

마이크로 자이로용 미소 용량 변화량 검출회로의 설계

이광, 우성훈, 조규형
한국과학기술원

Design of Capacitance Detector circuits for Micro-Gyroscope

K.Lee, S.H.Woo, and G.H.Cho
Korea Advanced Institute of Science & Technology

Abstract - 마이크로머시닝을 이용한 각속도 센서에서는 기계 구조체의 기준진동에 의한 캐패시턴스의 변화와 인가되는 각속도에 따른 캐패시턴스의 변화를 감지하여야 한다. 이러한 캐패시턴스의 변화량을 전기적으로 감지하는데 있어서 기준진동을 위해 구조체에 인가되는 구동신호의 간섭이 최소화 되도록 구조체를 설계하여야 하고 회로적으로 간섭을 상쇄할 수 있어야 미소한 캐패시턴스의 변화량을 감지하여 각속도 센서의 감도를 극대화할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 구동신호의 간섭을 상쇄하여 미소캐패시턴스 변화를 감지하는 회로를 설계하였다.

들과 운동을 모델링한 것이다. 이를 참조하여 이제 X축과 Z축의 운동방정식은 다음과 같다

X축의 운동 방정식,

$$m\ddot{x} + b_x\dot{x} + k_x x = F_x$$

$$F_x = \frac{\partial E}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} C_x V_c^2 \right) = \frac{1}{2} V_c^2 \frac{\partial C_x}{\partial x}$$

(1)

$$X(s) = \frac{1}{2} \frac{(\partial C_x / \partial x)}{ms^2 + b_x s + k_x} \mathfrak{I}\{V_c^2(t)\}$$

1. 서 론

기존의 반도체 집적회로 제작기술을 토대로 마이크로 단위의 초소형 소자를 구현하고 있는 마이크로머시닝 기술은 가속도계, 각속도계, 유량센서등 여러 가지 기계적 센서들의 소형화와 가격의 저렴화, 대량생산 등에 기여할 수 있다는 장점이 있다. 최근에는 GPS를 이용한 자동차의 자동운항장치, 능동현가장치 자세제어 등의 분야에서 특성이 기존의 각속도 센서의 대체 요구가 등장하면서 마이크로머시닝 기술을 적용한 새로운 형태의 각속도 센서(자이로 센서)가 연구가 활발히 진행되고 있다.

자이로 구조체의 기계적인 변화량이 캐패시턴스 변화량으로 나타나고 이의 감지를 위해서는 캐패시터의 변화량을 측정하는 것이 필요하다.

기준진동과 각속도에 의한 미소 캐패시턴스의 변화를 감지하는 회로는 전류검출부와 간섭상쇄부로 구성되어 있다. 간섭상쇄부는 간섭파형을 관측하여 크기와 위상을 각각 제어함으로써 미소 캐패시턴스의 변화량에 의한 신호만을 감지 할 수 있게 하였다.

m : 구조체의 질량

C_x : 감쇄계수

k_x : 스프링 상수

F_x : 정전기적 구동력

2. 본 론

2.1 자이로의 구조 및 운동 형태

그림1은 코움 형태의 기본적인 자이로 구조체로 수평과 수직(여기서는 X축과 Z축이라 하자) 두 개의 운동모드를 가진다.

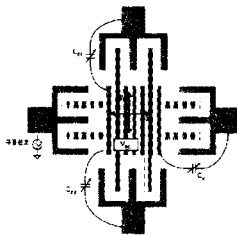


그림1. 자이로 구조체

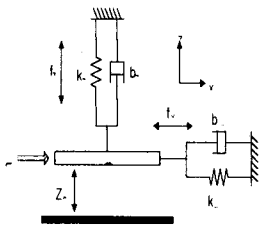


그림2. 물리적 운동 모델

여기서 v_D 는 인가한 구동 전압으로 $V_{DC} + \Delta V \sin \omega t$ 의 값을 갖는데, 거리 x 에는 무관하다. C_x 는 코움과 비임 사이의 정전용량으로 공진이 시작되면 코움과 비임 사이의 거리가 바뀌면서 이 값도 변하게 된다.

외부 힘이 없는 상태에서 수평으로 공진 하는 자이로에 회전력이 가해지면 코리올리 효과에 의해 자이로는 Z축방향으로 차동 공진 한다. 이 때 Z축의 정전용량의 변화를 측정함으로써 가해진 회전력을 측정할 수 있다. Z축의 운동 방정식은 구동력만을 빼 나머지는 X축의 경우와 동일하다.

