

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2006 ~ 2008
 課題番号：18760050
 研究課題名（和文） 三軸回転角速度の検出を目的とした
 モノリシック振動ジャイロセンサに関する研究
 研究課題名（英文） A study on monolithic vibrational gyrosensor
 to detect triaxial angular velocities.
 研究代表者
 田村 英樹 (TAMURA HIDEKI)
 山形大学・大学院理工学研究科・助教
 研究者番号：90396581

研究成果の概要： 組込用途などの小形で低コストな回転角速度センサの利用と要求が広がっており、振動型ジャイロセンサは最も有望なタイプであるが、通常は一つのデバイスで一つ無いし二つの回転軸しか検出出来ない。小形化アプローチとして一つのモノリシック振動デバイスにおいて三軸全ての回転角速度が検出されれば有用である。本研究ではフォトリソグラフィならびにエッチング加工で量産可能な水晶 Z 板より得られる単一振動子を用いて三軸ジャイロ実現の可能性を示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	900,000	0	900,000
2007 年度	1,700,000	0	1,700,000
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	270,000	3,770,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用物理学一般

キーワード：ジャイロセンサ、圧電、3 軸角速度、多軸ジャイロ、水晶、モノリシック振動子、超音波、振動デバイス

1. 研究開始当初の背景

これまでの航空宇宙産業はもとより、近年では例えば自立型ロボットや高性能・高安全性を目指した車両などのように自由空間中での高度な制御が要求されている。さらにはアミューズメントを始め医療分野に至るまで Quality of life 向上に関する感性操作に関する研究開発も盛んに行われている。このような中で慣性センサの必要性は益々高まっ

ている。これまで既に加速度センサに関してはかなりの小形化が進み広く応用が成されている。しかしながら原理構造的に簡単な加速度センサに比べて、回転角速度を検出するジャイロセンサはまだ高価であり小形化も十分であるとは言えなかった。従ってジャイロセンサの小形・低コスト化は産業応用において非常に期待されている事から一つには MEMS による小形化検討などが進めら

れていた。しかしながらセンサ能力で重要となる温度特性に関してシビアな要求があり必ずしも十分な特性のデバイスは得られてはいなかった。

このような状況下において、温度特性に優れた水晶振動ジャイロは小形低価格方式としての存在感を持っていたが更なる小形化に向けての検討はそれほど容易ではなかった。加えて、振動ジャイロは多くの場合、単一の振動子で一軸もしくは二軸回転角速度しか検出出来ず、従って三軸全ての検出を行う場合には複数のセンサを配置する必要があり、これも全体的に見てセンサのしめる体積が大きくなる要因であった。

2. 研究の目的

温度特性に優れ、またエッチング加工により量産性にも優れた圧電材料である水晶Z板を用いて、単一振動デバイスで三軸全ての回転角速度を検出可能な振動ジャイロセンサの実現に向けてデバイスの基本構造設計ならびに信号処理方式の研究を行った。

3. 研究の方法

(1) 初期解析

駆動と検出にそれぞれ直交独立した共振モードを縮退させるのが振動ジャイロ設計の基本である事から、そのような多重モード振動子を有限要素法解析を用いて構造設計を行った。この際に当初のアイデアとして水晶の結晶性質であるZ軸に対して三回対称となる特性に注目した。

(2) 試作評価と課題の明確化

初期構造に関して試作を行い、これより現実的に生じる諸問題を明らかにして次の再設計に向ける。

(3) 改良構造の再設計

現実にはエッチング加工の際に断面が垂直に溶解せず、特定の結晶面が固有の構造で残留するエッチング残渣の問題が生じた。これは原理的および産業的に取り除く事が出来ない事から、このエッチング残渣構造を含めた上でデバイスの対称性が保たれるように、新たに改良構造を設計した。

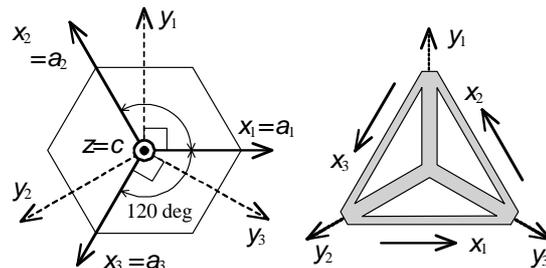
(4) 検出方式とその他の諸検討

改良構造に関して具体的な信号処理方法を検討して三軸回転角速度の分離検出が可能となるような演算方式を検討してシミュレーションによって検証を行った。また多重モード設計時に漏れ振動に関して評価する解析手法について計算負荷の少ない手法についての検討を進めた。

