ハイブリッド支持式回転型ジャイロの開発*

水野 毅** 秋山智広*** 高崎正也** 石野裕二***

Development of a Rotary Gyro with Hybrid Suspension

Takeshi MIZUNO, Tomohiro AKIYAMA, Masaya TAKASAKI and Yuji ISHINO

A new configuration for rotating gyros using magnetic suspension is proposed and fabricated. Gyro is one of inertial sensors and a measuring instrument for angular velocity. The magnetically suspended gyro (MSG) was proposed in which a disk-type rotor is connected to a synchronous motor through a fluid bearing and the motor is fixed to the holder; the holder is suspended by magnetic force without any mechanical contact to achieve high-accuracy measurement. According to this concept, a six-degree-of-freedom (6-DOF) active MSG was developed. However, the MSG had to consume power for compensating the gravitational force acting on the holder by magnetic force. In addition, the miniaturization of the MSG was difficult because four pairs of electromagnets were arranged on the opposite sides of the holder. To solve these problems, a novel gyro with hybrid suspension is designed and fabricated. In this gyro, only two rotational motions of the holder are controlled by four electromagnets while the other 4-DOF motions of the holder are constrained by cross springs and a gimbal. Such configuration is suitable for reducing power consumption and also for miniaturization. This paper shows the basic concepts and measurement principles of the rotary gyro with hybrid suspension. The performance of the gyro is evaluated through the measurement of two-axis angular velocities. It is found from the measured frequency characteristics and the succeeding analysis that imperfect derivatives used in the estimation cause an interaction between the two-axis estimations. Two ways to cope with this problem are also presented.

Key words: gyroscopic sensor, cross spring, magnetic bearing, energy saving, measurement method

1. 緒 言

姿勢・角速度測定に用いられる慣性センサの一種にジャイロセンサ（以下、ジャイロと表記する）がある。ジャイロは、デジタルカメラやコントローラなどの電子機器のモーション取得、航空機や船舶、自立式ロボットの姿勢制御など様々な分野で幅広く応用されている¹⁾²⁾。近年制御機器の複雑化に伴い、多分野にわたって、より緻密な運動計測・制御が求められている。そこで、本研究では、高精度、小型かつ安価なジャイロの実現を目的とする。

ジャイロには様々な種類が存在し、検出原理から、光学型、回転型、振動型に大別される³⁾。検出感度の面で優れているのは、サニャック効果を利用した光学型ジャイロで、航空機³⁾や宇宙⁴⁾の分野で利用されているが、高価なため、家電製品などでは用いられていない。一方、家電製品などで広く用いられているのは、低コストかつ小型な MEMS ジャイロで、その大半は振動型ジャイロである²⁾⁵⁾。最近では高精度が要求される宇宙用の特殊な MEMS ジャイロも開発されている⁶⁾。回転型ジャイロは、回転体の持つジャイロ効果を利用したもので、古くから航空機や船舶の分野で用いられてきた³⁾。原理的に、回転速度を上げれば検出感度を高くすることができるので、小型・低コスト化を達成すれば、高精度が要求される分野での利用が進展する可能性は、依然残っていると思われる。

これまでに、回転型ジャイロの高精度化のため、回転機

構を内包する保持体 (Holder) の支持に磁気浮上を利用した磁気支持ジャイロ (Magnetically Suspended Gyro: MSG) が提案されている⁷⁾。最初に開発された MSG は、3 自由度制御型のもので、保持体の半径方向 (回転体の回転軸と直交する方向) を永久磁石反発型磁気浮上機構でパッシブに支持していた。しかし、パッシブ支持機構の剛性やダンピングが小さいため、過渡的に現れる振動が減衰しにくく、角速度計測に悪影響を与えていた。これに対し、保持体の 6 自由度の運動を全てアクティブに制御する MSG が開発され⁸⁾、3 自由度制御型 MSG と比較して高精度の測定が行えることが実証されている⁹⁾。しかし、電磁石だけを用いて保持体を支持していたため、その重量を支えるために、定常的にかなり大きな電力が消費されていた。さらに、電磁石が保持体を挟み対向するように配置する必要があるため、ジャイロの小型化が技術的に難しくなっていた。

