

<학술논문>

저전압 대변위 고정도 구동을 위한 근육모사 직렬연결 디지털 구동기

이재용* · 이원철** · 조영호†

(2007년 3월 15일 접수, 2007년 11월 9일 심사완료)

Muscle-Inspired Serially-Connected Digital Actuators for Low-Voltage, Wide-Range, High-Precision Displacement Control

Jae Yong Lee, Won Chul Lee and Young-Ho Cho

Key Words : Serial Actuators(직렬 구동기), Digital Actuators(디지털 구동기), Low-voltage Actuators(저전압 구동기), Wide-range Actuators(대변위 구동기)

Abstract

This paper presents muscle-inspired serial digital actuators, achieving the improvement of the range-to-precision and range-to-voltage performance. We propose a weight-balanced design for *the serial actuators with serpentine springs* using serial arrangement of *digital actuators*. We have measured the displacement range, precision, and drive voltage at unit and serial actuation of 1Hz. The serial digital actuators produce a full range displacement of $28.44 \pm 0.02 \mu\text{m}$, accumulating the unit displacement of $2.8 \pm 0.5 \mu\text{m}$ at the operating voltage of $4.47 \pm 0.07\text{V}$. In addition, the serial digital actuators having the displacement precision of $37.94 \pm 6.26\text{nm}$ do not accumulate the precision of the unit actuators, $36.0 \pm 17.7\text{nm}$. We experimentally verify that the serial digital actuators achieve the range-to-squared-voltage ratio of $1.423 \mu\text{m}/\text{V}^2$ and the range-to-precision ratio of 749.6.

기호설명

- Δ : 출력변위
- K : 스프링 강성
- F_e : 평행판 정전력
- F_s : 스프링 복원력
- σ : 표준편차
- G_E : 평행판 전극의 무게중심
- G_S : 셀렌타인 스프링의 무게중심

1. 서론

최근 정보통신 분야⁽¹⁾에서는 저전압, 대변위, 고정도 구동기가 요구되고 있다. 종래 MEMS 정전구동기(Fig. 1)를 정보통신 분야에 응용할 경우, 구동범위 대 전압비 및 구동범위 대 정도비 향상이 필요하다. Figure 1은 전압제곱의 비와 구동범위 대 정도의 비를 개선하고자 제안된 기존의 정전구동기⁽²⁻⁴⁾의 성능을 보여준다. 그러나, 기존의 구동기는 정보통신분야의 광학 스위치나 RF 스위치나 광감쇄기(VOA: Variable Optical Attenuator)⁽⁵⁾에 응용되기에는 한계가 있다. 최근에는 저전압 대변위 구동의 문제를 해결하기 위해 아날로그 구동범위를 누적하는 방식인 직렬연결 구동기⁽⁶⁾가 제

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 바이오및뇌공학과 및 기계공학과, 디지털나노구동연구단
E-mail : nanosys@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-8691 FAX : (042)869-8690

* LG Electronics Inc. Digital TV 연구소

** 한국과학기술원 바이오및뇌공학과, 디지털나노구동연구단

안된 바 있다. 그러나, 기존의 직렬연결 아날로그 구동기는 단위 구동기의 오차까지 직렬로 누적되어 고정도 대변위 구동에는 한계를 갖는다.

본 논문에서는 생체근육을 모사하여 대변위 고정도 구동이 가능한 직렬연결 디지털 구동기를 제안한다. 생체근육은 Fig. 2와 같이 액틴과 마이오신의 단위 구동을 직렬로 조합하여 대변위 고정도 구동을 구현한다. 따라서, 본 연구의 생체모사 직렬연결 디지털 구동기는 다수의 디지털 구동기를 직렬로 조합하여, 대변위 고정도 구동을 구현하고자 Fig. 3과 같은 구조를 제안한다.