4. 研究成果

(1) 初期設計と試作評価

水晶は晶系 32 に属する三方晶の異方性材料である。すなわちx方向とy方向に関する特性が異なり、従って 90 度回転対称な構造ではx軸側の振動要素とy軸側の振動要素に違いがあり特に3自由度を与える為の複数モード縮退の設計が大変困難となる。そこで結晶の対称性に注目すると、水晶は図 1(a)に示すようにz軸(c軸)に関して三回対称性を示し、すなわちz軸で 120deg 回転させると諸特性が再び一致する事になる。



(a) Coordinate system.

(b) Basic form.

図1 水晶の三回対称性を示す基本座標系

従って、図 1(b)のように三回対称形とした振動子では、外周の梁部分の振動特性は三カ所のいずれも等しい事になる。そこで、次の図 2 の振動子によって多軸ジャイロが可能であると考えた。中央の固定部分、外周の駆動梁であるコリオリ力作用部と、検出部となる放射状の連結脚からなる。

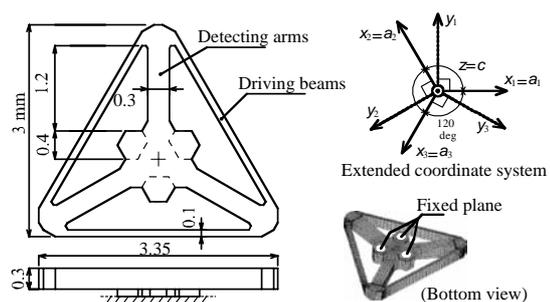


図2 三回対称形水晶振動子の基本構造

また、ジャイロ動作に用いる振動モードを図 3 に示す。

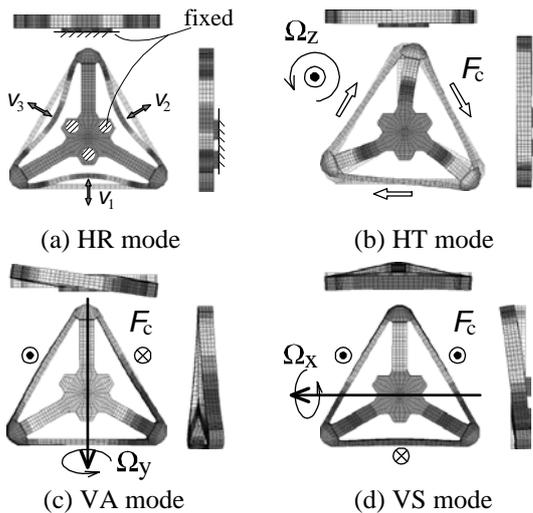


図3 三回対称振動子の共振モード

図3(a)の水平面内径方向振動(HR)モードは、中央支持部の影響も受けにくく安定である為、駆動モードとして利用出来る。従って外周梁の中央部付近の振動質量要素について慣性力の作用を考える。面垂直軸まわりのzの印加によって生じるコリオリ力は、x-y水平面内で固定点まわりで同じ周方向に向く為、面内で回転するHTモード成分を生じる。面内軸のy, xに関してはそれぞれ梁中央部に図3(c), (d)のようなz軸方向へのコリオリ力が作用して面垂直非対称(VA)モードならびに、面垂直対称(VS)モードの成分が生じる。ここで、駆動モード励振時には脚部の歪みは僅かであるが、HT, VA, VSモード成分が生じるとそれぞれ特徴的な歪みが生じる。その際に圧電的に生じる電荷を検出し、後段の検出回路で信号処理を行う事で三軸の角速度を識別して検出する事が出来る。

試作した振動子を図4に示す。振動子周辺に見える黒い部分はエッチング残渣である。これはエッチングレートの違いにより特にr面およびR面が除去されずに残り、結果として振動子の左右非対称を引き起こすものである。このため梁部付け根は左右によって残渣量が異なり、梁変位部の重心が振動子の中心線からずれる事になる。これは駆動モードと検出モードの振動結合の要因となり、信号の分離検出を困難にする。従ってこのようなエッチング残渣の影響は改善しなくてはならない。

