

# 디지털 영사식 무아레를 이용한 3 차원 형상 측정과 응용에 관한 연구(I)

유원재\*, 강영준#, 노형민\*\*, 이동환\*\*\*

## A Study on 3-D Shape Measurement and Application by using Digital Projection Moiré (I)

Weon-Jae Ryu\*, Young-June Kang#, Hyung-Min Rho\*\* and Dong-Hwan Lee\*\*\*

### ABSTRACT

Moiré topography method is a well-known non-contacting 3-D measurement method. Recently, the automatic 3-D measurement by moiré topography has been required, since the method was frequently applied to the engineering and medical fields. The 3-D measurement using projection moiré topography is very attractive because of its high measuring speed and high sensitivity. In this paper, using two-wavelength method of projection moiré topography was tested to measuring object with  $2\pi$ -ambiguity problems. The experimental results prove that the proposed scheme is capable of finding absolute fringe orders, so that the  $2\pi$ -ambiguity problems can be effectively overcome so as to treat large step discontinuities in measured objects.

**Key Words** : Projection moiré method(영사식 무아레 방법), Virtual Grating(가상격자),  $2\pi$ -ambiguity( $2\pi$  모호성)

### 1. 서 론

3 차원 자유곡면 형상측정기술(Profile measurement method)은 가공물의 치수검사 및 형상측정, 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 요구를 만족시킬 수 있는 광학을 바탕으로 한 영사식 무아레 방법은 고속측정이 가능하기 때

문에 활발히 연구되고 있다. 또한 기존의 위상이동법을 사용함으로써 측정분해능이 향상되어 무아레 무늬의 형태에 관계없이 측정이 가능하게 되었다.

그러나 위상 이동법을 사용하면 위상이동법의 기본적인 문제인  $2\pi$  모호성( $2\pi$ -ambiguity)의 문제가 발생한다. 이는 측정된 대상물 화상의 연속한 두 픽셀의 값이 어느 이상의 높이차(단차)를 가지면, 정확한 측정을 할 수 없다는 것을 말한다. 이러한 위상이동법의 문제를 해결하기 위해 다 파장

... 접수일: 2004 년 9 월 14 일; 게재승인일: 2005 년 4 월 15 일

\* (재)전주기계산업리서치센터(JMRC)

# 교신저자, 전북대 기계항공시스템공학부, 메카트로닉스센터

Email yjkang@chonbuk.ac.kr Tel. (063) 270-2453

\*\* 한국과학기술연구원(KIST) 시스템연구부

\*\*\* 전북대 기계항공시스템공학부

을 이용하는 방법을 사용하고 있다.<sup>1,2,3,4</sup>

이에 본 연구에서는 기존의 물리적인 격자대신 컴퓨터를 이용하여 격자의 피치 조절이 가능한 가상의 기준격자를 만들고, 이것을 빔 프로젝터를 이용하여 영사하는 방법을 사용하였다. 즉, 측정면에 높이차를 가지는 인체 흉상을 측정하기 위한 2중 파장 영사식 무아레 측정법을 사용하여 단차가 매우 큰 인체흉상 정도의 아그리파상을 빠르게 측정할 수 있었고, 기존 시스템에 비해 구성을 간단하게 하고 측정속도를 향상시킬 수 있었다.

## 2. 이 론

### 2.1 2중 파장 영사식 무아레 방법

Fig. 1 은 영사식 무아레 방법의 광학계 구성을 보여 준다.

