

MEMS センサを覗いてみよう！

星 貴之

平成 19 年 6 月 19 日

1. はじめに

近年, MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術の発展により 5 mm 角程度の小型慣性センサが商品化され, 携帯電話や家庭用ゲーム機などに用いられている. さらに小型化が進めば, センサネットワークと結びつくなど, 新たな応用分野も期待される [1].

本稿では MEMS 慣性センサの原理と構造を紹介する.

2. 加速度センサ

2.1 原理: ニュートンの第二法則とフックの法則

加速度は, ニュートンの第二法則 (式 (1)) とフックの法則 (式 (2)) から求められる. ここで f_i [N] は慣性力, m [kg] は質量, a [m/s²] は慣性加速度, f_r [N] は復元力, k [N/m] はバネ定数, x [m] は変位である (Fig.1).

$$f_i = ma \quad (1)$$

$$f_r = -kx \quad (2)$$

慣性力と復元力が釣り合うとき次式が成り立ち, 変位から慣性加速度が求められる. 筐体の加速度 a_{ext} [m/s²] と慣性加速度は逆向きであることに注意.

$$a = \frac{k}{m}x \quad (3)$$

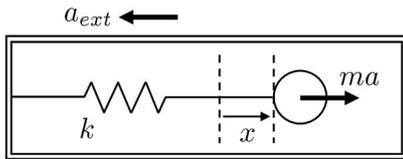


Fig.1 加速度センサの基本 (パネマス) モデル.

2.2 構造と信号変換

実用化されている加速度センサの多くは, ピエゾ抵抗型か静電容量型である.

2.2.1 ピエゾ抵抗型

ピエゾ抵抗型は Fig.2 のように重りをビーム (パネ) で支える構造になっており, ビームに配置したピエゾ抵抗素子 (シリコンに局所的に不純物をドーピングして作成) で変形を計測し, 慣性質量の変位を求める. 一軸のみを考えると, 抵抗値の変化 ΔR [Ω] は以下のように表される. ここで R [Ω] は初期抵抗, π [/Pa] はピエゾ抵抗係数, σ [Pa] は応力である. 式の右側の比例定数は MEMS 構造によって決まる.

$$\Delta R \approx R\pi\sigma \propto R\pi ma \quad (4)$$

これより, a に対する ΔR の感度を上げるには m を大きくすればよいことがわかる. 例えば, バルクマイクロマシニング技術で慣性質量を大きくするなどである. また抵抗値は温度の影響も大きく受けるため, ブリッジ回路を組むなど温度補償をする必要がある.

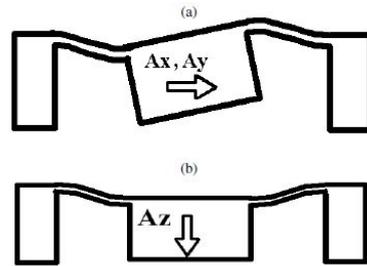


Fig.2 ピエゾ抵抗型加速度センサの仕組み [2].

2.2.2 静電容量型

静電容量型もやはり Fig.3 のように慣性質量をビームで支える構造で, 変位は慣性質量と外枠の間の静電容量で変位を計測する. 一軸のみを考えると, 静電容量の変化 ΔC [F] は以下のように表される. ここで ϵ [F/m] は誘電率, S [m²] は極板面積, d [m] は極板間距離の初期値である.

$$\Delta C = \frac{\epsilon S}{d-x} - \frac{\epsilon S}{d} \approx \frac{\epsilon S}{d^2}x = \frac{\epsilon S m}{d^2 k}a \quad (5)$$

これより a に対する ΔC の感度を上げるためには, S , m を大きくするか, d , k を小さくすればよいことがわかる. 例えば, 楕円にして極板面積を大きくするなどである (Fig.4). また慣性質量が動かないように静電力でフィードバック制御することで, 機械特性に依存しないダイナミックレンジや応答周波数を実現できる [5].

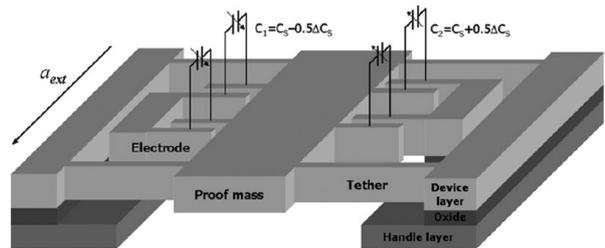


Fig.3 静電容量型加速度センサの仕組み [3].

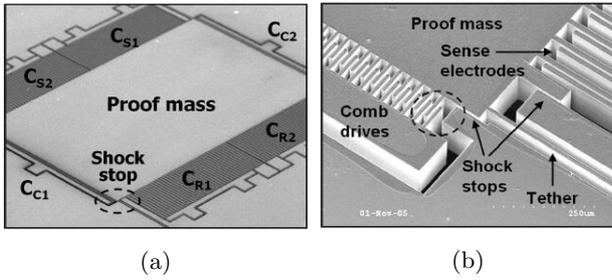


Fig.4 櫛型電極の電子顕微鏡写真 [4]. Comb drivers はフィードバック制御用電極.

