MEMS 技術を用いた水晶振動子荷重センサの製作

Fabrication of Quartz Crystal Resonator Load Sensor based on MEMS Technology

○学 室崎裕一 (名大) 正 新井史人 (名大)

Yuichi Murozaki, Nagoya Univ., Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603
Fumihito Arai, Nagoya Univ., Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603

Now, high sensitive, wide-measurement range, high-speed response and small size (as whole system) load sensors are desired in many fields, such as medical field, life support robots and industrial robots. Therefore, in this paper, we develop a compact load sensor using AT-cut quartz crystal resonator whose resonance frequency changes under external force, and features high sensitivity, a wide measurement range, high-speed response, and superior temperature and frequency stability. We design a quartz crystal resonator sensor to increase its sensitivity and to reduce the whole volume of the packaged sensor. We made the quartz crystal sensor and the sensitivity was increased from 574Hz/N to 896Hz/N and the volume was reduced from 423mm³ to 226mm³. We designed and fabricated a package of the sensor which has a mechanism of pre-loading of the quartz crystal sensor.

Key Words: Load sensor, Quartz Crystal Resonator, MEMS

1. 緒言

高感度・ワイドレンジ・高速応答の荷重計測を行うことによって、重い対象物の把持から脆弱な対象に対する繊細な作業までを人間の手と同様に行うロボットの実現が可能となる。また、ベッド等に加わる体圧(大荷重)と、脈拍・呼吸(微小荷重)などの複数の生体信号の同時計測が可能となり、健康管理などにも応用可能である。また、センサがより小型・高感度であれば、バイオ操作・微小脆弱部品の自動組み立てにおける力覚フィードバックなどへの応用も可能となる。

近年では、その実現に向け、水晶振動子(QCR)の発振周波数が外力によって変化する性質を用いた、水晶振動子荷重センサ[1][2]の研究が行われている。何故なら、水晶振動子は無負荷の状態では、ある一定の発振周波数で非常に安定的に振動する。また、特定方位からの外力に対して高い線形性をもって発振周波数が変化し、剛性が高いため応答性も良い。更に、圧縮応力に強く大きな荷重まで計測可能であるため、水晶振動子荷重センサは、高感度・ワイドレンジ・高速応答の計測を実現できる。

実際に、我々はこれまでに、水晶を安定に保持しながら、与えられた荷重を効率よく伝播するための機構を考案することで、センサの感度の向上およびセンサの小型化に取り組んできた[3]。これらのセンサはワイドレンジで、感度も従来に比して向上したが、生体信号計測やバイオ操作・微小脆弱部品の自動組み立てにおける力覚フィードバックなどの応用にはまだ感度が不足する。また、センサと発振回路間が離れているために寄生容量の影響を受けやすいといった問題があった。そこで、本研究においては、応用範囲拡大に向けた低コスト・小型・高感度化に取り組んだので報告する。

2. 水晶振動子荷重センサ

2-1 水晶振動子

AT カット水晶振動子は外部からの印加電圧により電極部に厚みすべり振動を生じ、外力に対して正確に比例した共振周波数での電気周期信号として出力を得ることができる。本研究においては、荷重負荷方向の断面を小さくすることによって、負荷荷重に対する水晶への負荷応力を増大させ、感度の向上を図った。実際の寸法としては、従来の 3.0 mm×3.0 mm から 2.0 mm×3.5 mm へ変更した(Fig.1)。

今回の水晶振動子では、厚さ 250 nm、直径 1 mm、配線幅 0.2 mm の電極を、MEMS 技術を用いて水晶表面に作製した。水晶振動子の発振は、機械的な振動を妨げる要素によっ

て減衰されるため、発振源となる円形電極から配線・保持部との距離をとることで安定性の向上を図った。発振回路との配線にはφ0.05 mm の銅線を用いた。

2-2 保持機構およびパッケージング

保持機構は、水晶振動子を安定に保持して、負荷荷重を効率よく水晶振動子に単純圧縮荷重として負荷するための機構である。組立の簡略化をはかるために保持機構は一体構造とし、鉛直方向以外の外力を低減するためにヒンジ機構を2重にした。設計においては、水晶振動子のサイズと、有限要素法による応力解析 (COMSOL Multiphysics v4.12, COMSOL AB.) を用いて算出された荷重伝播効率を基に、寸法を決定した(Fig. 2)。ここで、“荷重伝播効率”とは、“負荷荷重点に加えられた外力と水晶振動子に負荷される荷重の比”を意味し、本センサでは 86 % と算出された。従来センサの力の荷重伝播効率が 70 % [3]であるため、感度の向上が期待される。

