

## 6-자유도 초정밀 위치 결정 스테이지의 비선형성 식별을 위한 로스트 모션 해석

### Lost Motion Analysis for Nonlinearity Identification of a 6-DOF Ultra-Precision Positioning Stage

신현표<sup>1,✉</sup>, 문준희<sup>2</sup>  
Hyun-Pyo Shin<sup>1,✉</sup> and Jun-Hee Moon<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 동양미래대학교 로봇자동화공학부 (School of Robot and Automation Engineering, Dongyang Mirae University)

<sup>2</sup> 유한대학교 메카트로닉스학부 (School of Mechatronics, Yuhan University)

✉ Corresponding author: hpshin@dongyang.ac.kr, Tel: +82-2-2610-1816

Manuscript received: 2014.10.10 / Revised: 2015.1.11 / Accepted: 2015.2.2

*This paper describes lost motion analysis for a novel 6-DOF ultra-precision positioning stage. In the case of flexure hinge based precision positioning stage, lost motion is generated when the displacement of actuator is not delivered completely to the end-effector because of the elasticity of flexure hinge. Consequently, it is need to compute amount of lost motion to compensate the motion or to decide appropriate control method for precision positioning. Lost motion analysis for the vertical actuation unit is presented. The analysis results are presented in two ways: analytic and numerical analyses. It is found that they closely coincide with each other by 1% error. In finite element analysis result, the amount of lost motion is turned out to be about 3%. Although, the amount is not so large, it is necessary procedure to check the lost motion to establish the control method.*

Key Words: Flexure hinge (플렉서 힌지), Parallel mechanism (병렬 기구), Lost motion (로스트 모션), Ultra-precision (초정밀), Positioning stage (위치 결정 스테이지)

#### 1. 서론

마이크로/나노 위치결정은 광파이버 정렬, 웨이퍼 정렬, 마이크로 가공 등의 분야에서 많은 관심을 끌어 왔다.<sup>1</sup> 이러한 적용들에 있어 위치 결정 스테이지의 주된 역할은 물체를 마이크로/나노 정밀도로 조작하고 위치시키는 것이다.<sup>2,3</sup> 특히, 웨이퍼 정렬과 같이 두께 편차가 존재하는 웨이퍼를 정밀 정렬하고 높은 압력을 가하는 공정의 경우 높은

분해능과 내하중성과 같이 동시에 만족시키기 어려운 요구 사항들이 존재한다.

서보모터, 볼 스크류, 강체 링크 등으로 구성된 기존의 위치결정 기구는 유격, 마찰, 백래쉬 등의 문제로 인해 마이크로/나노 위치결정에 있어 적용이 많이 제한된다. 반면, 운동을 바꾸고 전달하기 위해 탄성 변형을 사용하는 컴플라이언트 기구 (Compliant mechanism)는 마모, 마찰, 백래쉬 등이 존재하지 않아서 좋은 반복정밀도를 제공한다.<sup>4,5</sup>

또한, 병렬 기구 매니플레이터의 경우 직렬 기구에 비해 작업영역이 좁고, 제어가 복잡해진다는 단점이 있지만 높은 강성, 낮은 관성, 높은 하중 지지력, 고정밀 등에 있어 유리하다.<sup>6,7</sup>

정밀위치결정 장치에 사용되는 액추에이터로서, PZT(Lead zirconate titanate)는 빠른 주파수 응답성, 높은 강성, 높은 분해능, 부드러운 운동 등의 특성으로 인해 정밀 위치결정에 적합하다. 그러나 최대 운동 범위가 액추에이터 자체 길이 대비 0.1% 정도로 제한되어 별도의 운동 증폭 메카니즘과 함께 사용되는 경우가 많다.

