

PSD 와 구면반사를 이용한 3 자유도 미소 변위의 정밀측정

이재욱*, 조남규#

Precision Displacement Measurement of Three-DOF Micro Motions Using Position Sensitive Detector and Spherical Reflector

Jae Wook Lee*, Nahm Gyoo Cho#

ABSTRACT

A precision displacement measurement system of 3-DOF micro motions is proposed in this paper. The measurement system is composed of two diode lasers, two quadratic PSDs, two beam splitters and a sphere whose surface is highly reflective. In this measurement system, the sphere reflector is mounted on the platform of positioning devices whose 3-DOF translational motions are to be measured, and the sensitive areas of two PSDs are oriented toward the center point of the sphere reflector. Each laser beam emitted from two diode laser sources is reflected at the surface of sphere and arrives at two PSDs. Each PSD serves as a 2-dimensional sensor, providing the information on the 3-dimensional position of the sphere. In this paper, we model the relationship between the outputs of two PSDs and 3-DOF translational motions of the sphere mounted on the object. Based on a deduced measurement model, we perform measurement simulation and evaluate the performance of the proposed measurement system: linearity, sensitivity, and measurement error. The simulation results show that the proposed measurement system can be valid means of precision displacement measurement of 3-dimensional micro motions.

Key Words : Displacement Measurement (변위 측정), Three-DOF motions (3 자유도 운동), Position Sensitive Detector (위치감별소자), Spherical Reflector (구 반사경)

1. 서론

최근 초정밀 메카트로닉스 기술의 발전과 더불어 변위측정기술의 발전은 서브 마이크로미터 또는 나노미터 급의 변위분해능을 갖는 초정밀 위치 및 자세 결정을 가능하게 하였다. 이러한 변위 측정기술은 MEMS 및 나노기술(nanotechnology)의 발달로 인하여 큰 측정범위에서 nm 수준의 정확도

와 sub-nm 의 정밀도가 요구되고 있다.

또한, 빠른 측정속도 및 현장 적용의 용이함으로 인하여 접촉식보다 비접촉식 측정방식이 선호되고 있으며, 구동 시스템 말단부의 위치/자세 검출을 동시에 하기 위해 1 자유도 변위 측정에서 다 자유도 변위 측정 기술에 대한 연구로 이행되고 있다. 현재 비접촉 방식으로 다자유도의 미세 변위를 고분해능의 정밀도로 측정하기 위하여 레

199 접수일: 2002 년 12 월 13 일; 게재승인일: 2003 년 4 월 14 일

* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

교신저자: 한양대학교 기계·정보·경영공학부

Email: ngcho@hanyang.ac.kr

이저 간섭계(laser interferometer)를 이용한 방법^{1,4}, 정전 용량형 변위 센서(capacitance displacement sensor)를 이용한 방법^{4,6}, 다수의 PSD(position sensitive detector)와 다이오드 레이저로 구성된 metrology frame 을 이용한 방법^{7,9} 등이 연구되고 있다. 정밀 변위측정을 위해 널리 사용되는 레이저 간섭계는 측정 분해능이 수십 nm 이고, 측정 범위도 매우 크나, 다자유도의 변위 측정을 동시에 수행하기 위해서는 매우 복잡한 광학계를 구성해야 하며, 측정 장치 제작 비용이 매우 고가인 단점을 갖는다. 정전 용량형 변위 센서는 측정 분해능이 sub-nm 로 매우 좋으나, 측정 범위가 수십 μm 정도로 작으며 센서가격이 비교적 고가인 단점을 갖는다. 한편, Cuttino⁷, Schinstock⁸ 등은 레이저 다이오드 모듈과 PSD 를 이용하여 정밀 구동 시스템의 6 자유도 위치/자세 측정용 metrology frame 를 제안하였으며, 박원식, 조형석⁹ 등은 삼면반사체(3-facet mirror)와 PSD 를 이용한 6 자유도 변위 센싱 시스템을 제안하였다. 이러한 방식들은 응답속도 및 자세측정을 위한 각도 분해능이 매우 좋으며, 측정 장치의 구조가 간단하고 비교적 저가로 측정 시스템 구축이 용이한 장점을 지니고 있으나, 측정 원리상 직선변위 분해능이 PSD 자체의 측정 분해능에 의존함으로 xyz 의 3 축 병진운동 변위를 sub- μm 이하의 분해능으로 측정하는 것이 불가능하다. 이러한 병진운동에 대한 측정 분해능의 한계를 보완하기 위해 본 연구에서는 구면반사와 PSD 를 이용한 새로운 비접촉식 3 자유도 미소 변위 측정 시스템을 제안하고자 한다. 제안된 변위측정장치는 고정도의 구 반사경(spherical reflector)과 2 개의 PSD, 2 개의 레이저 다이오드 등으로 구성된다. 본 논문에서는 제안된 변위측정시스템의 타당성을 분석할 수 있는 측정 모델이 도출된다. 또한, 측정 시스템의 성능 및 특성을 평가하기 위해 측정 범위, 감도 및 선형성 등이 모의실험을 통해 분석된다. 이러한 모의실험 결과들로부터 측정 시스템의 성능을 효과적으로 구현하기 위한 설계 조건들을 제시하고 제안된 장치의 효용성을 검증한다.

