.001°/h オーダーの分解能も要求されるが、SLD では強度不足で、この面からも EDF 光源が求められる。米国においては、EDF 光源で問題となる強度雑音の補償策を施して 0.001°/h を上回る性能の実験系が試作されている¹¹⁾。これは 1 世紀に 1 回転という極微小回転の検出能力に相当する。

このほか、価格低減のために、ファイバーコイルを偏波維持光ファイバーではなく通常の単一モード光ファイバーで構成する研究も進んでいる^{11,12,18,19)}。先に示した図2(d)がその構成である。I-FOG チップ中の光導波路をプロトン交換法という手法で作成すると、チップ全体がきわめて良好（消光比 60 dB 以上）な偏光子となる。この特性を活用すると、長尺光ファイバーを高価な偏波維持光ファイバーではなく、図2(d)のように単一モード光ファイバーとして

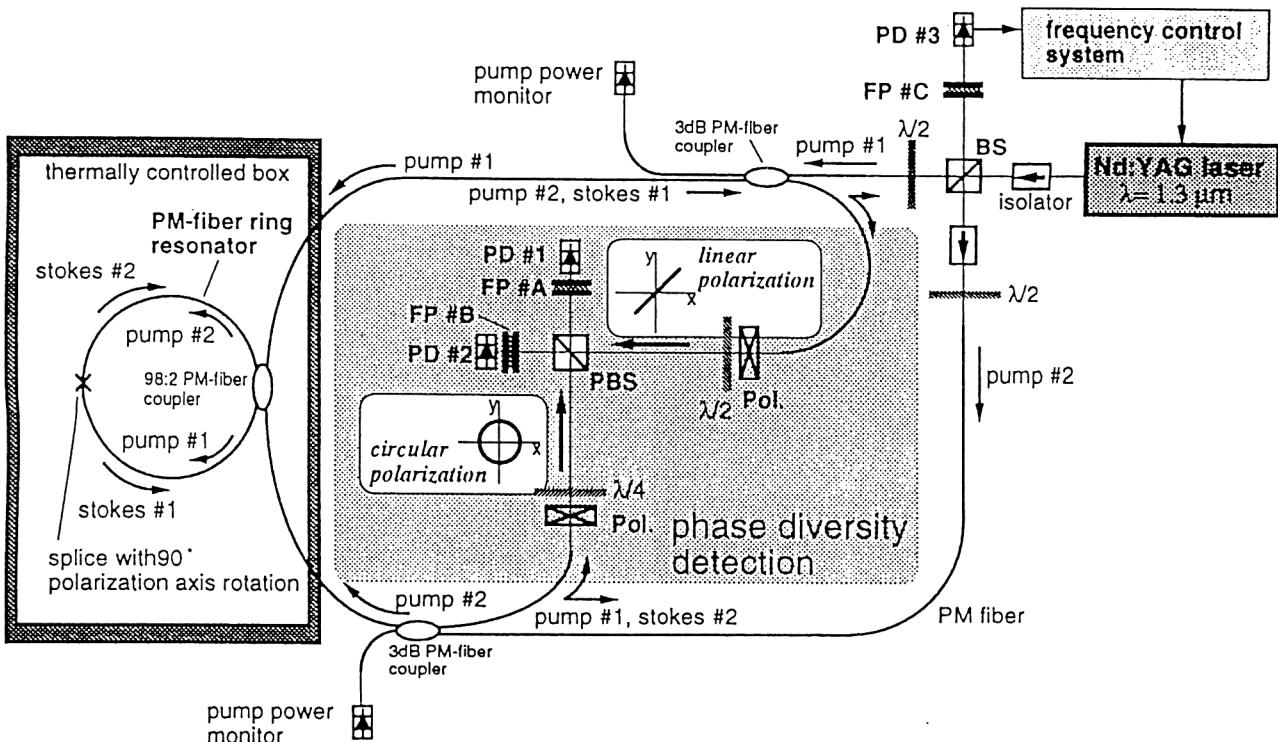


図7 回転方向検出機能を有するブリュアン方式光ファイバージャイロ³⁵⁾.

