

평행 광축에서의 위상측정 형상측정법에 관한 연구

정경민*, 박윤창**, 박경근***

A Study on the Phase Measuring Profilometry with Parallel-optical-axes

Kyung-min Jeong*, Yoon-chang Park**, Kyung-keun Park***

ABSTRACT

Noncontact measuring methodology of 3-dimensional profile using CCD camera are very attractive because of its high measuring speed and its high sensitivity. Especially when projecting a grid pattern over the object, the captured image have 3 dimensional information of the object. Projection moire extract 3-D information with another grid pattern in front of CCD camera. However phase measuring profilometry(PMP) obtain similar results without additional grid pattern. In this paper, the projection moire are compared with the PMP mathematically, and it is shown that PMP can generate moire image with simple mathematical computations. Experimental works are also carried out showing the same results. It is shown that using a single grid pattern, moire image can be obtained directly without any mathematical operation when some conditions are satisfied.

Key Words : Non-contact Optical 3-D Measurement(비접촉 광학식 3차원 측정), Phase Shifting(위상천이), Projection Moire(영사식 모아레), Phase Measuring Profilometry(위상 측정 형상측정법)

기호설명

d : distance between optical axes of projector and camera
 f_c : distance between image plane and pin-hole lens center
 f_p : distance between light source and projection grating
 g : pitch of projectin grating
 h : height of measuring point
 I_t : intensity of light transmitted through projection grating

I_g, I_s : intensity of light incident on projection grating and image sensor
 I_r : intensity of light reflected from measuring point
 L_c : distance between pin-hole lens and reference plane
 L_p : distance between light source and reference plane
 x_i : x-coordinate of measuring point w.r.t. image plane coordinates
 x_g : x-coordinate on projection grating

* 선문대학교 기계 및 제어공학부
 ** 선문대학교 기계 및 제어공학부
 *** 선문대학교 기계공학과 대학원

reference plane

x_i : x-coordinate of measuring point w.r.t. image plane coordinates

x_g : x-coordinate on projection grating

x_o : x-coordinate of measuring point w.r.t. reference coordinates

Δ : moving distance of projection grating

ϕ : phases of moire fringe

ψ_r, ψ_o, ψ_m : phases of reference plane, object and their difference

1. 서론

고속 정밀 3차원 형상 측정 기술에 대한 수요는 가공품의 치수 및 형상 검사, 기존 산업 제품에 대한 리버스 엔지니어링, 인체를 측정 대상으로 하는 의료/의류 분야뿐만 아니라 가상 현실 구현 등에서 점차 증가하고 있다. 광학을 이용한 비접촉 측정 방식은 과거의 탐침 접촉을 통한 3차원 측정기에 비해 저가이며 고속 고정도 측정이 가능하다는 장점 때문에 많은 관심의 대상이 되고 있다.

특히 직선 격자 무늬를 측정 대상 물체에 투사하고 측정 대상 물체의 형상에 따라 변형된 격자 무늬를 기준 직선 격자를 통해 획득하는 영사식 모아레법(Projection Moire)^[1]은 물체의 등고선에 해당하는 모아레 무늬를 얻을 수 있기 때문에 해석이 용이하다. 영사식 위상 천이 모아레법(Phase Shifting Projection Moire)에서는 위상 천이 인터페로메트리(Phase Shifting Interferometry)의 위상 천이 기법^[2]을 적용하여 측정점에 따른 반사도 차이나 조명의 불균일성 등에 둔감하게 고정도 측정을 할 수 있음이 많은 연구를 통해 확인되어 상품화되고 있는 실정이다^[3,4]. 영사식 위상천이 모아레법은 조명광 앞에 다중 직선 줄무늬가 새겨진 투영격자(Projection Grating)를 설치하고 이를 일정량씩 이송시키며 각각 얻어지는 영상들을 이용하여 형상 정보 추출에 필요한 모아레 위상을 얻어내기 때문에 격자 이송 기구가 필요하다. 또한 카메라 앞에 설치된 투영격자와 동일 크기인 기준 격자의 영상이 모아레 무늬와 함께 획득되기 때문에 기준 격자의 영상을 제거해야 한다. 또한 투영 격자와 기준 격자의 상대 위치를 정확하게 하기 위해 두 격자를

일체로 제작할 경우 격자의 크기가 커지게 된다.

