

위상천이 영사식 모아레법을 이용한 고속 3 차원 형상복원

최이배, 구본기, 정연구

한국전자통신연구원 컴퓨터/소프트웨어 연구소

휴먼컴퓨팅연구부

305-600 대전광역시 유성우체국 사서함 106 호

cyb@etri.re.kr

Fast 3-Dimensional Shape Reconstruction Using Phase-Shifting Grating Projection Moiré Method

Yi-Bae Choi, Bon-Ki Koo, Yun-Koo Chung

Electronics and Telecommunications Research Institute

CSTL-Human Computing Department

Yusong P.O. Box 106, Taejon, 305-600, Korea

cyb@etri.re.kr

Abstract

A phase-shifting projection moiré method particularly intended for high-speed three-dimensional shape reconstruction of diffuse objects is presented. Emphasis is on realization of phase-shifting fringe analysis in projection moiré topography using a set of line grating pairs designed to provide different phase shifts in sequence. Further a time-integral fringe capturing scheme is devised to remove undesirable high frequency original grating patterns in real-time without time-consuming software image processing. Finally the performances of the proposed method are discussed with measurement results.

Key Words : *Projection Moiré Topography, Phase-shifting Fringe Analysis, Phase-shifting Grating, Three-dimensional Modelling, Time-integral Fringe Capturing*

1 서론

최근 들어 우리 주위를 가만히 살펴보면, 그 동안 생산현장에서 제품의 품질검사내지는 조립라인에서의 불량품검출등에 부분적으로 사용되었던 3차원형상측정기술들이 단지 공학분야에만 국한되지 않고 의학, 영화산업, 오락(entertainment)산업, 의복 산업 등 한층 더 우리 생활과 밀접한 관계를 갖는 분야로 그 응용범위를 확장하고 있는 것을 어렵지 않게 발견할 수 있다. 공학분야에 있어서 3차원 형상측정은 이미 중요한 분야로서 자리 매김을 했고 공학전반의 요소요소에서 더 많은 수요가 창출되고

있는 추세이다. 의학분야에서는 인체의 3차원형상측정을 통해서 몸의 이상유무를 검사하기도 하고 뼈에 손상을 입은 큰 사고에서 뼈 모양의 완벽한 복원을 위해서도 3차원형상측정기술은 유효하게 사용되어 진다. 영화 산업에서도 사람이 직접하기에 불가능하거나 많은 위험이 따르는 고난도의 연기에는 과거에 스텐트랩을 이용하던 것과는 달리 배우의 몸을 3차원형상측정을 통해 그 모습을 측정하고 이를 이용해 컴퓨터 그래픽상에서 처리를 함으로써 많은 문제점들을 해결하고 있다. 또한 오락이나 캐릭터산업에서의 보다 인간의 모습에 가깝고 자연스러운 동작이나 모습을 위해서 3차원형상측정기술을 유효하게 사용되어 지고 있다. 최근 들어서는 의복이나 신발산업에 까지 그 범위를 확장해서 소비자의 체형을 3차원형상측정하고 소비자에 가장 적합한 옷 내지는 신발을 추천하는 등 그 응용범위는 급속하게 증가하고 있는 추세이다.

모아레(Moiré)란 말은 처음으로 프랑스인들에 의해 불려진 말로써 고대중국에서 수입된 비단위에 새겨진 물결무늬를 일컫는 말이다. 이런 모아레는 근래에 들어서 광학이론을 통해서 두 개 이상의 주기적인 패턴이 겹쳐질 때 발생하는 상대적으로 기준의 패턴의 비해서 저주파를 가지는 일종의 간섭무늬로서 다시 정의되어 지게 된다. 맥놀이현상으로 설명되는 이 고유한 저주파의 모아레 무늬는 공학전반에 걸쳐 2차원변위뿐만 아니라 3차원형상측정에 이르기까지 넓은 응용범위를 가진다.