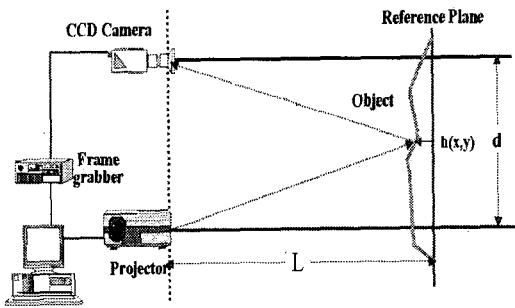


Fig. 1 Optical geometry of projection moiré

컴퓨터 모니터상의 픽셀단위의 피치를 가지는 가상의 기준격자를 기준평면 위에 영사 시켜 기준격자 이미지를 획득하고, 4프레임 위상이동법을 사용하기 위하여 피치의 1/4 씩 이동된 가상의 기준격자를 만들어 영사 시킴으로써 기준격자의 위상맵을 형성한다. 또한 가상의 기준격자를 측정물체 위에 영사하고 기준격자 위상맵을 형성하기 위한 방법과 동일하게 측정물체의 변형격자 위상맵을 얻는다. 얻어진 기준격자 위상맵과 변형격자 위상맵을 간단한 화상처리 알고리즘을 이용하여 무아레 위상맵을 얻는다. 이때의 무아레 무늬의 광강도는 다음과 같다.<sup>1</sup>

$$I_p(x, y) = I_o(x, y) [1 + \gamma(x, y) \cos(\phi(x, y) + \Delta)] \quad (1)$$

여기서,  $I_p(x, y)$ : 측정점의 광강도,  $I_o(x, y)$ : 평균 광강도,  $\gamma(x, y)$ : 간섭무늬 가시도,  $\Delta$ : 위상 이동량,  $\phi(x, y)$ : 측정하고자 하는 위상

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 무아레 위상은 다음과 같다.

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

여기서, 식 (2)에 의해 구해지는 초기 위상값은  $\tan^{-1}$ 의 연산의 특징으로 인하여  $-\pi \sim +\pi$  사이의 위상값 만을 가진다. 이는 측정된 물체의 높이차가 파장의 1/2 보다 크면 측정되는 높이차는 파장의 1/2 보다 작게 측정된다. 이를 위상이동법의 2 $\pi$  모호성이라 한다.<sup>1</sup>

위상이동법의 2 $\pi$  모호성의 문제는 얻어진 무아레 무늬의 차수(order)를 추출하지 못하기 때문에 일어나는 문제로 스펙클 간섭법에서 사용하는 2중 파장(2-wavelength)의 원리를 사용하면 무아레 무늬의 차수 추출이 가능해져 측정물체의 단차에 무관하게 3차원 형상을 측정할 수 있다.<sup>3</sup>

파장을 구하는 기본수식은 다음과 같다.<sup>5</sup>

$$\lambda = \frac{gL}{g+d} \quad (3)$$

여기서,  $\lambda$ : 파장,  $g$ : 가상의 기준격자의 피치,  $L$ : 카메라부터 기준평면까지의 거리,  $d$ : 카메라 광축과 프로젝터 광축 사이의 거리

또한, 측정대상물체의 높이  $h(x, y)$ 는 다음과 같이 표시된다.<sup>7</sup>

$$h(x, y) = \frac{\lambda}{2\pi} (\phi_p + 2m\pi) \quad (4)$$

여기서,  $\phi_p$ : 위상펼침과정을 거치지 않은 위상 이동법에 의해서 구한 위상 값,  $m$ : 무아레 무늬 차수,  $h(x, y)$ : 측정물체의 높이

Fig. 2는 이중파장 간섭의 기본원리를 나타낸다. 맥놀이 현상과 같은 2중 파장원리를 사용하기 위해서는 2개의 파장이 필요하므로 피치가 각각  $g_1$ ,

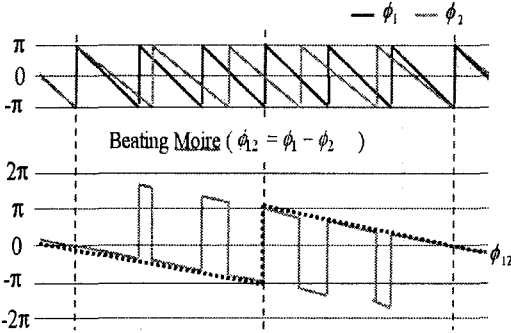


Fig. 2 Basic concept of two-wavelength moiré

$g_2$ 인 가상의 기준격자를 만들어 각각에 대해 위상을 측정하면 2중파장의 기본 원리를 영사식 무아레 방법에 사용할 수 있다

피치가  $g_1, g_2$ 인 가상의 격자를 사용해서 얻어진 위상도를 사용해서 맥놀이 효과를 얻는 방법은 다음과 같다.<sup>3</sup>

$$\phi_{12} = \phi_1 - \phi_2 = \frac{2\pi h}{\lambda_1} - \frac{2\pi h}{\lambda_2} = \frac{2\pi h}{\lambda_{12}} \quad (5)$$