카메라 앞의 기준 격자를 사용하지 않고 물체 형상에 따라 변형된 격자 무늬만을 획득하여 형상 정보를 추출하는 방법으로는 푸리에 변환 형상 측정법(Fourier Transform Profilometry, FTP)^[5], 위상 측정형상 측정법(Phase Measuring Profilometry, PMP)^[6,7,8]등이 연구되어졌다. 이중 PMP에 위상천이 기법을 적용한 위상천이 PMP는 영사식 위상천이 모아레법과 마찬가지로 측정점에 따른 반사도나 조명광 불균일성에 둔감하게 고정도의 측정이 가능하다. 하지만 영사식 위상천이 모아레법에서는 투영 격자에 수직인 투영광축과 카메라 광축이 서로 평행하게 배치되어 해석이 용이한 반면 위상 천이 PMP에서는 투영 광축과 카메라 광축이 경사지게 배치되고 있어 해석이 다소 복잡하다는 문제점이 있다.

본 논문에서는 투영 광축과 카메라 광축을 평행하게 배치하고 위상 천이 PMP와 같이 투영 격자만을 사용할 경우 영사식 위상 천이 모아레법에서 얻고자 하는 모아레 위상을 쉽게 얻을 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

2. 측정 광학계

2.1 평행 광축 광학계와 경사 광축 광학계

광학계 측면에서 영사식 위상 천이 모아레법과 일반적인 위상 천이 PMP의 큰 차이점은 기준 격자의 유무뿐만 아니라 투영광축과 카메라광축 사이의 각도이다.

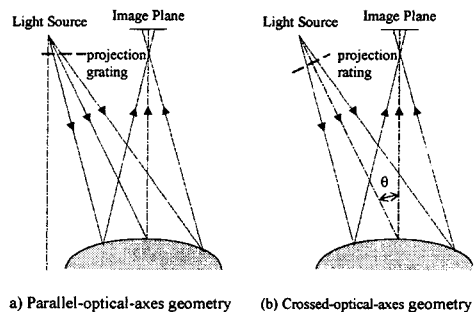


Fig. 1 Parallel-axes and crossed-axes geometry

Fig.1은 사이각이 0° 인 평행 광축 광학계와 경

사 광축 광학계를 나타내고 있다. Fig1(a)와 같은 평행 광축 광학계의 경우 격자 무늬를 측정 대상 물체 전면에 투사하기 위해서는 투영 격자가 투영 렌즈의 중심으로부터 많이 벗어나는 문제점이 있으나 Fig.1(b)의 경사 광축 광학계에 비해 해석이 용이하다는 장점이 있다. 기존의 위상 천이 PMP는 투영 격자만을 사용하는 장점에도 불구하고 경사 광축 광학계를 사용함으로써 해석이 복잡하다는 문제점이 있다.

2.2 변형 격자 무늬의 획득

Fig.2는 투영 격자를 이용하여 측정 대상 물체에 격자 무늬를 형성하고 CCD카메라를 이용하여 이를 획득하기 위한 광학계를 나타낸다.