2. 측정 원리

2.1 측정 시스템 구성

Fig. 1 은 본 논문에서 제안하는 비접촉식 3 자

유도 미소변위 측정 방법의 구성도를 보인다. 2 개의 레이저 다이오드에서 발생되어 빔 분할기(beam splitter)를 통과한 레이저 광선들은 각각 X와 Y 축을 따라 구(sphere)에 입사되며, 반사된 광원은 X와 Y 축에 대하여 수직으로 배치된 2 차원 소자인 PSD 평면에 입사 된다. 본 측정 시스템에 사용되는 구는 진구도(sphericity)가 수십 nm 인 금속 마스터 볼(precision master ball)이 사용되며, 구의 반경 R 의 치수 오차는 없다고 가정하였다. 초기 PSD 의 위치는 구에 반사되어 돌아온 광점(Beam spot)이 PSD 평면의 중심에 오도록 위치시킨다. 즉, 초기 위치에서 PSD 의 출력 전압이 0 이 되도록 PSD 의 위치를 조절한다. 2 차원 PSD 로부터 출력되는 레이저 광점의 좌표는 구의 위치 변화에 대한 정보를 내포하고 있다. 따라서, 2 개의 PSD 로부터 산출되는 레이저 광점의 좌표 이동 정보로부터 구의 3 자유도 병진운동을 측정하게 된다.

2.2 측정 모델

구의 3 자유도 이동 변위와 2 개의 PSD 에 맞힌 레이저 광점의 좌표 간의 관계를 구하기 위해, 제안된 측정 시스템에 대한 모델이 필요하다.

Fig. 2 는 측정 모델을 수립하기 위한 측정 시스템의 좌표계 및 위치 관계를 보인다. x_c, y_c, z_c 는 각각 구 중심의 x, y, z 축 방향에 대한 미소 변위량을 의미하며, $(x_{PSD1}, y_{PSD1}), (x_{PSD2}, y_{PSD2})$ 는 각각 PSD1 과 PSD2 에 맞힌 레이저 광점의 좌표를 나타낸다. Fig. 3 은 구면에서 레이저 광선의 반사 개념을 보이고 있다. 그림에서 A 는 구의 초기위치, B 는 구의 중심 좌표가 x, 또는 y 축 방향으로 이동했을 때의 구의 위치, C 는 구의 중심 좌표가 B

