

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年8月27日現在

機関番号：31308

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560055

研究課題名（和文） 2軸加速度及び1軸角速度の検出可能な高性能振動型センサの研究

研究課題名（英文） Study of High-Performance Mechanical-Vibration Type Sensor Detecting Two-Axis Acceleration and One-Axis Angular Rate

研究代表者

菅原 澄夫 (SUGAWARA SUMIO)

石巻専修大学・理工学部・教授

研究者番号：00007197

研究成果の概要（和文）：本研究では、2軸方向の加速度と1軸回りの角速度を同時に検出できる、新しい圧電振動型センサが考案され、有限要素法による設計並びにその試作が行われている。本センサの特徴は、従来の構成とは異なり、加速度と角速度を別々の振動子を利用して、加速度は振動子の共振周波数変化から、また角速度は横置き型の振動ジャイロセンサから、それぞれ検出させる点にある。

研究成果の概要（英文）：The new piezoelectric high-performance mechanical-vibration type sensor which can detect the acceleration along two axial directions and the angular rate around one axis is proposed in this study. The sensor is designed using a finite-element method, and its trial production is carried out for experimental verification. The sensor differs from the conventional one at the point that acceleration and angular rate are detected using separate vibrators. Acceleration is detected from the shift of the resonance frequency of a vibrator, and angular rate is detected from another vibrator which is a flatly-supported vibration-type gyroscope.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	1,300,000	390,000	1,690,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用軌理学・工学基礎、応用物理学一般

キーワード：加速度センサ、角速度センサ、振動ジャイロ、有限要素法、横振動子、力センサ

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、車両やロボットなどの運動物体の姿勢制御やナビゲーション用センサとして、この種センサの基本的構成である2軸加速度及び1軸角速度を同時検出できるマスプロによる低価格化の可能な構造を有する振動型センサが要求されている。

(2) 申請者は、このようなセンサとして、これまで科研費補助金により研究を進めてき

た周波数変化型2軸加速度センサに、新たに1軸角速度センサを組み合わせて一体化し、最終的にマスプロによる低価格化が可能な単純構造の3情報同時検出可能な1個の振動型センサを実現しようと考えた。

(3) 国内では、一般的な1軸及び3軸の加速度センサについては報告例が見られるが、1個のセンサで2軸方向の加速度を検知するセンサ構成については、未開発になっていた。

(4) また、2軸加速度センサに組み込まれる1軸角速度センサについては、既に提案した面内振動モードを利用した横置き型の平面型角速度センサを利用することにした。このセンサは、その表面に垂直な軸回りの角速度を検出することが可能で、しかもセンサの圧電的な駆動・検出は構造の側面に頼らず平板表面のみで実施できる特長を有しており、2軸加速度センサとはベストの組合せとなる。本研究では、このセンサについてもその研究成果を活用する。

2. 研究の目的

本研究は、申請者提案の周波数変化型2軸加速度センサと1軸角速度センサを平面的に一体化させて、2軸加速度と1軸角速度の3情報を同時検出可能な新しい高性能振動型センサを考案して、有限要素法による設計を行い、その試作実験を行おうとするものである。本センサでは、加速度と角速度を別々の振動子で検出させることが可能で、両信号の分離と独立調整が可能となる点が従来のセンサ構成とは異なる。

3. 研究の方法

本研究では、提案した新しい高性能振動型センサ実現のために、以下の方法に従って検討を進める。

(1) 1軸角速度センサの構造選定と設計

2軸加速度センサに組み込む1軸角速度センサの選定を行い、その寸法値が妥当な値となるか、また支持固定部の振動変位が特性に影響を与えない程度まで低減化可能であるかなど、有限要素法解析により明らかにし、これらを満足するセンサの設計を行う。

(2) 2軸加速度センサの設計

これまで得られた2軸加速度センサに関する知見では、センサの質量が加速度により回転運動し、その結果好ましくない他軸感度が発生することが明らかにされた。この回転による影響を低減させるために、幾つかの工夫が検討され、支持棒の寸法値を調整して低減化を図る方法がより現実的で好ましいと言う結論が得られていた。本研究では、この方法を採用して、質量回転の無い他軸感度を低減させた加速度センサの検討を行う。

(3) 2軸加速度及び1軸角速度検出用振動型センサの構造決定と設計

前述の2軸加速度センサと1軸角速度センサを平面的に一体化させた複合構造の振動型センサの設計を行う。そのために、まず両センサの配置を決定し、次いでその設計を行い、さらに試作実験を実施したい。

