

## PMP 형상 측정법의 위상보정에 관한 연구

이연태\*( 전북대 대학원 ), 강영준( 전북대 기계공학부 ), 황용선( 전북대 대학원 )

### A study on the phase calibration of the phase measuring profilometry

Y. T. Lee (Mecha. Eng. Dept., CBNU), Y. J. Kang (Mech. Eng. Dept., CBNU),  
Y. S. Hwang (Mech. Design Dept.,CBNU)

#### ABSTRACT

The 3-D measurement using a sinusoidal grating pattern projection is very attractive because of its high measuring speed and high sensitivity. When a sinusoidal amplitude grating was projected on an object, the surface-height distribution of the object is translated into a phase distribution of the deformed grating image. The phase-acquisition algorithms are so sufficiently simple that high-resolution phase maps using a CCD camera can be generated in a short time. The PMP technique is discussed, and the analysis of the systematic errors, the calibration procedure designed to determined the optimal setting of the measurement parameters is illustrated. Results of measurements and calibrations on the measurement plane objects are described.

**Key Words** : PMP ( Phase measuring profilometry ), phase measurement ( 위상 측정 ), Phase shifting method ( 위상 이동법 ),

#### 1. 서론

현대 산업의 생산체계에서 3차원 형상측정은 필수적인 의미를 갖고 있으며, 그 필요성이 날이 갈수록 증대되고 있다. 3차원 형상측정 기술은 가공 및 전자기술의 발달과 더불어 꾸준한 발전을 이루어 왔다. 3차원 형상 측정 기술은 과거에는 3차원 좌표측정기(Coordinate Measuring Machine : CCM)를 이용한 탐침 접촉을 통해 형상을 측정하는 접촉 방법이 있었으나, 이 방법은 측정물에 손상을 입힐 수 있으며, Probe의 보정이 필요하고 probe가 측정면에 닿지 못하는 경우에는 측정을 할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 최근에 와서는 광학을 바탕으로 한 비접촉 3차원 형상 측정 방법 ( Non-contacting 3-D Profile Measurement Method )이 연구되고 있다. 이런 광학을 이용한 3차원 형상측정 방법은 위의 단점을 해결할 뿐만 아니라 고속·고정밀도 측정이 가능하기 때문에 활발히 연구되고 있다.

본 연구에서는 광학식 비접촉 3차원 측정법에 대한 연구로써 간섭무늬 패턴을 물체에 투영하여, 생성된 간섭무늬의 변형정보에 위상이동법을 적용하여 3차원 물체의 위상정보를 획득하였다.

투영된 패턴을 CCD(charge Coule Device)로 기록하고, 기록된 정보를 컴퓨터에 입력한 뒤 소프트웨어를 이용하여 높이 정보를 추출하여 형상을 재구성하였다.

시스템의 주요 요소인 광학 투영기와 CCD를 이용한 이미지 기록장치의 기하학적 요인에 의한 영향 또한 무시할 수 없다. 본 실험에서 사용한 측정 시스템의 중요 요소인 두 시스템 사이의 관계에서 나타나는 오차요인을 보정하는 방법을 제시한다.

#### 2. 원리

##### 2.1 광학계 원리

광학계의 구성은 pattern을 생성하고 투영하는투영계와 pattern의 기록하는 기록계로 구성된다. 편이상 기록계를 측정 평면에 수직으로 위치시키고, 반드시 요구되는 조건은 아니지만 L로 표시되는 높이가 투영·기록계 같고, 투영계와 기록계의 거리 d에 같게한다. 한다. 이 조건을 이용하여 결과를 해석하는 수식을 보다 간단히 할 수 있다.

Fig. 1은 기본적인 형상측정 광학계의 구성을 보여주고 있다. Projector 부분에 pattern 투영 광학계를

설치하고, CCD에서 image를 획득, 기록하여 computer로 처리하게 된다. Projector 부분에서 sinusoidal grating pattern을 생성하고 투영하게 되는데, laser 간섭계를 구성하여 투영하거나, computer programming으로 grating pattern을 생성해서 투영할 수 있다.

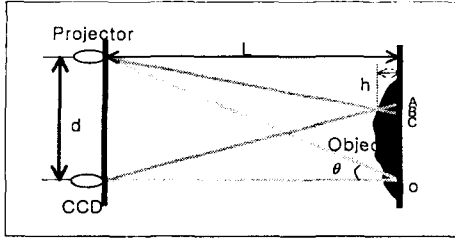


Fig. 1 Optical geometry of the measuring system

기준면 위에 투영된 간섭격자 무늬의 밝기 정보는 다음 식으로 표현된다.

$$I_R = a(x, y) + b(x, y) \cos \phi(x) \quad (1)$$

a는 화상의 배경 밝기를 나타내고, b는 간섭무늬의 명암대비를 나타낸다.  $\phi$ 는 각 지점에 존재하는 고유한 위상으로써, 기준면에서의 각 점은 어느 기준점에 대하여 다음과 같은 고유한 위상값을 가진다.

$$\phi_c = 2\pi n + \phi_c' \quad (2)$$

n은 순차적으로 정해지는 정수이며,  $\phi_c'$ 는 0에서  $2\pi$  사이의 값을 가진다.