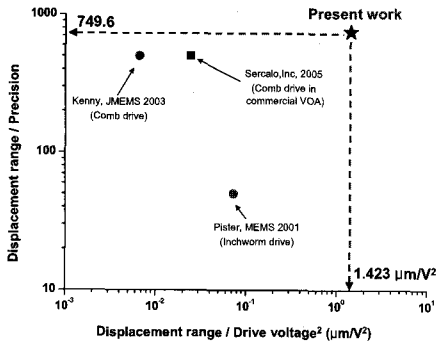


Fig. 1 Performance of the present and previous electrostatic actuators

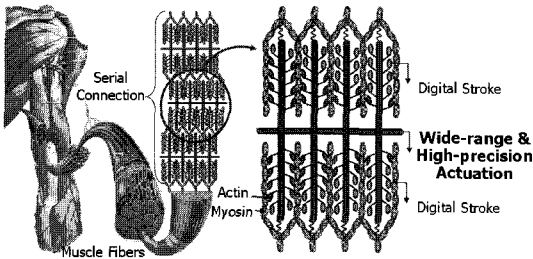


Fig. 2 Structure and principle of the biological muscle actuators

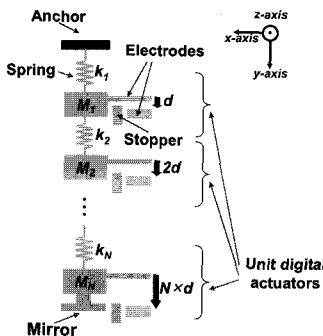


Fig. 3 Simplified model of the serial digital actuators

2. 이론적 해석 및 설계

기존 아날로그 구동변위를 누적인 직렬연결 구동기⁽⁶⁾는 저전압, 대변위, 고정도 구동을 위해서 각각 스프링 강성(k_s)을 작게 하고, 단위구동기의 수(M)를 늘리며, 단위 구동변위의 오차 누적을 감소할 수 있는 방안이 필요하다. 그러나, 스프링 강성을 작게 하고 단위 구동기의 수를 늘릴 경우, 직렬 연결 구동기의 하중에 의한 처짐(Fig. 3의 z-방향)이 증가된다. 또, 단위 구동기의 구동 오차들의 직렬 누적을 피할 수 없어 전체 구동변위의 정도를 향상시키기 어렵다.

본 논문에서는 스프링 강성을 줄이고 단위 구동기의 수를 늘리기 위해, 사각과 모양의 설펜타인(serpentine) 스프링을 사용하면서 디지털 구동기의 전극과 스프링이 고정단을 중심으로 균형이 잡히도록 Fig. 4와 같이 설계하였다. 즉, 전극과 스프링 구조의 무게 중심이 중앙의 앵커를 기준으로 서로 반대방향에 있게 하여, 자체 무게에 의한 굽힘 모멘트가 서로 상쇄되고 구조물의 처짐을 최소화하였다. 그 결과 무게 균형을 고려하지 않은 10 단 직렬연결 구동기의 경우 $10.6\mu\text{m}$ 였던 중력에 의한 처짐을 $0.16\mu\text{m}$ 까지 감소시켰다. 또한, 대변위에서의 고정도 구동을 위해서, 본 논문에서는 단위 아날로그 구동기 대신 단위 디지털 구동기의 직렬 연결을 제안하여 단위 디지털 구동변위들을 누적하되, 출력단의 구동 정도는 최종적으로 더해지는 단위 디지털 구동변위의 정도에 의해서만 결정되게 하여 각 단위 디지털 구동변위의 오차가 누적되지 않도록 하였다.

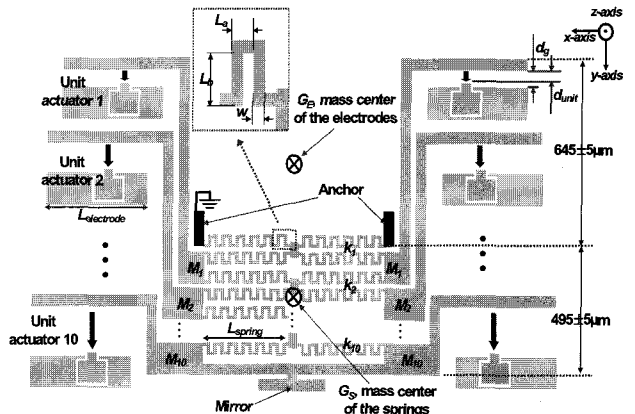


Fig. 4 Schematic view of the serial digital actuators illustrating weight-balanced structures and low-stiffness serpentine springs

