

## 203 ジャイロ式力（フォース）測定器の問題点

## Technical Considerations on Gyroscopic Force Measuring System

○ 児玉 一裕 黒須 茂 (小山高専)

Kazuhiro KODAMA, Shigeru KUROSU,

Oyama National College of Technology, Nakakuki 771, Oyama Tochigi

This paper concerns the development of a Gyroscopic Force Measuring System (simply called GFMS) for measuring a force vectorially. The principle and the dynamical characteristics are analyzed theoretically. The GFMS consists of two main parts: the gyroscope and the turntables. To measure a force vectorially, two auxiliary turntables (driven by servo-mechanisms) are installed around the gyroscope, in which turntables outputs are required to follow some angles of incidence of a force vector. The feasibility of the proposed GFMS is confirmed by numerical simulations.

Keywords: Force measurement, Gyroscope, Gyroscopic measuring system

## 1. はじめに

本研究では、すでにはかりとして実用化されている「ジャイロ式力（フォース）測定器」(以下 GFMS とよぶ) を 3 次元的に働く微小な力を測定する方式に改良し、力学的解析から技術上の問題点を検討し、GFMS を実用化する基礎資料を得ることを目的としている。

## 2. ジャイロスコープによる力の測定原理

力の計測には、ジャイロに加えられたトルクとジャイロの歳差運動（プリセッション）の角速度が比例するという性質を利用している。関係式は次のように表される。

$$\omega = -\frac{a}{H_0} F \quad (1)$$

ここで  $\omega$  : 歳差運動による角速度,  $F$  : 入力荷重,  $a$  : レバーアームの長さの 2 分の 1,  $H_0$  : ジャイロロータの角運動量である。

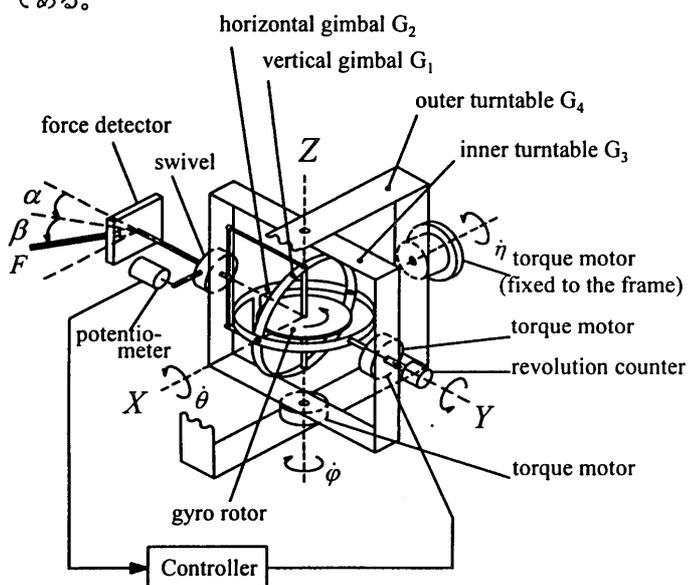


Fig.1 Construction model of GFMS

## 3. GFMS の構造

GFMS の基本構造を示したのが Fig.1 である。この GFMS は力の大きさを測定するジャイロ本体部分 ( $G_0, G_1, G_2$  により構成される) と、力の入射方向を推定するサーボ機構 ( $G_3$  と  $G_4$ ) によって構成されている。ジャイロロータは、2 つのジンバル ( $G_1$  と  $G_2$ ) で支持され、さらに全体を 2 つのターンテーブル ( $G_3$  と  $G_4$ ) により支持されている。受圧板に加えられた力はレバー機構を介して内部ジンバルに伝わる。

## 4. GFMS の動作原理

1) 力の入射角  $\alpha$ ,  $\beta$  の推定

力の入射角は、受圧板に対して上下方向の角度を  $\alpha$ 、左右方向の角度を  $\beta$  と定義する。

$\alpha$ ,  $\beta$  の推定には、ターンテーブルの向きを逐次変化させて  $\omega$  を測定し、連立方程式により  $\omega$  が最大となる角度を推定する方法を用いる。このとき試行的に変化させるターンテーブルの回転角 (目標値変化幅)  $\Delta\eta$ ,  $\Delta\varphi$  の選定が推定器の精度を決めることになる。

