

# 위상천이법을 이용한 삼차원 형상측정에서 위상오차 보정

박윤창\*, 안성준<sup>1</sup>, 강문호<sup>1</sup>, 권영철<sup>2</sup>, 안승준<sup>3</sup>

<sup>1</sup>선문대학교 정보통신공학과, <sup>2</sup>선문대학교 기계공학과, <sup>3</sup>선문대학교 정보디스플레이학과

## Phase error compensation for three-dimensional shape measurement based on a phase-shifting method

Yoon-Chang Park<sup>1\*</sup>, Seong Joon Ahn<sup>1</sup>, Moon-Ho Kang<sup>1</sup>, Young-Chul Kwon<sup>2</sup>  
and Seungjoon Ahn<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Information and Communication Engineering, Sunmoon University

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Sunmoon University

<sup>3</sup>Department of Information Display, Sunmoon University

**요 약** 고속 삼차원 형상측정에서는 충분한 위상이송 스텝 수를 적용할 시간을 확보할 수 없기 때문에, 스텝 수를 축소하게 되면서 위상측정에서의 잡음이 증가되게 된다. 본 논문에서는, 다파장 PMP법에 있어서 두 파장의 비례관계를 이용하여 측정된 위상에 포함되어 있는 위상오차를 예측하고, 이를 보정하는 방법을 제안하였으며, 제안된 보정 방법의 효용성을 확인하기 위한 실험이 진행되었다. 위상천이법에서 통상적으로 사용되는 스텝 수에 비해 월등히 많은 스텝의 위상 이송으로 측정하였으며, 또한 동일한 대상을 고속 삼차원측정에서 적용되는 3-3 step의 위상 이송으로 측정하여, 두 경우에서의 측정결과를 비교하여 고속측정에서의 측정잡음을 산출하였다. 그리고, 본 논문에서 제안하고 있는 보정 방법을 측정된 맥놀이 위상과 절대위상에 적용한 결과, 각각에 있어서 90%와 17.2%의 잡음감소가 이루어지는 것으로 확인되었다.

**Abstract** In this paper, a prediction and compensation method for the error in the phase measured by using the proportionality between two wavelengths in the TW-PMP (Two-wavelength Phase Measuring Profilometry) is proposed and experimental results are shown to verify the usefulness of the proposed method. For sample object, firstly, a phase-shifting with a quite large number of steps is adopted in measurement, compared with the conventional phase-shifting method, secondly, a 3-3 step phase-shifting method is used to measure the same object which is applied to high-speed 3D shape measurement, and then, measured results from these two phase-shifting methods are compared to calculate measurement noises. From the experimental results applying the proposed compensation method to the measured beat phase and absolute phase, it has proven that noises are decreased by 90% and 17.2% for each case.

**Key Words** : 3D Shape Measurement, Error Compensation, Phase Shifting Technique, Two-wavelength, Phase Measuring Profilometry, Phase Error

### 1. 서론

광학적인 방법을 이용한 삼차원 자유곡면 형상측정 기술은 생산품의 형상검사, 역공학(Reverse Engineering),

컴퓨터 그래픽스, 전자산업 및 패션산업 등의 분야로 그 응용 범위가 넓어지고 있다.[1,2]

삼차원 형상 측정법에 있어서는 그림자식 모아레[3], 영사식 모아레[4], 위상측정형상측정법(Phase Measuring

본 논문은 중소기업청의 산학 공동기술개발 지원사업으로 수행된 연구결과의 일부임.

\*교신저자 : 박윤창(ycpark@sunmoon.ac.kr)

접수일 09년 09월 18일

수정일 09년 10월 23일

게재확정일 09년 11월 12일

Profilometry, 이하 “PMP”로 표기)[5] 및 공간부호화법[6] 등의 매우 다양한 연구가 진행되어 왔으며, 이러한 연구들에 있어서 측정 속도와 정확도 측면에서 위상천이법(Phase-Shifting Method)이 가장 효과적인 방법으로 인식되고 있다[ 1-12].

위상천이법을 이용한 삼차원 형상 측정법에서는 다양한 형태의 측정오차가 발생되는데, 이들은 다음과 같은 두 가지 형태의 오차로 나누어질 수 있다.

그 중 하나는 광학계의 설계 파라미터(Model Parameter)에서의 부정확과 패턴광(Structured Light) 영사 및 이미지(Image) 결상과정에 사용되고 있는 렌즈의 왜곡(Distortion)등에 기인한 것으로서, 전체적인 형상의 치수오차를 발생시키는 측정오차인데, 카메라 및 설계 변수 보정 등의 다양한 방법들이 발표되고 있어서 대부분의 문제들이 해결되고 있다[7].

나머지 한 가지는, 격자의 위상이송 오차(Phase Shift Error), 패턴광의 비정현파적인 광강도분포, 카메라와 영사기에서의 잡음과 비선형성을 비롯한 양자화 오차 등에 기인하는 측정오차로서, 앞의 측정오차와 비교해서 상대적으로 높은 공간주파수를 가지는 측정잡음 형태로 나타난다[8].

