

밀리구조물의 다자유도 미세 변위 측정법에 대한 연구

배의원*(한국과학기술원 대학원 기계공학과), 김종안(한국과학기술원 대학원 기계공학과), 김수현
(한국과학기술원 기계공학과), 곽운근(한국과학기술원 기계공학과)

A study on multi degrees of freedom fine motion measurement for milli-structure

Eui Won Bae(Mechanical Eng. KAIST), Jong-Ahn Kim(Mechanical Eng. KAIST), Soo Hyun Kim(Mechanical Eng. KAIST), and Yoon Keun Kwak(Mechanical Eng. KAIST)

ABSTRACT

Current technological development toward miniaturization requires smaller components. These components usually generate complex multi-DOF motions other than simple 1-DOF motion. Therefore it is essential to develop measurement methodology for 6-DOF motions. In this paper, a new 6-DOF measurement system for milli-structure is presented. This methodology basically employs the Optical Beam Deflection Method (OBDM) with a diffraction grating. A laser beam is emitted toward the diffraction grating which could be attached on the surface of a milli-structure and the incident ray is diffracted in several directions. Among these diffracted beams, 0th and $\pm 1^{\text{th}}$ order diffracted rays are detected by 4 Quadrant Photodiodes. From coordinate values from each detector, we can get information for 6-DOF motions with linearization method. Required resolutions for milli-structure measurement are sub-micrometer in translation and arcsec in rotation. Experimental results indicate that proposed system has possibility to satisfy this requirement.

Key Words : Six-DOF(6 자유도), milli-structure(밀리 구조물), diffraction grating(회절 격자), OBDM(광선 편향법)

1. 서론

최근의 기술의 발전경향은 소형화를 지향하고 있다^{1,2}. 이러한 소형화된 시스템의 개발에는 설계와 분석 및 가공 방법과 더불어 제작된 시스템의 검사 및 측정 장비가 필수적으로 필요하다. 지금까지의 관심사와는 달리 최근에는 밀리구조물과 같은 시스템의 경우에 공간상에서의 다자유도 움직임을 측정할 필요성이 커지고 있다. 이러한 밀리 구조물은 정밀한 움직임과 큰 힘을 낼 수 있으므로 정밀 기계, 정보저장 장치, 의료기기 등에 응용될 수 있다. 이러한 밀리 구조물의 예로는 HDD 헤드의 슬라이더나², ICVL(Ionic Polymer Gel Film) 등을 이용한 마이크로 액츄에이터(micro-actuators)³ 등이 있다.

지금까지의 선행연구로는 다음과 같은 몇 가지 경우가 있다. Bokelberg 등은 4 면체를 이용한 6 자유도 진동계(vibrometer)를 제안하였다. 이 장치는 광원과 감지기가 3 쌍이 필요하며 4 면체의 가공 정도에 따라 측정 성능이 영향을 받는다⁴. Gao 등은

격자 간섭계(grating interferometer)를 이용한 HDD의 슬라이더의 움직임 측정법을 제안하였다. 그러나 이 방법 역시 1 자유도의 움직임만 측정 할 수 있다⁵. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로, 회절격자를 이용한 6 자유도 변위 측정법을 제안 하였다. 제안된 측정 시스템은 간단한 구조, 안정적인 측정 성능, 빠른 측정속도, 단순한 신호 처리 회로를 가지면서도 높은 분해능 및 정밀도를 실현 할 수 있다. 또한 회절 격자 표식을 반사체로 이용함으로써 향후 실제 적용가능성을 높여준다고 볼 수 있다.

제 2 장에서는 측정원리에 대하여 설명한다. 그리고 측정시스템의 구조와 회절격자의 원리에 대하여 설명한다. 제 3 장에서는 선형화를 통한 기구학적 해석 결과와 선형화 오차에 대하여 논의한다. 제 4 장에서는 실험결과 및 분석을 하며 마지막으로 제 5 장에서 결론을 맺는다.

