チューンドドライジャイロを用いた 2軸角加速度計測の可能性について†

新宮 博 公*・大月 正 男*・田 中 龍 一**

Feasibility Study on Measurement of Two-Axis Angular Accelerations Using a Dynamically Tuned Dry Gyro

Hirokimi SHINGU*, Masao OTSUKI* and Ryuichi TANAKA**

This paper reports on the analytical and experimental clarification of the possibility of measuring angular accelerations about two axes independently by the use of the Dynamically Tuned Dry Gyro (TDG) with the improved Rebalance Control Circuit (RCC).

First, direct and cross transfer functions relating outputs to inputs of the TDG were derived, taking into consideration the improvement of the RCC. It is then shown that the TDG functions efficiently as a sensor which is able to measure not only angular velocities but also angular accelerations about two axes simultaneously. Next, the hardware of each element of the RCC, which is necessary for the measurement of two-axis angular accelerations, was designed and manufactured, based on the parameters and figures of the TDG used in this study, and each manufactured parameter was adjusted properly. Third, electrical inputs were applied to the TDG, and the direct and cross transfer functions were measured experimentally. It was evident that the experimental results of direct transfer function which prescribes the performance of angular accelerations' measurement agree with the analytical solutions and are not influenced by the manufacturing accuracy of the RCC, but gain characteristics of cross transfer function, which correspond to the degree of measuring error of the angular accelerations, are significantly influenced by the manufacturing accuracy.

Finally, it is concluded that measurement of two-axis angular accelerations is realizable through the use of the TDG and the RCC as mentioned in this paper, though there are many items which need further improvement in design and manufacture.

Key Words: tuned dry gyro, gyroscope, angular accelerometer, noninteracting control, rebalance control circuit

1. ま え が き

ロケット, 人工衛星, スペースクラフトなどの宇宙飛しょう体の姿勢制御に必要な角速度検出用センサとしてチューンドドライジャイロ (以下, TDG; Tuned Dry Gyro) は広く用いられている¹⁾が, これは, TDG が容積, 重量, 消費電力, 精度, 性能, 信頼性, 価格などに関してミッションの要求条件を満たせる状況になっているためと思われる^{2), 3)}.

TDG は原理的には2自由度の変位ジャイロ^{4), 5)}であるが, ロータの対ケース相対角変位に比例したトルクを, リバランス制御回路 RCC (Rebalance Control Circuit) によって位相調整しつつ, ロータに与えることにより2軸角速度検出用センサとして使うことができる^{5), 6)}. その際, 2次元結合系⁷⁾であることに起因して発生する相互干渉効果は TDG の入出力制御特性を低下させる⁶⁾ので, TDG 搭載ミッションの高精度化を進めるには同効果の除去が必要となるが, この可能性に関しては解析的にも実験的にもすでに明らかにされている^{6), 8)}.

本研究は, TDG を角速度検出用センサとして用いる際に施される従来のトルカループ (RCC) に対応する主トルカループのほかに, 新たに副トルカループを設け, 両トルカループのゲイン, 位相を適当に調整す

† 第29回自動制御連合講演会で発表 (昭61・11)

* 航空宇宙技術研究所 調布市深大寺東町 7-44-1

** 三菱プレジジョン(株) 鎌倉市上町屋 345

* National Aerospace Laboratory, Chofu

** Mitsubishi Precision Co. LTD., Kamakura
(Received December 23, 1987)

(Revised April 30, 1988)

れば主トルカ電流は非干渉化された2軸角速度に対応し、副トルカ電流は同じく2軸角加速度に対応することの解明を目的として進めたものであるが、このうち、前者の角速度計測に関する詳細は発表済み⁹⁾なので、本稿では主として後者の角加速度計測の可能性に関する部分を報告する。

記号

本研究で用いた TDG は単一ジンバル系⁹⁾であり、これに付設する RCC の主要な記号とともに TDG の記号を以下に示す。なお、図面の説明上 TDG, RCC の各要素には一連の番号を付すことにする。

A, B, C : ロータの x, y, z 軸まわりの慣性モーメント ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)

A_1, B_1, C_1 : ジンバルの x_1, y_1, z_1 軸まわりの慣性モーメント ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)

D : フレクシャヒンジの角変位時のダンピング係数 ($\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$)

D_R : ロータ、ケース間のダンピング係数 ($\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$)

f_N : ロータの回転数 (Hz)

H : ロータの角運動量 ($\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$)

$I_{\theta X}, I_{\theta Y}$: 主トルカ電流 (mA)

$I'_{\theta X}, I'_{\theta Y}$: 副トルカ電流 (mA)

K_{x_1}, K_{y_1} : フレクシャヒンジの捩れ剛性 ($\text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}$)

K_{θ} : 信号発生器の感度 ($\text{V}_{\text{rms}}/\text{rad}$)

$K_{\theta}(K'_{\theta})$: 主(副)トルカの感度 ($\text{N}\cdot\text{m}/\text{mA}$)

K_f : 主トルカループのフィードバックゲイン ($\text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}$)