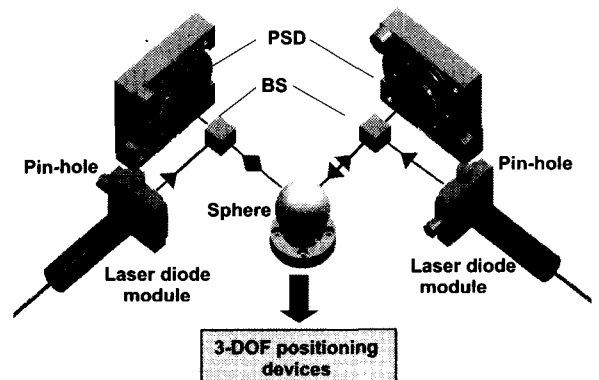


Fig. 1 Schematic drawing of measurement system

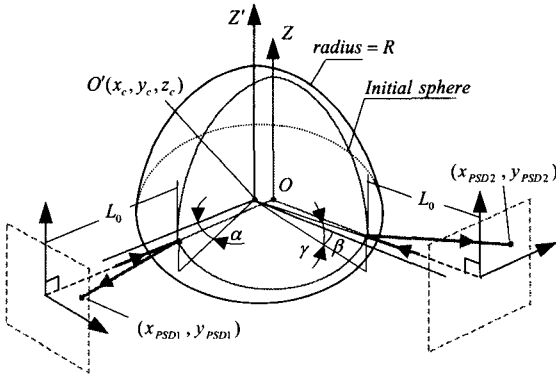


Fig. 2 Definition of coordinate system and geometrical parameters for modeling of measurement system

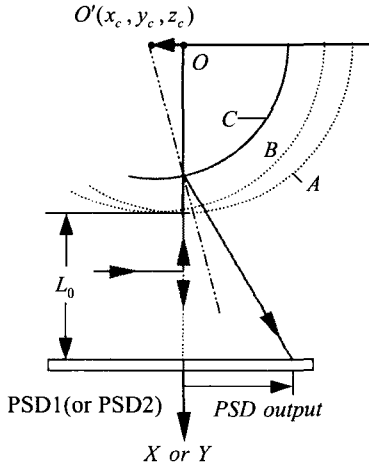


Fig. 3 2-D reflection model on spherical surface

의 위치로부터 z 축 방향으로 이동했을 때의 구의 위치를 나타낸다.

Fig. 3 에서 보는 바와 같이, 구의 중심이 각각 x, y, z 축으로 미소 이동함에 따라 레이저의 반사점도 같이 이동하게 되어 반사각이 변하게 된다. 이렇게 하여 구의 미소 병진 변위를 반사각의 변화로 바꾸어 줌으로써 PSD 상에 맺힌 광점의 위치 변화는 증폭된다. 따라서, 구의 미소 변위를 고감도로 감지할 수 있게 된다.

본 논문에서는 1 차적으로 레이저 광선을 직선으로 가정하고, 광선추적(ray tracing) 개념을 기초로 하여 광선 요소의 직선 방정식과 구 반사면의 평면 방정식을 이용하여 측정 모델을 구하였다. 측정 모델로부터 유도된 측정 시스템의 입출력 계산식은 다음과 같다.

$$x_{PSD1} = (L_o + R + x_c - \sqrt{R^2 - y_c^2 - z_c^2}) \tan 2\alpha \quad (1)$$

$$y_{PSD1} = (L_o + R + x_c - \sqrt{R^2 - y_c^2 - z_c^2}) \tan 2\gamma \quad (2)$$

$$x_{PSD2} = (L_o + R + y_c - \sqrt{R^2 - x_c^2 - z_c^2}) \tan 2\beta \quad (3)$$

$$y_{PSD2} = (L_o + R + y_c - \sqrt{R^2 - x_c^2 - z_c^2}) \tan 2\gamma \quad (4)$$

여기서, L_o 는 PSD 평면과 구면과의 거리를 나타내며, α, β, γ 는 다음과 같다.

$$\tan \alpha = \frac{y_c}{\sqrt{R^2 - y_c^2 - z_c^2}} \quad (5)$$

$$\tan \beta = \frac{x_c}{\sqrt{R^2 - x_c^2 - z_c^2}}$$

$$\tan \gamma = \frac{z_c}{\sqrt{R^2 - z_c^2}}$$

식(1)~(5)의 입출력 관계식을 이용하여 실제 측정을 수행하기 위해서는 $(x_{PSD1}, y_{PSD1}), (x_{PSD2}, y_{PSD2})$ 로부터 비선형 연립 방정식을 풀어 구의 중심 이동 좌표 x_c, y_c, z_c 를 구해야 한다. 이러한 작업을 수행하기 위해서는 수치적인 방법인 Newton-Raphson 법을 이용하면 빠르게 안정적으로 해를 구할 수 있다.¹⁰ 일반적으로 레이저 빔의 광속 강도분포는 단면에서 식(6)과 같이 중심으로부터 반경방향 거리 r 에 대한 가우시안 함수의 분포로 표현된다.

