

慣性センサへの応用

岡田 和 廣*

*株式会社ワコー
埼玉県さいたま市桜木町 4-244-1
*WACOH Corporation
4-244-1 Sakuragi-cho Saitama-shi, Saitama, Japan
*E-mail: okada@wacoh.co.jp

キーワード：慣性センサ (inertial sensor), 加速度センサ (acceleration sensor), 角速度センサ (gyro sensor), マイクロマシニング (micro-machining), 3軸センサ (three-axis sensor).
JL0001/03/4201-0048 © 2002 SICE

1. はじめに

3次元空間の物体の動作は、平行の動きと回転の動きで表現される。平行な動きは距離、速度、加速度等の物理量で表わされ、また回転の動きは角度、角速度、角加速度の物理量で表わされる。これらの物理量はそれぞれ微分または積分の数学的關係で表現することができる。

現在のところ、平行の動きを表わす距離、速度、加速度、そして、回転の動きを表す角度、角速度、角加速度の6つの物理量のうちマイクロマシニング技術を利用して実用化されているのは加速度センサと角速度センサのみである。

本稿では、マイクロマシニング技術を用いて実用化されている加速度センサ、角速度センサ、さらに加速度と角速度を1個の検出素子で同時に検出するモーションセンサについて述べる。

2. 加速度センサ

マイクロマシニング技術を用いて実用化されている加速度センサは種々なタイプのものがある。ほとんどの加速度の検出原理はニュートンの法則 ($F=mA$) に基づく。加速度が質量に作用すると力が発生する。この力から加速度を計測するものである。

加速度センサはこの力の検出方法で分類することができ、 piezo抵抗型、静電容量型、圧電型がある。

さらに、加速度は力と同様にベクトル量である。3次元空間の各軸成分 (X, Y, Z 軸) の検出軸数で加速度センサを分類することもできる。たとえば、3軸成分 (X, Y, Z 軸) のうち1軸のみを検出すれば1軸加速度センサであり、3軸すべてを検出すれば3軸加速度センサである。

また、構造の違いから加速度センサを分類することもできる。Si基板の裏面を3次元的に加工し、Si基板表面に検出部を形成するバルクマイクロマシニング型と、Si基板の表面を加工し、さらに表面に検出部を設けるサーフェスマイクロマシニング型がある。

通常、加速度センサを呼ぶ場合、検出原理と検出軸で呼ぶ場合が多く、構造を名称に入れる場合は少ない。これはセンサの構造は性能にさほど寄与しない場合が多いからである。たとえば、圧電型は静的な加速度を検出できない。それに対し、piezo抵抗型や静電容量型は静的加速度を検

出することができる。同じ加速度センサでも、この違いを明らかにするために検出原理を名称に入れる場合が多い。

2.1 加速度の検出原理

加速度の検出原理は、piezo抵抗効果を利用したpiezo抵抗型、静電容量の変化を利用した静電容量型、圧電効果を利用した圧電型がある。それぞれ異なる特徴があり、使用上注意する必要がある。

(1) piezo抵抗型加速度センサ

piezo抵抗型加速度センサは半導体技術とマイクロマシニング技術で作られ、piezo抵抗素子に力が加わると抵抗が変化する現象、すなわちpiezo抵抗効果を利用して加速度を検出するものである。図1に最も基本的な構造を示す。重錘に加速度が作用するとビームは変形する。応力の発生する領域にpiezo抵抗素子が形成され、検出感度と温度特性を改善するために4つのpiezo抵抗素子によってホイーストブリッジ回路が組まれている。

(2) 静電容量型加速度センサ

静電容量型加速度センサはpiezo抵抗型加速度センサと同様に、半導体技術およびマイクロマシニング技術を用いて作られる。その構造は図2のごとくなる。加速度が重錘に作用すると重錘は変位する。この変位を重錘の表面に形成された変位電極と重錘に対向した固定電極で構成される静電容量の変化で検出し、加速度を計測するものである。