N : ロータの角周波数 ($=2\pi f_N$) (rad/s)

T_D : ロータ、ケース間のドラッグトルク ($\text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}$)

x, y, z : シャフト固定軸 (z : シャフト軸)

x_1, y_1, z_1 : ジンバル固定軸 ($x_1=x$)

X, Y, Z : ジャイロケース固定軸 ($Z=z$)

θ_i : ジャイロロータ (以下、ロータ) の $i (=x_1, y_1, X, Y)$ 軸まわりの対ケース相対角変位 (rad)

ϕ_X, ϕ_Y : TDG の入力角速度 ($^\circ/\text{s}$)

$I := (A+B+A_1)/2$

2. 従来の TDG の用法

2.1 TDG の概要

本研究で用いる TDG は国内自主技術によって研究試作されたもの^{10), 11)}であり、ZY平面で切ったときの断面構造は Fig. 1 のようになる¹²⁾が、ロータ、ジ

1. shaft, 2. bearings, 3. housing, 4. motor rotor, 5. motor stator, 6, 8. flexure hinges, 7. gimbal, 9. gyro rotor, 10, 11. ring magnet, 12. S.G. rotor (X), 13. torquer (X), 14. S.G. stator (X), 15. stop plate, 16. cover

Fig. 1 Cross section of TDG

(a) Angular position of reference axes. View looking into spin axis

(b) Harmonic motion of the gimbal. View looking into the plane parallel to spin axis

Fig. 2 Behavior of TDG

バルの挙動モデルをスピン軸に垂直、平行な面からみれば、Fig. 2(a), (b) のようになる⁹⁾。1 はシャフトでベアリング 2 を介してジャイロハウジング 3 に支持されている。シャフト 1 の一端にはスピンモータを構成するモータロータ 4 が固定されており、これを囲むようにステータ 5 が配設されている。シャフト 1 はハウジング 3 に対してスピン軸 $z (=Z)$ まわりに角周波数 N でスピンする。また、シャフト 1 の他端にはフレクシャヒンジ 6 を介してジンバル 7 が支持されており、さらにジンバル 7 にはフレクシャヒンジ 8 を介してロータ 9 が支持されている。フレクシャヒンジ 6, 8 はその軸 $x_1 (=x)$, y_1 軸まわりにもみ捩れ剛性 K_{x_1}, K_{y_1} を有している。ロータ 9 には、Fig. 3(a) に

(a) Ring magnet

(b) Torquer coils

Fig. 3 Conceptual structure of torquer

示すような二つの分割リングマグネット 10, 11 が所定間隔をおいて同心状に取付けられていてほぼ半径方向に磁束を発生するようになっており、さらに信号発生器 S. G. (Signal Generator) 被検出部 12(可動部) が一体的に取付けられている。そしてリングマグネット 10, 11 間には、ハウジング 3 に支持されている、それぞれ一对の対称に配置された X-トルカコイル 13a, 13b および Y-トルカコイル 13a', 13b' がそう入配設されていて、一对の X または Y トルカコイルはそれぞれ直列に接続され、X, Y-トルカ 13, 13' を構成している。なお、Fig. 1 においては X-トルカ 13 のみが図示されていて、Y-トルカ 13' は紙面に対して垂直の位置に配設されるため図示を省略した。また、Fig. 2(a)では一对のトルカコイルのうち一方のみを示している。S. G. 被検出部 12 には、一对の対称に配置された X, Y-S. G. 14, 14' が対向配設されており、Fig. 1 においては一对の X-S. G. のみ図示されていて、一对の Y-S. G. 14' は紙面に対して垂直の位置に配設されるため図示を省略した。Fig. 2(a)は一对の各 X, Y-S. G. (可変レクタンス方式)¹³⁾のうち各一方のみを示している。15 はロータ 9 を保持するストッププレートで、これによってロータ 9 の対シャフト相対角変位は $\pm 0.3^\circ$ 以下に制限される。16 はロータ 9 を覆うカバーであるが、ハウジング 3 とは剛体的に結合されているので両者を併せてジャイロケースと呼ぶ。なお、Fig. 2(b)は、ロータ 9 がスピン軸に対してある一定角を有しているときに、ジンバルが角変位してコーニング運動する^{9), 14)}状態を示している。

上記のような構成の TDG において、仮にロータ 9 が X 軸まわりに角変位 θ_x を生じたとすると、S. G.