$$I(r) = \frac{2P}{\pi r_{beam}^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{r_{beam}^2}\right) \quad (6)$$

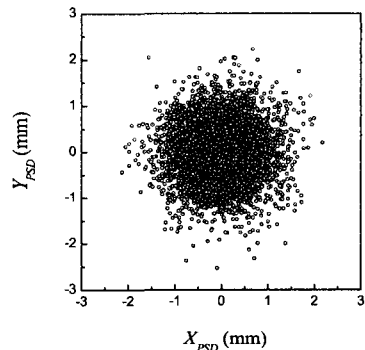


Fig.4 Distribution of laser beam reflected on PSD plane ($r_{beam}=0.1\text{mm}, L_o=30\text{mm}, R=5\text{mm}$)

여기서, P 와 r_{beam} 는 각각 레이저의 출력과 레이저 빔의 반경을 의미한다. 이러한 가우시안 빔은 단위 강도를 갖는 광선들의 밀도로서 모델링 할 수 있다. Fig. 4 는 가우시안 분포를 갖는 입사광이 구면에 반사되어 PSD 평면상에 산포된 단위 광선들의 출력분포를 식(1)~(5)를 이용하여 산출한 결과를 보이고 있다. 본 논문에서는 2 차원 PSD의 출력 특성을 고려하여 식(7)로부터 산출되는 결과값을 구면에 반사되어 돌아온 레이저 빔에 대한 PSD 상에서의 출력 좌표라고 가정하였다.

$$\hat{x}_{PSD} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{PSD}(i), \hat{y}_{PSD} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_{PSD}(i) \quad (7)$$

3. 측정 시스템의 성능 분석평가

3.1 측정 시뮬레이션(Simulation)

2 장에서 유도된 측정 모델을 바탕으로 제안된 변위 측정 시스템의 모의 측정 실험을 수행하였다. 모의 실험을 위해 정규 분포(normal distribution)를 지니는 25000 개의 단위 광선을 발생시켜 레이저 빔을 생성하였으며, 식(1)~(5)와 식(7)의 관계식을 적용하여 PSD 상의 광점의 궤적을 산출하였다.

Fig. 5 는 구 중심의 3 자유도 병진 운동을 1 차 유도별로 각각 $\pm 100\mu\text{m}$ 범위로 움직인 경우에 대한 측정 시뮬레이션 결과를 보인다. x 축을 따라 구가 움직인 경우는 PSD2 에서 횡 방향으로만 광점의 궤적이 나타나고 있으며, y 축을 따라 구가 움직인 경우에는 PSD1 에서 횡 방향으로만 궤적이 나타난다. 또한, z 축으로 움직인 경우에는 PSD1 과 PSD2 에서 종 방향으로만 궤적이 나타난다. Fig. 6 은 측정하고자 하는 구의 이동 변위(x_c, y_c, z_c)와 수치적인 방법으로 산출된 구의 이동 변위(x_m, y_m, z_m)를 비교한 것이다. 여기서, 구의 이동 변위는 측정하고자 하는 구의 이동 변위에 대해 PSD 상의 광점의 궤적을 구한 후, 식(1)~(5)의 관계식에 대입하여 Newton-Raphson 법을 이용하여 구한다. Fig. 6 의 비교 결과로부터 측정하고자 하는 구의 이동 변위와 수치적인 방법으로 산출된 구의 이동 변위가 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 7 은 측정하고자 하는 구의 이동 변위와 수치적인 방법으로 산출된 구 이동 변위와의 절대 오차를 각축에 대하여 산출한 결과를 보인다. 오차는 구의 이동 변위가 증가할수록 선형적으로 증

