T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	3軸ジャイロセンサ主軸方向と感度の検定手法の確立
Title(English)	Establishment of Examination Method for Sensor Directions and Sensitivities in 3-Axis Gyroscopes
著者(和文)	大江優作, 木村 仁, 伊能教夫
Authors(English)	Yusaku Ohe, Hitoshi Kimura, NORIO INOU
出典(和文)	電気学会 電子・情報・システム部門大会講演論文集（CD版）, pp. 509-513
Citation(English)	, pp. 509-513
発行日 / Pub. date	2017, 9

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

TC12-1

3 軸ジャイロセンサ主軸方向と感度の検定手法の確立

大江　優作*　　木村　仁　　伊能　教夫（東京工業大学）

Establishment of Examination Method for Sensor Directions and Sensitivities in 3-Axis Gyroscopes

Yusaku Ohe*, Hitoshi Kimura, Norio Inou, (Tokyo Institute of Technology)

A 3-axis gyroscope is used on the assumption that the axial directions of the sensors are orthogonal to each other and equal sensitivities. However, these conditions are not guaranteed, and the differences of sensor direction and sensitivity cause measurement error. This study aims to establish a calibration method for actual sensor directions and sensitivities to reduce the error. This paper describes an exciter for the calibration, which inputs sinusoidal angular velocity to all sensor axes of the gyroscope simultaneously. The exciter enables to identify the sensor directions and sensitivities from their phase and amplitude of sinusoidal outputs. A prototype exciter is mainly composed of two rotational platforms. The base platform rotates the whole exciter at a constant angular velocity. The sensor platform is on the base platform, and rotates in a direction orthogonal to the rotational direction of the base platform. The base platform inputs main angular velocity to the sensor, and the sensor platform changes the sensor angle. With this mechanism, the exciter inputs sinusoidal angular velocity, whose amplitude and phase correspond to the rotational speed of the base platform and the angle of the sensor platform, respectively. This paper discusses the performance of the prototype exciter.

キーワード：ジャイロセンサ，センサ方向，感度補正，加振装置
(Gyroscope, sensor direction, sensitivity correction, exciter)

1.　諸言

3 軸ジャイロセンサとは直交する 3 方向の角速度を検出するデバイスであり，3 つの角速度センサから構成されている．このセンサは通常センサパッケージ軸とセンサ実軸方向が完全に一致しており，かつセンサ感度もすべて等しいという前提で利用されている．ところが実際にはこの前提は必ずしも保証されているわけではない（図 1）．さらに各方向で感度のばらつきもあり得るため，センサ方向と感度のずれは測定誤差の原因となる．ジャイロセンサの性能評価指標は既に ISO などで定義されているが[(1)(2)(3)]，多軸センサの実軸方向や感度のばらつきについての議論はほとんどなされていないのが現状である．しかし一つの 3 軸ジャイロセンサにおいて，各センサの方向および感度を知ることができれば座標変換と感度補正によって正確な 3 次元角速度ベクトルを算出できる[(4)(5)]．このようなセンサ補正技術があれば，6 軸センサの測定値を積分することで位置と姿勢を推定するデッドレコニングの精度向上などが期待される[(6)]．

我々は，2 軸の回転機構を用いることで 3 軸ジャイロセンサの実軸方向および感度を検定する手法を提案している[(7)]．本手法は，安価な検定装置を用いて単純な制御でセンサ検定の実現が期待できるものである．本研究では提案手法の確立のため，実際の検定装置の製作を行い，その性能を検証する．

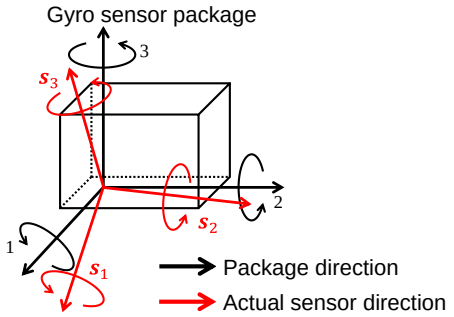


Fig. 1.　Package and sensor direction

2.　測定手法と原理

〈2･1〉　検定装置機構

提案する 3 軸ジャイロセンサ検定装置の機構図を図 2，模式図を図 3 に示す．装置は対偶 O_1 と O_2 を持つシリアルリンク機構と見なすことができる．また，図 3 に示すように，O_2 座標系はジャイロセンサ搭載テーブルとなっていて，ジャイロセンサが固定される．このときジャイロセンサは z_1 軸および z_2 軸の回転を同時に受ける．ここでセンサテーブルに与えられる角速度 $\boldsymbol{\omega}_2$ について考える．$\boldsymbol{\omega}_2$ は静止座標系から見たセンサテーブルの角速度を，O_2 座標系で表したものであり，以下の式（1）で表すことができる．