14 と S. G. 被検出部 12 との隙間は、右側が大きくなって左側が小さくなり、可変レクタンス型の場合、インピーダンスは右側が小さく左側が大きくなるので、この変化を交流ブリッジ回路(励磁電圧 $2.5 V_{rms}$, 励磁周波数 19.84 kHz)¹³⁾ によって検出すれば S. G. 出力電圧 $V_{\theta X}$ が得られる。また、一对のトルカコイル 13a, 13b はコアに巻回されて左右対称に配置されており、Fig. 3(b)に示すように直列接続されていて、 $I_{\theta X}$ は Fig. 1 に示す向き(⊗を正とする)に流れるようになっている。左右のトルカは同一に構成されるので、あるトルカ電流に対して発生する力は大きき等しく方向が逆になり、トルクとしては 1 軸まわりにのみ発生する。たとえば、 $I_{\theta X}$ が Fig. 1, 3 のコイルの向き(⊗が -X 方向)に流れたとすると、Fig. 3(a)に示すように磁界は外側から内側に向かっているため、右側のトルカでは上向き(+Z 方向)の力が、左側のトルカでは下向き(-Z 方向)の力がそれぞれロータ 9 に作用し、トルクとしては両側ともにプラス(+)X 軸まわりに発生するようになっている。

2.2 TDG の計測系

TDG に RCC を付して角速度検出用センサとして用いるときの入出力関係(計測系)をブロック線図で示せば、Fig. 4 の実線部ようになる。Fig. 4 は、ロータ、ケース間のドラッグトルク(T_D)⁴⁾、ダンピング係数(D, D_R)⁴⁾を無視し、かつロータはチューニング状態^{9), 14)}で回転すると仮定したときの近似的なブロック線図⁶⁾である。Fig. 4 の一点鎖線で囲まれているジャイロダイナミクス 21 は、ロータ 9 に作用する X, Y 軸まわりのトルク M_X, M_Y によってロータ 9 が ϕ_X, ϕ_Y だけ対慣性空間角変位 L 、これとケースの対慣性空間角変位 ϕ_X, ϕ_Y との差が S. G. 出力角 θ_X, θ_Y になるという関係を示しており、TDG 特有の伝達関数である。この θ_X, θ_Y に比例(感度 K_{θ})して検出される $V_{\theta X}, V_{\theta Y}$ は復調器(ゲイン K_d) 22, 22' で増幅・復調され、直流電圧 V_{dX}, V_{dY} となる。 V_{dX}, V_{dY} は電圧増幅器 23, 23' (ゲイン K_v) で増幅された後、ノッチフィルタと補償回路からなる位相調整回路{伝達関数 $R(s)$ } 24, 24' で位相調整され、電流変換器(ゲイン K_e) 25, 25' でトルカ電流 $I_{\theta Y}, I_{\theta X}$ に変換される。 $I_{\theta Y}, I_{\theta X}$ はそれぞれリードアウト抵抗(R_{out}) 26, 26' を介して出力電圧 W_{RX}, W_{RY} として読みとられるが、ジャイロ出力 W_X, W_Y は $I_{\theta Y}, I_{\theta X}$ にスケールファクタ($= -K_{TG} = -K_{\theta}/H$) 27, 27' を乗じたもの^{5), 6)}なので

$$W_X = \frac{K_{TG}}{R_{out}} W_{RX}, W_Y = \frac{K_{TG}}{R_{out}} W_{RY} \quad (1)$$

Fig. 4 Relations between inputs and outputs of TDG

となる。位相調整回路 24, 24' で位相調整する理由は、入力 ϕ_x, ϕ_y に対して出力 W_x, W_y が安定になるように、すなわち、伝達関数 $W_x/\phi_x, W_y/\phi_y$ が安定解を得るように、また、入出力応答特性が向上するようにするためである。Fig. 4 の入出力関係は、

$$\begin{bmatrix} W_x \\ W_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_a(S) & -P_c(S) \\ P_c(S) & P_a(S) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_x \\ \phi_y \end{bmatrix} \quad (2)$$

のように示され、 $P_a(S), P_c(S)$ はそれぞれ

$$P_a(S) = \frac{K_f [H \{HS + K_f R(S)\} + I^2 S^3]}{H [\{HS + K_f R(S)\}^2 + I^2 S^4]} R(S) \quad (3)$$

$$P_c(S) = \frac{K_f^2 IS \{R(S)\}^2}{H [\{HS + K_f R(S)\}^2 + I^2 S^4]} \quad (4)$$

$$K_f = K_g K_a K_d K_v K_{t_g} \quad (5)$$

となる。いまステップ入力を仮定すれば、 W_x, W_y は、 $t \rightarrow \infty (S \rightarrow 0)$ において ϕ_x, ϕ_y となる。

以上が従来の TDG の通常の用法であり、比較的低周波入力ときには相互伝達関数 $P_c(S)$ のゲインが小さい⁶⁾ので、相互干渉効果の影響を大きく受けることなく、自己伝達関数 $P_a(S)$ の応答特性に対応して出力 W_x, W_y が求められる。

なお、本論文では「2軸角加速度計測の可能性」を解析的かつ実験的に明らかにすることを目的としているために、TDG の gyro dynamics に関する部分を Fig. 4 のように近似化し、入出力伝達関数がより単純に表現できるようにしたが、この近似化の影響は当然ながら実験結果と解析結果が異なる一つの要因となる。いま、 D, D_R, T_D, K_N などを考慮しつつ、gyro dynamics の部分をより厳密化⁸⁾すれば、その伝達関

