インダクタンス素子を用いた圧電型振動ジャイロの高感度化

正 員 菅 原 澄 夫 (石巻専修大)

非会員 工 藤 すばる (石巻専修大)

Realization of High Sensitivity in Piezoelectric Vibratory Gyroscopes by an Inductance Element

Sumio Sugawara, Member, Subaru Kudo, Non-member (Ishinomaki Senshu University)

Under the condition that the two resonant frequencies of driving and detecting modes are different, the sensitivity of a piezoelectric vibratory gyroscope decreases remarkably. In this paper, a method to avoid a decrease of the sensitivity is proposed, and the results on the equivalent circuit consideration and the experimental inspection are also shown. The method is realized by connecting an inductance element to the detecting side in parallel. The vibratory gyroscope has the high and constant sensitivity within a designed frequency bandwidth because a band-pass filter circuit is formed by this connection. As the resonant frequency of the driving side can be freely set in the bandwidth as a result, degrees of freedom for the vibratory gyroscope design increase fairly. The bandwidth on the frequency response characteristic also becomes wide. The validity of such the method that realizes the high sensitivity was confirmed experimentally.

キーワード：圧電型振動ジャイロ，角速度センサ，インダクタンス素子，高感度化，等価回路

1. まえがき

圧電型振動ジャイロスコープ（以下、振動ジャイロと略）は、カメラの画振れ防止やカーナビゲーション・システムなどの角速度センサとして実用化されるようになった⁽¹⁾。また、最近では車両の姿勢制御用としても注目されている。

このような振動ジャイロを構成する場合、要求される周波数応答特性に応じて駆動側と検出側の共振周波数差を設定する必要がある。この場合、周波数差を大きく設定すると感度が著しく低下してしまう。これに対して、周波数差を小さくすると感度は大きくなるものの周波数応答特性が狭くなり、さらに両振動モードの機械的結合により大きな漏れ出力が発生するという問題があった。このため、駆動側と検出側の共振周波数を離して設定した状態で、高感度化を図る何らかの手法の考案が望まれていた。

本論文は、このような問題を解決する方法として、振動ジャイロの検出側にインダクタンスを並列に付加するというきわめて簡便な方法を提案し、振動ジャイロの駆動側及び検出側の共振周波数をかなり離して設定した状態でも、設計したある周波数帯域にわたって感度が大きく一定となることを明らかにしたものである。初めに、振動ジャイロ

の入出力電圧比と駆動側共振周波数の関係を等価回路考察し^{(2)~(4)}、インダクタンス付加時の振動ジャイロの特性を明らかにする。次いで、その実験的検証結果について述べ⁽⁵⁾、高感度振動ジャイロが構成できることを明らかにする。

2. 構造と等価回路

<2・1> 構造

本考案は各種の振動ジャイロに適用できるものであるが、ここでは一例として図1(a)のような構造を取り上げる。本構造は恒弾性金属音片の横振動第一次モードを利用するので、圧電セラミックスを接着してその駆動・検出を行う基本的な構成である。この動作原理を略述すると、まず同図(b)のようにx軸方向に第一次モードで振動させた状態で図示のようにz軸の回りに角速度 Ω_0 を印加すると、発生したコリオリ力によって直交したy軸方向に同図のような同一周波数の振動が新たに励振される。この振動の振幅が印加された角速度 Ω_0 に比例するので、本構成は角速度センサとなる。

<2・2> 等価回路

図2は図1の振動ジャイロの出力端子に並列にインダク

図1 圧電型振動ジャイロの構成

Fig.1 Construction of a piezoelectric vibratory gyro.