Table 1 Measured dimension of the unit digital actuators*

Parallel electrode	Gap (d_g)	4.55±0.85 μm
	Unit displacement (d_{unit})	3.05±0.60 μm
	Length ($L_{electrode}$)	795±5 μm
Serpentine spring	Stiffness (k_s)	0.46 N/m
	Meander dimensions ($L_a \times L_b$)	6±0.5 $\mu\text{m} \times$ 14±0.5 μm
	Length in x-direction (L_{spring})	540±5 μm
	Spring width (w)	2±0.5 μm
	Number of meanders	90 ea

* Notations and other dimensions are shown in Fig.3 for the serial digital actuators having an identical thickness of 80 μm .

Figure 4 와 Table 1 은 10 개의 단위 디지털 구동기로 구성된 직렬연결 디지털 구동기의 구조와 치수를 보여준다. 각 디지털 구동기의 단위 구동은 직렬로 연결되어 최종 변위를 출력한다. 이때, 출력변위의 정밀도는 단지 최종단에 있는 디지털 구동기의 정밀도에만 의존한다. 출력변위 Δ_o 에 관한 수식은 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta_o = \sum_{i=1}^{N-1} \Delta_i + \Delta_N \quad (1)$$

여기서 N 은 디지털 구동기의 수, Δ_i 는 i 번째 디지털 단위 구동기의 변위, Δ_N 은 N 번째 디지털 단위 구동기의 변위를 의미한다. 각 단위 디지털 구동기는 셀렌타인 스프링으로 지지된 전극이 기계적 스톱퍼(stopper)에 의해 3 μm 의 단위구동 변위를 발생시키고 이를 다음 단 단위 디지털 구동기의 전극에 전달하여, 각 단위구동이 순차적으로 누적되어 출력되게 된다. 단위 디지털 구동기는 정전력 평행판 구동기의 pull-in 효과⁽⁷⁾에 의해 구동되며, pull-in 위치 $d_g/3$ (Fig. 4)에서 구동기의 정전력 F_e 는 다음과 같이 표현된다.

$$F_e = \frac{9 \epsilon_0 L_{electrode} t V^2}{8 d_g^2} \quad (2)$$

여기서 ϵ_0 은 공기의 유전율, t 는 구조물의 두께, V 는 구동전압, d_g 는 평행판 전극의 간극, $L_{electrode}$ 는 이동 전극의 길이를 의미한다. Pull-in 위치보다 큰 영역(> $d_g/3$)에서 정전력 F_e 는 스프링에 의한 복원력 F_s 보다 커지게 되며 이 관계를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

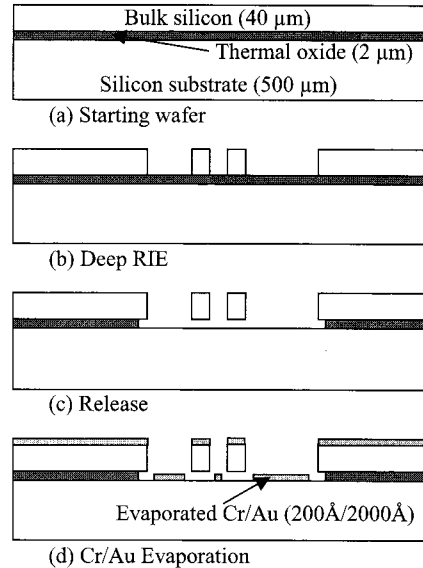


Fig. 5 Single mask fabrication process of the serial digital actuators

$$F_e > F_s = k_y \times \frac{d_g}{3} \quad (3)$$

여기서 k_y 는 y 방향의 강성을 의미한다. 결국, 단위 디지털 구동기는 5V 이하의 전압에서 식 (3)을 만족하는 셀렌타인 스프링(y -방향의 강성 0.46N/m)을 갖도록 설계되었다.