© 2017 IEE Japan

$$\boldsymbol{\omega}_2 = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \sin\theta_2 \\ \dot{\theta}_1 \cos\theta_2 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad \cdots\cdots (1)$$

また本機構において回転対偶 1 および 2 はともに等速円運動を行うため，$\dot{\theta}_1$ および $\dot{\theta}_2$ は一定となる．よって式（1）からセンサパッケージの受ける角速度成分 ω_x と ω_y は，θ_2 に応じて正弦波状に変化することがわかる．

さらにこのときジャイロセンサの各軸が受ける角速度 $\boldsymbol{\omega}_s$ について考える．センサテーブルに対するジャイロセンサの姿勢を R で表す．ここで R は x 軸 y 軸 z 軸の順に α, β, γ 回転させる回転行列とする．このときジャイロセンサの各軸が受ける角速度 $\boldsymbol{\omega}_s$ は以下の式（2）で表せる．なお具体的な α, β, γ の値については後述する．

$$\boldsymbol{\omega}_s = R^T \boldsymbol{\omega}_2 \quad \cdots\cdots (2)$$

ただし，

$$R = \begin{bmatrix} \cos\beta\cos\gamma & -\cos\beta\sin\gamma & \sin\beta \\ \cos\alpha\sin\gamma+\sin\alpha\sin\beta\cos\gamma & \cos\alpha\cos\gamma-\sin\alpha\sin\beta\sin\gamma & -\sin\alpha\cos\beta \\ \sin\alpha\sin\gamma-\cos\alpha\sin\beta\cos\gamma & \sin\alpha\cos\gamma+\cos\alpha\sin\beta\sin\gamma & \cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

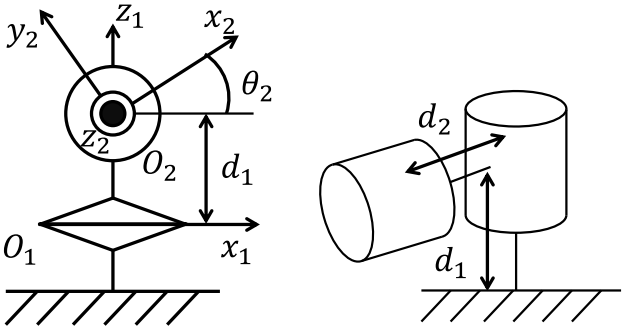


Fig.2.　Kinematic diagram of the exciter machine

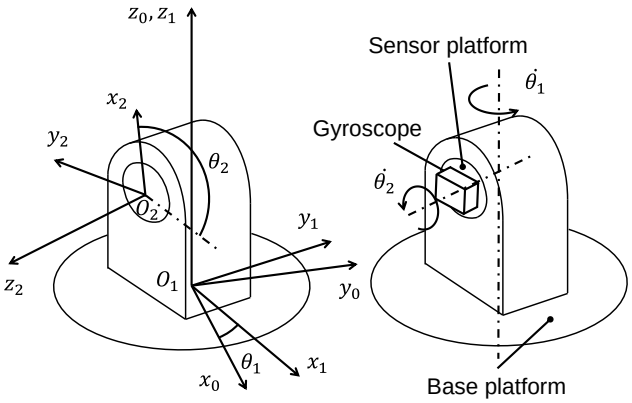


Fig.3.　Schematic diagram of the exciter machine

〈2･2〉　測定原理

検定装置上の 3 軸ジャイロセンサについて，一つの軸に注目しセンサ出力を見ると，式（1）より θ_2 に応じて正弦波状に変化する出力が得られることがわかる．ただし，注目するセンサ軸は z_2 とは平行ではないとする．この時ジャイロセンサの姿勢と角速度から出力の推定が可能であるが，推定値と実際の出力とは一致しない．推定される正弦波と実際に得られる正弦波を比較すると，位相差からセンサの実軸方向のずれ $\Delta\theta_i$ の検定が可能となる(図 4)．さらに後述する方法でセンサ軸の 3 次元的方向が同定できれば，正弦波の振れ幅から感度の検定も可能となる．また検定時にジャイロセンサの 3 つの軸がすべて z_2 と平行でなければ，一度で 3 軸全ての実軸方向および感度の検定が可能となる．

