

초점 조절이 가능한 디지털 유체 렌즈

이 동 우* · 조 영 호*†

* KAIST 바이오 및 뇌공학과

Digital Variable Focal Liquid Lens

Dong Woo Lee* and Young-Ho Cho*†

* Dept. of Bio and Brain Engineering, KAIST

(Received October 26, 2009 ; Revised January 25, 2010 ; Accepted February 24, 2010)

Key Words : Digital Liquid Lens(디지털 유체 렌즈), Variable Focal Length(가변초점)

초록: 본 논문에서는 4 비트 디지털구동기를 가변초점 유체렌즈에 적용하였다. 4 비트 디지털구동기는 총 16 단 계로 렌즈곡면을 조절하여 렌즈의 초점을 변화시킨다. 본 가변초점 유체렌즈는 별도의 정밀 압력 및 유체량 제 어기 없이 디지털구동기의 On/Off 제어만으로 렌즈곡면을 ±200nm 의 정밀도로 제어하여 초점거리를 3.63mm 에서 38.6mm 까지 조절할 수 있다.

Abstract: We have designed a digital variable-focal-length liquid lens by using 4-bit actuators. Each bit actuator consists of 1, 2, 4, and 8 unit actuators, squeezes discrete fluidic volume of 2^4 different levels into the lens. The 4-bit digital actuation mode ($b_4b_3b_2b_1$) affords 2^4 different lens curvatures and focal lengths. The on/off control of the bit actuators helps in solving the main problem associated with analog liquid lenses, i.e., precise control of the pressure or volume of the fluid for changing the lens curvature and focal length. Experimentally, it has been found that the 4-bit actuators allow 0.074 nl (± 0.02 nl) of the given fluid per bit to enter the lens and help in increasing the focal length from 3.63 mm to 38.6 mm in 2^4 different levels; no high-cost controllers are required for precise control of the pressure or volume in this case. Therefore, the present digital liquid lens is more suitable to integrated optical systems by reducing additional component for pressure and volume control.

- 기호설명 -

- V_L : 렌즈에 공급되는 유체량
- V_u : 단위구동기의 토출 유체량
- $b_1 \sim b_4$: 비트구동기
- d : 렌즈 중앙부의 최대 변위
- r_o : 렌즈 반지름
- R : 렌즈 곡률반경
- n : 굴절률
- f : 렌즈 초점거리

1. 서 론

고정렌즈의 곡면을 변화시켜 초점거리를 조절하 는 기술은 카메라 및 휴대폰과 같은 광학시스템에 중요한 기술이다. 유체렌즈는 렌즈 곡면을 변화시 키는 방식에 따라 Electrowetting 방식^(1,2)과 기계적

방식⁽³⁻⁶⁾으로 나뉜다. Electrowetting 방식은 렌즈 역 활을 하는 물방울에 전압을 인가하여 렌즈 곡면을 변화시키는 방식이다. 이 방식은 소형화가 용이하 나 높은 전압이 요구되고 기계적 진동에 취약한 단점을 가진다. 기계적 방식은 렌즈로 투명박막을 사용하고 이 박막에 유체를 주입하여 렌즈 곡면을 변화시키는 방식이다. 이 방식은 기계적 박막을 렌즈로 사용하므로 기계적 진동에 강하고 지름이 큰 렌즈의 제작이 용이하다. 하지만 기존 기계적 유체렌즈는 렌즈에 공급되는 압력 또는 유체량을 연속적으로 제어하는 아날로그 구동기를 사용하여 렌즈 곡면을 변화시켜 초점을 조절하기 때문에 고 가의 정밀 구동기가 필수적이다.

본 논문에서는 유체량을 이산적으로 공급하는 디지털 구동기를 유체렌즈에 적용하여, 정밀한 구 동기 없이 렌즈곡면을 정밀하게 변화시켜 초점거 리를 조절하는 디지털 가변초점 유체렌즈를 제안 한다.