4. 研究成果

本研究で得られた成果及び結論は、以下のよう要約できる。

(1) 1軸角速度センサの構造選定と設計

図1は1軸角速度センサとして使用される横置き型の4脚音さ振動子の構造である。また、図2はその駆動用モード f_{H1} と検出用モード f_{H2} をそれぞれ示したもので、両者は接近させて使用される。外側2本のアームが逆位相に振動する同図(a)の駆動用モードを予め励振させた状態で、z軸回りに Ω_0 なる角速度を印加させると、アーム先端部の折れ曲がり質量部に働くコリオリ力により、外側アーム2本が同位相で振動する同図(b)の検出用モードが励振される。このモードを検出することによって、印加角速度 Ω_0 が検出できる1軸角速度センサが実現できる。

図3は、このような4脚音さ振動子を用いた試作1軸角速度センサの特性例で、検出出力は印加角速度 Ω_0 に比例した直線特性となる。なお、検出出力は駆動信号を参照信号として同期検波して得られる。

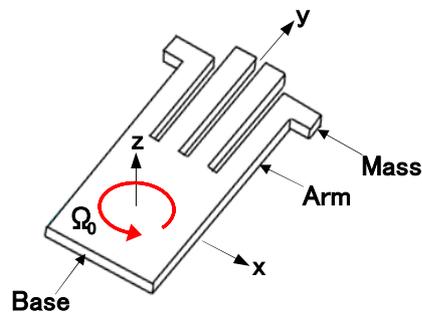
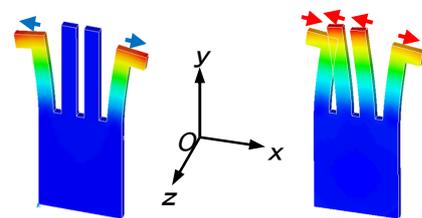


図1. 1軸角速度センサの構造例



(a) Driving mode f_{H1} (b) Detecting mode f_{H2}
図2. 角速度センサの駆動及び検出モード

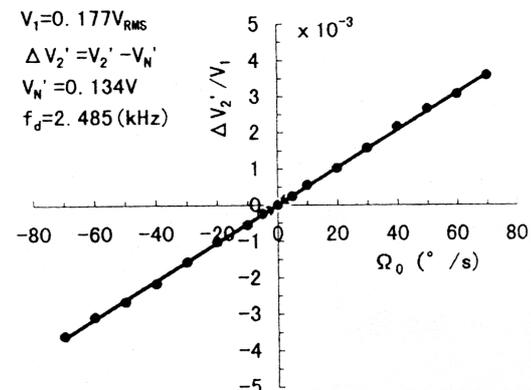


図3. 4脚音さ振動子・角速度センサの特性

(2) 2軸加速度センサの設計

図4は、2軸加速度センサの構造である。

45° に対称配置された 2 個の横振動子の一端はフレームに固定され、他端は質量に接続され、質量は 4 本の折り曲げ支持棒でフレームに固定される。この 2 個の横振動子を予めその面外 1 次モードで振動させて置いた状態で、センサに x 、 y 軸方向に加速度 α が印加されると、質量 M に加速度による力 $F(=M\alpha)$ が印加され、この力は加速度の向きにより振動子に対して引張り力或いは圧縮力として作用し、振動子の共振周波数を増減させる。これら 2 個の振動子における周波数の増減の組合せから加速度の向きを、また増減の絶対値から加速度の大きさを、それぞれ知ることができる。このことは、既に実験的にも検証され得られた成果となっている。

本センサは、 x 軸非対称、 y 軸対称の構造であるため、 x 軸方向加速度の印加時には図 5 のように x 軸非対称性に伴う質量回転がわずかに発生し、 y 軸方向加速度の印加時にはこの回転運動は発生しない。しかし、センサを $\theta_z = -45^\circ$ 回転させて $\sqrt{2}$ 倍の高感度状態で使用する際には、 x 軸、 y 軸何れの軸方向へ加速度を印加させても質量回転が発生する。このとき、センサ特性上には、この質量の回転運動に起因した他軸感度が x 軸、 y 軸の両方向に発生し、実験的にも検証されている。