測定すべき力  $F$  が入射角  $\alpha$ ,  $\beta$  で受圧板に印加されると、サーボ機構によって 2 つのターンテーブルはそれぞれ  $\eta$ ,  $\varphi$  だけ回転し、入射角  $\alpha$ ,  $\beta$  の推定値との差

$$\eta + \hat{\alpha} = \varepsilon_\alpha, \quad \varphi + \hat{\beta} = \varepsilon_\beta \quad (2)$$

が 0 となるように制御される。

## 2) 力の測定

受圧板が力の入射方向に対して垂直となるように制御されたとき、加えられた力  $F$  は (1) 式より求められる。

力が印加されてから出力角速度  $\omega$  が安定するまでには若干の時間が必要である。そのため、ターンテーブルを  $\Delta\eta$ ,  $\Delta\varphi$  変らせて出力角速度  $\omega$  を測定するその時間刻み  $\Delta t$  が角度  $\alpha$ ,  $\beta$  の推定および出力角速度  $\omega$  の精度を決めることとなる。

## 5. GFMS の特徴

GFMS の特徴として、つぎの点があげられる。

- ・GFMS の特性値が角運動量、慣性モーメントの力学量とフィードバックのゲインだけで決まり、軸受まさつなどの不確定な要因に影響されない。
- ・出力角速度  $\omega$  は作用する力  $F$  に比例し、ヒステリシス、ドリフトの影響を受けない。
- ・環境の温度によるドリフトの影響を受けない。
- ・角運動量  $H_0$  による感度  $S$  を変更することにより、幅広い観測可能領域をカバーできる。

6. 技術上の問題点

微小な力 0.01~0.3[N]を検出するためには、つぎのような技術上の問題点を解決しなければならない。

1) 感度の増大

作用する力  $F$  に対する出力角速度  $\omega$  への感度  $S$  はつぎのように与えられる。

$$s = \frac{a}{H_0} \tag{3}$$

微小な力  $F$  に対して出力であるプリセッション角速度  $\omega$  を精度よく検出するためには  $H_0$  を下げなければならない。ジャイロには本来2つの振動モードがあり、低周波モードをプリセッション、高周波モードをニューティションと呼んでいる。それぞれの固有振動数、減衰係数は、つぎのように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \text{(低周波)} \quad p_1 &= \sqrt{\frac{k_1}{H_0}}, \zeta_1 = \frac{k_p}{2\sqrt{H_0 k_i}} \\ \text{(高周波)} \quad p_2 &= \frac{H_0}{\sqrt{AB}}, \zeta_2 = \frac{k_d}{2H_0} \sqrt{\frac{A}{B}} \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

ここで、 $A$ 、 $B$ は  $X$ 軸、 $Y$ 軸まわりの慣性モーメント、 $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$ はフィードバックによる比例、積分、微分ゲインである。

通常のジャイロ計器では、

$$p_1 \ll p_2 \tag{5}$$

と仮定して、高周波モードと低周波モードと分離して、低周波モードだけで設計してきた。しかし、本GFMSでは、高周波モードと低周波モードの干渉があり、そのためにオーバーシュートも顕れる。

2) ターンテーブルの動つり合い

通常のジャイロ計器では、ロータを支持するジンバルはつり合いのとれたものである。GFMSでは、ジャイロセンサを内側、外側ターンテーブルで支持している。とくに内側ターンテーブル  $G_3$ は  $X$ 軸に関して非対称の円筒形であるため、不平衡質量によって発生するトルクを最小限(軸受まさつトルク程度)にしなければならない。

3) 反作用トルク

上に述べた構造上から、ジャイロセンサの運動により、内側、外側ターンテーブルに反作用トルクが発生し、ターンテーブルの出力角変位  $\eta$ 、 $\phi$ に、誤差  $\varepsilon_\alpha$ 、 $\varepsilon_\beta$ として出現する。

