動圧空気軸受を用いた加速度計の試作[†]

山 田 博*

A Prototype Accelerometer Using Hydrodynamic Air Bearing

Hiroshi YAMADA*

1. ま え が き

航空機、ロケットなどの慣性加速度を測定する加速度計の主な誤差としては、摩擦誤差（摩擦の存在によって微小入力に感じなくなることによる誤差）および cross coupling 誤差（測定方向と直角な方向の入力成分に影響される誤差）がある。筆者は、前者の摩擦誤差を低減させて分解能を向上させるために動圧空気軸受を利用して感受質量を空气中に浮かせ、かつ後者の cross coupling 誤差を低減させるために重力（単位質量に作用する加速度に基づく慣性反力と引力との和）に伴う感受質量の変位が、従来の加速度計に採用されている振子形式のように円弧状ではなく、直線状に生じる構造を採用して試作した。

ここでは、試作加速度計の原理、構造を明らかにし、現在までに得られた性能を示すとともに、その実用性を提案する。

2. 原理・構造および仕様

2.1 原理・構造

慣性加速度計は、慣性体（質量）に作用する慣性力（慣性反力）を利用している。ゆえに、その質量を支持する方法によって性能に差異が生じる。性能を向上させるために必要となる主な項目としては

- (1) 固体摩擦またはそれに類する内部摩擦（板ばね支持構造の場合）が小さいこと。
- (2) 感受方向以外の重力の影響が小さいこと。
- (3) 外部磁界などに起因する外乱力が小さいこと。

(4) 自励振動の発生を抑制することなどに関する安定性がよいこと。

(5) 磁気飽和などによる直線性の低下が小さいこと。

(6) 測定周波数範囲内での応答性がよいこと。

(7) 寿命などに関する信頼性がよいこと。

(8) 温度、振動、衝撃などに関する耐環境性がよいこと。

(9) 構造が簡単で生産性がよく、かつ低価格であること。

これらの項目のうち、(7)、(9)に関しては多少劣るが、主として(1)、(2)を満たす支持方法として

Fig. 1 (半断面図)の構造を採用した。すなわち、**Fig. 1**の加速度計の特徴は

(1) 可動磁石などからなる感受質量 m を回転ジャーナル動圧空気軸受で半径方向支持するとともに、空気粘性に基づくトルクによる動きは糸で拘束している。

(2) 回転ジャーナル軸方向は、容量形変位計(C-pickup)、増幅器および固定巻線 W_1 をもつフォースモータによるサーボループからなる電磁ばね（剛性係数 k ）で支持している。

Fig. 1 Prototype accelerometer

[†] 第26回自動制御連合講演会で一部発表(昭58・11)

* 航空宇宙技術研究所 調布市深大寺東町 7-44-1

* National Aerospace Laboratory, Chofu

(Received December 14, 1983)

(Revised October 8, 1984)

Key Words: accelerometer, prototype accelerometer, hydrodynamic air bearing

(3) ジャーナル軸方向の動きを安定化するために、固定巻線 W_2 で感受質量 m の速度 $\dot{x}$ を検出し、増幅器、フォースモータを介するサーボループでダンピングを与えている。ここに、 W_3 は W_1 から W_2 への誘導電圧を打ち消すための巻線である。

(4) 回転ジャーナル軸の回転むら (ω の変動) を小さくするために、定速性にすぐれたヒステリシスモータを使い、かつそれを含む外部磁界の影響をしゃへいし、フォースモータのギャップ磁束密度を高めるとともに、その位置で平衡させるために継鉄を取り付けている。

(5) 固定巻線 W_1, W_2 の支持用に非磁性体を用いて磁気飽和をなくして直線性を確保している。

Fig. 1 で、重力 g が作用した場合の感受質量 m に関する運動方程式は、その変位を x として

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + kx = mg \quad (1)$$

ここに、 r : 質量 m が速度 $\dot{x}(=dx/dt)$ をもった場合の制動係数 (主として W_2 を含むダンピングループ、フォースモータの制動定数および固定巻線支持部に生じるうず電流によるもの)。

(1) 式で、 g をステップ関数とした場合の定常解を x_0 として

$$kx_0 = mg$$

$$\therefore g = \frac{kx_0}{m} = \omega_n^2 x_0 \propto \frac{I}{m} \quad (2)$$

ここに、 $\omega_n = \sqrt{m/k}$: 固有角周波数、 I : 電流 (Fig. 1)。

したがって、巻線 W_1 に流れる電流 I から重力 g を測定することができる。なお、 m を大きくするとともに分解能が向上する。しかし、測定範囲が低下する。その点、高効率なフォースモータが必要となる。

また、減衰率 ζ を使い、(1) 式から $d/dt \equiv S$ (微分演算子) として

$$\frac{x}{g} = \frac{1}{S^2 + 2\omega_n \zeta S + \omega_n^2} \quad (3)$$

ここに、 $\zeta = \delta/\omega_n = r/2m \cdot \sqrt{m/k} = r/2\sqrt{mk}$ ($\delta = r/2m$)。

