

시분할 다중화 기법을 이용한 정전 구동형 XY 스테이지의 위치 검출

민동기, 정희문, 김철순, 전종업  
 삼성종합기술원, System & Control Sector, Nano System Lab.

Position Sensing for an Electrostatic XY-Stage Using Time-Division Multiplexing

Dong-Ki Min, Hee-Moon Jeong, Cheol-Soon Kim, and Jong Up Jeon  
 Nano System Lab., System & Control Sector, SAIT

**Abstract** - 시분할 다중화 방식을 이용한 정전 구동형 XY 스테이지의 새로운 위치 검출 방법을 제안한다. 각 축의 고정자에 90도의 위상차를 가지는 여기(excitation) 신호를 주입하여 스테이지와 연결된 1개의 charge amplifier와 S/H를 이용하여 x축과 y축 방향의 위치를 검출한다. charge amplifier의 파라미터는 DC 이득이 크고 또한 신호간 간섭이 발생하지 않도록 설정한다. 제안된 방법은 XY 스테이지의 디지털 서보 제어기의 구성 요소인 S/H를 사용하기 때문에 기존의 방식과는 달리 위치 신호의 검출이 안정적이고 반송 신호에 의한 고조파 왜곡과 복조 과정에서 발생하는 지연을 현저히 줄일 수 있으며 간단하게 구현할 수 있다.

1. 서 론

최근 회전형 자기 기록 장치의 기록 밀도의 한계를 극복하기 위하여 SPM(scanning probe microscopy) 원리를 이용한 고밀도 기록 장치의 연구가 진행되고 있다. 핵심 기술로는 탐침(tip)과 칸티레버(cantilever)의 제조, 매체의 기록 및 재생의 원리, 신호 처리, XY 스테이지(stage)의 제조 등을 들 수 있다. 특히 XY 스테이지와 신호 처리를 위한 회로 부분이 상기한 기록 장치의 면적의 대부분을 차지하기 때문에 시스템의 소형화를 위하여 XY 스테이지의 단위 면적당 구동력을 높이거나 회로 부분은 단일 칩으로 구성하는 연구가 많이 진행되고 있다.

XY 스테이지나 다축 단일 proof-mass 가속도계에서의 검출 방법으로는 반송 신호를 proof-mass에 주입하고 각 축의 고정자에서 이에 의하여 변조된 capacitance 변화량을 측정하는 방법[1][2]과 다른 주파수를 가지는 반송 신호를 각 축에 주입하여 변조된 capacitance 변화량을 proof-mass에서 검출하여 각 주파수에 대한 동기 변조기(synchronous demodulator)를 사용하여 각 축의 가속도를 검출하는 방법[3]이 제안되었다. 그러나 이러한 방법은 축의 수만큼 복조 회로가 필요하고 따라서 이에 상응하는 칩 면적을 차지하기 때문에 가격 및 시스템의 소형화에 어려움을 가지게 된다. 또한 12개의 스위치를 이용하여 여기 신호에 의한 응답의 일부로부터 capacitance의 변화량을 charge amplifier와 저역 통과 필터를 이용하여 측정하는 방법[4]이 제안되었으나 많은 스위치와 각 축마다 신호 처리를 위한 회로가 필요하고 저역 통과 필터의 사용으로 검출 신호의 크기가 작은 단점이 있다.

본 논문은 정전형 XY 스테이지의 새로운 위치 측정 방법을 제안한 것으로 각 축의 고정자에 여기 신호를 주입하고 charge amplifier의 출력 전압으로부터 시분할로 각 축의 변위를 XY 스테이지의 디지털 서보 제어기의 구성 요소인 S/H를 이용하여 검출한다. 따라서 시스템에 추가되는 검출 회로는 여기 신호 발생부와 charge amplifier뿐으로 기존의 방식에 비하여 칩 면적을 적게 차지하고 S/H를 이용하여 검출하기 때문에 검출 특성이

좋고 지연이 매우 적은 특성을 가진다. 시뮬레이션을 통하여 제안된 방법의 유효성을 증명한다.