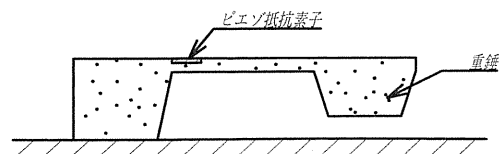


図1 piezo抵抗型1軸加速度センサ

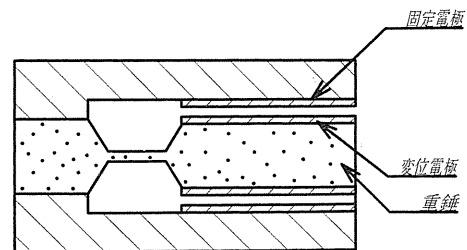


図2 静電容量型1軸加速度センサ

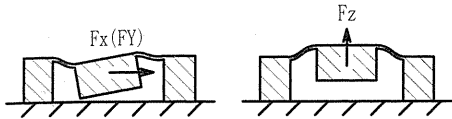


図3 3軸加速度センサ

2.2 1軸加速度センサと3軸加速度センサ

最近になり、多軸型の加速度センサも多く発表されるようになったが、依然、多くは1軸検出型である。図3に3軸加速度センサの基本構造を示す。図1と図2に示した通り1軸加速度センサの重錘の自由度は上下方向(Z軸方向)のみであるのに対し、3軸加速度センサの重錘の自由度は、上下方向(Z軸方向)と前後左右(X, Y軸方向)の3自由度である。

この自由度構造にすることによって3軸加速度センサ、さらに、後述の多軸角速度センサそして多軸モーションセンサの開発が可能となる。

2.3 3軸加速度センサ

1軸加速度センサの検出原理にピエゾ抵抗型、静電容量型、圧電型があるように、3軸加速度センサもピエゾ抵抗型、静電容量型、圧電型がある。以下、ピエゾ抵抗型3軸加速度センサと静電容量型3軸加速度センサについて述べる。

(1) ピエゾ抵抗型3軸加速度センサ

ピエゾ抵抗型3軸加速度センサは、加速度が重錘に作用したときに発生するダイアフラム上の歪をピエゾ抵抗効果を利用して検出するものである。Si基板表面に3組のピエゾ抵抗素子(12本)が形成されている。裏面には、環状のダイアフラムが形成され、さらに中央部と周辺部には重錘体と台座が接合されている。

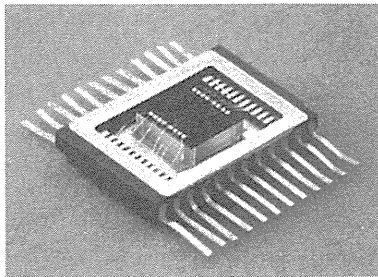


図4 ピエゾ抵抗型3軸加速度センサ

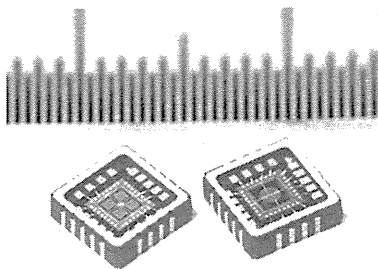


図5 (小型) ピエゾ抵抗型3軸加速度センサ

3軸加速度センサとしてはこのピエゾ抵抗型(図4参照)が約10年前に世界で初めて開発²⁾された。このチップサイズは約 $5 \times 5 \times 2.3$ mmと大きく、価格的に問題を含んでいたが、最近になりSOI(Silicon On Insulator)ウエハを用いた小型な加速度センサ³⁾が開発された。そのチップサイズは約 $2.5 \times 2.5 \times 0.6$ mmと従来サイズの1/4である。これを図5に示す。また、図6に示す通り製造プロセスも簡単である。初めに、ゲージ抵抗を熱拡散またはイオン注入法で形成する。つぎに重錘と台座を分離するためにICP(Inductively coupled Plasma)-エッチング法でシリコンを垂直にエッチングし、さらに、検出感度向上のために上面からエッチングし、ピエゾ抵抗素子が形成されている所をビーム状にする。図5はビーム上にゲージ抵抗が形成されたタイプである。

(2) 静電容量型3軸加速度センサ

静電容量型3軸加速度センサ⁴⁾は、加速度が重錘体に作用するとダイアフラムが変位し、その変位を静電容量の変化で検出するものである。構造的にもピエゾ抵抗型3軸加速度センサとほとんど同一である。異なる点は、静電容量を形成するためにダイアフラムと対向する位置に固定電極を有する固定基板が接合されている点である(図7参照)。

静電容量型3軸加速度センサもピエゾ抵抗型3軸加速度センサ同様に、SOIウエハとICP-エッチング法によってチップサイズが $2.5 \times 2.5 \times 0.6$ mmと小型の加速度センサ⁵⁾が開発された。これを図8に示す。中央部の重錘が