이들 측정잡음의 원인들 중에서, 격자의 위상이송 오차는 과거 격자를 기구적으로 이송시키는 방식에서는 가장 큰 오차요인들 중의 하나이었으나, 액정표시장치(Liquid Crystal Display) 혹은 디지털 마이크로미러 디바이스(Digital Micromirror Devices)를 이용한 디지털 프로젝터(Digital Projector)가 패턴광 영사기로 사용되면서 이로 인한 오차는 해결되고 있다[2,7,9,12].

높은 공간 주파수 형태의 측정잡음을 야기시키는 나머지 요소들은 위상이송 스텝(step) 수를 증가시키므로써 측정잡음을 효과적으로 감소시킬 수 있다[10].

하지만, 근래에 들어서 고속 혹은 실시간 삼차원 형상 측정기술[2,11]에 대한 연구가 활발히 진행되면서, 위상오차를 감소시킬 만큼의 충분한 위상이송 스텝 수를 적용할 시간을 확보할 수 없게 되었으며, 패턴광 혹은 모아레무늬의 위상계산을 위한 최소한의 스텝인 3스텝 알고리즘을 사용하게 됨으로써 위상측정에서의 잡음이 증가되게 된다.

본 논문에서는 고속 혹은 실시간 삼차원 형상측정에서 위상이송 스텝 수의 감소로 인해서 증가되는 높은 공간 주파수 형태의 측정잡음을 개선하는 데에 초점을 두고 있다.

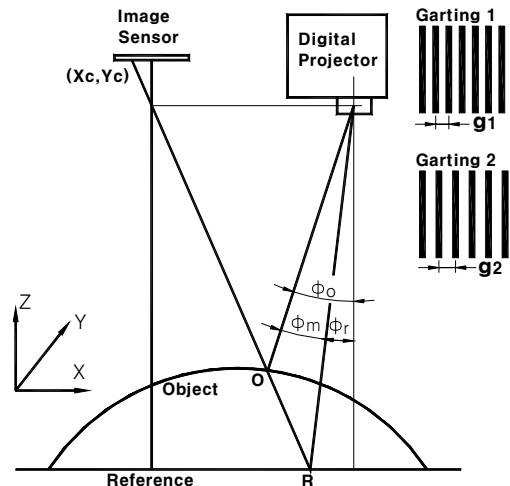
세밀한 직선줄무늬 형태의 패턴광을 영사하고, 위상천이법을 사용하여 고분해능을 확보하고, 또한  $2\pi$  모호성을 해결하는 다파장 위상측정 형상측정법(Two-wavelength

Phase Measuring Profilometry 이하 “다파장 PMP”로 표기)[9]에 있어서, 두 개의 파장에서 측정되어지는 위상들의 비례관계로부터 측정된 위상에 포함된 위상오차를 예측하고, 이를 보정하여 측정잡음을 개선하고자 하였다.

2장에서는 다파장 PMP의 원리를 설명하고, 각각의 파장에서 측정되어지는 위상에 포함된 위상오차를 예측하고, 이를 보정하는 알고리즘을 기술한다. 3장에서는 실험을 위한 장치구성 및 실험결과를 기술하며, 4장에서 본 논문을 결론짓게 된다.

## 2. 다파장 PMP법과 오차보정 원리

### 2.1 다파장 PMP법



[그림 1] PMP법을 구현하기 위한 기본 광학계 구성

PMP법을 구현하는 광학계는 그림 1에서 보는 바와 같이, 영상을 획득하는 카메라와 패턴광을 영사하는 프로젝터로 구성되어 있으며, 프로젝터에서는 세밀한 주기의 직선줄무늬 형태의 패턴광을 영사하고, 이때 카메라에서 획득된 프린지 패턴(fringe pattern) 영상의 위상을 측정하여 삼차원 형상을 측정한다.

패턴광을 형성하고 있는 직선줄무늬의 1주기를 등간격으로 나누어 이송시키면서, 매 스텝마다 획득되는 카메라 영상에서의 광강도 분포는 다음과 같이 표현된다.

$$I_i(x_c, y_c) = I_a(x, y) + I_m(x, y) \cos[\Phi(x, y) + \Delta_i] \quad (1)$$

여기서,  $(x_c, y_c)$ 는 이미지 센서의 픽셀좌표,  $I_a(x, y)$ 는 평

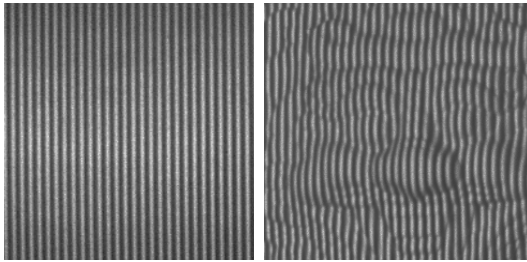
균 광강도,  $I_m(x,y)$ 는 위상이송에 따른 광강도변화의 진폭, 그리고  $\Phi(x,y)$ 는 결정되어야 할 위상값이다.

식(1)에서  $\Delta_i$ 는 높이 정보를 가지고 있는 위상  $\Phi(x,y)$ 를 정확하게 구하기 위한 위상천이법에서의 격자의 위상이송량으로서, 격자에 새겨진 줄무늬의 1주기를  $N$  등분하여 1스텝(step)씩 이송시킬 경우에 다음과 같이 결정된다.