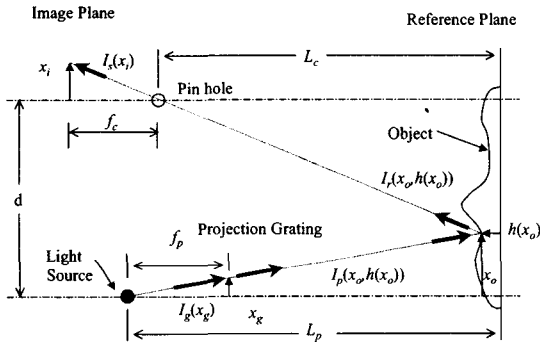


Fig. 2 Optical Geometry of Grating Projection

CCD카메라는 2차원 CCD 이미지 센서와 핀홀 렌즈로 모델링하고 투영부는 점광원과 투영격자로 모델링한다. 2차원 이미지 센서에 수직하고 핀홀 렌즈 중심을 지나는 직선을 카메라광축이라 하고 점광원을 지나며 투영격자에 수직인 직선을 투영광축이라 한다. 카메라 광축과 투영광축은 서로 평행하며 측정점 높이 h의 기준이 되는 기준 평면에 수직하다. 카메라 광축을 따라 2차원 이미지 센서와 핀홀 렌즈의 중심 사이의 거리를 f_c 라 하고, 핀홀로부터 기준면까지의 거리를 L_c 라 한다. 또한 투영 광축을 따라 점 광원과 투영 격자 사이의 거리를 f_p 라 하고 점 광원으로부터 기준면까지의 거리를 L_p 라 한다. 점 광원으로부터 투영 격자 상의 한 점 x_g 에 입사한 광은 투영 격자를 통과한 후

측정 물체상의 한 점 $(x_o, h(x_o))$ 에 입사된다. 반사 광은 핀 홀 렌즈의 중심을 지나 CCD카메라의 이미지 평면상의 위치 x_i 에 도달한다고 하자.

투영 격자의 투과도 $T(x_g)$ 가 피치 g 를 주기로 갖는 다음과 같은 여현파 함수로 나타난다고 하자.

$$T(x_g) = 1 + \cos\left(\frac{2\pi}{g}(x_g + \Delta)\right) \quad (1)$$

이때 Δ 는 투영 격자의 초기위치를 나타낸다. 투영 격자상의 한 점 x_g 에 입사하는 광의 밝기를 $I_g(x_g)$ 라 할 때 투영 격자를 통과하여 물체 상의 한 점 $(x_o, h(x_o))$ 에 입사되는 광의 밝기 $I_p(x_o, h(x_o))$ 는 식(1)로부터 다음과 같다.

$$I_p(x_o, h(x_o)) = I_g(x_g) [1 + \cos\left(\frac{2\pi}{g}(x_g + \Delta)\right)] \quad (2)$$

다음과 같은 기하학적 관계를 이용하면

$$\frac{x_g}{f_p} = \frac{x_o}{L_p - h(x_o)} \quad (3)$$

x_g 는 다음과 같이 표현된다.

$$x_g = f_p \frac{x_o}{L_p - h(x_o)} \quad (4)$$

식(4)로부터 식(2)는 다음과 같이 표현된다.

$$I_p(x_o, h(x_o)) = I_g(x_g) \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{g}\left(\frac{f_p x_o}{L_p - h(x_o)} + \Delta\right)\right) \right] \quad (5)$$

측정 물체상의 한 점 $(x_o, h(x_o))$ 의 반사도를 $R(x_o, h(x_o))$ 라 할 때 CCD이미지 평면상의 한 점 x_i 에 입사하는 빛의 밝기 $I_s(x_i)$ 는 다음과 같다.

$$I_s(x_i) = R(x_o, h(x_o)) I_p(x_o, h(x_o)) \quad (6)$$

다음과 같은 기하학적 관계를 이용하면

$$\frac{x_i}{f_c} = \frac{d - x_o}{L_c - h(x_o)} \quad (7)$$

$I_s(x_i)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} I_s(x_i) &= A_i \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{g}\left(\frac{f_p}{L_p - h_i}(d - \frac{x_i}{f_c}(L_c - h_i) + \Delta)\right)\right) \right] \\ &= A_i \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{g}\left(\frac{f_p d}{L_p - h_i} - \frac{f_p}{f_c} \frac{L_c - h_i}{L_p - h_i} x_i + \Delta\right)\right) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

단 $A_i \equiv R(x_o, h(x_o))I_g(x_g)$, $h_i \equiv h(x_o)$.

$L_p = L_c = L$, $f_p = f_c = f$ 일 경우는 식(8)은 다음과 같다.

$$I_s(x_i) = A_i [1 + \cos(\frac{2\pi}{g}(\frac{fd}{L-h_i} - x_i + \Delta))] \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{fd}{L-h_i} - x_i &= \frac{fd}{L-h_i} - \frac{fd}{L} + \frac{fd}{L} - x_i \\ &= \frac{fd/L}{L-h_i} h_i + (\frac{fd}{L} - x_i) \end{aligned}$$

이므로 $\frac{fd}{L} - x_i = x'_i$ 라 하면

$$I_s(x_i) = A_i [1 + \cos(\frac{2\pi}{g}(\frac{fd}{L} h_i + x'_i + \Delta))] \quad (10)$$

식(10)으로부터 이미지 센서로 획득된 빛의 밝기 $I_s(x_i)$ 는 측정점의 높이 h_i 와 에 따라 변화함을 알 수 있다.

