

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

유원재* , 강영준# , 노형민** , 이동환***

A Study on 3-D Shape Measurement and Application by Using Digital Projection Moiré (II)

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

ABSTRACT

A simple dimension measuring method for the measurement of human bust has been developed using projection moiré. The 3-D data of a human bust was calculated from the 2dimensional image information obtained by the stripe using projection moiré. The creation of 3-D geometric shape by digitizing real objects has been widely investigated in reverse engineering(RE). This procedure generally consists of three basic steps: data capture, data alignment and model reconstruction. In order to achieve a complete model, multiple scans must be taken and aligned.

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

기호설명

I_p = Intensity of measured point
 I_o = Average Intensity
 γ = Visibility of Fringe
 Δ = Amount of Phase Shifting
 $\phi(x, y)$ = Measured Phase
 λ = Wavelength
 g = Pitch of Virtual Reference Grating
 L = Length of Camera to Reference Plane
 d = Length of Camera to Projector

$h(x, y)$ = Height of Object
 ϕ_{ip} = Wrapped phase
 m = Absolute Moiré Fringe Order

1. 서론

현대산업에서 광학적 측정방법은 Opto-mechanics 의 이점을 가지고 다양한 분야에서 유용한 측정방법으로 사용되고 있고, 표면 형상학의 분야에서 다시 한번 중요한 역할을 할 것으로 기대를 받고 있다. 그 중에 특히 인체를 측정대상

접수일: 2006 년 9 월 18 일; 게재승인일: 2007 년 2 월 23 일

* (재)전주기계산업리서치센터(JMRC)

교신저자: 전북대 기계항공시스템공학부

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

** 한국과학기술연구원(KIST) 시스템연구부

*** 전북대 기계항공시스템공학부

으로 하는 의류 및 의학산업은 물론 오락산업의 가상현실 구현분야에서 광학적 측정방법의 사용이 점차 확대되고 있다.¹

이러한 요구를 만족시킬 수 있는 광학을 바탕으로 한 영사식 무아레 방법은 고속측정이 가능하기 때문에 활발히 연구되고 있다. 또한 기존의 위상이동법을 사용함으로써 측정 분해능이 향상되어 무아레 무늬의 형태에 관계없이 측정이 가능하게 되었다.

그러나 위상 이동법을 사용하면 위상이동법의 기본적인 문제인 2π 모호성(2π -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 파장을 이용하는 방법이 연구되고 있으며 상당한 진전을 보여왔다.^{2,3}

이에 본 연구에서는 이전연구²에서 수행된 결과를 바탕으로 보다 짧은 시간에 인체형상을 3차원 스캐닝하여 흉상이나 부조를 제작하기 위한 2중 파장 영사식 무아레 측정시스템을 구성하여 단차가 매우 큰 인체흉상을 각 3면에서 측정할 수 있었고, 3면의 데이터를 조합하여 3차원 모델로 재구성하였다.

2. 이론

2.1 2중 파장 영사식 무아레 방법

Fig. 1은 영사식 무아레 방법의 광학계 구성을 보여주고 있다.

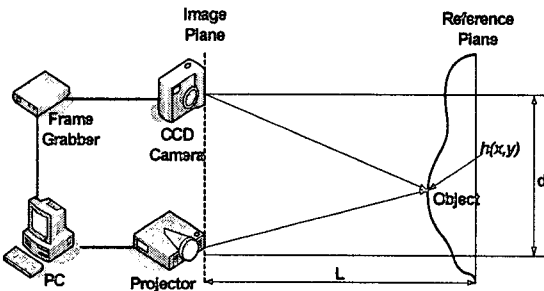


Fig. 1 Optical geometry of projection moiré

컴퓨터 모니터상의 픽셀단위의 피치를 가지는

가상의 기준격자를 기준평면 위에 영사시켜 기준격자 이미지를 획득하고, 4 frame 위상이동법을 사용하기 위하여 피치의 1/4 씩 이동된 가상의 기준격자를 만들어 영사시킴으로써 기준격자의 위상도(phasemap)를 형성한다. 또한 가상의 기준격자를 측정물체 위에 영사하고 기준격자 위상도를 형성하기 위한 방법과 동일하게 측정물체의 변형격자 위상도를 얻는다. 얻어진 기준격자 위상도와 변형격자 위상도를 간단한 화상처리 알고리즘을 이용하여 무아레 위상도를 얻는다. 이 때의 무아레 무늬의 광 강도는 다음과 같다.³

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

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

위상이동량 Δ 을 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 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 위상 값은 \tan^{-1} 의 연산의 특징으로 인하여 $-\pi \sim +\pi$ 사이의 위상 값만을 가진다. 이는 측정된 물체의 높이차가 파장의 1/2 보다 크면 측정되는 높이차는 파장의 1/2 보다 작게 측정된다. 이를 위상이동법의 2π 모호성이라 한다.

