

펄스폭 변조를 이용한 정전형 액추에이터의 구동 및 위치 검출 알고리즘

민동기*, 전종업⁺

(논문접수일 2007. 12. 26, 심사완료일 2008. 3. 11)

Driving and Position Sensing Algorithm for an Electrostatic Actuator Using Pulse-width Modulation

Dong-Ki Min*, Jong Up Jeon⁺

Abstract

Capacitive position sensing with modulation technique is widely used in electrostatic actuator applications. To maximize the electrostatic force and the position-sensing gain, capacitors for driving and capacitors for sensing are shared, i.e, after applying the driving voltage with high-frequency modulating signals using op amps, the position is demodulated from the modulated signal. In high-voltage applications, however, low bandwidth of a high-voltage op amp hinders adding the high-frequency modulating signal to the driving voltage. In this paper, new and very simple driving and sensing method is proposed, in which the pulse-width modulated driving voltage eliminates the need of the high-frequency modulating signal for position sensing. This new algorithm is proved by the simulation results using Matlab/SIMULINK.

Key Words : Electrostatic actuator(정전 구동형 액추에이터), Position sensor(위치검출기), Pulsewidth modulation(펄스폭 변조)

1. 서론

정전용량 변화를 이용한 위치 검출 원리는 정전 구동형 액추에이터(electrostatic actuator) 응용 분야에 널리 이용되고 있다. 특히 구동력 및 검출 신호의 크기를 최대화하기 위

해 정전 구동형 액추에이터의 커패시턴스(capacitor)를 공유하기도 한다^(1,2). 즉 구동용 커패시터(capacitor)와 위치 검출용 커패시터를 따로 마련하지 않고 하나로 구성하는 대신 구동 전압과 주파수 대역이 분리된 고주파의 변조 신호를 구동 전압에 더하여 하나의 커패시터에 인가하면 대상 액추에이

* 삼성종합기술원 Semiconductor Device Lab.

+ 교신저자, 울산대학교 기계자동차공학부 (jujeon@ulsan.ac.kr)

주소: 680-749 울산광역시 남구 무거2동 산29번지

터의 주파수 대역 때문에 구동 전압 성분만 기계적인 움직임에 기여하고 전기적인 변화 즉 정전 용량의 변화는 고주파 변조 신호에 의하여 기계적인 움직임이 변조되어 발생한다.

그러나 높은 구동 전압이 필요한 응용분야의 경우 Fig. 1과 같이 고전압 OP 앰프의 낮은 대역폭으로 고주파의 변조 신호를 구동 전압에 더할 수 없는 문제점이 발생한다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 고전압용 OP 앰프를 사용하는 대신 스위칭 소자를 사용하여 기준 신호(reference signal)를 펄스폭을 변조하여 구동 신호로 인가하고 이 변조된 구동 전압을 이용하여 위치를 검출하는 새로운 구동 및 검출 방법을 제안한다. 제안된 알고리즘은 Matlab/SIMULINK를 이용하여 모델링 및 시뮬레이션하였으며 이를 통하여 제안된 새로운 구동 및 검출 방법의 유효성을 검증하였다.

2. 구동 및 위치 검출 원리

2.1 구동 원리

일반적으로 정전 구동형 액추에이터는 스프링에 지지되어 움직일 수 있는 이동자(rotor)와 고정된 고정자(stator)로 구성되어 있으며 평판형 혹은 콦(comb)구조의 전극이 형성되어 있고 이에 전압을 가하여 발생하는 정전기력으로 이동자를 움직인다.