タンス L_{d2} を付加した場合の等価回路である。同図(a)で、 $z_i = r_i + j\omega m_i + s_i / j\omega$ ($i = x, y$) は i 軸方向の振動モードに対する等価機械インピーダンスであり、 r_i , m_i , s_i はそれぞれ等価機械抵抗、等価質量、等価スチフネスである。また、 C_{dj} ($j = 1, 2$) は制動容量、 A_{ji} は力係数、 R_2 は負荷抵抗である。さらに、 $\bar{G}_i$ はジャイレータ定数であり⁽⁶⁾、 F_{Gj} はコリオリ力である。この等価電気機械回路は、同図(b)のような等価電気回路に変換される。ここに、 $R_i = r_i / A_{ji}^2$, $L_i = m_i / A_{ji}^2$, $C_i = A_{ji}^2 / s_i$, $\bar{G}_i' = \bar{G}_i / (A_{1x} A_{2y})$ なる関係がある。なお、これらの等価回路では振動ジャイロに与える付加インダクタンスの影響を浮き彫りするため、不要な力係数成分、機械的結合、入出力間静電結合容量などによる影響⁽⁷⁾は全て無いものとして表示されている。

表1は、以下の等価回路解析で使用する試作振動ジャイロの等価回路定数の実測値の一例である。

表1 実測等価回路定数の一例

Table 1. Measured values of equivalent circuit constants.

f_x mode		f_y mode	
f_{rx} (Hz)	4864.1	f_{ry} (Hz)	4746.6
L_x (H)	105.58	L_y (H)	97.68
C_x (pF)	10.14	C_y (pF)	11.51
R_x (Ω)	6453	R_y (Ω)	5827
C_{d1} (pF)	2944	C_{d2} (pF)	2930
Q_x	500	Q_y	500
γ_x	290	γ_y	255
$A_{1x}(\text{gr./H})^{1/2}$	0.176	$A_{2y}(\text{gr./H})^{1/2}$	0.183
Q: QUALITY FACTOR			
γ_i : CAPACITANCE RATIO= C_{dj}/C_i ($i=x,y, j=1,2$)			

3. インダクタンス付加時の設計

<3・1> 設計の基礎

この場合、振動ジャイロの検出側の等価回路は定K型のフィルタと見なせるから、損失を無視するとその等価回路は図3(a)のように、またこれにさらに終端抵抗と電源をも考慮したものは同図(b)のように表される。このようなフィルタ回路における諸関係式から、付加インダクタンス L_{d2}

図2 圧電型振動ジャイロの等価回路

(a)等価電気機械回路, (b)等価電気回路

Fig.2 Equivalent circuits of a piezoelectric vibratory gyro.

(a) Electromechanical circuit, (b) Electric circuit.

図3 検出側等価回路

(a)基本回路, (b)負荷を考慮した回路

Fig.3 Equivalent circuits for the detecting side.

(a) Basic circuit, (b) Circuit including the termination.

と実現される帯域幅 Δ 及び終端抵抗 R_2 は、それぞれ式(1)のように整理・表示される⁽⁸⁾。

$$\begin{aligned}
 L_{d2} &= (\omega_{0y}^2 C_{d2})^{-1}, \\
 \Delta &= (L_y C_{d2})^{-1/2} = (C_y \omega_{0y}^2 / C_{d2})^{-1/2}, \\
 R_2 &= 0.8 \times (L_y / C_{d2})^{1/2} \\
 &= 0.8 \times (L_{d2} / C_y)^{1/2}
 \end{aligned} \quad (1)$$

<3・2> 設計例

ここでは、実測された表1の L_y と C_{d2} の値を用いて付加インダクタンス L_{d2} 、帯域幅 Δ を求め、終端抵抗 R_2 の値は後述のように入出力電圧比特性の平坦性を考慮して算出した。即ち、 $L_{d2} = 383.6\text{mH}$, $\Delta/2\pi = 297\text{Hz}$, $R_2 = 135\text{k}\Omega$ のように決定された。

