

光ファイバジャイロ

— 実用化の進展と次世代技術 —

東京大学 先端科学技術研究センター
保立和夫

Fiber Optic Gyros; Progress in practical applications and future technologies

Kazuo Hotate

Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo

Abstract

Fiber Optic Gyros, FOG for short, have been studied and developed for about 20 years. The first generation FOG. Interferometer FOG, has already been in practical application stage, being used in Boeing 777, scientific rockets navigation, car navigation systems, and so on. Next generation FOGs. Besonator FOG and Brillouin FOG, have also been studied to accumulate basic research results. This paper describes recent researches and applications of the three types of FOGs.

1. はじめに

光ファイバジャイロは、純光学的な可動部分のないジャイロであり、従来の機械式ジャイロと比べ、瞬間起動が可能、保守が不要、ダイナミックレンジが広い、扱いが容易等の特徴を有する。本ジャイロの第一世代である干渉方式は、Fig.1 に示す様々なジャイロ応用分野において、既にその実用化が進められている[1-6]。ここで特記すべきことは、これら応用分野が航空機の慣性航法やロケットの制御等の従来のジャイロ応用分野に限られず様々な民生応用をも含むことである。これは、まさに上記の特徴を反映しているものといえる。本稿では、光ファイバ

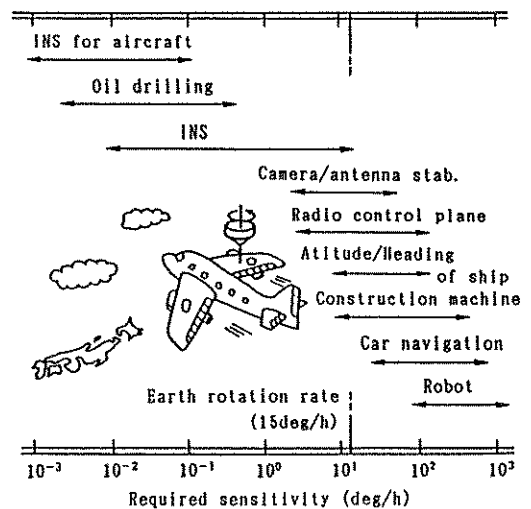


Fig.1 Application fields of gyros and required sensitivity

〒153 目黒区駒場4-6-1
TEL. 03-3481-4437

ジャイロの分類、上記第一世代方式の実用化状況、そして次世代方式の研究動向を概観する。

2. 光ファイバジャイロの分類と特徴

光ファイバジャイロは、1976年にその原理提案がなされて以来、各国で多くの研究が蓄積され、Fig. 2 に示すように大別して3種の方式が研究されてきた[1-6]。この内、第1世代の干渉方式（I-FOG）は、数百mから1kmという長尺光ファイバコイルにより感度向上を図ったもので既に実用期を迎えている。第2世代は共振方式（R-FOG）であり、光ファイバリング共振器の鋭い共振特性によって感度向上を図り、5~10mの光ファイバ長で航空機の慣性航法用のグレードが達成可能と考えられ、基礎研究が蓄積されている。第3世代は光ファイバ

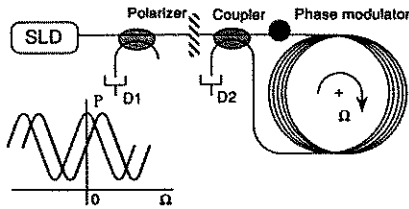
共振器中で生じる誘導ブリルアン散乱によりレーザ発振を得て、その発振周波数変化から回転を検出する方式で、光回路構成を簡素化できると期待され、やはり基礎研究が進められている。この他にも、新しい光ジャイロの構成法に関するチャレンジングな研究も見られる。

以下に、これら方式について説明するが、これらの特徴と研究・開発状況を予めまとめるとTable 1のようになる。

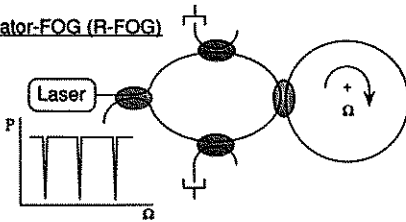
3. 干渉方式光ファイバジャイロの実用化

Table 2 は、I-FOGの開発・実用化状況をまとめたものである。ジャイロの分解能で大別すれば、200度/時程度のグレード、1度/時近辺のグレード、0.01度/時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、

(a) Interferometer-FOG (I-FOG)



(b) Resonator-FOG (R-FOG)



(c) Brillouin-FOG (B-FOG)

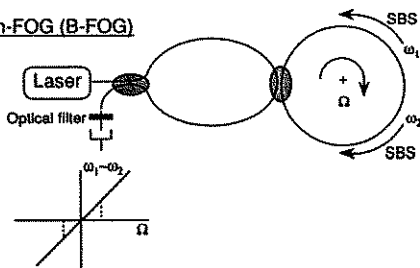


Fig. 2 Classification of Fiber Optic Gyros. (a) Interferometer FOG, (b) Resonator FOG, and (c) Brillouin FOG.