영사식 모아레는 일반적으로 측정을 하고자 하는 대상에 백색광 프로젝터를 이용해서 격자패턴을 주사하고 물체의 형상에 따라서 변형되어진 격자의 이미지를 다시 주사된 격자와 동일한 기준격자에 겹침으로써 모아레

무늬를 얻는 방법이다. 이 영사식 모아레법은 비교적 큰 물체의 3차원형상측정에 널리 사용되어진다. 본 연구에서는 위상천이격자를 이용한 영사식 모아레에 대해서 자세히 언급한다. 영사식 모아레에 위상천이법을 적용함으로써 측정분해능을 향상시키고 위상천이법을 적용함에 있어 발생하기 쉬운 위상천이오차에 전혀 영향을 받지 않는 위상천이격자를 새로이 제안한다. 또한 횡 방향으로의 측정분해능을 향상시키기 위해 고배율 광학계를 사용함으로써 필연적으로 발생하는 여러 문제점들을 격자이송법을 이용하여 해결한다. 위상천이격자를 이용한 실제 시스템을 설계, 제작하고 새로이 제안된 보정법을 통해 시스템을 보정한후 다양한 측정대상에 대해서 실제 측정을 수행함으로써 그 효율성을 입증한다.

2 영사식 모아레(Projection moiré topography)

그림 1은 영사식 모아레의 가장 보편적인 광학계를 보여준다. 영사식 모아레는 크게 영사격자의 투영을 위한 영사시스템(projection system)과 투영된 격자이미지의 결상을 위한 결상 시스템(viewing system)으로 나누어진다. 광원으로는 일반적으로 백색광이 사용되어지고, 광원과 투영격자의 사이에는 광원의 빛을 격자면에 균일하게 집광하기 위한 집광렌즈(condenser)가 위치한다. 한 쌍의 같은 피치를 가지는 동일한 직선격자가 각각 투영격자(projection grating)와 기준격자(viewing grating)로 사용되어진다. 이들 두 격자는 광축에 대해서 수직인 한 평면상에 대칭적으로 위치하게 된다. 직선격자는 여백과 격자선의 간격이 1:1인 론키-롤링(Ronchi-ruling) 격자를 사용한다. 광원에 의해서 조명 되어진 투영격자는 투영렌즈(projection lens)에 의해서 측정대상물체에 투영되어진다. 이렇게 투영된 직선형태의 격자는 물체의 높낮이에 따라서 휘어져게 되고, 이 변형된 격자는 다시 결상렌즈(viewing lens)에 의해서 기준격자 상에 결상 되게 된다. 이 때 모아레 무늬는 기준격자 상에 형성되어지고 최종적으로 릴레이렌즈(relay lens)에 의해서 CCD 카메라에 결상 되게 된다. 이 광학계에서 모아레 무늬의 등차수면(equi-order plane)이 평면으로 형성되기 위해서는 투영렌즈의 광축과 결상렌즈의 광축이 평행해야 하고 두 렌즈는 같은 평면상에 위치 해야만 한다. 즉, 투영시스템과 결상 시스템에서 격자와 렌즈가 광축과 평행한 임의의 한 축에 대해서 대칭적으로 구성되어야 한다.

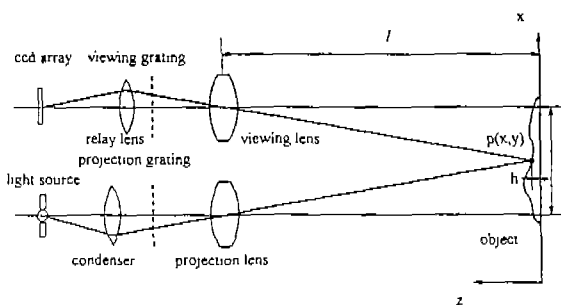


Figure 1. Optical configuration of projection moiré

일반적으로 영사식 모아레에 사용되는 직선격자의 투과도(transmittance)가 코사인 분포를 가진다고 가정하고 수학적 모델로 표현하면 다음과 같다.