본 논문에서는 고전압용 OP 앰프를 사용하는 대신 Fig. 2에서 보는 바와 같이 스위칭 소자를 이용하여 0과 V_D 의

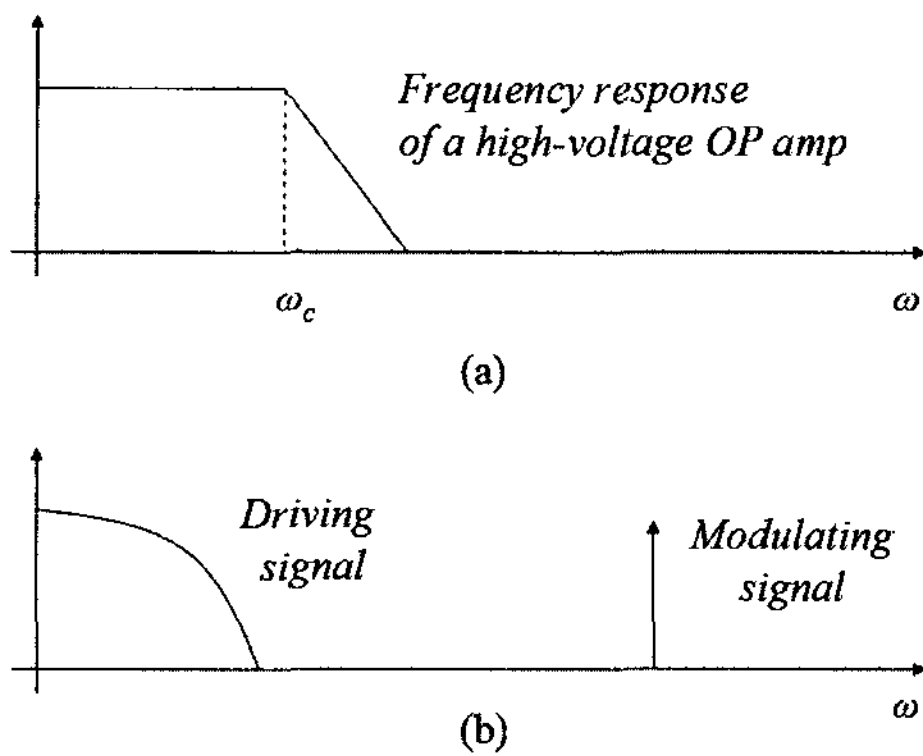


Fig. 1 (a) typical frequency response of a high-voltage op amp (b) frequency range of a driving signal and a modulating signal for position sensing in conventional system

전압 크기로 펄스 폭 변조된 전압을 고정자 1과 고정자 2에 인가하여 이동자를 구동한다. 이동자의 전위는 위치 검출을 위한 전하증폭기(charge amplifier)의 가상 접지에 의해 전위가 0으로 유지된다. 따라서 양단간 걸리는 전위차는 곧 고정자에 인가되는 전압이 된다.

펄스폭 변조는 변조 신호의 종류에 따라 여러 가지 방법으로 구현할 수 있으나 본 논문에서는 Fig. 3과 같이 톱니파를 사용한다(자세한 이유는 다음 장에서 설명한다). 변조 신호와 기준 신호와 비교하여 변조된 구동신호 v_{PWM} 을 얻은 후 이에 따라 고정자 1과 2에는 각각 듀티비(duty ratio) D 와 $(1-D)$ 를 가지는 구동 전압이 인가된다. 이에 따라 이동자에 인가되는 정전기력은 식 (1)과 같다.