7. 誤差特性

入力荷重を  $F=0.3$ [N]、入射角を  $\alpha=-45^\circ$ 、 $\beta=-60^\circ$ 、時間刻み  $\Delta t=2$ [sec]、目標値変化幅  $\Delta\eta = \Delta\phi = 20$ [deg]とし

てシミュレーションを行った。Fig.2にシミュレーション結果を示す。これより、ニューティションモードが速やかに減衰し、プリセッションモードでGFMSが作動していること、力  $F$  の計測誤差が入力荷重 0.01~0.3[N]の間で最大  $10^{-7}$ [N]のオーダーであること、 $\alpha$ 、 $\beta$ の推定値が  $10^{-2}$ [deg]のオーダーであることが確認できる。測定された各値はサーボ機構による反作用トルクによって微小に振動していることもあわせて確認されている。この微小な振動がGFMS本体の分解能を規定することになる。

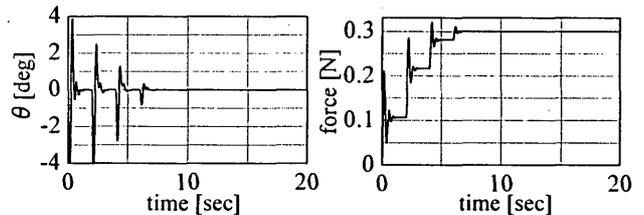


Fig.2 Responses of GFMS

時間刻み  $\Delta t$  および目標値変化幅  $\Delta\eta$ 、 $\Delta\phi$  の変化による  $F$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  の測定誤差を Fig.3、Fig.4 に示す。 $\Delta t=2$ [sec]、 $\Delta\eta$ 、 $\Delta\phi = 20$ [deg] のときが最も誤差の少ない適切な値であることがわかる。

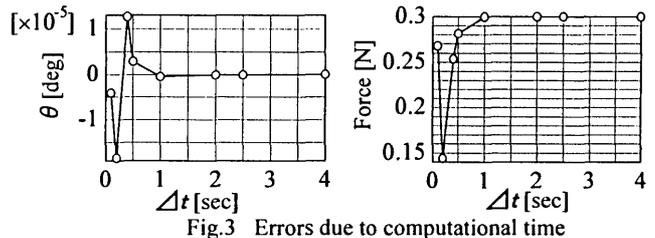


Fig.3 Errors due to computational time

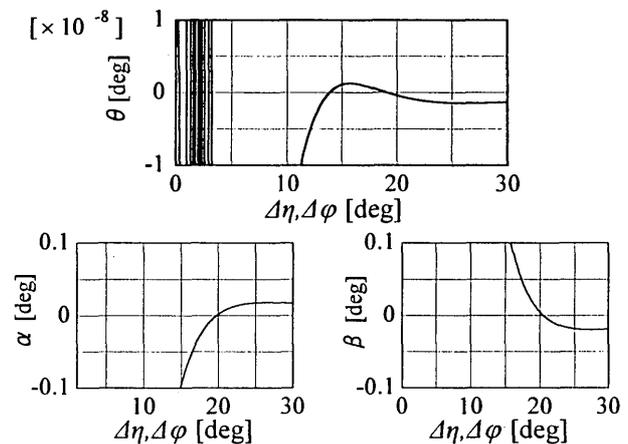


Fig.4 Errors due to step-changes of a reference inputs

8. おわりに

本研究は、従来、電磁式天秤で計量してきた微小な力測の問題点を、ジャイロの持つ特異性に着目した方式で力計測の可能性を理論的に検討した。今後、適切な数値のもとに、現在到達している性能を持つ航空計器用ジャイロを改造し、ここに得られた結果を実証する計画を進めている。

参考文献：S. Kurosu et al, Dynamical Characteristics of Gyroscopic Force Measuring Apparatus, ASME J. Dynamic System, Measurement and Control (1997)