3. ジャイロ (角速度) センサ

3.1 原理: コリオリ力

角速度は、コリオリ力から求めるのが一般的である。回転系で質点 m [kg] が受ける慣性力 f_i [N] は式 (6) のように表される。右辺第一項は遠心力、第二項がコリオリ力である。ここで r [m] は回転中心からの距離、 ω [rad/s] は角速度、 v [m/s] は質点の速度である (Fig.5).

$$f_i = mr\omega^2 + 2mv \times \omega \quad (6)$$

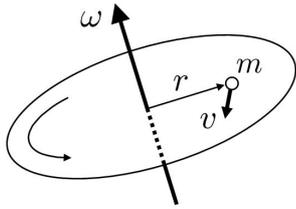


Fig.5 回転系の中を動く質点.

コリオリ力は、移動速度の違いによって生じる見かけの力である。半径 r の位置に A さん、同じ方向 $r + \Delta r$ の位置に B さんが立っているとす。回転速度は半径に比例するので、A さんより B さんのほうが速い。このとき A さんがボールを B さんに向けて投げると、ボールは A さんと同じ回転速度を持つため、B さんの通り過ぎた後の地点に到達する。その様子を静止系から見るとボールには何の外力も働いていないが、B さんから見るとあたかもボールの軌道を曲げる力が働いたように見える。それがコリオリ力である。

ちなみに遠心力とコリオリ力は、ローレンツ力 f_l [N] (式 (7)) とのアナロジーが指摘されており、興味深い [6, 7].

$$f_l = qE + qv \times B \quad (7)$$

3.2 構造と信号変換

MEMS では静電型や圧電型のアクチュエータを組み込める利点を生かし、構造体 (m) を励振 (v) しておく方法が一般的である。角速度が加わるとコリオリ力による新たな振動が生じ (Fig.6), その振動は加速度センサと同様、ピエゾ抵抗、静電容量、圧電効果などで計測される。

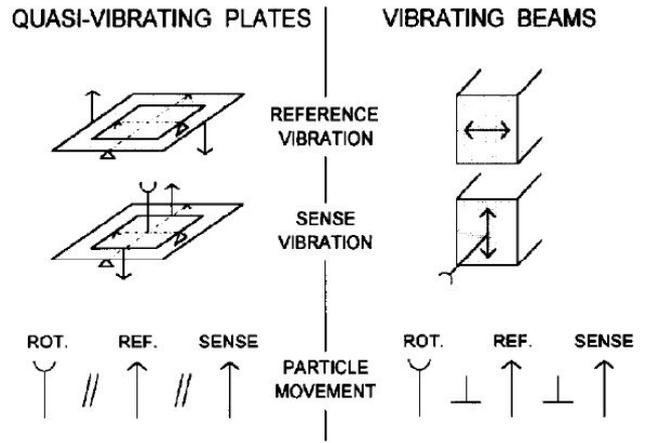


Fig.6 ジャイロセンサの仕組み [8].

4. おわりに

本稿では原理などをもっとも単純化したモデルで説明した。実際には他軸成分とのクロストークや分布定数系、異方性など、より複雑な解析が必要とされる。また加速度、角速度、磁気センサなどは三軸、もしくは複合型センサがすでに商品化されており、GPS と組み合わせた携帯サービスなどに利用されている。

通常、マイクロ構造体と電子回路は別々に製造され、ワイヤボンディングなどで接続される。しかし近年、両者を同一ウェハ上に形成する CMOS-MEMS 技術 [9] の研究が進んでおり、さらなる小型化が期待される。

参考文献

- [1] 前田龍太郎, 池原毅, 小林健, 単学伝: MEMS のはなし, 日刊工業新聞社, 2005.
- [2] R. Amarasinghe, D. V. Dao, T. Toriyama, and S. Sugiyama: "Simulation, fabrication and characterization of a three-axis piezoresistive accelerometer," Smart Materials and Structures, vol. 15, no. 6, pp. 1691-1699, 2006.
- [3] B. V. Amini and F. Ayazi: "A 2.5-V 14-bit $\Sigma\Delta$ CMOS SOI capacitive accelerometer," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 39, no. 12, 2004.
- [4] B. V. Amini, R. Abdolvand, and F. Ayazi: "A 4.5-mW closed-loop $\Delta\Sigma$ micro-gravity CMOS SOI Accelerometer," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 41, no. 12, 2006.
- [5] N. Yazdi, F. Ayazi, and K. Najafi: "Micromachined inertial sensors," Proc. IEEE, vol. 86, pp. 1640-1659, 1998.
- [6] <http://homepage2.nifty.com/eman/analytic/coriolis.html>
- [7] <http://home.catv.ne.jp/dd/pub/rot.html>
- [8] J. Söderkvist: "Micromachined gyroscopes," Sensors and Actuators A, vol. 43, pp. 65-71, 1994.
- [9] O. Brand: "Microsensor Integration into Systems-on-Chip," Proc. IEEE, vol. 94, no. 6, pp. 1160-1176, 2006.