も、偏波変動に基づく出力雑音が小さく抑えられる。コイル両端に設けた短尺の偏波維持光ファイバーの偏波軸をチップのそれに対して45°傾けて接続することにより、左右両回り光とも偏光が解消され、しかも不要な偏波成分は上記チップの偏光子作用によって十分に低減される。

筆者らは、偏波維持光ファイバーコイルを用いると地磁気によるファラデー効果が誘起するドリフトが低減されることを理論的、実験的に示してきた²⁰⁾。そして最近、その理論を一般化することに成功した²¹⁾。これによれば、光ファイバーコイルを伝搬する光波が樽円偏波化し、しかもその形状がコイル1ターンをちょうど一周期として変化するときのみ、ファラデー効果誘起ドリフトが生じると結論できる。図2(d)の系では両光とも偏光が解消されていて、上記の状況が起こらない。つまり、この系においてもファラデー効果誘起ドリフトは小さいことが示された。図2(d)の系は、このように価格低減、性能向上の両面で優れた特性を示している。すでに約0.003°/hの分解能を示す基礎実験もみられ¹¹⁾、1°/hのグレードは市販もされている¹²⁾。

このほか I-FOG の超高性能化には、光ファイバーコイル中に不均一に分布した温度やひずみが時間変化することにより、左右両回り光間に位相差が生じる現象²²⁾も低減する必要がある。特殊なコイルの巻き方²³⁾が提案されているほか、コイル内での熱伝搬を考慮した詳細なシミュレーション²⁴⁾が展開されている。また、小型ジャイロの構成も研究

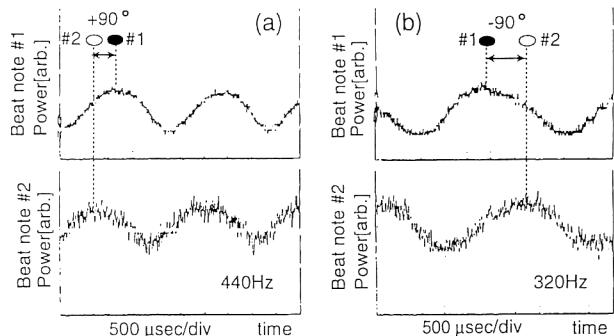


図8 ブリュアン方式光ファイバージャイロによる回転角速度と回転方向の検出実験³⁵⁾. (a) 右回り回転, (b) 左回り回転.

されている。筆者らは、直径10mmほどの小径コイルのI-FOGを作成するために、このようなコイル中に生じる曲げ誘起複屈折を活用した雑音低減方策の検討を進めている²⁵⁾。

3.2 次世代光ジャイロ技術

R-FOGでは、I-FOGと異なり、高強度で高コヒーレントなレーザーを光源とする。I-FOGにおけるSLDが有している波長変動や強度不足の問題は、レーザーを光源とすることで回避できる可能性がある。また、光ファイバー長もI-FOGに比べ圧倒的に短く、価格低減のみならず、上記の温度変動誘起ドリフトの低減にもつながると期待できる。

筆者らのグループでは、R-FOGの雑音要因の挙動把握と

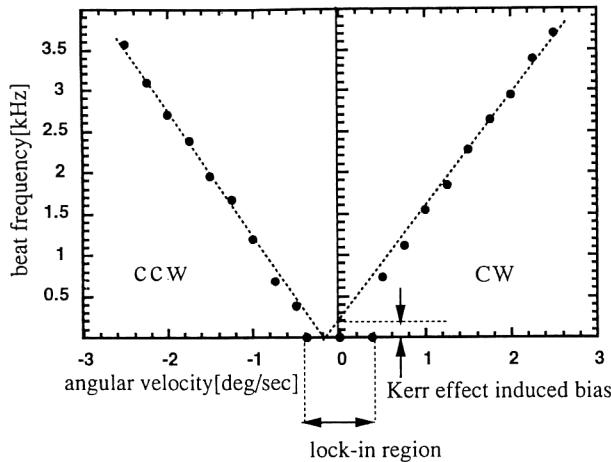


図9 ブリュアン方式光ファイバージャイロにおけるロックイン現象と光カーエフェクト誘起バイアスの観察結果³⁸⁾.