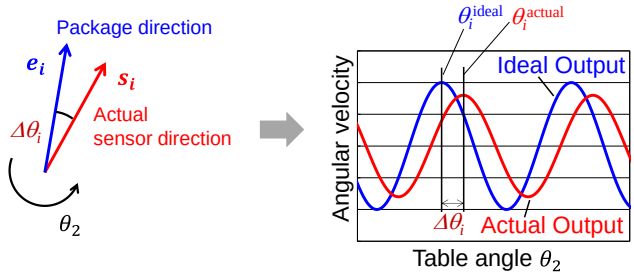


Fig.4.　Phase angle of sin wave output by sensor inclination

〈2･3〉　センサ軸の 3 次元的方向の同定

センサパッケージを基準とした座標系における，センサ実軸方向ベクトル $\boldsymbol{s}_i$ (i = 1, 2, 3) の同定方法について述べる．前述したように，本検定手法ではセンサ実軸方向ベクトル $\boldsymbol{s}_i$ を，センサテーブルに投影したベクトルの方向を同定しているといえる．また投影ベクトルの方向を同定したということは，センサ実軸方向と z_2 軸を含む平面を同定したことと同義である．提案する検定手法では，センサの姿勢 q (= 1, 2) を変更し 2 度測定を行う．2 度測定を行うことで $\boldsymbol{s}_i$ を含む平面を 2 枚同定することができ，平面同士の交線を求めることでセンサ実軸 $\boldsymbol{s}_i$ の同定が可能となる．

さらに具体的なセンサ方向の測定について述べる．センサ姿勢 q (= 1, 2)での検定において，センサテーブルの座標系，O_2 に対するセンサ姿勢を回転行列 R_q とする．このとき検定によって得られる平面 ψ_{iq} を図 5 に示す．ここで ψ_{iq} の法線ベクトル $\boldsymbol{n}_{iq}$ は，式（4）に示すようにセンサ実軸方向 $\boldsymbol{s}_i$ を R_q によって回転させたベクトルと，z_2 軸方向の単位ベクトル $\boldsymbol{e}_{z2}$ の外積で求まる．

$$\boldsymbol{n}_{iq} = R_q \boldsymbol{s}_i \times \boldsymbol{e}_{z2} \quad \cdots\cdots (4)$$

提案する検定装置によって得られる測定値は，センサ出力が最大となる時のセンサテーブルの位相であるため，式 (4) における左辺が求まる．ジャイロセンサの姿勢を変更させ検定を行い (q = 1 から q = 2)，一つのセンサ方向 i に対して 2 つの平面の法線ベクトル $\boldsymbol{n}_{i1}$, $\boldsymbol{n}_{i2}$ が得られると，センサ実軸方向ベクトル $\boldsymbol{s}_i$ は以下の式（5）で表すことができる．

$$\frac{R_1^{-1}\boldsymbol{n}_{i1} \times R_2^{-1}\boldsymbol{n}_{i2}}{\left| R_1^{-1}\boldsymbol{n}_{i1} \times R_2^{-1}\boldsymbol{n}_{i2} \right|} = \pm \boldsymbol{s}_i \ (i = 1, 2, 3) \quad \cdots\cdots (5)$$

© 2017 IEE Japan

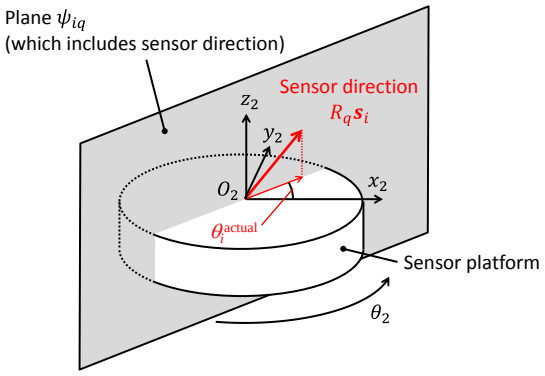


Fig.5. Measured plane which includes actual sensor direction

〈2･4〉 センサ出力の補正方法

ジャイロセンサの実軸方向ベクトル $\boldsymbol{s}_i$ が同定できれば，正弦波出力の振れ幅からセンサそれぞれの感度 k_i を求めることができる．ここでセンサ実方向テンソル S および，個別感度テンソル K を以下のように定義する．

$$S = \begin{bmatrix} \boldsymbol{s}_1^T \\ \boldsymbol{s}_2^T \\ \boldsymbol{s}_3^T \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{bmatrix} \quad \text{.....(6)}$$

