

## 간섭무늬 투영 방식의 3차원 형상 측정

이연태\* ( 전북대 대학원 ), 강영준 ( 전북대 기계공학부 ), 박낙규, 황용선 ( 전북대 대학원 )  
백성훈 ( 한국원자력연구소 )

The shape measurement of 3D object by using the method of interference pattern projection.

Y. T. Lee (Mecha. Eng. Dept., CBNU), Y. J. Kang (Mech. Eng. Dept., CBNU), N. K. Park , Y. S. Hwang (Mech. Design Dept.,CBNU), S. H. Baik (KAERI)

### ABSTRACT

The 3-D measurement using interference 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 pattern was generated by a interferometer, and a PZT was used to shift the fringes on the target surface. The phase-acquisition algorithms are so sufficiently simple that high-resolution phase maps using a CCD camera can be generated in a short time. A working system requires a interferometer, a PZT, and a detector array interfaced to a microcomputer. Results of measurements on the diffused test objects are described..

**Key Words** : Shape measurement ( 형상측정 ), Phase ( 위상 ), Phase shifting method ( 위상이동법 ), Interference fringe ( 간섭무늬 ), PZT ( Piezo-eletric Transducer ), Image processing ( 화상처리 )

### 1. 서론

기계가공의 정밀도와 생산성 향상을 꾀하면서 자동화 기술의 급진적인 발전이 이루어지게 됨에 따라 정밀기계 부품의 품질 검사 등을 위한 3차원 표면 형상측정 기술의 필요성이 날이 증대되고 있다. 또한 현대 산업의 생산체계에서 3차원 형상측정은 필수적인 의미를 갖는다. 3차원 형상측정 기술은 가공 및 전자기술의 발달과 더불어 꾸준한 발전을 이루어 왔다. 3차원 자유곡면 형상측정기술(3-D Profile Measurement Method)은 가공물의 치수검사 및 형상 측정, 기존 산업제품의 역 복원 등의 공학분야뿐만 아니라 최근에는 인체를 측정대상으로 하는 의류 및 의학산업은 물론 오락산업의 가상현실 구현에 이르기까지 여러 분야로 점차 사용이 확대되고 있다. 이러한 다양한 분야에 요구를 만족시킬 수 있는 3차원 형상 측정 기술은 과거에는 3차원 좌표측정기 (Coordinate Measuring Machine : CCM)를 이용한 탐침 접촉을 통해 형상을 측정한 접촉 방법이 있었으

나, 이 방법은 측정물에 손상을 입힐 수 있으며, Probe 의 보정이 필요하고 probe가 측정면에 닿지 못하는 경우에는 측정을 할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 최근에 와서는 광학을 바탕으로 한 비접촉 3차원 형상측정방법(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 laser의 가간섭성을 이용한 간섭무늬 패턴을 물체에 투영하여, 생성된 간섭무늬의 변형정보에 위상이동법을 적용하여 3차원 물체의 위상정보를 획득하였다. Laser의 간섭성에 의하여 생성되는 삼각함수형 밝기 정보를 가지는 간섭무늬를 CCD(charge Coule Device)로 기록하고, 밝기 정보를 가지는 이미지를 컴퓨터에 입력한 뒤 소프트웨어를 이용하여 높이 정보를 추출하여 형상을 재구성하였다.

시스템의 주요 요소인 간섭계를 이용한 격자 투

영기와 CCD를 이용한 이미지 기록장치의 기하학적 요인에 의한 영향 또한 무시할 수 없다. 본 실험에서 사용한 측정 시스템의 중요 요소인 두 시스템 사이의 관계를 살펴봄으로써 측정정밀도에 미치는 영향을 알아보았다.

## 2. 원리

### 2.1 광학계 원리

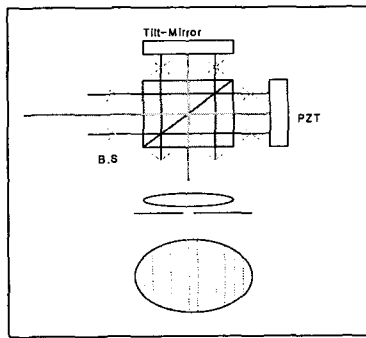


Fig. 1 Interferometer for fringe pattern

Fig. 1 에서 보는 것처럼 마이켈슨 간섭계의 원리를 이용하여 laser beam을 beam splitter에 의하여 분할하고, mirror에서 반사되어 나온 beam을 다시 모아서 간섭이 형성된 광을 측정광원으로 사용한다. 이는 레이저가 가간섭성 광원이기 때문에 가능한 현상으로, 생성된 간섭무늬는 한쪽 mirror의 tilt 정보를 이용하여 원하는 간섭무늬의 방향과 주파수를 조절하여 투영할 수 있게 된다.

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 출무늬 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 거쳐야 한다

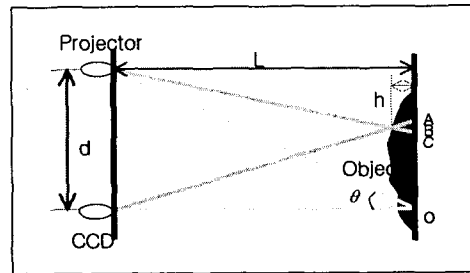


Fig. 2 Optical geometry of the measuring system

Fig. 2 는 기본적인 3차원 측정 광학계의 구성을 보여주고 있다. 광학계 측면에서 보면 laser beam을 이용하여 간섭무늬를 생성하고 이를 투영시키는 투영계와 투영된 간섭무늬 격자를 기록하는 기록계로 구성된다. 편의상 기록계를 측정 평면에 수직으로 위치시키고, 반드시 요구되는 조건은 아니지만 L로 표시되는 높이가 투영·기록계에 같게 한다. 이 조건을 이용하여 결과를 해석하는 수식을 보다 간단히 할 수 있기 때문이다.

