

# Digital moire 형상측정 시스템의 보정에 관한 연구

김도훈\*, 유원재<sup>+</sup>, 박낙규<sup>++</sup>, 강영준<sup>+++</sup>

A Study on the Calibration of Shape Measurement System Using Digital moire

Do-hun Kim\*, Weon-jae Ryu<sup>+</sup>, Nak-kyu Park<sup>++</sup>, Young-june Kang<sup>+++</sup>

## Abstract

Moire topography method is a well-known non-contacting 3-D measurement method as a fast non-contact test for three-dimension shape measuring method. Recently, it's important to study the automatic three-dimension measurement by moire topography because it is frequently applied to the reverse engineering, the medical, the entertainment fields. Three-dimension measurement using projection of moire topography is very attractive because of its high measuring speed and high sensitivity.

In this paper, the classical moire method is computerized-so called digital moire. when a virtual grating pattern is projected on a surface, the captured image by the CCD camera has three-dimension information of the objects. The moire image can be obtained through a simple image processing and a reference grating pattern. and it provides similar results without physical grating pattern. digital projection moire topography turns out to be very effective for the three-dimension measurement of objects.

Using different N-bucket algorithm method of digital projection moire topography is tested to measuring object with the 2-ambiguity problem. Experimental results prove that the proposed scheme is capable of finding measurement errors that decreased more by using the four-three step algorithm method instead of the same step in the phase shifting of different pitch.

**Key Words :** Non-contacting 3-D Measurement Method(비접촉 3차원 측정법), Projection Moire Topography(영사식 무아래 측정법), Virtual Grating(가상격자), Two-wavelength Method(2중 파장법), Phase Shift(위상이동)

\* 김도훈, 전북대학교 기계설계학과 대학원(optics@mail.chonbuk.ac.kr)

주소: 561-756 전북 전주시 덕진구 덕진1동 664-14

+ , ++ 전북대학교 기계설계학과 대학원

+++ 전북대학교 기계항공시스템 공학부

## 1. 서론

3차원 형상측정기술(3-D Profile Measurement Method)은 가공품의 치수검사 및 형상측정 등의 공학분야뿐만 아니라 최근에는 의류산업 및 의화산업은 물론 오락산업의 가상 현실 구현 등 여러 분야로 점차 사용이 확대되고 있다.

이러한 요구를 만족시킬 수 있는 광학을 바탕으로 한 비접촉 3차원 형상측정방법(Non-contacting 3-D Profile Measuring Method)은 고속 고정밀도 측정이 가능하기 때문에 활발히 연구되고 있다.

광학을 이용한 대표적인 3차원 비접촉 측정방법의 하나로 무아레 현상을 이용한 그림자식 무아레가 처음 제안되었으며, 이후 영사식 무아레를 제안하여 그림자식 무아레의 단점인 격자의 크기가 측정물체보다 커야 한다는 점과 측정물체와 격자사이의 거리 제한 문제를 해결했다. 또한 3차원 형상정보를 포함하는 무아레 무늬 해석 방법으로 광간섭무늬 해석에 사용되는 위상 이동법<sup>(1)(2)</sup>을 사용함으로써, 측정 분해능이 향상되어 무아레 무늬 형태에 영향을 받지 않고 측정이 가능하게 되었다

2중파장 영사식 무아레 방법에서 기존의 물리적인 격자 대신 컴퓨터를 사용하여 피치가 다른 두개의 가상 기준격자를 만든다. 이때, CCD카메라로 획득한 영상을 위상이동을 시킬 때 Digital Moire의 특성상 Pixel단위로 위상이동을 시킨다이에 본 연구에서는 2중 파장 영사식 무아레에서 서로 다른 두 피치에 대해 Pixel단위의 위상이동시 등간격 위상이동을 할 수 있도록 다른 두 피치에 대해 서로 다른 N-bucket 위상이동법을 적용하여 높은 측정 분해능은 그대로 유지하면서도 측정하고자 하는 물체의 불연속적인 단차에 구애받지 않고 측정물체의 높이 정보인 무아레 위상을 얻어 3차원 형상을 측정할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 이론

Fig. 1은 빔프로젝터를 이용하여 측정대상물체에 가상 격자무늬를 형성하고, 결상계의 CCD 카메라를 이용하여 투영된 가상의 변형격자를 획득하기 위한 광학계의 구성을 나타낸다.