数要素はつぎのように置き換えられる。

$$\frac{H}{S(I^2 S^2 + H^2)} \Rightarrow \frac{H_1 S + T_q}{\Phi_0(S)} \quad (6)$$

$$\frac{I}{I^2 S^2 + H^2} \Rightarrow \frac{I S^2 + D_q S + K_N}{\Phi_0(S)} \quad (7)$$

$$\Phi_0(S) = (I S^2 + D_q S + K_N)^2 + (H_1 S + T_q)^2 \quad (8)$$

上式における D_q, T_q, K_N, H_1 はそれぞれ

$$D_q = D_R + D, \quad T_q = T_D + ND \quad (9)$$

$$K_N = \frac{1}{2} \{K_{x1} + K_{y1} - (A_1 + B_1 - C_1)N^2\} \quad (10)$$

$$H_1 = (C + A_1)N \quad (11)$$

である⁸⁾。

3. 角加速度計測系の構成

TDG に設けられている従来のトルカコイルに対応する主トルカコイル (Fig. 3(b)の実線部) とともに副トルカコイル (Fig. 3(b)の点線部) を同一コアに巻回し、永久磁石 (リングマグネット) 10, 11 を共用して、主、副トルカ系を構成し、副トルカ電流 $I'_{\theta x}, I'_{\theta y}$ より角加速度 $\ddot{\phi}_x, \ddot{\phi}_y$ を計測できるように考案したのが本研究での TDG の用法である。副トルカループは Fig. 4 の点線部であるが、このループでは、復調器出力電圧 V_{ax}, V_{ay} を電圧増幅器 31, 31' (ゲイン K_v) で増幅した後、ノッチフィルタと補償回路からなる位相調整回路 (伝達関数 $R'(S)$) で位相調整し、電流変換器 33, 33' (ゲイン K_a) で $I'_{\theta x}, I'_{\theta y}$ に変換する。いま、 V_{ax}, V_{ay} から副トルカ (感度 K'_{t_g}) に至る開ループ伝達関数を

$$K'_v K'_a R'(S) K'_{t_g} = \frac{I}{H} K_v K_a S R(S) K_{t_g} \quad (12)$$

なるように設定すれば、 $I'_{\theta x}, I'_{\theta y}$ はそれぞれ $I_{\theta y}, I_{\theta x}$ より 90° 位相が進んだ電流となるので、それらをリードアウト抵抗 (R'_{out}) を介して出力電圧 W'_{ax}, W'_{ay} として検出することにより、 $\ddot{\phi}_x, \ddot{\phi}_y$ が求められる。副トルカループの伝達関数を(12)式のように設定したのは、主トルカループの入出力関係における相互伝達関数を零にして、非干渉制御を行うためでもある^{6), 8)}。Fig. 4 において点線部を(12)式のように考慮したときの入出力関係は

$$\begin{bmatrix} W_x \\ W_y \end{bmatrix} = \frac{K_{TG}}{R_{out}} \begin{bmatrix} W_{RX} \\ W_{RY} \end{bmatrix} = \frac{K_{t_g}}{H} \begin{bmatrix} I_{\theta y} \\ I_{\theta x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_a(S) & -Q_c(S) \\ Q_c(S) & Q_a(S) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\phi}_x \\ \ddot{\phi}_y \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} W'_X \\ W'_Y \end{bmatrix} &= \frac{K'_{ig}}{R'_{out}} \begin{bmatrix} W'_{RX} \\ W'_{RY} \end{bmatrix} = \frac{K'_{ig}}{I} \begin{bmatrix} I'_{igX} \\ I'_{igY} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} Q'_a(S) & -Q'_c(S) \\ Q'_c(S) & Q'_a(S) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\phi}_X \\ \ddot{\phi}_Y \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} Q_a(S) &= Q'_a(S) = \frac{K_f R(S)}{HS + K_f R(S)}, \\ Q_c(S) &= Q'_c(S) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

となるので、相互干渉効果の影響⁶⁾を受けることなく、 I_{igY}, I_{igX} によって角速度 $\dot{\phi}_X, \dot{\phi}_Y$ が、 I'_{igX}, I'_{igY} によって角加速度 $\ddot{\phi}_X, \ddot{\phi}_Y$ が計測可能になる。

4. 制御回路の試作

TDG は試作済のもの¹⁰⁾を用いるとし、その性能諸元を **Table 1** に示す。ロータ 9 の回転数 $f_N (=N/2\pi)$ は、TDG をチューニング状態^{9), 14)}で用いるとしているので

$$f_N = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{x1} + K_{y1}}{A_1 + B_1 - C_1}} \quad (16)$$

より算出される。また、 K_{sg}, K_{tg} は X 軸と Y 軸とで異なっているが、制御回路の設計においてはそれらの平均値 (Table 1 の nominal values) を用いる。以下、Table 1 の性能諸元に基づいて制御回路を設計試作する。