3. 제작 공정

Figure 5 는 단일 마스크에 의하여 제작되는 본 연구의 직렬연결 디지털 구동기의 공정 순서를 나타낸다. SOI(Silicon On Insulator) 웨이퍼(Fig. 5a)의 윗면을 PR(AZ1512)로 패터닝을 하고, 상부 실리콘층(40 μm)을 DRIE 공정으로 식각(Fig. 5b)하여 시제품들의 구조를 형성한다. BOE (Buffered Oxide Etchant) 용액으로 내부의 산화막층을 제거(Fig. 5c)하고, 소자의 표면에 200Å/2000Å 두께로 Cr/Au 층을 증착하여 전기적 접촉을 위한 패드를 형성한다. Figure 6 은 소자의 전체 구조와 확대된 셀렌타인 스프링 부분에 대한 SEM (Scanning Electron Microscope) 사진을 보여준다.

4. 측정결과

제작된 소자(Fig. 6)를 Fig. 7의 실험방식으로 10회씩 측정하여, 단위구동과 직렬누적구동의 전압, 범위, 정도를 측정하였다.

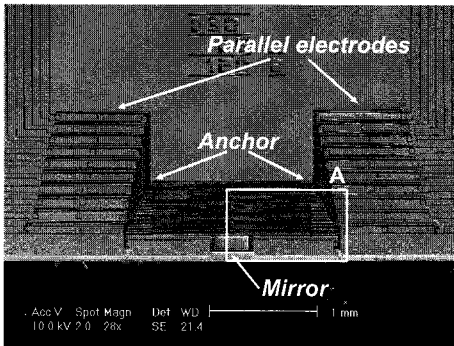
Table 2 The estimated and measured performance of the unit digital actuators

	Estimated values	Measured values
Minimum operating voltage	5.0 V	4.25±0.08 V
Unit displacement	3.05±0.60 μm*	2.8±0.5 μm
Precision	~40 nm**	36.0±17.7 nm***

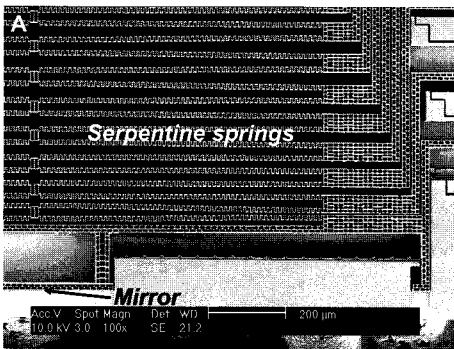
* The estimated unit displacement is obtained from the measured dimensions(Table 1) and Eq.(1).

** The estimated precision is calculated by the side wall roughness of the stoppers in the order of ±30nm⁽⁸⁾.

*** The measured precision indicates the doubled standard deviation (2σ) of the output displacements measured from 10 repeated actuations.



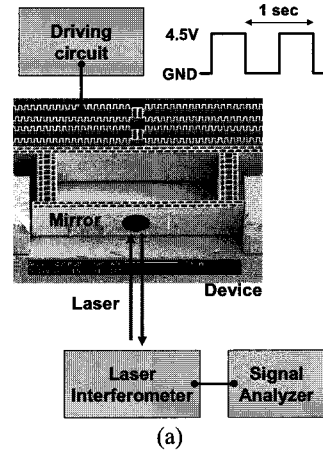
(a)



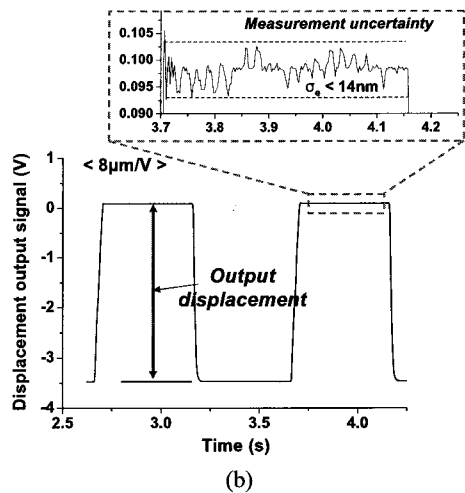
(b)