† Corresponding Author, nanosys@kaist.ac.kr

2. 본 론

2.1 작동원리

유체렌즈는 렌즈에 유체를 공급하여 렌즈 부피를 변화시켜 렌즈의 곡률반경을 바꾸고, 이를 통해 초점거리를 조절한다. Fig. 1 은 4 비트 디지털 가변초점 유체렌즈의 개략도이다. 지름이 500 μm 인 렌즈에 서로 다른 토출량을 가지는 비트구동기가 연결되어 있으며, 각 비트구동기의 토출량비는 1:2:4:8 로 이진조합을 가진다. 서로 다른 유체량을 토출하는 비트구동기(b_i)는 토출 유체량비가 공정 오차에 강인⁽³⁾하도록 각각 1 개, 2 개, 4 개, 8 개의 동일한 크기의 단위구동기를 직렬로 연결하여 구성하였다. 단위구동기는 한면이 150 μm 크기의 정사각 박막을 가지며 박막이 휘어질 때 일정 유체량을 토출한다. Fig. 2 에서 Pressure Inlet 를 통해서 공급된 압력은 각 비트구동기의 박막에 전달되어 박막을 아래로 휘게 든다. 이 휘어진 박막은 특정량의 유체를 렌즈에 공급하게 된다. 4 개의 비트구동기($b_1 \sim b_4$)의 상태에 따라서 렌즈에 공급되는 유체량(V_L)을 다음 식과 같다.

$$V_L = V_u \cdot (b_1 + 2b_2 + 4b_3 + 8b_4) \quad (1)$$

V_L 은 렌즈에 공급되는 유체량, V_u 는 단위구동기가 토출하는 유체량, $b_1 \sim b_4$ 은 비트구동기의 On/Off 여부(On 이면 1, Off 면 0)를 나타낸다. 각 비트구동기의 On/Off 에 따라서 4 개의 비트구동기를 사용하는 4 비트 디지털 구동기는 0 에서 15 V_u 까지 총 16(2^4) 단계로 렌즈에 공급되는 유체량(V_L)을 조절할 수 있다. 일반적으로 N 개의 비트구동기를 사용하면 렌즈에 공급되는 유체량을 2^N 단계로 조절할 수 있어 보다 정밀한 조절이 가능하다.

렌즈에 유체가 공급되어 부피가 변하면 렌즈의 곡률반경은 아래의 식과 같이 변하게 된다.

$$V_L = \frac{\pi}{3} d^3 (3R - d), \quad d = R - \sqrt{R^2 - r_o^2} \quad (2)$$

d 는 렌즈 중앙부의 최대 변위, R 은 렌즈 곡률반경, r_o 는 렌즈 지름이다.

변화된 렌즈 곡률반경은 렌즈의 초점거리를 바꾸게 된다. 렌즈 곡률반경과 초점거리의 관계식은 아래와 같다.

$$f = \frac{R}{n - 1} \quad (3)$$

f 는 초점거리, n 은 렌즈 내 유체의 굴절률을 나타

낸다.

결국, 각 비트구동기의 On/Off 제어로 유입된 유체량(V_L)은 렌즈 곡률반경을 바꾸고, 이를 통해 렌즈의 초점거리가 조절된다.

Fig. 2 는 4 비트 가변초점 유체렌즈의 구동원리를 나타낸다. b_1 비트 구동기만 켜지는 (0001) 구동 모드에서는 1 개 단위구동기의 토출 유체량인 V_u 이 렌즈에 공급된다. 이때, 적은 유체공급량 때문에 렌즈곡면 변형이 적어 곡률반경이 크게 되고, 초점거리가 길게 나타난다.

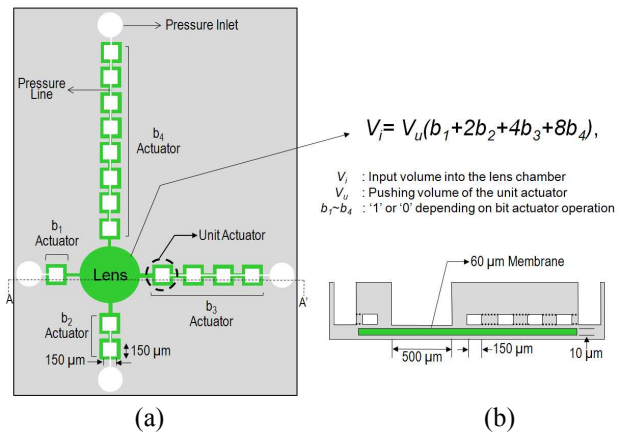


Fig. 1 Schematic view of 4-bit digital liquid lens: (a) top view; (b) cross-sectional view along AA' line of (a)