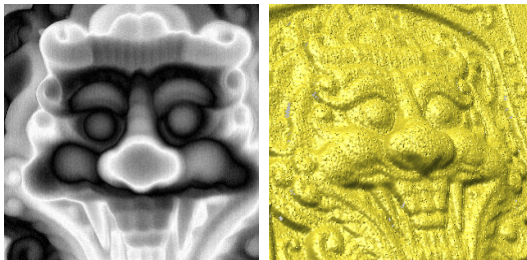
$$\Delta_i = 2\pi(i-1)/N \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

이미지 센서의 픽셀좌표( $x_c, y_c$ )에서, 매 스텝마다 얻어진 영상 데이터  $I_1(x_c, y_c), I_2(x_c, y_c), \dots, I_N(x_c, y_c)$ 으로부터 위상  $\Phi_p(x, y)$ 은 다음과 같이 구해진다.

$$\Phi_p(x, y) = \tan^{-1} \frac{\sum_{i=1}^N I_i \cdot \sin[2\pi \cdot (i-1)/N]}{\sum_{i=1}^N I_i \cdot \cos[2\pi \cdot (i-1)/N]} \quad (3)$$



(a) 측정물의 격자영상 (b) 기준면의 격자영상



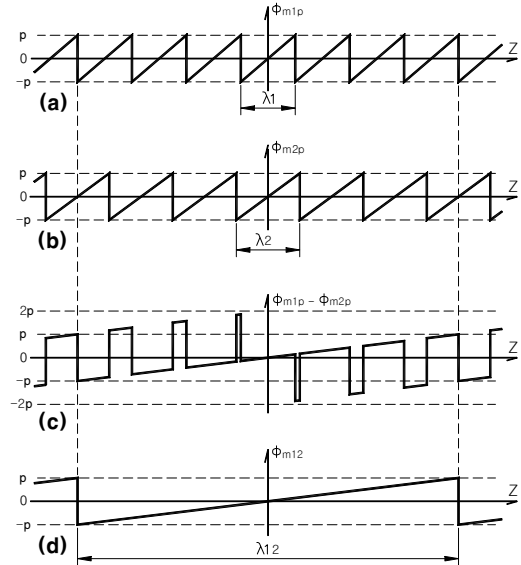
(c) 모아레무늬 (d) 측정된 삼차원 형상

[그림 2] PMP법에서의 삼차원 형상 획득과정.

그림 2는 PMP법에서의 삼차원 형상측정과정을 보여주고 있다. 기준면에 패턴광이 영사되고 있는 영상[그림 2(a)]에서 획득되는 기준위상(Reference Phase,  $\Phi_r$ )과 측정대상물에 패턴광이 영사되고 있는 영상 그림 2(b)에서 획득되는 물체위상(Object Phase,  $\Phi_o$ )의 차이값이 측정대상물의 Z축 방향 높이에 따른 위상으로서 모아레 위상

(Moiré Phase,  $\Phi_m$ )이 된다.[5]

이렇게 얻어지는 모아레 위상  $\Phi_m(x,y)$ 는 식(3)에서 보는 바와 같이  $\tan^{-1}$ 의 연산결과로 인하여  $-\pi$ 부터  $\pi$ 사이의 값을 가지는 접혀진 모아레 위상(wrapped moiré phase,  $\Phi_{mp}$ )으로서,  $2\pi$  모호성[5] 문제를 야기하게 되는데, 이를 해결하기 위해서 다파장 위상천이 모아레[4] 혹은 다파장 PMP법[9]이 사용된다.



[그림 3] 다파장 PMP법에서 측정영역 확대과정 (a) 짧은 파장( $\lambda_1$ )의 접혀진 위상( $\Phi_{m1p}$ ), (b) 긴 파장( $\lambda_2$ )의 접혀진 위상( $\Phi_{m2p}$ ), (c) 두 파장에 대한 위상차( $\Phi_{m1p} - \Phi_{m2p}$ ), (d) 맥놀이 파장의 위상( $\Phi_{m12}$ )

그림 3은 위상천이 모아레에서 얻어지는 접혀진 위상을 주기가 비슷한 두 개의 파장을 이용하여 측정영역을 확대시키는 과정을 보여주고 있다.

그림 3(a)에 표시된, 줄무늬의 주기가 짧은 격자( $g_1$ )를 영사하여 측정된 짧은 파장 모아레 위상( $\Phi_{m1p}$ )은 측정대상물의 높이( $Z$ )에 따라  $-\pi$ 부터  $+\pi$ 사이의 값으로 반복적으로 변하고 있으며,  $Z=0$ 부근에서의 1주기를 짧은 파장 모아레무늬의 등가파장( $\lambda_1$ )에 해당한다.

그림 3(b)는 (a)에 비해서 줄무늬의 주기가 다소 긴 격자( $g_2$ )를 영사하여 측정된 긴 파장 모아레 위상( $\Phi_{m2p}$ )을 보여주고 있는데, 마찬가지로 긴 파장 모아레무늬의 등가파장( $\lambda_2$ )이 표시되어 있다.