まず、主トルカループの構成要素 $K_a, K_v, R(S), K_a$ を、入出力安定性および周波数特性を考慮して、試行錯誤的に設定した。位相調整回路の伝達関数 $R(S)$ は

$$R(S) = R_N(S) R_C(S) \quad (17)$$

とし、右辺の $R_N(S), R_C(S)$ を

$$R_N(S) = \frac{S^2 + \omega_N^2}{S^2 + 2\zeta_N \omega_N S + \omega_N^2} \quad (18)$$

$$R_C(S) = \frac{\omega_r^2}{S^2 + 2\zeta_r \omega_r S + \omega_r^2} \quad (19)$$

Table 1 Data for TDG

Moments of inertia $A=B=0.570\times10^{-4}$ $C=1.051\times10^{-4}$ $A_1=B_1=3.338\times10^{-7}$ $C_1=4.936\times10^{-7}$ (kg·m ²)		Torsional stiffness of flexure hinges $K_{x_1}=K_{y_1}=8.26\times10^{-2}$ (N·m/rad)		
		Rotation speed of rotor $f_N=155$ (Hz)		
		Angular momenta $H=0.1026$ (N·m·S)		
Sensitivities of signal generators and torquers				
Symbols	Units	Nominal values	Manufactured results	
			X-axis	Y-axis
K_{sg}	V _{rms} /rad	23.033	22.689	23.377
K_{tg}	N·m/mA	0.792×10^{-4}	0.795×10^{-4}	0.789×10^{-4}
K'_{tg}	N·m/mA	0.149×10^{-4}	0.149×10^{-4}	0.149×10^{-4}

のように定めた。 $R_N(S)$ はノッチフィルタの伝達関数であり、減衰係数 $\zeta_N = 0.316$ 、固有角周波数 $\omega_N = 974$ rad/s にすれば、入力周波数 $f = 100$ Hz におけるゲインが -1.72 dB、同じく $f = 155$ Hz におけるゲインが -69 dB になり、155 Hz 成分が大幅に除去される。これは、 f_N が 155 Hz であるためロータの X, Y 軸まわりに 155 Hz の振動トルクが作用することがあり^{4), 15)}、この場合、当然ながら θ_X, θ_Y したがって各ループの電圧、電流信号にも 155 Hz 成分が含まれることになるが、飛しょう体などに搭載されるジャイロの周波数特性は通常数十 Hz もあれば十分とされており、本研究でもそのような観点から RCC を設計しているの、ノッチフィルタの適用は位相調整に関しては本質的な必要性はない。しかし、TDG の入出力関係はサーボ系 (Fig. 4) であり、増幅器など回路要素の線形性は零近傍の電圧 (オフセット) 入力に対して成立しているために、仮に 155 Hz の雑音成分のみでもその値が大きくなると線形性がくずれ (たとえば、飽和状態)、回路が所望の動作を行わなくなる恐れがあると予測し、ノッチフィルタを用いることにした。補償回路の伝達関数 $R_C(S)$ の各要素 ζ_r, ω_r および K_f は、 $P_a(S), Q_a(S)$ の周波数特性が 50 Hz 程度になるように

$$\zeta_r = 0.7, \omega_r = 942 \text{ rad/s}, K_f = 30 \text{ N·m/rad} \quad (20)$$

を設計値とした。 V_{sgX}, V_{sgY} (交流, 19.84 kHz) は増幅された後復調されるが、復調のしやすさを考慮して経験的に増幅器のゲインを 20 と決め、これと復調時のゲイン 0.9 との積 ($=18 \text{ V/V}_{rms}$) が復調器 22, 22' のゲイン K_a となる。電流変換器 25, 25' の K_a は、従来の TDG の用法における設計値として $K_a = 43.2$ mA/V を用いた。電圧増幅器 23, 23' のゲイン K_v は、Table 1 の K_{sg}, K_{tg} の nominal values および上記 K_f, K_a, K_v の設計値を (5) 式に代入すれば、 $K = 21 \text{ V/V}$ となる。これで主トルカループ要素の設計はできたので、つぎに副トルカループ要素の設計を行う。この設計は (12) 式を満たすようにすればよいが、このうち位相調整回路 32, 32' の伝達関数 $R'(S)$ は

$$R'(S) = SR(S) \quad (21)$$

なるようにする。 $R'(S)$ の各要素は上記 $R(S)$ の各要素と同じ設計値になること、 K'_{tg} は Table 1 の nominal values を用いればよいことからして、残りは K'_a, K'_v の設計となる。副トルカ電流は主トルカ電流に比して微小になるとの観点から、 K'_a は K_a の 20% あればよいと考え、 $K'_a = 8.64 \text{ mA/V}$ に設計した。このとき、 K'_v の設計値は 0.312 V/V となる。

Table 2 Manufactured results for RCC

Symbols	Units	Designed values	Manufactured results	
			Loop(1)	Loop(2)
K_d	V/V _{rms}	18	16.2	13.4
K_v	V/V	21	31	31
K_a	mA/V	43.2	41.7	41.7
ω_N	rad/s	974	(974)	(974)
ζ_N		0.316	(0.316)	(0.316)
ω_r	rad/s	942	1,000	1,000
ζ_r		0.7	(0.7)	(0.7)
K_f	N·m/rad	30	38	32
K'_v	V/V	0.312	0.22	0.22
K'_a	mA/V	8.64	14	14
ω'_N	rad/s	974	(974)	(974)
ζ'_N		0.316	(0.316)	(0.316)
ω'_r	rad/s	942	895	895
ζ'_r		0.7	(0.7)	(0.7)
K'_f	N·m/rad	0.016	0.017	0.014
R_{out}	Ω	24	—	—
R'_{out}	Ω	71.4	—	—

