

# 인치웜 구동방법에 의한 초정밀 회전모터

김상채\*, 김수현\*\*

## An Ultraprecision Rotary Motor based on Inchworm-type Actuation

Sang-Chae Kim\*, and Soo Hyun Kim\*\*

### ABSTRACT

An ultraprecision rotary motor is developed using inchworm motion of two belts actuated by elongation of piezoelectric elements. A symmetric lever mechanism with flexure hinges is designed to connect belts with piezoelectric elements. The lever mechanism is used not only to amplify the elongation of piezoelectric element but also to minimize the numbers of components and the effort for assembly. By experiment, the rotational angle by one cycle is varied from  $0.2 \times 10^{-4}$  rad to  $9.76 \times 10^{-4}$  rad depending on input signal amplitude. Further, the motor has the capability of getting more precise rotational resolution by enlarging the radius of the rotor.

**Key Words:** Inchworm-type Actuation (자벌레 구동), Ultraprecision Rotary motor (초정밀 회전모터), Piezoelectric Element (압전소자), Lever Mechanism with Flexure hinges(탄성힌지 레버메커니즘)

### 1. 서론

고정밀도의 위치결정기구인 반도체 노광장치나 주사전자현미경 등은 서브나노미터의 위치분해능과 광역의 구동범위를 필요로 한다. 이러한 요구사항을 만족시키기 위해 압전소자를 이용한 다양한 구동방법이 제안되었다. 기존의 전기, 유압식 등의 액츄에이터와는 달리 압전소자는 소형화, 고정밀도의 구동 분해능을 구현할 수 있는 특징을 가지고 있다. 압전소자를 이용한 다양한 형태와 구동방식의 모터 개발은 고정밀 장치 및 시스템의 성능 발전에 많은 도움을 주고 있다.

압전소자를 이용한 자벌레 구동방법의 회전모터는  $10^{-4}$  rad 이하의 고분해능의 스텝 회전운동과 이를 누적함으로써 광역의 이동이 가능한 장점으로 주요 연구대상이 되고 있다. 기존에 개발된 자벌레 구동방법의 회전모터는 회전운동 생성 방

식과 형태에 따라 세분화된다. 압전소자의 신장과 복귀를 이용하여 자벌레 방식의 "Piezoelectric-driven turntable"이 Tojo 에 의해 개발되었다<sup>[1]</sup>. 이 장치의 회전구동은 디스크에 내재된 두개의 압전소자에 의한 회전구동과 베이스에 연결된 두개의 압전소자의 순차적인 클램핑 과정에 의해 이루어진다. 그러나, 이 장치의 구조특성상  $\pi/2$  의 제한된 회전영역을 가지는 특징을 가지고 있다. Tojo 와 비슷한 형태로 Shimizu<sup>[2]</sup>와 Duong<sup>[3]</sup>은 원통형 로터 내부에서 두개의 클램퍼와 한 개의 스윙거 (swinger)가 3 단으로 구성된 자벌레 회전모터를 제시하였다.

다양한 변위형태가 가능한 압전소자가 개발되면서 회전모터의 구조가 다양화되기 시작하였다. 1990 년도에 Ohnishi<sup>[4]</sup>는 6 개의 종방향 변위 압전소자와 1 개의 비틀림변위 압전소자를 병합한 자벌레형 압전모터를 개발하였다. 클램핑은 종변위

\* 삼성전자(주) 중앙연구소 광메카 Lab

\*\* 한국과학기술원 기계공학과

용 압전소자가 담당하고, 회전구동에는 비틀림 압전소자를 이용하였다. W. Xu<sup>[5]</sup>는 롤러클러치와 압전소자를 병합하여 단일방향의 회전을 생성시켰다. A. Satake<sup>[6]</sup>는 스프링 복원력을 이용한 자벌레형 회전모터를 제시하였다. 이상의 모터에서는 요소 부품을 조립할 때 고정자(stator)와 로터(rotor) 사이의 수  $\mu\text{m}$  의 간극조절<sup>[1-3,6]</sup>의 어려움과 회전이 가능한 범위의 제한<sup>[1,5]</sup>이 존재하고 있다.