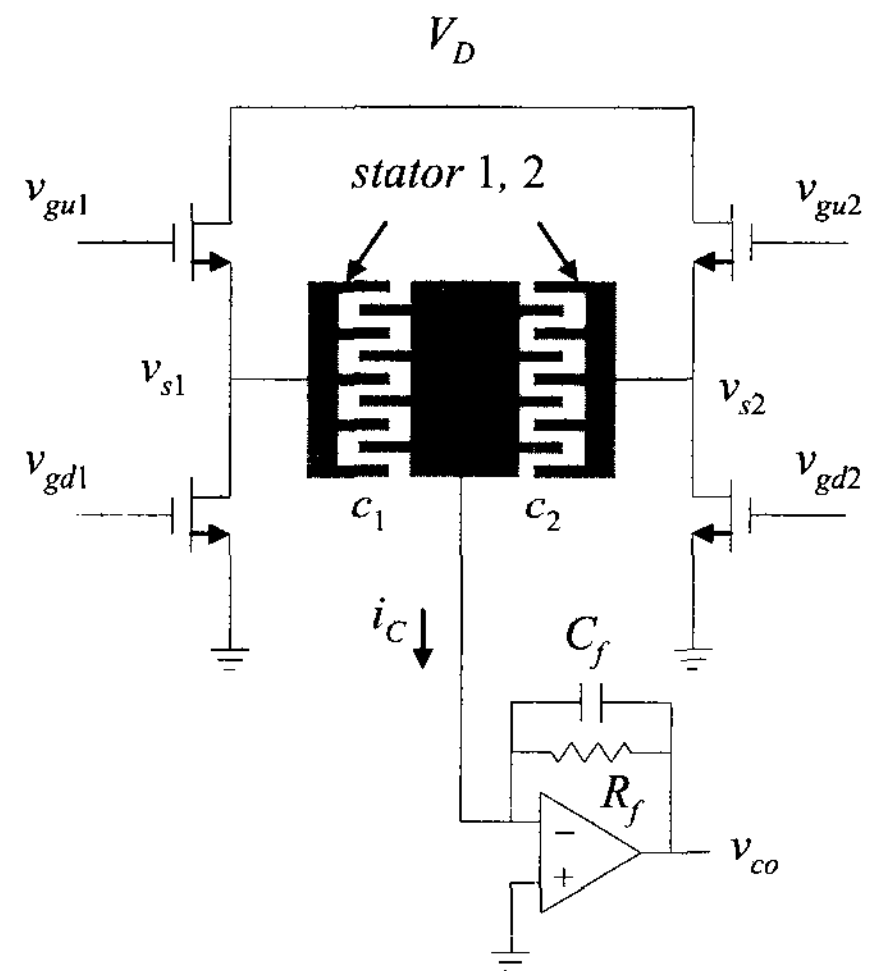


Fig. 2 Schematic Diagram of PWM driving circuit and position sensing circuit

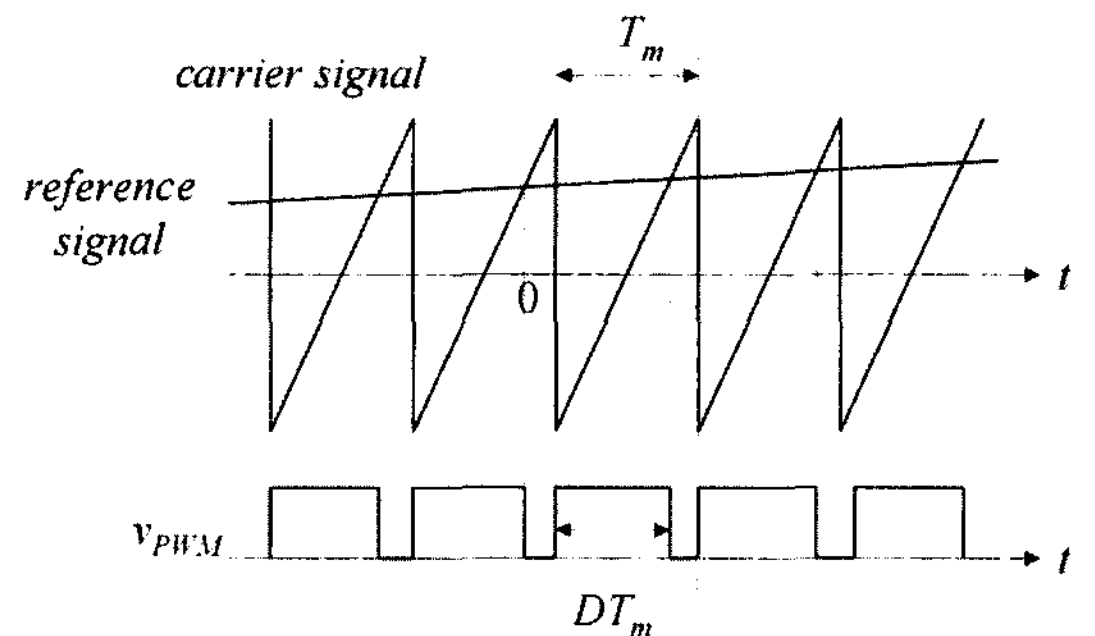


Fig. 3 Pulse-width modulation using a saw-tooth wave

$$f = f_1 + f_2 = \frac{1}{2} \frac{\partial c_1 v_{s1}^2}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{\partial c_2 v_{s2}^2}{\partial x} \quad (1)$$

여기서 x 는 이동자의 구동 변위이고 c_1 과 c_2 는 각각 이동자와 고정자 1 사이의 정전용량, 이동자와 고정자 2 사이의 정전용량이며 변위 x 에 대한 정전용량 변화량을 c_r 라 하면 $c_1 = C_0 + c_r$, $c_2 = C_0 - c_r$ 으로 정의할 수 있다.

변조 신호의 주기를 T_m 이라 할 때 각 주기마다 발생하는 평균 정전기력 $\langle f \rangle_{T_m}$ 은 식 (2)와 같다.

$$\langle f \rangle_{T_m} = \langle f_1 \rangle_{T_m} + \langle f_2 \rangle_{T_m} = \frac{V_D^2}{2} \frac{\partial c_r}{\partial x} (1 - 2D) \quad (2)$$

따라서 발생한 정전기력은 변조된 신호의 듀티비와 선형 관계임을 알 수 있다.

2.2 위치 검출 원리

위치 검출은 변위 x 에 의한 정전 용량 변화량을 통해 이루어진다. 정현파를 사용하는 기존의 검출 방법⁽¹⁻³⁾과 달리 펄스형태의 신호를 이용하여 상승 또는 하강 엣지(edge)에서 발생하는 전류의 크기로부터 정전 용량 변화량을 검출한다.