$$T_p(x) = A \left[1 + \cos \frac{2\pi x}{g} \right] \quad (1)$$

$T_p(x)$ 는 격자의 투과도를 나타내고, A와 g는 각각 격자의 모듈레이션 값과 격자의 피치를 나타낸다. 이 격자가 투영렌즈를 통해서 물체에 투영되었을 경우 격자의 이미지는 다음과 같이 결정된다.

$$I_p(x, y) = I_s R(x, y) A \left[1 + \cos \frac{2\pi(x + h(x, y) \tan \theta_1)}{m_p g} \right] \quad (2)$$

m_p 는 투영렌즈의 배율, $h(x, y)$ 는 임의의 측정점 $P(x, y)$ 의 광축방향으로의 높이, θ_1 은 측정점 $P(x, y)$ 에서의 투영각도, I_s 는 광원의 광강도, $R(x, y)$ 는 측정대상물체의 반사도를 나타낸다. 위의 수식(2)에 있는 광강도 분포를 잘 살펴보면 코사인 함수의 위상이 단지 격자에 의해서만이 아니라 측정점의 높이 $h(x, y)$ 에 의해서도 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 기준격자 역시 투영격자랑 동일한 피치를 가지므로 다음과 같이 표현된다.

$$T_r(x) = A \left[1 + \cos \frac{2\pi(x - \delta)}{g} \right] \quad (3)$$

δ 는 투영격자와 기준격자사이의 위상의 차이를 변위로 나타낸 값이다. 수식적인 유도를 간단하게 하기 위해서 변형된 격자이미지가 기준격자에 결상 되는 과정을 역으로 기준격자가 결상렌즈를 통해서 측정물체에 가상적으로 투영된다고 생각을 하게 되면, 가상적으로 투영된 기준격자의 광강도 분포는 다음과 같이 표현된다.

$$I_r(x, y) = A \left[1 + \cos \frac{2\pi((x - \delta) + h(x, y) \tan \theta_2)}{m_v g} \right] \quad (4)$$

m_v 는 결상렌즈의 배율, θ_2 는 측정점 $P(x, y)$ 로의 투영각도를 나타낸다. 앞의 수식(2)의 이미지와 수식(4)의 가상이미지가 겹쳐지게 되면 간섭무늬가 발생하게 된다. 이렇게 해서 형성되는 광강도 분포 중에 가장 낮은 주파수를 가지는 항이 바로 모아레 무늬를 나타낸다. 수식(2)와 수식(4)의 곱셈후의 네 가지 항 중에서 모아레 무늬를 나타내는 항만을 적어보면 다음과 같이 나타내진다.

$$I(x, y) = B(x, y) \left[1 + \cos \left[\frac{2\pi}{mg} (h(x, y)(\tan \theta_1 - \tan \theta_2) + \delta) \right] \right]$$

(5)

수식(5)에서 $B(x, y) = I_s A^2 R(x, y)$ 이고 투영렌즈와 결상렌즈의 배율은 $m=m_p=m_v$ 로 가정한다.

3 위상천이격자판 이용한 위상천이법 (phase-shifting grating)

간섭무늬의 해석에 위상천이법을 사용하기 위해서는 그 간섭무늬의 광강도 분포가 다음과 같은 형태의 주기적인 분포를 가져야 한다.

$$I(x, y) = M(x, y)[1 + v(x, y)\cos(\phi(x, y) + \Delta)] \quad (6)$$

$M(x, y)$ 는 평균 광강도(mean intensity), $v(x, y)$ 는 간섭무늬의 정규화된 가시도(normalized visibility), $\phi(x, y)$ 는 측정대상의 초기위상, Δ 는 위상천이량을 나타낸다. 식(5)와 식(6)에서 $\Delta = 2\pi\delta / mg$ 로 두게 되면, 두 식 사이에는 다음과 같은 관계가 있음을 알게 된다.

$$h(x, y) = \frac{\lambda_{eq}}{2\pi} \phi(x, y), \quad \text{단 } \lambda_{eq} = \frac{mg}{\tan \theta_1 - \tan \theta_2} \quad (7)$$