본 논문에서는 두개 벨트의 자벌레 구동에 의한 회전모터를 제시하고자 한다. 자벌레 회전모터는 로터의 반경을 크게 할수록 단위 사이클당 회전각이 매우 미소해진다. 그러나, 본 논문에서는 구동특성을 살펴보기 위해 전회전 영역에서  $10^{-4}$  rad 이하의 고정밀도 회전 스텝운동을 발생시킬 수 있도록 설계한다. 또한, 조립상의 문제를 최소화하기 위해 회전모터에 적합한 탄성헌지를 포함한 레버메커니즘을 설계하여 압전소자와 벨트를 연결하고, 이에 대한 유한요소해석(FEM)을 병행한다. 그리고, 제작된 자벌레 회전모터의 회전 운동 특성을 살펴보기 위한 실험을 수행한다.

## 2. 초정밀 회전모터의 구동원리 및 구조

### 2.1 구동원리

벨트의 자벌레 구동에 의한 새로운 형태의 회전모터의 개념도와 구동원리는 Fig. 1 과 같이 표현된다. 네개의 압전소자는 두 벨트의 자벌레 운동을 위해 순차적인 변위를 발생시킨다. 압전소자 A 와 B 는 벨트 a 로, 압전소자 C 와 D 는 벨트 b 로 연결되어진다. 각 압전소자의 한쪽단은 베이스 프레임에 고정되고, 두개의 벨트는 로터를 감싸고 있다.

벨트구동 메커니즘은 압전소자 A-벨트 a-압전소자 B 와 압전소자 C-벨트 b-압전소자 D 로 연결하여 각각 구성된다. 단위사이클의 회전구동은 여섯 개의 과정으로 구성된다. 초기상태에서 압전소자 A 와 B 를 동일한 길이  $d$  만큼 변위를 발생시켜 벨트 a 로 로터를 클램핑한다. 그리고 나서 압전소자 A 와 B 를 동시에 각각 신장, 복귀시키는 (1)의 과정을 수행한다. 이때 로터는 벨트 a 에 의해 반시계 방향으로 회전하게 된다. 이때 로터의 회전량은 식(1)과 같이 표현할 수 있다. 여기서,  $R$  은 회전자의 반경을 의미한다.

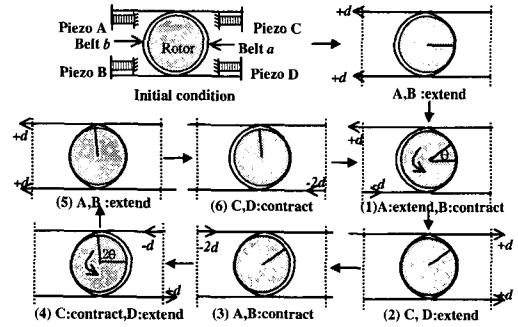


Fig. 1 Driving principle of an inchworm-type rotary motor

$$\theta = d / R \quad (1)$$

구동 과정 (1)이 완료된 후 압전소자 C 와 D 는 로터를 클램핑하기 위해 동일한 변위만큼 신장한다(2). 이 과정은 압전소자 A 와 B 가 줄어들 때 (3) 발생할 수 있는 외란의 영향을 최소화하기 위해 필요하게 된다. 그런 후 로터는 압전소자 C 의 복귀와 D 의 신장에 의해 벨트 b 와 함께 (4)와 같이 회전하게 된다. 마지막으로 (5)와 (6)의 과정은 (2)와 (3)의 방식과 동일하게 된다. 결과적으로 로터는 단위 사이클을 구성하는 6 개 과정동안  $2\theta$ 에 해당하는 회전각을 이동하게 된다. 이러한 자벌레 구동을 축적하면 로터는 전 회전영역에서 임의의 각 위치에 놓여질 수 있게 된다.