上述の各設計に基づいて試作した要素の値を Table 2 に示す。各要素を構成する部品（抵抗、容量、演算増幅器など）は、5～10% 程度定格値とずれがあり、試作は必ずしも設計どおりにはいかなかった。また、Table 2 のカッコ内の値は、現状では試作品の値が精度よく測定できなかったことを示しているが、従来は自己伝達関数にのみ着目して入出力特性を考えていたので、そのような状態 (Table 2) でも十分であった。すなわち、試作値と設計値が Table 2 に示される程度異なっているが、また、位相調整回路は設計仕様に従って市販品を用いて試作するだけで、試作品の位相を精密測定しつつ調整しなくても、自己伝達関数に関連する入出力特性にはほとんど影響がなかった。

なお、RCC の各要素は、(12) 式の関係が成立するように試作時に調整する必要があるが、位相調整回路の特性を精度よく測定することができなかったため、角速度計測時の干渉補正の効果が最大になること（相互伝達関数 $Q_c(S)$ のゲインが最小になること⁸⁾）を調整基準として各要素のゲインを調整した。

5. 実験結果

角加速度計測の可能性を実験的に明らかにするためには、TDG に入力軸まわりの角振動を印加し、 ϕ_x 、 ϕ_y を正弦波入力にする必要があるが、本研究ではこれと等価な実験を Fig. 4 に示す電気入力 V_{sx} 、 V_{sy} を印加して行った。 V_{sx} 、 V_{sy} を入力とした場合、 $\phi_x = \phi_y = 0$ とするので、オフセット量（電圧）は V_{ex} 、

V_{ey} (Fig. 4) となる。Fig. 4 において V_{sx} 、 V_{sy} を入力、 W_{RX} 、 W_{RY} を出力としたときの入出力関係は

$$\begin{bmatrix} W_{RX} \\ W_{RY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a(S) & -V_c(S) \\ V_c(S) & V_a(S) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sx} \\ V_{sy} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$V_a(S) = \frac{R_{out}HS}{K_{sg}K_dK_{tg}} Q_a(S), \quad V_c(S) = 0 \quad (23)$$

となるので、 $V_a(S)$ 、 $V_c(S)$ のボード線図を実験的に求め、これに $K_{sg}K_dK_{tg}/(R_{out}HS)$ を乗ずれば、角速度計測におけるボード線図が得られる⁸⁾。つぎに、 V_{sx} 、 V_{sy} を入力、 W'_{RX} 、 W'_{RY} を出力としたときの入出力関係は

$$\begin{bmatrix} W'_{RX} \\ W'_{RY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V'_a(S) & -V'_c(S) \\ V'_c(S) & V'_a(S) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sx} \\ V_{sy} \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$V'_a(S) = \frac{R_{out}IS^2}{K_{sg}K_dK'_{tg}} Q'_a(S), \quad V'_c(S) = 0 \quad (25)$$

となるので、 $V'_a(S)$ 、 $V'_c(S)$ のボード線図を実験的に求め、これに $K_{sg}K_dK'_{tg}/(R_{out}IS^2)$ を乗じた変換を施せば、 $Q'_a(S)$ 、 $Q'_c(S)$ の周波数特性（実験結果）が求められる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} \hat{W}'_{Ri} &= \frac{K_{sg}K_dK'_{tg}}{R'_{out}IS^2} W'_{Ri} = Q'_c(S)V_{si}, \\ i &= X, Y \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

$$\left. \begin{aligned} \hat{W}'_{Ri} &= \frac{K_{sg}K_dK'_{tg}}{R'_{out}IS^2} W'_{Ri} = Q'_c(S)V_{sj}, \\ i, j &= X, Y, i \neq j \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

としたとき、実験的に求めたい伝達関数は

$$G_{XX}(S) = \frac{\hat{W}'_{RX}}{V_{sx}}, \quad G_{YY}(S) = \frac{\hat{W}'_{RY}}{V_{sy}} \quad (28)$$

$$G_{YX}(S) = \frac{\hat{W}'_{RY}}{V_{sx}}, \quad G_{XY}(S) = \frac{\hat{W}'_{RX}}{V_{sy}} \quad (29)$$