Fig. 6 SEM photographs of the fabricated devices: (a) an overall structure; (b) the serpentine springs, shown in section A of Fig.6(a)

구동전압은 제작된 소자가 정상적으로 구동하는 최소의 전압을 측정된 것이고, 구동변위(Fig. 8)는 구동기에 부착된 거울(Fig. 7)의 이동을 레이저 간섭계로 측정하여 얻어졌으며, 구동정도(Fig. 9)는 10회 반복 측정된 구동변위의 표준 편차를 2배 (2σ)한 값이다. 단위 구동기의 예측 및 측정 성능을 Table 2에, 직렬연결 디지털 구동기의 예측 및 측정 성능을 Table 3에 요약 정리하여, 각 구동의 전압, 범위, 정도를 비교하였다. 여기서 변위 추정값은 소자의 치수(Table 1)을 이용한 정전력 및 변위에 관한 이론적 예측치를 구한 것이고, 정밀도 추정값은 제조공정으로 인한 디지털 구동부의 측면 거칠기 ±30nm⁽⁸⁾의 평균제곱근 값으로부터 구하였다.



(a)



(b)

Fig. 7 Output displacement measurement: (a) experimental apparatus; (b) displacement output signal

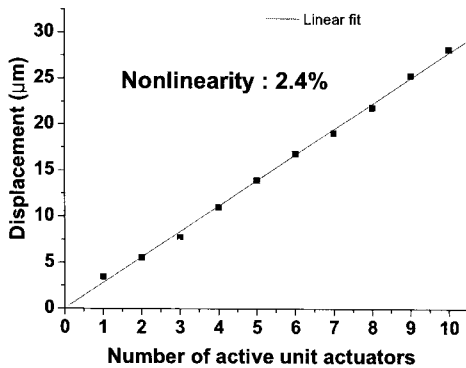
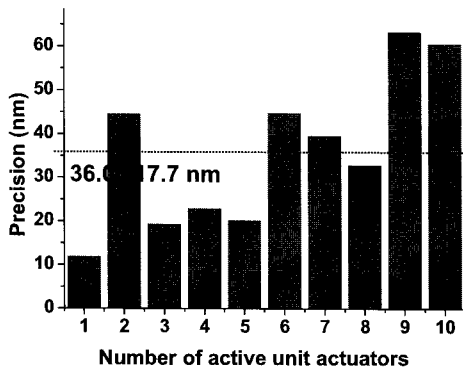
Table 3 The estimated and measured performance of the serial digital actuators

	Estimated values	Measured values
Minimum operating voltage	5.0 V	4.47±0.07 V
Displacement range	30.5±0.5 μm^*	28.44±0.02 μm
Precision	~40 nm ^{**}	37.94±6.26 nm ^{***}
Displacement range / (drive voltage) ²	1.202 $\mu\text{m}/\text{V}^2$	1.423 $\mu\text{m}/\text{V}^2$
Displacement range / precision	762.5	749.6

*The estimated unit displacement is obtained from the measured dimensions(Table 1) and Eq.(1).

**The estimated precision is calculated by the side wall roughness of the stoppers in the order of $\pm 30\text{nm}^{(8)}$.

***The measured precision indicates the doubled standard deviation (2σ) of the output displacements measured from 10 repeated actuations.

**Fig. 8** Output displacement depending on the number of active unit actuators**Fig. 9** Precision depending on the number of active unit actuators

측정된 단위 구동기 및 직렬누적 구동기의 구동전압은 각각 $4.25\pm 0.08\text{V}$ 및 $4.47\pm 0.07\text{V}$ 으로 정보통신 분야⁽¹⁾에서 요구되는 조건인 5V 이하를 만족시켰다. 또한, 직렬연결 디지털 구동기는 구동범위에 있어서 $2.8\pm 0.5\mu\text{m}$ 의 단위 구동 변위를 누적하여 $28.44\pm 0.02\mu\text{m}$ 의 전체 구동 범위를 출력하면 서도, 구동정도에 있어서는 단위 구동기의 구동정도(Table 2 의 $36.0\pm 17.7\text{nm}$)가 누적되지 않고 $37.94\pm 6.26\text{nm}$ 의 구동정도를 나타냄을 입증하였다.