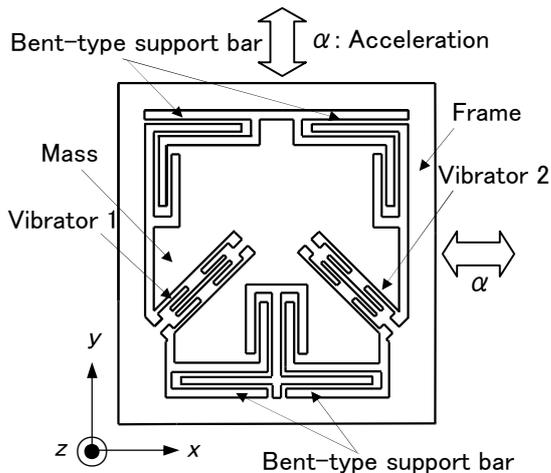


図 4. 周波数変化型 2 軸加速度センサの構造

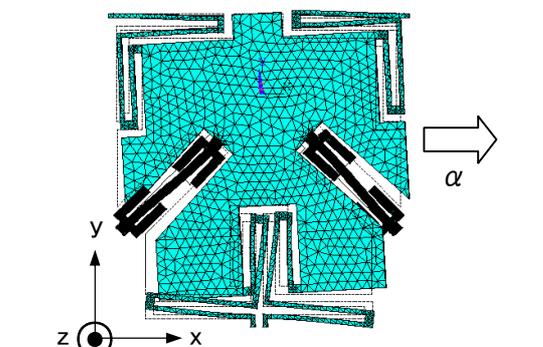


図 5. x 軸方向に加速度 α を印加させた場合の 2 軸加速度センサの質量回転

ここで、このようなセンサの質量の回転運動を無くして直線運動を実現させる工夫について述べる。まず、 x 軸方向に加速度を印加させてセンサの下部 2 本の折り曲げ支持棒の l_2 部の寸法のみを可変して、図 6 のように質量の回転運動が発生しなくなる l_2 の値を決定する。次に、この l_2 の値を一定として、 l_1 を可変して同様の解析を行い、振動子 1 の y 軸方向の共振周波数変化率 $\Delta f_{1y}/f_{01}$ を x 軸方向の周波数変化率 $\Delta f_{1x}/f_{01}$ に一致させ、2 軸方向の周波数変化率、すなわちセンサ感度が等しくなる l_1 の値を決定した。この場合、 $\theta_z = -45^\circ$ としても質量の回転運動が発生しなくなる。

図 7 は、支持棒の寸法調整後の試作センサで、図 8 はその $\theta_z = -45^\circ$ におけるセンサ特性

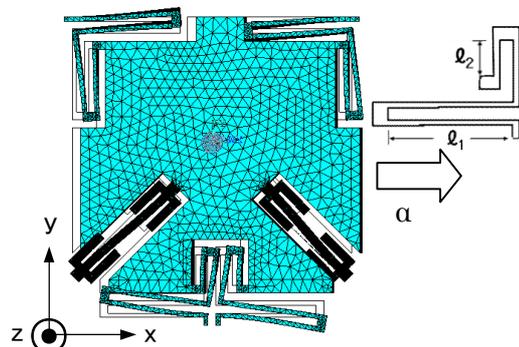


図 6. x 軸方向加速度印加時の質量運動

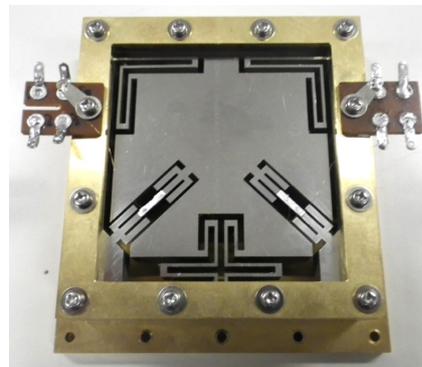
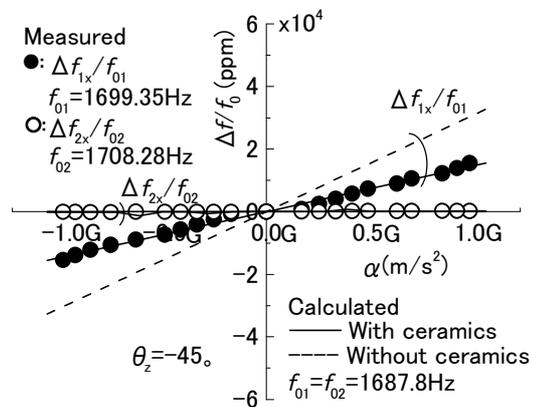
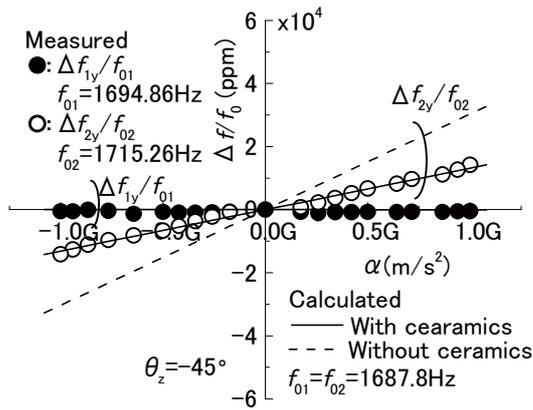