理想的なセンサであれば，センサ実方向テンソル S は単位行列 E に等しくなり，個別感度テンソル K はセンサ感度を k としたとき kE となる．しかし実際の製品であれば S および K は理想の値よりも多少ずれがある．センサに入力された角速度 $\boldsymbol{\omega}_{in}$ に対して，センサが実際に出力した電圧が $\boldsymbol{v}_{out} = [v_1, v_2, v_3]^T$ であったとき，以下の式が成り立つ．

$$\boldsymbol{v}_{out} = KS\boldsymbol{\omega}_{in} + \boldsymbol{v}_{off}, \quad \boldsymbol{\omega}_{in} = (KS)^{-1}(\boldsymbol{v}_{out} - \boldsymbol{v}_{off}) \quad \text{.....(7)}$$

なお $\boldsymbol{v}_{off}$ はセンサのオフセット電圧であり，上記のセンサ検定における正弦波出力の基線から求めることができる．

以上のように，提案手法によって 3 軸ジャイロセンサのセンサ実方向テンソルおよび個別感度テンソルを求めれば，センサ軸方向とパッケージ方向が一致していなくても，また各センサ感度のばらつきがあっても正確な 3 次元角速度ベクトル $\boldsymbol{\omega}_{in}$ を推定することが可能となる．

3. ジャイロセンサ検定実験

〈3･1〉 検定装置の製作

実際に製作したジャイロセンサ検定装置を図 6 に示す．検定装置は，装置全体を回転させるベーステーブルと，ジャイロセンサを搭載するセンサテーブルから構成されており，これらのテーブルは同時に等速円運動を行う．このとき両テーブルはギアで拘束されているため，1 自由度での駆動が可能となる．またセンサテーブルの反対側には，同じ質量，慣性モーメントになるように設計されたカウンターウェイトが設置されている．カウンターウェイトはセンサテーブルと逆方向に同じ速さで回転し，装置全体のバランスを保つ．また装置の機構を描いた模式図を図 7 に示す．図 7 に示すように，装置のモータが回転したとき，ギアで連結されているベーステーブルが回転する．また装置の中心には地面に固定されたシャフトがある．このシャフトに固定されたギアと，ベーステーブル上のギア A，B がかみ合うことで，ベーステーブル，ギア A，ギア B が共に回転する．ここでギア A およびギア B はそれぞれセンサテーブルとカウンターウェイトにつながっているため，ベーステーブル，センサテーブル，カウンターウェイトを 1 自由度で同時に回転させることができる．この機構では一つのモータを等速で回転させるだけで所望の運動を得ることができるため，簡便な制御系で装置の駆動が可能となる．なお装置のモータは maxon，DC モータ RE 30 Ø30 mm，エンコーダは Canon，レーザーロータリエンコーダ R-1SO (4 逓倍，81000 パルス/回転) を用いた．

また本装置において，ギアはすべて非接触のマグネットギアを用いる．今回の設計では，プロスパイン社の円筒×円筒タイプのギア(MP3560-12)と円盤×円筒タイプのギア(MP3535-12)を用いることとした．実物の写真を図 8 に示す．マグネットギアは図 9 に示すような配置で N･S 極が配置されており，非接触でギア比 1:1 での回転の伝達が可能となる．非接触での運動伝達をするためモータ駆動時の細かな振動がジャイロセンサに伝わることを防止する効果が期待できる．

