AT-Cut 水晶振動子を用いた荷重センサの評価と温度補償

Characterization and Temperature Compensation of Load Sensor Using AT-Cut Quartz Crystal Resonator

○学 鳴海 圭亮 (東北大) 正 福田 敏男 (名大) 正 新井 史人 (東北大)

Keisuke NARUMI, Tohoku University, narumi@imech.mech.tohoku.ac.jp
Toshio FUKUDA, Nagoya University
Fumihito ARAI, Tohoku University

The compact load sensor we developed uses an AT-cut quartz crystal resonator whose resonance frequency changes under external force, and features high sensitivity, high-speed response, a wide measurement range, and superior temperature and frequency stability. Quartz crystal resonators were rarely used in force measurement due to their poor stress concentration during bending. We have developed and characterized a sensor mechanism that safely maintains the quartz crystal resonator. The objective of this study is to improve the resolution of load measurement and to miniaturize the sensor. We designed a novel retention mechanism of the quartz crystal resonator which is fixed vertical to the applied load. The new load sensor was evaluated on the relation between load and resonance frequency as well as temperature and resonance frequency. We also proposed the temperature compensation methods.

Key Words: Sensor, Force measurement, Quartz crystal, Micro-mechanism, Microfabrication

1. 緒言

1.1 研究背景

現在, ロボット, 医療および介護の分野で優れた荷重センサが必要とされている. 測定対象としては, ベッド等に加わる荷重分布, 関節内の接触圧力の測定, 咬合力計測等が挙げられる. また, 低侵襲医療技術において, 内視鏡やカテーテル挿入時の先端荷重やマニピュレータの操作力の測定等が必要である. 特に, ロボットが重い対象物から軽い対象物までを人間の手の様に同様に操作する際, また, 初期荷重が印加した状態で生体信号を計測する際には, 高感度とともに広計測範囲の荷重センサが必要になる.

従来の荷重センサには, ダイアフラム型センサ, ひずみゲージ式センサ[1]および圧電振動形センサ[2]等があるが, 高感度, 広計測範囲, 高速度応答, 小型および高耐久性等をすべて満たすセンサは存在しないのが現状である. また, 上記センサはアナログ出力であるために AD 変換器を要し, ノイズ対策などの複雑な信号処理が必要となる.

このような背景から, 我々は圧電素子の一つである水晶に着目し, 水晶を振動させた状態で用いる水晶振動子を用いた超小型荷重センサの開発を行ってきた.

1.2 荷重センサの原理と課題

我々は AT-cut 水晶振動子を用いた荷重センサの開発を行ってきた. 水晶は圧電素子の一つであり, 外部からの力に対して電荷を発生する性質をもっており, 高感度かつ広計測範囲を有し, 温度安定性や周波数安定性にも優れた材料である. 水晶を荷重センサとして用いる研究もなされているが, その原理は外力により発生する電荷を検出するものであるため, 電氣的なドリフトの影響を受けやすいといった欠点があった. 一方, 水晶を振動させた状態で用いる水晶振動子は外力によりその共振周波数に変化する特性を持ち[3-4], 出力として周波数を用いることで電氣的なドリフトを抑えることが可能である. しかし, 水晶は圧縮に強いが, 曲げや引張りに弱いという特性を持つため自身を安定に保持する機構が必要である[5-7].

我々は水晶を安定に保持する機構を考案し従来と比較して非常に小型な荷重センサの製作を行ってきた[8]. このセンサ

は広計測範囲を有することができたが, 生体信号を計測するための十分な分解能を得ることができなかった. そこで, 我々は従来センサと同様の広計測範囲を維持しつつ, 分解能を向上させた荷重センサを開発した. 本稿では開発した荷重センサの特性を評価し, 温度補償に関する考察を行ったので報告する.

