解説

リングレーザジャイロ*

Ring Laser Gyro

鈴木和夫** 上原勇三** 渡辺 弘**

Kazuo SUZUKI, Yuzo UEHARA and Hiroshi WATANABE

Key words: ring laser gyro, Sagnac effect, mechanical dither, mirror, super-smooth polishing, rate sensor

1. はじめに

1950年代後半のレーザ出現以来、計測・加工・通信等の分野においては従来になかった新しいレーザの利用技術が生まれてきた。

かかるレーザの応用技術の一分野として慣性センサの領域にもレーザ技術が波及してきている。そのひとつが角速度検出装置としてのリングレーザジャイロ(以下、RLGという)である。このRLGはその優れた特徴を生かし、現在では各種航空機の角速度センサに使われ、実用化に至っている。さらに、国内においてもRLGの利用分野が徐々に拡大しており、航空機以外として宇宙開発事業団にて開発を進めている次期大型H-IIロケットの慣性誘導装置の角速度センサとしてRLGの採用が決定している¹⁾。

本稿ではこのRLGの基本原理・特徴・現状、及び、今後の動向などについて記述する。

2. RLGの基本原理

光を使って回転運動を検出する原理は1913年にSagnacによって発見された²⁾。この効果をSagnac効果といい、図1には説明のため簡略化した系を示す。図に示すように右回りと左回りの光が何らかの方法により円環状に伝播しているものとする。この系に入力角速度 Ω が加わると、Aから左回りに出発した光は元の位置に戻る間には

AはA'に移動している。従って、左回りの光は入力角速度がゼロの場合に比べてみかけに Δl だけ光路が短くなっている。

一方、右回りの光は同様に Δl だけ光路が長くなっている。この二つを組み合わせると二つの光の間の光路差 ΔL は、光速を c 、光路が囲む面積を A として

$$\Delta L = \frac{4\pi r^2 \Omega}{c} = \frac{4A\Omega}{c}$$

となる。この光路差 ΔL は換言すれば、二つの光の位相差となって現れ、入力角速度を検出するにはこの位相差を検出すればよい。

この原理に立脚して1925年にMichelsonとGaleは2000×1100 ftという巨大な干渉計を作り、地球自転の計測を試み、干渉じまが1/4だけシフトしたことを確認している³⁾。このようにSagnac効果により角速度を検出するには非常に長い光路長を有する干渉計を構成することが必要であり、現代では光ファイバを用いることにより

図1 Sagnac効果の原理図

* 原稿受付 昭和62年10月8日

** 日本航空電子工業(株)(昭島市武蔵野3-1-1)

図2 RLGの原理図

ファイバオプティックジャイロ (FOG) として引き継がれている。

RLG は上記の Sagnac 効果と 1950 年代後半に発見されたレーザの発振原理を巧みに組み合わせた入力角速度検出装置である。この RLG の基本原理はレーザ発見後、間もなく、Herr⁴⁾ と Rosenthal⁵⁾ によってほぼ同時に提唱され、測定精度が向上し、かつ、非常にコンパクトな装置が可能であることが明らかになった。この原理に基づき、Macek と Davis, Jr. により 1963 年に 4 つの放電管を使い、四角形のリングレーザを構成して実験的に角速度の検出に成功し⁶⁾、RLG の開発の歴史が開始された。

図2に RLG の原理図を示す。3つのミラーで光をリング状に伝播し、レーザ発振媒体により光の増幅を行う。このリング共振器内に存在する二つの方向の光の波長 $\lambda_{\pm}$ は入力角速度が存在しない場合、

$$m\lambda_{\pm} = L_{\pm}$$

または

$$\nu_{\pm} = mc/L_{\pm}$$

となる。ここで、 m は非常に大きな整数、 L は光路の長さ、 ν は光の周波数を表す。また、添字の $+$ 、 $-$ はそれぞれ右回り方向、左回り方向の光を表す。

このリング共振器に入力角速度が加わると前述の Sagnac 効果により、2つの光の間にはみかけの光路差 ΔL が発生する。 ΔL と $\Delta \nu$ との関係は上の関係式を微分して、 $\Delta \nu / \nu = -\Delta L / L$ が得られる。この関係と前述の Sagnac 効果の関係式より RLG の入力角速度と 2つの光の周波数差の関係式

$$\Delta \nu = \frac{4A\Omega}{\lambda L}$$

が得られる。これは 33 cm の光路長を持つ発振波長 $6328 \text{ \AA}$ の RLG においては $1^\circ/\text{s}$ の入力角速度に対し、周波数差として約 1.8 kHz に相当する。