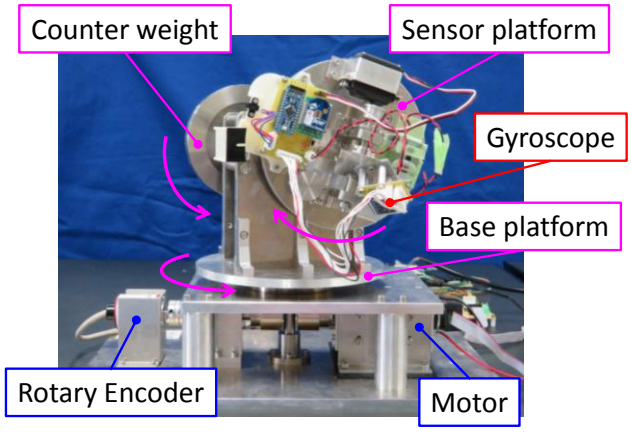


Fig.6. Whole view of the exciter

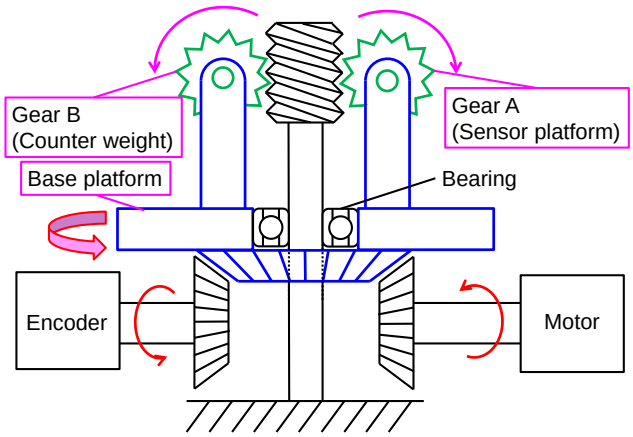
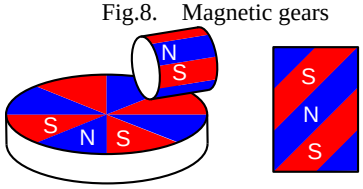


Fig.7. Diagram of the exciter

© 2017 IEE Japan

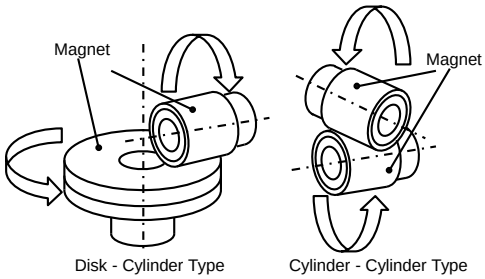
Disk-Cylinder type　　Cylinder-Cylinder type

Fig.8.　Magnetic gears



Disk – Cylinder Type　　Cylinder – Cylinder Type

a) Arrangement of the magnet



Disk - Cylinder Type　　Cylinder - Cylinder Type

b) Rotational direction

Fig.9.　Arrangement of the magnet gears

またセンサ姿勢変更機構について述べる．前述したとおり，提案する検定手法においてセンサの姿勢を変更し 2 度の測定を行う必要がある．ジャイロセンサの 2 つの姿勢の様子を図 10 に示す．またこの姿勢におけるセンサ軸方向を表したものを図 11 に示す．ここで図 11 における φ はセンサ台の傾きであり，$\cos\varphi = 1/\sqrt{3}$ となる角度 ($\varphi \approx 57.74°$) とした．姿勢 2 は姿勢 1 を y 軸周りに- 90 度回転させたものである．この姿勢の組み合わせは，姿勢 1 においてセンサパッケージの軸を xy 平面に投影したときの長さが等しくなり，姿勢 2 でも 3 軸の投影長さが長くとれる組み合わせである．また姿勢 1 の時にジャイロセンサにかかる角速度にについて考える．式（3）における α, β, γ はそれぞれ以下の式（8）となるので，これらの値を式（2）に代入するとセンサにかかる角速度 $\boldsymbol{\omega}_s$ は式（9）で表すことができる．

$$\alpha = \varphi(\approx 57.74°),\quad \beta = 0,\quad \gamma = 45° \quad \text{.....(8)}$$

$$\boldsymbol{\omega}_s = R_1^T \boldsymbol{\omega}_2$$

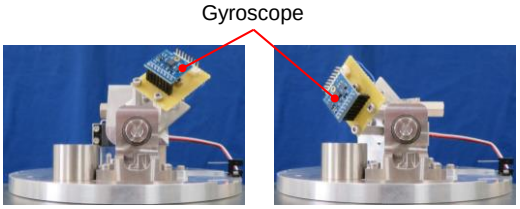
$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ 0 & -\frac{2}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \sin\theta_2 \\ \dot{\theta}_1 \cos\theta_2 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \dot{\theta}_1 \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{6}}{3}\sin\left(\theta_2 + \frac{\pi}{6}\right) \\ \frac{\sqrt{6}}{3}\sin\left(\theta_2 + \frac{5\pi}{6}\right) \\ \frac{\sqrt{6}}{3}\sin\left(\theta_2 + \frac{3\pi}{2}\right) \end{bmatrix} + \dot{\theta}_2 \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