また、この試作振動子の駆動モードに関する電気特性を測定した結果は、真空中および大気中いずれも駆動抵抗が非常に大きい。従って自励振駆動において駆動回路のゲインを非常に大きくする必要があり、場合によっては発振停止といった問題を引き起こしか

ねない。せん断を用いた駆動はそもそも一般的な方法では無かったが、試作測定結果はこれが困難な方法である事を示しており修正を要する。

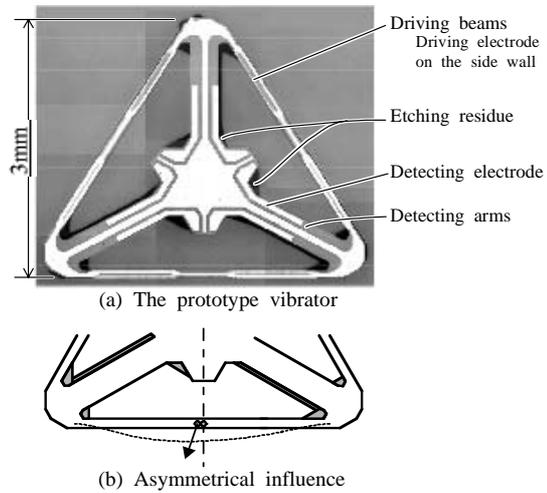


図4 試作した基本振動子に関して、エッチング残渣とその影響

(2) 特性改善の検討

前述の基本構造では幾つかの問題点が明らかとなったが、まずはエッチング残渣について検討する。残渣の発生は特に+x面であり、これが-x面との違いにより左右の非対称を引き起こす。また、エッチング残渣は長時間のエッチングで減少させる事は出来るが、生産性を考えると長時間のエッチングは不利である。そこで残渣の発生自体は許容し、その対称性を保つ事を目指す。図5は振動子の方向を変えた場合の+x面、すなわちエッチング残渣の発生方向を表したものである。このような向きにすることで、エッチング残渣を含めて対称性の良い振動子を得る事が出来る。

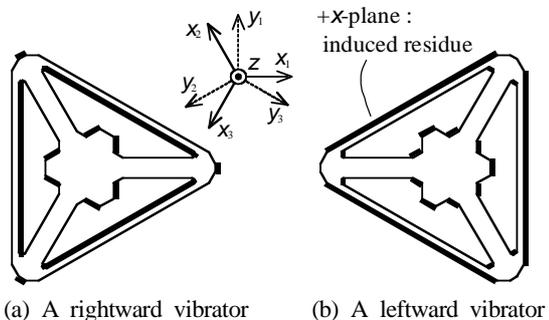


図5 振動子方向によるエッチング残渣発生状態の違い

しかしながら、この向きの振動子では圧電定数 e_{12} の効果を用いて駆動モードを励振する事は可能であるが、必要なモードを識別して検出する事が出来ない。従って検出脚部についてはさらに変形を行った。結果として得られた、残渣対称性と圧電的検出の双方を備えた構造例を図 6 に示す。

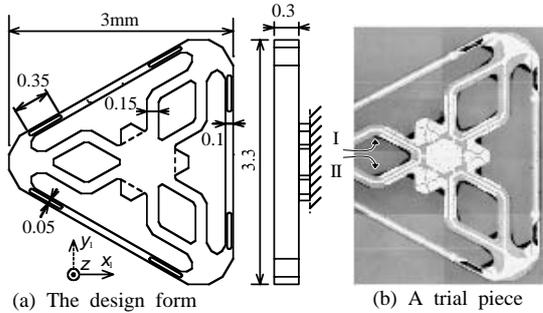


図 6 改良型振動子構造と試作デバイス

検出脚は単純に x_i 軸方向に伸ばすのではなく y_i 軸方向への要素を組み合わせた構造としており、従って駆動・検出いずれも水晶音叉振動子などで一般的な圧電定数 e_{12} の効果を用いる事が出来る。

駆動抵抗が高い問題については、駆動梁の両端部に穿孔する構造を採用した。通常、水晶の y 軸棒に屈曲振動を励振する場合には図 7(a) のように振動脚の四方外周に電極を設けて電圧を印加する。湾曲した電界が生じるが、そのうちの x 方向成分のみが駆動に寄与する。これに対して、穿孔構造では図 7(b) のように側面と孔内部に電極を設ける事で電極間距離を短縮出来る。さらには機械的にも固さを減らして共振周波数を下げる事ができる。駆動周波数の低下は感度向上に効果がある。