2. 측정 원리

회절 격자(diffraction grating)에 빛이 입사하면 산란하는데 이때 진행 방향은 입사광의 파장(wavelength), 회절 격자의 피치(pitch), 입사광이 회절 격자면과 수직인 방향과 이루는 각으로 결정된다. 만약 단파장의 입사광이 회절격자의 피치와 수직하지 않다면 회절광의 방향은 Fig. 1 와 같이 3 차원 공간에서 해석되어야 한다.⁶

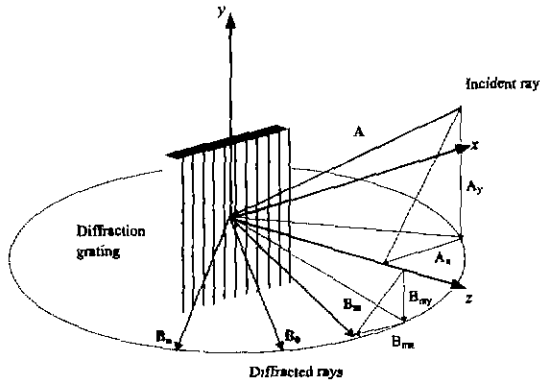


Fig. 1 3-dimensional diffraction of a monochromatic incident ray on a grating

여기서 A 는 단위 입사광 벡터, B 는 단위 회절광 벡터를 나타내며 B 의 아래첨자는 회절광의 차수(order)를 나타낸다. 그러므로 입사광과 회절광을 회절 격자에 고정된 좌표계에 나타내면 3 차원 회절 격자식을 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} B_{mx} &= A_x + m \frac{\lambda}{d} \\ B_y &= A_y \end{aligned} \quad (1)$$

만약 회절 격자의 자세가 변하면 회절 격자 좌표계에서 표현된 입사광의 성분들도 변하게 된다. 식 (1)에 의해 m 차 회절광의 방향벡터를 구함으로써 움직임을 측정할 수 있다. 그러나 회절 격자는 평면 변위에 대해서는 회절광의 방향을 바꾸어 주지 못하므로 본 연구에서는 입사광의 지름을 반사형 회절격자 보다 크게 한다. 이 경우 회절광의 발생위치가 변함으로써 위치 변화를 감지 할 수 있다. Fig. 2 와 같이 측정 시스템은 1 개의 광원, 3 개의 2 차원 감지기, 그리고 볼록 렌즈로 구성되어 있다. 0 차수 감지기의 렌즈는 회절격자의 움직임과 감지기

상의 움직임이 일대일 대응이 되도록 해준다.

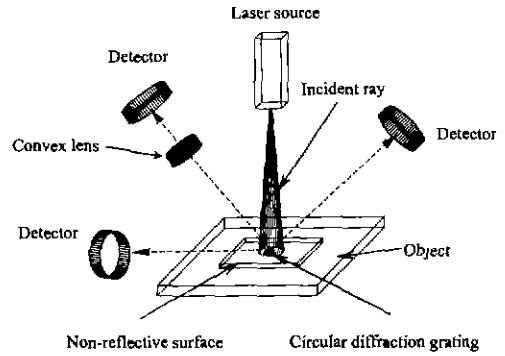


Fig. 2 Structure of the measurement system

3. 기구학적 해석

측정 대상물의 6 자유도 변위를 구하기 위해서는 회절 격자의 움직임과 감지기의 출력값의 관계를 나타내는 정기구학과 감지기의 출력값으로부터 역으로 회절격자의 자세값을 구하는 역기구학이 필요하다. 역기구학은 기준 좌표계와 회절 격자 좌표계 사이의 변환을 나타내는 6 개의 인자값을 구하는 것으로 이들은 기구학적 변수들과 복잡하게 연관이 되므로 수치적 반복 알고리즘에 의해 해를 계산하여야 한다. 그러나 측정영역이 작다고 가정하면 선형화에 의하여 닫힌 형태의 해를 구할 수 있다. 이러한 선형화를 위한 인자는 Fig. 4 에 나타내었다. 앞서 정의한 정기구학의 해는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.⁷

$$y_i = f_i(\bar{x}; \phi_j) \quad (i=1, \dots, 6 \quad j=1, \dots, n) \quad (2)$$

여기서 \bar{x} 는 회절 격자의 6 자유도 자세값, y_i 는 회절광의 감지기상의 좌표값, ϕ 는 측정시스템을 구성하는 기구학적 인자 값이다. 식 (2)를 테일러 급수로 전개하여 선형화 하면 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$y_i = f(\bar{x}_0) + \frac{\partial f}{\partial \bar{x}} \Delta \bar{x} + H.O.T \quad (i=1..6) \quad (3)$$

측정 영역이 작다는 가정 하에 초기값 $f(\bar{x}_0)$ 를 0 으로 만들면 다음과 같은 6x6 행렬식을 구할 수 있다.

$$Y = AX \quad (4)$$

여기서 Y 는 감지기의 출력값을 나타내고 A 는 선형화된 행렬을 나타낸다. X 는 측정 대상물의 6 자유도 입력 변위를 나타낸다. 측정 시스템의 구조가 대칭적이어서 3,4 열과 5,6 열은 유사한 값을 나타내었다.