Fig. 2 는 로터가 반시계 방향으로 회전할 경우 (Fig. 1)에 압전소자 각각의 구동전압 신호의 형태를 나타내고 있다. 여기에서  $V_m$  은 로터를 클램핑 및 회전시키는 구동 전압을 가리킨다. 벨트로 로터를 클램핑하거나 풀 때 사용되는 전압파형은 1 msec 의 ramp 신호를 인가하였다. Fig. 2 의 경우는 모터회전 한 주기에 클램핑 및 풀림에 총 4 msec, 모터회전에 총 40 msec 가 적용된 경우이다. 시계방향 회전을 위해서는 압전소자 A 와 B 의 입력전압을 교환하고, 압전소자 C 와 D 의 전압을 교환해주게 된다.

### 2.2 초정밀 회전모터의 구조

자벌레 구동방법의 구동원리를 적용하여 제작한 회전모터의 시작품 외형도는 Fig.3 과 같고, 크기는  $77 \times 96 \times 20$  mm 이다. 로터는 직경 30 mm 의 강

철로 제작되었고, 고정도 표면을 얻기 위해 그라인딩 (grinding) 작업이 수행되었다. 압전소자는 TOKIN 사의 5×5×18 mm 크기의 적층 형태이다.

벨트와 압전소자를 Fig.1 과 같이 직접 연결한 후 회전운동을 실험적으로 확인하였으나 조립할 때 로터와 벨트사이의 간극 조절에 상당한 어려움이 존재하였다. 이를 개선하기 위해 Fig.3 과 같이 탄성힌지를 포함한<sup>[7]</sup> 레버메커니즘<sup>[8]</sup>을 설계하여 압전소자의 미소한 변위를 증폭시켰다. 레버메커니즘은 와이어방전가공 (WEDM)으로 일체형 구조로 제작되었다. 레버메커니즘의 첫번째 레버에 의해 압전소자의 변위 방향이 바뀌고, 두번째 레버에 의해 평면상의 이동으로 증폭된다. 레버운동에 방해되지 않도록 레버메커니즘과 베이스프레임 사이에 다수개의 기둥(pillar)을 설치하였다.

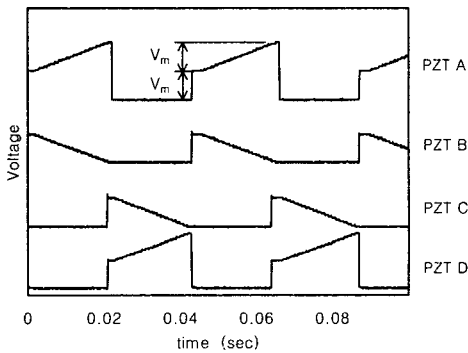


Fig. 2 Signals of four piezoelectric elements for inchworm motion of the two belts (driving frequency = 22.73Hz)

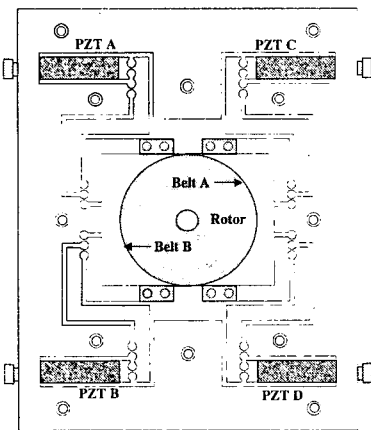


Fig. 3 Design of the inchworm rotary motor

### 3. 구동특성 실험 및 해석

#### 3.1 실험장치 구성

전체적인 실험장치의 구성을 Fig. 4 에 나타내었다. 구동신호는 12 비트의 D/A 변환기를 탑재한 486 PC 로 부터 생성되고, 전압증폭기를 통해 압전소자에 인가된다. 센서에서 출력되는 아날로그 신호를 처리하기 위해 디지털오실로스코프와 A/D 컨버터를 선택적으로 사용하였다.