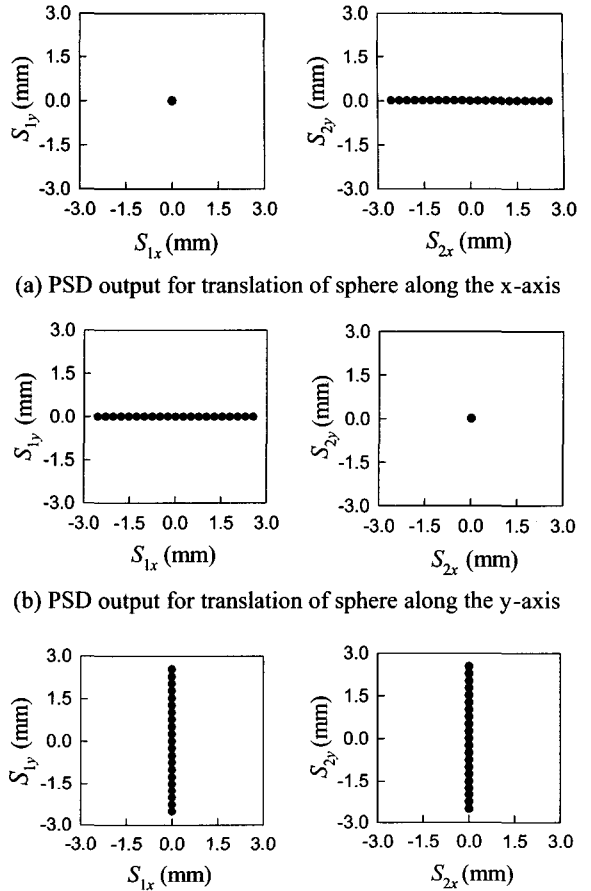


Fig. 5 Measurement of 3-DOF translational movement of Sphere ($R=5\text{mm}, L_o=30\text{mm}, r_{beam}=0.1\text{mm}$)

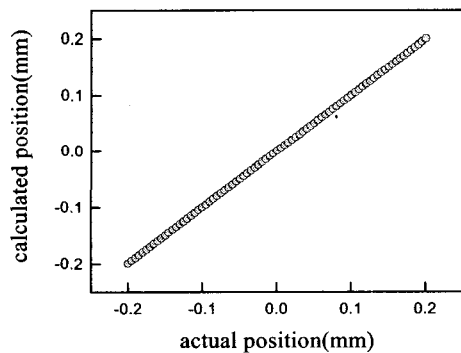


Fig. 6 Comparison between actual position and calculated position using inverse model ($R=5\text{mm}, L_o=30\text{mm}, r_{beam}=0.1\text{mm}$)

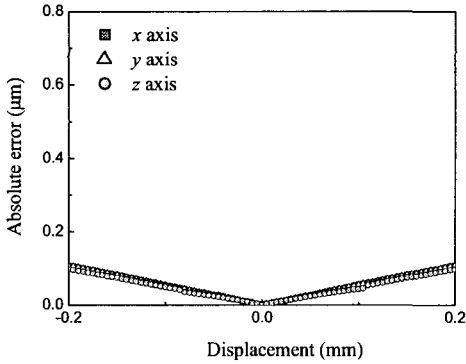


Fig. 7 Absolute error of displacement measurement ($R=5\text{mm}$, $L_0=30\text{mm}$, $r_{\text{beam}}=0.1\text{mm}$)

가함을 확인할 수 있다. 이러한 측정오차의 발생 원인은 구면 반사의 특성상 구의 이동변위가 증대 될수록 반사광의 산포는 증대되고, 레이저 빔의 분포모양이 원형모양에서 타원의 형태로 일그러져 분포의 비대칭성이 증대하기 때문이다.

