時分割方式により実現した単一参照駆動用コイルを有する マイクロ振動型ジャイロの駆動・検出システム

学生員 澤井 信博* 正員 前中 一介*
学生員 井奥 淳* 正員 藤田 孝之*
非会員 高山 洋一郎*

Time Shared Driving and Detection System for Micro Vibratory Gyroscope with Single Vibration Coil

Nobuhiro Sawai*, Student Member, Kazusuke Maenaka*, Member,
Sunao Ioku*, Student Member, Takayuki Hujita*, Member, Yoichiro Takayama*, Non-member

We report a driving and movement detection system for a micro vibratory gyroscope with double gimbal structure. The gyroscope has two-coils on its outer and inner-gimbals and the inner-gimbal is vibrated by the electromagnetic force. Our system drives inner-coil and simultaneously detects the vibration of the inner-gimbal by time shared control. The system includes a PLL loop with an over-tone oscillator and PLD for achieving time-shared driveing/detection scheme. The system showed good characteristics for angular rate detection.

キーワード：ジャイロ스코プ，マイクロマシニング，自励発振回路，PLD，PLL

Keyword: Gyroscope, Micromachining, Self-oscillation circuitry, PLD, PLL

1. はじめに

近年，MEMS 技術を用いた振動型ジャイロ스코プが多数報告されている^{(1)~(7)}。振動型ジャイロ스코プは運動している物体に角速度が与えられたとき，物体に働くコリオリ力により角速度を検出する機械量センサであり，静電駆動⁽¹⁾⁽⁶⁾，電磁駆動⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁸⁾，圧電駆動⁽²⁾⁽⁷⁾など多様なデバイスが提案されている。我々は比較的容易に大きな駆動力が得られる磁界との相互作用を駆動力とする二重ジンバル構造を持つジャイロ스코プを提案し試作した⁽⁸⁾。本デバイスは単純な構造であり，空気中で動作するなどのメリットを有するが，精度良く角速度の検出を行うには温度変化や加速度印加に伴う構造体の共振周波数の変化に影響を受けない安定した参照振動駆動を行う必要がある。そのためには振動状態を検出し自励発振を行うことが好ましい。しかし，駆動機構とその振動検出機構を別個に設ける方法は構造の複雑化や設計自由度の低下を引き起こし，必ずしも適切な方法ではない。本報告では，単一の参照駆動用コイルを駆動と動作検出に用いるためのアナログ・デジタル混載シス

テムを設計し，時分割処理を行うことで良好な自励発振を行うことができたので報告する。また，本システムを用いて角速度検出の初期特性を測定したので併せて報告する。

2. 構造及び動作原理

ジンバル構造を持つジャイロの構造・動作原理を図 1 に示す。詳細は参考文献(8)に示されているため，ここでは概略の説明にとどめる。構造は，二重のジンバルが，それぞれ直交したトーションバー（ねじりバネ）によって支えられており，これらのトーションバーに対し45度の角度で磁界が与えられている。内ジンバル裏面には図 1 のように円筒状のプルーフマスが設けられている。内ジンバル，外ジンバル共に独立したコイル（薄膜導線）が巻かれており，それぞれの電極を取り出している。内ジンバルは角速度検出に必須の参照振動駆動用，外ジンバルは角速度検出用のジンバルである。

次に本デバイスの動作原理を述べる。まず，内ジンバルのコイルに交流電流を流し，磁界との相互作用で内ジンバルを共振駆動する。一般に，トーションバーでつられた構造体の Q は高く，内ジンバルの共振周波数と外ジンバルの共振周波数を不一致させることによって，内ジンバルのみが内ジンバル用トーションバーを軸に回転振動する。この際，内ジンバル用トーションバーと外ジンバル用トーション

* 姫路工業大学
〒 671-2201 兵庫県姫路市書写 2167
Himeji Institute of Technology
2167 Shosha, Himeji, Hyogo, 671-2201

図1 ジンバル構造をもつジャイロの構造及び動作原理
Fig. 1. Structure and operation principle of double gimbal gyroscope.

図2 内・外ジンバルの共振特性
Fig. 2. Resonance characteristics of inner- and outer-gimbals.

ンバーは直交しているため、この参照振動は外ジンバルには影響を与えず、外ジンバルは停止している。いま、図1に示す方向の角速度 Ω を印加すると、コリオリ力が円筒状ブルーファースの振動方向に直交して発生し、外ジンバル用トーシヨンバーを軸にするトルクが発生する。これによって外ジンバルが参照振動と同期して振動する。このため外ジンバル上のコイルが磁界を横切り、逆起電力が発生する。この逆起電力が角速度出力となる。図2に内ジンバル、外

図3 センサのチップ写真
Fig. 3. Photograph of sensor.