3. RLG の長所とエラー要素

RLG の理論は Macek らの原理実験以後、Aronowitz⁷⁾ らによる理論展開をはじめとして急速な進歩を遂げ、今日では、各方面に角速度センサとして実用に供せられている。レーザ共振を利用した RLG は従来のこまの回転による機械式ジャイロに比較して非常に優れた次のような長所を有している。(1) 光を利用していることにより広範囲な角速度を精度よく計測できる。典型的な例では入力角速度範囲 $400^\circ/\text{s}$ 、スケールファクタ非直線性は 10 ppm 以下である。(2) 光の周波数差を検出することにより、RLG の出力は本質的にデジタル出力であり、信号処理が容易で精度が落ちない。(3) 機械的回転部分を持たないことにより、長寿命、かつ、耐環境性に優れている。(4) 光による共振特性を検出原理としているので、通常の機械式ジャイロの欠点である加速度による測定誤差が全くない。(5) 機械式ジャイロのようにこまの回転が定常状態に達するのに時間を要するのに対し、光の共振を得るには瞬時ですみ、スイッチ・オン後即座に高精度な作動状態が得られる。

RLG はこのような優れた利点を持っている反面、原理上からいくつかの克服すべきエラー要素を持っていることもまた確かであり、以下にその主要要素を列挙する。

まず、最も主要なエラー要素はロックイン現象である。このロックイン現象とは低入力角速度においては 2つの光の間の周波数差が小さいことから、一方が他方の周波数に引き込まれてしまい、出力として周波数差が検出できなくなる現象である。その主な原因は光の反射のために用いているミラー表面での乱反射である。通常、注意深く作られたミラーでも 100 ppm 程度の乱反射があり、ひとつの方向に伝播している光の極くわずかの部分が他の方向の光に影響を及ぼすことによりロックインが引き起こされる。従って、ミラーの乱反射を極めて少なくすることが必要であるが、現実的には乱反射はわずかでも残ってしまい、ロックイン現象を完全になくすことは不可能であり、何

図3 リングレーザジャイロの各種方式

らかの手段によりこの不感帯を取り除くことが必要である。

次のエラー要素は入力角速度が存在しないにもかかわらず出力に周波数差が現れる現象、いわゆる、ヌルシフトである。また、同時にヌルシフトを生起させている要因が変動し、出力の安定性が失われることへの対策も重要である。これらはレーザ共振器内の以下の要因で起こる。一般に光が伝播している媒体に流れが存在すると Fresnel-Fizeau 効果によって屈折率の異方向性が生じ、光の伝播する方向と流れの方向と相対関係に依存して光の速度が異なってくる⁹⁾。それによれば、光の速度 v は

$$v = \frac{c}{n} \pm V \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)$$

で与えられる。ここで、 n は媒体の屈折率、 V は媒体の流速であり、式中の±の符号は光と流れの相対関係により決定される。この効果はRLGでは左回りと右回りの光の間の光路差となり、入力角速度の効果と同様に結果的に光の周波数差となって現れる。この媒体の流れはRLGのように気体ガスを直流プラズマ放電を行う以上必ず存在し、Langmuir Flow と呼ばれている。Langmuir Flow はレーザ共振器の放電管径、ガス圧、放電電流、温度等に依存するため⁹⁾、高精度RLGとするためにはこれらの影響を打ち消し、また、その変動を押さえる必要がある。

さらにRLGにおいてはレーザ発振波長の安定度もエラーの要素となっている。一般的にはレーザは非常に優れた単色性を有しているが、RLGでは積極的にレーザ波長の安定度を 1×10^{-8} 以下*にする必要がある。発振波長が本来の波長から偏移するとモードプリングという作用が働き、RLGのスケールファクタがわずかに変化したり、種々の特性の劣化が起こる。そのため一部のミ

ラーの反射面位置を可変できないいわゆるダイヤモンドフラム構造にして光路長制御を正確に実施し、波長安定性を得ることが必要である。

4. RLGの方式と現状

今まで述べてきたようにRLGには原理的に非常に優れた利点を持っていないが、いくつかの解決すべき点を持っている。その最大のポイントがロックイン対策であり、これを解決する方式により様々なタイプのRLGが出現している¹⁰⁾、これを示した図が図3である。この中で現在最も早く開発に成功し、航空機、ロケット等の飛しょう体に搭載されている方式がメカニカルディザ方式である。以下にこの方式に焦点をあて、前述のエラー要素の解決方法を含めてRLGの技術的ポイントについて概説する。