측정하고자 하는 물체 위에 가상격자를 투영시켜 물체의 형상에 따라 형성되는 변형격자 이미지를 획득하고, 기준격자 이미지와 화상처리 알고리즘을 사용하여 무아레 무늬를

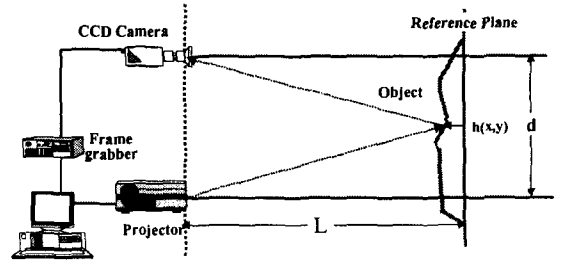


Fig. 1 Optical Geometry of Projection Moiré

만든다. 기준격자와 변형격자의 화상처리 알고리즘을 통한 무아레 무늬의 광강도는 다음과 같다

$$I_P(x, y) = I_0(x, y) \{1 + \gamma(x, y) \cos[\phi(x, y) + \Delta]\} \quad (1)$$

여기서,  $I_0(x, y)$ 는 무아레 무늬 평균강도,  $\gamma(x, y)$ 는 무아레 간섭무늬의 정규화된 가시도이고,  $\Delta$ 는 위상이동량,  $\phi(x, y)$ 는 측정하고자 하는 초기 위상값이다.

4 Frame 위상이동법은 위상이동량  $\Delta$ 를  $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 가 되도록 순차적으로 이동시켜 각각의 위상이동에 대해 무아레 무늬 광 강도를  $I_1, I_2, I_3, I_4$ 라 하면 측정하고자 하는 위상은 다음과 같다.

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left[ \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right] \quad (2)$$

3 Frame 위상이동법은  $\Delta$ 를  $-\alpha, 0, \alpha$ 가 되도록 순차적으로 이동시켜 각각의 위상이동에 대한 무아레 광강도를  $I_1, I_2, I_3$ 라 하면 측정하고자 하는 위상은 다음과 같다. 일반적으로  $\alpha = 2\pi/3$ 을 적용한다.

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left\{ \sqrt{3} \frac{I_1(x, y) - I_3(x, y)}{2I_2(x, y) - I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right\} \quad (3)$$

여기서, 식(2),(3)에 의해 구해지는 초기 위상값은  $\tan^{-1}$ 의 연산의 특징으로 인하여  $-\pi \sim +\pi$ 사이의 위상값만을 가진다. 이는 측정물체의 단차가 파장의 1/2보다 크면 측정되는 단차는 파장의 1/2보다 작게 측정된다. 이를 위상이동법의  $2\pi$  모호성( $2\pi$ -ambiguity)이라 한다

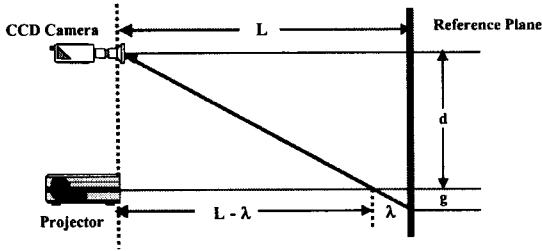


Fig. 2 Basic Concept for Calculating Wavelength

Fig. 2는 파장을 구하는 기본원리를 나타낸다.

$$\lambda = \frac{gL}{g+d} \quad (4)$$

여기서,  $\lambda$ : 파장,  $g$ : 가상의 기준격자의 피치  
 L: Camera Lens부터 기준평면까지의 거리  
 d: Camera 광축과 Projector 광축사이의 거리

획득한 위상도에서 높이정보를 추출하는 식은 다음과 같다.

$$h(x, y) = \frac{\lambda}{2\pi} (\phi_p(x, y) + 2m\pi) \quad (5)$$

여기서,  $\phi_p$ : 위상정렬을 거치지 않은 위상이동법에 의해서 구한 주위상값,  $m$ : 무아레 무늬 차수,  $h(x, y)$ : 측정물체의 높이

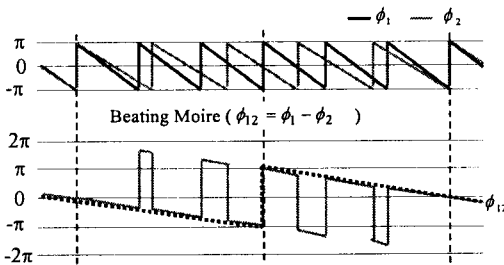


Fig. 3 Basic Concept of Two-Wavelength Moire

Fig. 3은 이중파장 간섭의 기본원리를 나타낸다.<sup>(3)</sup> 위상이동법의  $2\pi$  모호성의 문제는 무아레 무늬의 차수(Order)를 추출하지 못하기 때문에 일어나는 문제이다. 이에 이중파장(Two-Wavelength)의 원리를 사용하면 무아레 무늬의 차수 추출이 가능해져 위상이동법의  $2\pi$  모호성의 문제를 해결할 수 있다.