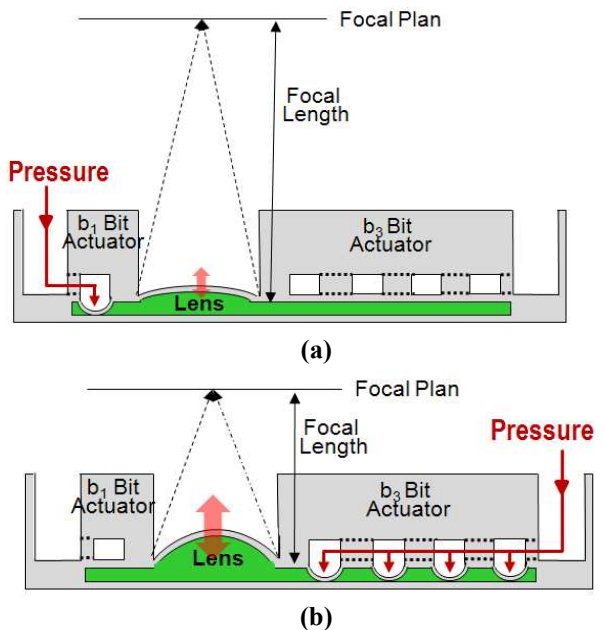


Fig. 2 Focal length change of 4-bit digital liquid lens of Fig. 1(b) depending on the digital actuation mode of (b4b3b2b1); (a) (0001) digital actuation mode (b) (0100) digital actuation mode

b_1 비트 구동기만 켜지는 (0001) 구동모드에서는 1 개 단위구동기의 토출 유체량인 V_u 이 렌즈에 공급된다. 이때, 적은 유체공급량 때문에 렌즈곡면 변형이 적어 곡률반경이 크게 되고, 초점거리가 길게 나타난다. (0100) 구동모드에서는 b_3 비트 구동기가 4 개의 단위구동기의 토출 유체량인 $4V_u$ 을 렌즈에 공급하여 렌즈곡면이 (0001) 구동모드 일 때 보다 크게 변형한다. 이 때문에 렌즈 곡률반경이 짧아져 초점거리는 짧아지게 된다. 결국 구동모드를 (0000)에서 (1111)까지 총 16 단계로 조절하게 되면 렌즈에 공급되는 유체량의 차이로 인해서 렌즈곡면을 다르게 변형시켜 초점거리를 조절할 수 있게 된다.

2.2 설계 및 제작

4 개의 비트구동기들은 단위구동기를 각각 1, 2, 4, 8 개를 직렬로 연결되어 비트구동기가 토출하는 유체량비가 공정 오차에 강인하도록 설계되었다. 정해진 유체량을 토출하는 단위구동기는 폭 $150\mu\text{m}$, 너비 $150\mu\text{m}$, 두께 $60\mu\text{m}$ 의 박막으로 구성되었으며, 상판 유로에 200kPa 의 압력이 가해지면 박막이 $10\mu\text{m}$ 단차를 가지는 하판 유로로 휘어지면서 0.075nl 의 유체량을 유체렌즈에 공급하도록 설계되었다. 4 비트 가변초점 유체렌즈는 유로가 형성된 상하판 PDMS 층을 두께 $60\mu\text{m}$ 인 PDMS 박막과 함께 접합하여 Fig. 3 과 같이 제작하였다. Fig. 4 는 제작된 소자를 나타낸다