기존의 정밀 위치결정기구에 대한 연구를 살펴보면, Choi와 Lee는 내부와 외부 메카니즘으로 구성된 6-자유도 컴플라이언트 기구의 웨이퍼 스테이지를 설계하였다.<sup>8</sup> Choi et al.은 모션 증폭 메카니즘의 최적 설계를 수행하고 Preisach model feed-forward와 PID피드백 제어를 설계하여 정밀 모션을 구현하였다.<sup>9</sup> Liang et al.은 6-자유도 병렬기구 방식의 플렉서 힌지 스테이지를 설계하고 힘센서를 통합하여 피드백 제어를 하고, 강성 및 작업영역 해석을 수행하였다.<sup>10</sup>

본 논문에서는 고정밀 내하중성을 동시에 갖춘 플렉서-병렬 기구 기반의 6-자유도 정밀위치결정기구에 대한 비선형성 및 동역학 식별을 수행하였다. 플렉서 힌지와 PZT를 적용한 기구의 경우 힌지 강성으로 인해 로스트 모션이 발생할 수 있으며, 힌지는 스테이지의 동적 성능을 결정하는 주요 요소이다. 로스트 모션을 계산함으로써 필요한 액추에이터의 구동량을 얻을 수 있고, 적절한 제어 기법이 무엇인지를 계산할 수 있으므로, 정밀 스테이지 설계에서 로스트 모션 계산은 필수적인 과정이라고 할 수 있다.

2장에서는 스테이지의 설계와 구조적 특징에 대해 기술하였고, 3장에서는 수직 구동 유닛의 메카니즘과 하중 부담 특성에 대해 고찰하였다. 4장에서는 플렉서 힌지의 탄성을 고려한 수직 구동 유닛의 로스트 모션 계산을 분석적·수치적으로 수행하고 비교하였다. 마지막으로 결론을 제시하였다.

**2. 위치 결정 스테이지의 이중 병렬 구조**

본 연구의 6-DOF 스테이지는 공간 활용도를 높이고 각 구동 유닛이 하중을 균일하게 분담하며 틸트 모션 범위 향상에 강조점을 두도록 설계되었다. 스테이지의 형상과 내부 구성품이 Fig. 1에 나

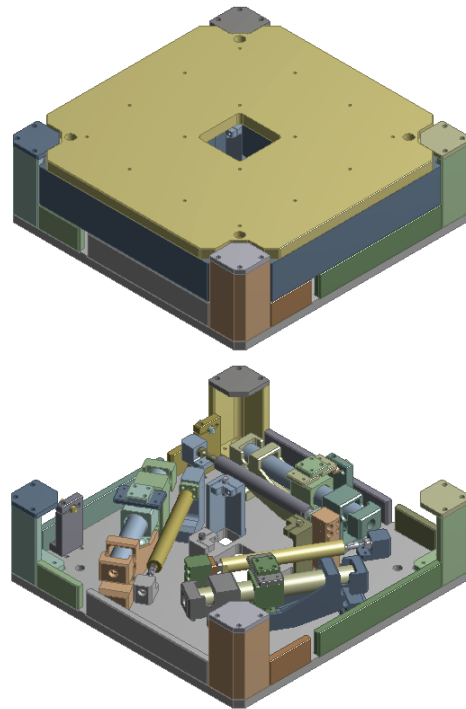


Fig. 1 6-DOF precision stage and its components

타나 있다. 인플레인 운동(In-plane motion)과 아웃오브플레인 운동(Out-of-plane motion)을 담당하는 수평 구동 유닛과 수직 구동 유닛이 서로 이중 삼각형 구조를 이루도록 배치하였다. 수평 구동 유닛과 수직 구동 유닛이 각각 내부와 외부의 삼각형을 이루도록 배치함으로써 z-회전 범위와 x, y-틸트의 민감도가 최대화 되도록 했으며, 동시에 웨이퍼 접합과 같은 수직 방향의 하중에 대해 안정적으로 지지할 수 있도록 하였다. 이중 삼각형 구조는 중앙에 홀을 만들 수 있으므로 스테이지 중앙 부분에 광학 모듈을 관통 장착하는 것이 가능하다는 장점이 있다. 스테이지를 구동하기 위한 액추에이터와 센서는 분해능 및 응답속도가 빠르고 백래쉬가 없는 PZT와 서브나노급 분해능으로 운동을 감지할 수 있는 정전용량 갭 센서를 각각 사용하였다. 각 구동 유닛 및 센서의 배치는 Fig. 2와 같다. 3개의 센서는 스테이지 바닥면에 수평이 되도록 배치되어 인플레인 운동을 감지하고, 3개의 센서는 스테이지 바닥면을 기준으로 수직으로 배치되어 아웃오브플레인 운동을 감지한다. 각 센서는 엔드이펙터의 움직임을 높은 정밀도로 감지하기 위해 직각이 되도록 설계 되었고, 센서와 마주하는 면