주기가 비슷한 두 개의 파동이 합쳐질 때 발생하는 맥놀이 파동의 파장( $\lambda_{12}$ )은 다음과 같이 구해진다.

$$\lambda_{12} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (4)$$

이 맥놀이 파동의 위상( $\Phi_{m12}$ )은 짧은 파장( $\lambda_1$ )의 위상( $\Phi_{m1p}$ )과 긴 파장( $\lambda_2$ )의 위상( $\Phi_{m2p}$ )의 차이로 구해진다. 그림 3(c)에서 표시되고 있는 “ $\Phi_{m1p} - \Phi_{m2p}$ ”는  $+2\pi$ 부터  $-2\pi$  범위를 가지는데,  $+\pi$ 부터  $-\pi$  범위를 벗어나는 값에 대하여  $+2\pi$  혹은  $-2\pi$ 를 하면 그림 3(d)에 표시되고 있는 맥놀이 파동에 대한 위상( $\Phi_{m12}$ )가 산출될 수 있다[9].

이러한 과정으로 구해지는 맥놀이 파동에 대한 위상( $\Phi_{m12}$ )은 그림 3에서 보이는 것과 같이 넓은 영역에서의 파장을 가지고 있기 때문에  $2\pi$ 모호성 문제가 해결될 수 있음을 알 수 있다.

### 2.2 위상 오차 보정원리

앞서 기술된 바와 같이 두 개 파장의 맥놀이 현상을 이용하여  $2\pi$  모호성을 해결하고, 측정영역을 확대하는 방법은 매우 유용한 수단으로 사용되고 있다.

하지만, 맥놀이 파동의 위상( $\Phi_{m12}$ )을 산출하는 과정을 살펴보면, 짧은 파장의 위상( $\Phi_{m1p}$ )과 긴 파장의 위상( $\Phi_{m2p}$ )은 측정으로부터 얻어진 값이기 때문에 측정오차를 포함하고 있을 수밖에 없다. 또한 이 두 개의 위상의 차이값( $\Phi_{m1p} - \Phi_{m2p}$ )을 이용하여 산출되는 맥놀이 파동의 위상( $\Phi_{m12}$ )에는 당연히 위상오차를 포함하게 된다.

결국 측정에서 얻어지는 2개의 위상( $\Phi_{m1p}$ ,  $\Phi_{m2p}$ )에는 측정과정에서 다양한 원인에 기인한 측정오차, 즉 위상오차가 포함될 수밖에 없으며, 더구나, 측정에 충분한 시간을 할애할 수 없는 고속 혹은 실시간 삼차원 형상측정에서는 식 (3)에서의 위상이송 스텝 수(N)를 최소화하기 때문에 이러한 위상오차는 더욱 증가하게 된다.

본 논문에서는 두 개의 주기에서 측정되어지는 위상들의 상관관계로부터 측정된 위상에 포함된 위상오차를 예측하여, 이를 보정함으로써 측정잡음을 개선하고자 한다.

우선, 측정 잡음이 없는 이상적인 경우에 있어서, 두 개의 주기에서 측정된 위상은 다파장 언래핑 알고리즘(unwrapping algorithm)에 의해 다음과 같이 절대위상( $\Phi_{m1}$ ,  $\Phi_{m2}$ )이 구해진다[4]

$$\Phi_{m1}(x, y) = \Phi_{m1p}(x, y) + 2m_1\pi \quad (5)$$

$$\Phi_{m2}(x, y) = \Phi_{m2p}(x, y) + 2m_2\pi \quad (6)$$

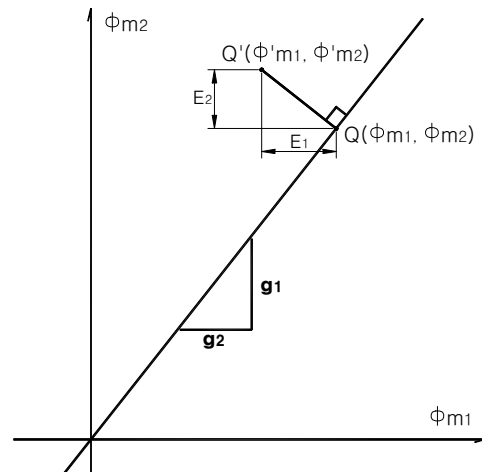
여기서  $m_1$ 과  $m_2$ 는 각각 짧은 파장과 긴 파장에 대한 모아레 차수를 표시하는 정수값이다.

이들 절대위상은 모아레 무늬의 등가파장( $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ )에 반비례하고, 또한 이들 등가파장( $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ )은 측정에 사용된 격자의 줄무늬 주기( $g_1$ ,  $g_2$ )와 비례관계를 가지기 때문에, 다음과 같은 비례식을 얻게 된다.

$$g_1 : g_2 = \lambda_1 : \lambda_2 = \frac{1}{\Phi_{m1}(x, y)} : \frac{1}{\Phi_{m2}(x, y)} \quad (7)$$

식(7)로부터,  $\Phi_{m1}(x, y)$ 과  $\Phi_{m2}(x, y)$ 는 다음과 같이 정리된다.

$$\Phi_{m2}(x, y) = \frac{g_1}{g_2} \cdot \Phi_{m1}(x, y) \quad (8)$$



[그림 4] 위상오차 예측 원리

식(8)로부터,  $\Phi_{m1}(x, y)$ 과  $\Phi_{m2}(x, y)$ 는 그림 4에서와 같이 평면 [ $\Phi_{m1}$ ,  $\Phi_{m2}$ ]에서 기울기가  $g_1/g_2$ 이면서 원점을 지나는 직선상에 위치해야함을 알 수 있다.