위 식에서 λ_{eq} 는 모아래 무늬에 있어서 등가파장으로 정의된다. 식(6),(7)에서 초기위상 $\phi(x, y)$ 와 등가파장 λ_{eq} 를 구함으로써 측정점의 높이정보를 구할 수 있다. 하지만 식(7)에서 보는 바와 같이 등가파장의 값이 상수가 아니라 측정점의 높이에 따른 변수 θ_1, θ_2, m 에 따라서 변화하게 된다. 그림 1에서 표시한 대로 기하학적인 관계를 고려해서 등가파장 λ_{eq} 의 분모부분을 표현해 보면 다음과 같다.

$$\tan \theta_1 - \tan \theta_2 = \frac{d}{l - h(x, y)} \quad (8)$$

l 은 동작거리(working distance), d 는 두 광축 사이의 거리를 나타낸다. 이와 같이 결상렌즈 및 투영렌즈의 배율 m 을 다시 나타내본다.

$$m = \frac{l - h(x, y)}{f} \quad (9)$$

f 는 사용된 렌즈의 초점 거리이다. 식(8),(9)를 식(7)에 대입하고 정리하면 다음과 같다.

$$\lambda_{eq} = \frac{(l - h(x, y))^2 G}{f d} = \frac{l^2 g}{f d} (1 - h(x, y)/l)^2 \quad (10)$$

즉, 영사식 모아래에 있어서 위상천이법을 적용할 경우 등가파장의 길이는 측정물체의 높이에 따라서 비선형적으로 변화함을 알 수 있다. 임의의 측정점의 높이가 증가하게 되면 등가파장의 길이는 짧아지게 된다. 하지만 동작거리가 측정물의 높이에 비해서 상대적으로 매우 크게 될 경우에는 $h(x, y)/l \ll 1$ 이 되어 등가파장을 다음과

같이 상수로 가정할 수 있게 된다.

$$\lambda_{eq} \approx \frac{l^2 g}{fd} \quad (11)$$

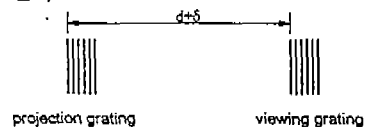
위에서 언급한 등가파장의 조건이 만족할 경우에 한해서 위상천이법은 영사식 모아래에 적용이 가능하게 된다. 본 연구에서는 널리 알려진 위상측정알고리즘중에 5-bucket 알고리즘을 사용한다. 위상천이법을 적용하기 위해서 정밀하게 제작된 위상천이격자판을 사용한다. 그림 2(a)에서 보는 바와 같이 위상천이격자판은 투영격자와 기준격자판을 한 쌍으로 해서 두 격자사이의 상대거리를 $d+\delta_i$

(단, $\delta_i = \frac{g}{(n-1)}(i-1)$ n 은 위상천이법에서 bucket의 수,

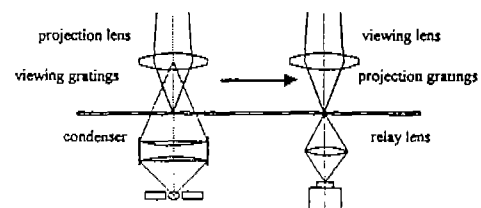
본 연구에서는 $n=5$, i 는 i 번째 bucket)로 하고 하나의 수정유리(quartz glass) 위에 반도체 리소그라피 기술을 이용해서 n 쌍을 새겨넣어 제작한다. 이렇게 제작된 위상천이격자판을 이용하면 위상천이를 매우 용이하게 얻을 수 있다. 그림 2(b)에서 보는 바와 같이 각 격자쌍들의 상대적인 위상이송량은 순차적으로 $\Delta = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2, 2\pi$ 가 된다. 상용화된 반도체 리소그라피 기술의 위치정밀도가 $0.025\mu m$ 이므로, $g = 25\mu m$ 인 격자를 사용할 경우 위상이송시의 각 bucket에서의 위상천이오차는 0.007rad 정도(0.5%)로 매우 안정적인 위상이송이 가능하게 된다. 따라서 위상천이법을 적용할 경우 중요한 오차요인의 하나인 위상천이오차를 별다른 처리 없이 하드웨어적으로 해결할 수 있다. 순차적으로 위상천이격자판이송되면서 각 격자의 쌍에 대해서 $I_1(x, y), I_2(x, y), I_3(x, y), I_4(x, y), I_5(x, y)$ 의 광강도를 획득한다. 이 영상을 가지고 다음의 식을 이용해서 각 측정점에서의 초기위상을 구한다.