여기서  $\lambda_{12} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$  : 맥놀이 현상으로 형성된

파장,  $\phi_{12}$ : 맥놀이 현상으로 형성된 파장을 기준으로 표현한 위상

식 (5)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 두 가지 파장  $\lambda_1, \lambda_{12}$ 로 표현하면 짧은 파장을 기준으로 하는 무아레 무늬 위상의 차수( $m$ )를 추출할 수 있다.

$$h(x, y) = \frac{\phi_{12}}{2\pi} \lambda_{12} = \frac{\phi_1}{2\pi} \lambda_1 = \frac{\phi_{1p} + 2m\pi}{2\pi} \lambda_1 \quad (6)$$

$$m = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{\lambda_{12}}{\lambda_1} \phi_{12} - \phi_{1p} \right] \quad (7)$$

이렇게 구한 차수  $m$ 을 식 (4)에 적용하여 측정물체의 높이를 구하게 된다. 위 식에서 차수  $m$ 은 이론적으로 정수이다. 그러나 위상 이동법으로 계산되는 무아레 무늬 위상 값에는 여러 가지 오차 성분(즉 측정물체의 반사도, 측정 표면의 기울기, 빛의 산란정도)이 포함되어 있어 무아레 무늬의 가시도가 떨어져 차수  $m$ 은 정확한 정수 값을 가지지 못하기 때문에 정수화 연산을 통하여 값을 구한다. 따라서 위상이동법을 사용하여 높은 분해능은 그대로 유지하면서  $2\pi$  모호성의 문제를 극복할 수 있다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험장치

Fig. 3은 실험장치의 구성을 나타내고 있다. 광원으로서 LCD 프로젝터를 사용하였고, CCD 카메라와 프레임그래버를 사용하여 화상을 획득하였다. 4 프레임 위상이동법을 사용하기 위하여 컴퓨터 모니터상의 1 픽셀간격으로 가상격자를 이동하였다. 변형격자와 기준격자의 위상도를 구한 다음 이들의 강도 값을 서로 빼 주는 방법으로 측정을 하였다. 각각의 가상격자의 피치는 6.88mm, 7.74mm이다. 그리고 측정물체와 CCD 카메라 사이의 거리는 1,460mm, CCD 카메라와 프로젝터 사이의 간격은 170mm이다.