하지만, 패턴광 영상과 카메라를 통한 영상획득으로 산출되는 측정잡음이 포함된 위상값  $\Phi'_{m1}(x, y)$ 과  $\Phi'_{m2}(x, y)$ 는 그림 4에서 보는 바와 같이 이상적인 직선으로부터 벗어나게 된다.

짧은 주기( $g_1$ ) 격자와 긴 주기( $g_2$ )의 격자를 영상하여 측정된 절대 위상  $\Phi'_{m1}(x, y)$ 와  $\Phi'_{m2}(x, y)$ 에 포함된 위상오차를 각각  $E_1(x, y)$ ,  $E_2(x, y)$ 라 하면, 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Phi'_{m1}(x, y) = \Phi_{m1}(x, y) + E_1(x, y) \quad (9)$$

$$\Phi'_{m2}(x, y) = \Phi_{m2}(x, y) + E_2(x, y) \quad (10)$$

이러한 측정된 위상  $\Phi'_{m1}(x,y)$ 와  $\Phi'_{m2}(x,y)$ 에 포함된 오차값  $E_1(x,y)$ 과  $E_2(x,y)$ 를 정확히 알기는 어렵지만, 가장 타당하게는 식(8)에 표시된 직선상의 점들 중에서 점 Q' ( $\Phi'_{m1}(x,y)$ ,  $\Phi'_{m2}(x,y)$ )로부터 가장 가까이 위치한 점 Q' ( $\Phi'_{m1}(x,y)$ ,  $\Phi'_{m2}(x,y)$ )에서 식(8)에 표시된 직선에 수직교점인 Q( $\Phi_{m1}(x,y)$ ,  $\Phi_{m2}(x,y)$ )일 가능성이 가장 높을 것이다.

따라서  $E_1(x,y)$ 과  $E_2(x,y)$ 사이에는 다음과 같은 관계가 얻어진다.

$$E_2(x,y) = -\frac{g_2}{g_1} E_1(x,y) \quad (11)$$

이상의 식(8)에서 식(11)까지로부터, 측정잡음이 없는 절대위상  $\Phi_{m1}(x,y)$ 를 계산하면, 다음과 같이 정리된다.

$$\Phi_{m1}(x,y) = \frac{1}{G} \left[ \frac{g_2}{g_1} \Phi'_{m1}(x,y) + \Phi'_{m2}(x,y) \right] \quad (12)$$

또한, 측정잡음이 없는 긴 파장의 절대위상  $\Phi_{m2}(x,y)$ 는 식(8)과 식(12)로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\Phi_{m2}(x,y) = \frac{1}{G} \left[ \Phi'_{m1}(x,y) + \frac{g_1}{g_2} \Phi'_{m2}(x,y) \right] \quad (13)$$

$$\text{where } G = \frac{g_1}{g_2} + \frac{g_2}{g_1}$$

이상의 과정에서와 같이 측정된 위상에 포함되어 있는 위상오차를 보정하는 방식은 가장 가능성이 높은 위상값으로 조정하는 방식이기 때문에, 위상오차가 완벽하게 보정될 수는 없다. 하지만 고속 삼차원 형상 측정에서와 같이 3 스텝 알고리즘이 이용되면서 증가되는 측정잡음을 다소 완화하는 기능을 할 수 있을 것으로 예상된다.

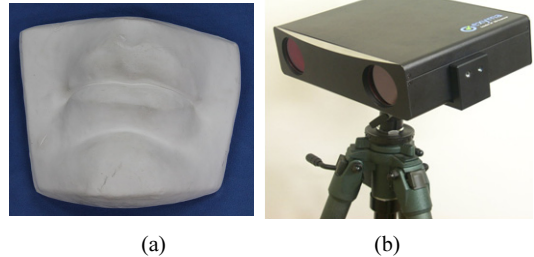
### 3. 실험 및 결과 고찰

#### 3.1 실험 장치 및 방법

본 논문에서 제안하고 있는 측정된 위상에서의 위상오차 보정을 통한 측정잡음 개선효과를 검증하기 위하여, 레이저 격자영사 방식[12]을 사용하고 있는 삼차원 형상 측정기 exyma-E200(Z-Scan Co., LTD)이 사용되었다.

이 측정기에서의 패턴광 영사는, 등각도로 분할된 14개의 반사면을 가진 회전다면경을 고속으로 회전(10,000rpm)시키면서 반사면의 회전과 동기를 맞추어 슬릿빔(Slit Beam)형태의 레이저를 점멸함으로써 격자를 영사하는 방식을 취하고 있다.

격자의 주기( $g_1$ ,  $g_2$ )는 레이저의 점멸 주파수로 조정이 가능하고, 격자의 위상이송( $\Delta$ )은 반사면의 회전각도를 기준으로 생성되는 동기신호 발생시점으로부터의 시간지연을 조정하는 것으로 이루어지도록 되어 있다.