2.3 모아레 무늬의 획득 과정

영사식 모아레 법은 CCD 이미지 평면상에 기준 격자를 설치하여 물체의 높이 정보에만 해당하는 등고선 무늬를 형성시킴으로써 높이 정보를 추출하는 방법이다.

투과도 $T_c(x_i) = 1 + \cos(\frac{2\pi}{g} x'_i)$ 인 격자를 CCD 이미지 평면앞에 설치할 경우 CCD이미지 평면에 입사되는 광의 밝기 $I_{sg}(x_i)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_{sg}(x_i) &= T_c(x_i)I(x_i) \\ &= A_i [1 + \cos(\frac{2\pi}{g} x'_i)] \cdot \\ & [1 + \cos(\frac{2\pi}{g}(\frac{fd}{L} h_i + x'_i + \Delta))] \end{aligned} \quad (11)$$

식(11)을 전개하여 도출되는 곱셈항중 x'_i 에 무관한 모아레 무늬의 밝기 $I_m(x_i)$ 는 다음과 같이 나타난다.

$$I_m(x_i) = A_i [1 + \cos(\frac{2\pi}{g}(\frac{fd}{L} h_i + \Delta))] \quad (12)$$

점 광원 이외의 외부 조명이 있는 일반적인 경우, $\Delta = \Delta_j$ 에 대한 모아레 무늬의 밝기 I_{mij} 는 다

음과 같다.

$$\begin{aligned} I_{mij} &\equiv I_m(x_i)|_{\Delta=\Delta_j} = B_i + C_i \cos(\phi_i + \frac{2\pi}{g} \Delta_j) \\ \text{단 } \phi_i &= \frac{2\pi}{g} \frac{fd}{L} h_i \rightarrow \phi_i \cong \frac{2\pi}{mg} \frac{d}{L} h_i, m \equiv \frac{L}{f} \end{aligned} \quad (13)$$

이때의 ϕ_i 를 모아레위상이라 한다.

위상 천이 모아레법(Phase-shifting Moire Topography)에서는 $\Delta_j (= \frac{g}{N} j, j=0, 1, 2, N-1)$ 에 대해 I_{ij} 를 측정하고 최소자승법등을 이용하여 ϕ_i 를 구함으로써 높이 h_i 를 구한다. 이 방법의 경우 CCD이미지 평면상에 기준 격자를 설치하여야 하여야 하고 식(11)과 같은 획득된 밝기 값 중에서 이미지 평면상의 위치 x'_i 에 무관한 모아레 무늬의 밝기만을 추출해야 하는 어려움이 있다.

또한 ϕ_i 는 측정 가능한 중첩 위상 $\overline{\phi}_i$ ($-\pi < \overline{\phi}_i \leq \pi$)과 정수 m 의해 다음과 같이 표현되므로

$$\phi_i = \overline{\phi}_i + 2\pi m$$

높이 변화가 큰 물체의 경우 위상 전개(Phase Unwrapping)과정이 필요한데 높이값의 연속성을 가정하는 방법을 주로 사용하고 있다.

2.4 Phase Measuring Profilometry

PMP법은 기준 격자를 사용하지 않고 식(10)과 같은 변형 격자 무늬의 밝기로부터 물체의 높이 정보를 직접 추출하는 방식이다.