2. 본 문

2.1. 정전형 XY 스테이지의 모델링

본 논문에서 적용한 정전형 XY 스테이지는 그림 1(a)의 개념도와 같이 x축과 y축 방향으로 구동할 수 있도록 콤(comb) 형태의 정전력 발생부와 개체를 얻을 수 있는 미디어와 이를 지지하는 스프링으로 구성되어 있다. 스테이지는 전기적으로 공통 노드를 형성하고 이와 각 축의 구동부는 그림 1(b)와 같이 4개의 비선형 capacitor  $C_{x1}$ ,  $C_{x2}$ ,  $C_{y1}$ ,  $C_{y2}$ 를 형성한다. 각 축의 구동부의 스프링이 상수이고 축간 간섭이 없다고 가정하면 다음과 같이 변위  $x$ 에 대한 2차의 운동 방정식을 얻을 수 있다.

$$m\ddot{x} + d\dot{x} + kx = f_x \tag{1}$$

여기서  $m$ 은 스테이지의 질량,  $d$ 는 damping 상수,  $k$ 는 스프링 상수이다.  $f_x$ 는 x축의 고정자  $sx1$ 와 스테이지, 고정자  $sx2$ 와 스테이지 간에 인가된 전압  $v_{sx1}$ ,  $v_{sx2}$ 에 의해 발생된 정전력의 차이이다.

$\partial C_{x1}/\partial x = -\partial C_{x2}/\partial x \equiv \partial C/\partial x$ 으로 서로 대칭의 구조를 가진다면 다음과 같이 정전력  $f_x$ 를 구할 수 있다.

$$f_x = 2 \frac{\partial C}{\partial x} V_B v_{dx} \tag{2}$$

여기서  $\partial C/\partial x = Ne\epsilon_0 h/g$ ,  $N$ 은 x축 양의 방향의 콤의 수,  $\epsilon_0$ 는 공기의 유전율(=8.854e-12N/m),  $h$ 는 구조물의 높이,  $g$ 는 gap 간격,  $V_B$ 는 bias 전압,  $v_{dx}$ 는 x축 방향의 구동 전압이다.

y축에 대한 운동 방정식과 정전력  $f_y$ 는 동일한 방법으로 구할 수 있다. x축 양의 방향의 비선형 capacitor  $C_{x1}$ 에 흐르는 전류는 다음과 같이 구할 수 있다.

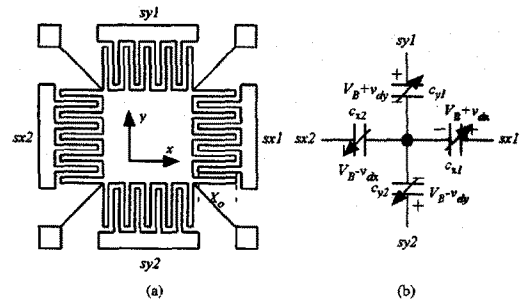


그림 1. 정전형 XY 스테이지 (a)개념도 (b) 전기적 모델

$$i_{x1} = \frac{\partial c}{\partial x} [(V_B + v_{ax}) \frac{dx}{dt} + (X_o + x) \frac{dv_{ax}}{dt}] \quad (3)$$

여기서  $X_o$ 는 평형 상태에서의 고정자 콤과 스테이지의 콤이 서로 겹치는 길이이다.

식 (3)에서 보는 바와 같이 전기 시스템과 기계 시스템이 결합되어 있음을 명확히 알 수 있다. 마찬가지로 비선형 capacitor  $c_{x2}$ ,  $c_{y1}$ ,  $c_{y2}$ 에 흐르는 전류를 구할 수 있다.

## 2.2. 시분할 다중화 방식에 의한 위치 검출

### 2.2.1 Charge Amplifier

본 논문에서는 capacitance 검출 방법으로 그림 2와 같이 charge amplifier와 S/H를 사용하였다. Charge amplifier가 이상적인 OP amp의 특성, 즉 입력 impedance가 무한대이고 반전, 비반전 단자간 전위차가 영이면 앞에서 각 축의 비선형 capacitor에 흐르는 전류의 합  $i_{in}$ 은 charge amplifier의 feedback으로 연결된 capacitor  $C_f$ 와 저항  $R_f$ 으로 흐르게 된다. 즉,

$$i_{in} = i_{x1} + i_{x2} + i_{y1} + i_{y2} \quad (4)$$

여기서  $i_{x1}$ ,  $i_{x2}$ ,  $i_{y1}$ ,  $i_{y2}$ 는 각각  $c_{x1}$ ,  $c_{x2}$ ,  $c_{y1}$ ,  $c_{y2}$ 에 흐르는 전류이다.