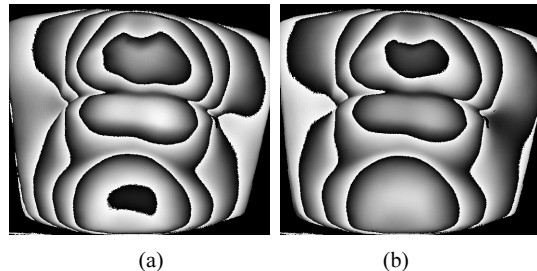
[그림 5] 측정 대상물과 실험에 사용된 삼차원형상 측정기. (a) 측정대상물로 사용된 입술모양 석고상, (b) 실험에 사용된 삼차원형상 측정기(exyma-E200)

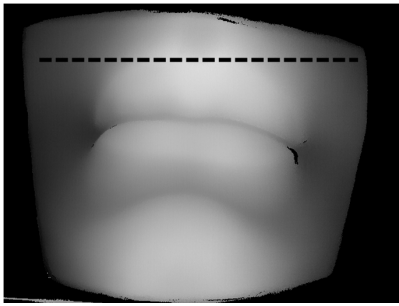
격자 영사에 있어서는 맥놀이 현상을 이용한 언래핑 알고리즘이 사용되고, 격자의 주기가 짧은 주기( $g_1$ )와 긴 주기( $g_2$ )의 패턴광은 40MHz의 메인 클럭(Main Clock)을 기준으로 각각 60Clock과 72Clock을 주기로 레이저 다이오드를 On/Off시키면서 격자를 생성하였다. 측정물에 형성된 프린지 패턴 영상을 획득하기 위한 카메라(AVT사의 1/2" CCD, Marlin F-033, 해상도 640X480)와 초점거리  $f=25\text{mm}$ 의 결상렌즈가 장착되어 있으며, 카메라와 격자영사부사이의 거리는 180mm로 제작되어 있다.

본 실험에 사용된 측정대상물은 입술모양의 석고상으로서 크기는 190 X 160 X 80(unit : mm)로서, 그림 5에 표시되어 있다.

#### 3.2 실험 결과 및 고찰

먼저 측정 대상물의 정확한 형상 데이터를 확보하기 위하여, 통상적인 위상천이법에서 사용되는 스텝 수(4 혹은 5 스텝)에 비해서 월등히 많은 위상이송 스텝 수를 적용하여 측정대상물의 형상을 측정하였다.



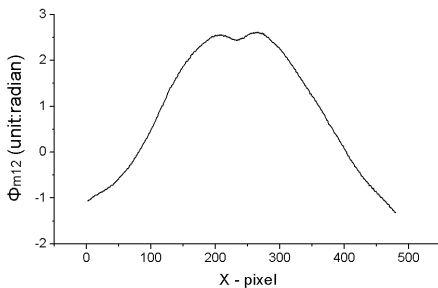


(c)

[그림 6] 20-18스텝 위상이송으로 측정된 결과.  
 (a) 짧은 파장에 대한 접혀진 모아레위상( $\Phi'_{m1p}$ )  
 (b) 긴 파장에 대한 접혀진 모아레위상( $\Phi'_{m2p}$ )  
 (c) 맥놀이 파장에 대한 모아레위상( $\Phi'_{m12}$ )

짧은 주기(60clock)의 격자영사에서는 20 스텝, 긴 주기(72clock)의 격자영사에서는 18 스텝의 위상이송이 이루어 졌으며, 여기서 획득된 짧은 주기와 긴 주기의 접혀진 모아레위상( $\Phi'_{m1p}$ ,  $\Phi'_{m2p}$ )이 각각 그림 6(a)와 그림 6(b)에 표시되어 있다. 또한, 이들 두 개의 모아레위상( $\Phi'_{m1p}$ ,  $\Phi'_{m2p}$ )의 차이값으로부터 계산된 맥놀이 파의 모아레위상( $\Phi'_{m12}$ )이 위상지도(phase map)의 형태로 그림 6(c)에 표시되어 있다.

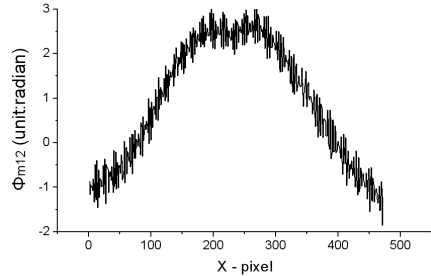
그림 6(c)에서 점선 표시부의 맥놀이 위상( $\Phi'_{m12}$ )의 프로파일(profile)이 그림 7에 표시되어 있다. 이 결과에서는 위상측정과정에서의 측정오차가 보이지 않는데, 이는 충분히 많은 위상이송을 적용함으로써 높은 공간주파수를 가지는 측정잡음이 평균화 효과에 의해 제거된 것으로 판단된다.(이하에서 “정밀측정”이라 표기)



[그림 7] 정밀측정에서 측정된 맥놀이 위상

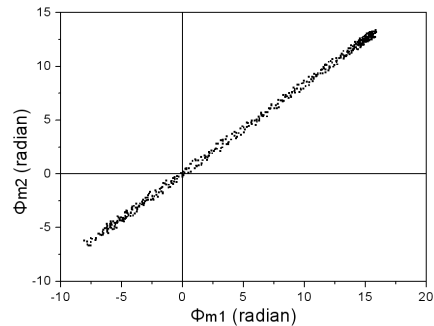
다음은 측정에 소요되는 시간을 단축시키기 위해서, 짧은 파장(60clock)과 긴 파장(72clock)에서 모두 3스텝의 위상이송을 적용하여 동일 대상물을 측정하였으며, 그 결과가 그림 8에 표시되어 있다.(이하 “고속측정”으로 표기) 이는 서론에서 기술된 높은 공간 주파수 형태의 잡음

을 야기하는 여러 가지 원인들이 복합적으로 나타난 결과로 판단되며, 그림 7에 표시된 정밀측정의 결과와의 차이에 대한 표준편차가 0.26rad으로 나타났다.