Table 1 Feature and state of the technology in I-FOG, R-FOG and B-FOG

方式/現状	特徴
干渉方式 [I-FOG]	<ul style="list-style-type: none"> 長尺(100m~1km)のファイバコイルによるリング干渉計 低コヒーレント光源により雑音低減 アナログ出力のオープンループ方式とデジタル(周波数)出力のクローズドループ方式とに分類。前者は低・中精度用、後者は広いダイナミックレンジと良好な直線性が実現でき中・高精度用 ファイバが長尺であるために増加する温度ドリフトや光源の波長変動によるスケールファクタ変動が高精度化へのバリア
共振方式 [R-FOG]	<ul style="list-style-type: none"> 短尺(5~10m)のファイバコイルによるリング共振器。コイルの小型化 高コヒーレント光源(レーザ)の利用 基礎研究の蓄積 ファイバコイルでの温度変動および光源の波長変動によるジャイロ性能の劣化を防げる可能性
ブリルアン方式 [B-FOG]	<ul style="list-style-type: none"> 光ファイバリング共振器中で生じる誘導ブリルアン散乱によりレーザ発振を得てその発振周波数変化としてジャイロ機能を実現 基礎研究段階 左右両回りレーザ発振光間のビート周波数として入力回転を検出。高精度ジャイロに必須な7桁におよぶダイナミックレンジを簡単な光学系で実現できる可能性
他の手法	<ul style="list-style-type: none"> エルビウムドープ光ファイバリングレーザによる構成 提案の段階 光集積回路による小型・軽量・安価なモノリシック光ジャイロ

Table 2 Development and practical application of I-FOG

性能	応用例
低精度 ・分解能 200 度/時程度 ・スケールファクタ 数%程度	<ul style="list-style-type: none"> ・カーナビゲーション ・アンテナ/カメラ安定機構 ・自動走行車のナビゲーション ・クリーニングロボット ・クレーンコントロール ・農業機器の制御/ナビゲーション ・管路ルーティング ・自動車/列車/人体の運動検出
中精度 ・分解能 1度/時程度 ・スケールファクタ 0.1%程度	<ul style="list-style-type: none"> ・航空/宇宙応用：ボーイング777 ：TR-1Aロケット ・ラジコンヘリコプタ ・アンテナ/カメラ安定機構 ・自動走行車のナビゲーション ・クリーニングロボット ・クレーンコントロール ・農業機器の制御/ナビゲーション ・管路ルーティング ・自動車/列車/人体の運動検出 ・ジャイロコンパス(北指儀) <p style="text-align: center;"><分解能は高精度並></p>
高精度 ・分解能 0.01 度/時程度ないしそれ以上 ・スケールファクタ 10ppm程度以上	<ul style="list-style-type: none"> ・航空機のナビゲーション ・宇宙応用(望遠鏡の方位制御、等) ・船舶のナビゲーション

中精度は多方面での実用化が進んでいる[1-6]。

最近のトピックの一つは、最新鋭旅客機ボーイング777の慣性航法装置に米国ハネウェル社製のI-FOGが採用されたことである[7]。光ファイバジャイロが、遂に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。我が国では宇宙開発事業団のTR1-Aロケットの制御に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。我が国のジャイロメーカーがこのジャイロを提供している[8]。その他、文部省宇宙科学研究所と国内ジャイロメーカーとでもロケット用I-FOGの検討が進められている[9]。さらに、国内他社では0.003度/時と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[4]。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。

この流れに加えて、メンテナンスフリー、瞬間起動が可能等の特徴を生かして、I-FOGは新たな応用分野を創造している。カーナビゲーション、自動走行車の姿勢制御・ナビゲーション、アンテナ/カメラの安定台、ラジコンヘリコプタ制御、クレーン制御、農業機器の制御、管路のルーティング、列車/人体等の動きの計測、そして北指儀、等がその例である[4, 5]。

