

# 피에조 스택을 이용한 나노 포지셔너의 셀프-캘리브레이션 Self-Calibration of a Piezoelectric Actuator Based Nanopositioner

\*#정영훈<sup>1</sup>, P. M. Ferreira<sup>2</sup>, 윤원수<sup>1</sup>

\*#Y. H. Jeong(yhjeong@kpu.ac.kr)<sup>1</sup>, P. M. Ferreira<sup>2</sup>, W. S. Yun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 한국산업기술대학교 기계공학과, <sup>2</sup>Dept. MechSE, University of Illinois at Urbana Champaign

Key words : Nanopositioner, self-calibration, transitivity, redundancy, calibration

## 1. 서론

최근 나노 및 생명 기술의 발전에 힘 입에 나노 위치결정에 대한 기술이 활발히 연구되고 있다. 나노 포지셔너는 초소형 기전 공학(MEMS), 나노 생산 공정, 나노 매니폴레이션, 초정밀 장비, 의료장비, AFM 및 SPM 과 같은 측정장비에서의 초정밀 위치 결정 기구로서 활발히 이용되고 있으며, 이러한 장비의 성능을 결정짓는 가장 중요한 요소로서 자리잡고 있다. 이러한 나노 위치 결정 기술은 나노미터 또는 서브 나노미터 수준의 이송 분해능과 함께 이송 정밀도를 확보해야 한다. 현재 사용되는 나노 포지셔너로는 기존의 볼스크류를 이용한 방식, 선형 모터를 채용한 방식, 압전 소자와 플렉서 힌지를 이용한 방식, 압전 소자와 정지 마찰을 이용한 방식 등 다양한 작동 방식이 소개되어 있다.

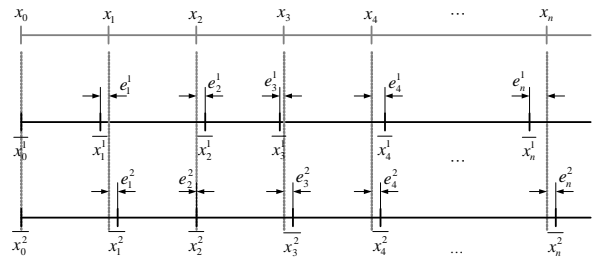
나노 포지셔너에서 가장 핵심적인 성능으로는 정밀도를 들 수 있다. 구체적인 항목으로서 정확도와 반복정밀도를 들 수 있으며, 정확도는 주어진 변위 기준에 벗어난 정도를 의미한다. 반면, 반복정밀도는 위치 결정 기구에 의해 생성되는 변위의 반복적 생성 정도를 의미하며, 그 정도를 표준편차로 나타낸다. 이러한 위치 결정 성능은 나노 포지셔너 분야에서도 매우 중요하게 다뤄지고 있다. 그러나 나노 포지셔너의 정밀도 확보는 여전히 상당히 어려운 문제로서 자리잡고 있는 실정이다 [1].

나노 포지셔너가 이러한 성능을 확보하기 위해서 캘리브레이션이 필요하며, 간단하게는 기준이 되는 측정 장비로 포지셔너의 정밀도 수준을 평가하는 것으로 정의할 수 있다. 캘리브레이션을 위해서는 기준이 되는 측정장비와 대상 장비의 정밀도를 측정하기 위한 기하학적 정보 및 수집된 신호들을 이용하여 정밀도를 추정하는 알고리즘이 필요하다. 이러한 캘리브레이션 기술들은 표준화 등을 통해 이미 다양한 정밀 이송 시스템에 활용되고 있다[2]. 마찬가지로 나노 수준의 위치결정 기구에 대해서도 이러한 캘리브레이션에 대한 요구가 높다. 미국의 NIST 에서는 이러한 요구에 부응하기 위해 피코미터 정밀도 수준의 레이저 간섭계를 발표하고 기준 측정 장비로서 활용하고자 하였다[3]. 그 외에도 정밀한 1 차원 및 2 차원의 격자 패턴을 기준 변위로서 사용함으로써 측정장비를 대신하는 연구도 활발히 진행되고 있다. 그러나 나노 포지셔너의 캘리브레이션을 위한 측정장비는 여전히 설치에 많은 어려움이 있으며, 동시에 포지셔너의 크기에 제한을 받고, 동적 특성에 영향을 미치는 등 여러 가지 문제점을 가지고 있다. 또한 기준 측정 장비의 정밀도에서도 나노 포지셔너에서 원하는 수준의 정밀도를 확보하기가 쉽지 않으며, 알고리즘에서도 기존의 방식을 이용하거나 간단한 형태의 알고리즘을 사용함으로써 아직까지는 많은 연구가 요구되고 있다.