4. 入出力電圧比

図2の入出力電圧比 $|V_2|/|V_1|$ 及びその位相差 θ_2 は、その[F]行列の要素A, Bを用いて式(2)及び式(3)のように導出される。ただし、ここでは漏れ出力の影響を考慮していないので、 V_0 と θ_0 をコリオリ力による出力電圧とその位相とすると、 $V_2 = V_0$, $\theta_2 = \theta_0$ となる。

$$|V_Q|/|V_1| = \{(A_R + B_R/R_2)^2 + (A_X + B_X/R_2)^2\}^{-1/2},$$

$$A_R = R_X(1 - X_Y X_{d2})/\bar{G}_X' - R_Y X_X X_{d2}/\bar{G}_X',$$

$$A_X = R_X R_Y X_{d2}/\bar{G}_X' + X_X(1 - X_Y X_{d2})/\bar{G}_X' + \bar{G}_Y' X_{d2},$$

$$B_R = R_X R_Y/\bar{G}_X' - X_X X_Y/\bar{G}_X' + \bar{G}_Y',$$

$$B_X = R_X X_Y/\bar{G}_X' + R_Y X_X/\bar{G}_X', \quad (2)$$

$$X_X = \omega L_X - (\omega C_X)^{-1},$$

$$X_Y = \omega L_Y - (\omega C_Y)^{-1},$$

$$X_{d2} = \omega C_{d2} - (\omega L_{d2})^{-1},$$

$$\theta_Q = \tan^{-1} \{-(R_2 A_X + B_X)/(R_2 A_R + B_R)\} \quad (3)$$

図4は $\Omega_0 = 100^\circ/\text{sec}$ とした場合の入出力電圧比 $|V_Q|/|V_1|$ と駆動側共振周波数 f_{0x} の関係を等価回路計算した結果である。同図の(a)はインダクタンス挿入時の特性である。また、(b)、(c)は無挿入時の特性で、負荷抵抗をそれぞれ $R_2 = R_0 = 1/(\omega_{0y} C_{d2})$, $R_2 = 10R_0$ とした場合である。ここで、 f_{0x} は駆動周波数 f_d に常に一致させて $f_{0x} = f_d$ として可変させている。また、同図における f_{0y}' は付加インダクタンスがない場合の出力端子開放時の制動容量 C_{d2} の影響をも考慮した検出側の共振周波数で、検出側の容量比を $\gamma_y (= C_{d2}/C_y)$ とすると、 $f_{0y}' = f_{0y}(1 + 1/\gamma_y)^{1/2}$ と与えられる。

これより、インダクタンスを付加すると付加しない場合より電圧比が大きく一定となる周波数範囲がかなり広帯域に及んでいることが確認された。したがって、この平坦特性の範囲内で駆動側の共振周波数 f_{0x} を、検出感度の低下無しに検出側の共振周波数 f_{0y} から離して設定することが可能となる。また、 f_{0x} の値が多少変化しても検出感度には変化がない構成となることも分かる。

図4 駆動側共振周波数に対する入出力電圧比特性

Fig.4 Characteristics of $|V_Q|/|V_1| - f_{0x}$.

- (a) $L_{d2} = 383.6\text{mH}$, $R_2 = 135\text{k}\Omega$,
(b) $R_2 = R_0 = 11.42\text{k}\Omega$, (c) $R_2 = 10R_0$.

一方、図5はこのときの入出力間の位相差 θ_Q と f_{0x} の関係の計算結果で、インダクタンス L_{d2} を付加した場合には無付加の場合と比較して使用周波数における位相変化が少

図5 駆動側共振周波数に対する入出力間位相差特性

Fig.5 Characteristics of $\theta_Q - f_{0x}$.

- (a) $L_{d2} = 383.6\text{mH}$, $R_2 = 135\text{k}\Omega$,
(b) $R_2 = R_0 = 11.42\text{k}\Omega$, (c) $R_2 = 10R_0$.

図6 インダクタンス素子付加時の入出力電圧比特性

Fig.6 Characteristics of $|V_Q|/|V_1| - f_{0x}$, with inductance element.

図7 入出力電圧比特性

Fig.7 Characteristics of $|V_Q|/|V_1| - f_{0x}$.

- (a) $L_{d2} = 383.6\text{mH} = L_{d0}$, $C_{d2} = 2930\text{pF} = C_{d0}$, $R_2 = 135\text{k}\Omega$,
(b) $L_{d2} = L_{d0} \times 0.1$, $C_{d2} = C_{d0} \times 10$, $R_2 = 43\text{k}\Omega$,
(c) $L_{d2} = L_{d0} \times 0.01$, $C_{d2} = C_{d0} \times 100$, $R_2 = 14\text{k}\Omega$.