図 7. 支持棒調整後のセンサの試作結果



(a) α to the x -axis direction



(b) α to the y-axis direction
 図 8. 2 軸加速度センサの特性

の測定結果である。これより、振動子の駆動・検出用に接着した圧電セラミックスによる感度の低下及び共振周波数のずれが見られるが、実測値は解析値と良く対応しており、感度は加速度に対して直線的に変化していることも確認された。本工夫によって、他軸感度は解析では 5.1% から 0.06% まで、また実験的には 7.8% から 0.2% まで大幅に低減化されることが明らかになった。

(3) 2 軸加速度及び 1 軸角速度検出用振動型センサの構造決定と設計

図 9 は 2 軸加速度センサである図 7 に、図 1 の 1 軸角速度センサを組み合わせることで一体化させた振動型センサの構造である。本センサは、図 7 の加速度センサと外形寸法が全く等しいが、質量が 4 脚音さ振動子の形状相当分だけ切削され軽量となっている。

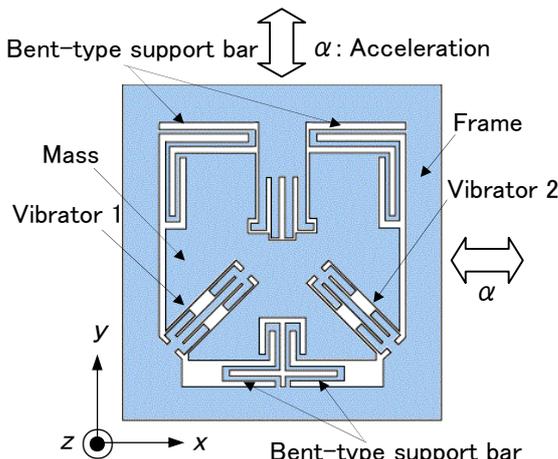


図 9. 振動型センサの構造

まず、1 軸角速度センサとなる 4 脚音さ振動子の設計について述べる。底部端を固定した振動子の厚さ t に対する各種共振周波数の解析を実施した。その結果、角速度センサとして使用される駆動用と検出用の各モードの共振周波数 f_{H2} と f_{H1} の値は、それぞれ

8,464kHz と 8,589kHz に設計され、周波数差は約 125Hz に設定された。

次に、2 軸加速度センサの設計結果について述べるが、この場合図 7 の質量とは 1 軸角速度センサ形状相当分が異なるだけなので、詳細については省略する。図 10 は、支持棒調整による設計後の 2 軸角速度センサの x 軸方向加速度印加時の質量の運動解析結果で、質量が回転せず直線運動することが分かる。もちろん、y 軸方向へも直線運動するが、 $\theta_z = -45^\circ$ としても質量は同様に 2 軸方向に直線運動することが確認された。また、振動型センサの特性解析も行ったが、 $\theta_z = -45^\circ$ に設定した場合、x、y 軸方向に加速度を印加させても、他軸感度の周波数変化率 $\Delta f_{2x}/f_{02}$ 、 $\Delta f_{1y}/f_{01}$ が何れも現れない理想的な特性が実現されている。また、図 11 は試作した振動型センサの外観である。

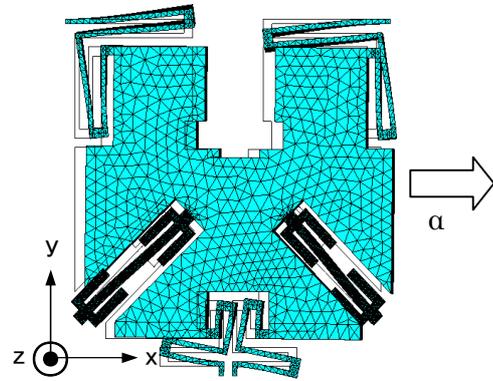


図 10. x 軸方向へ加速度 α を印加させた場合のセンサの質量運動

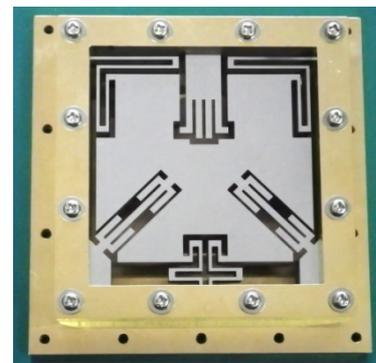


図 11. 振動型センサの試作結果

(4) 成果のまとめと今後の展望

- ①当初の目標であった周波数変化型 2 軸加速度センサと 1 軸角速度センサを組み合わせる圧電振動型センサの構成については、その有限要素法による設計が実施され、実験的にも一部検証することができた。しかし、本報告書作成時も実験継続中であったため、結果については今後順次公表して行きたい。
- ②加速度センサについては、使用している横