위상이동법의 2π 모호성의 문제는 얻어진 무아레 무늬의 차수(order)를 추출하지 못하기 때문에 일어나는 문제로 스펙클 간섭법에서 사용하는 2중파장(2-wavelength)의 원리를 사용하면 무아레 무늬의 차수 추출이 가능해져 측정물체의 단차에 무관하게 3차원 형상을 측정할 수 있다.³ 파장을 구하는 기본수식은 다음과 같다.³

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

여기서, λ : 파장, g : 가상의 기준격자의 피치
 L : Camera Lens 부터 기준평면까지의 거리

d: Camera 광축과 Projector 광축 사이의 거리 또한, 측정대상물체의 높이 $h(x,y)$ 는 다음과 같다.²

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

여기서 ϕ_{1p} : 위상정렬을 거치지 않은 위상이동법에 의해서 구한 주위상값, m : 무아레 무늬 차수, $h(x,y)$: 측정물체의 높이

Fig. 2 는 이중파장 간섭의 기본원리를 나타낸다. 2 중 파장원리를 사용하기 위해서는 2 개의 파장이 필요하므로 피치가 각각 g_1, g_2 인 가상의 기준격자를 만들어 각각에 대해 위상을 측정하여 ϕ_1 파 ϕ_2 를 획득한 후 이들을 이용하여 2 중파장의 기본 원리를 영사식 무아레 방법에 사용할 수 있다.

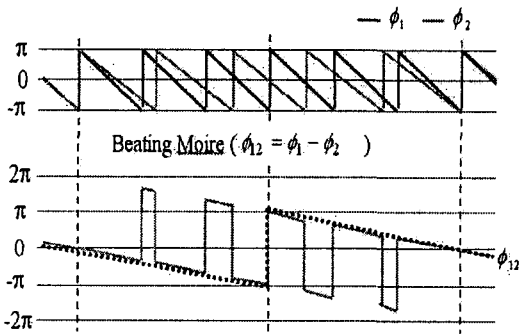


Fig. 2 Basic concept of two-wavelength moiré

피치가 g_1, g_2 인 가상의 격자를 사용해서 얻어진 위상도 ϕ_1 파 ϕ_2 를 사용해서 맥놀이 효과를 얻는 방법은 다음과 같다.^{3,4,5,6}

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

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

파장, ϕ_{12} : 맥놀이 현상으로 형성된 파장을 기준으로 표현한 위상

식(5)에서 보는 것처럼 g_1, g_2 의 피치의 비율 적절히 조절함으로써 매우 큰 등가파장을 사용하여 측정하는 것과 같은 효과를 얻을 수 있다.²

측정물체의 높이를 두 가지 파장 λ_1, λ_{12} 로 표현하면 짧은 파장을 기준으로 하는 무아레 무늬

위상의 차수(m)를 추출할 수 있다.

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

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

위 식에서 차수 m 은 이론적으로 정수이다. 그러나 위상 이동법으로 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 정수 값을 가지지 못하기 때문에 정수화 연산을 통하여 값을 구한다. 따라서 위상이동법을 사용하여 높은 분해능은 그대로 유지하면서 2π 모호성의 문제를 극복할 수 있다.