3.2 선형성(Linearity)

대부분의 측정 시스템들은 정적인 입력과 이에 대한 출력이 선형적인 관계를 갖도록 설계된다. 따라서, 본 논문에서 제안된 변위 측정 시스템의 선형성을 평가하였다. 일반적으로 비선형적인 거동을 하는 측정 시스템에 대해 선형성의 평가 지수는 출력 범위에 대한 최대 선형성 오차의 백분율로서 표시한다.

$$\%(e_L)_{\max} = \frac{[e_L(x)]_{\max}}{r_o} \times 100 \quad (8)$$

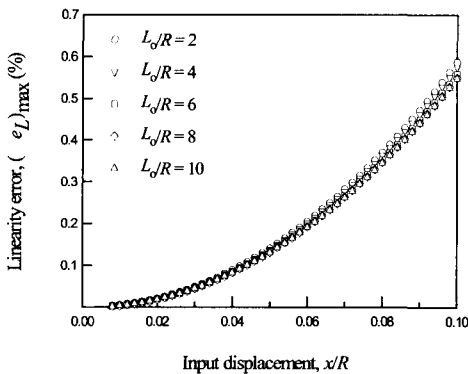


Fig. 8 Linearity error of proposed measurement system

여기서, r_o 는 출력 범위, $e_L(x)$ 는 입력값 x 에 대한 선형성 오차를 나타낸다. 식(8)으로부터 계산된 선형성 오차 평가 결과 각 축에 대한 입력변수 x_c/R , y_c/R , z_c/R 에 대하여 동일한 값을 보였다. 또한, Fig.8 에서 보는 바와 같이, L_0/R 의 변화에 대하여 선형성 오차가 거의 동일한 값을 보임을 확인할 수 있다. Fig.8에서 선형 오차가 0.1%, 0.2%, 의 경우 구의 최대 입력 변위의 한계는 각각 0.045, 0.06 정도 됨을 보인다.

3.3 측정 감도(Sensitivity)

모의 측정 실험 결과들에서 알 수 있는 바와 같이, x 축 방향과 y 축 방향에서의 구의 이동 변위는 각각 PSD2 평면과 PSD1 평면의 횡축에서만 출력 나타나고, z 축 방향에서의 구의 이동 변위는 PSD1 과 PSD2 평면의 종축에서 출력 나타난다. 따라서, 3 자유도 변위 측정 시스템의 각 축에 대한 측정 감도는 식(9)으로써 정의 될 수 있다.

$$K_x = \frac{\Delta S_{2x}}{\Delta x_c}, K_y = \frac{\Delta S_{1x}}{\Delta y_c}, K_z = \frac{\Delta S_{1y}}{\Delta z_c} \text{ or } \frac{\Delta S_{2y}}{\Delta z_c} \quad (9)$$

변위 측정 시스템의 선형성 오차가 0.1% 이 내인 입력 범위에 대하여 각 축에 대한 측정감도 K_x, K_y, K_z 는 거의 동일한 값을 보임을 확인할 수 있었다. Fig.9(a)와 Fig.9(b)는 구의 반경 R 과 PSD와 구면과의 거리 L_0 에 따른 x 축 방향에 대한 측정 감도 K_x 의 변화 특성을 보이고 있다. Fig.9(a)에서 구의 반경 R 이 작아질수록 측정 감도는 급격하게 증가하며, PSD와 구면과의 거리 L_0 에 비례하여 측정 감도가 증가함을 확인할 수 있다.

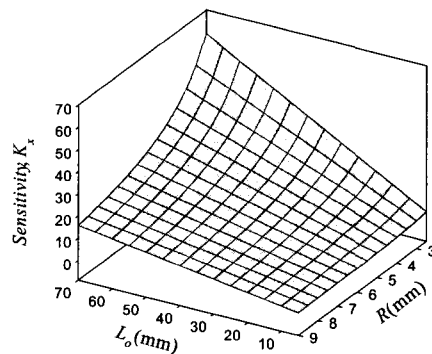


Fig. 9(a) Sensitivity K_x according to sphere radius R and PSD position L_0

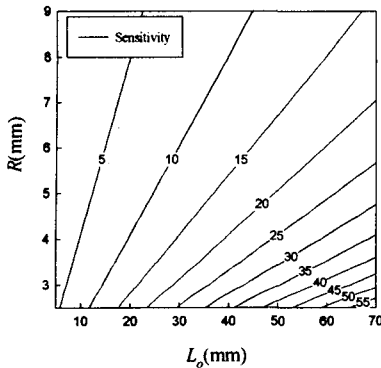


Fig.9(b) Contour plot of sensitivity K_x according to sphere radius R and PSD position L_0 .