であるが、実験では W'_{RX}/V_{sx} 、 W'_{RY}/V_{sy} 、 W'_{RY}/V_{sx} 、 W'_{RX}/V_{sy} が測定されるので、この測定結果に (26)、(27) 式の変換を施して、(28)、(29) 式の実験結果が得られるということである。(28) 式は自己伝達関数であり、 $Q'_c(S)$ に相当する。この $G_{XX}(S)$ 、 $G_{YY}(S)$ の周波数特性によって角加速度計測の帯域幅が実験的に明らかにされる。(29) 式は相互伝達関数であり、(25) 式に従えば零となるが、本稿での TDG の伝達関数は近似的なものであること^{5), 6), 16)}、各信号伝達経路に雑音成分が含まれること、制御回路が設計通りに試作されていないこと (Table 2) からして、 $G_{YX}(S)$ 、 $G_{XY}(S)$ のゲインは零 ($-\infty$ db) にはならないと予想される。そして、このゲインは角加速度計測の精度を決める一つの尺度ともなる。(28) 式の実験結果（周波数特性）を Fig. 5 の実線部に、(29) 式の実験結果（ゲイン特性）を Fig. 6 の実線部にそれぞれ示す。Fig. 5 の点

Fig. 5 Frequency response of direct transfer functions

Fig. 6 Gain characteristics of cross transfer functions

線部は、Table 1, 2 の試作値を用いて解析的に求めた周波数特性であるが、これを設計値を用いて求めると両特性の差は $f=0\sim 50$ Hz においてほとんどなかった。すなわち、自己伝達関数 $Q'_a(S)$ の周波数特性は、設計されたとおりに実験結果が得られたといえる。このことは、従来の TDG の用法では自己伝達関数にのみ着目して RCC が設計試作されるので Table 2 のような試作精度でも十分であることを実験的に証明しているといえる。しかし、角速度計測において、相互伝達関数 $Q'_c(S)$ (13式) に着目し、非干渉化^{6),8)}、角加速度計測をも可能にする TDG の用法では、RCC の試作精度の影響が大きいため、今後はその点に留意して精度よく試作する必要がある。なお、Fig. 6 は、角加速度計測系の相互伝達関数 $Q'_c(S)$ に関連する誤差を現しているが、その実験値は $-30\sim -40$ dB (3~1%) 程度となっている。

また、本研究で用いた TDG の D , D_R , T_D は

$$D=0.1\times 10^{-5}\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}, D_R=0.4\times 10^{-3}\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s} \quad (30)$$

$$T_D=0.6\times 10^{-3}\text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad} \quad (31)$$

である⁸⁾ので、これらの値を用い、gyrodynamics の部分 (Fig. 4) の伝達関数を (6)~(11) 式のように変換して、 $G_{XY}(S)$, $G_{YX}(S)$ を解析的に求めると Fig. 6 の点線部のようになる。

6. 考 察

角加速度計測を考慮した TDG の用法において、Table 2 の RCC の試作結果は改善していく余地があると思われるので、本章では、TDG が 2 軸角速度・角加速度同時計測可能な高精度センサとして機能するために必要な設計試作上の観点を明らかにする。

TDG は、本来高精度角速度計測を目的としたセンサであり、相互干渉効果⁶⁾による制御特性の低下を防ぐために用いた非干渉制御^{6),8)}の副産物として角加速度計測が可能になる（すなわち、相互干渉を減らす非干渉化効果そのものが角加速度成分になる⁶⁾）ということに着目して TDG ならびに RCC の設計試作を進めることが必要である。したがって、角加速度計測のために TDG の設計を大幅に変更することは不可能であるが、主トルカ、副トルカ、S.G. それぞれの 2 軸直交度、副トルカ電流の許容最大値などに着目して改善することは可能である。一方、RCC は TDG の性能に即して設計されるのが通常であり、TDG 計測系 (Fig. 4) がサーボ系であるため、従来の用法では計測精度からみた設計の条件は比較的緩やかであったが、本研究のように非干渉制御、角加速度計測を考慮した用法では主、副トルカループにおいて (12) 式の関係がゲインだけでなく位相についてもほぼ完全に成立するような試作が必要となる。RCC の各要素は抵抗、容量、演算増幅器、半導体などの部品で構成されるが、角加速度計測の精度を仮に 1% 程度とすると受動素子（抵抗、容量）の公差は 1% 以下にしなければならない。このうち、抵抗については、金属皮膜抵抗を使用すれば公差 $\pm 0.1\%$ 、温度係数 ± 25 ppm/°C は可能であるので、容量の公差のみを考慮するだけでよい。また、公差だけでなく温度に対する安定性を考えると温度補償形のセラミックキャパシタを選択する必要がある。さらに、RCC の各要素の調整時には、主、副トルカループ間の整合をとるために、トルカ感度および S.G. 感度の公差も吸収できるよう考慮する必要がある。将来的には、能動素子（演算増幅器、半導体）および調整に用いない抵抗、容量をハイブリッド IC 化することにより、RCC の小型、軽量化が実現でき、搭載を前提とした開発に有利となる。

角加速度計に限らずセンサの高精度化には、センサの入出力特性を計測・評価する設備の高精度高性能化が不可欠となる。本研究では、現存の角振動試験機では低周波時 (0~50 Hz) に十分な精度が保証されないこと、また、それによって不測の加速度が TDG に作用する恐れがあることなどのために、電気入力による実