カーナビゲーション用のI-FOGは、現在2,500~3,000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[4, 10]。カーナビは幾つかのグレードに分類できる。最も簡単な構成では、GPSとマップマッチング法のみが用いられている。その次のグレードではジャイロ機能が付加されるが、I-FOGではなく振動ジャイロが採用されている。その理由は価格である。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。もっとも誤動作は滅多に生じない。I-FOGを含むカーナビは、GPSが動作できない場所、地図情報に誤りが有る場所等、いかなる場所においても十分な機能を発揮する。小生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。ヘリコプタから望遠カメラで地上を捉えた画像をテレビで目にするのが多くなっているが、あのブレの無い画像はI-FOGによるカメラ安定台が提供している。農業散布およびレスキュー用ラジコンヘリコプターの制御のためにもI-FOGが活躍している[4]。

このような民生用の応用開拓では、我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の導入が計られている。

I-FOGの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を用いた低コヒー

レント光源の検討が重要である[11]。宇宙用等に必要数ppmを越える高いスケールファクタの安定性を実現するには、現在用いられている半導体スーパー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だからである。光源の強度雑音の低減あるいは補償もジャイロの超高性能化にとって重要である[7]。その他、価格低減のためにファイバコイルを偏波維持光ファイバではなく通常の単一モード光ファイバで構成する研究も進んでいる[12-14]。

4. 次世代光ファイバジャイロ

著者らのグループではここ数年来、次世代光ファイバジャイロとして、R-FOGの雑音要因の挙動把握とその対策に関する研究を蓄積してきた[4-6, 15-17]。これら研究により、Table 3に示されたように、本方式光ファイバジャイロに於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、これら対策を全て施すには、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。これに対し最近、I-FOG用に開発されたニオブ酸リチウム光集積回路(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チップ中の位相変調器を駆動し、この波形を制御することにより、Table 3中の全ての雑音に対処できる新しい方式を提案して、

Table 3 Deterioration factors and countermeasures in R-FOG

雑音要因	対策
偏波変動	・偏波維持光ファイバで共振器を構成し、その中で偏波軸を90度振って接続
後方散乱	・CW or CCW光の搬送波を除去 [B-PSK変調] ・共振点検出用にCWとCCW光とに施す変調を異なる周波数で行う
温度変動	・短尺コイルのため、センシングコイル中の温度分布の時間変動によるドリフトは小
光カー効果	・デジタル掃選法による共振周波数の追従
フリンジ効果	・サニャック効果と光カー効果の分離検出とCW or CCW光の強度制御を組合せた手法
	・偏波維持ファイバコイルの利用と振れ除去

基礎実験にも成功している[18]。Fig. 3にこの方式を図示する。

光ファイバリング共振器中で発生する誘導ブリルアン散乱により、リングレーザを得ることができ、これによりジャイロ機能を実現できる[19]。この方式が第3世代の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分り、7桁にもおよぶ広い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である。本ジャイロの基礎研究として、光ファイバブリルアンリングレーザ自体の詳細な研究が進んでいる[21, 22]。ビート周波数のみでは、回転角速度は分るものの、回転の方向は分らない。筆者らは最近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、実験にも成功した[22]。Fig. 4はこの方式の実験系、Fig. 5は回転検出信号である。

この他に、エルビウムドープ光ファイバによりリングレーザを構成し、これをジャイロにするとのチャレンジングな試みもある[23]。また、センシンググループを含む全ての要素を光集積回路で一体化し、小型・軽量・低価格な光ジャイロを構成する研究も、今後重要となろう。

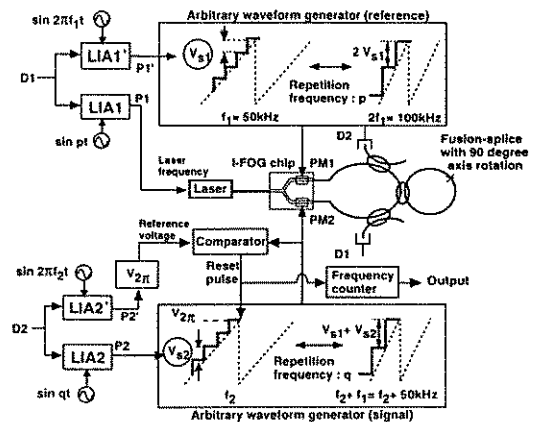


Fig. 3 Resonator Fiber Optic Gyro with digital serrrodyne modulation [18]

