ハードスプリング効果を用いた振動型ジャイロ駆動法の提案

学生員 藤 田 孝 之 (姫路工大)

非会員 岡 田 茂 (姫路工大)

正 員 前 中 一 介 (姫路工大)

非会員 前 田 宗 雄 (姫路工大)

Driving Technique of Reference Vibration for Vibratory Gyroscopes using Hard Spring Effect

Takayuki Fujita, Student Member, Shigeru Okada, Non-Member, Kazusuke Maenaka, Member, Muneo Maeda, Non-Member
(Himeji Institute of Technology)

Recently, many micromachined vibratory gyroscopes are proposed. Almost all the devices have been made efforts to obtain the double resonant mode in order to improve the sensitivity of micro gyroscopes. Nevertheless, there are some difficulty to obtain the accurate structure for consistent resonant frequencies between reference vibration and detection vibration in fabrication steps. In this paper, we show the design strategy of the high sensitive vibratory gyroscope using the hard spring effect positively. We propose the method for adjusting vibrating frequency and show the example of the actual device and some measured data for high performance devices.

キーワード：振動型ジャイロ、参照振動、双共振、ハードスプリング効果、ジャイロ스코プ、角速度センサ

1. はじめに

近年、マイクロマシニング技術による角速度センサ(ジャイロ스코プ)の研究・開発が盛んに行われている⁽¹⁾。これまで提案されている角速度センサのほとんどは、高感度化のために双共振を用いた構造が採られている。このため共振構造の設計、設計どおりの共振周波数を得るための作製プロセスの検討など様々な努力がなされている。また、構造の微小化や形状的な制約から生じるハードスプリング効果に対する検討⁽²⁾も盛んに行われている。本稿では振動型微小デバイスにおける構造的な問題点と考えられていたハードスプリング効果を共振周波数調整の手法として用い、双共振の利点を生かした高感度な振動型ジャイロの構造設計手法を提案し、検討する。

2. 参照振動駆動と双共振

今日報告されている振動型マイクロジャイロでは双共振による感度増倍効果を用いるために、参照振動の周波数と振動系の検出振動方向の共振周波数を一致させるための努力がなされている。また、参照振動のための駆動エネルギーを低減させ、出力への漏れ信号を最小にするために、参照振動は参照振動方向の共振周波数に一致させるのが普通である。参照振動軸と検出振動軸はコリオリ力の原理上、直交しているため、結果的に直交した2軸の共振周波

数を一致させた構造が必要である。一般にこの共振周波数は数%程度で一致させるべきであるとされているため⁽³⁾、2次共振系では振動する質量とそれを支えるバネ系の製作精度として数%の平方根に相当する精度(共振周波数はバネ定数/質量の平方根に比例すると考えられるため)、すなわち1%以下の精度が必要であるということになる。一般にマイクロマシニングで作製されるデバイスでは機械的Q値が高いことと相まって共振周波数の正確なあわせ込みは現実の問題として難しく、実際には動作時に電氣的な調整が行われることも多い⁽⁴⁾。

3. ハードスプリング効果とデバイス例

ハードスプリング効果はバネを形成する材料の硬さの非線形性やバネ構造に起因し、バネの曲げ変位が大きくなるとバネが硬くなりなり、結果として振幅に比例して共振周波数が高い方向へ変化する現象である。なお材料がシリコンの場合は材料のバネ特性の非線形性は考慮する必要はないとされている⁽⁵⁾。バネ構造でハードスプリング効果を発現させるためには、例えば図1に示すように両持ちのメンブレンバネで質量を支えた系を考えればよい。図のように参照駆動することを考えた場合、質量の変位が小さい場合にはメンブレンの曲げ硬さが系の共振周波数をほぼ決定するが、変位が大きくなった場合、メンブレンの伸び方向の硬さが無視できなくなり、両者の合成バネを考える必要が出

図1 ハードスプリング効果を発現するバネ構造例
Fig. 1. Spring structure with hard spring effect.