なくなる。検出出力を同期検出して使用する観点からすると、位相変化の少ないことは望ましいと言える。また、図6は $L_{d2} = 383.6\text{mH}$ として R_2 の値を変えた場合の特性変化を示したもので、整合抵抗値 $R_2 = 135\text{k}\Omega$ のとき実効Q値の低下により、図示のような良好な特性が実現される。こ

のとき、負荷抵抗 R_2 の値をさらに大きくして検出端子開放状態 ($R_2 = \infty$) に接近させるに従い位相変化はさらに小さくなり殆ど変化しなくなるので、周波数応答特性における位相遅れのきわめて小さい構成の実現も可能となる。

さらに、図 7 には $L_{d2} C_{d2} = \omega_{0y}^{-2}$ 一定の条件を保って L_{d2} の値を変化させた場合の電圧比 $|V_0|/|V_1|$ と周波数 f_{0x} の関係を示した。 L_{d2} の値の減少と共に平坦部の電圧比は小さくなり、帯域幅 Δ の狭い特性となる。図 8 はこの場合の位相変化を示したもので、 L_{d2} の値の減少と共に位相変化が大きくなる。式(1)による L_{d2} の設計値が実現困難と思われる場合には、これらの結果を参考にして L_{d2} の値を実現可能な値にすることもできる。

なお、同時に振動ジャイロの入力端子にもインダクタンス L_{d1} を C_{d1} と並列に付加した場合についても考察しているが^{(2),(4)}、電圧比 $|V_0|/|V_1|$ は L_{d1} 及び入力抵抗 R_1 の存在には無関係の表現となり、検出側にだけに付加した本考察結果と等しいので、ここでは省略した。

図 8 入出力間位相差特性

Fig.8 Characteristics of $\theta_Q - f_{0x}$.

- (a) $L_{d2} = 383.6 \text{ mH} = L_{d0}$, $C_{d2} = 2930 \text{ pF} = C_{d0}$, $R_2 = 135 \text{ k}\Omega$,
- (b) $L_{d2} = L_{d0} \times 0.1$, $C_{d2} = C_{d0} \times 10$, $R_2 = 43 \text{ k}\Omega$,
- (c) $L_{d2} = L_{d0} \times 0.01$, $C_{d2} = C_{d0} \times 100$, $R_2 = 14 \text{ k}\Omega$.

5. 実験的検討

インダクタンスを付加した場合の振動ジャイロにおいては、前式(1)から駆動周波数 $f_d (= f_{0x})$ を $f_{0y}(1 \pm \Delta/4\pi)$ の範囲に設定すれば、感度低下のない構成が可能である。ここでは、この振動ジャイロの特性とインダクタンスを付加しない従来の構成の特性とを比較して、提案した本手法の妥当性を検証する。このため、これらの特性の等価回路考察及びその実験的検証を行った。ただし、この等価回路シミュレーションに用いた回路定数は $Q_x = 3,039$, $Q_y = 1,357$ であり、 R_1 以外の他の諸定数は前表 1 とわずかに異なるだけなので⁽⁵⁾、ここでは省略した。

$< 5 \cdot 1 >$ 角速度特性

まず、図 9 は $\Omega_0 = 90^\circ/\text{sec}$ とした場合の入出力電圧比 $|V_0|/|V_1|$ と駆動側共振周波数 f_{0x} の関係を計算した

図 9 入出力電圧比特性

(a) インダクタンス素子付加時, (b) インダクタンス素子無付加時

Fig.9 Characteristics of $|V_0|/|V_1| - \Omega_0$.

- (a) With inductance element. $L_{d2} = 399.5 \text{ mH}$, $R_2 = 143 \text{ k}\Omega$,
- (b) Without inductance element. $R_2 = R_0 = 11.9 \text{ k}\Omega$.

図 10 入出力電圧比の実験結果

(a) インダクタンス素子付加時, (b) インダクタンス素子無付加時

Fig.10 Characteristics of $|V_0|/|V_1| - \Omega_0$.