Charge amplifier의 출력 전압  $v_{co}$ 는 Laplace 변환에 의하여 다음과 같은 관계식을 가진다.

$$V_{co} = -\frac{1}{C_f} \frac{1}{s + \omega_f} I_{in} \quad (5)$$

여기서  $\omega_f^{-1} = R_f C_f = \tau_f$ 이다.

### 2.2.2 여기 신호(excitation signal)

본 논문에는 그림 3(a)과 같은 여기 신호를 각 축에 인가하여 이에 대한 응답을 charge amplifier에서 검출한다. x축의 고정자 sx1에는 구형파의 여기 신호  $v_{ex1}$ 를 인가하고 고정자 sx2에는  $v_{ex1}$ 와 180도의 위상차를 가지는 구형파의 여기 신호  $v_{ex2}$ 를 인가한다. 마찬가지로 y축의 고정자 sy1과 sy2에 여기 신호  $v_{ey1}$ 와  $v_{ey2}$ 를 인가하지 않고 x축의 여기 신호와는 90도의 위상차를 가진다.

이러한 여기 신호를 인가하면 비선형 capacitor에 흐르는 전류들의 합  $i_{in}$ 이 charge amplifier에 연결된 feedback 저항  $R_f$ 와 capacitor  $C_f$ 에 흐르게 된다.

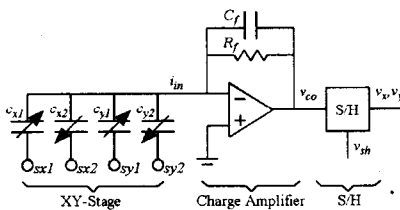


그림 2. 제안된 XY 스테이지의 위치 검출 시스템

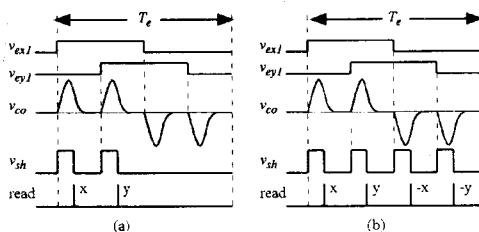


그림 3. 여기 신호, Charge amplifier 출력 전압, S/H 신호 및 타이밍 신호. (a) Cycle 당 1번 검출 (b) Cycle 당 2번 검출

$$i_{in} = 2 \frac{\partial c}{\partial x} x \frac{dv_{ex}}{dt} + 2 \frac{\partial c}{\partial y} y \frac{dv_{ey}}{dt} \quad (6)$$

여기서  $v_{ex} = v_{ex1} - v_{ex2}$ ,  $v_{ey} = v_{ey1} - v_{ey2}$ 이다.

식 (6)에서 보는 바와 같이 전류  $i_{in}$ 은 각 축의 위치와 여기 신호의 미분값 간의 선형 조합으로 이루어져 있으나 여기 신호가 90도의 위상차를 가지고 있으므로 전류  $i_{in}$ 은 여기 신호 주기  $T_e$ 에 대하여 4개의 펄스 형태가 된다. 따라서 전류  $i_{in}$ 의 응답인 charge amplifier의 출력 전압을 S/H를 이용하여 검출함으로써 하나의 회로로 x축과 y축의 위치를 검출할 수 있다.

### 2.2.3 Charge amplifier의 파라미터 설계

식 (5)에서 보는 바와 같이 입력 전류  $i_{in}$ 에 대하여 charge amplifier의 출력 전압  $v_{co}$ 는 1차 시스템으로 시상수  $\tau_f$ 에 의해 시간 응답이 결정된다(그림 3(a) 참조). 따라서  $T_e/4$ 의 시간마다 입력되는 전류 펄스에 대한 응답이 서로 겹치지 않도록 하기 위하여 다음과 같은 조건을 만족하도록 시상수  $\tau_f$ 를 결정한다.

$$\tau_f < T_e/4\alpha \quad (7)$$

여기서  $\alpha$ 는 5 이상의 상수이다.