Table 1 Linearization error

Axis	Max. linearization error (μm , arcsec)	Range (μm , arcsec)
x	± 0.316	± 100
y	± 0.227	± 100
z	± 0.409	± 100
α	± 1.580	± 216
β	± 0.126	± 216
γ	± 0.410	± 216

선형화에 의해 역기구학 문제는 쉽게 풀 수 있으나 고차항을 무시함으로써 선형화 오차가 존재하게 된다. 이러한 오차는 측정영역에 비례하므로 허용 가능한 오차를 가지는 측정영역을 알아볼 필요가 있다. 이를 위해 모의 실험을 수행하였다. 먼저 측정영역의 최대값을 정의한뒤 이를 64 가지의 입력조합에 대하여 입력변위 값과 선형화에 의하여 구한 변위값을 비교하여 차이값을 선형화 오차로 정의 하였다. 이중 가장 큰 값을 최대 선형화 오차로 정의하고 전체 측정 영역에 대하여 최대 선형화 오차가 1%이내의 조건을 만족시키는 영역을 구하였다. 이를 Table 1 에 나타내었다.

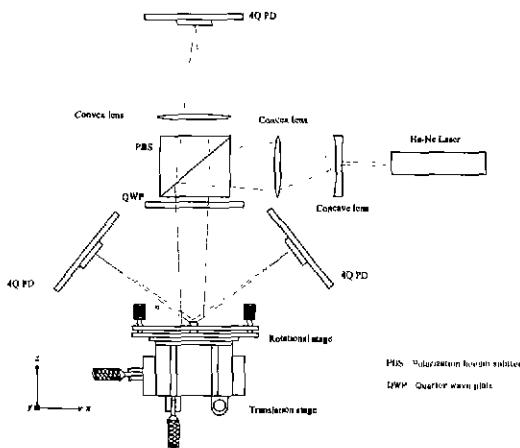
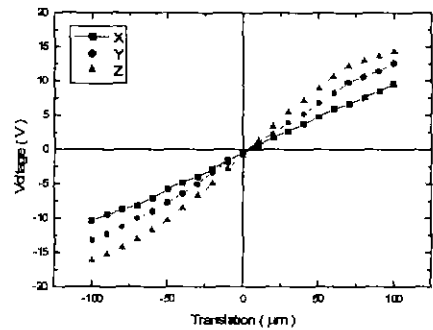


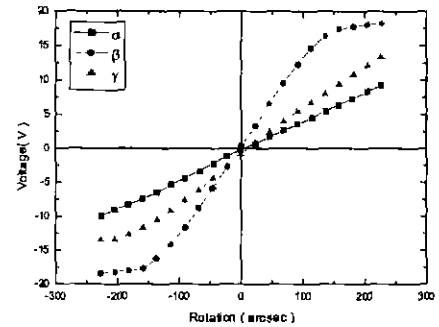
Fig. 3 Experimental setup

4. 실험

실험장치의 계략도는 Fig. 3 와 같다. 회절격자를 6 자유도 스테이지에 부착하여 임의의 6 자유도 움직임을 구현한다. 오목렌즈는 입사광의 크기를 회절 격자보다 크게 하는 역할을 한다. 편광 빔 스플리터(polarization beam splitter)와 4 분의 1 파장 판(quarter wave plate)은 편광상태를 조절하여 입사광이 0 차수 감지기로 진행하도록 한다. 감지기로는 높은 분해능을 얻을 수 있는 4 분할 포토 다이오드를 이용한다.



(a)



(b)

Fig. 4 Sensitivity of -1^{st} order detector

(a) Translation (b) Rotation (α : yaw β : pitch γ : roll)

측정 장치의 민감도를 알아 보기위해 출력신호를 구하였다. 여기서 0 차 와 -1 차 회절광의 세기는 각각 $23.5 \mu\text{W}$, $44.5 \mu\text{W}$ 로 나타났다. 회절광의 세기가 약하므로 감지기의 상의 크기를 조절할 필요가 있다. -1 차의 경우는 Fig. 4 과 같이 6 개의 입력에 대하여 모두 신호를 얻을 수 있다 반면에 0 차수 회절광의 경우는 감지기를 렌즈의 결상 평면에 위치 시킴으로써 X,Y 입력 변위에 대해서만 신호를 얻을 수 있었다. Fig. 6 (b)를 보면 yaw(α) 축에

대한 신호의 변화가 다른 축에 비하여 적게 나타났다. 이는 평면 변위에 대한 민감도가 떨어지는 광선 평행법(optical beam deflection method)의 특징임을 알 수 있다.