その対策に関する研究を蓄積してきた^{2-8,26,27)}. これらの研究により、本方式光ファイバージャイロにおける主たる雑音要因の挙動把握と、これらの対策の考案がほぼ完了している。しかし、これらの対策をすべて施すには、2つの光周波数シフター、2つの光強度変調器等、多くの光学要素を含む複雑なジャイロ系となることが問題であった。これに對し最近、前述の I-FOG チップを用いて光学系を圧倒的に簡素化し、さらに A/D 変換器で発生される階段状の波形で I-FOG チップ中の光位相変調器を駆動し、この波形を制御するだけで、すべての雑音に対処できる新しい方式を提案した²⁸⁾。

図5が本方式の構成図である。光コイル中を光が1周伝搬するのに要する時間幅をもつ階段状鋸歯状波で光位相変調器を駆動することにより、等価的に光周波数をシフトさせることができ、入力回転による共振周波数の変化を正確に追従できることが証明できた²⁸⁾。受光器出力の波形変化から、デジタルセロダイイン波形の振幅が理想値 2π から外れたことも検知でき、したがってこの振幅を自動的に制御することができる。

図6は、共振器の共振周波数の変化に対し、左右両回り光を独立に追従させ、両者の差周波数として入力回転を検出した基礎実験結果である²⁹⁾。本実験で、デジタルセロダイイン波形は A/D 変換波で形成され、その量子化で決まる分解能は約 3 kHz の周波数シフトに相当する。しかし、本実験系では速いサンプリングと多数のサンプリングにわたる平均化により、この量子化限界を千倍も上回る分解能を実現した。図6中の雑音は、主にデジタル回路の出するノイズによるものと考えられるが、すでに共振周波数に換算して約 5 Hz に対応する分解能を実現している²⁹⁾。デジタルセロダイイン変調波形の調節により、共振器への入射光パワ

ーの調節もでき、左右両回り光パワーに差があるときに生じる光カーエフェクト誘起バイアスの除去も可能と考えている。

光ファイバーリング共振器中で発生する誘導ブリュアン散乱により、リングレーザーを得ることができ、これによりジャイロ機能が実現できる^{9,30-34)}。この方式が B-FOG で、これによれば左右両回り発振光のビート周波数として回転角速度がわかり、ダイナミックレンジが要求される航空機の慣性航法用等に好都合となる。ビート周波数のみでは、回転角速度はわかるものの、回転の方向はわからない。筆者らはこの問題を解決する手法として、光位相ダイバーシティの導入により位相が互いに 90° 異なる 1 対のビート信号を得て、両者の位相差の符号から回転方向の検出を可能にする方式を提案した³⁵⁾。図7はこの方式の実験系、図8は回転方向検出結果である³⁵⁾。

B-FOG のキーポイントは、He-Ne-RLG と同様に、ロックイン現象をいかに解除するかである^{36,37)}。図9は、最近構成した実験系によるロックイン現象の観察結果である³⁸⁾。筆者らはこの現象の解除手法として、共振器中で生じる光カーエフェクトを活用して機械的ディザイナーの不要な手法を検討していく、ロックインレンジの減少を実験的に確認している³⁸⁾。

このほかに、より小型で量産性に富む光ジャイロ構成として、センシングループを含むすべての要素を光集積回路で一体化したジャイロの研究も今後重要となる。筆者らは低損失ガラス基盤光導波路 (PLC 光導波路) によるモノリシック集積化光ジャイロの研究を始めている³⁹⁾。

光ファイバージャイロの研究・実用化動向を概観した。I-FOG の実用化は着実であり、航空機、宇宙応用といった従来のジャイロ応用分野はもとより、光ファイバージャイロのものつ性能と使いやすさとにより、一般民生用途が数多く開拓されていて、ジャイロ技術領域に革新を起こしつつある。R-FOG や B-FOG 等の新しい光ファイバージャイロ構成も検討されており、さらにモノリシック集積化光ジャイロの動向も注目される。光ジャイロは、厚みのある技術分野に成長している。