자벌레 구동방법의 회전모터는 단위구동 회전각의 크기가 매우 미소하기 때문에 Fig. 5 와 같이 간접측정 방법을 사용하였다. 센서로는 광역의 범위 측정을 위해 분해능이 0.5 μm 인 에디커런트형 갭센서 (AEC-5505)와 미소 회전각 측정에 커패시턴스 갭센서 (ADE Microsense 3401, 2.5 μm/V)를 사용하였다. 갭센서로 로터에 탑재된 스틸 판과의 직선변위를 측정후 식(2)와 같이 계산하면 회전각을 구해낼 수 있게 된다.

$$\theta = \tan^{-1}(d/l) \quad (2)$$

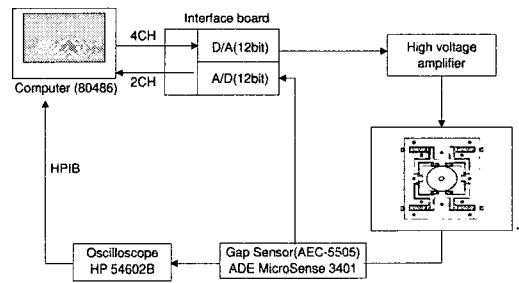


Fig. 4 Schematic diagram of experimental setup

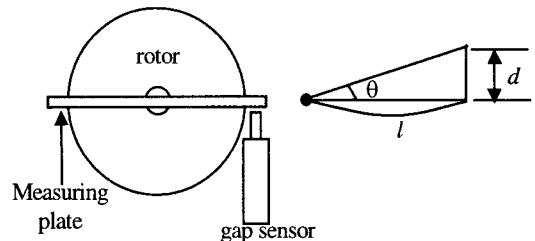


Fig. 5 Measuring method of rotational angle of the rotor

### 3.2 탄성힌지 레버메커니즘

탄성힌지 레버메커니즘은 일반적으로 압전소자의 변위에 의해 출력단이 직선운동을 발생시키도록 설계되어진다. 이러한 구조의 레버메커니즘을 본 자벌레 회전모터에 적용할 수 있으나 크기가 매우 커지는 단점이 있다. 이러한 이유로 본 회전모터의 대칭구조에 적합한 탄성힌지를 포함한 레버메커니즘을 새로이 설계하였다. 설계된 레버메커니즘은 압전소자의 직선 변위입력에 대해 출력단은 평면상에서 이동을 하게 된다. 유한요소해석에서 Fig. 6 과 같은 메쉬(mesh) 형태로 디자인하고, 해석을 수행하였다. 해석결과에 따르면, 압전소자에 100 V를 인가했을 때 발생되는 15.4  $\mu\text{m}$ 의 변위를 레버메커니즘에 가했을 때 출력단의 노드(node)에서 수평방향으로 -102  $\mu\text{m}$ , 수직 방향으로 -69  $\mu\text{m}$ 의 이동이 발생하였다. 실제로 제작된 레버메커니즘에서는 벨트를 연결하지 않은 상태에서 측정된 출력단의 이동 결과는 수평방향으로 -73.5  $\mu\text{m}$ , 수직방향 -51  $\mu\text{m}$ 로 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 레버메커니즘의 강성에 의해 압전소자의 변위발생이 제한되기 때문으로 사료된다.