上式より，ジャイロセンサのすべての軸に正弦波状の角速度が入力されることがわかる．右辺第 1 項は，ベーステーブルの回転 $\dot{\theta}_1$ によって発生する角速度を表しており，センサテーブルの位相 θ_2 に応じて正弦波状に変化していることがわかる．また第 2 項は，センサテーブルの回転 $\dot{\theta}_2$ によって発生する角速度であり，常に一定の値となっている．この値は正弦波のオフセットとなって出力される．　また姿勢 2 は姿勢 1 を y 軸周りに- 90 度回転させたものであるため，センサの受ける角速度は以下のように表せる．

$$\boldsymbol{\omega}_s = R_2^{-1}\boldsymbol{\omega}_2 = R_1^{-1} \begin{bmatrix} \cos-90° & 0 & -\sin-90° \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin-90° & 0 & \cos-90° \end{bmatrix} \boldsymbol{\omega}_2$$

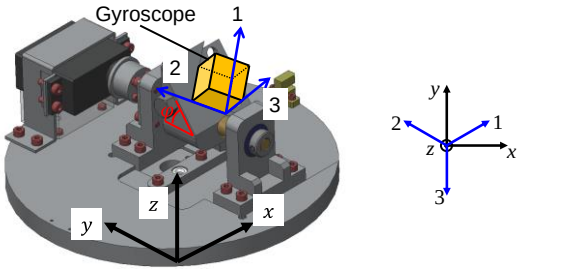
$$= \dot{\theta}_1 \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}}\sin\left(\theta_2 + \frac{\pi}{2} + \varphi\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}}\sin\left(\theta_2 + \frac{\pi}{2} + \varphi\right) \\ \sin\left(\theta_2 + \pi + \varphi\right) \end{bmatrix} + \dot{\theta}_2 \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{.....(10)}$$

姿勢 2 の場合も姿勢 1 と同様に，オフセットを持つ正弦波状の角速度がセンサに入力されるのがわかる．なお，式 (9)（10）の正弦波の振れ幅および位相は，図 11 に示すセンサパッケージ軸を xy 平面に投影した矢印の，長さおよび方向にそれぞれ対応している．



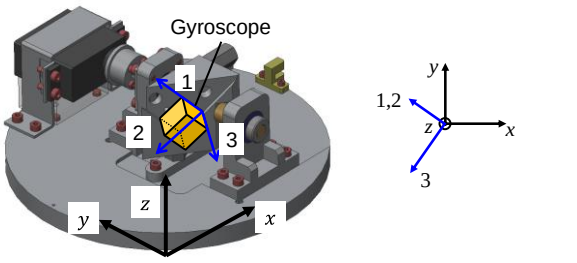
a) Posture 1　　b) Posture 2

Fig.10.　Two postures of the sensor



Overview of the fixed gyroscope　　3 axes projected on the xy plane

a) Posture 1



Overview of the fixed gyroscope　　3 axes projected on the xy plane

b) Posture 2

Fig.11.　Sensor axes projected on the xy plane

© 2017 IEE Japan

〈3･2〉 動作確認実験

検定装置を 0.5 Hz で駆動し，ベーステーブルの回転周期をロータリエンコーダで測定した. その結果を図 12 に示す. 図 12 からベーステーブルは概ね一定速度で回転していることが確認できる．さらにセンサテーブル上にジャイロセンサ (Parallax Inc. L3G4200D) を搭載し，角速度を計測した. またセンサテーブル上にはジャイロセンサに加えてフォトインタラプタも搭載している．これは角速度とテーブルの回転位置を同期するためのインデックスとして用いる．ベーステーブル上に図 13 に示すような遮光板を設置することによって，センサテーブルが 1 回転するごとに遮光板を検知する．ここからセンサテーブル回転周期を測定することができる．ジャイロセンサの出力とフォトインタラプタの出力を図 14 にプロットする．なおフォトインタラプタの受光素子，発光素子間に遮光板が存在するとき 1，なにも存在しないとき 0 としている．図 14 からわかるようにジャイロセンサによって正弦波状の角速度が検出されている．またセンサテーブルが 1 回転するごとにフォトインタラプタが遮光板を検知していることもわかる．今後，このデータをテーブルの位相と同期させることでジャイロセンサの検定を目指す.