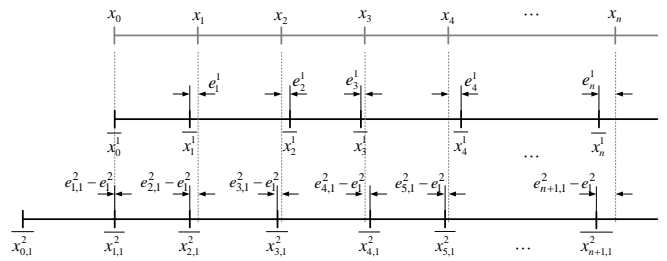
본 연구에서는 셀프-캘리브레이션 방식을 나노 포지셔너에 적용하였다. 셀프-캘리브레이션 방식은 센서 간의 변위정보의 연결관계(transitivity)를 정의함으로써 각 센서가 가진 오차 정보를 서로 비교하게 함으로써 오차의 크기를 추정하는 기술이다. 따라서, 셀프-캘리브레이션 기술은 별도의 정밀한 측정장비를 요구하지 않기 때문에, 측정장비의 정밀도에 관한 문제를 해결할 수 있다. 본 연구에서는

이런 장점을 가진 셀프-캘리브레이션 기술을 듀얼-액츄에이션 기반의 단축 나노 포지셔너에 적용하였다. 특히 센서간 변위정보의 연결관계를 맺기 위해 나노 포지셔너와 센서의 기하학적 구조 및 변위간의 관계 획득을 위한 과정을 정의하였으며, 이를 통해 두 센서의 오차를 추정하였다. 특히 개발된 방식에서는 오차 추정의 RMS 반복 정밀도가 1 nm 수준에 이르는 것을 확인하였으며, 이를 통해 50 nm 의 포지셔닝 오차를 1 nm 수준으로 줄일 수 있음을 확인하였다[1].

## 2. 셀프-캘리브레이션



(a) Two physical scales with their origins aligned



(b) Two physical scales when the second scale is offset to align its first grid with the origin of the first scale

Fig. 1 Comparison of two physical scales when their origins aligned and the second scale is offset to align its first grid with the origin of the first scale [4].

Fig. 1 은 Takac[4]에 의해 제시된 1 차원에서 두 센서(scale)의 셀프-캘리브레이션을 도식적으로 보여준다. Fig. 1(a)와 같이 두 센서의 원점이 맞춰져 있을 때 두 센서로부터 각 눈금에서 읽어지는 변위들로부터 다음을 얻을 수 있다 [1].

$$\overline{x_i^1 - x_i^2} = (x_i^1 + e_i^1) - (x_i^2 + e_i^2) = e_i^1 - e_i^2 = O_i \quad (1)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots$$

여기서,  $\overline{x_i^1}$ ,  $\overline{x_i^2}$ ,  $x_i^1$ ,  $x_i^2$ ,  $e_i^1$ ,  $e_i^2$ 는 각각 I 번째 눈금에서 첫 번째와 두 번째의 센서로부터 측정된 변위, 실제 변위, 시스템 오차(systematic error)이다. 또한 Fig. 1(b)와 같이 두 번째 센서의 첫 번째 눈금이 첫 번째 센서의 원점과 맞춰질 경우 Fig. 1(b)로부터 다음의 관계를 얻을 수 있다[1].