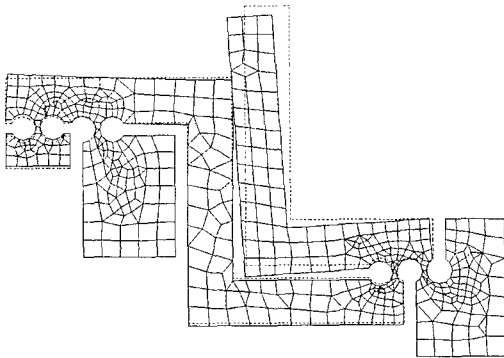


Fig. 6 Finite element analysis of the lever mechanism with flexure hinges

### 3.3 구동특성 실험

자벌레 회전모터를 구동할 때 구동전압 크기는 로터에 벨트를 밀착시키는 Fig.2 에 표시된 구동전압  $V_m$  이 기준이 된다. 자벌레 회전모터의 양방향 회전운동은 Fig. 7 과 같이 단위 회전사이클의 미소각 회전이 누적되어 회전변위의 확장을 이루게 된다. 두개 벨트와 로터 사이의 갭 조립차는

한 사이클 동안의 로터의 회전 형태의 변화를 초래한다. 특히, 6 개의 구동과정 중에서 벨트의 조립차는 클램핑 과정에서 로터의 미세한 회전각 변화를 유발한다. Fig. 7 을 통하여 클램핑시에 미소변화가 발생됨을 관찰할 수 있었다.

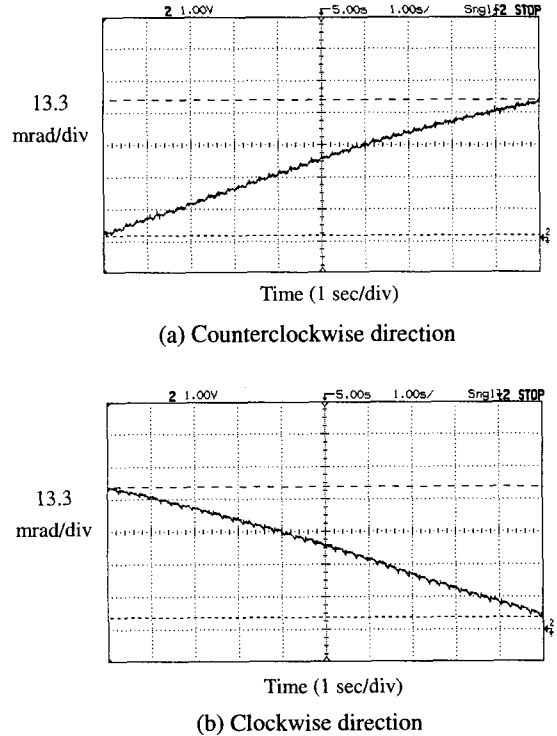


Fig. 7 Continuous rotating shape of the rotor ( $V_m=50$  V, driving frequency=4.2 Hz)

단위 사이클당 회전각은 구동전압  $V_m$  의 크기에 따라 Fig. 8 과 같이  $(0.2\sim 9.76)\times 10^{-4}$  rad 의 범위에서 연속적으로 증가함을 볼 수 있다. 전압의 크기와 회전각은 선형관계에 있고, 양방향 회전은 유사한 운동특성을 보였다. 구동전압 크기의 증가는 로터와 접촉하고 있는 벨트의 이동거리를 크게 함으로써 단위 사이클당 회전각을 증가시키는 것을 알 수 있다. 따라서, 입력전압의 크기를 조절함으로써 요구하는 회전각 분해능의 크기를 임의로 결정할 수 있게 된다.

Fig. 9 는 구동전압 크기가 50 V 인 경우에 대해 136 회 반복 구동실험을 통한 위치정밀도의 특성을 파악한 것이다. 히스토그램은 정규분포곡선과

비슷한 형태를 띤다. 평균은  $-9.742 \times 10^{-4}$  rad 이고, 표준편차는  $0.238 \times 10^{-4}$  rad 의 값을 가진다. Fig. 9 에서 표준편차가 상대적으로 큰 이유는 구동전압의 최대값을 사용했기 때문에 압전소자의 히스테리시스와 클램핑시의 미소변화의 영향이 크게 작용했기 때문이다.

