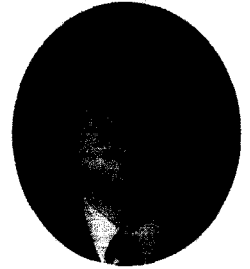


# 삼차원 영상인식을 위한 모아레 기술 (Moire Topography for 3D Image Recognition)



김 승 우

한국과학기술원 기계공학과

## 요 약

오늘날 삼차원 영상인식에 대한 산업적 수요는 꾸준히 증가하고 있으며, 이에 대응하여 다양한 광계측 원리들이 개발되어 시험되고 있다. 모아레 기법도 삼차원 영상인식을 위해 많은 발전을 거듭하고 있으며 현재 시도되는 다른 광계측 방법들에 대해 다양한 기술적 경쟁력을 갖고 있다. 본 기술소개에서는 삼차원 영상인식을 위해 최근 국내외에서 활발히 진행되고 있는 모아레 기법의 현재의 연구 현황 및 앞으로의 발전 전망에 대해 정리하였다.

## 1. 삼차원 영상인식

삼차원 영상인식의 산업적인 수요는 로봇 공학의 발전과 더불어 인간의 시각을 모방할 수 있는 기계시각장치의 개발에 대한 욕구에서부터 시작되었다고 할 수 있다. 오늘날 산업기술의 발전에 따라 삼차원 영상인식 기술의 수요는 다양한 분야로 확장되고 있으며 이의 대표적인 예가 컴퓨터 그래픽스를 이용한 가상 현실을 위한 삼차원 모델링을 들 수 있다. 이뿐 아니라 삼차원 영상매체, 생산공학, 의류 및 보건 분야에서도 표 1과 그림 1에 정리된 바와 같이 다양한 수요가 창출되고 있다. 이제 삼차원 영상인식 기술은 단지 인간의 시각에 대한 모방이 아니라 다양한 측정 정밀도, 범위 그리고 속도를 요구하고 있으며 이에 대한 광범위한 연구와 발전을 이루고 있다. 현재 기술의 예측 관점에서 볼 때 삼차원 영상인식 기술은 폭 넓은 수요와 파급효과를 갖고 있으며, 향후 미래산업의 기반기술로 성장될 것으로 확신되고 있다.

기존의 영상광학에 근거한 카메라, 현미경 등을 포함한 영상인식 매체는 삼차원 물체를 이차원의 영상평면에 결상하는 제한적 기능을 갖는다. 이는 근원적으로 물체가 갖는 삼차원 정

보를 손실하게 되며, 삼차원 영상인식을 위해서는 새로운 광학 원리의 도입이 필요하게 된다. 역사적으로 삼차원 영상인식을 위한 초기의 시도는 대부분 스테레오 시각 기술(stereo vision)<sup>[1]</sup>에 의존하였다. 이는 인간의 시각이 갖는 삼차원 정보추출의 원리에 근거하고 있다. 그러나 스테레오 시각 기술은 두 가지의 근원적인 문제점이 해결되고 있지 못해 그 성과 면에서 대단히 미흡한 상태이다. 첫째는 인간의 안구에서는 수정체 렌즈가 유연변환이 가능하여 대상물체의 거리에 적합한 자동초점 기능을 통해 물체의 거리정보를 거시적으로 획득이 가능한 반면, 아직 공학적으로는 수정체 렌즈의 기능을 구현할 수 있는 유연 수축이 가능한 렌즈가 개발되지 못하고 있다. 또 다른 문제점은 미세한 삼차원 정보의 추출이 인간의 뇌에서는 두 안구로부터 입력되는 영상으로부터 동일 점의 인식이 학습을 통해 수월하게 진행되는 반면, 아직 공학적으로 인간의 뇌에 대응되는 연산 능력과 지적 기능을 소유한 영상처리 프로세서를 확보하고 있지 못하고 있다. 이러한 이유로 초기에 많은 실험 가능성이 있다고 믿었던 스테레오 시각기술은 현재 부진한 상태에 머물러 있다.