위상은 CCD에서 밝기 정보로 검출된 화상에 위상이동법을 적용하여 구할 수 있다. 즉, 한번 영상신호를 컴퓨터에 저장한 뒤 격자피치의  $1/N$  만큼 줄무늬 방향에 직각으로 이동시키고, 각각 저장하여 N개의 영상이미지를 얻게 된다. N개의 영상이미지를 이용하여 위상은 다음 관계로 산출한다.

$$\tan \phi_c' = \frac{\sum_{n=1}^N I_n \sin(2\pi n/N)}{\sum_{n=1}^N I_n \cos(2\pi n/N)} \quad (3)$$

이 식에 의한 위상은  $2\pi$ 의 계단형으로 나타나지만 실제의 위상분포는 연속이기 때문에 식의 n값을 적절히 조정하여야 한다. 이와 같이 산출된 위상값은 적절한 기하학적 관계를 이용하여 기준면으로부터의 높이를 환산하는 과정을 거친다

높이 산출에 대한 관계식은 기하학적 관계에서 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$h(x, y) = \frac{AC \cdot L}{d + AC} \quad (4)$$

여기서 AC는 기준면과 물체면의 위상차로 획득한 위상값으로 나타낼 수 있다.

$$AC = p_o \frac{\Delta \phi(x, y)}{2\pi} \quad (5)$$

$p_o$  : 투영간섭무늬 격자의 pitch

$\Delta \phi$  : 기준면과 물체면의 위상차

기준면과 물체면 위상차에 의한 물체의 측정 위상값이 선분 AC와 대응하기에는 여러 가지 오차 요인이 존재할 수 있으나, 기본적으로 위와 같은 위상값으로 물체의 각 점에서의 높이정보를 구할 수 있게 된다.

$$h(x, y) = \frac{p_o \Delta \phi L}{2\pi d + p_o \Delta \phi} \quad (6)$$

## 2.2 4-buckets 위상이동법

투영계에 의하여 삼각함수형 밝기 정보를 가지는 sinusoidal grating pattern을 투영하고, grating pattern의 pitch의  $1/4$ 에 해당하는 만큼 이동하여 상대적인 위상차 (각  $\pi/2$ )를 지나는 4개의 화상을 생성하게 된다. 즉  $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 가 되도록 순차적으로 이동시켜 각각의 위상이동에 대한 화상 ( $I_1, I_2, I_3, I_4$ )을 구할 수 있다. 위상이동량을 화상처리 장비에 입력한 후 이를 물체의 각 지점에서의 위상값을 구하면  $2\pi$  마다 불연속성을 지니게 되는 위상도(phase-map)를 얻을 수 있다. 각각의 위상에서의 재생강도는 다음 식과 같이 나타낸다.

$$I_1 = A(x, y) + B(x, y) \cos[\phi(x, y)] \quad (7)$$

$$I_2 = A(x, y) + B(x, y) \cos[\phi(x, y) + \frac{\pi}{2}] \quad (8)$$

$$I_3 = A(x, y) + B(x, y) \cos[\phi(x, y) + \pi] \quad (9)$$

$$I_4 = A(x, y) + B(x, y) \cos[\phi(x, y) + \frac{3\pi}{2}] \quad (10)$$

측정물체 표면의 각 점들의 위상값을 얻기 위해 윗식에서 위상( $\phi$ )에 대해 정리하면 다음 식과 같이 나타낸다.

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \quad (11)$$

## 2.3 측정 위상보정

PMP 측정법은 투영계와 기록계의 기하학적 구성과 광학적인 문제에 의해서 기본적인 보정 오차를 가지고 측정하게 된다. 본 실험에서는 측정법이 기본적으로 가정하고 측정하게 되는 오차문제를 해결하고자 보정 알고리즘을 제시하고자 한다.

일반적으로 광학 PMP 형상 측정의 경우에 측정면과 광학계의 높이가 피측정물에 비해서 상당히 큰 경우, 몇 가지 측정 요인에 대해서 가정하게 되는 문제에 대해서 보정을 실시하고자 한다.