本報では、上記のような問題を解決するために、新たに十字ばねによるパッシブ支持と磁気浮上によるアクティブ支持とを組み合わせ、ハイブリッド支持式ジャイロ (Hybrid-Suspension Gyro: HSG) を提案する。そして、HSG における角速度の計測原理を示し、試作した装置による角速度計測実験の結果を報告する。さらに、実測した周波数特性から、角速度推定を行う際に近似微分を用いることによって生じる問題点を指摘し、これを回避する推定方法も合わせて示す。

2. 磁気支持ジャイロの基本構想

MSG の基本構想⁷⁾を図 1 に示す。同図に示すように、回転体とそれを駆動するモータから構成される回転機構を内

* 原稿受付 平成 26 年 6 月 30 日

掲載決定 平成 26 年 11 月 10 日

** 正 会 員 埼玉大学 (埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

*** 埼玉大学 (埼玉県さいたま市桜区下大保 255)

包する保持体を、電磁石の吸引力によって非接触支持する。このような非接触支持を導入することによって、従来の機械式回転型ジャイロ（図 2 参照）では問題となっていた軸受における摩擦・摩耗の発生を完全になくすることができるので、測定精度の向上が期待できる。また、回転機構に、ハードディスクドライブなどに利用されている安価な部品を利用することができるので、回転体を直接磁気浮上支持する磁気浮上式ジャイロ¹⁰⁾と比較して、低コスト化が容易であるという利点を持っている。

Fig.1 Schematic view of the magnetic suspended gyro

Fig.2 Conventional mechanical gyro

(a) Schematic view

(b) Photograph

Fig.3 Full active MSG

3. 6自由度制御型磁気支持ジャイロ⁸⁾

2章で述べた基本構想を基に開発された6自由度制御型MSGの模式図及び外観を図3に示す。回転機構を内包する保持体は、全自由度を電磁石によりアクティブ制御されている。この装置の問題点として、電磁石を用いて保持体の重量を支持しているため定常的に電力が消費されること、また、電磁石が保持体を挟み対向するように配置されているためジャイロの小型化が技術的に困難ということが挙げられる。なお、MSGにおいて電磁石を用いて保持体の重量を支持するために必要な電力は20 W程度であった。

4. ハイブリッド支持式回転型ジャイロ

4.1 基本構想

MSGの持つ問題点を克服するために提案されたHSGの模式図を図4に示す。回転機構を内包する保持体を十字ばねとジンバルを用いて支持することによって並進3自由度、回転1自由度を拘束し、残りの保持体の回転2自由度を電磁石を用いてアクティブに制御する。このような構造とすることで、従来のMSGでは必要であった保持体の重量を支持するための定常的な電力が一切不要となる。さらに、電磁石を保持体を挟み対向するように配置する必要がなく、保持体の片側だけに電磁石を配置しても保持体の制御が可能なので、ジャイロの小型化が期待できる。

Fig.4 Schematic view of HSG

(a) Model

(b) Rotation direction

Fig.5 Cross spring

Fig.6 Composition of the holder unit

Fig.7 Photographs of the fabricated HSG

Fig.8 Comparison between MSG and HSG

4.2 十字ばね

本装置は保持体の並進3自由度と回転1自由度の拘束に十字ばねとジンバルを利用している。開発した十字ばねのモデル及び十字ばねの剛性の低い回転方向を図5に示す。十字ばねは、図5(b)に示す回転方向の剛性が低く、同時にその他の自由度は高い剛性を有し、回転中心のずれが小さくなるよう設計を行った。本装置において、図6に示すように十字ばねとジンバルを配置し保持体を支持することで、保持体の回転2自由度は低い剛性を有し、その他の自由度は高い剛性を有する構造となる。

4.3 装置構成

製作したハイブリッド支持式回転型ジャイロ、十字ばねとジンバルにより支持された保持体を有する保持体ユニット及び電磁石ユニットの外観を図7に示す。図7(a)に示すとおり、本装置は保持体を有する保持体ユニット(b)と、保持体をアクティブ制御を行うための電磁石を有する電磁石ユニット(c)で構成されている。保持体ユニットでは、十字ばねとジンバルを用いて、保持体の x , y , z 方向の並進3

Table 1 Specification of the gyros

	MSG	HSG
Size m	$0.18 \times 0.14 \times 0.2$	$0.075 \times 0.06 \times 0.1$
Volume m^3	5.0×10^{-3}	3.3×10^{-4}
Weight kg	5	0.7
Power consumption for suspension of radial direction W	20	0