- (a) With inductance element, (b) Without inductance element.

結果である。同図の特性(a)はインダクタンスを付加した場合で、特性(b)の無付加の場合と比較して前同様電圧比が大きく一定の範囲が図示のように広がる。一方、図 10 は $f_{0x}/f_{0y} = 1.024$ と設定した場合の駆動周波数 f_d に対する電圧比 $|V_0|/|V_1|$ の関係の等価回路シミュレーション結果及び実験結果である。同図(a), (b)はそれぞれインダクタンス付加時、無付加時の特性で、シミュレーション結果と実験値はよく一致対応している。これらの特性の電圧比

$|V_Q|/|V_1|$ の最大値は前図 9 上の $f_{0x}/f_{0y}=1.024$ の条件における電圧比に相当する。

さらに、図 11 は Ω_0 に対する同期検波出力 $V_Q'/|V_1|$ の関係で、実験値には多少ばらつきが見られるが回路シミュレーション結果ともほぼ一致する直線特性となっている。これより、インダクタンス付加時の特性は無付加時の特性より電圧比がかなり大きく高感度となることが確認された。

図 11 入出力電圧比の角速度特性

(a)インダクタンス素子付加時, (b)インダクタンス素子無付加時

Fig.11 Characteristics of $V_Q' / |V_1| - \Omega_0$.

(a) With inductance element, (b) Without inductance element.

<5・2> 漏れ出力

ここで、 $\Omega_0 = 0$ の角速度が印加されない場合の出力電圧、

図 12 インダクタンス素子付加時の漏れ出力特性

(a) $|V_N|/|V_1| - f_d$ 特性, (b) $\theta_N - f_d$ 特性

Fig.12 Leakage output in the vibratory gyro with inductance element. (a) Characteristics of $|V_N|/|V_1| - f_d$.

(b) Characteristics of $\theta_N - f_d$.

図 13 インダクタンス素子無付加時の漏れ出力特性

(a) $|V_N|/|V_1| - f_d$ 特性, (b) $\theta_N - f_d$ 特性

Fig.13 Leakage output in the vibratory gyro without inductance element. (a) Characteristics of $|V_N|/|V_1| - f_d$.

(b) Characteristics of $\theta_N - f_d$.

即ち漏れ出力について考察して見た。図 12 はインダクタンス付加時の漏れ出力 V_N と駆動周波数 f_d の関係で、同図(a)はその振幅 $|V_N|/|V_1|$ であり、同図(b)はその位相 θ_N を表す。図示のように回路シミュレーション結果と実測値はほぼ一致対応することが分かった。一方、図 13 はインダクタンス無付加時の漏れ出力 V_N と駆動周波数 f_d の関係である。この場合も前同様、計算値と実測値は良く一致対応している。なお、これらの図の特性シミュレーションには既に提案されている漏れ出力による影響の考慮された等価回路を利用した⁽⁷⁾。この場合、漏れ出力の原因として圧電セラミックスの接着ずれや電極の非対称性に起因する力係数の不要成分の存在を考慮し、その値として $\Delta A_{2x} = -4.05 \times 10^{-3}(\text{gr./H})^{1/2}$, $\Delta A_{1y} = 5.75 \times 10^{-3}(\text{gr./H})^{1/2}$ なる実測値を採用した。これらの不要力係数成分についての詳細は文献に譲るが、 ΔA_{2x} , ΔA_{1y} は駆動側の振動が検出側に漏れる成分、駆動側で検出モードを励振してしまう成分にそれぞれ相当する。

したがって、回路シミュレーション結果と実測値がほぼ一致するという結果から、本試料では力係数の不要成分 ΔA_{2x} , ΔA_{1y} に起因する漏れ出力が支配的となっていることが分かった。さらに、インダクタンス付加の場合には無

付加の場合より漏れ出力が大きくなっていることも分かった。何れの場合も漏れ出力は大きく観測されているが、これは漏れ出力の低減化の調整は一切実施していないため、実際の使用に当たっては各種の低減化の工夫⁷⁾が実施されることは言うまでもない。