실제 실험의 경우 기계적 진동, 공기의 흐름, 온도의 변화와 광원의 불안정성에 기인하는 저주파 잡음이 존재한다. 이러한 잡음은 실험환경의 개선에 의하여 제거할 수 있는 잡음이므로 측정 시스템의 성능을 나타낸다고 볼 수 없다. 반면에 감지기 자체에 내재하는 고주파 잡음은 측정 시스템의 성능에 영향을 미치므로 분해능은 신호대 잡음비(SNR)의 역수로 나타낼 수 있다. 그러나 실제 측정 분해능은 시스템의 기구학적 변수와도 관련이 된다. 식 (4)로부터 행렬 A 의 역행렬과 감지기의 출력값을 이용하면 식 (10)과 같이 입력값을 계산할 수 있다^{8,9}.

$$X = A^{-1}Y \quad (5)$$

그러므로 측정 시스템에서 구현 가능한 분해능은 식 (11) 과 같이 표현 할 수 있다.

$$R_i = \left[\sum_{j=1}^6 [b_j, \sigma_j]^2 \right]^{1/2} \quad i = 1..6 \quad (6)$$

여기서 b_j 는 역행렬의 i 번째 열, j 번째 행을 나타내고 σ_j 는 1σ 의 잡음에서의 측정 불확도(uncertainty)로 정의되는 감지기의 분해능을 의미한다. 측정 영역은 선형도 5%를 만족시키는 구간을 선택하였다. 결과를 바탕으로 구현할 수 있는 분해능은 Table 2 와 같다.

Table 2 System performance

	Range (μm , arcsec)	Resolution (μm , arcsec)
X	± 100	0.083
Y	± 100	0.118
Z	± 50	0.027
α	± 144.3	0.262
β	± 103.1	0.022
γ	± 103.1	0.059

5. 결론

밀리구조물의 다자유도 변위측정을 위한 방법을 제안하였다. 간단한 구조로 높은 분해능을 구현

할 수 있으며 복잡한 기구학을 선형화를 통하여 풀 수 있음을 확인하였다. 실험을 통하여 제안된 구조는 마이크로 미터이하의 분해능을 구현 할 수 있는 가능성을 보여 주었다.

후 기

본 연구는 BK21 사업에서 일부 지원을 받았습니다.

참고문헌

1. T. Hirano, Long-Sheng Fan, T. Semba, W. Y. Lee, J. Hong, S. Pattanaik, P. Webb, W.H. Juan, and S. Chan, "Micro-Actuator For Tera-Storage", MEMS '99. 12th IEEE International Conference on , pp 441 -446, 1999.
2. W.S. Park, H.S. Cho. Y, G. Byun, D.K. Jung, N.Y. Park, "Measurement of 3D position and orientation of rigid bodies using a 3-facet mirror", SPIE, Intelligent Systems and Advanced Manufacturing, Vol. 3835, pp. 2-13, 1999, Boston, USA.
3. S. Tadokoro, S. Yamagami, M. Ozawa, T. Kimura and T. Takamori, "Multi-DOF Device for Soft Micromanipulation Consisting of Soft Gel Actuator Elements", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp 2177 - 2182, 1999.
4. E. H. Bokelberg. H.J. Sommer III, and M.W. Trethewey, "A six-degree-of-freedom laser vibrometer, par I: theoretical development", Journal of Sound and Vibration, Vol. 178, No. 5, pp. 643-654, 1994.
5. H. Garner, K. M. Lee, and L. Guo, "Design Analysis of a Grating Interferometer Sensor for HDD Servo-Track Writing", Proceedings of the IEEE/ASME, pp 126 - 131, 1999.
6. D. Post, B. Han, and P. Ifju, "High Sensitivity Moiré", Springer-Verlag, 1994
7. J.A. Kim, K.C. Kim, E. W. Bae, S.H. Kim, and Y. Kn Kwak, "Six Degree of Freedom Displacement Measurement System Using a Diffraction Grating", RSI, Vol. 71, No. 8, pp. 3214-3219, 2000
8. Eiji Higurashi, Renshi Sawada, and Takahiro Ito, "Monolithically Integrated Optical Displacement Sensor based on Triangulation and Optical Beam Deflection", Applied Optics, Vol.38, No. 9, pp 1746 - 1750, 1999.
9. K.S. Lee, Y. Cal, and A. Joneja, "High-resolution multidimensional displacement monitoring system", Optical Engineering, Vol. 36, No. 8, pp 2287 - 2293, 1997