ジンバルの共振特性を示す。0.1Tの磁界中に本デバイスを設置し、内ジンバルのコイルを実効値1mAで駆動したときの内ジンバルの変位(レーザ変位計で測定)および外ジンバルのコイルに発生した逆起電力が示されている。参照駆動がほとんど外ジンバルの運動に寄与していないことがわかる。なお内ジンバルのQ値は約400である。

図3にチップ写真を示す。本デバイスのチップサイズは5mm×5mmであり内ジンバルには11ターン、外ジンバルには9ターンの薄膜導線が形成されている。

3. 時分割による駆動方法

3.1 時分割による駆動の必要性 安定な参照振動を行うためには、内ジンバルの振動状態をS/N比良くモニタし、自励発振を行う必要がある。振動状態をモニタする方法として、内ジンバルに対向した電極を設け静電容量の変化としてモニタする方法や別個に振動検出用コイルを形成する方法などが考えられる。しかしながら前者では容量変化を精度良く検出するためのC/V変換回路を形成する必要がありシステムが大規模になる可能性があることや対向電極と可動構造体のギャップを小さくすると参照振動変位が大きくとれなくなることやスキュー効果によるQ値の低下が発生する。また後者では電極取り出し本数が増え、トーシヨンバーの構造を複雑化あるいは設計自由度を低減させ(本デバイスでは2層配線を用いて、1本のトーシヨンバーで2層2本のコイル電極を2組取り出すきわめて簡易な構造を持っている)、さらに駆動用の電流コイルからの相互インダクタンスにより信号が検出コイルに漏れるという問題も発生する。そこで、時分割処理によって参照振動用の内ジンバルコイルを駆動と信号検出の両方に使用した。

図4 時分割駆動/検出回路及び内ジンバル等価回路
Fig. 4. Time-shared driving/detection circuitry with equivalent circuit of Inner-coil.

図5 信号の位相関係
Fig. 5. Phase relationship of signals.

磁界中を振動する内ジンバル上のコイルは、薄膜導線の抵抗、インダクタンス、振動によってコイルに発生する逆起電力を示す電圧源の直列接続によって表される(図4)。図2より、0.1Tの磁界中で内ジンバルに1mAの交流電流を流すと参照振動として内ジンバルは約80 μ m振動する。このとき内ジンバルのコイルに発生する逆起電力はおよそ100 μ Vであるが、内ジンバルの薄膜導線の抵抗が約500 Ω であるため、駆動電流による抵抗性の電圧ドロップが約500mV発生し、この電圧ドロップと逆起電力とが加算された電圧がコイルの端子電圧となる。従って逆起電力のみをS/N比良く検出することはきわめて難しい。時分割による駆動、検出手法は、駆動電流を間欠的に与え、駆動電流が与えられない(すなわち抵抗性の電圧ドロップが存在しない)時間にコイルの両端電圧を計測する方法である。この方法により振動検出信号は駆動信号の影響を全く受けない。ただし、検出された信号は、正弦波である逆起電力を時間的に切り取った信号となるため、その基本波成分を抽出するためフィルタリングが必要となる。我々は、アナログスイッチとPLDを用い、矩形波で駆動を行って時分割処理による逆起電力のみの検出をおこなった。

時分割の方法としていくつかの方法が考えられる。以下、最適な駆動方法を考察するために、まず本デバイス動作時における信号の位相関係を述べ、2種の時分割法について検討を行った。

3・2 信号の位相関係 各信号の位相関係を図5に示

図6 駆動方法1
Fig. 6. Driving method 1.

図7 駆動方法2
Fig. 7. Driving method 2.

す。本デバイスは内ジンバルを共振状態で用いるため、印加電流つまり駆動力に対し振動位相は90°遅れる。また、磁界中で振動している内ジンバルに発生する逆起電力は参照振動に対し90°進む。従って、印加電流と逆起電力は同相となる。以上の位相関係を考慮し、以下に適切な駆動法を検討する。

3・3 駆動方法1 駆動と振動状態の検出を時分割によって行うため、駆動時間と振動状態のモニタ時間に最適な時間配分が存在する。アナログスイッチを用いた時分割回路を図4に示す。駆動方法1は図6(a)に示すように1周期に2回の正負パルスを与える方法である。駆動のデューティサイクル x を、

$$x = (\text{駆動時間}) / (\text{周期})$$

と定義し、駆動パルスの振幅をA、検出すべき逆起電力の最大振幅をB(図6,7参照)とすると、本駆動方法における駆動信号の基本波成分(コイルを共振振動させるための成分) $d(x)$ は次の式によって表される。

$$d(x) = \frac{4A}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{2}x\right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

同様に、検出信号の基本波成分 $s(x)$ は次式で表される。

$$s(x) = B \left\{ (1-x) - \frac{1}{\pi} \sin(\pi x) \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、全周期にわたり駆動を行ったときの駆動量は $d(1)$ 、

図8 アナログスイッチのスイッチングタイミング
Fig. 8. Switching timing for analog switches.