てくる。メンブレンバネの曲げ硬さ K_B は、ヤング率を E 、メンブレンの厚さを t 、長さを L としたとき、メンブレンの単位幅あたり $K_B=E(t/L)^3$ であるが、メンブレンの引っ張り硬さ K_E は $K_E=E(t/L)$ である。具体的設計例として $L=1\text{mm}$ 、 $t=5\mu\text{m}$ としたとき、両者の硬さの比 $R=K_E/K_B$ は40000におよぶ。図1でマスの変位を x とすると、曲げバネと引っ張りバネの合成バネによる反力 F_{eff} は x の関数として

$$F_{\text{eff}} = k_B x \left(1 + R \left(1 - \frac{L}{\sqrt{L^2 + x^2}} \right) \right)$$

となり、 x の増大にともない共振周波数が高域へシフトすることがわかる。

図2は実際にデバイスを作製し、その共振特性を測定した例である。極めて小さな駆動振幅を与えた場合、構造体の Q は約300程度であり駆動周波数の増大とともに共振点 f_0 (約1740Hz)で急峻に振幅が増大し、共振点を過ぎると速やかに振幅が低下する一般的な2次系の共振カーブを描く。しかし、駆動振幅が増加し、例えば $0.1\mu\text{m}$ 程度になると図2のように微小駆動時の共振周波数のほぼ1.5倍の周波数まで、大きな振幅を維持する曲線を描く。すなわち、大きな

図2 ハードスプリング効果の測定例
Fig. 2. Measured hard spring effect.

振動振幅が広い周波数範囲で得られる。実質的な機械的 Q 値に相当する振動振幅と駆動振幅の比は数十にまで低下するが、振動型ジャイロなどへの応用を考えた場合には実用的に十分な値である。なお、駆動振幅を更に大きくし、例えば $10\mu\text{m}$ とした場合、この振幅の上昇は本来の共振周波数の3倍にもおよぶという結果が得られている。

なお、振幅が最大となる周波数の近辺では、振動が極めて不安定な挙動を示し、わずかな外力で大変位振動が中断するという現象が見られた。このため、ハードスプリング効果を有効に利用するためには十分な駆動振幅を共振系に与え、最大振幅を示す周波数より十分低い周波数で使用する必要がある。さらに、静止状態から大振幅振動を得るためには駆動周波数を低周波側から高周波側に向かって変化させる必要がある。しかしこれは簡単なアナログ回路、またはマイクロプロセッサにより容易に実現可能であるため大きな問題ではないと考えられる。

4. 振動型ジャイロへの適用

ここでは本効果を双共振を用いる振動型ジャイロへ適用する場合の設計指針について簡単に議論する。双共振を用いる場合には、系の検出方向の共振周波数と参照振動周波数を一致させる必要がある。具体的には、例えば図2を考えた場合、 f/f_0 が1.2~1.4程度の範囲であれば十分安定な振動を示すため、構造設計としては参照振動方向の共振周波数(微小振動時の) f_0 に対し、検出方向の共振周波数を1.3 f_0 程度に設計し、ハードスプリング効果によって大振幅を維持したまま駆動周波数を検出方向の共振周波数へ必要なだけ近づけていく。この際、実際のデバイスに許される共振周波数の製造トレランスは約±10%となり、余裕を持ったデバイス製造が可能になる。なお、更に大きなトレランスが要求される場合には単に駆動振幅を増すだけでよい。

5. まとめ

本稿では、ハードスプリング効果を積極的に利用することにより、双共振の利点を生かした高感度な振動型ジャイロの構造設計手法を提案した。本手法を振動型ジャイロに適用することにより、容易に高感度なデバイス設計が可能であると考えられる。

(平成11年09月30日受付, 平成11年11月19日再受付)

文 献

- (1) 前中:「シリコンジャイロの現状」, 電学論E, 116-E, 131-135 (平8-4)
- (2) W. Geiger, H. Sandmaier, W. Lang, "A Mechanical Controlled Oscillator", Dig. of Tech. Papers, The 10th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, (1999) 1406-1409.
- (3) 前中, 藤田, 前田:「振動形マイクロジャイロの設計指針」, 電学論E, 118-E, 377-383 (平10-7/8)
- (4) T. Tsuchiya, Y. Kageyama, H. Funabashi, J. Sakata, "Vibrating Gyroscope Consisting of Three Layers of Polysilicon Thin Films", Dig. of Tech. Papers, The 10th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, (1999) 976-979.
- (5) 五十嵐, 豊田研究報告, 17, (1963) 1.