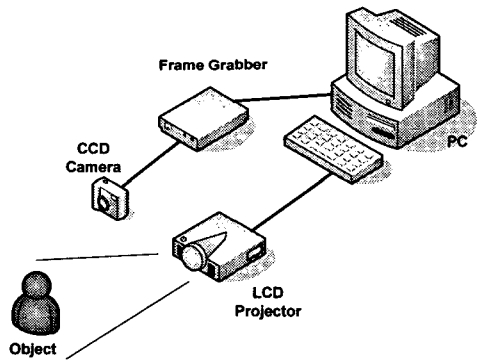


Fig. 3 Experimental set-up

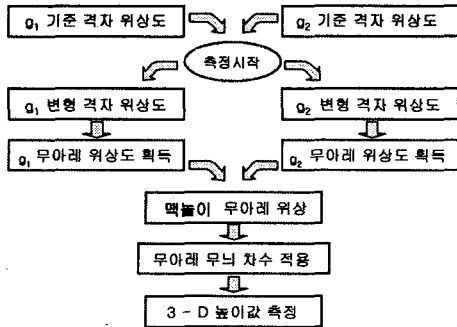


Fig. 4 The flow chart of measurements

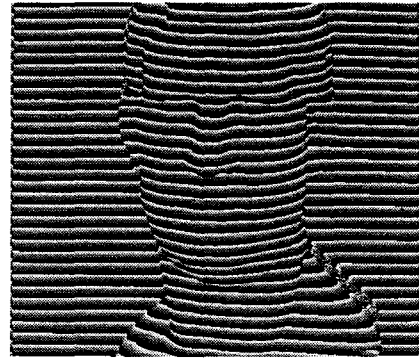
Fig. 4는 측정순서도를 나타낸다. 기준격자의 영향을 제거하기 위하여 기준격자의 위상도와 변형격자의 위상도를 먼저 구한 다음, 이를 이용하여 무아래무늬 위상도를 구하는 방법을 사용 하였다.<sup>5</sup> Fig. 5(a)는 변형격자의 위상도, Fig. 5(b)는 기준격자 위상도를, 그리고 Fig. 5(c)는 이 두 위상도를 이용하여 구한 무아래 무늬 위상도를 나타낸다.

측정 시간을 줄이기 위해서 측정을 시작하기 전에 피치가 각각  $g_1, g_2$ 인 가상의 기준격자를 이용하여 4-frame 위상이동을 시켜 기준평면의 기준격자 위상도를 구한다. 측정물체를 프로젝터의 앞에 놓은 후 가상의 격자를 투영시켜 변형격자 위상도를 기준격자 위상도를 구하는 방법과 동일하게 각각의 피치에 대하여 구한다. 그런 다음 변형격자 위상도와 기준격자 위상도를 이용하여 간단한 화상처리 알고리즘을 이용하여 각각의 피치에 해당하는 무아래 무늬 위상도를 얻는다. 각각 얻어진 무아래 무늬 위상도를 이용하여 맥놀이 현상을 이용하여 맥놀이(Beating) 무아래 무늬 위상도를 구한다. 구해진 맥놀이 무아래 무늬 위상도와 피치가  $g_1$ 인 무아래 무늬 위상도를 이용하여 피치가  $g_1$ 인 무아래 무늬 위상도의 차수  $m$ 을 구한다. 구해진 차수를 피치가  $g_1$ 인 무아래 무늬에 적용하여 3차원 형상 높이 값 측정을 완료한다.

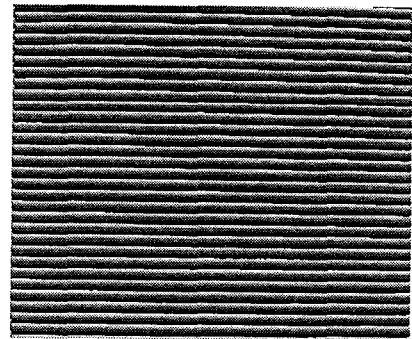
### 3.2 측정결과 및 분석

Fig. 6(a)과 6(b)는 피치가 각각  $g_1, g_2$ 인 격자로 측정하여 얻어진 무아래 위상도를 나타낸다. 단파장으로 각각 측정한 결과라 할수 있는데, 측정물체의 단차가 측정파장보다 훨씬 크기 때문에 불연속 부분이 얼굴표면에 나타난 것을 볼 수 있다. 따라

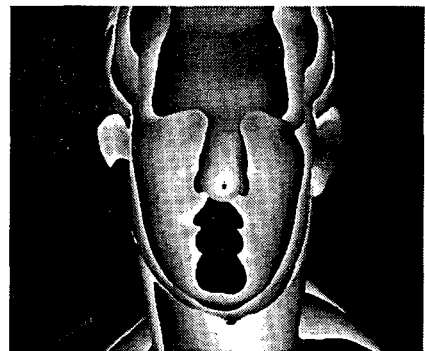
서 이 두개의 위상도를 이용하여 보다 긴 파장인 맥놀이무아래 화상을 Fig. 6(c)와 같이 얻었다.