각각  $g_1, g_2$  피치의 가상 기준격자를 만들어 각각에 대해

위상을 측정하면 이중파장의 기본 원리를 영사식 무아레 방법에 사용할 수 있다.  $g_1, g_2$  가상의 격자를 사용해서 얻어진 위상도를 사용해서 맥놀이 효과를 얻는 방법은 다음과 같다

$$\begin{aligned} \phi_{12}(x, y) &= \phi_1(x, y) - \phi_2(x, y) \\ &= \frac{2\pi h(x, y)}{\lambda_1} - \frac{2\pi h(x, y)}{\lambda_2} \\ &= \frac{2\pi h(x, y)}{\lambda_{12}} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,  $\lambda_{12} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}$ : 맥놀이 현상으로 형성된 파장,  $\phi_{12}$ : 맥놀이 현상으로 형성된 파장을 기준으로 표현한 위상

식(6)에서 보는 것처럼  $g_1, g_2$ 의 피치의 비를 적절히 조절함으로써 매우 큰 등가파장을 사용하는 측정하는 것과 같은 효과를 얻을 수 있다.

측정물체의 높이를 두가지 파장  $\lambda_1, \lambda_{12}$ 로 표현하면 짧은 파장을 기준으로 하는 무아레 무늬 위상의 차수(m)를 추출할 수 있다.

$$h(x, y) = \frac{\phi_{12}(x, y)}{2\pi} \lambda_{12} = \frac{\phi_{1p}(x, y) + 2m\pi}{2\pi} \lambda_1 \quad (7)$$

$$m = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{\lambda_{12}}{\lambda_1} \phi_{12}(x, y) - \phi_{1p}(x, y) \right\} \quad (8)$$

위 식에서 차수  $m$ 은 이론적으로 정수이다. 그러나 위상이동법으로 계산되는 무아레 무늬 위상값에는 여러가지 오차 성분(즉 측정물체의 반사도, 측정 표면의 기울기, 빛의 산란정도)이 포함되어 있어 무아레 무늬의 가시도가 떨어져 차수  $m$ 은 정확한 정수값을 가지지 못하기 때문에 정수화 연산을 통하여 값을 구한다. 따라서 위상이동법을 사용하여 높은 분해능은 그대로 유지하면서  $2\pi$  모호성의 문제를 극복할 수 있다.

### 3. 실험

Fig. 4는 실험장치 구성을 나타내고 있다. 카메라는 PULNIX사의 TM-7EX 흑백 CCD 카메라를 사용하였고, 프레임 그래버(Frame grabber)는 Matrox사의 640\*480의 Meteor/MC-II를 사용하였다. 가상격자의 피치  $g_1, g_2$ 는

컴퓨터 해상도 800\*600의 8Pixel, 9Pixel 로 생성을 하였다. 본 연구에서는 Digital Moire의 특성상 4 Frame 위상이동 또는 3 Frame 위상이동시 등간격 위상이동이 되지 않게 되는 경우가 생긴다. 가상격자는 컴퓨터 상의 Pixel단위로 격자를 생성하기 때문에 4 배수의 Pixel로 생성된 가상격자는 4 Frame 위상 이동시 등간격으로 이동이 되나, 3 배수의 Pixel로 이루어진 가상의 격자의 경우 4 Frame 위상 이동법 사용시 등간격으로 위상이동이 되지 않는다. 이 3 배수의 Pixel 가상격자는 3 Frame 위상이동법을 사용하여 등간격 이동을 할 수 있다.

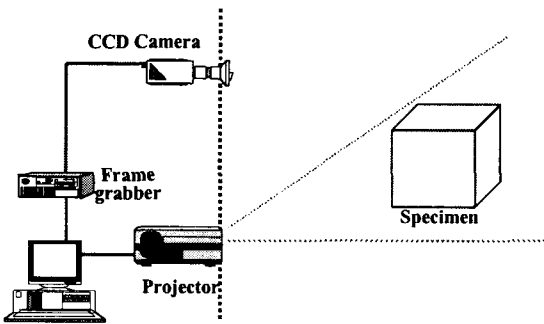


Fig. 4 Experimental Set-Up

Fig.5는 단차가 55mm를 가진 시편으로 정밀도 0.025mm를 갖는 LDI(Laser Design Inc)의 RPS450 으로 측정된 데이터 결과값이다. 피치 $g_1$ 의 경우 4 Frame 위상 이동법을 사용할 경우 등간격의 위상이 이동 가능하나 피치 $g_2$ 에 의한 경우 4 Frame 위상이동을 할 경우 등간격으로 위상이동이 되지 않아 만들고자하는 큰 파장을 제대로 형성할 수 없다