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \frac{2(I_4 - I_2)}{I_1 - 2I_3 + I_5} \quad (12)$$

이렇게 해서 초기위상이 구해지면 식(7)을 이용해서 측정점 $P(x, y)$ 에서의 높이 $h(x, y)$ 를 구할 수 있다. 하지만 식(12)의 결과로 구해지는 초기 위상값은 $-\pi \sim +\pi$ 사이의 주위상값만을 가진다. 따라서 측정대상물의 형상을 제대로 구하기 위해서는 위상정렬(phase-unwrapping)의 과정을 거치게 된다.



(a) grating pair

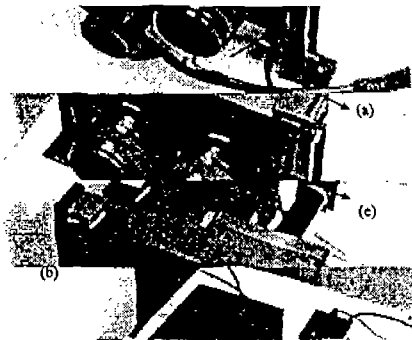


light source CCD camera
(b) translation for phase shift and noise rejection

Figure 2. Phase shifting for projection moiré
4 시적분 영상획득 : 격자이송을 통한 노이즈 제거 (time-integral fringes capturing)

그림 3은 본 연구를 통해서 지금까지 언급한 내용을 중심으로 설계, 제작된 위상천이격자를 이용한 영사식 모아레 장치를 보여주고 있다. 투영렌즈 및 결상렌즈로는 니콘(Nikon)사의 초점거리 60mm의 매크로렌즈를 사용한다. 매크로렌즈는 다른 표준 렌즈들에 비해서 렌즈의 수차와 왜곡이 상대적으로 적어서 이로 인한 오차를 최소화 할 수 있다. 다섯 쌍의 투영/기준격자로 만들어진 위상천이격자는 반도체 리소그래피를 이용해서 크롬코팅이 된 수정유리(chrome coated quartz glass)에 새겨져 매크로렌즈의 영상면에 위치한다. 위상천이격자는 위상천이를 위해서 마이크로 스테핑 모터에 의해서 동속으로 구동된다. 광원으로는 150W의 할로겐램프가 사용되어진다. 기준격자위에 형성된 모아레 무늬는 X5의 현미경대물렌즈를 거쳐서 640x480의 CCD 카메라에 연결된다. CCD 카메라는 IBM 호환 펜티엄컴퓨터에 장착된 8-bit의 프레임 그래버(frame grabber)로 획득한 영상을 보내고, 최종적으로 위상측정알고리즘을 이용해서 3차원형상측정이 이루어지게 된다.

본 연구에서 측정대상은 석고용상이나 조각상과 같은 자유곡면을 가지는 물체에 초점이 맞추어 졌다.



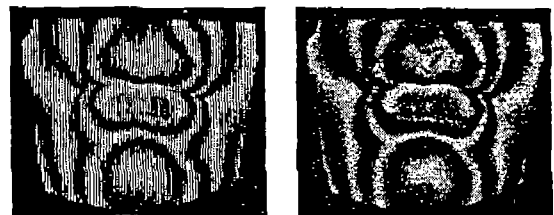
(a) CCD camera & microscope probe, (b) projection macro lens, (c) viewing macro lens, (d) light projector, (e) grating translation mechanism

Figure 3. Photograph of experimental setup for phase-shifting projection moiré topography