全周期にわたり検出を行ったときの検出量は $s(0)$ であり、これらの値で規格化した駆動効率を $d(x)/d(1)$ 、検出効率を $s(x)/s(0)$ 、と定義し、同一の駆動量での検出信号の振幅比を示す出力信号効率を $d(x)/d(1) \cdot s(x)/s(0)$ と定義した。図6(b)に計算結果を示す。 $x=0$ 付近では駆動量が小さいため検出信号も小さい。逆に $x=1$ 付近では駆動量は大きいものの検出時間が短くなりやはり検出信号は小さくなる。検出信号を最大にするデューティサイクル x が0.3近傍に存在することがわかる。

3・4 駆動方法2 次に駆動方法2を示す。図7(a)に示すように、1周期に正の駆動パルスを2回、負の駆動パルスを2回与える方法である。本駆動方法における駆動、検出信号の基本波成分は、

$$d(x) = \frac{4A}{\pi} (1 - \cos \frac{\pi}{2}x) \quad (3)$$

および、

$$s(x) = B \left\{ (1-x) + \frac{1}{\pi} \sin(\pi x) \right\} \quad (4)$$

で示すことができる。駆動方法2の駆動/検出/出力効率を図7(b)に示す。出力効率の最大値は0.7近傍に存在しており、その時の駆動効率は駆動方法1より大きい。そのため、大きな駆動力が得られ大参照振動変位を得られる。これは振動形ジャイロの検出出力を大きくすることができることと等価である。駆動方法1と駆動方法2を比較すると、駆動方法1は一周期間 $(1/f_0)$ におけるスイッチング回数が少いため単純な回路構成で実現出来るが、本研究においては角速度検出感度の向上を目指し、出力効率が最大時に駆動効率の高い駆動方法2を採用した。

本考察の結果を確認するために、図8のタイムチャート

図9 時分割処理による共振特性
Fig. 9. Resonance characteristic for time-shared drive/detection scheme.

に従った駆動方法2でコイルを駆動し x をパラメータとして内ジンバルの共振特性を計測した結果を図9に示す。検出出力はロックインアンプで検出出力の基本波成分のみを計測した。コイルの駆動は4Vのパルス電圧である。本来、コイルの駆動は電流源で行うべきであるが、図4に示す内ジンバルの等価回路においてコイルの内部抵抗 R はリアクタンス成分 ωL より十分に大きい。つまり、 $R \gg \omega L$ であるため、電圧駆動で電流駆動を模擬している。また、パルス間に挿入されている $1/50T$ の待ち時間はスイッチングノイズの低減のために設けている。図9の結果より、図7に示されるように x の値が0.6付近で最大になることがわかる。また、 x の値が大きくなるにしたがって共振のピーク周波数がわずかに高い周波数へ変移していく挙動がみられるが、これは振動振幅が大きくなるにともないトーションバーが堅くなる、いわゆるハードスプリング効果が現れていることと観察できる。

4. 角速度検出システム

図10に角速度検出システムのブロック図を示す。ジャイロの内ジンバルを取り込んだPLLループを組み、自励発振を行なって安定な駆動を実現している。また、角速度の検出は外ジンバルに発生した逆起電力を十分に増幅した後、参照振動信号で同期検波することによって実現されている。回路の規模は汎用のディスクリート部品を用いて構成した場合、概略PCカード大の基板で実現できる。ブロック図上部の phase compensator 1 はスイッチトキャパシタバンドパスフィルタ(SC-BPFと表記)の位相遅れを補償するため、また下部の phase compensator 2 は参照振動と角速度検出信号との位相差を補償するために設置されている。また、VCOの発振周波数は参照振動周波数の整数倍となるように設定されており、このVCOの信号が各種の制御信号のマスタークロックとなっている。

本システムの特徴をまとめると次のようになる。

(1) 内ジンバルの共振周波数 f_0 に対して十分高い整数倍の

図 13 角速度検出特性

Fig. 13. Sensor output v.s. rate input.