Fig.9 Model of the HSG

自由度及び z 軸周りの回転1自由度を拘束した構造となっている。また、電磁石ユニットを用いて、保持体の x 軸, y 軸周りの回転2自由度のアクティブ制御を行う。電磁石ユニットは、ハウジングに固定され、保持体のアクティブ制御用の電磁石4個、保持体の位置検出用の変位センサ4個が配置されている。

また、回転体を駆動するモータにはハードディスクドライブ用の流体軸受内蔵の同期モータ、変位センサには反射型の光学式変位センサを使用している。

図8は、MSGとHSGとを並べて示したもので、その大きさの違いがよくわかる。また、それぞれの仕様を表1に示す。この表から、本装置はMSGと比べると、体積で15分の1程度、質量で7分の1程度と、小型化かつ軽量化を達成していることがわかる。また、MSGは電磁石を用いて保持体の重量を支持するため定常的に20W程度の電力を要することに対し、本装置は十字ばねとジンバルを利用して保持体を支持しているため、保持体の重量を支持するための電力を必要としないことがわかる。

5. 角速度計測原理

ここでは、アクティブ制御を行う保持体の回転2自由度の運動に関する基礎方程式を導出し、角速度推定式を示す。図9にハイブリッド支持式回転型ジャイロのモデルを示す。図9に示すように各電磁石をEM1~4と呼ぶこととする。また、座標系は図中に示すとおりである。ただし、保持体とハウジングの原点は同一である。保持体及びハウジングの絶対角変位をそれぞれ ψ_x , ψ_y 及び ϕ_x , ϕ_y とおく。それぞれの絶対変位の関係は以下の通りである。

$$\begin{cases} \theta_x = \psi_x - \phi_x \\ \theta_y = \psi_y - \phi_y \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 θ_x , θ_y は保持体とハウジングの相対変位である。こ

のとき保持体の各方向の運動方程式は以下の式で表される。

$$\begin{cases} I_{h_x} \ddot{\psi}_x + I_p \omega_z \dot{\psi}_y + k_x \theta_x = T_x \\ I_{h_y} \ddot{\psi}_y + I_p \omega_z \dot{\psi}_x + k_y \theta_y = T_y \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 I_{h_x} 、 I_{h_y} はそれぞれ保持体とジンバルの x_h 、 y_h 軸周りの慣性モーメント、 I_p は回転体の主軸周りの慣性モーメント、 ω_z は回転体の主軸周りの角速度、 k_x 、 k_y は x_h 、 y_h 軸周りのばね剛性、 T_x 、 T_y は保持体に作用する x_h 、 y_h 軸周りの制御トルクである。次に、制御トルクは以下の式で表される。

$$\begin{cases} T_x = (F_2 + F_4 - F_1 - F_3)l \\ T_y = (F_1 + F_4 - F_2 - F_3)l \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 F_j は電磁石 j の保持体に対する吸引力、 l は各電磁石から各回転運動方向の中心軸までの距離である。次に各電磁石の吸引力は以下の式で表される。

$$F_j = F_s + K_i u_j + K_d d_j \quad (j=1, \dots, 4) \quad (4)$$

ここで、 F_s は各電磁石に与えているオフセット電流による吸引力、 K_i は各電磁石の電磁石係数 (力/電流)、 u_j は電磁石 j への電流指令値の定常値からの変動量、 K_d は各電磁石の電磁石係数 (力/距離)、 d_j は電磁石 j - 保持体間の距離の定常値からの変動量である。また、電磁石 j - 保持体間の距離の定常値からの変動量は以下の式で表される

$$\begin{cases} d_1 = (-\theta_x - \theta_y)l \\ d_2 = (-\theta_x + \theta_y)l \\ d_3 = (\theta_x + \theta_y)l \\ d_4 = (\theta_x - \theta_y)l \end{cases} \quad (5)$$

また、各電磁石に与えられる指令値を各軸方向へ与えられる指令値に変換するため以下のように定義する。

$$\begin{cases} u_1 = u_{\theta_x} + u_{\theta_y} \\ u_2 = u_{\theta_x} - u_{\theta_y} \\ u_3 = -u_{\theta_x} - u_{\theta_y} \\ u_4 = -u_{\theta_x} + u_{\theta_y} \end{cases} \quad (6)$$