これらの改良の結果、駆動モードの電気特性は真空中はもちろんの事、大気中においても駆動抵抗低下の効果は十分に見られ、自励振駆動も十分可能と考えられる。

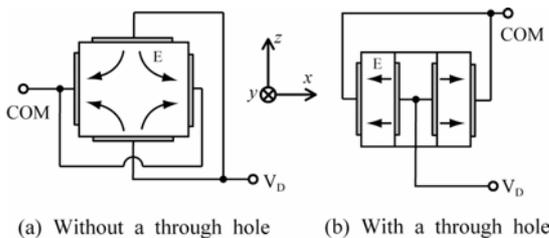


図 7 駆動電界の比較

また、この改良振動子の共振モードを図 8 に示す。基本的には改良前の振動モードと同様の振動モードが生じている事が分かる。ただしここでは図 8(c)(d)は面垂直モードの組の 1 次モードであり、図 8(e)(f)の組は 2 次モードである。これら面垂直モードは振動子の厚みを変える事で、いずれかの組を選択出来る。振動子を薄くする事で面垂直モードの共振周波数を選択的に低下させる事が出来る。その他のパラメータも調整して駆動モード、面内回転モードおよびいずれかの次数の面垂直モードを縮退させる。

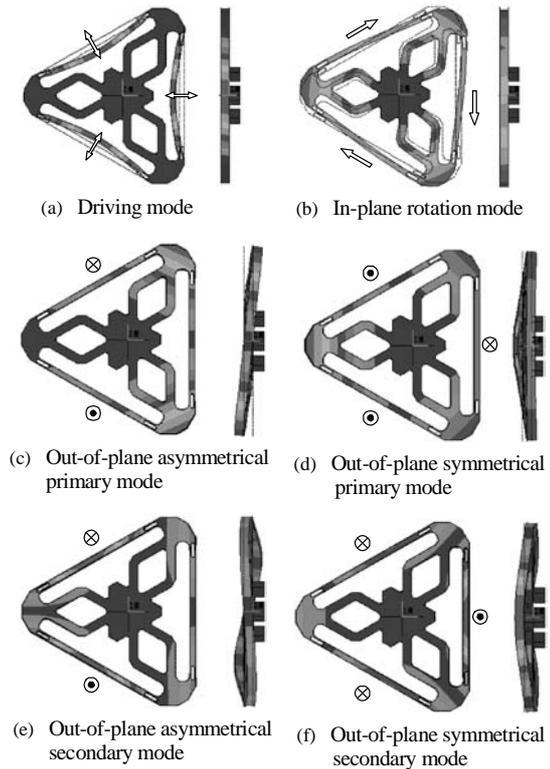


図 8 改良型振動子の共振モード各種

面垂直 2 次モードを採用すると、振動子が薄くなりエッチングが容易になる。また面垂直 1 次モード付近には、面内回転モードと結合しやすいスプリアモードが存在するので注意が必要である。ここで、モードの結合とは幾つかの振動モードが独立に存在出来ず、そのモード間でお互いの振動成分を共有する事であり、振動モードの独立分離を甚だ困難にする。振動子を駆動するには図 9 に示すように、穿孔内部の電極に共通電位、外側面に駆動電位を与える。この時、駆動電界は穿孔部の左右で反対極性になる。 e_{12} の逆圧電効果で生じる応力も振動梁の左右面で極性が逆となり、一方で y 軸方向に伸びて他方が縮む。従って梁の付け根で面内の曲げが生じて駆動モードが励振される。