먼저, Fig. 2에서 보이는 바와 같이 CCD와

projector에 의해서 발생하는 문제로 CCD에서 높이 방향으로 측정 영역이 작아지게 됨으로써, pattern의 높이 방향에 대한 측정 파장이 지점에 따라 다르게 나타난다. 또한 projector가 측정면에 수직으로 투영하지 않으므로 기준면에서 A와 B 지점의 측정 pitch가 다르게 적용됨을 알 수 있다. 이러한 원인으로 인해서 일정 높이면의 측정을 행할 경우 오차로 기인하여 정확한 측정이 이루어질 수 없게 된다. 이를 보정하기 위해서 기준면과 평행한 측정면으로 측정된 위상값과 비교하여 보정을 실시한다. 즉, 일정 높이 측정면에 대해서 측정된 위상값이 기울어짐을 확인할 수 있게 된다.

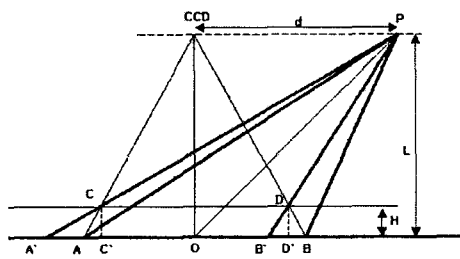


Fig. 2 Optical geometry

먼저 기본 측정식 (6)에 pitch와 x 방향에 측정 지점의 위상을 보정하여 측정 보정을 실행한다.

$$h(x, y) = \frac{p(x) \Delta\phi(x) L}{2\pi d + p(x) \Delta\phi(x)} \quad (12)$$

기하학적 관계식을 이용하여 측정 시스템에서 주어지는 측정 요소값을 적용하여 pitch의 변화값을 x 측정 지점에 대한 pitch 값으로 표현할 수 있다.

$$p(x) = \frac{p_0 \cos(\theta' - \theta)}{\cos \theta'} \\ = \frac{p_0 \cos[\arctan(\frac{d+x}{L}) - \arctan(\frac{d}{L})]}{\cos[\arctan(\frac{d+x}{L})]} \quad (13)$$

CCD 획득 각도( $\beta$ )의 영향으로 측정 지점 x에 대해 위상값이 다르게 적용됨을 알 수 있다. 이때 측정된 위상을 다음 식으로 보정할 수 있다.

$$\Delta\phi(x) = \frac{\cos \theta \cos \beta}{\cos(\theta + \beta)} \Delta\phi_M \\ = \frac{\cos[\arctan(\frac{d+x}{L})] \cos[\arctan(\frac{x}{L})]}{\cos[\arctan(\frac{d+x}{L}) + \arctan(\frac{x}{L})]} \Delta\phi_M$$

### 3. 실험

#### 3.1 실험장치

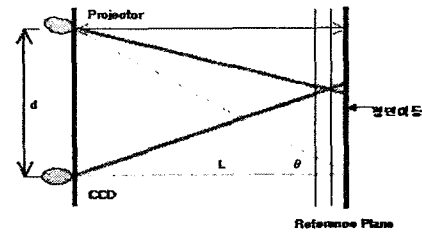


Fig. 3 The measuring system

Fig. 3은 실험 장치의 구성을 나타낸다. 광원으로는 상용 LCD projector를 사용했으며, CV-M10 흑백 CCD camera를 사용하였다. 이미지 처리를 위하여 프레임그래버(Frame grabber)는 Matrox사의 Meteor-II를 사용하였다. 높이방향에 대한 기준면을 이동시키기 위하여 micrometer를 이용하여 5mm 간격으로 높이 방향 위상을 측정하였다. 측정 시스템을  $L = 735\text{mm}$ ,  $d = 250\text{mm}$ 로 구성하였다.

#### 3.2 실험결과

시스템의 주요한 구성 요소들의 조건 고정하고, 높이방향에 대한 측정을 실시하여 기준면으로부터의 높이방향 위상을 측정하였다.

Fig. 4는 기준면의 측정위상과 높이면 측정 위상의 차이로 실제 높이면의 측정 위상을 나타낸다. 높이 방향에 대해 위상의 변화가 일정하게 보이고 있으나, 각 측정면에 있어서, 위상이 기울어짐 또한 확인할 수 있다. 이는 시스템 자체의 오차에 기인하는 것으로 보정의 필요성을 가지고 있다.

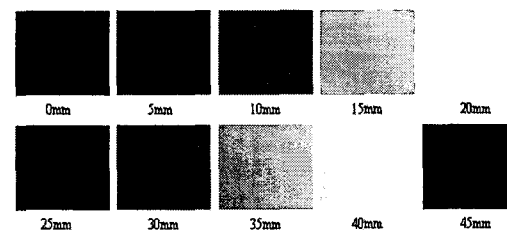


Fig. 4 The phase of measuring plane

#### 3.3 측정 위상 보정

Fig. 5는 실제 높이면과 측정 위상 값을 비교하기 위해서 실제 높이면에 대한 계산된 위상값과 높이면

의 측정 위상의 평균을 비교하였다.