これまでの式を整理すると式 (2) は以下の式で表される。

$$\begin{cases} \ddot{\theta}_x + a_{k_x} \dot{\theta}_y + a_{\theta_x} \theta_x = b_{\theta_x} u_{\theta_x} - \ddot{\phi}_x - a_{k_x} \dot{\phi}_y \\ \ddot{\theta}_y - a_{k_y} \dot{\theta}_x + a_{\theta_y} \theta_y = b_{\theta_y} u_{\theta_y} - \ddot{\phi}_y + a_{k_y} \dot{\phi}_x \end{cases} \quad (7)$$

これがアクティブ制御を行う保持体の回転 2 自由度の運動に関する基礎方程式である。ただし、

$$\begin{aligned} a_{k_x} &= \frac{I_p \omega_z}{I_{h_x}}, \quad a_{k_y} = \frac{I_p \omega_z}{I_{h_y}}, \quad a_{\theta_x} = \frac{k_x - 4K_d l^2}{I_{h_x}}, \\ a_{\theta_y} &= \frac{k_y - 4K_d l^2}{I_{h_y}}, \quad b_{\theta_x} = \frac{4K_i l}{I_{h_x}}, \quad b_{\theta_y} = \frac{4K_i l}{I_{h_y}}. \end{aligned}$$

ハイブリッド支持式回転型ジャイロでは、ハウジングに対する 2 自由度の保持体角変位を能動的に制御し、これらの制御入力から各軸の角速度を推定する。ここで、浮上位置をハウジングに対して一定に保つような制御が理想的に達成されていると仮定する。すなわち、次式が成立しているとする。

$$\begin{cases} \theta_x = 0 \\ \theta_y = 0 \end{cases} \quad (8)$$

このとき、基礎方程式 (7) は以下になる。

$$\begin{cases} b_{\theta_x} u_{\theta_x} = \ddot{\phi}_x + a_{k_x} \dot{\phi}_y \\ b_{\theta_y} u_{\theta_y} = \ddot{\phi}_y - a_{k_y} \dot{\phi}_x \end{cases} \quad (9)$$

式 (9) をまとめて表すと、以下の式となる。

$$\begin{bmatrix} b_{\theta_x} u_{\theta_x} \\ b_{\theta_y} u_{\theta_y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{\phi}_x \\ \ddot{\phi}_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & a_{k_x} \\ -a_{k_y} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_x \\ \dot{\phi}_y \end{bmatrix} \quad (10)$$

初期条件をすべて零として式(10)をラプラス変換すると、以下の式が得られる。

$$\begin{bmatrix} b_{\theta_x} U_{\theta_x} \\ b_{\theta_y} U_{\theta_y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s & a_{k_x} \\ -a_{k_y} & s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \end{bmatrix} \quad (11)$$

ここで、 Ω_x 、 Ω_y 、 U_x 、 U_y はそれぞれ $\dot{\phi}_x$ 、 $\dot{\phi}_y$ 、 u_{θ_x} 、 u_{θ_y} をラプラス変換したものである。式 (11) より

$$\begin{bmatrix} \hat{\Omega}_x \\ \hat{\Omega}_y \end{bmatrix} = \frac{1}{s^2 + a_{k_x} a_{k_y}} \begin{bmatrix} s & -a_{k_x} \\ a_{k_y} & s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{\theta_x} U_{\theta_x} \\ b_{\theta_y} U_{\theta_y} \end{bmatrix} \quad (12)$$

ここで、 $\hat{\Omega}_x$ 、 $\hat{\Omega}_y$ は角速度の推定値 $\hat{\phi}_x$ 、 $\hat{\phi}_y$ をラプラス変換したものである。式 (12) の右辺の最初に現れる伝達関数に着目すると、中立極

$$s = \pm j\omega_k \quad (\omega_k = \sqrt{a_{k_x} a_{k_y}}) \quad (13)$$

が存在することがわかる。すなわち、式(12)に基づいて推定を行うと、この極に対応する振動は減衰しないので、推定信号にこの成分が現れてしまうことになる。そこで角速度推定を行う周波数領域では、 $\omega \ll \omega_k$ が成立すると仮定して、 s^2 の項を無視すると、式 (12) は以下の式となる。

$$\begin{bmatrix} \hat{\Omega}_x \\ \hat{\Omega}_y \end{bmatrix} = \frac{1}{a_{k_x} a_{k_y}} \begin{bmatrix} s & -a_{k_x} \\ a_{k_y} & s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{\theta_x} U_{\theta_x} \\ b_{\theta_y} U_{\theta_y} \end{bmatrix} \quad (14)$$