Z축의 운동 방정식,

$$m\ddot{z} + b_z\dot{z} + k_z z = F_z = F_x$$

(2)

위 식에서 구동력 F_x 는 코리올리힘으로,

$$F_x = 2m_z \Omega v_x$$

(3)

이다. Ω 는 각속도이고, v_x 는 X축으로 움직이는 속도이다. 라플라스 변환으로 해를 구해보면

$$\begin{aligned} Z(s) &= \frac{2m_z \cdot \Omega \cdot v_x}{ms^2 + b_z s + k_z} v_x(s) \\ &= \frac{2m_z \cdot \Omega \cdot \epsilon_0 \frac{1}{d} s}{(ms^2 + b_z s + k_z)(ms^2 + c_x s + k_x)} \mathfrak{I}\{v_D^2(t)\} \end{aligned} \quad (4)$$

외부에서 가해지는 힘(회전력)이 없는 상태에서 구동 전원의 주파수를 구조체의 공진주파수에 맞추면 자이로는 수평으로 공진한다. 그림2는 자이로의 물리적인 계수

이고, 이 때 C_z 는 Z축의 정전용량으로 각속도에 따라 변한다. 그리고 각속도에 따른 용량변화는 차동구조로 검출됨을 그림1(2,3번 패드)에서 볼 수 있다.

2.2 미소 용량 변화량 검출회로

그림3은 구조체의 기준 진동을 측정하는 것으로 일반적인 미소 용량 변화량 측정회로를 보여 주고 있다.

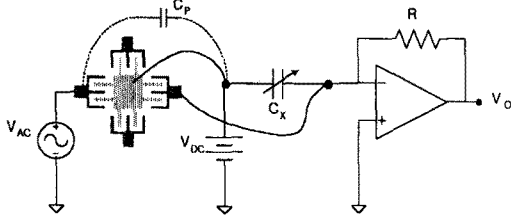


그림3. 용량 변화량 측정회로

V_{AC} 는 구조체의 기준 진동을 유발하는 것으로 구조체의 공진 주파수와 동일한 주파수를 가지는 구동 교류전원이다. 구조체의 기준 진동은 용량검출회로를 통해 전압으로 나타내며 다음과 같다.

$$V_o = R \cdot \dot{I}_s = R \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} = R \cdot V_{DC} \frac{\partial C_x}{\partial t}$$

$$= R \cdot V_{DC} \frac{\partial C_x}{\partial x} \cdot \frac{\partial x(t)}{\partial t} = V_{s(cmp)} \cdot \cos \omega_x t$$

where, $x(t) = X_o \sin \omega_x t$

$$V_{s(cmp)} = R \cdot V_{DC} \frac{\partial C_x}{\partial x} X_o \cdot \omega_x \quad (5)$$

여기서, $\frac{\partial C_x}{\partial x}$ 는 그림1과 같은 빔살무늬 형태의 구조체에서는 상수가 되고 계산에 의해 알 수 있으므로 검출전압의 크기로 X_o 즉 기준진동의 크기를 알 수 있다.

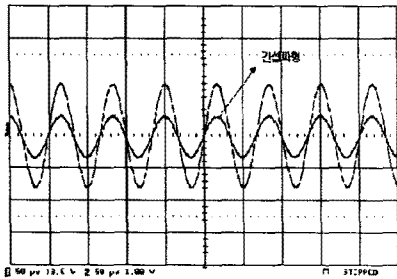


그림4. 구동 교류신호의 간섭 파형

그림3의 측정회로를 통해 구조체의 기준진동 실험을 한 결과 그림4와 같이 구조체 구동을 위한 교류신호가 기생캐패시터를 통해 검출회로로 간섭됨을 볼 수 있었다. 이러한 간섭은 구조체의 구조 및 회로 결선을 통해 이루어지고 그 크기가 구동교류 신호의 약 1/20(1V) 이상 되었다. 구조체의 움직임에 의해 나타나는 수 mV의 미약한 신호를 검출하기 위해서는 이러한 간섭의 영향을 최소화하여야 한다.

그림5는 간섭을 상쇄하여 구조체의 움직임에 의해 유기되는 용량의 변화량을 측정할 수 있는 회로로 크게 용량

변화량 측정회로와 간섭 상쇄회로부로 나눌 수 있다. (가)는 기본적인 전류검출방식의 용량 변화량 측정회로이고, (나)~(라)는 간섭상쇄 회로부이며 (마)는 최종 이득 조절부이다. 구조체 구동 교류전원 V_{ac} 는 노드A에 간섭되어 나타난다. 교류전원 V_{ac} 를 또 다른 병렬경로를 통해 노드A에 나타나는 간섭파형과 동일한 크기와 위상의 파형을 만들어 그 차를 측정하므로 간섭을 상쇄하는 것이다.