[그림 8] 고속측정에서 측정된 맥놀이 위상

고속측정에서 측정된 짧은 파장과 긴 파장에 대한 접혀진 모아레위상( $\Phi'_{m1p}$ 와  $\Phi'_{m2p}$ )을 이용하여 식(5)와 (6)에 의해, 절대위상( $\Phi'_{m1}$ 와  $\Phi'_{m2}$ )이 계산되었다. 그림 9는 절대위상  $\Phi'_{m1}$ 와  $\Phi'_{m2}$ 의 분포도를 표시한 것으로서 여러 가지 잡음으로 인하여 측정점들이 한 개의 직선상에 위치하지 못하고 분산되어 있음을 볼 수 있다.

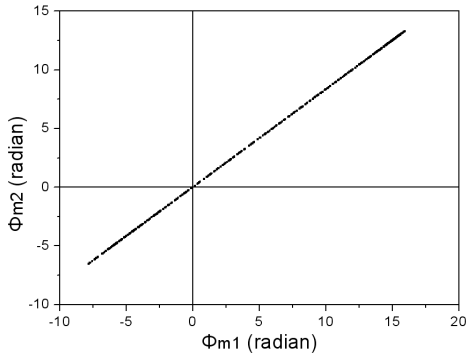


[그림 9] 고속측정에서 측정된 절대위상 분포도

다음은 본 논문에서 제안하고 있는 위상오차 방법에 따라 식(12)와 식(13)에 의해서 보정된 절대위상( $\Phi_{m1}$ 와  $\Phi_{m2}$ )이 계산되었다. 그림 10은 보정된 절대위상  $\Phi_{m1}$ 와  $\Phi_{m2}$ 의 분포도를 표시한 것으로서, 모든 측정점들이 한 개의 직선상에 위치하고 있어서 정상적인 위상보정이 이루어지고 있음을 볼 수 있다.

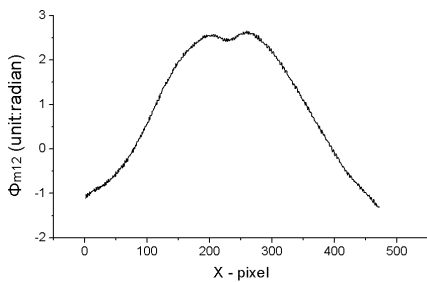
그림 11은 보정이 이루어진 절대위상  $\Phi_{m1}$ 와  $\Phi_{m2}$ 의 차이값으로 구해지는 맥놀이 위상  $\Phi_{m12}$ 을 표시한 것으로서, 그림 9에서 표시되고 있는 보정 전의 결과에 비해서 고주파형태의 잡음이 크게 감소되고 있음을 볼 수 있다. 이렇게 보정된 맥놀이 위상의 오차는 앞서서 측정된 정밀측정의 결과와의 차이값에 대한 표준편차 값으로 0.025rad

으로 나타났다.



[그림 10] 위상오차가 보정된 절대위상 분포도

이러한 결과는, 보정되지 않은 맥놀이 위상( $\Phi_{m12}$ )의 측정잡음이 0.26rad임을 감안하면, 고속측정에서 심하게 발생하는 측정잡음의 약 90%가 보정됨을 알 수 있다.



[그림 11] 보정된 위상에서 계산된 맥놀이 위상

동일한 방법으로, 모아레 차수를 이용하여 계산되는 절대위상( $\Phi'_{m1}$ 와  $\Phi'_{m2}$ )에서의 측정 잡음 개선효과를 시험한 결과, 0.1784rad으로 측정된 고속측정에서의 측정잡음이 0.1477rad으로 감소하여 약 17.2%의 잡음 개선효과가 확인되었다.

이상의 실험에서, 측정된 두 개의 위상 차이값으로 계산되는 맥놀이 위상에서의 보정효과가 훨씬 크게 나타나는 이유는, 두 개의 위상에 포함되어 있는 위상오차  $E_1(x,y)$ 와  $E_2(x,y)$ 가 동시에 보정되기 때문인 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 논문에서는, 다파장 PMP법에 있어서 두 파장의 비례관계를 이용하여 측정된 위상에 포함되어 있는 위상오

차를 예측하고, 이를 보정하는 방법을 제안하였으며, 이러한 방법의 효용성을 확인하기 위한 실험이 진행되었다.

위상천이법에서 통상적으로 사용되는 스텝 수(4 혹은 5 step)에 비해 월등히 많은 20 - 18 스텝의 위상 이송으로 정밀측정하였으며, 또한 동일한 대상물을 고속 삼차원측정에서 적용되는 3-3 스텝의 위상 이송으로 측정하여, 두 경우에서의 측정결과를 비교하여 고속측정에서의 측정잡음을 산출하였다.