振動子の底部固定端における振動変位が元々非常に小さいので、振動子を複数個同一基板に設けても、それら間の機械的結合が極めて小さくできる特長がある。振動型センサにおける組み合わせ用として利用するだけでなく、センサ単独での使用ももちろん可能で、3軸構成への発展も考えられる。

③また、組み合わせる角速度センサについても、他の構造や2軸或いは3軸構造の利用も可能であり、今後さらなる発展が期待できる。

④従来のセンサでは、一つの振動体から加速度と角速度を分離検出させるため高度な技術が必要とされ、著しく複雑で高価な駆動・検出回路が不可欠である。その上、一旦センサにトラブルが発生すると、加速度及び角速度の信号が全て検知不能となる場合が多く、センサのコストダウンにはつながり難い。

⑤本研究は、加速度と角速度を別々のセンサ部で分担検出させる新しいデバイスを提案・開発するものである。本センサでは、両信号の分離検出が可能で、仮にセンサがダメージを受けても、加速度或いは角速度何れかの信号が継続検知される可能性が高い。

⑥今後、加速度センサについてはマस्पロ化の観点からさらに改良すべき点があり、角速度センサとの組み合わせについても前述のようにさらに高性能化が期待できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

- (1) J. Terada, Y. Uetsuji, and S. Sugawara: “Construction of Two-Axis Acceleration Sensor Using a Cross-Coupled Vibrator”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 51, No. 7 (2012) 106602-1~6. (査読有)
- (2) S. Sugawara and Y. Kajiwara: “Improvement of Characteristics of Frequency-Change-Type Two-Axis Acceleration Sensor”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 51 (2012) 07GC06-1~6. (査読有)
- (3) S. Sugawara and J. Terada, and Y. Takahashi: “Analysis of Characteristics of Coupled Bending Vibrators”, Vol. 51 (2012) 07GC05-1~5. (査読有)
- (4) J. Terada, S. Sugawara, and Y. Mito: “Construction of Acceleration Sensor Using a Coupled Vibrator”, Vol. 50 (2011) 07HC04-1~4. (査読有)
- (5) S. Sugawara and Y. Kajiwara: “Finite-Element Analysis and Experimental Study of Frequency-Change-Type Acceleration

Sensor”, Vol. 49 (2010) 07HD02-1~6. (査読有)

[学会発表] (計6件)

- (1) Y. Kajiwara and S. Sugawara: “Consideration of Characteristics of Frequency-Change-Type Two-Axis Acceleration Sensor”, Proc. of 32nd Symp. on Ultrason. Electron., Kyoto, No. 3Pb3-6, pp. 499~500 (2011-11). (査読無)
- (2) S. Sugawara and J. Terada, Y. Mito, and Y. Takahashi: “Analysis of Characteristics of Coupled Bending Vibrators”, Proc. of 32nd Symp. on Ultrason. Electron., Kyoto, No. 3Pb3-5, pp. 497~498 (2011-11). (査読無)
- (3) J. Terada, Y. Uetsuji, and S. Sugawara: “Construction of Two-Axis Acceleration Sensor Using a Cross-Coupled Vibrator”, Proc. of 32nd Symp. on Ultrason. Electron., Kyoto, No. 3Pb3-1 ~ 2 (2011-11). (査読無)
- (4) J. Terada, S. Sugawara, and Y. Mito: “Construction of Acceleration Sensor Using a Coupled Vibrator”, Proc. of 31st Symp. on Ultrason. Electron., Tokyo, No. 1Pa-35, pp. 85~86 (2010-11). (査読無)
- (5) S. Sugawara, R. Sasada, and Y. Kajiwara: “Experimental Study of Frequency-Change-Type Force Sensor”, Proc. of 31st Symp. on Ultrason. Electron., Tokyo, No. 1Pa-34, pp. 83~84 (2010-11). (査読無)
- (6) S. Sugawara and Y. Kajiwara: “Improvement of Characteristics of Frequency-Change-Type Acceleration Sensor”, Proc. of 31st Symp. on Ultrason. Electron., Tokyo, No. 1Pa-32, pp. 79~80 (2010-11). (査読無)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菅原 澄夫 (SUGAWARA SUMIO)
石巻専修大学・理工学部・教授
研究者番号: 00007197