또한, Fig. 9(b)의 등고선 그래프로부터 고감도의 변위측정을 위한 측정 시스템의 설계 조건(R , L_0)을 결정할 수 있다. 예를 들어, $R=5\text{mm}$, $L_0=50\text{mm}$ 로 할 경우, 측정 감도 K 는 약 20이다. 따라서, 이론적으로 측정 분해능이 $2\mu\text{m}$ 인 PSD를 사용하면 구의 변위를 $0.1\mu\text{m}$ 의 분해능으로 측정이 가능하다.

4. 결론

본 논문에서는 고정도의 구반사경과 2개의 PSD, 2개의 레이저 다이오드 등으로 구성된 새로운 광학식 3자유도 미소 변위 측정 시스템을 제안하였다. 제안된 측정 시스템에 대한 수학적 모델 및 입출력 관계식이 도출되었다. 측정 모델에 기초한 측정 시뮬레이션을 수행하여 구의 이동변위에 따른 PSD 상의 광점의 궤적으로부터 수치적인 방법에 의해 구의 3자유도 변위가 산출될 수 있음을 확인하였다. 측정 시스템의 선형성 평가 결과 선형오차가 0.1%의 경우, 각축에 대한 입력변위의 최대값은 구반경 R 의 0.045배가 됨을 확인하였다. 측정 시스템의 감도는 구의 반경 R 이 작아질수록 급격히 증가하고, PSD와 구면과의 거리 L_0 에 비례하여 증가하였다. 이러한 감도특성은 R 과 L_0 의 값을 적절히 선형함으로써 고감도의 3자유도 변위 측정이 가능함을 알 수 있었다. 예를 들어 선형오차가 0.1%이내인 입력범위 내에서 R 과 L_0 을 각각 5mm와 50mm로 하고, 측정 분해능이 $2\mu\text{m}$ 인 PSD를 사용할 경우, 각축에 대한 측정감도 K 는 이론적으로 약 20이며, 이는 $0.1\mu\text{m}$ 의 분해능으로 변위 측정이 가능함을 의미한다.

참고문헌

1. Kim, J. S., Chung, S. C., "Synthesis of an On-Line 5 Degrees of Freedom Error Measurement System for Translational Motion Rigid Bodies," J. of the KSPE, No. 15, No. 5, pp. 93-99, 1998.
2. Jenq Shyong Chen, Tzu Wei Kou and Shen Hwa Chiou, "Geometric error calibration of multi-axis machines using an auto-alignment laser interferometer," Precision Engineering, Volume 23, pp. 243-252, 1999.
3. Kuang-Chao Fan, Mu-Jung Chen, "A 6-degree-of-freedom measurement system for the accuracy of X-Y stages," Precision Engineering, Vol. 24, pp. 15-23, 2000.
4. Mike Holmes, Robert Hocken and David Trumper, "The long-range scanning stage: a novel platform for scanned-probe microscopy," Precision Engineering, Vol. 24, pp.191-209, 2000.
5. Mike Holmes, David Trumper, "Magnetic/fluid-bearing stage for atomic-scale motion control (the angstrom stage)," Precision Engineering, Vol. 18, pp. 38-49, 1996.
6. Renzo Vaccarone, Andrea Pozzo and Rosanna Puppo, "A cryogenic scanning stage with position control for a magnetic microscope," Physica B: Condensed Matter, Volumes 284-288, Part 2, pp. 2115-2116, 2000.
7. Cuttino, J. F., Schinstock, D. E. and Prather, M. J., "Three-dimensional metrology frame for precision applications," Precision Engineering, Vol. 23, pp. 103-112, 1999.
8. Schinstock, D. E., Cuttino, J. F., "Real time kinematic solutions of a non-contacting three dimensional metrology frame," Precision Engineering, Vol. 24, pp. 70-76, 2000.
9. Park, W. S., Cho, H. S., "Measurement Method for Fine 6-DOF Displacement of Rigid Bodies," J. of Control, Automations and Systems Engineering, Vol. 8, No. 3, pp. 208-219, 2000.
10. Namir C. Shammas, C/C++ Mathematical algorithms for scientists and engineers, McGraw-Hill, 1996.