文 献

- 1) S. Merhav: *Aerospace Sensor Systems and Applications* (Springer, New York, 1996).
- 2) K. Hotate: "Fiber-optic gyros," *Optical Fiber Sensors, vol. IV* (Artech House, London, 1997) pp. 167-206.
- 3) K. Hotate: "Fiber sensor technology today," *J. Opt. Fiber Technol., 3* (1997) 356-402.
- 4) K. Hotate: "Fiber optic gyros," *Photonics Spectra*, April

- (1997) 108-112.
- 5) K. Hotate: "Future evolution of fiber optic gyros," Opt. Rev., **4** (1998) 28-34.
 - 6) H. Lefevre: *The Fiber-Optic Gyroscope* (Artech House, London, 1993).
 - 7) E. Udd, H. C. Lefevre and K. Hotate, eds.: "Fiber optic gyros," 20th Anniversary Conference, Proc. SPIE, **2837** (Denver, 1996).
 - 8) K. Hotate: "Passive and active resonator fiber optic gyros," Fiber Optic Sensors V, Proc. SPIE, **2895** (Beijing, 1996) 68-78.
 - 9) F. Zarinetchi, S. P. Smith and S. Ezekiel: "Stimulated Brillouin fiber-optic laser gyroscope," Opt. Lett., **16** (1991) 229-231.
 - 10) H. C. Lefevre, Ph. Martin, T. Gaiffe, Ph. Graindorge, G. LeBoudec, J. Morisse, P. Simonpietri, E. Taufflieb, Ph. Vivenot and H. J. Arditty: "Latest advances in fiber-optic gyroscope technology at Photonetics," Fiber Optic and Laser Sensor XII, Proc. SPIE, **2292** (San Diego, 1994) 156-165.
 - 11) G. A. Sanders, B. Szafraniec, R.-Y. Liu, C. Laskoskie, L. Strandjord and G. Weed: "Fiber optic gyros for space, marine and aviation applications," 20th Anniversary Conference, Proc. SPIE, **2837** (Denver, 1996) 61-71.
 - 12) K. Sakuma: "Application of fiber optic gyros at JAE," 20th Anniversary Conference, Proc. SPIE, **2837** (Denver, 1996).
 - 13) A. Kurokawa: "Space applications of I-FOG," *International Conference on Optical Fiber Sensors* (Sapporo, 1996) Ex2-3.
 - 14) K. Yamamoto and Y. Okada: "High resolution I-FOGs for ship applications," *Int. Conf. on Optical Fiber Sensors* (Sapporo, 1996) Ex2-4.
 - 15) H. Kajioka, T. Kumagai, H. Nakai, T. Dohsho, H. Soekawa and T. Yuhara: "Commercial applications of mass-produced fiber optic gyros," 20th Anniversary Conference, Proc. SPIE, **2837** (Denver, 1996) 18-32.
 - 16) H. J. Patrick, A. D. Kersey, W. K. Burns and R. P. Moeller: "An erbium-doped super-fluorescent fiber source with long period fiber grating wavelength stabilization," *Int. Conf. on Optical Fiber Sensors* (Williamsburg, 1997) pp. 138-141.
 - 17) N. Cerre, E. Taufflieb, T. Faussot, P. Simonpietri and H. C. Leufevre: "Fiber bragg grating for use high-accuracy fiber optic gyroscope," *Int. Conf. on Optical Fiber Sensors* (Williamsburg, 1997) pp. 142-144.
 - 18) S. Motohara and A. Ohno: "Fiber optic gyroscope with single mode fiber coil," *Int. Conf. on Optical Fiber Sensors* (Monterey, 1992) W2.2, pp. 30-33.
 - 19) J. Blake and B. Szafraniec: "Random noise in PM and depolarized fiber gyros," *Int. Conf. on Optical Fiber Sensors* (Williamsburg, 1997) pp. 122-125.
 - 20) K. Hotate and K. Tabé: "Drift of an optical fiber gyroscope caused by the Faraday effect," J. Lightwave Technol., **5**, (1987) 987-1001.
 - 21) T. Saida and K. Hotate: "General formula describing drift of interferometer fiber optic gyro due to faraday effect: Reduction of the drift in twin-depo-IFOG," *Int. Conf. on Optical Fiber Sensors* (Williamsburg, 1997) pp. 134-137.