2. 設計コンセプト

図 1 に設計コンセプトを示す. 荷重センサの分解能を向上させるため, 水晶振動子を鉛直に配置した. 水晶振動子を鉛直に配置することで外力をより効率よく水晶振動子に伝えることが可能である. 衝撃による水晶の破損を防ぐため, 保持機構の上部カバーにはヤング率の低いばね用リン青銅を板ばねとして用いた. また, 鉛直方向以外の力の影響を受けないようにするため, 保持機構全体を外部ケーシングにより保護し, コンタクト部を逆円錐形に設計した. コンタクト部の上部は外部ケーシングにより押さえられており, 摩擦力で横方向へのずれを防いでいる.

外部ケーシングを含めたサイズは, 直径 7 mm, 高さ 11 mm の円柱形となっており, 従来センサ (直径 13 mm, 高さ 13 mm) と比較して体積比で 2 分の 1 を実現できた.

3. 構造解析

設計した荷重センサの特性を調べるため構造解析を行った. 解析ソフトは COMSOL Multiphysics (v 3.4, COMSOL AB.)を用いた. 図 2 に鉛直方向から 1 MPa (2.0 N) の応力を与えた場合の水晶振動子に付与される z 方向の応力分布を示す. 解析結果より, 水晶振動子の中心部では 4.7 MPa (厚さ 100 μm , 幅 3 mm のサイズのため 1.41 N) の応力が加わっていることが確認できた. “与えた外力に対する水晶振動子に付与される荷重”を“力の変換効率”と定義するとき, 本センサでは $(1.41 / 2.0) \times 100 = 70.1\%$ となる. 従来センサの力の変換率は約 37%であることから外力をより効率よく水晶振動子に伝えることができるため, 感度および分解能の向上が期待できる結果となった.

また, 鉛直方向以外からの方向から外力が加わった場合の構造解析を図 3 に示す. 図 3(a)は z 方向の応力分布であり, 図

3(b)はx方向の変位を示している。解析結果より、横方向からの外力に対して水晶振動子に影響はほとんど見られず、本センサの構造の安定性が確認された。

4. 荷重センサの製作

4.1 水晶振動子の製作

本センサは水晶振動子の厚みすべり振動を用いるため、水晶振動子の電極を両面にパターンニングする必要がある。水晶振動子の電極製作プロセスを図4に示す。電極の製作はLift-offプロセスを用いて行った。まず、表面を洗浄した水晶（サイズは20 x 30 x 0.1 mm）の片面に犠牲層となるLOR5B（KAYAKU MICROCHEM CO., LTD.）およびOFPR800（30cp, TOKYO OHKA KOGYO CO., LTD.）をパターンニングする。次にCrおよびAuをスパッタし電極を形成した後、犠牲層を除去する。裏面も同様のプロセスを行い、電極をパターンニングする。

4.2 荷重センサの組立て

保持機構および外部パッケージングは放電加工等の機械加工を用いて製作した。製作した部品を組立て、従来センサと比較した写真を図5に示す。図5より、本センサが従来のセ

Fig. 1 Concept of load sensor with a new retention mechanism

Fig. 2 Stress distribution in z axis

Fig. 3 (a) Stress distribution in z axis, (b) Displacement distribution in x axis

ンサに比べ非常に小さいサイズ（体積比2分の1）を実現できたことが確認できる。

5. 荷重負荷実験

5.1 センサ単体による荷重負荷実験

保持機構のみを実装した状態で荷重負荷実験を行い、従来センサとの比較を行い分解能および計測範囲の評価を行った。実験システムを図6に示す。センサを共振回路に接続し、出力は周波数カウンタ（9031A, Agilent technologies）により計測した。

実験は2種類行った。一つは無負荷の状態と0.98 Nの荷重をかけた場合の時間軸に対する共振周波数の変化を計測した。次に、220.5 mNの荷重を44.1 mN刻みで与えた場合の共振周波数の変化を計測した。