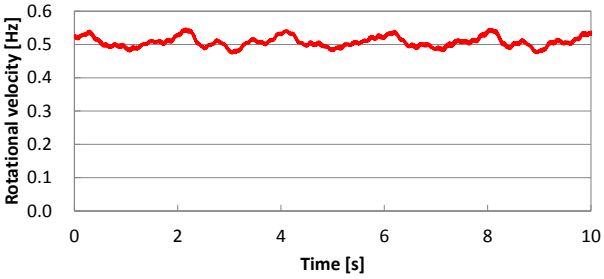
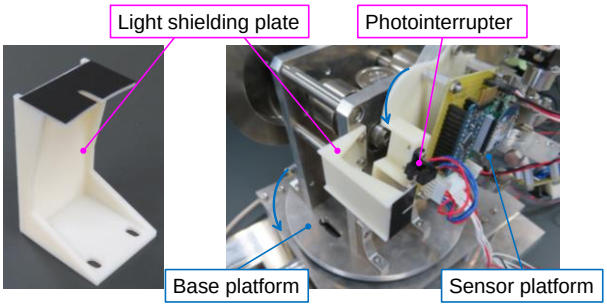


Fig.12. Rotational velocity of the base platform



a) Light shielding plate　　b) Light shielding plate on the exciter

Fig.13. Light shielding plate

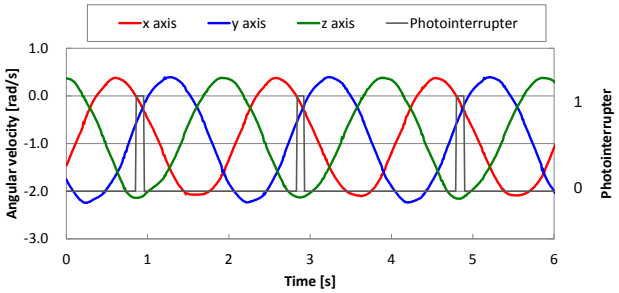


Fig.14. Output of the gyro sensor on the sensor platform

4. 結言

3 軸ジャイロセンサの，実軸方向および感度を検定するために加振装置の開発を行った．提案する装置は同時に回転する 2 つのテーブルから構成されている両テーブルは等速回転運動を行うため，単純な制御で運動が実現できるという特長がある．装置はジャイロセンサの各軸に正弦波状の角速度を与えることができ，センサから出力される正弦波角速度の位相と振れ幅からそれぞれ実軸方向と感度の検定を可能とする．実際に製作した装置は所望の運動を実現できていることが確認され，ジャイロセンサから正弦波状の角速度が出力された．今後は実際にセンサの検定を行う予定である.

文　　献

(1) ISO 8728:2014 Ships and marine technology－Marine gyro-compasses”, (2014)

(2) ISO 16328:2014 Ships and marine technology－Gyro-compasses for high-speed craft”, (2014)

(3) ISO 22090-1:2014(en) Ships and marine technology － Transmitting heading devices (THDs) – Part 1:Gyro-compasses”, (2014)

(4) 木村仁，中村成志，伊能教夫，松平昌之，吉田稔，「多軸加速度センサの主軸方向の感度の同定手法(主軸方向テンソルと感度テンソルの実測)」，日本機械学会論文集 C 編，Vol. 78, No.786, pp.499-507, (2012)

(5) Hitoshi Kimura, Masashi Nakamura, Kodai katou, Norio Inou, Minoru Yoshida, “Identification Method of Sensor Direction and Sensitivities in Multi-Axis Accelerometer-Actual Measurement of Direction Tensor and Sensitivity Tensor-”, Proceeding of 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON) 2012, (2012), MF-026085

(6) Grantham Pang, Huge Liu, “Evaluation of a Low-cost MEMS Accelerometer for Distance Measurement”, J. of Intel. and Robotic Sys.Vol.30, pp.249-265,(2001)

(7) 木村仁，伊能教夫，吉田稔，「多軸ジャイロセンサ特性評価装置及び方法」，特開 2017-9456，(2015)

© 2017 IEE Japan