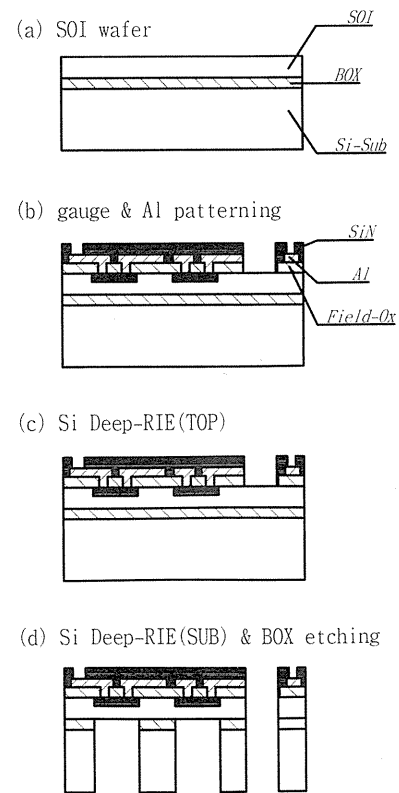


図6 製造プロセス

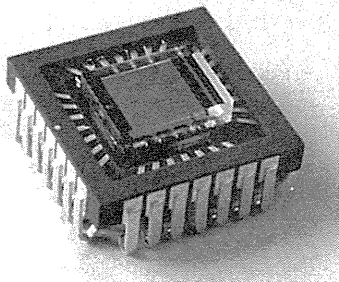


図7 静電容量型3軸加速度センサ

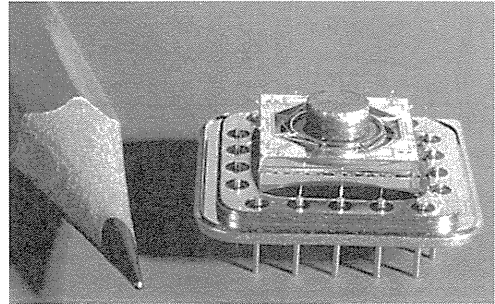


図9 1軸角速度センサ

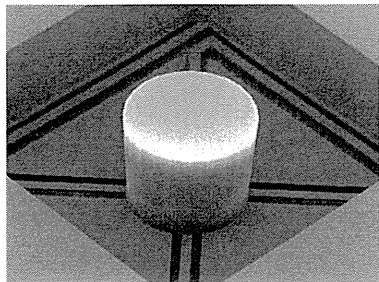


図8 小型加速度センサ

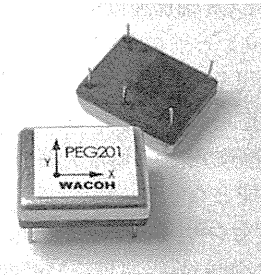


図10 2軸角速度センサ

ビームで保持されているのがわかる。

4. 角速度センサ

角速度センサは種々な原理に基づくものが提案されているが、マイクロマシニング技術を利用した角速度センサはほとんど振動子を励振させ、角速度によって発生するコリオリ力を検出し、角速度を計測するものである。これはマイクロマシニングの小型化技術と合致している。コリオリ力を検出原理とした角速度センサは、質量 m を有する振動子を振動させ、速度 V を付加する。このとき、振動子に角速度 ω が作用すると、速度と角速度と双方に直行する方向にコリオリ力 $F_c (F_c = 2mV \times \omega)$ が発生する。このコリオリ力を求めることで角速度を検出することができる。

角速度センサは振動子の駆動方法とコリオリ力の検出方法で分類することができる。駆動方法は圧電効果、ローレンツ力、クーロン力等が提案され、また、検出方法は圧電効果、誘導起電力、静電容量等が提案されている。駆動方法と検出方法でそれぞれの組み合わせが可能である。そのため、種々のタイプの角速度センサが提案されている。

角速度センサも加速度センサ同様に検出軸数でも分類されている。1軸周りの角速度を検出するセンサは1軸角速度センサであり、3すべてを検出すれば3軸角速度センサである。現在市販されているのは1軸と2軸角速度センサである。

4.1 1軸角速度センサ

図9に示す1軸角速度センサ⁶⁾はマイクロマシニング技術を用いて作られている。ドライエッチング装置でSi基板

をエッチングし、リング状の振動子を作る。この表面にAl等で配線を施し、電流路を形成し、振動子の上下面に永久磁石を配置する。Alに交流電流を流すとリング状の振動子はローレンツ力によって縦横歪型の振動となる。このとき、角速度がリング状の振動子に作用するとコリオリ力によって斜め振動が発生する。この振動を誘導起電力で計測し角速度を検出するものである。

4.2 2軸角速度センサ

重錘をZ軸方向に振動させることにより、重錘はZ軸方向の速度成分 V_z を有する。このとき、X軸周りの角速度 ω_x が作用するとY軸方向のコリオリ力 F_y が発生する。この力 F_y を検出することによりX軸周りの角速度 ω_x を検出することができる。つぎに、Y軸周りの角速度 ω_y が作用するとX軸方向のコリオリ力 F_x が発生する。この力 F_x を検出することによりY軸周りの角速度 ω_y を検出することができる。