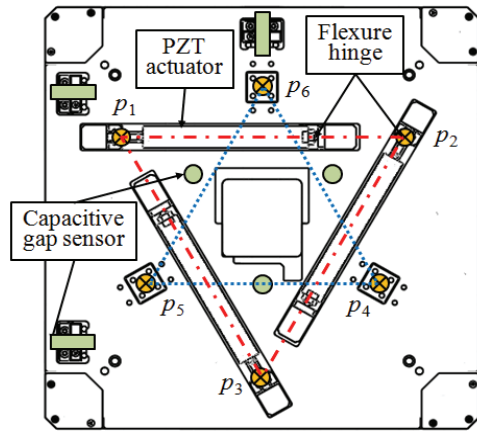


Fig. 2 Schematics displaying sensors and actuators

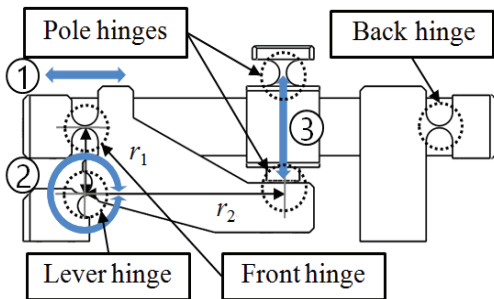


Fig. 3 6-DOF precision stage and its components

은 센싱 오차를 줄이기 위해 표면 조도가 높게 가공되었다. 총 6개의 센서를 통해 스테이지의 움직임을 감지함으로써 페루프 제어를 하게 된다.

### 3 수직 구동기와 하중부담 특성

#### 3.1 수직 구동기의 기능 및 구성

수직 구동 유닛과 그 내부를 구성하고 있는 힌지 타입이 Fig. 3에 나와 있다. 수직 구동기는 레버 힌지(Lever hinge)를 통해 PZT액추에이터의 변위를 증폭시키는 역할을 수행하고, 수직하중을 지지하는 역할도 수행하는 스테이지의 핵심 구성 유닛이다. 또한, 레버 힌지는 PZT 액추에이터의 움직임을 수직으로 바꾸는 역할도 수행한다. 힌지의 차원으로 볼 때, 폴 힌지(Pole hinge)는 2-D 힌지이며, 프론트 힌지(Front hinge) 및 백 힌지(Back hinge), 레버 힌지는 1-D 힌지이다. 각 힌지의 굽힘 중심(Center of bending)은 연성 운동(Parasitic motion)을 줄이기 위해 서로 수평 또는 수직 방향으로 정렬

되어 있다.

#### 3.2 하중부담 분포 해석

플렉서 힌지 기반의 스테이지 설계시 각 힌지가 어느 정도의 하중을 부담하게 되는지 파악하는 것이 필요하다. 특히, 여러 개의 힌지가 동시에 하중을 받을 때, 하중이 가해지는 위치에 따른 하중 부담 분포를 파악하는 것은 힌지의 배치 위치를 결정하기 이전에 이루어져야 하는 과정이다.