삼차원 영상인식의 비교적 안정된 구현은 광삼각법(Optical Triangulation)의 단순한 기하광학의 원리를 통해 이루어졌다. 그림 2는 광삼각법의 한 예를 보여주고 있으며, 하나의 카메라만을 사용하면서 삼차원정보의 추출을 위해 공간 상에서 위치가 잘 정의된 레이저 빔이나 평면광을 이용한다. 하나의 카메라에서 얻어지는 영상으로부터 물체의 삼차원 좌표 미지수 ( $x, y, z$ )의 추출에 필요한 2개의 조건식을 얻고, 보조광의 영상으로부터 또 하나의 추가 조건식을 얻게 된다. 결국 세 개의 미지수 ( $x, y, z$ )는 얻어진 세 개의 조건식들로부터 적절한 역연산을 통해 추출되게 된다. 이러한 광삼각법은 삼차원 인식을 가능하게 하나, 보조광을 측정 물체에 주사하는데 장시간이 소요되며 정밀도면에서도 산업적인 수요에 미치지 못하고 있는 실

표 1. 삼차원 시각의 대표적인 산업적 수요

수요 항목	수요의 특성
로봇 항로 제어	인간의 시각과 비교될 수 있는 고속의 측정을 요구.
컴퓨터 그래픽스 모델	물체의 삼차원 기하 형상 및 칼라 정보를 동시에 컴퓨터 내에서 구축.
Reverse Engineering	가공 대상의 물체로부터 직접적인 가공 데이터의 추출.
생산 제품의 삼차원 검사	제조라인에서 생산되는 공업제품의 삼차원 형상 검사로 정밀도와 속도가 중시.
의류 신발의 체형 측정	의류와 신발의 설계를 위한 인간의 표준 형상 규격 구축.
의료 보건 체형 측정	인체의 외형 또는 치형 등의 삼차원 형상을 정밀하게 측정.

정이다. 이러한 광삼각법의 문제점을 해결하기 위해 측정시간을 최소화하기 위한 보조광의 고속 주사에 대한 여러 연구가 진행되었으며, 이 결과 실용화에 많은 성과를 이루고 있다. 이와 더불어 광속의 공간 상에서의 진행시간(Time-of-flight)의 측정을 통한 삼차원 측정기술도 최근의 시간측정기술의 발전과 함께 많은 성과를 거두고 있다<sup>[2]</sup>.

## 2. 모아레 토폠포그래피

모아레 현상은 1874년 Lord Rayleigh<sup>[3]</sup>에 의해서 최초로 과학적인 도구로서의 사용이 제안되어진 이후로 다양한 계측 분

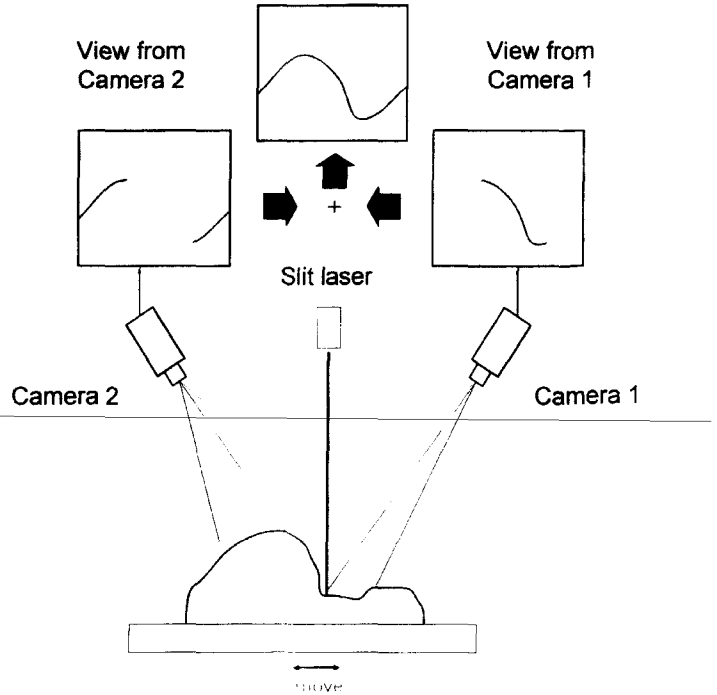


그림 2. 광삼각법의 기본 원리.

야로의 응용에 대한 연구가 진행되어져 왔다. 특히 1970년에 이르러 Meadows<sup>[4]</sup>와 Takasaki<sup>[5]</sup> 등에 의해서 모아레 현상이 임의의 형상을 가지는 물체의 3차원(out-of-plane)형상을 측정하는데 응용되어질 수 있음이 밝혀지면서 부터 이 분야에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. 이제까지의 3차원 형상측정을 위