본 논문에서 제안한 위치 검출 알고리즘은 Fig. 4와 같이 구성할 수 있다. 이동자에서 유입되는 전류 i_c 는 전하증폭기(CA)에 의해 전압 v_{co} 로 변환되며 피크검출기(peak detector, PD)를 통해 CA 출력 전압의 피크값 $v_{co,peak}$ 을 검출한다. 이 최대값은 변위 x 에 따른 정전 용량 변화량과 비례하며 이를 샘플 앤 홀드(sample & hold, S/H) 장치를 이용하여 검출할 수 있다. 기존의 방법은 복조기의 특성상 저역 통과 필터를 포함하기 때문에 응답 속도가 낮으나 이와 같은 방법은 변조 신호 주기에 해당하는 응답 속도를 가지기 때문에 더 빠른 응답 특성을 가질 수 있다. 또한 검출 감도가 높은 장점을 가지고 있다.

이상적인 경우 고정자에 인가되는 전압이 순간적으로 상

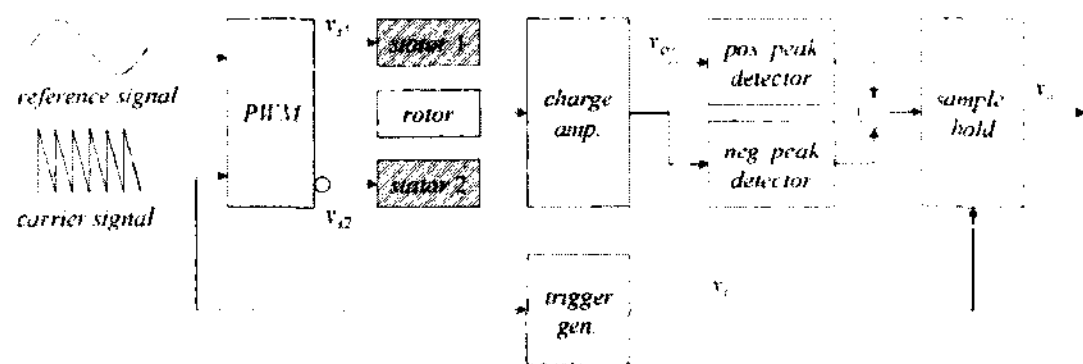


Fig. 4 Schematic diagram of PWM driving & sensing algorithm

승 및 하강하여 이에 따라 이동자에서 흐르는 전류는 임펄스 형태로 발생하지만 실제 소자에서는 고정자 1에 전압이 0에서 V_D 로 턴온(turn-on) 시간 t_{on} 을 가지고 인가되고(Fig. 5 (a) 참조) 고정자 2에는 전압이 V_D 에서 0으로 인가된다. 따라서 변조 신호 주기 동안 정전 용량 변화량이 일정하다고 가정하면 변조 신호의 상승 에지를 $t=0$ 이라 할 때 이동자에서 유입되는 전류 i_c 는 시간 $0 < t < T_m$ 동안 식 (3)과 같이 2개의 펄스형태의 파형이 발생하게 된다(Fig. 5 (b) 참조).

$$i_c = \frac{d}{dt} (c_1 v_{s1} + c_2 v_{s2}) \approx \frac{2c_r V_D}{t_{on}} (\Pi_{T_m}(t) + \Pi_{T_m}(t - t_1)) \quad (3)$$

여기서 t_1 은 Fig. 3에서와 같이 톱니파의 변조 신호의 하강 에지와 기준 신호와의 교점이며, $\Pi_{T_m}(t)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\Pi_{T_m}(t) = \begin{cases} 1 & 0 < t < T \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

전류 i_c 는 CA에 의해 전압 v_{co} 로 변환되며 주파수 영역에서 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{CO}(s) = - \frac{R_f}{1 + sR_f C_f} I_c(s) \quad (5)$$