$$\overline{x_i^1} - (\overline{x_{i,j}^2} - \overline{Offset_j}) = (x_i^1 + e_i^1) - \{(x_{i,j}^2 + e_{i,j}^2) - (x_j^2 + e_j^2)\} = e_i^1 - e_{i,j}^2 + e_j^2 = O_i^j \quad (2)$$

$j = 1, 2, 3, \dots, m$

이때,  $Offset_j$ 은 두 번째 센서의  $j$  번째 눈금이 첫 번째 센서의 원점과 맞춰져 있을 때의 간격 차이이다. 특히,  $j = 1$  일 때, (1)과 (2)로부터  $O_i^1 = e_i^1 - e_i^2$  와  $O_{i+1}^1 = e_{i+1}^1 - e_{i+1}^2$  은  $O_i^1 = e_i^1 - e_{i+1}^2 + e_{i+1}^1$  에 의해 오차 요소들이 서로 연결될 수 있음을 확인할 수 있다.  $j = 1$  인 경우와 원점이 정렬된 경우만을 고려할 경우에 대해 행렬식으로 정리하면 (3)과 같이 얻을 수 있다. 그러나 이 경우 유일해를 얻기 위해서는 한 개의 조건이 더 필요하다. 본 연구에서는 이를 위해  $e_1^1 = 0$  의 조건을 추가함으로써 유일해 조건을 만족시켰다.

또한  $Offset_j$  에 대해 다양한  $j$  를 추가함으로써 알고리즘에 측정잡음에 대한 강인성을 부여하였다. 이 경우 (3)의 식은 유일해를 얻기 위해 요구되는 식의 개수보다 많으므로 최소 자승법을 이용하여 근을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & -1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & -1 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 1 & 0 & 0 & \dots & \dots & -1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1^1 \\ e_2^1 \\ e_3^1 \\ \vdots \\ e_n^1 \\ - \\ e_1^2 \\ e_2^2 \\ e_3^2 \\ \vdots \\ e_n^2 \\ e_{n+1}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} o_1 \\ o_2 \\ o_3 \\ \vdots \\ o_n \\ - \\ o_1^1 \\ o_2^1 \\ o_3^1 \\ \vdots \\ o_n^1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

### 3. 듀얼 액추에이션 나노 포지셔너의 셀프-캘리브레이션

추가된 센서를 부착하지 않고, 센서 간의 변위 연결 관계를 얻기 위한 듀얼 액추에이션 방식의 나노 포지셔너의 구성은 Fig. 2 와 같다.

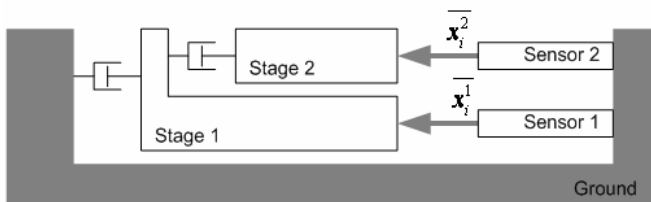


Fig. 2 Configuration for the self-calibration of a dual-axis system [1].

Fig. 2 로부터 두 센서가 모두 기준면을 기준으로 하여 변위를 측정함을 확인할 수 있으며, 이 때 Stage 1 과 Stage 2 의 상대 위치는 일정하도록 하였다. 실제 실험에서 용량 변위 측정 방식의 센서를 사용하였으며, 나노 포지셔너의 구동을 위한 제어는 Delta-Tau 의 UMAC 제어기를 이용하였다. 실험에 사용된 나노 포지셔너는 피에조 스택을 이용한 모듈형 단축 나노 포지셔너[5]를 이용하여 구성하였다. 캘리브레이션 간격 (graduation size for calibration)은  $2 \mu\text{m}$  로 하였으며, 전체 캘리브레이션은 Stage 1 에 대해서는  $20 \mu\text{m}$ , Stage 2 에 대해서는 5 세트의  $Offset$  을 부여함으로써  $30 \mu\text{m}$  로 하였다. 측정된 변위 신호는 진동에 의한 영향을 최소화 하기 위해 평균을 취하였다. 또한 캘리브레이션의 반

복성을 확인하기 위해 24 시간의 시간 간격을 두고 2 번의 실험을 수행하였다.