開発するジャイロセンサでは、式(14)に基づいて、制御入力からハウジングの x 及び y 軸周りの絶対角速度を推定する。このとき、式(11)、式(14)から、次式が得られる。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \hat{\Omega}_x \\ \hat{\Omega}_y \end{bmatrix} &= \frac{1}{a_{k_x} a_{k_y}} \begin{bmatrix} s & -a_{k_x} \\ a_{k_y} & s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s & a_{k_x} \\ -a_{k_y} & s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 + \frac{s^2}{\omega_k^2} & 0 \\ 0 & 1 + \frac{s^2}{\omega_k^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

すなわち、式(8)で表されるような理想的な制御が達成されているならば、真値に対する推定値の周波数伝達関数は、次式で与えられることになる。

$$\frac{\hat{\Omega}_\alpha(j\omega)}{\Omega_\alpha(j\omega)} = 1 - \frac{\omega^2}{\omega_k^2} \quad (\alpha = x, y) \quad (16)$$

後述する実験の条件では、 $a_{k_x} = 95.8 \text{ rad/s}$ 、 $a_{k_y} = 122.4 \text{ rad/s}$ であるので、 $\omega_k = 108 \text{ rad/s}$ (17.2 Hz に対応) となる。このときの周波数特性を図 10 に示す。図から ω_k に対応する周波数に零点が存在するので、この周波数を越えて測定することはできない¹¹⁾。また、理想的な制御が実現されていると見なせる周波数帯域より周波数が高くなると、式(8)が成立しなくなるので、次章で示すように、実際の周波数特性は、高周波領域では式(16)

Fig.10 Theoretical frequency response on the assumption of being ideally controlled.

Fig.11 Experimental setup

で与えられる特性から外れることになる¹¹⁾。

6. 角速度計測実験

本装置を用いて 2 自由度角速度計測実験及び測定周波数帯域の取得を行った。実験構成を図 11 に示す。ターンテーブル上に、製作したハイブリッド支持式回転型ジャイロ及びリファレンス用のファイバーオプティカルジャイロ (FOG) を固定し、ターンテーブルを揺動することにより両者に角速度を与えた。このとき、式 (12) を用いて本装置の制御入力から角速度を推定した。ただし、磁気支持を実現するために用いている光学式変位センサ^{7,8)}の出力信号に含まれる高周波ノイズが増幅されることを避けるために、カットオフ周波数 f_c が 40 Hz の近似微分を使用している。さらに、高周波ノイズを除去するために、カットオフ周波数 60 Hz の 1 次ローパスフィルタを通したものを推定値としている。加えて、回転体の不つり合いによって生じる振動成分を除去するため、回転数と同じ周波数の信号成分をオブザーバによって推定し、それを取り除くような不つり合い補償を適用している¹²⁾。

ターンテーブルを 1 Hz で揺動したときの 2 自由度角速度計測結果を図 12 に示す。この結果から、本装置による推定信号は、位相が少し遅れているが、リファレンスに対して良く一致していることがわかる。

次に、測定周波数帯域を調べるため、リファレンス信号に対する推定角速度の周波数応答を取得した結果を図 13 に示す。この結果から、低い周波数帯域においてリファレンスとよく一致していることがわかる。また、特に、x 軸周角速度計測において顕著であるが、15 Hz 付近で、ゲインが小さくなっている。これは、角速度推定式 (12) において、推定される角速度の変動

Fig.12 Two-axis angular velocity measurement ($f_c = 40$ Hz)

Fig.13 Measured frequency responses ($f_c = 40$ Hz)

Table 2 Resolutions of the gyros

		MSG	HSG
Resolution deg/s	x-axis	0.18	0.07
	y-axis	0.16	0.12

は ω_k に比べて十分遅いものと仮定した推定式であることによるものと考えられる。加えて、x 軸周角速度計測と y 軸周角速度計測とを比較すると、周波数特性が異なることがわかる。この原因については次章で詳しく述べる。

また、静止状態での出力から分解能を測定した結果を表 2 に示す。この表から、6 自由度制御型磁気支持ジャイロと同程度あるいはそれ以上の性能が得られていることがわかる。十字ばねによるパッシブ支持を用いているのにもかかわらず、このような性能が実現されている理由の一つとして、十字ばねによるパッシブ支持の剛性は、3 自由度制御型磁気支持ジャイロで用いた反発型磁気支持機構の剛性と比べて大きいので、パッシブ支持している方向でも振動が発生しにくいことが挙げられる。