따라서 출력 전압 v_{co} 는 시간 영역에서는 지수 함수의 응

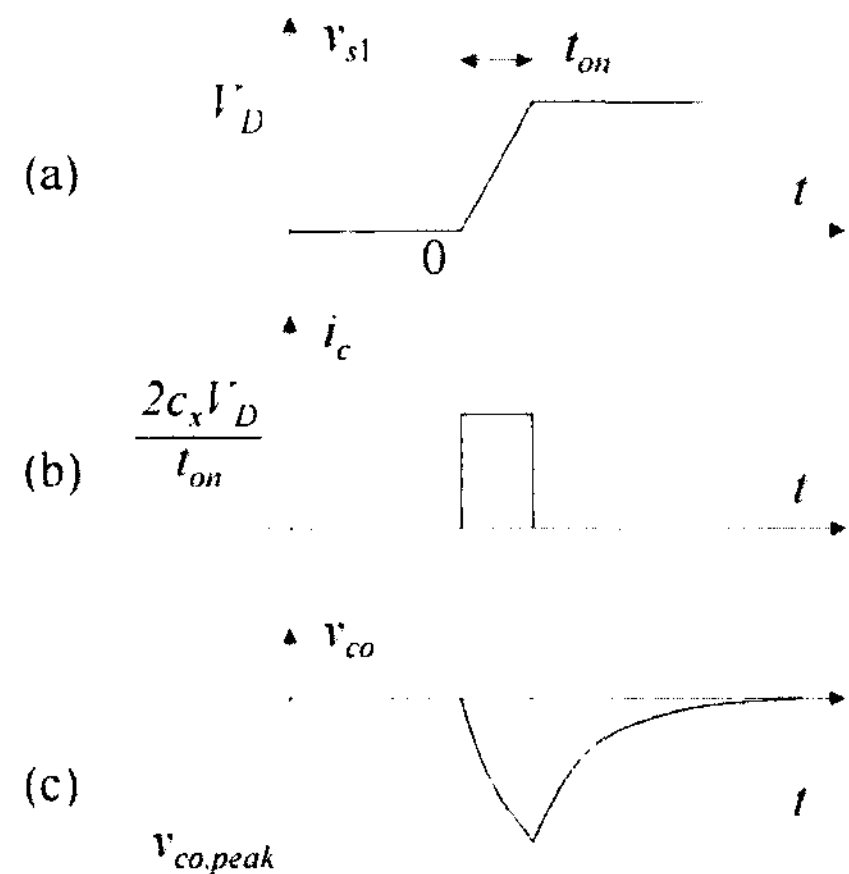


Fig. 5 (a) voltage waveform at stator 1 (b) current flowing out from a rotor (c) charge amplifier output

답 특성을 갖는다. CA의 시상수 $\tau(=R_f C_f)$ 가 턴온시간 t_{on} 보다 크기 때문에 Fig. 5 (c)와 같이 상승하다가 감쇠하게 된다. 이 때 CA의 피크값 $v_{co,peak}$ 는 다음과 같다.

$$v_{co,peak} = -\frac{2R_f c_x V_D}{t_{on}} \left(1 - e^{-\frac{t_{on}}{\tau}}\right) \quad (6)$$

식 (3)에서 보는 바와 같이 이동자에서 유입되는 전류 i_c 는 변조 주기 T_m 동안 부호가 다른 두개의 펄스가 발생되는데 첫 번째 펄스는 톱니파 변조 신호의 급격한 상승 에지에서 발생해서 항상 일정한 위치에서 발생하지만 두 번째 펄스는 기준 신호와 만나는 지점에서 발생하여 기준 신호에 따라 다른 위치에서 발생하게 된다. 따라서 간단하고 쉬운 검출부 구성을 위해 첫 번째 펄스를 기준으로 위치를 검출을 할 수 있다. 만약 삼각파의 변조 신호를 사용하면 스위칭 시점이 매번 달라지는 문제점이 발생한다.

식 (6)과 같이 정전 용량 변화량 c_x 에 따라 CA의 출력 전압의 부호가 변하므로 양의 PD(positive PD)와 음의 PD(negative PD)를 동시에 구성하여 피크값을 검출한다. 톱니파 변조 신호의 상승 엣지 이후 턴온시간이 지난 후 발생하는 트리거(trigger) 신호를 이용하여 S/H 장치는 PD의 출력값을 검출하여 식 (6)과 같이 정전 용량 변화량 c_x , 즉 구동 변위 x 와 비례하는 신호를 얻는다.

일반적으로 페루프 제어시 과도 응답에 의해 기준 신호가 변조 신호보다 더 커지는 경우가 발생하는데 펄스폭 변조가 되지 않는 과변조(overmodulation) 현상이 나타나게 된다.

Table 1 Simulation parameters

Parameters		Value
scanner	mass	1e-6kg
	damping ratio	0.05
	spring constant	39.48N/m
	nominal capacitance	0.1888pF
	resonant freq.	1kHz
	$\partial c_x / \partial x$	9.444nF/m
charge amplifier	R_f	100k Ω
	C_f	5pF
modulating frequency		100kHz
rise time of switch(IRF740)		27ns
switching voltage		200V

이 경우 스위칭이 되지 않기 때문에 제안된 위치 검출 알고리즘은 동작하지 않게 되는 문제점이 있다. 과변조가 되지 않도록 기준 신호에 리미터(limiter)를 연결하면 변조 주기가 항상 위치 검출할 수 있게 된다.