다음에 소개되는 식들은 스테이지의 수직 구동 유닛이 정삼각형을 이루어 수직 점하중을 받을 때 하중 작용 위치에 따라 받는 힘의 크기를 계산한 것이다.  $F_c$ 는 가해지는 하중을,  $F_4, F_5, F_6$ 는 각각 4, 5, 6번 수직구동 유닛이 받는 하중을,  $l_0$ 는 스테이지 중심에서 각 구동 유닛까지의 최단거리를,  $x, y$ 는 하중이 가해지는 위치를 의미한다.

$$\Sigma F = 0, \quad F_c = F_4 + F_5 + F_6 \quad (1)$$

$$\Sigma M = 0, \quad F_4 l_0 - F_c y = F_4 l_0 \sin 30^\circ + F_5 l_0 \sin 30^\circ$$

$$F_5 l_0 \cos 30^\circ = F_4 l_0 \cos 30^\circ - F_c x \quad (2)$$

$$F_c \begin{bmatrix} 1 \\ y \\ x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ l_0 & -l_0 \sin 30^\circ & -l_0 \sin 30^\circ \\ 0 & -l_0 \cos 30^\circ & -l_0 \cos 30^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_4 \\ F_5 \\ F_6 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$F_c B = A F \quad (4)$$

$$F = F_c A^{-1} B \quad (5)$$

Fig. 4는 각 수직 구동 유닛이 받는 힘의 크기를 나타낸다. 각 그래프의 오른쪽 바(Bar)는 힘의 크기를 뉴톤(N)으로 나타내며, 흰색에 가까울수록 힘을 많이 받는 위치임을, 검은색에 가까울수록 힘을 적게 받는 위치임을 나타낸다. 하중이 중심에 작용하면 모든 수직 구동 유닛이 균일한 하중을 받고 2개의 수직 구동 유닛을 연결한 선에서 먼 위치에 하중이 작용하면 모멘트에 의해 나머지 1개의 수직 구동 유닛이 큰 하중이 받게 됨을 알 수 있다. 또한, 이러한 해석을 통해서 수직 구동 유닛의 힌지가 수직 하중의 작용 위치에 따라 어떠한 분포로 하중을 지지하는지와 스테이지 중앙에서 크게 벗어나지 않을 경우 하중이 3개의 수직 구동 유닛에 비교적 고르게 분산되어 작용하게 됨을 알 수 있다.

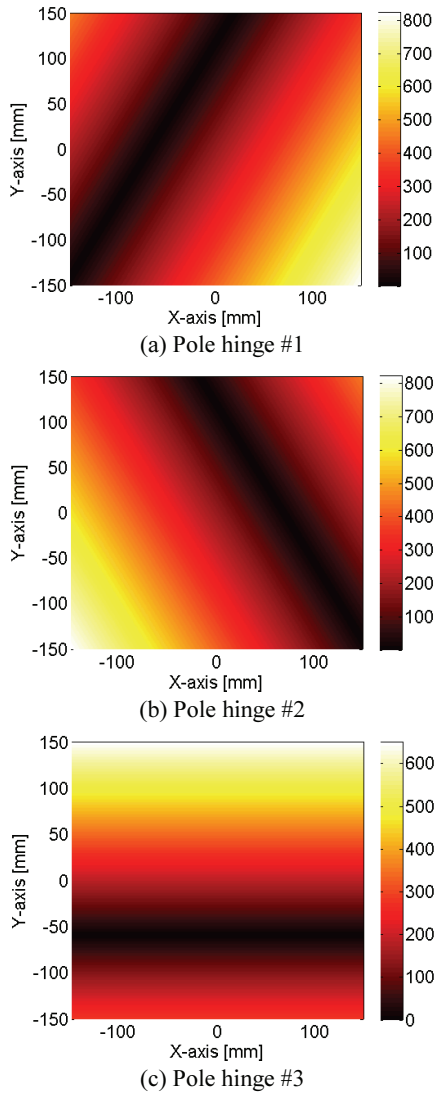


Fig. 4 Load exerted on the three pole hinges

#### 4. 수직 구동 유닛의 로스트 모션 해석

##### 4.1 플렉서 힌지 탄성을 고려한 해석

플렉서 힌지를 사용한 스테이지의 경우 힌지 자체의 탄성으로 인해 PZT의 변위가 모두 엔드 이펙터의 운동으로 변환되지 않고 사라지는 부분이 발생하는데 이를 로스트 모션(Lost motion)이라고 한다. 그러므로, 정밀한 제어를 위해서는 발생하는 로스트모션을 계산하는 것이 향후 정확한 위치 제어를 위해 필요하다.