Fig. 3 은 얻어진 캘리브레이션의 결과를 보여준다. 그림으로부터 첫 번째 센서(Sensor 1)는 최대  $8 \mu\text{m}$  의 오차를 가짐을 확인할 수 있으나, 두 번째 센서(Sensor 2)는 최대  $52 \mu\text{m}$  정도의 오차를 가짐을 볼 수 있다. 또한 두 번의 실험 결과가  $2 \text{nm}$  의 최대 오차와  $1 \text{nm}$  의 RMS 오차를 가짐을 확인하였다. 이로부터 본 연구에서 제안한 셀프-캘리브레이션 방법이 나노 포지셔너의 정밀도 향상에 효과적으로 기여할 수 있음을 알 수 있다.

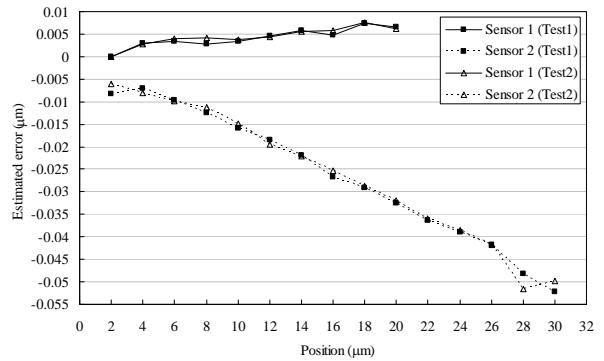


Fig. 3 Calibration results for two sensors of a dual stage positioning system [1].

### 4. 결론

본 연구에서는 피에조 스택과 플렉서 힌지 구조를 이용한 나노 포지셔너의 정밀도 향상을 위해 셀프-캘리브레이션 방식을 적용하였다. 특히 제안한 방식은 고가의 측정장비를 필요로 하지 않으며, 소형의 나노 포지셔너의 특성에 영향을 미치지 않으며, 높은 수준의 정밀도를 확보할 수 있도록 하는 장점을 가지고 있다. 또한 자동화될 수 있는 캘리브레이션 과정으로 정의되어짐으로 높은 숙련도를 가진 기술자를 요구하지 않는다. 본 연구에서는 제안한 방식을 듀얼 액추에이션 방식의 나노 포지셔너에 적용하여 오차 추정의 반복 정밀도가  $1 \text{nm}$  수준에 이를 수 있음을 확인하였으며, 이를 통해  $50 \text{nm}$  의 위치 결정 오차를  $1 \text{nm}$  수준으로 줄일 수 있음을 확인하였다.

### 후기

본 연구는 2008년도 산학연공동기술개발사업인 “피에조 스택을 이용한 모듈형 나노 포지셔너의 개발” 과제의 지원으로 이뤄졌습니다.

### 참고문헌

- Jeong, Y. H., Dong, J., Ferreira, P. M., "Self-calibration of dual-actuated single-axis nanopositioners," Measurement Science and Technology, **19**, 1-13, 2008.
- ISO 230-2, ISO230-2: Determination of Accuracy and Repeatability of Positioning Numerically Controlled Axes, Geneva, Swiss, 2006
- Beer, S. J., Penzes, W. B., "The NIST length scale interferometer," Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, **104**, 225-252, 1999.
- Takac, M., "Self-calibration in one-dimension," Proceedings of 13th Annual BACUS Symposium on Photomask Technology and Management, Santa Clara, USA, 1993
- Dong, J., Jeong, Y. H. and Ferreira, P. M., "Design and analysis of a micro-positioning module for multi-degree-of-freedom micro-positioners," Proceedings of International Conference on Micromanufacturing Greenville, South Carolina, 2007.