験を行ったが、この傾向は今後の研究においても続くと考えられる。したがって、電気入力実験に用いる周波数応答解析機 FRA (Frequency Response Analyzer) の性能向上とその出力に (26), (27) 式の変換を施して処理する際の処理技術の向上などが今後の課題となる。

今度は TDG の機構部に関連する T_D , D , D_R の値が角加速度計測における相互伝達関数のゲイン (出力に着目すれば誤差となる) にどのように影響するかを解析的に考察する。まず, T_D , D , N からなる T_q {(9) 式} の値を 2~3 倍あるいは零にしたところ, 特性 (ゲイン) の変化はなかったので, T_D の影響はないといえる。つぎに, D , D_R からなる D_q {(9) 式} の影響としては, $D_R \gg D$ なので D_R の影響を考察する。RCC の試作値を用いた場合, ゲイン (Fig. 6 の解析解) は, D_R を 2 倍にすれば 6 dB 大きくなる ($f=1\sim 50$ Hz) が, D_R を零にすれば, $f=1, 3, 5, 10$ Hz でそれぞれ 15, 7, 5, 1 dB だけ小さくなり, $f \geq 10$ Hz では変わらない。一方, $D_R=0$ の状態で, RCC が設計どおりであるとすれば, ゲインは大幅に低下し, T_D に関係なく, $f=1, 10, 100$ Hz でそれぞれ -100, -80, -70 dB となる。以上のことから, TDG の機構および RCC の精度が角加速度計測に与える影響度は, 相互伝達関数のゲインの小さい低周波域 (解析解) ほど大きいといえる。

7. あとがき

本研究では, TDG に付す RCC の改良設計によって 2 軸角速度だけでなく 2 軸角加速度をも同時に計測可能であることを解析的実験的に追求したが, 第 4 章の解析結果, 第 5 章の実験結果 (Fig. 5, 6) よりその可能性は解明できたといえる。自己伝達関数の特性は十分満足できるものであったが, 相互伝達関数の特性 (Fig. 6) には TDG の固有誤差^{9), 15), 17)}, RCC の試作精度 (Table 2) などの影響が含まれていると考えられるので, 今後はそれらの影響を除去しつつ角加速度計測の高精度化を図ることが必要になる。

最後に, 本研究を進めるにあたり, NAL, NASDA, MPC の関係者の方々から協力, 支援をいただいたこ

とを付記する。

参 考 文 献

- 1) 金井, 太原, 早川, 長蘭: 姿勢センサ, 日本航空宇宙学会誌, **30**-336, 15/25 (1982)
- 2) B. Stieler and H. Winter: Gyroscopic Instruments and Their Application to Flight Testing, AGARDograph, **15**-160, 44/58 (1982)
- 3) J.W. Ritter and R.B. Irvine: DRIRU-II, Standard High Accuracy Inertial Reference Unit, The 34th Annual Meeting of the Institute of Navigation, 1/11 (1978)
- 4) R.J.G. Craig: Theory of Operation of an Elastically Supported Tuned Gyroscope, IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, **AES-8**-3, 280/288 (1972)
- 5) 新宮, 大月, 早野: チューンドドライジャイロの近似伝達関数の有用性について, 航技研報告, TR-720 (1982)
- 6) 新宮, 大月: チューンドドライジャイロの非干渉制御の一方式, 航技研報告, TR-857 (1985)
- 7) 大島, ほか: 制御工学ハンドブック, 119/206, 朝倉書店 (1964)
- 8) 新宮, ほか: チューンドドライジャイロの非干渉制御に関する実験的研究, 計測自動制御学会論文集, **23**-12, 43/50 (1987)
- 9) 新宮, 大月, 園田: チューンドドライジャイロのパラメータ変化の影響度に関する一考察, 航技研資料, TM-522 (1983)
- 10) M. Ikeuchi, et al.: Research and Development of Tuned Dry Gyro, Proceedings of the 14th International Symposium on Space Technology and Science, 667/672 (1984)
- 11) 滝沢, 中安, 新宮: 宇宙用ジャイロの研究開発, 第 2 回宇宙航空誘導制御シンポジウム資料, 97/104 (1985)
- 12) 早川, 村山: チューンドドライジャイロのクォードレチャスプリングレートに関する実験的研究, 日本航空宇宙学会誌, **34**-392, 481/490 (1986)
- 13) 早川, 仁部: TDG 設計における不様性の問題, 日本航空宇宙学会誌, **35**-403, 379/388 (1987)
- 14) E.W. Howe and P.H. Savet: The Dynamically Tuned Free Rotor Gyro, Control Engineering, **2**-6, 67/72 (1964)
- 15) R.J.G. Craig: Theory of Errors of a Multigimbal, Elastically Supported, Tuned Gyroscope, IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, **AES-8**-3, 289/297 (1972)
- 16) D.E. Coffman: Feasibility Study of a Digital Rebalance Loop for a Dry Tuned TDF Gyro, NASA CR-144089 (1974)
- 17) J.E. Bortz: Dynamic Errors in a Tuned Flexure-Mounted Strapdown Gyro, NASA CR-12416 (1972)