그림 4(a)는 위상천이격자를 이송시키지 않는 상황에서 입술모양의 석고상에 대해서 CCD 카메라로 획득한 영상을 보여주고 있다. 이 영상에는 석고상의 배경영상, 모아레 간섭무늬 그리고 기준격자가 한데 섞여 있음을 알 수 있다. 기준격자에 의해서 상당한 부분의 영상이 가려져 있다. 이와 같이 기준격자에 의해서 가려진 부분은 위상을 이송하는 데도 불구하고 광강도의 변화가 없게 되

로 측정이 불가능하게 된다. 따라서 기준격자를 제거하지 않고서는 측정을 제대로 수행하기에 많은 어려움이 따른다. 영상처리를 이용해서 획득된 영상에서 기준격자를 제거하는 방법으로 가장 많이 사용되는 방법으로는 푸리에 변환을 이용한 방법이다. 기준격자의 영상은 모아레 무늬에 비해서 상대적으로 높은 주파수성분을 가진다. 또한 거의 단 파장에 가까운 관계로 FFT를 이용하면 효과적으로 제거는 가능하다. 하지만 이렇게 할 경우 기준격자의 주파수성분과 비슷한 대역에 존재하는 모아레 무늬의 왜곡을 가져오게 되어 측정결과의 손상을 초래하며 많은 시간이 소요되는 단점을 가진다.

실시간 처리가 가능하면서 모아레 무늬에 왜곡을 주지 않는 방법으로는 시적분 영상획득법(time-integral fringe capturing)[9]이 있다. 투영격자 및 기준격자를 서로 상대운동이 발생하지 않도록, 즉 동시에 같은 속도로 이송을 시키게 된다. 격자의 이송이 이루어지는 동안 CCD 카메라는 영상을 일정시간동안 적분을 한다. 투영격자와 기준격자사이의 상대운동이 발생하지 않기 때문에 모아레 무늬는 변하지 않고 노이즈로 작용하는 기준격자는 평균화 효과에 의해서 사라지게 된다. 본 연구에서는 하나의 마스크에 투영격자와 기준격자를 새겨넣고 투영격자에 대해서 상대적으로 위상천이량을 고려해서 기준격자를 제작하였다. 따라서 마이크로 스테핑 모터로 위상천이격자를 일정속도로 구동만 하게 되면 위상천이효과와 기준격자제거효과를 동시에 수행할 수 있다. 실제 똑같은 측정 대상에 대해서 시적분 영상획득법을 적용할 경우에 기준격자를 효과적으로 잘 제거할 수 있음을 그림 4(b)를 통해서 알 수 있다. 더불어 시적분 영상획득법은 자칫 격자상에 발생할 수 있는 여러 먼지나 흠집 등의 노이즈도 효과적으로 제거한다.



(a) raw image (b) enhanced image

Figure 4. Time-integral fringe capturing

시적분 영상획득 시에 CCD에 미치는 영상은 다음과 같은 광강도 분포를 가진다.

$$I_t(x) = A \left[1 + \frac{\sin(\tau v \pi / g)}{(\tau v \pi / g)} \cos \frac{2\pi}{g} (x - \delta + (\tau v / 2)) \right] \quad (13)$$

$T_t(x)$ 는 식(3)에서 정의한 바와 같이 기준격자의 투과도를 나타내고, $I_t(x)$ 는 CCD에 획득되는 광강도, v 는 격자의 이송속도, τ 는 CCD의 영상획득시간을 나타내고 있다. 식(13)을 잘 살펴보면 영상의 평균광강도 A 는 상수로 남고

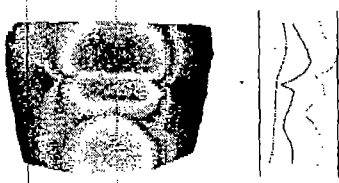
기준격자의 주기적인 성분항의 가시도는 $\sin(\tau v \pi / g) / (\tau v \pi / g)$ 로 나타나고 있음을 알 수 있다. 기준격자가 완전히 제거된다는 것은 이 가시도 성분이 0인 경우를 의미하므로 $\tau v = 0, g, 2g, 3g \dots$ 인 경우에 기준격자는 완전히 제거되어 진다. 그리고, 정확히 τv 값이 격자피치의 정수배가 되지 않는다 하더라도 그 값이 충분히 커지게 되면 기준격자는 모아레 무늬에 거의 영향을 줄 수 없게 된다. 따라서 실제 경우에는 τv 값을 격자피치의 정수배가 되도록 속도제어를 정확하게 하던지 아니면 그 값을 충분히 크게 해서 기준격자를 효과적으로 제거할 수 있다.