기하학적 관계에서 다음과 같은 관계식을 얻을 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 간섭무늬격자를 기준면에 투영하고, 기록계를 기준면의 밝기 정보를 획득한다. 각 지점의 간섭 위상값을 알아내기 위하여 PZT(Piezo-Electric Transducer)를 부착시킨 거울을 광경로에 설치하여 레이저 파장의 수분의 일 정도로 미세 이동시켜 아래 식과 같이 상대적인 위상 차(각각  $\pi/2$ )를 지니는 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.

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

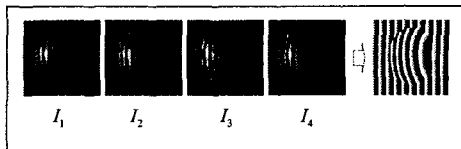


Fig. 3 The 4-Buckets phase shifting method

## 3. 실험

### 3.1 실험장치

Fig. 4과 Fig. 5는 실험 장치의 구성과 화상처리과정을 나타내고 있다. 광원으로는 파장이 632.8nm인 He-Ne 레이저를 사용하였고, 카메라는 CV-M10 흑백 CCD를 사용하였다. 이미지 처리를 위하여 프레임그래버(Frame grabber)는 Matrox사의 Meteor-II를 사용하였다. PZT를 laser 파장의 1/4만큼씩 이동하여 위상이동법을 적용하였다. 먼저 기준격자의 위상도와 변형격자의 위상도를 구한 다음 이들의 광 강도값을 빼주는 방법으로 측정하였다

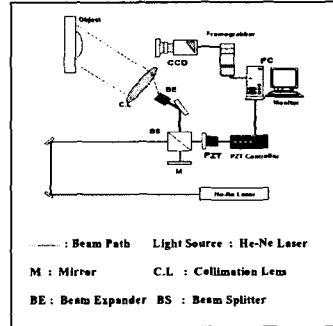


Fig. 4 The Diagram of the measuring system

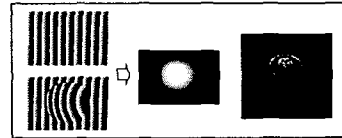


Fig. 5 The Image Processing

측정위상이  $2\pi$  범위를 벗어나는 경우  $\arctan$  특성상  $2\pi$  마다 불연속성을 지니게 된다. 이는 위상펼침(unwrapping)에 의해 연속적인 표면으로 나타낸다.

### 3.2 실험결과

시스템의 주요한 구성 요소들의 조건을 달리하여 측정하였다. Fig. 6은 fringe pattern 과 변형격자의 위상도 그리고 기준면의 위상을 제거한 물체 위상도를 나타낸 것으로 투영조건에 따른 측정위상을 확인할 수 있다.



Fig. 6-1 L = 440mm d = 400mm  
p = 8.46mm

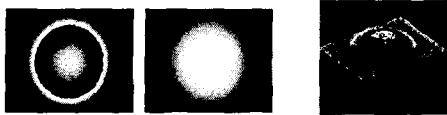


Fig. 6-2 L = 440mm d = 400mm  
p = 3.86mm



Fig. 6-3 L = 440mm d = 250mm  
p = 4.23mm

Fig. 7과 Fig. 8 은 조밀한 격자를 투영하고, 두 물체에 대해 같은 투영조건으로 측정을 실행한 측정 위상도와 unwrapping 위상도, 그리고 3차원 이미지도. 위상 변화 폭을 크게 하여 측정도를 높일 수 있으나, 물체에 의한 그림자가 형성되어 측정이 불가능함을 볼 수 있다.

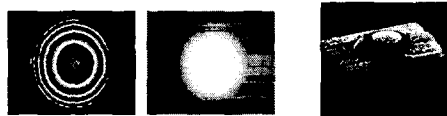


(a) 크기가 큰 물체

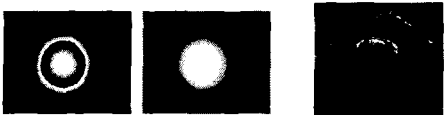


(b) 크기가 작은 물체

Fig. 7  $L=520\text{mm}$   $d=145\text{mm}$  ( $\theta=15.6^\circ$ )  $p=1.75\text{mm}$



(a) 크기가 큰 물체



(b) 크기가 작은 물체

Fig. 8  $L=520\text{mm}$   $d=420\text{mm}$  ( $\theta=38.9^\circ$ )  $p=1.54\text{mm}$

#### 4. 결론

본 연구는 laser의 간섭패턴을 이용한 비접촉 3차원 형상 측정법으로 laser를 광원으로 하는 간섭계를 구성하였다. 간섭계에 의하여 형성된 간섭무늬 패턴을 투영하고, 간섭계 내의 광 경로에 PZT를 설치하여 위상이동법(phase shifting method)을 적용하여 물체의 형상을 측정하는 시스템을 구성하였다.

광학적 측정방법이기 때문에 물체에 따라서 표면 반사도가 일정치 않거나 혹은 국부적으로 그림자가 발생하여 가시도를 저하시켜 측정결과의 신뢰도를 감소시킬 수 있으나, 적절한 측정 조건하에서 측정을 실행하고, 위상이동법을 적용함으로써 간섭무늬 패턴에 존재하는 작은 노이즈에 대해 무시할 수 있음을 알 수 있었다.

측정물체에 대하여 평면을 기준으로 측정하였으므로 측정물체의 높이에 대한 격자 pitch의 변화 등을 고려해야 할 것으로 사료된다. 또한 측정시스템의 투영 조건에 대하여 적절한 수치의 측정이 필요하다.

#### 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