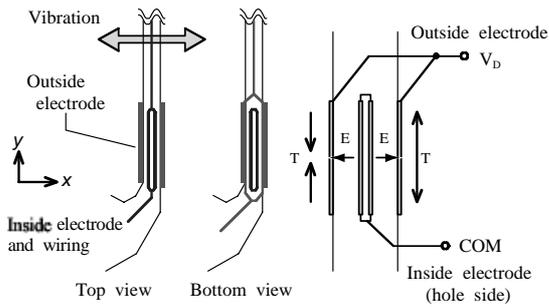


図9 穿孔構造を有する駆動梁の励振方法

検出において、まずは検出脚一对あたりの動作として面内振動と面垂直振動の分離について図10に概念を示す。検出脚の中央部に共通電位、その左右に検出電極を設ける。この時、各電極部付近の歪み極性は面内あるいは面垂直方向変位で異なる分布となる。従って極性判別回路(単純には和・差)を用いる事で、その検出脚対に生じた変位方向を識別出来る。さらに3箇所の検出脚対からの信号を総合的に処理して各検出モードの成分を分離する。例えば単純な処理回路例を図11に示す。ここで成分分離した後一般的な振動ジャイロと同じく同期検波によって微小な角速度起因の信号を得る。

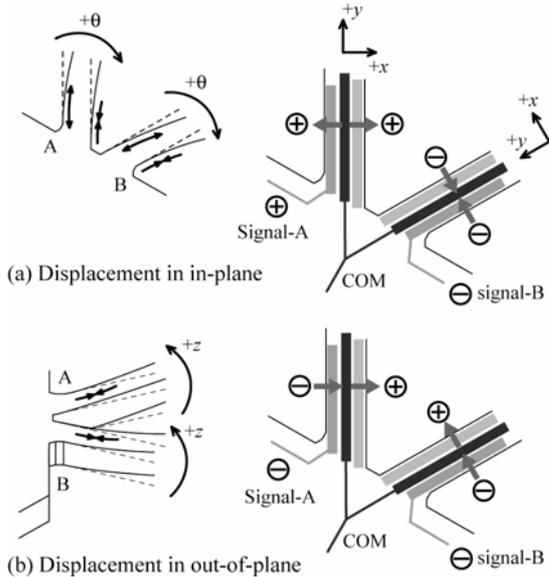


図10 検出脚一对あたりの面内振動と面垂直振動の識別原理

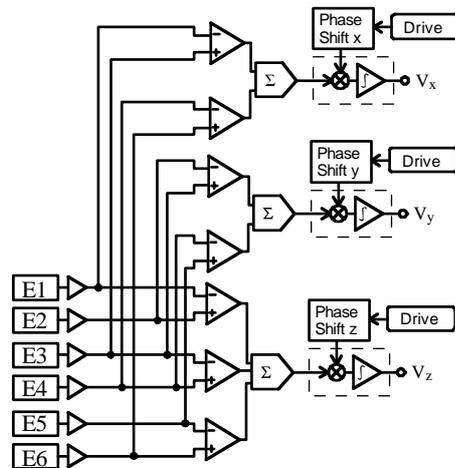
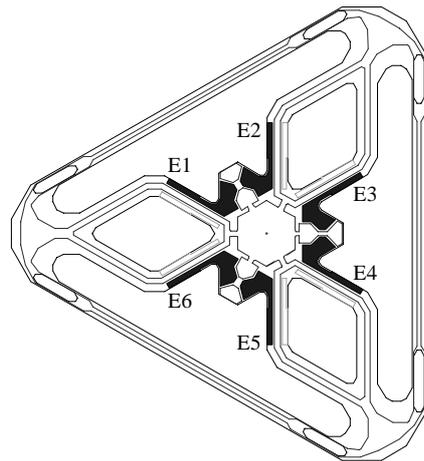
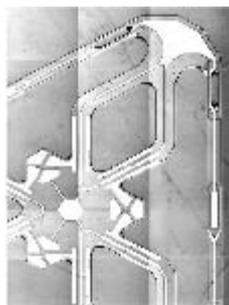


図11 回転角速度分離検出の為の信号処理ダイアグラム例

ただし実際には主に温度特性を補償する為温度変化をルックアップテーブルに組み込んで温度センサと組み合わせた処理系とする。具体的には入出力の伝達特性から逆行列を求めて、ジャイロデバイスの出力と温度情報からDSPにより温度ならびに漏れ信号を補正するように処理を行う。

(3)シミュレーション特性

前出の一辺3mm程度の振動子では、まだエッチング残渣の影響が大きく評価が困難な為、図12に示すような6mm寸法の振動子も試作した。図中に共振周波数を記す。実デバイスによるジャイロ評価は未実施であるが、本サンプルを元に有限要素法(FEM)によるコンピュータシミュレーションを行った。その結果、駆動周波数37.695kHzで検出モードの離調が最大 $f=120\text{Hz}$ の条件となる解析モデルで、他軸(誤差)感度が約3%にて3軸検出動作が確認されている。