수평 구동 유닛의 로스트 모션의 경우 스테이

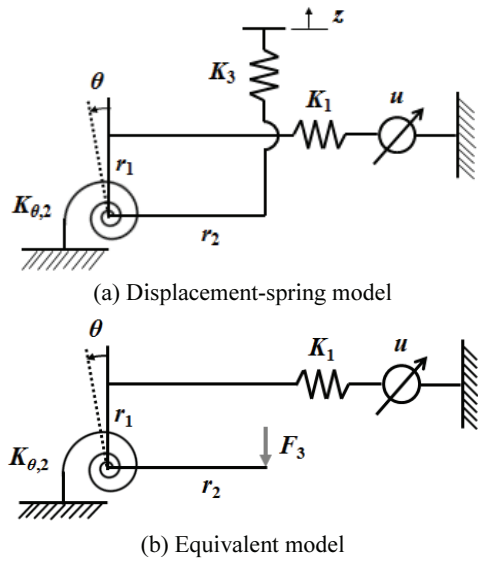


Fig. 5 Simplified model of the vertical actuation unit

지의 하중 지지 구조상 수직 구동기에서 발생하는 로스트 모션 보다 상대적으로 매우 작은 수준이므로 수직 구동 유닛의 로스트 모션을 계산하였다.

수직 구동 유닛의 로스트 모션을 계산하기 위해 Fig. 3을 Fig. 5(a)와 같이 힌지와 액추에이터를 변위, 스프링 모델로 단순화하였다. 액추에이터가  $u$ 만큼의 변위를 발생시킨다고 할 때, 레버 힌지는  $\theta$ 만큼 회전을 하게 되고 수직 구동기의 엔드 이펙터에 해당하는 폴 힌지 블럭이 증폭비에 의해서 증폭된 만큼 수직 운동을 하게 된다. 레버 힌지의 중심을 기준으로 모멘트 평형식을 적용하면 (8)과 같은 식이 도출된다.

$$K_{\theta,2}\theta - r_1K_1(u - r_1\theta) + r_2K_3(r_2\theta - z) = 0 \quad (8)$$

$$(K_{\theta,2} + r_1^2K_1 + r_2^2K_3)\theta = r_1K_1u + r_2K_3z \quad (9)$$

$$\text{where, } K_1 = \left( \frac{1}{K_{PZT}} + \frac{2}{K_{a,1}} \right)^{-1} \quad (10)$$

식(8)에서  $K_1$ 은 PZT 강성( $K_{PZT}$ )과 앞, 뒤 힌지 강성( $K_{a,1}$ )을 포함한 강성이며,  $K_{\theta,2}$ 는 레버힌지의 강성이고,  $K_3$ 는 폴 힌지 블럭의 강성이다.  $r_1$ 은 앞 힌지 중심과 레버 힌지 중심간 거리를,  $r_2$ 는 폴 힌지 블럭의 아래 힌지 중심과 레버 힌지 중심간의 거리를,  $z$ 는 폴 힌지 블럭의 수직 구동 거리를 나타

낸다. 이를  $\theta$ 에 대해 정리하면 (11)과 같다.

$$\theta = \frac{r_1 K_1}{K_{\theta,2} + r_1^2 K_1 + r_2^2 K_3} u + \frac{r_2 K_3}{K_{\theta,2} + r_1^2 K_1 + r_2^2 K_3} z \quad (11)$$

Fig. 5(a)의 폴 힌지 블럭을 모델을 등가의 힘으로 나타낸 것이 Fig. 5(b)에 나타나 있다.