또한 식 (5)에서 보는 바와 같이  $R_f$ 가 DC 이득이므로  $R_f$ 는 크게  $C_f$ 는 작게 식 (7)의 조건을 만족하도록 설정한다.

### 2.2.4 S/H 제어 신호

그림 3(a)에서 보는 바와 같이 charge amplifier의 출력  $v_{co}$ 가 최대가 되는 시점에서 hold 신호를 S/H에 인가한다. 식 (6)에서 보는 바와 같이 여기 신호의 하강 edge에서 부호가 반대가 되므로 각 여기 신호의 상승 edge에 대한 응답을 검출한다.

여기 신호의 하강 edge에 대한 응답을 이용하여 한 cycle에 위치를 두 번 검출하려면 그림 3(b)와 같이 하강 edge에 대한 응답이 최대가 되는 시점에서도 hold 신호를 인가하고 검출한 값의 부호를 바꾸어 사용한다.

### 2.2.5 n축 시스템으로의 확장

지금까지는 2축 시스템인 XY 스테이지에 시분할 다중화 방식의 검출 방법에 대하여 논의하였으나 본 개념을 n축 시스템으로의 확장이 용이하다.

각 축에 인가하는 여기 신호는 서로  $180/n$ 도의 위상차를 가지도록 인가하고 charge amplifier의 시상수는  $\tau_f < T_e/2na$ 의 조건을 만족하도록 설정한다. 따라서 각 여기 신호에 대한 응답이 최대가 될 때 S/H에 의해 전압을 측정하면 n축의 위치 정보를 시분할로 검출할 수 있다.

## 2.3 시뮬레이션

그림 2와 같은 시스템 구성을 가지고 본 논문에서 제안한 검출 방법을 확인하기 위하여 SPICE를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다.

표 1. 시뮬레이션 조건

Parameter	Value	Parameter	Value
$m$	3.2e-6kg	$h$	40 $\mu$ m
$d$	1.2e-3Ns/m	$x_o$	60 $\mu$ m
$k$	12.0N/m	$v_{ex1}, v_{ex2}, v_{ey1}, v_{ey2}$	1V, 25kHz
$g$	3 $\mu$ m	$V_B$	7.5V
$N$	$\approx$ 6000	$v_{dr}, v_{ds}$	5.0V, 100Hz

식 (1)~(3)으로 표현된 XY 스테이지의 전기-기계 시스템은 등가 회로(equivalent circuit)[5]를 이용하여 모델링하였다. 검출부의 charge amplifier에 사용된 OP Amp는 National Semiconductor사에서 제공하는 LM6361의 회로 모델을 사용하였으며 S/H는 behavioral macromodel을 사용하였다[6].

그림 4(a)와 같이 y축의 고정자에는 Bias 전압 7.5V, 크기 5.0V, 주파수 100Hz의 sine 파형의 구동 전압과 주파수 25kHz, 크기 0V-1V의 구형파의 여기 신호를 인가하였다. 마찬가지로 x축의 고정자에는 bias 전압 7.5V, 크기 5.0V, 주파수 100Hz의 sine 파형의 90도 지연된 구동 전압과 주파수 25kHz, 크기 0V-1V의 구형파의 여기 신호를 인가하였다.

그림 4의 (b)는 charge amplifier의 출력 전압으로 x축과 y축의 고정자에 인가한 여기 신호에 대한 응답이 모두 나타나 있다.

그림 4(c)는 charge amplifier의 출력 전압을 확대한 것이다. 각 여기 신호에 대한 응답이 시간  $T_e/4$ 안에 충분히 감쇠하여 신호간 간섭이 없음을 알 수 있다. 이 전압을 읽기 위한 S/H의 신호와 S/H의 출력 전압을 나타내었다.