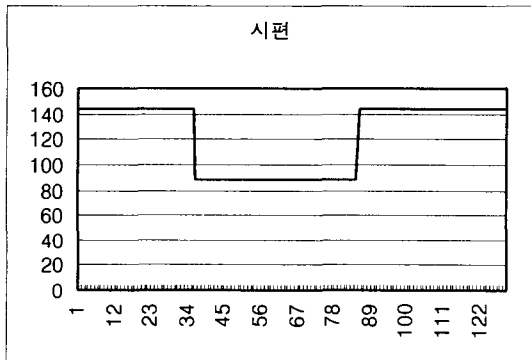


Fig.5 Specimen Data by RPS4

이러한 위상이동의 오차로 인해 전체적인 차수결정에 영향으로 작용하고 있다. 4 Frame 위상법과 3 Frame 위상이동법을 동시에 적용하여 피치 $g_1$ 에는 4 Frame 위상이동을, 피치 $g_2$ 에는 3 Frame 위상이동을 하여 위상도를 구한 다음 이들의 강도값을 빼주는 방법<sup>(4)(5)</sup>으로 측정을 하였다. 각각의 가상격자의 피치 $g_1$ 은 7.26mm, 피치 $g_2$ 는 8.167mm이다. 그리고 L은 1600mm, d는 170mm이다.

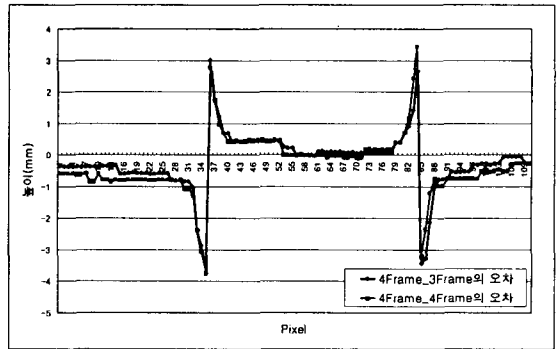


Fig.6 The Results of 4-4 step and 4-3 step algorithm in phase shift

Fig.6은 피치  $g_1, g_2$  모두 4Frame 위상이동법으로 측정된 시편과 Sample Data와의 차이와 피치  $g_1$ 은 4Frame, 피치 $g_2$ 는 3Frame 위상이동하여 측정물체 높이값과 Sample Data 값과의 차이를 나타낸다. Fig.6 에서 보듯이 후자의 경우에 오차가 작아짐을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 비접촉 3차원 형상측정법으로 많이 연구되고 있는 영사식 무아레 토포그래피로, 물리적인 격자를 사용하지 않고 컴퓨터를 이용하여 가상의 격자를 만든다. 가상격자의 위상이동은 Pixel단위로 이동하기 때문에 위상이동시에 등간격 위상이동이 불가능 할 때가 있다. 등간격 위상이동을 하고자, 피치 $g_1$ 은 4Frame, 피치 $g_2$ 는 3Frame 위상이동법을 적용하므로써 기존에 수행했던 같은 N-bucket 위상이동법을 적용할 경우보다, 등간격 위상이동법을 중심으로 서로 다른 N-bucket 위상이동법을 각각 적용하여 등간격 위상이동을 하여 측정영역과 높은 측정 분해능

의 장점을 그대로 유지하면서 측정 물체에 큰 단차가 존재할 때 이중 파장을 사용하여 측정 물체의 단차와 무관하게 측정할 수 있음을 보였다. 그러나 단차가 존재하는 Edge부분에서 오차가 큼을 Fig6에서 볼 수 있는데 이는 Edge부분에서 그림자의 영향으로 오차가 크게 발생하는 것으로 추정된다. 적절한 화상처리를 통하여 단차가 크게 존재하는 Edge부분의 데이터 필터링 처리가 필요하다.

## 참고 문헌

- (1) Kevin G. Harding and Albert Boehnlein., "Absolute measurement using field shifted moire," *SPIE*, Vol. 1614, pp. 259-264.
- (2) Zhong Jिंगgang and Wang Ming., 1996, "Tracking of carrier coded fringe pattern for the automatic measurement of 3-D object shapes," *SPIE*, Vol. 2899, pp. 192-196.
- (3) Jie-Lin, Hong-Jin Su, and Xian-Yu Su., 1997, "Two -frequency grating used in phase-measuring - profilometry", *Applied Optics*, Vol. 36, No. 1, pp. 277-290.
- (4) Wang, Ming and Zhong, Jिंगgang., "Automated fringe analysis profilometry of 3-D diffuse objects.", *SPIE* Vol. 2899, pp. 197-203, 1996
- (5) Zheng-Feng Hu, Cheng-Lin Luo, and Jian-Qin Zhon., 1996, "3-D diffuse object profilometry based on analysis the intensity of grating pattern.", *SPIE* Vol. 2866, pp. 493-496.