$$F_3 = K_3(r_2 \theta - z) \quad (12)$$

$$K_{\theta,2} \theta - r_1 K_1(u - r_1 \theta) + r_2 F_3 = 0 \quad (13)$$

여기에서 다시 식을  $\theta$ 에 대해 정리하면 (15)와 같다.

$$(K_{\theta,2} + r_1^2 K_1) \theta = r_1 K_1 u - r_2 F_3 \quad (14)$$

$$\theta = \frac{F_3}{r_2 K_3} + \frac{z}{r_2} \quad (15)$$

결국, PZT 액추에이터의 변위  $u$ 에 의한 수직 구동기 엔드 이펙터의 운동 발생량은 (16)과 같다.

$$z = \frac{r_2/r_1}{1 + \frac{K_{\theta,2}}{r_1^2 K_1}} u - \left( \frac{r_2^2}{K_{\theta,2} + r_1^2 K_1} + \frac{1}{K_3} \right) F_3 \quad (16)$$

식(16)의 우변항의 첫째 항 분모를 보면 플렉서 힌지의 강성에 의해 로스트 모션이 발생함을 확인할 수 있다. 둘째 항은 스테이지의 자중에 의한 영향을 고려했을 경우 데드 디플렉션(Dead deflection)이 항상 일정하게 발생함을 나타내고 있다.

**4.2 유한요소해석 결과와의 비교**

Fig. 6은 수직 구동 유닛에 대한 유한요소해석(Finite element analysis) 결과이다. 액추에이터 구동에 의해 폴힌지의 위치가 얼마나 이동하는지를 볼 수 있다. 또한, 이론식과 유한요소해석을 통해 수직 구동 유닛의 로스트 모션을 해석한 결과가 Table 1에 제시되어 있다. 유한요소해석 소프트웨어는 ANSYS를 적용했다.

Table 1을 보면, 이론식과 유한요소해석을 적용한 결과가 1% 이내의 오차를 지니고 있음을 확인할 수 있다. 구동 목표치와 실제 구동거리의 차이를 유한요소해석을 기준으로 분석해 보면 3% 정도임을 알 수 있고 이는 피드백 제어를 통해서 충분히 보상할 수 있는 수준이다.

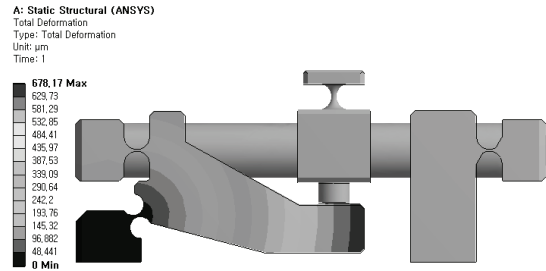


Fig. 6 Static finite element analysis for the 6-DOF precision stage

Table 1 Comparison of amount of lost motions obtained from theoretical and finite element analyses

| Command ( $\mu\text{m}$ ) | Theoretical ( $\mu\text{m}$ ) | FEA ( $\mu\text{m}$ ) |
|---------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| 0                         | 0                             | 0                     |
| 60                        | 58.5                          | 58.1                  |
| 120                       | 117                           | 116.3                 |
| 180                       | 175.5                         | 174.4                 |
| 240                       | 234                           | 232.5                 |
| 300                       | 292.5                         | 290.6                 |
| 360                       | 351                           | 348.8                 |
| 420                       | 409.5                         | 406.9                 |
| 480                       | 468                           | 465                   |
| 540                       | 526.5                         | 523.2                 |
| 600                       | 585                           | 581.3                 |

로스트 모션을 계산하여 이동거리를 보상해 주는 것이 본 연구의 목표이지만 본 정밀 스테이지의 경우 그 양이 적어서 제어를 페루프 제어에 의해 보상이 되도록 하였다. 그러나, 로스트 모션을 계산하는 것은 어떠한 제어를 해야할지 판단하는데 도움이 되며, 제어를 수행하기에 앞서 선행되어야 하는 중요한 과정임을 알 수 있다.