따라서, 본 논문은 직렬연결 디지털 구동기의 저전압, 대변위, 고정도 구동을 실험적으로 증명하고 $1.423\mu\text{m}/\text{V}^2$ 의 구동범위 대 전압제공의 비와 749.6 의 구동범위 대 정도의 비를 얻어내었다. Figure 1 의 최근 10 년 간의 기존 연구 중 최고 성능을 가지는 두 소자^(2,3)와 비교해 볼 때, 본 논문이 제안하는 근육모사 직렬연결 디지털 구동기는 구동범위 대 전압제공의 비와 구동범위 대 정도의 비에 있어서 각각 19.4 배와 1.5 배 향상된 성능을 보였다.

5. 결론

본 논문에서는 디지털 단위구동의 직렬연결을 통한 근육의 고정도, 대변위 구동을 모사하여, 10 개의 단위 디지털 구동기의 직렬연결을 통해 저전압, 대변위, 고정도 디지털 직렬연결 구동기를 개발하였다. MEMS 정전구동기의 경우 요구되는 구동범위 대 전압비 및 구동범위 대 정도비 향상을 위해, 본 논문에서는 10 개의 디지털 단위구동 변위를 직렬 연결하여 각 단위구동 변위의 오차가 누적되지 않는 직렬연결 디지털 구동기를 제안하였고, 직렬연결 구동기의 자체 처짐 문제를 해결하기 위하여 각 단위구동기와 스프링의 무게중심이 고정단의 양쪽에 위치하도록 설계하였다. 본 논문의 직렬연결 구조로 5V-구동전압에서 $30\mu\text{m}$ -범위와 40nm-정도를 가지는 변위를 출력하여, $1.423\mu\text{m}/\text{V}^2$ 및 749.6 인 구동범위 대 전압제공의 비 및 구동범위 대 정도의 비를 달성하였다. 이 성능은 Fig. 1 의 최근 10 년간의 연구 중 최고 성능을 달성한 두 개의 소자^(2,3)와 비교해 볼 때, 각각 19.4 배와 1.5 배 향상된 것으로, 본 논문의 근육모사 직렬연결 디지털 구동기가 저전압, 대변위, 고정도 구동을 출력함이 실험적으로 입증되었다.

후 기

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 창의적연구

진흥사업(디지털나노구동연구단)인 "생체모사기법을 응용한 디지털나노구동기관의 구현에 관한 연구" 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Noell, W., Clerc, P.-A. and Rooij, N., 2002, "Applications of SOI-based Optical MEMS," *IEEE Journal on selected topics in quantum electronics*, Vol. 8, No. 1, pp. 148~154.
- (2) Yeh, R. and Pister, K.S., 2001, "Single Mask, Large Force, and Large Displacement Electrostatic Linear Inchworm Motors," *IEEE MEMS 2001*, Interlaken, Switzerland, pp. 260~264.
- (3) Grade, J.D., Jerman, H. and Kenny, T.W., 2003, "Design of Large Deflection Electrostatic Actuators," *Journal of microelectromechanical systems*, Vol. 12, No. 3, pp. 335~343.
- (4) Sercalo Microtechnology, Ltd., "Miniature MEMS Variable Optical Attenuator," <http://sercalo.com>
- (5) Isamoto, K., Kato, K. and Toshiyoshi, H., 2004, "A 5-V Operated MEMS Variable Optical Attenuator by SOI Bulk Micromachining," *IEEE Journal on selected topics in quantum electronics*, Vol. 10, No. 3, pp. 570~578.
- (6) Frank, T. and Schilling, C., 1998, "The Development of Cascadable Microdrives with Muscle-like Operating Behavior," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 8, No. 3, pp. 222~229.
- (7) Rebeiz, G.M. 2003, *RF MEMS Theory, Design, and Technology*, Wiley, New Jersey, pp. 36~38.
- (8) Zhou, R., Zhang, H., Hao, Y. and Wang, Y., 2004, "Simulation of the Bosh Process with a String-cell Hybrid Method," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 14, pp. 851~858.