実験結果を図7に示す。図7(a)より、0.98 Nの荷重に対して1250 Hzの共振周波数の変化が得られることが確認できた。従来の横置きタイプのセンサを用いて同様の実験を行ったところ、共振周波数の変化は160 Hzであった。また、図7(b)より、荷重の増加に対して共振周波数が直線的に変化していることが確認でき、220.5 mNの荷重に対して215 Hzの共振周波数変化が得られた。従来センサを用いて同様に実験を行ったところ、30 Hzの共振周波数変化を得た。

以上の結果より、本センサの分解能は約7倍に向上していることが分かった。水晶振動子の共振周波数の安定性と合わせて考察すると、最小分解能は3.21 mN (0.33 g)となる。

1. Coat LOR5B and pattern OFPR	2. Sputter Cr/Au
3. Remove LOR5B and OFPR	4. Repeat 1-3

Fig. 4 Fabrication process of quartz crystal resonator

Fig. 5 Assembled load sensor compared with old sensor

Fig. 6 Experimental setup

また、水晶振動子に付与することのできる許容応力は 128 MPa (38.4 N) であることから、本センサに外部から与えることのできる最大荷重は 54.9 N であることも確認できた。このことから本センサが従来センサと同様に広範囲の計測を行うことができ、かつ最小分解能が向上したと考えられる。

5.2 外部パッケージを実装した状態での荷重負荷実験

図 5 に示すような外部パッケージを実装した状態での荷重負荷実験を行った。実験装置図を図 8 に示す。本センサとロードセル (9031A, KISTLER corporation) をステージ上に鉛直上に配置し、ステージを上下させることでセンサ上面を壁に押し付けて荷重を与える。与えた荷重をロードセルにより計測し、そのときの水晶振動子の共振周波数の変化を周波数カウンタにより計測した。実験結果を図 9 に示す。図 9 より 10 N までの荷重に対しては殆ど共振周波数の変化が得られていないことが分かった。

そこで、ボルトの締め付けを強化し初期荷重として 10 N を与えた状態で再度荷重負荷実験を行った (図 10)。実験結果より、外部荷重と水晶振動子の共振周波数の関係は以下のような式となった。

$$Y = 573.0 \times 10^{-6}X + 16.231 \quad (1)$$

ここに、 X : 荷重[N], Y : 共振周波数[MHz]であり、相関係数は $R^2 = 0.9452$ であった。

よって、外部パッケージを実装した状態において、良好な線形性が得られることを確認した。このときの、センサ精度は 573 Hz/N であることが分かった。

6. 温度補償方法

本センサは AT-cut 水晶振動子を用いているので、常温付近に対する温度変化による共振周波数の変化はほとんど無視できる。しかし、水晶振動子を保護している保持機構は金属を用いているので熱膨張を受けやすく、水晶に与えている初期荷重や締め付け力に変化があると考えられる。つまり、温度変化により共振周波数の変化が生じる可能性があるので温度補償の必要性がある。以下に 2 種類の補償方法を提案する。

6.1 温度計測による補償

温度を計測することを前提として、各温度による共振周波数の変化を実際に測定し、立式することで温度を補償することが可能である。具体的には、センサに特定の荷重をかけた状態で温度を変化させ、そのときの共振周波数を計測する、もしくは、温度を一定に保ちつつ荷重を変化させていく方法である。

6.2 水晶並列構造による補償

温度センサを用いない方法として、水晶並列構造による補償方法を考案した。これは、同様の水晶振動子を 2 つ用いて、一方の水晶振動子を荷重センシング用として用い、他方を温度補償用として用いる方法である。概念図を図 11 に示す。保持機構を用いて 2 つの水晶振動子に同様の初期荷重を与えることで、温度変化が起こった際の熱膨張の影響は 2 つの水晶に対して同様に起こると考えられる。この状態で一方の水晶振動子のみに外部からの荷重を伝えることができれば、他方の水晶振動子で温度変化に対する補償ができると考えられる。