2.2 좌표변환

Fig. 3 은 세 방향에서 인체를 측정하기 위한 측정시스템의 구성도이다. Y 축을 중심으로 회전한 양쪽 면에서의 측정 data 는 좌표변환 과정을 통하여 정면에서의 절대 좌표 값으로 환산할 수 있다. 기준화면의 크기가 800×600 픽셀일 때 픽셀당 거리를 적용한 front view 를 (X_1, Y_1, Z_1) 라고 한다면 side view1 과 side view2 는 각각 $(-Z_2, Y_2, X_2)$ 와 $(Z_3, Y_3, -X_3)$ 로 변환해줌으로써 정면에서의 절대좌표로 바꿀 수 있다.⁷ 이렇게 절대좌표로 추출된 점데이터들은 다각형 기반 모델링 시스템(Polygon based modeling system)으로 형상모델링을 생성하였다.⁸

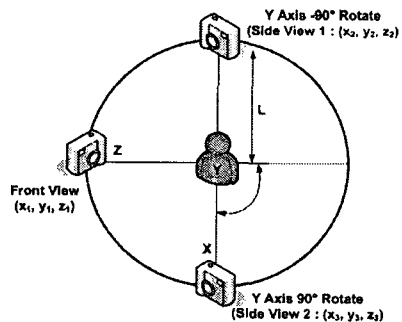


Fig. 3 The relative position of three employed scanners

3. 실험

3.1 실험 장치

Fig. 4 는 실험장치 구성을 나타내고 있다. 4 frame 위상이동법을 사용하기 위하여 컴퓨터 모니터상의 1 픽셀간격으로 가상격자를 이동하였다. 변형격자와 기준격자의 위상도를 구한 다음 이들의 강도 값을 빼주는 방법으로 측정을 하였다. 각각의 가상격자의 피치는 6.88mm, 7.74mm 이다. 그리고 L 은 1460mm, d 는 170mm 이다.

또한, 나머지 2 방향에서의 측정은 CCD 카메라와 LCD 프로젝터를 추가로 설치하여 총 3 방향에서 순차적으로 측정을 실시하였다.

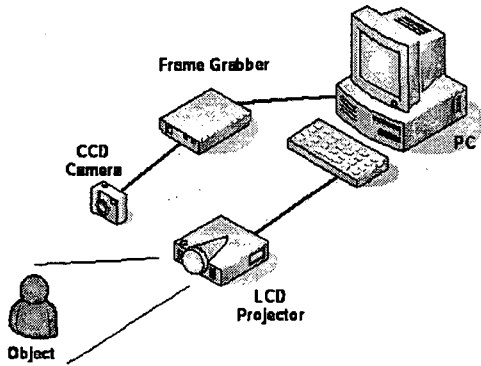


Fig. 4 Experimental set-up

3.2 시스템 오차분석

시스템의 정밀도를 분석하기 위해 다른 광학식 3 차원 측정기와와의 측정결과를 비교하고 반복능을 분석하였다. 비교에 사용된 측정기는 LDI (Laser Design Inc)社의 3 차원 레이저 스캐너를 사용했으며, 凹자형의 55mm 포켓을 가진 시편을 비교 측정한 결과 0.2mm 이내의 정밀도를 가지고 있었다. 이는 인체흉상을 측정하기 위한 pitch 값 및 측정거리에 대한 정밀도이며, 보다 작은 물체를 측정할 때에는 측정거리 및 pitch 가 달라지기 때문에 정밀도도 달라지게 된다.

측정반복능은 세 부분의 좌표를 각 20 번씩 측정하여 조사하였으며 각 부위별로 오차를 추출한 결과는 아래와 같으므로 반복능은 0.1mm 미만으로 볼 수 있다.

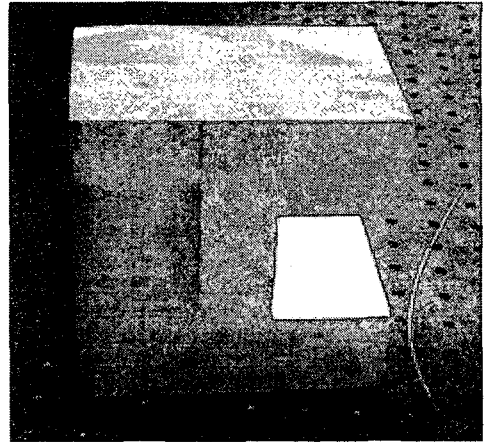


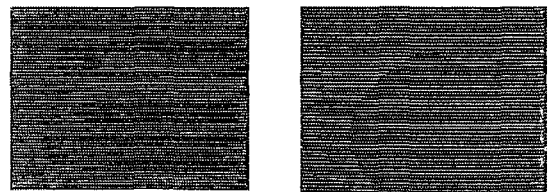
Fig.5 Specimen for measurement

Table 1 Error analysis of measurement system

측정부분	처음 측정높이 (mm)	오차범위 (mm)
이마부분	300.67	+0.09 ~ -0.08
양볼(왼쪽)	288.03	+0.07 ~ -0.06
양볼(오른쪽)	287.84	+0.08 ~ -0.06

3.3 측정 결과

Fig. 6 은 측정을 시작하기 전에 얻어진 기준격자 g_1, g_2 의 위상도를 각각 나타낸다. 각각 피치가 약간 다른 격자를 사용하여 위상이동 후 획득한 위상도이다.