図10は圧電効果を使いZ方向に励振させ、X、Y軸方向のコリオリ力を圧電効果で検出し、X軸およびY軸周りの角速度を検出するものである。

5. モーションセンサ

力の大きさが3軸の力と3軸のモーメントで表わされるように、3次元空間の物体の動きも、3軸の加速度と3軸の角速度で表わされる。加速度と角速度を検出するセンサをモーションセンサという。マイクロマシニング技術を用いて図11に示す2軸の角速度と3軸の加速度を検出する5軸モーションセンサ^{7),8)}が開発された。

検出原理は駆動する周波数と加速度の周波数の違いを利

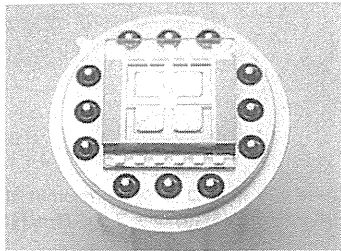


図 11 5 軸モーションセンサ

用して、角速度と加速度を検出するものである。コリオリ力は駆動する周波数に同期して現れるために高い周波数になる。それに対し、加速度の周波数成分は十分低い。たとえば、車で使われるような場合、駆動周波数 10 kHz に対し、加速度の周波数成分は 10 Hz 程度となる。モーションセンサはこの周波数の違いを利用して、角速度と加速度を弁別して検出するものである。性能との詳細については文献 7)、8) を参照されたい。

図 11 は大きさ、配線そしてパッケージの点で改善すべき点は多いが、今後、6 軸モーションセンサと共に期待されるセンサである。

まとめ

加速度センサ、角速度センサそしてモーションセンサについて述べた。それらセンサの検出原理は種々提案され、加速度センサの場合は piezoresistive 型、静電容量型そして圧電型が提案されている。また、角速度センサおよびモーションセンサの場合は駆動方式として圧電、クーロン力、ローレンツ力による方式が提案され、コリオリ力の検出方法として、圧電、静電容量、誘導起電力による方式が提案されている。

加速度センサの開発は piezoresistive 型 1 軸加速度センサが 1979 年から始まり、現在のさまざまなタイプの小型 3 軸加速度センサの商品化に至っている。

角速度センサの場合はマイクロマシニング技術や圧電技術を使った 1 軸および 2 軸角速度センサが開発されているが、3 軸角速度センサはまだ開発されていない。

モーションセンサの場合はマイクロマシニング技術を

使い 5 軸モーションセンサが開発されているが、慣性センサで究極の 6 軸モーションセンサはまだである。

これら未開発の慣性センサの商品化⁹⁾ は市場のニーズが決めることであるが、最近のロボット技術の発達を考慮すると、3 軸角速度センサおよび 6 軸モーションセンサの商品化も近い将来に実現できるものと思われる。

(2002 年 9 月 3 日受付)

参 考 文 献

- 1) K. Okada: Tri-axial piezoresistive accelerometer, Tech. Dig. of the 11 th Sensor symposium, 245/248 (1992)
- 2) Joost C. Lotters: A Highly Symmetrical Capacitive Traxial Accelerometer, ISBN 90-365-0982-3
- 3) 池内, 橋本, 原田, 大麻: ピエゾ抵抗型 3 軸加速度センサの開発, マイクロマシニング・センサ研究会, MSS-02-3, 2002.2, 電気学会 (2002)
- 4) O. Torabayashi, et al.: Capacitive type 3-axis accelerometer, Tech. Deg. of the 14 th Sensor symposium, 19/22 (1996)
- 5) M. Mizushima and M. Esashi: Capacitive 3-axis Accelerometer, Tech. Dig. of the 17 th Sensor symposium, 225/230 (2000)
- 6) 住友精密株式会社: <http://www.spp.co.jp/jigyuu/jigyuu.html>
- 7) N. Taniguchi, et al.: The 5-axis Motion Sensor, Tech. Dig. of the 16 th Sensor Symposium, 41/44 (1998)
- 8) Y. Watanabe, et al.: 5-axis Capacitive Motion Sensor Fabricated by Silicon Micromachining technique, Transducer' 01, Munich, 446/449 (2001)
- 9) K. Okada, et al.: Development of Micro-machined Three-axis Sensors in Venture Business, Transducer '01, Munich, 1280/1283 (2001)

[著 者 紹 介]

おか だ かず ひろ
岡 田 和 廣 君



1974 年上智大学理工学部電気電子工学科卒業、76 年同大学院修士課程修了、79 年からマイクロマシニング技術を利用した piezoresistive 型圧力センサの開発に従事、88 年株式会社ワコー設立、マイクロマシニング技術、圧電技術を利用した 3 軸加速度センサ、3 軸角速度センサ、モーションセンサの開発に従事、電気学会、電子情報通信学会、IEEE 各会員。