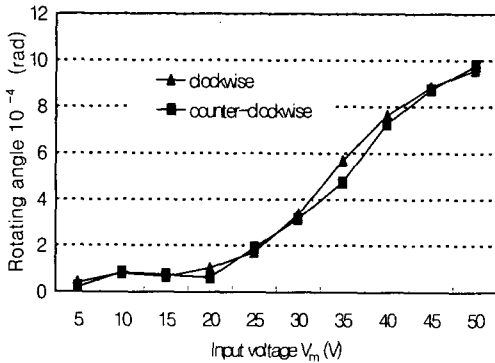


Fig. 8 Characteristics of the magnitude of the input voltage signal ( $V_m$ )

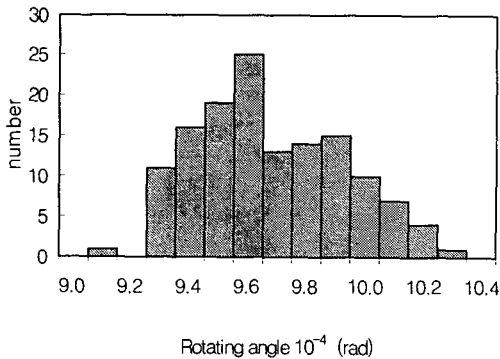


Fig. 9 Positioning accuracy of the inchworm rotary motor ( $V_m=50$  V, driving frequency=4.9 Hz)

회전모터의 구동신호는 로터를 클램핑하는 신호와 로터를 회전시키는 신호로 구성된다. 회전구동 주파수는 로터를 클램핑시키기 위한 1 msec 의 램프신호를 일정하게 하고, 로터를 회전 구동시키는 신호의 시간을 조절함으로써 변화시킬 수 있다. 이에 따른 입력 구동신호의 주파수와 로터의 속도에 대한 실험에서는 Fig. 10 과 같은 결과를 얻게 되었다. 회전 각속도 측정은 로터의 각운동을 측

정한 후 시간에 대한 각 변위의 증가를 1 차함수로 커브피팅하여 구하였다. 저주파수 쪽에서 양방향의 각속도가 거의 동일하였으며, 주파수가 높아질수록 미미한 차이를 보였다. 이와 같은 현상은 저주파수에서는 로터를 구동시키는 램프신호의 기울기가 작아 로터의 회전운동이 안정적이기 때문이다.

모터의 토크특성 실험결과는 Fig. 11 과 같다. 인가되는 토크와 구동 입력전압의 두가지 변수에 대해 회전 각속도의 특성을 조사하였다. 구동 입력전압의 크기가 클수록 토크성능이 더 우수해짐을 알 수 있었다. 이러한 결과는 벨트와 로터가 접촉한 후 구동전압이 클수록 로터에 가해지는 수직력이 증가하여 마찰력을 크게 하기 때문이다.

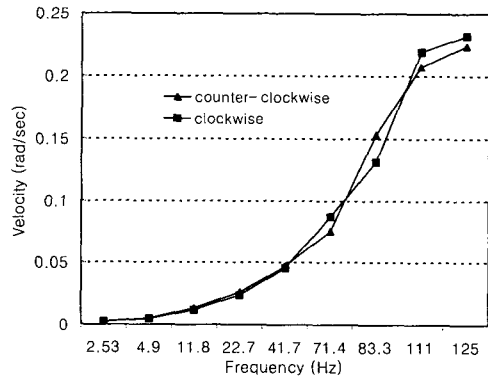


Fig. 10 Relation of driving frequency and angular velocity ( $V_m=50$  V)