(a) g_1 grating (b) g_2 grating

Fig.6 The reference phase-maps

Fig. 7 은 측정인체의 정면에서 측정한 위상도 및 3-D plot 이다. Fig. 7(a)와 (b)는 각각 단파장의 격자로 측정된 이미지로서, 측정높이에 대해 불연

속적인 특징을 나타내나, Fig. 7(c)는 등가과장을 사용하여 측정된 효과로 나타나서 불연속적인 부분이 없어지게 되었다. 이를 3-d 효과로 나타낸 것이 Fig. 7(d)에 나타나 있다. 1면당 순수하게 영상획득에만 소요된 시간은 약 2.5 초 정도 소요되었으며, 3 면의 총 영상획득 시간은 7.5 초 정도 소요되었다. Fig. 8 과 9는 좌측면과 우측면의 위상도 및 3-d plot 이다. 측정결과에 나타난 것과 같이 흉상 및 부조를 제작하기 위해 인체를 3 차원 스캐닝 하였으나, 얼굴표면 및 착용의상이 검정색이 아닐 경우에는 측정에 어려움이 없었으나 착용의상이 검은색인 경우는 측정결과가 만족스럽게 나타나지 않았다. 다만 아주 검은색 의상인 경우를 제외하곤, 프로젝터의 백색광이 측정면의 명도를 높여주는 효과가 있기 때문에 측정이 가능하였다. 이 경우 프로젝터의 광 강도가 너무 세면 광 포화 (Saturation)현상이 국부적으로 발생하며, 너무 약하면 측정데이터 추출에 어려움이 있으므로 적절한 투사강도를 조절해야만 한다.

머리카락의 경우에도 광 흡수현상이 발생하였으나 위에서 기술한 대로 프로젝터의 명도상승효과로 인해 측정이 가능하였다. 그러나 머리카락의 경우는 대체적인 머리결 및 헤어스타일을 표현하는 정도에 그침을 알 수 있었다.