(a) Transformation grating phase map

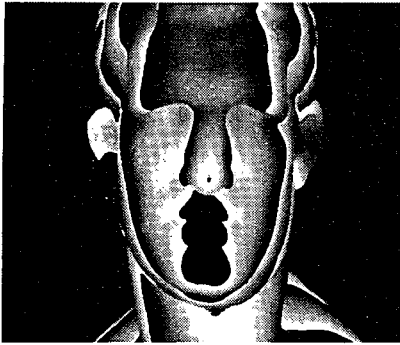


(b) Reference grating phase map

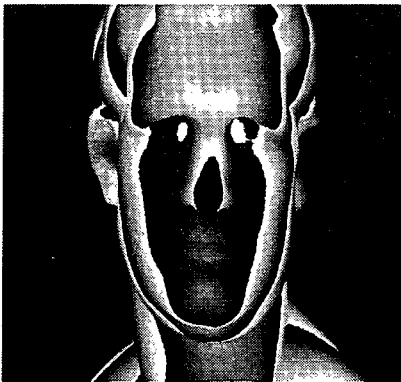


(c) Moiré fringe phase map

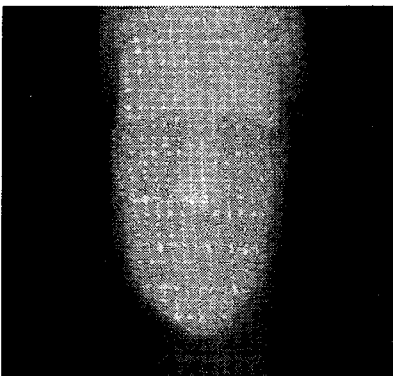
Fig. 5 The phase maps of Agrippa statue



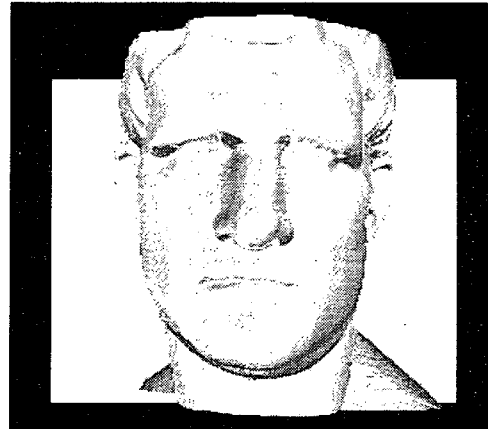
(a)  $g_1$  grating phase map



(b)  $g_2$  grating phase map



(c) Beating moiré image



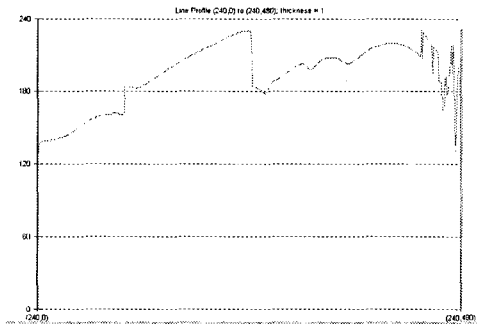
(d) 3D plotting image

Fig. 6 Experimental Results

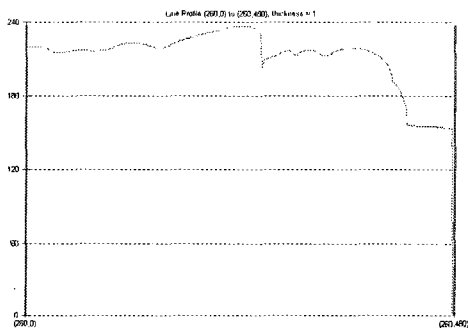
또한, Fig. 6(c)에서 각각의 무아레 무늬 차수를 추출하여 이를 이용해 형상을 복원한 결과가 Fig. 6(d)에 나타나 있다.

앞서 언급한 알고리즘을 토대로 커다란 단차를 가지는 물체에 2중파장 위상이동 영사식 무아레 방법을 이용하였고, 이를 이용하여 측정된 결과와 단파장 위상이동 영사식 무아레를 이용해서 측정된 결과를 비교하였다.