점광원 이외의 외부 조명이 있는 일반적인 경우, $\Delta = \Delta_j$ 에 대한 변형 격자 무늬의 밝기 I_{ij} 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_{ij} &\equiv I(x_i)|_{\Delta=\Delta_j} = M_i + N_i \cos(\psi_i + \frac{2\pi}{g} \Delta_j) \quad (14) \\ \text{단 } \psi_i &= \frac{2\pi}{g}(\frac{d/m}{L-h_i} h_i + x'_i), m \equiv \frac{L}{f} \end{aligned}$$

위상 ψ_i 는 중첩위상 $\overline{\psi}_i$ ($-\pi < \overline{\psi}_i \leq \pi$)와 정수 n 의해 다음과 같이 표현되므로

$$\psi_i = \frac{2\pi}{g}(\frac{d/m}{L-h_i} h_i + x'_i) = \overline{\psi}_i + 2\pi n \quad (15)$$

h_i 가 0일 때, 즉 기준면 영상을 이용하여 얻은 기준 위상을 $\psi_{ir}(\equiv \psi_i|_{h_i=0} = 2\pi \frac{x_i'}{g})$ 라 하고 측정 대상 물체에 대한 위상을 ψ_{io} 라 할 때 두 위상의 차이 ψ_{im} 는 다음과 같으며 이는 식 (13)의 도 아래 위상 ϕ_i 와 같음을 알 수 있다.

$$\psi_{im} = \psi_{io} - \psi_{ir} = \frac{2\pi}{g} \frac{d/m}{L-h_i} h_i = \phi_i \quad (16)$$

3. 실험 및 결과

Fig.3은 실험에 사용된 실험 장치를 나타내고 있다. 카메라는 SONY사의 XC-75 흑백 CCD카메라를 사용하였고 렌즈는 SPACECOM사의 TV 줌 렌즈 S6X11을 사용하였다. 프레임 그래버는 DATA TRANSLATION사의 해상도 640x480의 흑백 프레임 그래버 DT3155를 사용하였다. 투영격자는 피치g가 0.92mm인 이진 격자로서 수정유리 판에 반도체 리소그래피 기술을 이용하여 제작하였다. 광원으로는 할로젠 광원을 광섬유에 집속하여 사용하였다. 또한 격자 이송을 위해 마이크로미터가 부착된 직선 이송 테이블을 사용하였다.

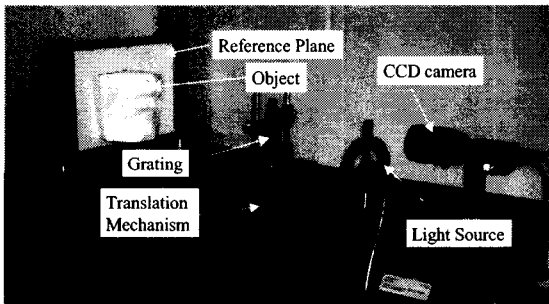


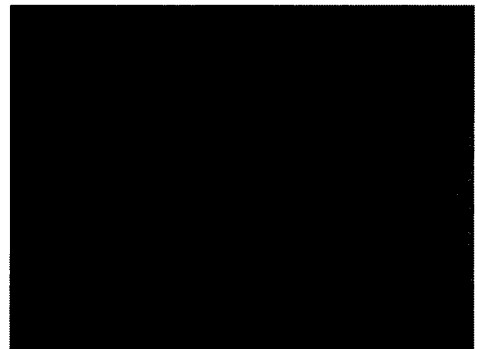
Fig. 3 Experimental Setup

Fig.4 는 격자를 20 μ m씩 이송시켰을 때 기준면의 임의 한 점(카메라 중심)에서 측정한 밝기값의 변화를 나타내고 있다.

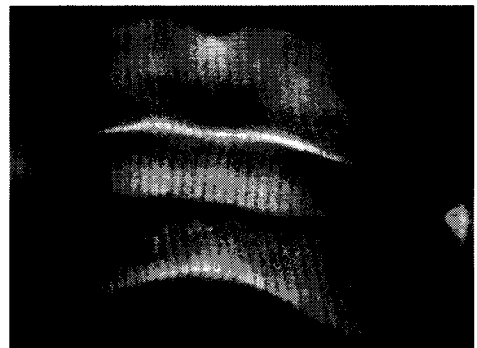


Fig. 4 Intensity variation with grating-shifting

Fig.5(a)는 CCD카메라에 의해 획득된 기준면에 투영된 격자 무늬 영상이고 Fig.5(b)는 측정 대상물인 입술모양 석고상에 격자 무늬가 투영된 영상이다.