**5. 결론**

본 논문에서는 플렉서 힌지 병렬 기구 기반의 6-자유도 정밀위치결정기구에 대한 비선형성 식별을 수행하였다. 플렉서 힌지의 자체 탄성으로 인해 액추에이터의 운동이 일정 부분 감소되어 전달되는 것이 로스트 모션이다. 그러므로, 정확한 위치 결정을 하기 위해 수직 구동 유닛에 대해 각 힌지의 강성을 고려한 로스트 모션 해석을 수행하였다.

분석적·수치적 로스트 모션 해석을 통해 실제

로 아웃오브플레이 운동에 담당하는 수직 구동 유닛 내에서 로스트 모션이 발생함을 확인하였다. 제시된 이론식의 계산 결과와 유한요소해석을 적용한 결과가 1% 이내의 오차로 일치함을 확인할 수 있었다. 또한, 구동 목표치와 실제 구동거리의 차이가 유한요소해석 결과를 기준으로 3% 정도임을 알 수 있었다.

본 정밀위치결정기구의 경우에는 로스트 모션의 크기가 크지 않아서 피드백제어를 통해 충분히 보상이 가능하지만 로스트 모션의 크기가 큰 경우에는 이를 보상해 주기 위한 제어 알고리즘을 적용하는 것이 필요하다.

## 후 기

본 논문은 2014년도 동양미래대학 교내학술연구과제 연구지원에 의하여 연구되었음.

## REFERENCES

1. Yang, R., Jouaneh, M., and Schweizer, R., "Design and Characterization of a Low-Profile Micropositioning Stage," *Precision Engineering*, Vol. 18, No. 1, pp. 20-29, 1996.
2. Chen, M.-Y., Huang, S.-C., Hung, S.-K., and Fu, L.-C., "Design and Implementation of a New Six-Dof Maglev Positioner with a Fluid Bearing," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 16, No. 3, pp. 449-458, 2011.
3. Chang, S. and Du, B., "A Precision Piezodriven Micropositioner Mechanism with Large Travel Range," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 69, No. 4, pp. 1785-1791, 1998.
4. Yao, Q., Dong, J., and Ferreira, P. M., "Design, Analysis, Fabrication and Testing of a Parallel-Kinematic Micropositioning XY Stage," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No. 6, pp. 946-961, 2007.
5. Moon, J. H., Park, J. H., and Pakh, H. J., "Design and Modeling of a 6-dof Stage for Ultra-Precision Positioning," *J. Korean. Soc. Precis. Eng.*, Vol. 26, No. 6, pp. 106-113, 2009.
6. Kim, H. S., Cho, Y. M., and Moon, J. H., "Active vibration control using a Novel Three-Dof Precision Micro-Stage," *Smart Materials and Structures*, Vol. 19, No. 5, Paper No. 055001, 2010.
7. Shin, H., Lee, S., Jeong, J. I., and Kim, J., "Antagonistic Stiffness Optimization of Redundantly Actuated Parallel Manipulators in a Predefined Workspace," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 18, No. 3, pp. 1161-1169, 2013.
8. Choi, K.-B. and Lee, J. J., "Passive Compliant Wafer Stage for Single-Step Nano-Imprint Lithography," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 76, No. 7, Paper No. 075106, 2005.
9. Choi, S., Han, S., and Lee, Y., "Fine Motion Control of a Moving Stage using a Piezoactuator Associated with a Displacement Amplifier," *Smart Materials and Structures*, Vol. 14, No. 1, Paper No. 222, 2005.
10. Liang, Q., Zhang, D., Chi, Z., Song, Q., Ge, Y., and Ge, Y., "Six-Dof Micro-Manipulator based on Compliant Parallel Mechanism with Integrated Force Sensor," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 27, No. 1, pp. 124-134, 2011.