3. 모델링 및 시뮬레이션

제안된 구동 및 검출 알고리즘을 검증하기 위하여 Matlab/SIMULINK⁽⁴⁾를 이용하여 Fig. 6 (a)와 같이 Fig. 4의 구성소자를 모델링하고 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 6 (b)는 펄스폭 변조 블록으로 기준 신호의 크기를 제한하고 이를 톱니파의 변조 신호와 비교하여 스위칭 신호를 발생한다. 이

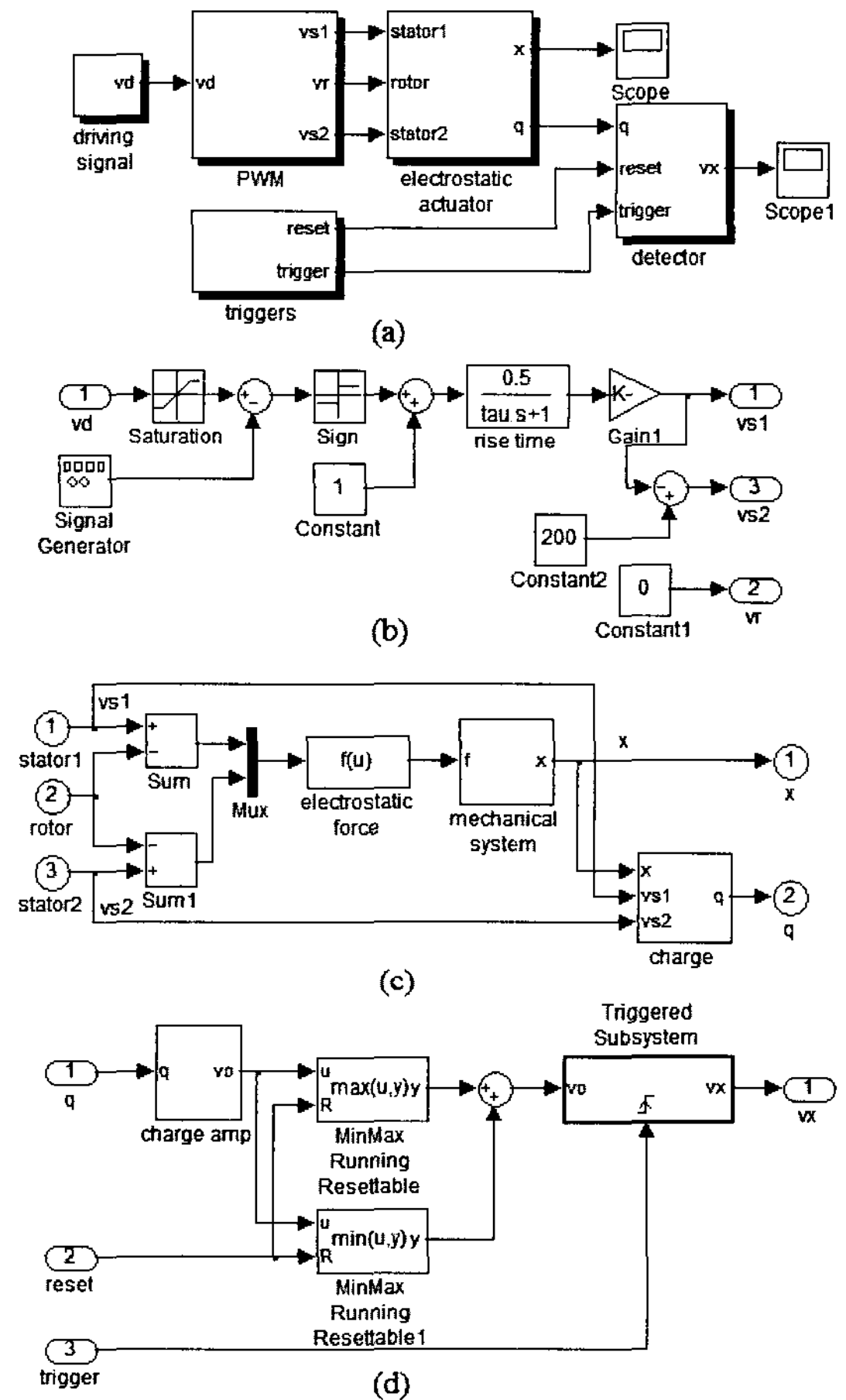


Fig. 6 (a) block diagram of whole system (b) PWM block (c) electrostatic actuator block (d) detector block

를 스위칭 소자(범용 power MOSFET인 IRF740)의 상승시간(rise time)을 모사한 저역 통과 필터를 통하여 고전압 200V를 곱하여 고정자에 전압을 인가한다. Fig. 6 (c)는 정전 구동형 액추에이터 블록으로 식 (1)의 정전기력을 발생하는 블록과 2차 기계방정식을 나타내는 블록, 식 (3)에서 볼 수 있듯이 고정자와 이동자 사이의 대전되는 전하량을 나타내는 블록으로 구성된다. Fig. 6 (d)는 검출기(detector) 블록으로 식 (5)의 CA, 양의 PD와 음의 PD, 그리고 S/H 장치로 구성되어 있다. 이 장치의 제어는 Fig. 6 (a)에서의 트리거 블록에서 발생하는 PD를 리셋시키는 트리거 신호와 S/H를 제어하는 트리거 신호를 이용한다.