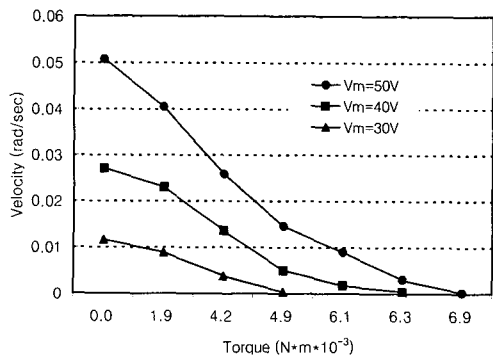


Fig. 11 Relation of torque and angular velocity (driving frequency=41.7 Hz)

자벌레 구동방식의 본 회전모터는 구동 매개체로 벨트를 이용하게 되므로 벨트의 탄성 특성 및 고유진동 문제를 고려하여야 한다. 벨트에 가해지는 인장력의 크기는 벨트가 로터에 접촉 후에 압전소자에 가해지는 전압크기에 비례하게 된다. 인장력에 의해 벨트는 양방향으로 신장하게 되므로 단위 주기당 회전각의 크기를 변화시키는 요인으로 작용할 수 있게 된다. 또다른 주요 고려사항은 탄성힌지 레버메커니즘과 벨트에 영향을 주게 되는 구동 주파수이다. 구동주파수를 높이면 레버 및 벨트의 고유 진동에 의해 모터의 회전이 불가능하게 된다. 특히, 정적인 구동 방식인 Fig. 1의 자벌레 방식은 고유진동수 이하의 저주파수 영역에서 구동하여야 한다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 압전소자와 벨트를 이용한 자벌레 구동방법의 초정밀 회전모터를 제시하였다. 고분해능의 회전위치결정과 전영역에서 회전이 가능한 새로운 형태의 회전모터의 구동원리와 구조에 대해 소개하였다. 회전모터의 벨트 구동방식에 적합한 대칭구조의 레버메커니즘을 설계하고, 이를 유한요소해석 방법을 통해 해석하였다. 모터의 기본적인 성능실험을 수행한 결과에 의하면 구동 입력전압의 크기에 따라  $(0.2\sim 9.76)\times 10^{-4}$  rad의 고정밀도의 회전운동을 구현할 수 있었다. 제시된 자벌레 구동방법의 회전모터는 로터의 반경과 구동전압의 크기를 조절함으로써 회전각 분해능을 향상시킬 수 있는 특성을 가지고 있다.

#### 후기

이 논문은 2000년도 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음.

#### 참고문헌

1. Toru ToJo, Kazuyoshi Sugihara, "Piezoelectric-driven Turntable with High Positioning Accuracy," JSPE, Vol. 53, No. 6, pp. 879-884, 1987.

2. Hiroyuki Shimizu, "A Basic Study on the Development of a Highly Accurate Rotational Positioning Actuator," JSME(C), Vol. 55, No. 517, pp. 2371-2375, 1989.

3. Khanh Duong, "Development of a Rotary Inchworm Piezoelectric Motor," SPIE, Vol. 2443, pp. 782-788, 1995.

4. Kazumasa Ohnishi, "Rotary Inchworm-Type Piezoelectric Actuator," T.IEE, Vol. 110-D, No. 1, pp. 51-58, 1990.

5. W.Xu, T.G.King, "A New Type of Piezoelectric Motor Using a Roller Clutch Mechanism," Mechatronics, Vol. 6, No. 3, pp. 303-315, 1996.

6. Akira Satake, "Development of Rotational Fine Positioning Mechanism with Piezoelectric Actuator," ISCIE, pp. 253-257, 1990.

7. J. M. Paros and L. Weisbord, "How to Design Flexure Hinges," Machine Design, pp. 151-156, Nov., 1965.

8. Fredric E. Scire and E. Clayton Teague, "Piezodriven 50- $\mu$ m Range Stage with Subnanometer Resolution," Rev. Sci. Instrum., Vol. 49, No. 12, pp. 1735-1740, 1978.