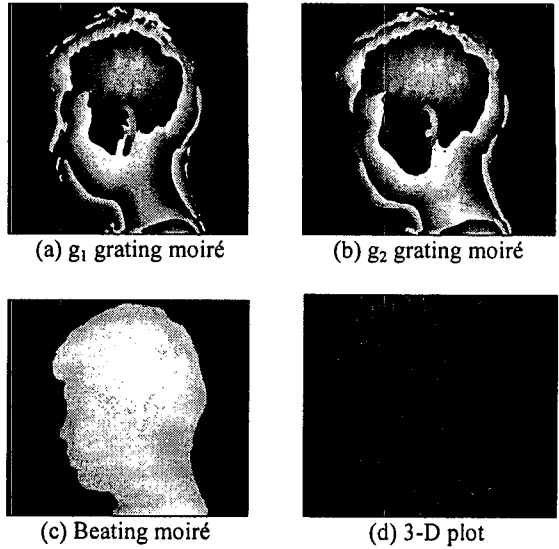


Fig. 8 The left view images

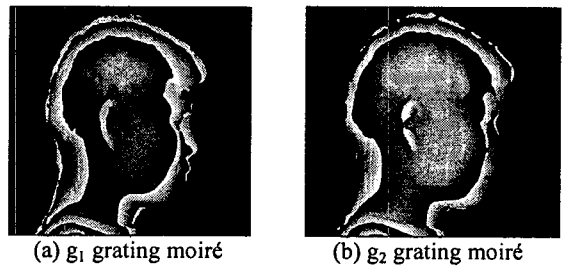


Fig. 9 The right view images

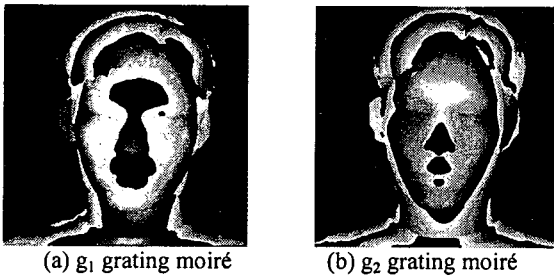


Fig. 7 The front view images

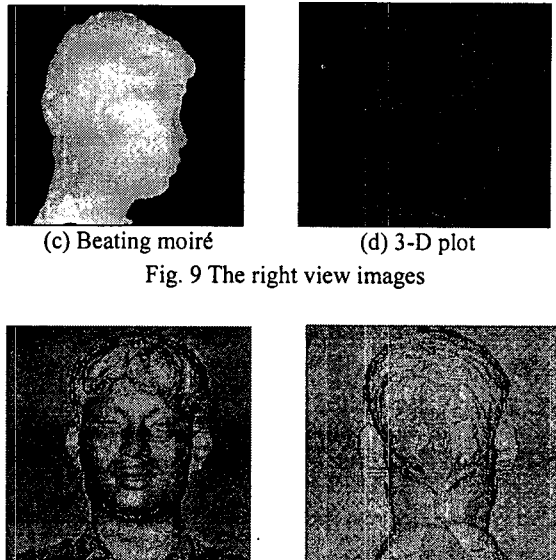


Fig. 10 The composition images

Fig. 10 은 측정된 좌측면과 우측면을 정면을 기준으로 절대좌표로 좌표변환을 거쳐 합성된 이미지를 나타낸다.

4. 결 론

본 연구에서는 비접촉 3 차원 형상측정법으로 많이 연구되고 있는 영사식 무아레 토포그래피로 측정영역과 높은 측정 분해능의 장점을 그대로 유지하면서 물리적인 격자를 사용하지 않고 컴퓨터를 이용하여 가상의 격자를 만들어 빔 프로젝터로 측정하고자 하는 인체에 투영하여 인체의 무아레 위상을 간단한 화상처리를 통해서 쉽게 얻을 수 있는 시스템을 구성하였다. 위상이동법의 측정 분해능은 그대로 유지하면서 측정 물체에 큰 단차가 존재 할 때 이중 파장을 사용하여 측정 물체의 단차와 무관하게 측정할 수 있음을 보였다. 또한 여러 방향에서 인체의 형상을 측정하여 완전한 모델을 만들기 위해 좌표변환과 합성과정을 거쳐 인체 흉상을 복원할 수 있음을 보였다.

참고문헌

1. Harding, K. G. and Boehnlein, A., "Absolute measurement using field shifted moiré," Proc. of SPIE, Vol. 1614, pp. 259-264, 1992.
2. Kim, S. W., Oh, J. T., Jung, M. S. and Choi, Y. B., "Two-Wavelength Phase-Shifting Projection Moire Topography for Measurement of Three-Dimensional Profiles with High Step Discontinuities," Journal of KSME, Vol. 23, No. 7, pp. 1129-1138, 1999.
3. Ryu, W. J., Kang, Y. J., Rho, H. M. and Lee, D. H., "A study on 3-D shape measurement and application by using digital projection moiré(I)," Journal of the KSPE, Vol. 22, No. 7, pp. 88-93, 2005.
4. Lin, J., Su, H. J. and Su, X. Y., "Two-frequency grating used in phase-measuring - profilometry," Applied Optics, Vol. 36, No. 1, pp. 277-290, 1997.
5. Wang, M. and Zhong, J., "Automated fringe analysis profilometry of 3-D diffuse objects," Proc. of SPIE, Vol. 2899, pp. 197-203, 1996.
6. Hu, Z. F., Luo, C. L. and Zhon, J. Q., "3-D diffuse object profilometry based on analysis the intensity of grating pattern," Proc. of SPIE, Vol. 2866, pp. 493-496, 1996.
7. Zhong, J. and Wang, M., "Tracking of carrier coded fringe pattern for the automatic measurement of 3-D object shapes," Proc. of SPIE, Vol. 2899, pp. 192-196, 1996.
8. KIST, "Development of a rapid 3D copy system," Ministry of Science & Technology, pp. 63-121, 2001.