6. あとがき

圧電型振動ジャイロの駆動側及び検出側の共振周波数を離調した状態で高感度化を図る一方法として、検出側端子に並列にインダクタンスを付加させる簡便な手法を提案し、実験的にもその妥当性が検証された。得られた結果を要約すると、

- (1) インダクタンスを付加すると、設計した広い帯域幅において入出力電圧比が大きく一定値となり、位相変化の少ない特性が実現できること、
- (2) この検出側広帯域特性により、共振周波数のばらつきによる感度変化が押さえられるという製造上の大きなメリットが生まれること、
- (3) $L_{d2}C_{d2} = \omega_0^{-2}$ 一定の条件のもとで、付加インダクタンス値の可変設定が可能であること、
- (4) インダクタンス付加時はコリオリ力による出力成分だけでなく、漏れ出力成分も大きくなるので、その低減化により両出力成分の比の大きな構成が実現できること、

などが明らかになった。

本研究では、付加インダクタンスとしてコイルを使用した。さらに小型化を図るにはオペアンプを利用したインダクタンス回路を利用する方法も考えられる。これについては、改めて報告したい。

本研究を実施するに当たり御討論頂いた近野正・山形大学名誉教授並びに富川義朗・同大教授に深謝申し上げます。なお、本研究には昭和 63 年度文部省科学研究費補助金（一般(C), No.63550284）及び平成 11 年度同補助金（基盤研究(C), No.11650057）の援助を受けたことを付記する。

（平成 11 年 08 月 30 日受付, 平成 11 年 11 月 10 日再受付）

文 献

- (1) 日刊工業新聞社：“特集 21 世紀に向けての振動ジャイロスコープセンサ”，超音波テクノ，Vol.6, No.9, pp.15-53 (1994-09)。
- (2) 菅原，富川：“圧電形振動ジャイロの等価回路考察”，日本音響学会，講論集(II)，No.2-4-16, pp.833-834 (1988-10)。
- (3) 菅原，富川，近野：“圧電形振動ジャイロの入出力インピーダンスについて”，日本音響学会，講論集(II)，No.1-4-7, pp.665-666 (1989-03)。
- (4) 菅原，工藤：“インダクタンスを挿入した圧電形振動ジ

ャイロの等価回路解析”，石巻専修大学研究紀要，No.10, pp.49-59 (1999-02)。

- (5) 菅原，近野，富川：“圧電形振動ジャイロの検出側広帯域化に関する実験的検討”，日本音響学会，講論集(II)，No.1-4-7, pp.841-842 (1989-10)。
- (6) 近野，菅原，尾山，中村：“圧電形振動ジャイロ”，信学論(A)，Vol.J68-A, No.6, pp.602-603 (1985-06)。
- (7) 菅原，近野，工藤，吉田：“横振動音片を用いた圧電形振動ジャイロスコープの漏れ出力の等価回路考察”，信学論(A)，Vol.J76-A, No.3, pp.263-272 (1993-03)。
- (8) 近野 正：“メカニカルフィルタ”，共立出版，p.40 (1954-08)。

菅原 澄夫（正員） 昭和 22 年 8 月 27 日生。47 年 3 月

山形大学大学院修士課程修了。同年 4 月同大学工学部助手，63 年同助教授，平成元年 4 月石巻専修大学理工学部助教授，平成 9 年同教授，現在に至る。工学博士。超音波エレクトロニクス，特に振動ジャイロスコープに関する研究に従事。

電子通信学会学術奨励賞。電子情報通信学会，日本音響学会会員。

工藤 すばる（非会員） 昭和 35 年 3 月 9 日生。59 年

3 月東北大学大学院修士課程修了。同年 4 月横河電機(株)入社，62 年 12 月アデス電気(株)入社，平成元年 4 月石巻専修大学理工学部助手，平成 8 年同講師，現在に至る。博士(工学)。超音波エレクトロニクス，特に振動ジャイロスコープ

に関する研究に従事。電子情報通信学会，日本音響学会会員。