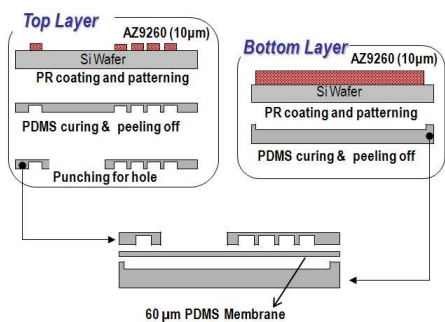


Fig. 3 Fabrication process of 4-bit digital liquid lens along AA' line of Fig. 1

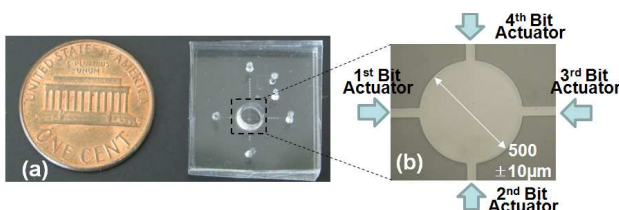


Fig. 4 Fabricated device; (a) the prototype of 4-bit digital liquid lens; (b) the enlarged view of lens

2.3 실험 및 결과

렌즈의 성능 평가는 렌즈 중앙부의 최대 변위 [Fig. 5(a)]의 측정과, 초점거리[Fig. 5(b)]의 측정으로

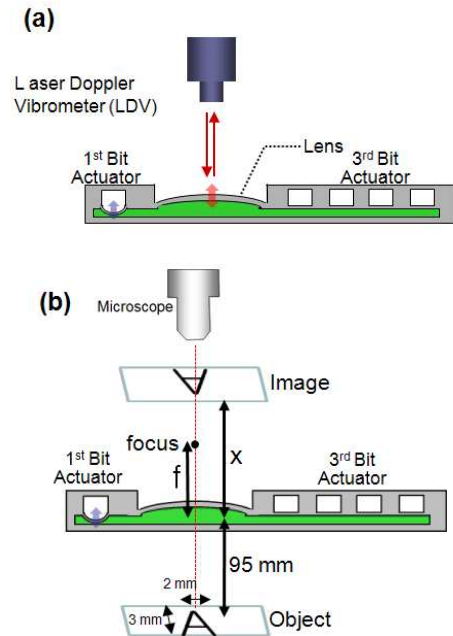


Fig. 5 Experimental setup; (a) for measuring maximum deflection; (b) for measuring focal length

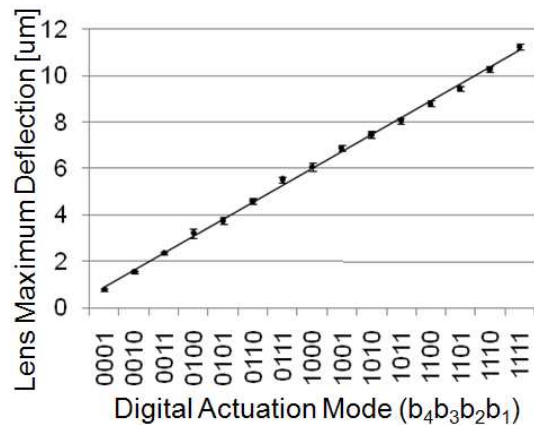


Fig. 6 The measured maximum deflection of the lens depending on 4-bit digital actuation mode of ($b_4b_3b_2b_1$)

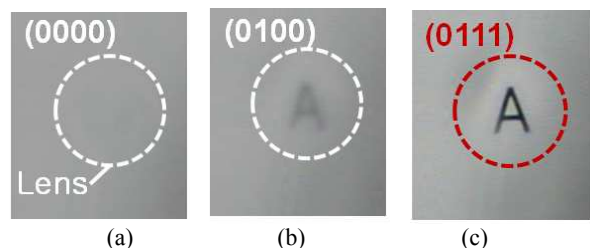


Fig. 8 The character, A, depending on 4-bit digital mode of ($b_4b_3b_2b_1$) at the plane located at 12mm [x is 12mm at Fig.5(b)] above the lens

나누어 진다. 이때, 렌즈를 채우는 유체로 굴절률이 1.33 인 물을 사용하였다. 렌즈 중앙부의 최대 변위 측정은 디지털 구동기의 토출 유체량 분석에 목적이 있다. 측정된 렌즈 중앙부의 최대 변위를 식 (2)에 대입하여 렌즈의 부피를 계산하고, 이를 통해 각 디지털 구동모드에 따라 토출 유체량을 간접적으로 측정하였다. 렌즈 중앙부의 최대 변위는 Laser Doppler Vibrometer(LDV)로 각 구동모드로 렌즈를 1Hz 로 구동하면서 변위를 측정하였다.