(a) Image of reference plane



(b) Image of object

Fig. 5 Captured images

투영 격자의 이송량 Δ_j 를 $0, \frac{g}{4}, \frac{2g}{4}, \frac{3g}{4}$ 로

하여 기준 평면에 대한 4개의 이미지 $I_{r0}, I_{r1}, I_{r2}, I_{r3}$ 과 측정 대상 물체에 대한 4개의 이미지 $I_{o0}, I_{o1}, I_{o2}, I_{o3}$ 를 획득하였다.

이들 이미지의 밝기 값에 대해 다음과 같은 4 버킷 알고리즘^[7]을 사용하여 기준면 위상 $\overline{\phi_{ir}}$ 과 측정물 위상 $\overline{\phi_{io}}$ 를 계산하였다.

$$\begin{aligned} \overline{\phi_{ir}} &= \tan^{-1}\left(\frac{I_{r1} - I_{r3}}{I_{r0} - I_{r2}}\right) \\ \overline{\phi_{io}} &= \tan^{-1}\left(\frac{I_{o1} - I_{o3}}{I_{o0} - I_{o2}}\right) \end{aligned} \quad (17)$$

Fig.6(a)는 기준 평면의 각 점의 위상 $\overline{\phi_{ir}}$ 를, Fig.6(b)는 측정물의 각 점의 위상 $\overline{\phi_{io}}$ 를, Fig.6(c)는 모아레 위상 $\overline{\phi_{im}} (= \overline{\phi_{io}} - \overline{\phi_{ir}})$ 를 밝기로 표현한 그림이다. 이때 각 위상 값과 밝기의 관계는 Fig.6(d)와 같으며 위상값이 0일 때는 가장 밝은 값인 255로 표시하였고 위상값이 $\pm\pi$ 일 때는 가장 어두운 값인 0으로 표시하였다.

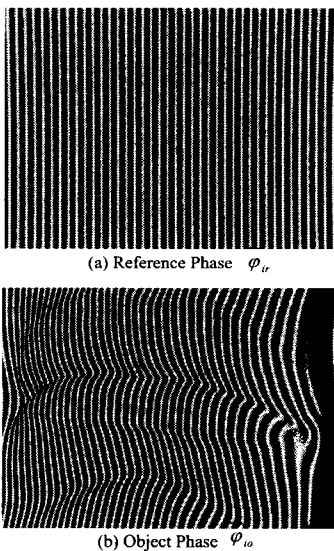
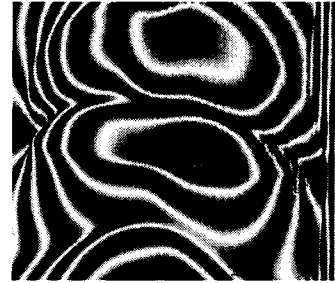
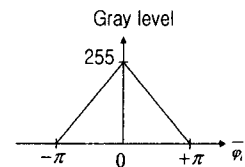


Fig. 6 Phase of reference, object and moire



(c) Moire Phase ϕ_{im}



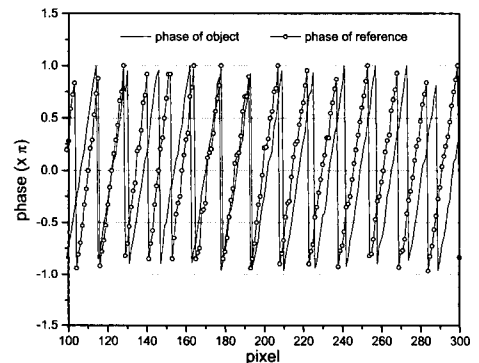
(d) Gray level vs. phase in (a),(b),(c)

Fig. 6 Phase of reference, object and moire

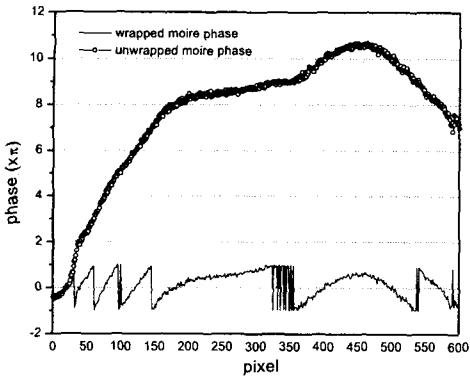
Fig.7과 Fig. 8은 측정물에 대하여 CCD 이미지 640*480영역 중 178행과 267열에 대해 기준 위상과 측정물 위상, 모아레 위상을 나타내고 있다.