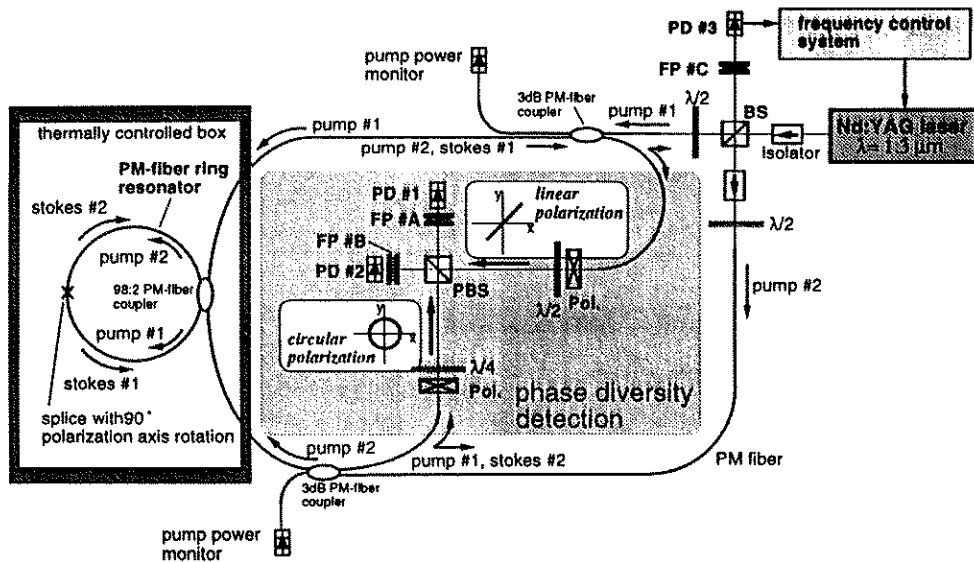


Fig. 4 Brillouin Fiber Optic Gyro with directional sensitivity [22]

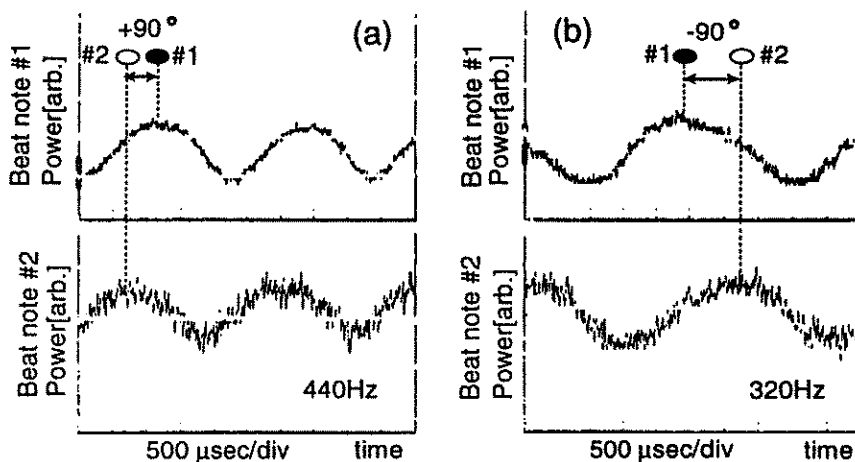


Fig. 5 Detention of the rotation direction [22]

5. まとめ

光ファイバジャイロの最近の研究・実用化動向を概観した。I-FOGの実用化は着実であり、更にR-FOG、B-FOG等の新しい構成も提案・検討されていて、光ファイバジャイロは厚みのある技術分野に成長している。機械式ジャイロにない特徴を生かして、新たなジャイロ応用分野を開拓してゆくものと期待される。

参考文献

- 1) 保立和夫, "光ファイバセンシング技術の動向," 電子情報通信学会誌, vol.79, no.8, pp. 808-813, Aug. 1996.
- 2) 保立和夫, "光ファイバセンサ," レーザ研究, vol.19, no.8, pp.776-786, Aug.1991.
- 3) K. Hotate, "Future evolution of fiber optic gyros," Proc. Intl. Conf. on Optical Fiber Sensors, Sapporo, Tu3-S3, pp.62-65, May 1996. <Invited>
- 4) K. Hotate, "Recent research and applications of