5 고찰

실제 측정에서는 측정분해능을 향상시키기 위해서는 모아레 무늬의 가시도를 최대한으로 하기위해서 AD 변환기의 이득값(gain)과 오프셋(offset)을 잘 조정하는 작업이 요구된다. 그림 5(a)는 입술모양의 석고상에 대한 3차원형상 복원 결과를 나타내고 있다. 측정결과에서 보는 바와 같이 실제 석고상의 형태가 잘 복원되었음을 알 수 있다. 그림 5(b)에서는 측정된 입술모양 석고상의 단면형상을 보여주고 있다.



(a) a lip-shaped sculpture



(b) cross-sectional profiles

Figure 5. 3-D reconstruction example

그림 5에서의 예보다 더 큰 물체에 대한 측정을 수행해 보았다. 아래 그림 6(a),(b)는 각각 석고흉상과 나무로 만들어진 전통조각에 대한 측정결과를 보여준다. 본 연구에서 제안한 위상천이격자를 이용한 영사식 모아레법은 이와 같이 다양한 측정대상에 대해서 고속, 고정밀 3차원 형상복원을 안정적으로 수행함을 알 수 있었다.

6 결론

자유곡면을 가지의 임의의 물체에 대한 고속, 고정밀 3차원형상 복원을 위해 위상천이 영사식 모아레법에 관한 연구를 수행하였다. 측정분해능을 향상하기 위하여 영사식 모아레에 위상천이법을 도입하였다. 위상천이 영사식 모아레에서 안정적인 위상천이와 실시간 노이즈 제거를 위하여 위상천이격자를 이용한 영사식 모아레를 새로이 제안하고 다양한 측정대상에 대해 실제 3차원형상측정을 수행하였다. 본 연구에서 제안된 방법은 복잡한 구조를 가지는 다양한 종류의 물체에 대해서 뛰어난 3차원형상 측정을 수행한다.



(a) a Korean traditional sculpture



(b) a plaster figure

Figure 6. 3-D Reconstruction of free-formed surfaces

8 참고문헌

[1] Lord Rayleigh, 1874, *Philos. Mag.* 47, 81,193
 [2] D.M.Meadows, W.O.Johnson, and J.B.Allen, 1970, "Generation of surface contours by moiré patterns," *Applied Optics* Vol.9, No.4, pp.942-947
 [3] H.Takasaki, 1970, "Moiré Topography," *Applied Optics*, Vol.9, No.6, pp.1467-1472
 [4] K. Creath, 1988, "Phase-measurement interferometry techniques," *Progress in Optics*, Vol.26, pp.349-398
 [5] M. Kujawinska, 1987, "Use of phase-stepping automatic fringe analysis in moiré interferometry," *Applied Optics*, Vol.26, No.22, pp.4712-4714
 [6] J. Dirckx and W. Decraemer, 1990, "Automatic calibration method for phase shift shadow moiré interferometry," *Applied Optics* Vol.29, No.10, pp.1474-1476
 [7] T. Yoshizawa and T. Tomisawa, 1993, "Shadow moiré topography by means of the phase-shifting method," *Optical Engineering* Vol.32, No.7, pp.1668-1674
 [8] T. Mathumoto, Y. Kitagawa, T. Minemoto, 1996, "Sensitive-variable moiré topography with a phase shift method," *Optical Engineering* Vol.35, No.6, pp.1754-1760
 [9] M. Halioua, R.S. Krishnamurthy, H. Liu, and F.P. Chiang, 1983, "Projection moiré with moving grating for automated 3-D topography," *Applied Optics*, Vol.22, No.6, pp.850-855