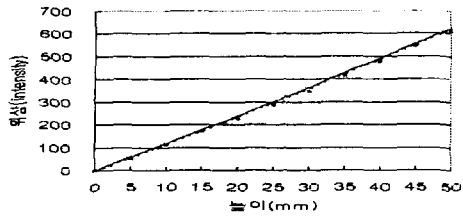


Fig. 5 실측 위상과 계산 위상 비교

각 높이 측정면의 위상은 projection 방향 등의 시스템의 기본적인 영향으로 인해 위상이 기울어져 있음을 확인 할 수 있다. 이는 측정의 오차로 작용한다. Fig. 6은 실제 측정된 측정면의 위상이 기울어짐을 보여준다.

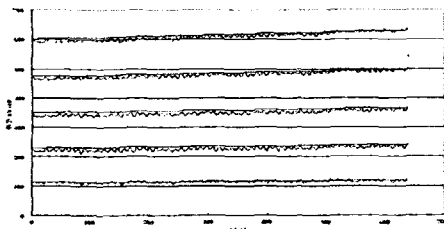


Fig. 6 10mm 간격의 높이 측정면 위상

각 측정면의 위상 기울어짐은 앞에서 제안한 위상보정방법으로 인하여 위상을 보정하여 실 측정과의 오차를 최소화 할 수 있게 된다.

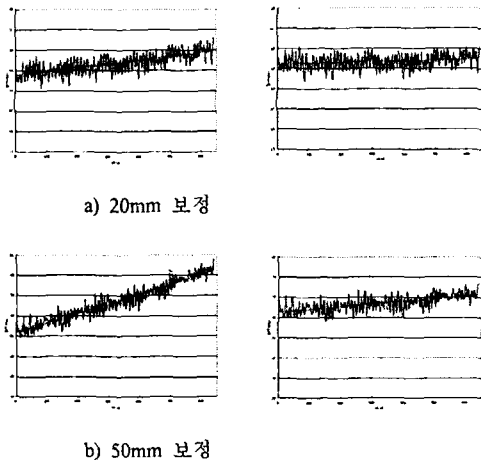


Fig. 7 측정면의 위상보정

#### 4. 결론

본 연구는 광학 형상 측정법의 오차기인문제에 대한 보정을 실시하기 위하여, 기본적인 측정시스템

을 구성하여 측정을 실시하고, 보정의 오차를 확인하고, 보정을 위한 실험으로 micrometer를 이용하여 높이방향으로 이동된 측정면의 위상을 측정하여, 측정면의 위상을 보정하였다.

기본적인 광학 형상측정법인 PMP 법에서 광학계와 기준면의 높이가 피측정물의 높이보다 상당히 클 경우 무시되어지고 있고, 광학계의 구성이 crossed optical axes geometry 구조로 시스템이 형성되어 투영 격자의 pitch값이 고정되지 않는다. 이에 대한 광학 형상 측정법의 보정 방법을 제안하였다.

#### 참고문헌

1. V. Srinivasan, H.C. Liu, and Maurice Halioua " Automated phase-measuring profilometry : a phase mapping approach " Applied Optics, Vol.24, No.2, pp. 185-188, 1985
2. M. Chang and C-S. Ho " Phase-measuring profilometry using sinusoidal grating " Experimental Mechanics. pp. 117-122, 1993
3. Wansong Li , Xianyu Su , Likun Su and Liqun Xiang " A practical coordinate mapping method for phase-measuring profilometry " SPIE Vol. 3558 pp. 125-130
4. Wang, Ming and Zhong, Jinggang " Automated fringe analysis profilometry of 3-D diffuse objects " SPIE Vol. 2899 pp. 197-203, 1996
5. Giovanna Sasoni, Matteo Carocci, and Roberto Rodella " Three-dimensional vision based on a combination of gray-code and phase-shift light projection : analysis and compensation of the systematic errors " Applied Optics Vol. 38 No.31 pp. 6565-6573, 1999
6. Peisen S. Huang and Fu-Pen Chiang " Recent advances in fringe projection technique for 3-D shape measurement " SPIE Vol. 3783 pp. 132-142, 1999
7. Jie-Lin Li, Xian-Yu Su, Hong-Jun Su, Sonyoung S. Cha " Removal of carrier frequency in phase-shifting techniques " Optics and Laser Engineering 30 pp. 107-115, 1998
8. Zheng-Feng Hu, Cheng-lin Luo and Jian-Qin Zhou " 3-D Diffuse object profilometry based on analysis the intensity of grating pattern " SPIE Vol. 2866 pp 493-496, 1996