パッケージングは、円筒形状とし、ネジによって封入し、保持機構に予荷重を付加できる構造とした。予荷重によって、保持機構と水晶振動子間のギャップを埋め、計測不可領域と非線形性の問題を解決する。外部ケーシングを含めたサイズ

Fig. 1 Dimensions of the previous and new QCRs

Fig. 2 Design of QCR load sensor

Fig. 3 Fabrication process of QCR

Fig. 4 Fabricated QCR sensor with oscillation circuit

は、直径 6 mm、高さ 8 mm の円柱形となっており、従来センサ[3]と比較して体積比で 53% の設計となっている。

2-3 発振回路

システム全体を小型化し、一体化して配線距離を短くすることで各機器間の接続における寄生容量の影響などを抑えることができるため、今回、センサ部と発振回路を集約した。また、発振回路を水晶振動子の周りに配置し、金属ケースによってシールドを行うことで外乱の影響を抑えることもできる。

3. 水晶振動子荷重センサの製作

水晶振動子の MEMS 技術を用いた製作プロセスを Fig. 3 に示す。まず、犠牲層となる LOR 5B (Kayaku Microchem CO., LTD) および OFFPR 800 (30CP, Tokyo Ohka Kogyo CO., LTD) をパターニングした。次に Cr および Au をスパッタし電極を形成した後、犠牲層を除去した。裏面も同様のプロセスを行い、電極をパターニングした。電極完成後に、ダイシングソーによってカットした。

保持機構には、繰返し応力に強く高い剛性を有しており、板バネとして優れた特性を持つリン青銅(C5210)を用いた。製作においては、エンドミルを用い、板から削り出しを行うことによって、一体化構造を実現した。パッケージングには、剛性が高いステンレス鋼(SUS302)を用い、旋盤等の機械加工による製作を行った。

発振回路を含めたセンサの製作例を Fig. 4 に示す。水晶センサ部および発振回路を含めて、 $\phi 12\text{ mm} \times$ 高さ 11 mm に収めることができた。

4. 実験結果

製作したセンサに対して、荷重負荷実験を行った。電子天びん(UW4200A, SHIMADZU)の鉛直上にステージに取り付けた本センサを配置し、ステージを上下させることで押しあて荷重を加える。負荷荷重を電子天びんの読みで、センサの出力を周波数カウンタ(Hewlett Packard, 53131A)で計測することで、負荷荷重に対する周波数変動を計測した。予荷重を 10 N 負荷した状態での実験結果を Fig. 5 に示す。外部荷重 x [N] と水晶振動子の共振周波数 Y [MHz] の関係は、 $Y = 973x \cdot 10^6 + 16.146$ であった。相関係数は $R^2 = 0.9987$ であり、良好な線形性が得られることを確認した。センサ感度は 973 Hz/N であり、従来センサの感度 573 Hz/N [3] から 1.7 倍に向上した。

さらに、現在、保持機構およびパッケージングも MEMS 技術により作製する様にプロセス及び設計の変更を行うことで、センサの更なる小型・高感度・低コスト化に取り組ん

Fig. 5 Result of load experiment

Fig. 6 Updated QCR load sensor

Fig. 7 Result of load experiment of the updated QCR load sensor

でいる。変更後の設計・プロセスにより実際に作製した水晶振動子荷重センサを Fig. 6 に示す。図に示す通り、Fig. 2 および Fig. 4 に示したものに比べて、体積比にして 10 分の 1 に小型化できた。また、荷重負荷実験も行い、Fig. 7 に示す様に感度 1191 Hz/N と、122% に向上していることも確認した。

5. 結言

本稿では、我々が製作を行ってきた At カット水晶振動子荷重センサの感度の向上および小型化を目的として、センサの設計及び製作を行った。製作した荷重センサを評価し、従来の 573 Hz/N から 973 Hz/N と 1.7 倍の感度向上を確認した。また、体積比で従来の 53% への小型化を実現した。また、センサへの発振回路の組込みにより、外乱に対するセンサの安定性の向上を実現し、センサの実用性を向上した。

今後は、MEMS 技術の活用により、応用範囲拡大に向けた更なる低コスト・小型・高感度化を目指す。

引用文献

- (1) Z. Wang, H. Zhu, Y. Dong, and G. Feng, A thickness-shear quartz force sensor with dual-mode temperature and Pressure, IEEE Sens. J., Vol. 3, No. 4, pp. 490-497, Aug. 2003
- (2) 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
- (3) K. Narumi, T. Fukuda, F. Arai, Miniaturization and resolution improvement of load sensor using AT-cut quartz crystal resonator, Proc. of IEEE/SICE International Symposium on System Integration 2009, pp. 13-18, Jan. 2009