- fiber optic gyros," Proc. 20th Australian Conf. on Optical Fiber Technology, Queensland Australia, pp.367-370, Dec. 1995. <Invited>
- 5) K. Hotate, "Fiber optic gyro: Technologies and applications in Japan," Proc. Intl. Conf. on Optical Fiber Sensors, Firenze, Tu4.1, pp.89-95, May 1993. <Invited>
- 6) 保立和夫, "光ファイバジャイロ," レーザー研究, vol.22, no.4, pp.253-264, April 1994.
- 7) G. A. Sanders, B. Szafraniec, R. Y. Liu, M. Bielas and L. Strandjord, "Fiber-optic gyro development for a broad range of applications," Proc. Fiber Optic and Laser Sensors XIII: SPIE, vol.2510, pp.1-11, Munich, June 1995.<Invited>
- 8) K. Sakuma, "Fiber optic productization at JAE," Proc. Fiber Optic Gyros:15th Anniversary Conference, SPIE, vol.1585, pp.8-16, Boston, Sept. 1991. <Invited>
- 9) R. Tanaka, A. Kurokawa, Y. Sato, M. Magome, Y. Hayakawa, I. Nakatani and J. Kawaguchi, "Signal Processing for FOG," Proc. Fiber Optic and Laser Sensor XII: SPIE, vol.2292, pp.192-202, San Diego, July 1994.
- 10) S. Oho, H. Kajioka and T. Sasayama, "Optical fiber gyroscope for automotive navigation," IEEE Trans. on Vehicular Technology, vol.44, no.3, pp. 698-705, Aug. 1995.
- 11) D.C. Hall, W.K. Burns and R.P. Moeller, "High-stability Er^{3+} -doped super-fluorescent fiber sources," IEEE J. of Lightwave Technol., vol.13, no.7, pp.1452-1460, July 1995.
- 12) A. Ohno, R. Usui, K. Suzuki, K. Okada and K. Sakuma, "Intermediate and moderate grade fiber optic gyroscope for industrial applications," Proc. Fiber Optic and Laser Sensor XII: SPIE, vol.2292, pp.166-176, San Diego, July 1994.
- 13) B. Szafraniec, J. Feth, R. Bergh, J. Blake, "Performance improvements in depolarized fiber gyros," Proc. Fiber Optic and Laser Sensors XIII: SPIE, vol.2510, pp.37-48, Munich, June 1995.
- 14) 才田隆志, 保立和夫, "干渉方式光ファイバジャイロにおけるファラデー効果誘起ドリフトの汎用表現式," 電子情報通信学会信学技報, OPE96-45, pp.73-78, July. 1996.
- 15) K. Hotate and K. Takiguchi, "Drift reduction in an optical passive ring- resonator gyro," Proc. Fiber optic gyros: 15th anniversary conference, SPIE, vol.1585, pp.116-127, Boston, Sept. 1991. <Invited>
- 16) K. Hotate, "Polarization problem and counter-measures in passive/active resonator fiber optic gyros," Proc. Fiber Optic and Laser Sensor XII: SPIE, vol.2292, pp.227-239, San Diego, July 1994. <Invited>
- 17) K. Hotate and T. Kurakake, "Optical fiber ring-resonator composed of an ordinary single mode fiber for resonator fiber optic gyros: Experiment," Proc. Intl. Conf. on Optical Fiber Sensors, pp.434-437, Glasgow, Oct. 1994.
- 18) K. Hotate and M. Harumoto, "Resonator fiber optic gyro using digital serrodyne modulation," Proc. Intl. Conf. on Optical Fiber Sensors, Sapporo, Tu3-5, pp.80-83, May 1996.
- 19) F. Zarinetchi, S.P. Smith and S. Ezekiel, "Fiber laser gyroscope," Optics Letters, vol.16, no.4, pp.22-231, Feb. 1991.
- 20) Y. Tanaka and K. Hotate, "Fiber Brillouin ring laser without instability due to interaction between the polarization lateral modes," IEEE Photonics Technol. Lett., vol.7, no.5, pp.482-484, May 1995.
- 21) Y. Tanaka and K. Hotate, "Lasing characteristics of optical fiber Brillouin ring laser with spatially distributed gain coefficient," IEICE Trans. Electron. vol.E79-C, no.10, pp.1346-1441, Oct. 1996.
- 22) Y. Tanaka, S. Yamasaki and K. Hotate, "Brillouin fiber optic gyro with directional sensitivity," IEEE Photonics Technol. Lett., vol.8, no.10, pp.1367-1369, Oct. 1996.
- 23) S.K. Kim, H.K. Kim and B.Y. Kim, " Er^{3+} doped fiber ring laser for gyroscope applications," Optics Letters, vol.19, no.22, pp.1810-1813, Nov. 1994.