ゆえに、 x 対 g に関する伝達関数 $G(s)$ (s : 複素数演算子) の周波数特性 $G(j\omega)$ は

$$G(j\omega) = \frac{1}{\omega_n^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right\}^2 + \left(\frac{2\zeta\omega}{\omega_n}\right)^2}}$$

$$\angle \tan^{-1} \left\{ \frac{2\zeta\omega}{\omega_n} \right\} \quad (4)$$

したがって、正規化周波数特性 $W(j\omega) = G(j\omega)/G_0 =$

$G(j\omega) \cdot \omega_n^2$ ($G_0 = 1/\omega_n^2$: $\omega=0$ のときの伝達関数) は

$$W(j\omega) = \omega_n^2 G(j\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right\}^2 + \left(\frac{2\zeta\omega}{\omega_n}\right)^2}}$$

$$\angle \tan^{-1} \left\{ \frac{2\zeta\omega}{\omega_n} \right\} \quad (5)$$

要するに、分解能の点から m をなるべく大きく保つとともに、 k を大きくすることにより応答性を高め、かつ m の変位によって生じる W_1 に鎖交する磁束密度変化を小さくして直線性を高めることができる。なお、 $\zeta \approx 0.65$ が適当である。

2.2 仕様

試作加速度計の主だった仕様をつぎに示す (単位は mm)。

(1) 感受質量 重さ: 27 g. 形状寸法: $20\phi \times 15\phi \times 10$ L (永久磁石) + $(30\phi \times 10\phi \times 5$ L (アルミ合金) +

Fig. 2 Static characteristics

Fig. 3 Frequency characteristics

Table 1 Performance of accelerometers

	unit	conventional	prototype
range	g	± 20	± 10
threshold	g	2×10^{-7} *	1×10^{-8} ***
linearity	%	0.01	0.1
zero error	g	$\pm 1 \times 10^{-4}$	$\pm 1 \times 10^{-4}$
vibration error	g/g^2	5×10^{-6}	$< 1 \times 10^{-7}$
cross coupling	%	0.03	$< 0.05 \times 10^{-2}$
natural frequency	Hz	300	60
attenuation factor		0.65	0.65
size	mm	$25 \times 29 \times 51$	$32\phi \times 75$
weight	g	115	222

* resolution $> 1 \times 10^{-8}$, ** equal to resolution

($15\phi \times 14\phi \times 10\text{L}$ (継鉄). 永久磁石: 希土類コバルト磁石 (TS-18), 放射状異方性. 糸の張力: 1.8g .)

(2) フォースモータ固定子 重さ: 30g . 形状寸法: $30\phi \times 20.2\phi \times 15\text{L}$ (アルミ合金) + $32\phi \times 30\phi \times 12.5\text{L}$ (継鉄). 巻線: $0.35\phi \times 70\text{T} \times 2$ (速度巻線: $0.12\phi \times 50\text{T} \times 2$), 抵抗: 4.1Ω . 発生力: 288mA で 27g .

(3) 電磁ばね 剛性係数: 391g/mm (3833N/m).

(4) 動圧空気軸受 プラスチック (アセタール系) 被覆ジャーナル, $10\phi \times 26\text{L}$.

(5) 駆動モータ ヒステリシスモータ, 165g , $32\phi \times 56\text{L}$, 6000rpm , 200Hz , すべり軸受.

3. 実験および検討

試作加速度計の入力 (重力) g に対する出力 E の静特性を Fig. 2 に示す. また, フォースモータ駆動電圧増幅器への重量入力電圧 e_1 に対する C-pickup 増幅器の出力電圧 e_2 の正規化周波数ゲイン特性を Fig. 3 に示す. さらに, 試作加速度計の主な性能を GPI の C70-2401-005 (板ばねを用いた振子形式) の性能とともに Table 1 に示す.

Fig. 2 の静特性は, 1g までしか示していないが, 10g 以下の重力に対する直線性はほぼ同等となるものと

思われる. (別に重量を付して測定), しかし, 10g を超えるに伴ってフォースモータの加熱が問題となる.

また, Fig. 3 の周波数特性は, サーボループのループ利得を変えることによって比較的広範囲に変化させることができる.

さらに, Table 1 は確認された値が示されているが, 工作精度などの向上によって, さらに性能向上の可能性が秘められている. そのうち, 加速度測定範囲, 直線性および固有周波数は, フォースモータの高効率化とループ利得の増大化によって向上させることができる. しかし cross coupling 誤差が小さいために, それほどループ利得を増大させなくともすむ. ただしその場合, 直線性はマイクロコンピュータなどで補正することが容易である. なお, 振動誤差とは振子形式のものでは, 主として cross coupling が起因する vibropendulous error である.

4. む す び

試作加速度計の性能は, 各誤差を考慮した場合, Table 1 の常用加速度計に劣っていないと思われる. なお, 試作加速度計はそれほど生産性が悪くないことを考えれば, かなり実用性があるものと思われる.