4. 결론

본 논문에서는 광학식 비접촉 3차원 형상 측정 방법으로 많이 연구되고 있는 모아레법과 PMP법을 수식적으로 비교하여 단일 격자를 이용하는 PMP법으로도 2개의 격자를 사용하는 얻을 수 있는 모



(a) phase of reference & object



(b) phase of moire

Fig. 7 phase of 178'th horizontal line

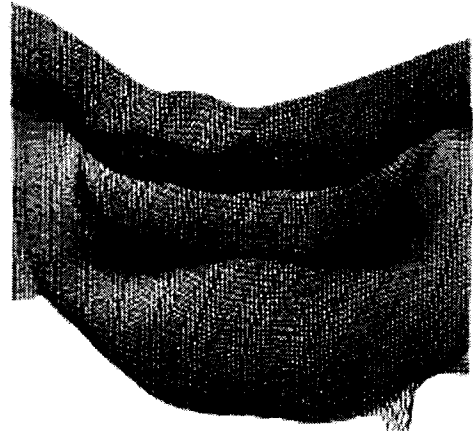
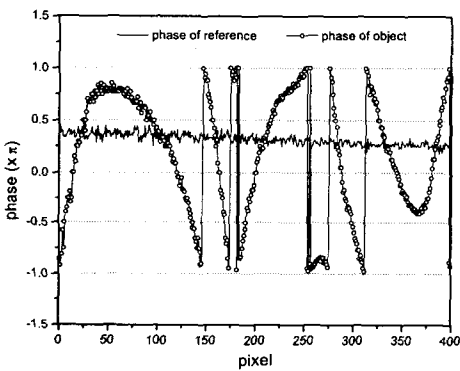
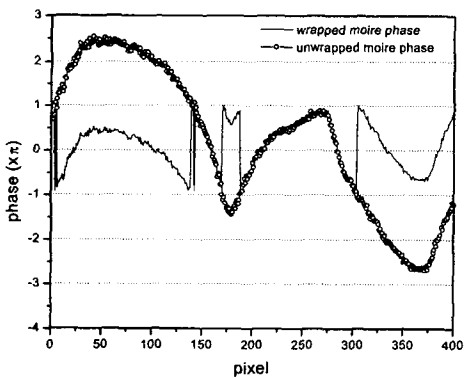


Fig. 9 measurement result



(a) phase of reference & object



(b) phase of moire

Fig. 8 phase of 267'th vertical line

아래 영상을 단순한 연산을 통해 쉽게 얻을 수 있음을 보이고 실험을 통해 확인하였다. 또한 내부 연산없이도 단일 격자만을 이용하여 모아레 무늬를 얻을 수 있는 조건을 제시하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 선문대학교 공조기 술연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Takasaki H., "Moire Topography," Applied Optics, Vol. 9, No. 6, pp. 1467-1472, 1970.
2. Creath K., "Phase-measurement Interferometry techniques," Progress in Optics, Vol. 26, pp. 349-398, 1988.
3. 김승우, 최이배, 오정택, 정문식, "위상천이격자를 이용한 영상식모아레," 대한기계학회논문집, 제22권, 5호, pp. 850-857, 1998.
4. Kujawinska M., "Use of Phase-stepping Automatic Fringe Analysis in Moire interferometry," Applied Optics, Vol. 26, No. 22, pp. 4712-4714, 1987.
5. Bone D.J., Bachor H.A., and Sandeman R.J.,

- "Fringe-pattern Analysis Using a 2-D Fourier Transform," *Applied Optics*, Vol. 25, No. 10, pp. 1653-1660, 1986.
6. Jie-Lin Li, Hong-Jun Su, and Xian-Yu Su, "Two-frequency grating used in phase-measuring profilometry," *Applied Optics*, Vol. 36, No. 1, pp. 277-280, 1997.
 7. 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.
 8. Ming Chang, "On-line Automated Phase-Measuring Profilometry," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 15, pp. 127-139, 1991.