그림 4(d)와 (e)는 각 축의 실제 변위와 시분할 다중화 방식에 의해 검출된 변위를 동시에 나타내었으며 본 논문에서 제안된 시분할 다중화 방식에 의한 XY 스테이지의 위치 검출 방식이 유효함을 알 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 XY 스테이지의 시분할 다중화 방식을 이용한 새로운 위치 검출 방법을 제안하였다. 위상차를 가지는 여기 신호를 인가하고 이에 대한 charge amplifier의 출력 전압으로부터 XY 스테이지의 디지털 서보 제어기의 구성 요소인 S/H와 AD 변환기를 이용하여 각 축의 변위를 시분할로 검출할 수 있다. 따라서 XY 스테이지 시스템에 추가되는 검출 회로는 기존의 방식에 비해 차지하는 면적이 매우 적고 성능이 우수하므로 시스템 가격과 소형화 면에서 매우 유리하다.

본 연구는 국가지정연구실사업의 지원에 의해 수행되었습니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] M.A.Lemkin, B.E.Boser, D.Auslander and J.H.Smith, "A 3-axis force balanced accelerometer using a single proof-mass", *International Conference on Solid-State Sensor and Actuators (TRANSDUCERS '97)*, Vol. 2, pp1185~1188
- [2] J.C.Lotters, W.Olthuis, P.H.Veltink, and P.Bergveld, "A sensitive differential capacitance to voltage converter for sensor applications," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 48, No. 1, pp89 -96, 1999
- [3] K.Jono, M.Hashimoto and M.Esashi, "Electrostatic servo system for multi-axis accelerometers," *IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '94)* pp251~256
- [4] H.Ahmad, A.J.Al-Khalili, L.M.Landsberger and M.Kahrizi, "A two-dimensional micromachined accelerometer," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 46, No. 1, pp18 -26, 1999
- [5] H.A.Tilmans, "Equivalent circuit representation of electro-mechanical transducers: I. Lumped-parameter systems," *Journal of Micromechanics and Microengineering* Vol. 6, pp157~176, 1996
- [6] J.A.Connelly and P.Choi, *Macromodeling with SPICE*, Prentice Hall Inc., 1992

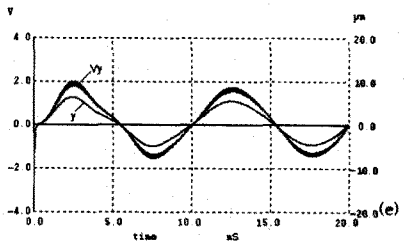
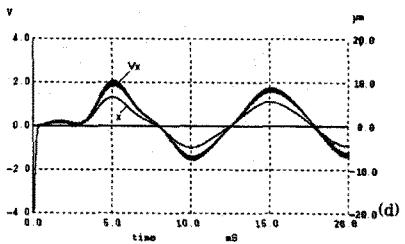
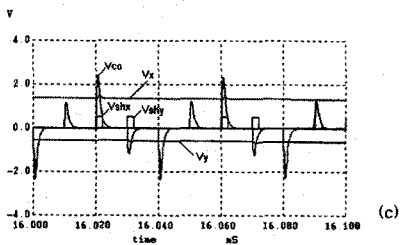
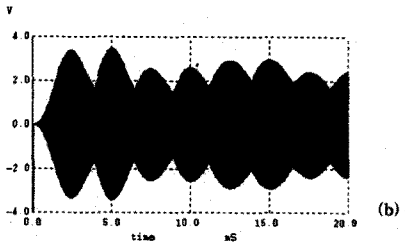
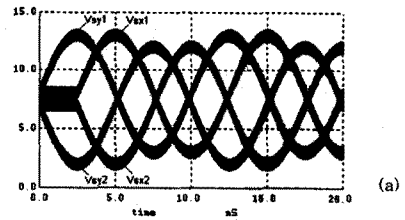


그림 4. 시뮬레이션 파형. (a) 각 고정자에 인가한 전압 (b) charge amplifier 출력 (c) 타이밍 신호 및 S/H 출력 (d) 실제 변위 x와 검출된 변위  $x_s$  (e) 실제 변위 y와 검출된 변위  $y_s$