 - 22) M. D. Shupe: "Thermally induced nonreciprocity in the fiber-optic interferometer," Appl. Opt., **19** (1980) 654-655.
 - 23) N. J. Frigo: "Compensation of linear sources of nonreciprocity in Sagnac interferometers," *Fiber Optic and Laser Sensor I*, Proc. SPIE, **412** (Arlington, 1983) 302-305.
 - 24) F. Mohr: "Thermooptically induced bias drift in fiber optical Sagnac interferometers," J. Lightwave Technol., **14** (1996) 27-41.
 - 25) K. Hotate, K. Masaki and O. Mikami: "Interferometer fiber optic gyro having a small-diameter single-mode-fiber sensing coil with a function as depolarizer using its bend-induced birefringence," *Int. Conf. on Optical Fiber Sensors* (Williamsburg, 1997) pp. 488-491.
 - 26) K. Takiguchi and K. Hotate: "Method to reduce the optical Kerr-effect-induced bias in an optical passive ring-resonator gyro," IEEE Photonics Technol. Lett., **4** (1992) 202-206.
 - 27) K. Takiguchi and K. Hotate: "Evaluation of the output error in an optical passive ring-resonator gyro with a 90° polarization-axis rotation in the polarization-maintaining fiber resonator," IEEE Photonics Technol. Lett., **3** (1991) 88-90.
 - 28) K. Hotate and M. Harumoto: "Resonator fiber optic gyro using digital serrodyne modulation," J. Lightwave Technol., **15** (1997) 466-473.
 - 29) 林 譲治, 保立和夫: "デジタルセロダイン方式共振型光ファイバジャイロ", 光波センシング技術研究会講演会, LST21-12 (1998) pp. 77-84.
 - 30) K. Hotate and Y. Tanaka: "Analysis on state of polarization of stimulated Brillouin scattering in an optical fiber ring-resonator," J. Lightwave Technol., **13** (1995) 384-390.
 - 31) Y. Tanaka and K. Hotate: "Fiber Brillouin ring laser without instability due to interaction between the polarization lateral modes," IEEE Photonics Technol. Lett., **7** (1995) 482-484.
 - 32) Y. Tanaka and K. Hotate: "Analysis of fiber Brillouin ring laser composed of single-polarization single-mode fiber," J. Lightwave Technol., **15** (1997) 838-844.
 - 33) P. A. Nicati, K. Toyama and H. J. Shaw: "Frequency stability of a Brillouin fiber ring laser," J. Lightwave Technol., **13** (1995) 1445-1451.
 - 34) Y. Tanaka and K. Hotate: "Lasing characteristics of optical fiber Brillouin ring laser with spatially distributed gain coefficient," IEICE Trans. Electron., **E79-C** (1996) 1436-1441.
 - 35) Y. Tanaka, S. Yamasaki and K. Hotate: "Brillouin fiber-optic gyro with directional sensitivity," IEEE Photonics Technol. Lett., **8** (1996) 1367-1369.
 - 36) S. Huang, K. Toyama, B. Y. Kim and H. J. Shaw: "Lock-in reduction technique for fiber-optic ring laser gyros," Opt. Lett., **18** (1993) 555-558.
 - 37) M. Raab and T. Quast: "Two-color Brillouin ring laser gyro with gyro-compassing capability," Opt. Lett., **19** (1994) 1492-1494.
 - 38) 山下真司, 保立和夫: "ブリュアン方式光ファイバジャイロ-ロックイン現象の観測とその解除方法についての検討-", 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, OPE98-1 (1998) pp. 1-6.
 - 39) 鈴木賢哉, 保立和夫, 瀧口浩一: "PLC 光導波路による集積型共振方式光ジャイロ", 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, OPE97-98 (1997) pp. 85-90.

(1998年4月24日受理)