7. 温度特性評価

7.1 温度特性評価実験

今回は、6.1 節の方法による補償を目的として、荷重が一定

(a) Load 0 N to 0.98 N

(b) Load 0 N to 220.5 mN

Fig. 7 Change of resonance frequency for external load

Fig. 8 Experimental setup

Fig. 9 Experimental result

Fig. 10 Experimental result

の状態における、温度変化に対する共振周波数の変化を測定した。荷重センサおよび共振回路をオープンの中に入れ、センサに温度変化を与えた (図 12)。温度を 20℃から 60℃まで 5℃刻みで変化させ、センサ内部での温度分布が生じないように、温度が安定してから十分時間が経過した後に計測を行った。

7.2 実験結果

実験結果を図 13 に示す。20℃から 60℃の変化において、共振周波数の変化は線形であることが確認できた。実験結果より、無負荷状態における温度変化に対する共振周波数の変化は以下のような式で表現できる。

$$Y = -54.9 \times 10^{-6} X + 16.326 \quad (2)$$

ここに、 X : 温度[℃], Y : 共振周波数[MHz]であり、相関係数は $R^2 = 0.9997$ であった。

よって、無負荷状態における、温度変化に対する共振周波数の変化は -54.9 Hz/℃であることが分かった。

8. 考察

本稿では無負荷状態のみにおける温度特性評価を行った。負荷がかかった状態においても温度特性が変化しないと仮定すると、温度補償を行うことが可能である。温度センサ等を用いて温度を計測することで、回路上で補償することができる。

しかし、温度特性が荷重によって変化する場合は回路上で

Fig. 11 Concept of temperature compensation using double quartz crystal resonator

Fig. 12 Experimental setup

Fig. 13 Experimental result

の補償が困難になる。そこで、6.2 節で提案したように、水晶振動子自体を温度センサとして用い、荷重センシング用水晶振動子の共振周波数との差分を取ることで温度補償が可能になると考えられる。

9. 結言

本稿では、我々が開発を行ってきた AT-cut 水晶振動子を用いた荷重センサのさらなる小型化および分解能の向上を目的として、センサの設計および製作を行った。製作した荷重センサに関する評価を行い、従来センサと比較して広計測範囲を維持しつつ最小分解能を向上することができた。

また、温度補償に関する方法を提案した。温度特性に関する評価を行ったところ、理論上温度補償は可能であることが確認できた。

今後の課題としては、荷重のかかった状態での温度特性評価を行い、回路上での温度補償を行うことが挙げられる。また、水晶振動子を温度センサとして用いた荷重センサの製作および評価を行うことである。

謝 辞

本研究はマイクロ・メカトロニクスに関する共同研究の助成を得た。

文 献

- [1] J. G. da Silva, A. A. de Carvalho, and D. D. da Silva, A Strain Gauge Tactile Sensor for Finger-Mounted Applications, IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 51, No.1, pp. 18–22, 2002
- [2] URL: <http://www.olympus.co.jp>, Dec. 1999
- [3] A. Ballato and R. Bechman, Effect of initial stress in vibrating quartz plates, Proc. IRE, Vol. 48, pp. 261–262, 1960
- [4] J. Ratajski, Force frequency coefficient of singly rotated vibrating quartz crystals, IBM J. Dev. Res., pp. 92–99, Jan. 1968
- [5] L. D. Clayton, E. P. EerNisse, Quartz Thickness -shear mode pressure sensor design for enhanced sensitivity, IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., Vol. 45, No. 5, pp. 1196–1203, Sep. 1998
- [6] E.P. EerNisse, Review of Thickness-Shear Mode Quartz Resonator Sensors for Temperature and Pressure, IEEE Sens. J., Vol. 1, NO. 1, pp. 79–87, Jun. 2001
- [7] Z. Wang, H. Zhu, Y. Dong, and G. Feng, A thickness-shear quartz force sensor with dual-mode temperature compensation, IEEE Sens. J., Vol. 3, No. 4, pp. 490–497, Aug. 2003
- [8] A. Asakura, T. Fukuda, F. Arai, Design, Fabrication and Characterization of Compact Force Sensor Using AT-cut Quartz Crystal Resonators, Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2008, pp. 506–511, Sept. 2008