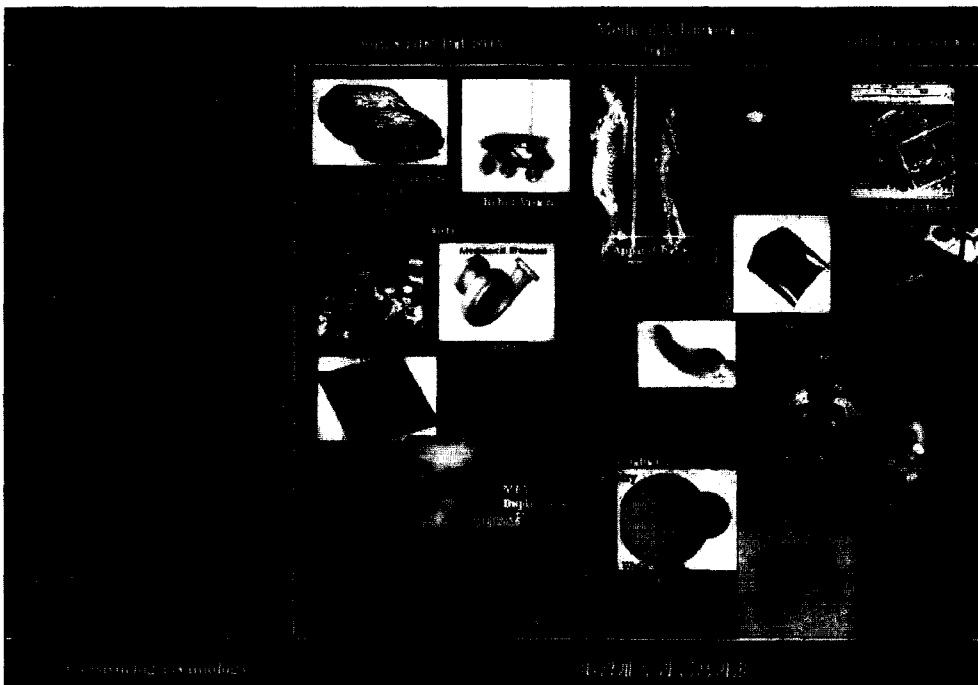


그림 1. 삼차원 영상인식과 광계측 기술의 기술 수요동향.

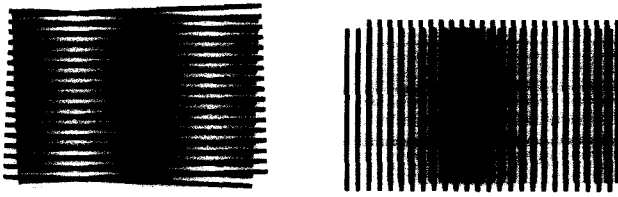


그림 3. 모아레 무늬 형성의 기본 원리.

한 모아레 방법을 모아레 토포그래피(Moire Topography)라 칭하며, 간섭무늬를 형성시키는 방법에 따라서 크게 그림자식(shadow moire), 영사식(projection moire), 그리고 반사식(reflection moire)으로 구분한다<sup>[6]</sup>.

모아레 간섭무늬의 형성은 이론적으로 공간상의 맥놀이(Spatial beating) 현상으로 설명될 수 있다. 두 개의 유사한 공간상의 주기를 갖는 격자가 겹쳐진 상태를 공간상의 주파수 영역에서 살펴보면, 그림 3에 보이는 바와 같이 원래의 격자들이 갖고 있던 고유의 주파수 성분들과 격자 주기의 합과 차에 해당하는 주파수 성분으로 분리할 수 있게 된다. 이때 격자 주파수의 차에 해당하는 저주파수 성분을 모아레 간섭무늬라 한다. 모아레를 이용한 삼차원 측정에서는 격자의 하나는 주기가 일정한 기준 격자를 사용하며, 또 하나의 격자는 기준격자가 측정 대상물에 의해 변조된 상태의 측정 격자를 생성하여 간섭무늬를 생성한다. 이때 저주파수의 모아레 무늬는 측정 대상물의 형상정보를 갖게 되며 일반적으로 측정 대상물의 등고선의 궤적과 일치하게 된다. 그림 4는 Takasaki<sup>[5]</sup>에 의해 구현되었던 그림자식 모아레의 한 응용 결과를 보여준다. 측정 대상물 앞에 격자를 위치하고 조명광을 입사하면 격자의 그림자가 물체의 표면에 형성되게 된다. 모아레 무늬의 형성은 격자와 그림자를 동시에 관측함으로써 이루어진다. 그림자식 모아레는 비