Size: 6.015 × 6.6 × 0.3mm

Resonant frequency and equivalent circuit constant for driving mode. (in vacuum)

$$f_0 = 38.127 \text{ kHz}$$

$$R = 23 \text{ k}\Omega$$

$$Q = 36,716$$

図 12 二倍寸法で試作した振動子

(4) その他の検討

本提案の多軸ジャイロでは4つ程度の共振モードを縮退させる為それぞれのモード間の結合は非常に複雑な関係となる。このように複雑な振動子は現在の所、有限要素法解析を用いて数値的に設計・検討を行うほか無いが、実際の駆動シミュレーションに相当する周波数応答解析はかなりの計算機リソースを要する。ここで細部寸法や温度条件などの幾多の条件でパラメータ解析を行うのは時間的に実用的でなく、また傾向評価を数値的に表す事が出来ていなかった。

そこで本年度の主な取り組みは、有限要素法による構造解析のうち比較的計算処理負荷が軽く短時間で計算結果の得られる固有値解析から得られる情報からモード間結合の強度を見積もる事を目指した。この過程で、固有値解析によって得られる主振動振幅と漏れ振動振幅の比は、周波数応答解析によって得られる実際に近い振幅比と異なり、安易な評価の危険性が確認された。しかしながら入出力電気端子の開放・短絡による、これは1端子対圧電振動子では共振・反共振評価を行うような方法に着目し、端子条件の違いによる固有値周波数の関係を調査したところ、有用な情報が得られる事が見いだされた。すなわち、一般的なジャイロ振動子は初期状態では駆動モードと検出モードは本来直交分離している事から、非駆動端子の電気条件を変えたとしても駆動端子ではその影響を受けないのが理想的であるが、モード間に結合がある場合にはその程度によって電気端子条件の違い、短絡-開放、が固有周波数の違いとして何う事が出来る。

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3件)

- (1) T. Soneda, H. Tamura, Y. Tomikawa and S. Hirose: “Basic Study of Threefold Rotatory

Symmetric Form Quartz Vibrator for Triaxial Gyrosensor”, Jpn. J. Appl. Phys., No.7B, Vol. 467, pp. 4709-4713, (2007) 査読・有

- (2) 田村英樹:「振動ジャイロセンサの基礎と三軸検出デバイスの概要」MATERIAL STAGE, Vol.7 No.7, pp.4-8, (2007) 査読・無
- (3) 田村英樹, 曾根田敏昭, 富川義朗, 広瀬精二:「三軸ジャイロのための三回対称形水晶振動子の検討」電子情報通信学会技術研究報告[超音波], Vol.106 No.250, US2006-41, pp.31-36, (2006) 査読・無

〔学会発表〕(計4件)

- (1) 田村英樹:「圧電振動ジャイロセンサの振動結合評価に関する解析の一手法」日本音響学会 2009 年春季研究発表会, 2009.3.17, 東京工業大学
- (2) 曾根田敏昭, 田村英樹, 広瀬精二:「三回対称形水晶三軸ジャイロにおける検出信号処理方法の検討」日本音響学会 2008 年春季研究発表会, 2008.3.18, 千葉工業大学
- (3) T. Soneda, H. Tamura, Y. Tomikawa and S. Hirose: “Basic Study on a Threefold Rotatory Symmetric Form Quartz Vibrator for Triaxial Gyrosensor”, 第 27 回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, 2006.11.16, 名古屋国際会議場
- (4) 田村英樹, 曾根田敏昭, 富川義朗, 広瀬精二:「三軸ジャイロ用の三回対称形水晶振動子に関する基礎的検討」日本音響学会 2006 年秋季研究発表会, 2006.9.13, 金沢大学

〔図書〕(計1件)

- (1) 田村英樹(第17章)[分担共著], (株)技術情報協会:「新しいセンサの上手な使い方・選び方」(第17章: 振動ジャイロセンサ), 2008, pp.251-261(全605P)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)
取得状況(計0件)

6. 研究組織

- (1)研究代表者
田村 英樹 (TAMURA HIDEKI)
山形大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号: 90396581
- (2)研究分担者
無し
- (3)連携研究者
無し