Fig. 6 은 구동모드($b_4b_3b_2b_1$)에 따른 최대 변위 측정치를 나타낸다. 단위 구동모드에 따른 렌즈 중앙의 최대변위는 $0.75\mu\text{m} \pm 0.2\mu\text{m}$ 로, 본 소자는 $11.6\ \mu\text{m}$ 의 구동범위에서 최대 $\pm 200\text{nm}$ 의 정밀도를 가지고 구동할 수 있는 것으로 측정되었다. 즉 본 연구에서 제안한 4 비트 디지털 구동기는 식 (2)에 의해 초소 토출 유체량은 $0.074\text{nL} \pm 0.02\text{nL}$ 이고, 1.11nL 까지 유체를 렌즈에 공급할 수 있다. 초점거리의 측정을 위해서 렌즈로부터 95mm 떨어진 'A' 모양의 피사체(Subject)가 렌즈를 통해 만드는 상의 거리[x in Fig. 5(b)]를 측정하여 아래의 식으로 초점거리를 구하였다.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{x} + \frac{1}{y} \quad (4)$$

f 는 초점거리, x 는 렌즈로부터 상의 거리, y 는 렌즈로부터 피사체의 거리이다. y 는 95mm 로 고정시키고, x 를 구하여 초점거리를 계산한 결과는 Fig. 7 과 같다. Fig. 7 에서 초점거리의 이론값은 Fig. 6 의 렌즈 중앙의 최대변위로부터 식 1, 2, 3 을 사용하여 구한 값이다.

본 소자의 초점거리는 3.63mm 에서 38.6mm 까지 총 16 단계로 Fig. 7 과 같이 조절 가능한 것으로 나타났다. Fig. 8 은 렌즈로부터 12mm 위에 있는 평면에 맺히는 상의 이미지를 (0000) 구동모드, (0100) 구동모드, (0111) 구동모드에서 보여준다. 피사체 'A'는 (0111)에서 초점이 맞아 가장 선명하게 보여진다.

3. 결 론

본 논문에서는 4 종의 비트구동기를 사용하는 4 비트 디지털 구동기를 유체렌즈에 적용하였다. 본 가변초점 렌즈는 별도의 정밀 압력 및 유체량 제어 없이 비트구동의 On/Off 제어만으로 렌즈곡면을 $\pm 200\text{nm}$ 의 정밀도로 제어하여 초점거리를 조절할 수 있어, 집적화된 광학시스템에 적용이 용이하다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 창의적연구진흥사업의 일환인 "생체모사기법을 응용한 디지털나노구동기관의 구현에 관한 연구" 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Krupenkin, T., Yang, S. and Mach, P., 2003, "Tunable Liquid Microlens," *Applied Physics Letters*, 82, 316~318.
- (2) Kuiper, S. and Hendriks, B. H. W., 2004, "Variable-Focus Liquid Lens for Miniature Cameras," *Applied Physics Letters*, 85, 1128~1130.
- (3) Moran, P. M., Dharmatilleke, S., Khaw, A. H., Tan, K. W., Chan, M. L. and Rodriguez, I., 2006, "Fluidic Lenses with Variable Focal Length," *Applied Physics Letters*, 88, 041120.
- (4) Chronis, N., Liu, G. L., Jeong, K.-H. and Lee, L. P., 2003, "Tunable Liquid-Filled Microlens Array Integrated with Microfluidic Network," *Optics Express*, Vol.11, No.19, 2370~2378.
- (5) Kuwano, R., Tokunaga, T., Otani, Y. and Umeda, N., 2005, "Liquid Pressure Varifocus Lens," *Optical Review*, Vol.12, No.5, 405~408.
- (6) Ren, H. and Wu, S. -T., 2005, "Variable-Focus Liquid Lens by Changing Aperture," *Applied Physics Letters*, 86, 211107.