る。1 Gの加速度印加で励振周波数は約 0.8% 変化している。一方、デバイスの機械的共振周波数をその共振特性をプロットすることによって計測したが、この計測結果とシステムの励振周波数との誤差は最大で 0.025% であり、本システムの励振周波数は、デバイスの機械的共振周波数の変化に十分な精度で追従することが確認できた。

5・2 角速度計測結果 ガスレートジャイロの出力を参照値として角速度の計測を行った。図 13 に測定結果を示す。印加角速度に対しリニアな出力が得られており、角速度検出感度は 16mV(deg./sec)である。現在、角速度と共に加速度を印加した場合、加速度に対する応答もわずかに認められる。これは共振周波数の変化にもとづく Q 値の変化で駆動振幅が変化するためではないかと考えている。本システムでは内ジンバル励振力は一定値であり、実際に振動する振幅は安定化されていない。この振動振幅の安定化は、振動振幅をモニタリングし、振動振幅が一定になるよう駆動パルスの幅を微調整するデジタルフィードバック系を構成することによって実現できると考えられる。現在、振動振幅の安定化と共に、共振周波数の絶対値をデジタル的に計測し、その値によって出力を補正する手法について検討している。

6. まとめ

二重ジンバル構造を持つジャイロ스코ープを最適に駆動するために、PLD とアナログスイッチを用いて時分割処理を実現し、自励発振を実現した。また、ジャイロシステムとしての基本的計測を行い良好な計測結果を得た。

(平成 15 年 2 月 26 日受付, 平成 15 年 8 月 11 日再受付)

文 献

- (1) P.Greiff, B.Boxenhorn, T.King, and L.Niles: "Silicon monolithic micromechanical gyroscope", Proc. Transducers '91, San Francisco, CA, USA, pp.966-968 (1991)
- (2) K.Maenaka and T.Shiozawa: "Silicon Rate Sensor Using Anisotropic Etching Technology", Dig of Tech. Papers, Transducers '93, Yokohama, Japan, pp.642-645 (1993)
- (3) 前中一介, 藤田孝之, 前田宗雄: 「振動形マイクロジャイロの

設計指針」, 電学論 E, 118-E, pp. 377-383 (平 10-7/8)

- (4) M.Hashimoto, C.Cabuz, K.Minami, and M.Esashi: "Silicon resonant angular rate sensor using electromagnetic excitation and capacitive detection", Tech. Dig. of the 12th Sensor Sym. pp.163-166 (1994)
- (5) J.Choi, K.Minami, and M.Esashi: "Silicon Resonant Angular Rate Sensor by Reactive Ion Etching", Tech. Dig. of the 13th SensorSym. pp.177-180 (1995)
- (6) T.Fujita, Y.Konishi, R.Kenny, K.Maenaka, and M. Maeda: "Proposed bi-axial Silicon Angular Rate Sensor", Tech Dig of the 14th Sensor Sym. pp.43-46 (1996)
- (7) T. Fujita, K. Maenaka, and M. Maeda: "Design of two-dimensional micromachined gyroscope by using nickel electroplating", Sensors and Actuators, pp.173-177 (1998)
- (8) K.Maenaka, N.Sawai, H.Sugimoto, H.Suzuki, T.Fujita, and Y.Takayama: "MEMS Gyroscope with Double Gimbal Structure", Dig of Tech. Papers, Transducers '03, Boston, CA, USA, pp.163-166 (2003)

澤 井 信 博 (学生員) 2002年姫路工業大学工学部電子工学科卒業。同年4月姫路工業大学大学院工学研究科電気系工学専攻博士前期課程入学, 現在に至る。

前 中 一 介 (正員) 1984年豊橋技術科学大学大学院情報工学専攻修了。同年, 同大教務職員。89年より神戸市立工業高等専門学校電子工学科講師。93年より姫路工業大学工学部電子工学科助教授, 現在に至る。工学博士。電子情報通信学会, IEEE 各会員。

井 奥 淳 (学生員) 1999年姫路工業大学工学部電子工学科卒業。2001年姫路工業大学大学院工学研究科電気工学専攻博士前期課程修了, 同年同博士後期課程入学, 現在に至る。

藤 田 孝 之 (正員) 1995年姫路工業大学工学部電子工学科卒業。1997年同大学院工学研究科電気電子工学専攻博士前期課程修了, 2000年同博士後期課程修了。2001より姫路工業大学工学部電子工学科助手。マイクロマシニングによるマイクロセンサに関する研究に従事。

高 山 洋 一 郎 (非会員) 1965年大阪大学工学部電子工学卒業。1967年同大学院修士了。同年日本電気(株)入社。2000年より姫路工業大学工学部電子工学科教授, 現在に至る。工学博士。1983 IEEE MTT Society Microwave Prize 受賞。