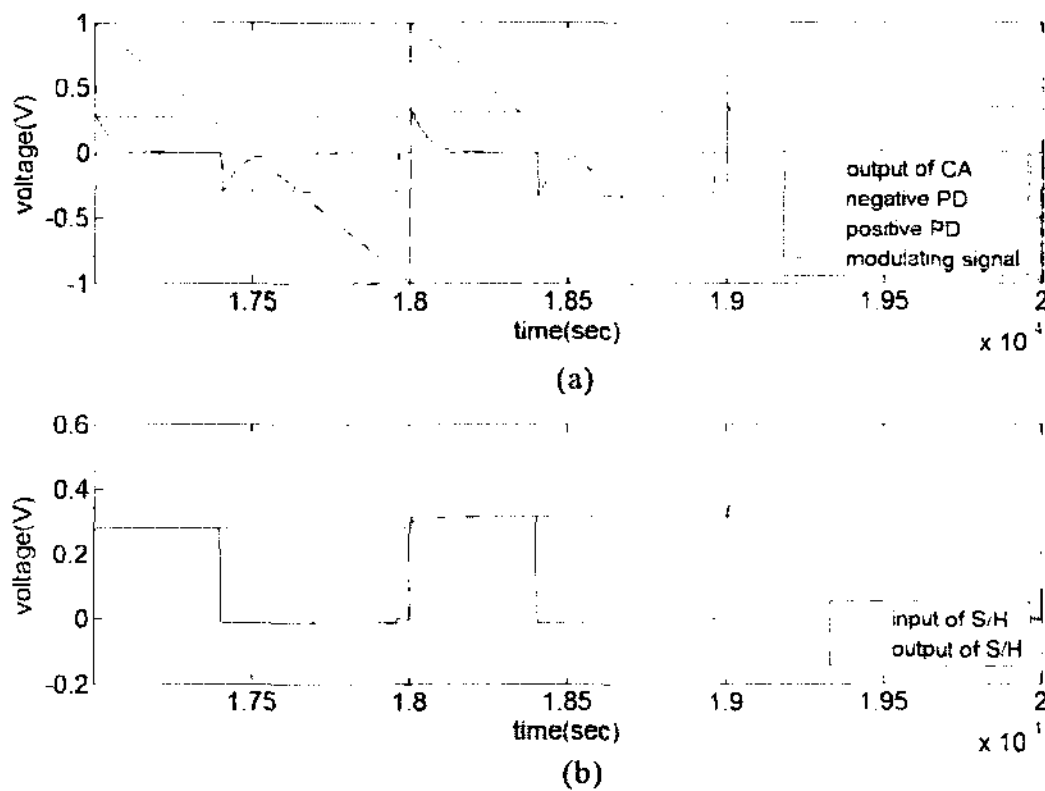


Fig. 7 (a) waveform of the modulating signal (sawtooth), and the outputs of the charge amplifier, positive and negative peak detectors (b) waveform of the input and output of the sample and hold device