RLGの基本構成を図4に示す。まず、ロックイン現象を防ぐためにメカニカルディザ方式では図中のガラスブロックに微小角振動を常時印加し、ロックイン領域に滞留する時間を極力短くしている。このことにより不感帯を除こうという方式である。他の方式がFaraday効果、Kerr効果など光学的なバイアス素子を利用しているのに対して機械的角振動を与えるという特徴がある。このディザの量は典型的な例では、周波数400 Hz程度、全振幅は数分である。この方式による最も高精度なRLGの出力安定度は $1/1000^\circ/\text{h}$ 台、ランダムノイズで同じく $1/1000^\circ/\sqrt{\text{h}}$ 台の精度を得ている。この中で特にランダムノイズをさらに低減するためにはロックインの原因であるミラーの乱反射率を低下する必要がある。それにはミラー基板の表面粗さを $10 \text{ \AA}$ レベルにすること、ミラーコーティング物質の均一性をよくすることが中心課題である。これを実現するために最新の超精密ポリッシュ方式の導入、あるいは、半導体工業で採用されている最新コーティング方式の導入などミラーの精度向上が活発に行われている。この方

* 波長の変動量と波長の比 ($\Delta\lambda/\lambda$)

図4 RLGの基本構成図

面での開発努力が今後のRLGの精度向上の中心テーマであろう。

また、前述のヌルシフト、及び、その安定性に関してはほぼ技術的対応が達成されたと言ってよい。まず、ガス流に対しては図4のように左右対称な放電系を構成することにより互いにLangmuir Flowによる影響をキャンセルする構造とし、放電電流のコントロールを厳密に行うことにより対応している。レーザー発振の長期安定性を保証するためには、真空シール技術、真空ガス出し技術などの採用により十分な対応が達成されている。

メカニカルディザ方式に限らず、RLGの開発において以上述べた技術のほかに重要な基礎技術としてはガラス加工技術がある。ガラスというぜい性材料に精度よく長い細穴をあけること、光路長制御用ミラーに代表される複雑な形状加工を行うことが必要である。そのためには現在はダイヤモンドコアドリルによる超音波ロータリ加工が有効な加工法として実用に供されており、この方面では既に確立した技術となっている。

5. 今後の動向

現在、RLGは高精度角速度センサとして $0.1^{\circ}/h$ 以下の高精度の領域についてほぼ主流となりつつある。このRLGの今後の動向としては次のような事項が予測される。

(1) センサの小型化

(2) ローコスト化

(3) ディザ方式に変わる新しいバイアス方式への発展

(4) 3個のRLGを一つのガラスブロックに組み込んだ三軸一体型RLG

この動向を支える技術としては、ミラーに代表される超精密ポリッシュ技術、あるいは、3軸ブロックに代表される3次元の精密加工技術などであることは間違いないと予測される。

6. むすび

以上、RLGについて概説してきたが、30年近いRLGの開発の歴史を振り返ると多くの技術の中で超精密加工技術の果たした役割は大きく、また、今後のRLGの発展においてもその寄与するところは大きであろう。従って、この領域での技術開発がRLGの開発のために肝要である。

参考文献

- 1) Y. Tahara, Y. Takizawa, H. Nakayasu, M. Otsuki, Y. Kojima and Y. Uehara: Development of a Space-use Ring Laser Gyroscope in Japan, Symp. Gyro Technology 1985, Sep. (1985) 60.
- 2) E. J. Post: Sagnac Effect, Rev. Mod. Phys., **39**, 2 (1967) 475.
- 3) A. A. Michelson and H. G. Gale: The Effect of the Earth's Rotation on the Velocity of Light, Astrophys. J., **61**, 3, (1925) 140.
- 4) C. V. Herr: Interference of Electromagnetic and Matter Waves in a Nonpermanent Gravitational Field, Bull. Amer. Phys. Soc., **6**, (1961) 58.
- 5) A. H. Rosenthal: Regenerative Circulatory Multiple-beam Interferometry for the Study of Light-propagation Effects, J. Opt. Soc. Amer., **52**, 10, (1962) 1143.
- 6) W. M. Macek and D. T. M. Davis, Jr.: Rotation Rate Sensing with Traveling-wave Ring Lasers, Appl. Phys. Lett., **2**, 3, (1963) 67.
- 7) F. Aronowitz: Theory and Operation of a Traveling-wave Laser, Ph. D. Thesis, New York Univ., (1969).
- 8) F. Aronowitz: The Laser Gyro in Laser Applications, M. Ross, Ed., Academic Press, New York, N. Y., (1971) 143.
- 9) T. J. Podgorski and F. Aronowitz: Langmuir Flow Effects in the Laser Gyro, IEEE J., **4**, 1, (1968) 11.
- 10) 中神浩一: リングレーザージャイロの現状と応用, 日本航空宇宙学会誌, **34**, 388 (1986) 261.