그리고, 본 논문에서 제안하고 있는 측정된 위상의 보정 방법을 적용하여 측정잡음의 개선 정도를 실험한 결과 맥놀이 위상에서는 약 90%의 잡음감소가 확인되었고, 모아레 차수를 이용하는 절대위상에서는 약 17.2%의 측정잡음 감소가 확인되었다.

#### 참고문헌

- [1] Chen F, Brown GM, Song M., "Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods", Opt Eng, Vol. 39, No. 1, pp. 10~22, 2000.
- [2] Song Zhang, "Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques", Opt Laser Eng(2009), doi:10.1016/j.optlaseng.2009.03.008
- [3] Meadows, D. M., Johnson, W. O. and Allen, J. B., "Generation of surface contours by Moire patterns", Applied Optics, Vol. 9, No. 4, pp. 942-947, 1970.
- [4] 김승우 외, "고단차 불연속 형상의 3차원 측정을 위한 이중파장 위상천이 영상식 무아레", 대한기계학회 논문집 A권, 제23권 제7호, pp. 1129-1138, 1999.
- [5] 박운창 외, "평행광축에서의 위상측정 형상측정법에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제17권 제6호, pp. 210-217, 6월 2000.
- [6] Raymond C. Daley, Laurence G. Hassebrook, "Channel capacity model of binary encoded structured light-stripe illumination", Appl. Opt. Vol. 37, No. 17, pp. 3689-3696, 1998.
- [7] Liang-Chia Chen, Chu-Chin Liao, "Calibration of 3D surface profilometry using digital fringe projection", Meas. Sci. Technol. 16, pp. 1554-1566, 2005.
- [8] Song Zhang, Peisen S. Huang, "Phase error compensation for a 3-D shape measurement system based on the phase-shifting method", Optical Engineering, Vol. 46, No. 6, pp. 063601-1~9, 2007.
- [9] Weon-Jae Ryu, Young-June Kang, Sung-Hoon Baik, Shin-Jae Kang, "A study on the 3-D measurement by using digital projection moire methode", Optik, Vol.

119, pp. 453-458, 2008.

[10] Jieli Li, Laurence G. Hasebrook, Chun Guan, "Optimized two-frequency phase measuring profilometry light-sensor temporal-noise sensitivity", J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 20, No. 1, pp. 106-115, 2003.

[11] Su X, Zhang Q. "Dynamic 3-D shape measurement method : A review", Opt Laser Eng(2009), doi:10.1016 /j.optlaseng.2009.03.012.

[12] 박윤창 외, "회전다면경을 이용한 줄무늬 격자 영사 방법에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제18권 제6호, pp. 159-164, 6월 2001.

**박 윤 창(Yoon-Chang Park) [정회원]**



- 1983년 2월 : 부산대학교 기계공학과 (공학사)
- 1988년 2월 : 한국과학기술원 생산공학과 (공학석사)
- 1994년 2월 : 한국과학기술원 정밀공학과(공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 정보통신공학부 부교수

<관심분야>  
정밀측정, 동작기계, 냉동공조제어

**안 성 준(Seong Joon Ahn) [정회원]**



- 1987년 2월 : 서울대학교 물리학과(이학사)
- 1989년 2월 : 한국과학기술원 물리학과(이학석사)
- 1992년 8월 : 한국과학기술원 물리학과(이학박사)
- 1992년 9월 : 삼성전자 반도체연구소 선임연구원
- 1996년 5월 : 한전전력연구원 선임연구원
- 2002년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 정보통신공학부 부교수

<관심분야>  
반도체 공정, 광섬유 통신 및 센서, 전자빔 기술, 레이저 미세가공, 접지기술

**강 문 호(Moon-Ho Kang) [정회원]**



- 1988년 2월 : 고려대학교 전기공학과(공학사)
- 1990년 2월 : 고려대학교 전기공학과(공학석사)
- 1995년 8월 : 고려대학교 전기공학과(공학박사)
- 1997년 9월 : 한국철도기술연구원 선임연구원
- 1997년 9월 ~ 현재 : 선문대학교 정보통신공학과 부교수

<관심분야>  
센서네트워크, ITS, 지능제어

**권 영 철(Young-Chul Kwon) [정회원]**



- 1989년 2월 : 부산대학교 정밀기계공학과 (공학사)
- 1991년 9월 : 포항공과대학교 기계공학과 (공학석사)
- 1996년 8월 : 포항공과대학교 기계공학과(공학박사)
- 1996년 9월 ~ 1999년 2월 : 한국전력 전력연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 기계공학과 부교수

<관심분야>  
냉동공조, 열교환기/시스템 설계, 열전달

**안 승 준(Seungjoon Ahn) [정회원]**



- 1985년 2월 : 경북대학교 자연과학대학 물리학과 (이학사)
- 1989년 2월 : 한국과학기술원 물리학과 (이학석사)
- 1993년 2월 : 한국과학기술원 물리학과(이학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 정보디스플레이학과 교수

<관심분야>  
반도체공정 및 장비기술, 레이저 annealing, 레이저 미세가공, 전자빔 기술, 접지기술, 정밀측정