7. 近似微分の影響について

前章において、両軸周角速度計測の周波数特性が異なるといった結果が得られた。この原因としては、式 (14) に基づいて角速度を推定する場合に、高周波のノイズ成分を低減するため、実際には近似微分を用いていることと、x 軸周角速度と y 軸周角速度に同時に角速度を入力しているためである。これを以下で解析的に示す。理想的な微分の代わりに、

カットオフ周波数 f_c の近似微分を用いた場合、式(14)は、次式のようになる。

$$\begin{bmatrix} \hat{\Omega}_x \\ \hat{\Omega}_y \end{bmatrix} = \frac{1}{\omega_k^2} \begin{bmatrix} \frac{s}{T_c s + 1} & -a_{k_x} \\ a_{k_y} & \frac{s}{T_c s + 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{\theta_x} U_{\theta_x} \\ b_{\theta_y} U_{\theta_y} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$T_c = \frac{1}{2\pi f_c} \quad (18)$$

式(17)と式(11)とを組み合わせると、次式が得られる。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \hat{\Omega}_x \\ \hat{\Omega}_y \end{bmatrix} &= \frac{1}{\omega_k^2} \begin{bmatrix} \frac{s}{T_c s + 1} & -a_{k_x} \\ a_{k_y} & \frac{s}{T_c s + 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s & a_{k_x} \\ -a_{k_y} & s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 + \frac{s^2}{\omega_k^2 (T_c s + 1)} & -\frac{a_{k_x} T_c s^2}{\omega_k^2 (T_c s + 1)} \\ \frac{a_{k_y} T_c s^2}{\omega_k^2 (T_c s + 1)} & 1 + \frac{s^2}{\omega_k^2 (T_c s + 1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (19)$$

式(19)から、周波数が高くなると、 x 及び y 軸周りの角速度の推定に干渉が生じてしまうことがわかる。これが、 x 軸周りと y 軸周りとで周波数特性が異なったことの原因である。図 11(b)に示

Fig.14 Frequency responses calculated according to Eq.(19) with $f_c = 40$ Hz

Fig.15 Frequency responses calculated according to Eq.(19) with $f_c = 300$ Hz

すような姿勢でジャイロを固定してテーブルを揺動させた場合、 $\Omega_x = -\Omega_y$ が成立する。このような場合に、 $f_c = 40$ Hz として式(19)から周波数特性を計算した結果を図 14 に示す。図から、 x 軸周りと y 軸周りとで周波数特性が異なっていることが確認できる。

この干渉の影響は、 T_c を小さく、すなわち f_c を高くすることによって、小さくすることができる。図 15 は、 f_c を 300 Hz とした場合の計算結果である。図から、 x 軸周りと y 軸周りとで周波数特性が違いが小さくなっていることがわかる。

実際に、 f_c を 300 Hz としたときの角速度計測結果及び周波数応答をそれぞれ図 16、図 17 に示す。これらの結果から、近似微分のカットオフ周波数を高くすると、ノイズが大きくなること、 x 軸周りと y 軸周りの周波数特性の違いが小さくなることがわかる。よって、カットオフ周波数を高くするほど、角速度計測結果に含まれるノイズは大きくなることが考えられるため、干渉を小さくすることと角速度計測結果に含まれるノイズ小さくすることは、トレードオフの関係であると考えられる。

また、式(14)に基づいて推定を行う場合に、微分演算だけではなく、比例演算についても同じローパスフィルタを通すようにすれば、上述した干渉をなくすることができる。すなわち、式(17)の代わりに、

$$\begin{bmatrix} \hat{\Omega}_x \\ \hat{\Omega}_y \end{bmatrix} = \frac{1}{\omega_k^2} \begin{bmatrix} \frac{s}{T_c s + 1} & -\frac{a_{k_x}}{T_c s + 1} \\ \frac{a_{k_y}}{T_c s + 1} & \frac{s}{T_c s + 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{\theta_x} U_{\theta_x} \\ b_{\theta_y} U_{\theta_y} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Fig.16 Two-axis angular velocity measurement ($f_c = 300$ Hz)

Fig.17 Measured frequency responses ($f_c = 300$ Hz)