Fig. 7은 코 부분과 턱 부분에 단차를 가지는 아그리파상을 단파장으로 구한 결과의 프로파일(Profile)을 나타낸다. Fig. 7(a)는 기존의 단파장 위상이동 영사식 무아레가 가지는  $2\pi$  모호성문제로 인한 측정오차의 전파(Error propagation)의 좋은 예이다. 코 부분과 턱 부분에서 전체적으로 오차가 발생하여  $2\pi$  단차가 발생한 부분 뿐만이 아니라 그 주변의 측정결과에도 영향을 미쳐 전체적으로 형상이 왜곡되어지고 있다. 이는 위상펼침과정에서 발생하는 위상이동법의 한계점을 보여준다. Fig. 7(b)는 동일한 측정대상에 대해서 2중파장 위상이동 영사식 무아레를 이용하여 측정된 결과를 나타내고 있다. 측정분해능은 그대로 유지하면서  $2\pi$  모호성 문제를 잘 해결하고 있음을 알 수 있다.



(a) Conventional moiré method



(b) 2-wavelength moiré method

Fig. 7 The comparison results between conventional and 2-wavelength method

#### 4. 결 론

본 연구에서는 비접촉 3차원 형상 측정법으로 많이 연구되고 있으며, 가 간섭광(Coherent light)을 광원으로 사용할 필요가 없고, 진동이나 외란에 비교적 둔감한 장점을 가지고 있는 영사식 무아레 토포그래피에 대해 연구를 하였다. 영사식 무아레 방법의 장점인 넓은 측정영역과 높은 측정 분해능의 장점을 그대로 유지하면서 가상의 격자를 만들어 측정하고자 하는 물체의 무아레 위상을 간단한 화상처리를 통하여 쉽게 얻을 수 있음을 실험을 통하여 확인하였고, 위상이동법의 측정 분해능은 그대로 유지하면서 기존의 위상이동법의 문제인  $2\pi$  모호성을 해결한 2중파장 방법을 적용하여 실험을 수행하였다. 본 연구의 연구내용을 요약하면 다

음과 같다.

1) 물리적인 격자대신 컴퓨터를 사용하여 가상의 격자를 만들어 3차원 형상을 측정할 수 있는 영사식 무아레 토포그래피 시스템을 구성하였다.

2) 기존의 비접촉식 측정방법으로 본 연구에 사용된 대상 물체를 측정하는 경우, 측정시간이 수십초 이상 소요되는 반면에 가상의 격자를 사용한 본 연구에서는 3~4 초만에 측정을 완료할 수 있었으며, 최종 높이값 추출 계산까지는 10 여초만에 취득할 수 있었다

3) 2중 파장 방법을 사용하여 기존의 위상이동 방법의 문제인 단차로 인한  $2\pi$  모호성의 문제를 극복한 측정이 가능함을 확인하였다.

4) 좀더 정밀한 측정을 위해서는 가상의 기준 격자 피치에 영향을 주는 장비 즉 CCD Camera 와 프로젝터의 성능향상에 밀접한 관계가 있으므로 측정장비향상을 통해서 측정분해능을 높일 수 있다.

#### 참고문헌

1. Harding, K. G., Boehnlein, A., "Absolute measurement using field shifted moiré," SPIE, Vol. 1614, pp. 259-264, 1992.
2. Jिंगgang, Z., Ming, W., "Tracking of carrier coded fringe pattern for the automatic measurement of 3-D object shapes," SPIE, Vol. 2899, pp. 192-196, 1996.
3. Kim, S. W., Oh, J. T., Jung, M. S., Choi, Y. B., "Two-wavelength phase-shifting projection moiré topography for measurement of three-dimensional profiles with high step discontinuities," KSME, Vol 23, No. 7, pp. 1129-1138, 1999.
4. Lin, J., Su, H. J., Su, X. Y., "Two-frequency grating used in phase-measuring - profilometry," Applied Optics, Vol. 36, No. 1, pp. 277-290, 1997.
5. Park, Y. C., Jung, K. M., Park, G. G., "A study on the phase measuring profilometry with parallel-optical-axes," KSPE, Vol. 17, No. 6, pp. 210-217, 2000.