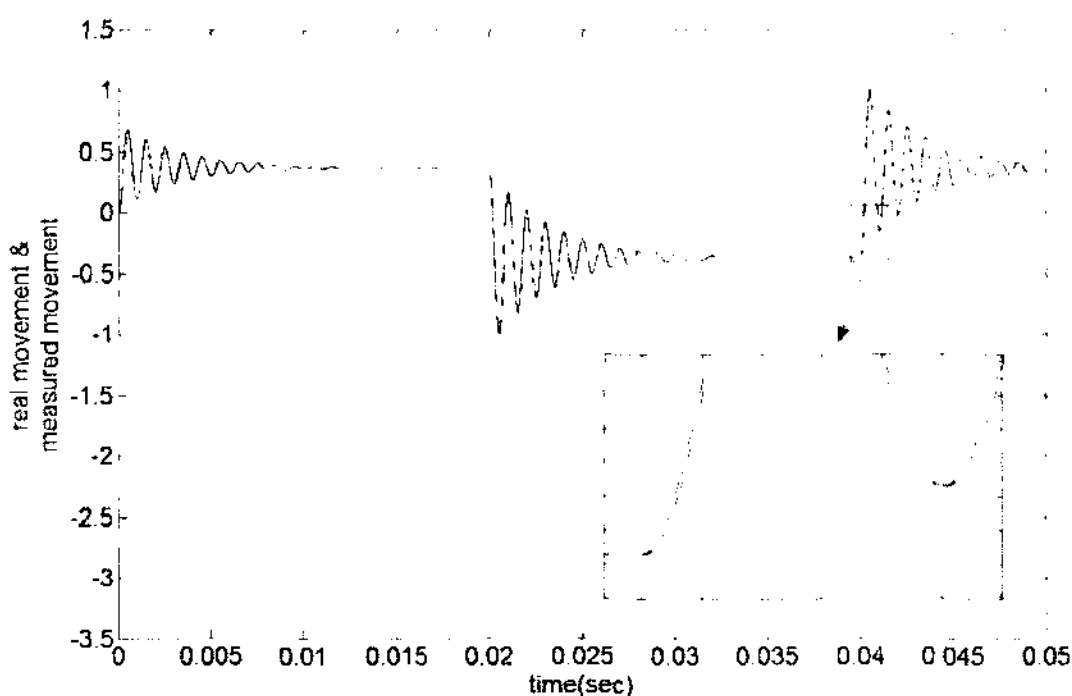


Fig. 8 Normalized signals of the movement of the electrostatic actuator and the measured movement using the proposed position-sensing algorithm

정전 구동형 액추에이터는 이상적인 콤프 형태의 액추에이터를 사용하였고 Table 1과 같은 시뮬레이션 파라미터 및 10ns의 고정 시간격을 가지고 2차 Runge-Kutta 알고리즘 (Heun's method)으로 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 7은 검출 알고리즘을 설명하는 파형으로 Fig. 7 (a)는 톱니파의 상승 에지에서 발생하는 CA 출력을 양의 PD와 음의 PD를 통하여 검출하고 또 다른 톱니파의 상승 에지 전에 리셋시킨다. Fig. 7 (b)는 두 PD의 출력을 더한 신호 즉 S/H의 입력 신호와 톱니파의 상승 에지 부근에서 샘플링한 S/H의 출력신호를 나타낸다.

Fig. 8은 펄스 신호를 인가하였을 경우 정전 구동형 액추에이터의 구동 변위를 그 최대값으로 표준화한 신호(실선)와 제안된 검출 알고리즘으로 검출한 변위를 그 최대값으로 표준화한 신호(점선)를 나타낸다. 시뮬레이션 결과 제안된 검출 알고리즘으로 정확하고 응답 특성이 빠른 위치 검출이 가능함을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 고전압으로 구동되는 정전 구동형 액추에이터의 새로운 위치 검출 알고리즘을 제안하였다. 기존의 위치 검출 방법과 달리 즉 고주파의 변조신호를 구동 신호에 더하기 위해 사용되는 고전압용 OP 앰프를 사용하지 않고 스위칭 소자를 사용한다. 간단한 검출 회로 구성을 위해 톱니파 변조 신호를 이용하여 구동 전압을 펄스폭 변조하여 인가하고 이 변조된 구동 전압을 이용하여 위치를 검출하게 된다. 제안된 알고리즘은 Matlab/SIMULINK를 이용하여 모델링하였고 검출 원리 및 검출 성능은 시뮬레이션으로 설명 및 검증하였다. 본 알고리즘은 고전압용 응용 분야외에도 사용이 가능하다.

후 기

이 논문은 한국학술진흥재단 선도연구자지원사업의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2004-041-D00091).

참 고 문 헌

- (1) Fan, L. S., Hirano, T., Hong, J., Webb, P. R., Juan, W. H., Lee, W. Y., Chan, S., Semba, T., Imano, W., Pan, T. S., Pattanaik, S., Lec, F. C., McFadyen, I., Arya, S., and Wood, R., 1999, "Electrostatic

- Microactuator and Design Considerations for HDD Applications,” *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 35, No. 2, pp. 1000~1005.
- (2) Jono, K., Hashimoto, M., and Esashi, M., 1994, “Electrostatic Servo System for Multi-axis Accelerometers,” *Proc. IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, Oiso, pp. 251~256.
- (3) Lotters, J. C., Olthuis, W., Veltink, P. H., and Bergveld, P., 1999, “A Sensitive Differential Capacitance to Voltage Converter for Sensor Applications,” *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, Vol. 48, No. 1, pp. 89~96.
- (4) The MathWorks, Inc., viewed 5 May 2008, <www.mathworks.com>.