Fig.18 Frequency responses calculated according to Eq.(21) with $f_c = 40$ Hz

に基づいて推定を行うようにすると、式(18)に対応する式は、

$$\begin{bmatrix} \hat{\Omega}_x \\ \hat{\Omega}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{s^2}{\omega_k^2 (T_c s + 1)} & 0 \\ 0 & 1 + \frac{s^2}{\omega_k^2 (T_c s + 1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \end{bmatrix} \quad (21)$$

となる。式(21)に基づいて周波数特性を計算した結果を図 18 に示す。図から、 x 軸周りと y 軸周りとで周波数特性が同一となっていることが確認できる。

さらに、この場合の実際の角速度計測結果及び周波数応答をそれぞれ図 19、図 20 に示す。ただし、 f_c は 40 Hz としている。この方法を用いると、ノイズを大きくすることなく、 x 軸周りと y 軸周りの周波数応答の違いを小さくすることができる。また、約 10 Hz まではゲインの低下も小さく、位相も揃っているため、この周波数が測定可能な周波数帯域の目安となる。

8. 結 言

本研究では、次のような結果を得た。

- (1) 低消費電力化及び小型化を実現する新たな構造をもったハイブリッド支持式回転型ジャイロを提案、開発を行い、低消費電力化のみこめる構造及びジャイロの体積は従来のものと比べ 15 分の 1 以下と小型化を実現した。
- (2) 開発したジャイロの基本構想を示し、角速度の測定原理を明らかにした。
- (3) 開発したジャイロを用いて角速度計測実験及び測定周波数帯域の取得を行い、10 Hz 程度までの角速度計測が可能であることを示した。
- (4) x 軸周りの角速度計測と y 軸周りの角速度計測とで周波数特性が異なる原因が、純粋な微分の代わりに近似微分を用いたために、軸間の相互干渉が生じていることであることを示した。
- (5) 上記の改善方法を提案し、その有効性を示した。

参 考 文 献

- 1) 坂本修ら、ジャイロ活用技術入門—その原理・機能・応用ポイントを

Fig.19 Two-axis angular velocity measurement ($f_c = 40$ Hz)

Fig.20 Measured frequency responses ($f_c = 40$ Hz)

詳述一、株式会社工業調査会、(2002)。

- 2) Acar, C. and Shkel, A.: MEMS Vibratory Gyroscopes -- Structural Approaches to Improve Robustness ---, Springer (2008).
- 3) Lawrence, A.: Modern Inertial Technology Navigation, Guidance, and Control, Springer-Verlag (1993).
- 4) 佐藤秀俊、宇宙用リングレーザジャイロ、計測と制御、35, 11, (1996) 857.
- 5) Piyabongkam, D., Rajamani R. and Greminger, M., The Development of a MEMS Gyroscope for Absolute Angle Measurement, IEEE Trans. on Control Systems Technology, 13, 2, (2005) 185.
- 6) Rozelle, R. M.: The Hemispherical Resonator Gyro: From Wineglass to the Planets, <http://www.northropgrumman.com/Capabilities/HRG/Documents/hrg.pdf> 2014.6.25 アクセス。
- 7) 丸山 裕、水野 毅、高崎 正也、石野 裕二：3 自由度アクティブ制御型磁気支持ジャイロセンサの開発、日本機械学会論文集C 編、76, 766, (2010) 1445.
- 8) Akiyama, T., Mizuno, T., Takasaki, M., Ishino, Y. and Obara, K.: Development of a Totally Active Magnetically Suspended Gyro, Mechatronics, to appear.
- 9) 秋山 智広、小原 恭輔、高崎 正也、石野 裕二、水野 毅：6 自由度制御型磁気支持ジャイロセンサにおける測定感度評価、日本機械学会関東支部第 19 期総会講演会 講演論文集、(2013) 509.
- 10) Maruyama, Y., Mizuno, T., Takasaki, M., Ishino, Y., Ishigami, T. and Kamen, H., An Application of Active Magnetic Bearing to Gyroscopic and Inertial Sensors, Journal of System Design and Dynamics, 2, 1, (2008) 155.
- 11) Maruyama, Y., Mizuno, T., Takasaki, M., Ishino, Y. and Kamen, H., Extension of Measurement Bandwidth in an AMB-based Gyroscopic Sensor, Mechatronics, 19, 8, (2009) 1261.
- 12) 秋山智広、水野 毅、高崎正也、石野裕二：ハイブリッド支持式回転型ジャイロへの不つり合い補償の適用、日本AEM学会誌、22, 2, (2014) 22