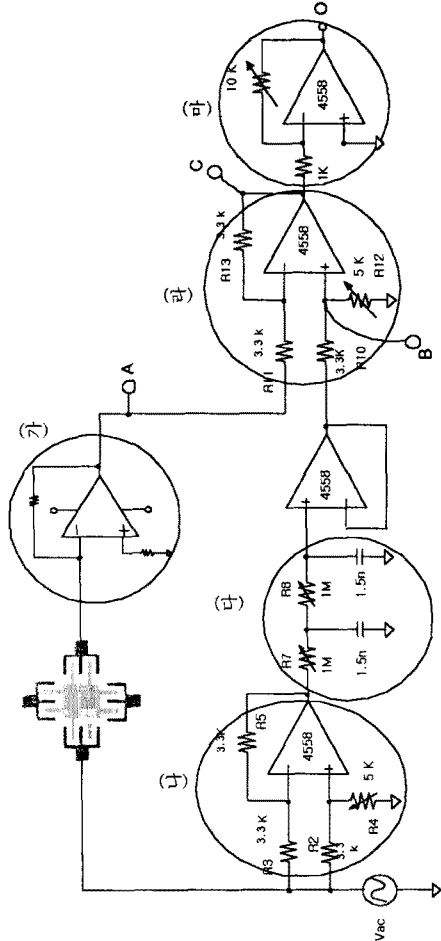


그림5. 간섭이 상쇄된 용량 변화량 검출 회로

(나)는 크기(amplitude)를 조절하는 회로이며 그 이득은 -1 ~ 0.2의 범위 내에서 가변이 가능하다. (다)의 위상가변 회로에서는 대략 180°의 범위 내에서 위상 제어가 가능하다.

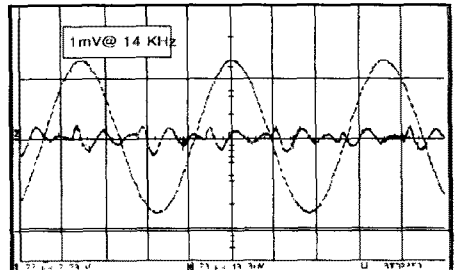


그림6. 구동 교류신호의 상쇄된 간섭 파형

물론 위상제어를 하면 그 크기도 변하게 되나 이는 (나)의 이득 조절회로와 (라)의 차신호 발생회로에서 차신호를 얻을 때 크기를 조절할 수 있으므로 문제가 되지 않는다. (라)는 앞서 언급한 바와 같이 전류검출 방식의 용량 변화량 측정회로에 나타나는 간섭 파형과 의도적으로 만들어진 간섭파형과 유사한 파형의 차를 얻어내는 차동 증폭기이다. 이는 (나)와 같은 구조로 두 신호의 차를 구할 때 각 신호의 곱해지는 계수를 조절 할 수 있다. (다)에서 위상을 조절하고 (나)와 (다)에서 그 크기를 각각 제어 가능하게 함으로 간섭의 영향을 최소화 할 수 있었다.

그림6은 구조체가 움직이지 않고 있을 때의 검출 신호로 간섭파형의 영향이 간섭상쇄회로로 1mV 정도로 현저하게 줄었음을 보여주고 있다.

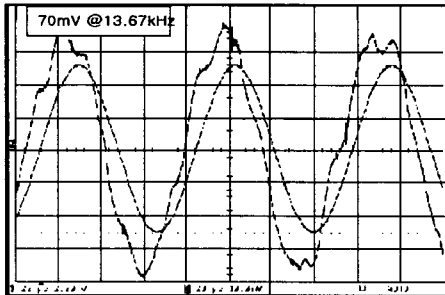


그림7. 구동 교류신호의 상쇄된 간섭 파형

그림7은 구조체가 공진하여 기준진동으로 인해 캐패시터의 용량 변화량 검출 파형을 보여 주고 있다. 가속도 검출 시에도 구조체의 기준진동 여부를 계속 적으로 모니터링 할 수 있게 해준다. 이상에서 X축 기준진동에 따른 용량변화량 검출회로와 그 실험파형을 보여 주었다.

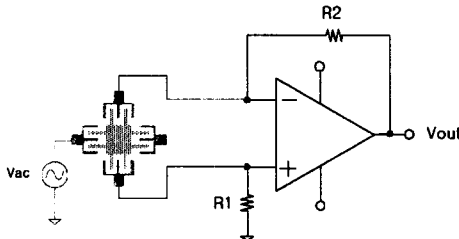


그림8. 차동 용량 변화량 측정회로

외부 각속도에 따른 Z축 용량 변화량 검출회로도 X축 기준진동에 따른 용량변화량 검출회로(그림5)와 동일하고 기본적인 전류 검출방식의 용량 변화량 측정회로(그림5-(가))만 차동 증폭회로(그림8)로 대체하면 된다.

3. 결 론

마이크로머시닝을 이용한 각속도 센서를 포함한 기계적인 구조체의 움직임으로 인해 야기되는 용량 변화량을 검출하는 회로를 설계하였다. 특히 각속도 센서에서는 기준진동을 위한 교류신호가 필요하고 이는 진동하면서 변화되는 용량을 측정하는 회로에 직접적인 노이즈원으로 작용한다. 본 논문에서는 이러한 간섭이 있을 때에도 간섭의 영향을 최소화하여 용량 변화량을 측정할 수 있는 회로를 설계하고 실험을 통해 그 동작을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

[1] W.A. Clark, "Surface Micromachined Z-axis

Vibratory Rate Gyroscop", Sensor & Actuator workshop, 1996

- [2] W.C.Tang, et. al. " Electrostatic-comb Drive of Lateral Polysilicon Resonators", Sensor and Actuator, pp.328-331, 1990
- [3] Liwei Lin, et al. " Micro Electromechanical Filters for Signal Processing", MEMS, pp. 228-231, 1992