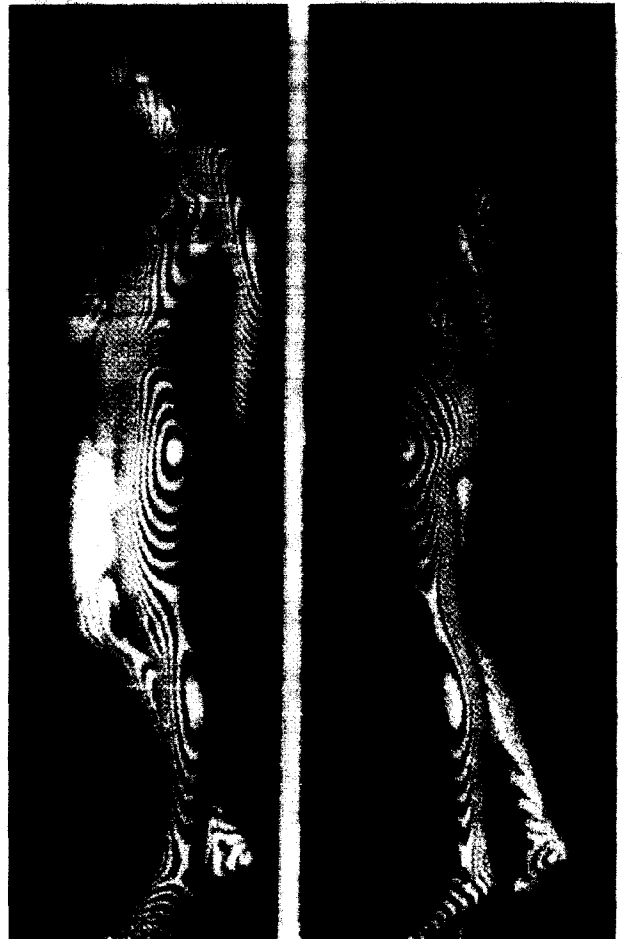


그림 4. Takasaki<sup>[5]</sup>의 그림자식 모아레 토포그래피.

교적 큰 물체의 삼차원 형상측정에 유리하며, 격자에서 발생하는 빛의 회절에 의한 측정 깊이의 제한이 비교적 작은 장점을 갖는다.

최근 모아레 기술의 산업적 응용은 마이크로컴퓨터의 연산

표 2. 삼차원 영상인식을 위한 대표적인 기술 요약

	기술 명	기술의 특징
거시 계측	스테레오 비전 (Stereo vision)	인간시각 시스템과 가장 유사함. 현재의 공학수준에서 완벽한 구현에 많은 어려움이 있음.
	광삼각 주사법 (Optical triangulation)	단순 기하광학의 응용으로 구현이 용이하나, 측정의 속도와 정밀도 면에서 타 방법에 뒤떨어짐.
	체공시간 측정법 (Time-of-flight)	먼 거리의 측정에 유리한 반면, 짧은 거리의 측정에는 정밀도가 상대적으로 저하됨.
	모아레 법 (Moiré topography)	측정의 정밀도가 우수하면서도 거시측정이 가능한 장점을 갖고 있음.
미시 계측	스펙클 간섭 (Speckle interferometry)	정밀도가 우수하나 측정의 대상이 스펙클의 형성 여부에 따라 제한되는 문제점이 있음.
	동초점 현미경 (Confocal microscopy)	미시계측에서는 측정 속도 및 정밀도 면에서 우수한 장점을 가지나 창치가 복잡한 단점이 있음.
	광위상간섭(Phase-measuring interferometry)	다양한 간섭방법이 가능하며 다양한 용도로의 변환이 가능함.
	프로브주사법(Scanning probe microscopy)	비교적 짧은 역사를 가지나 원자단위의 초정밀 삼차원 계측이 가능함.

능력의 향상과 간섭 무늬의 해석의 개선에 의해 도약의 시기를 맞고 있다. 초기에 모아레 무늬 해석에는 연속적인 간섭무늬의 중심을 추종하는 프린지 추적(fringe contouring)기법에 의존하였다. 그러나 프린지 추적 해석 방법은 낮은 분해능, 그리고 간섭무늬의 형태에 따른 해석의 제한성 때문에 많은 한계점을 가지게 되었다. 그 이후 푸리에 변환을 이용한 주파수 영역에서의 영상 처리 방법을 통한 모아레 무늬를 해석하는 여러 가지 방법들도 연구되어졌다. 그리고 최근에 제일 괄목할 만한 발전이 이루어졌는데 이는 위상천이법<sup>[7]</sup>의 적용이라 할 수 있다. 모아레 무늬는 광축 방향으로 광강도의 분포가 주기적인 조화함수의 형태를 갖는다는 가정에서 출발한 이 해석 방법은 1987년 Kujawinska<sup>[8]</sup>에 의해 처음 제안된 이후 많은 연구<sup>[8-10]</sup>가 진행되어졌다. 위상천이법의 적용으로 인해서 모아레 방법은 괄목할만한 분해능향상과 더불어 프린지의 형태에도 전혀 구애를 받지 않는 아주 유용한 비접촉 3차원 형상측정법으로 발전하게 되었다.

### 3. 영사식 모아레(projection moire topography)

모아레 토포그래피에 대한 최근의 연구는 위상천이 영사식 모아레에 집중되고 있다. 위상천이 기법의 적용은 측정분해능을 향상시키고 단차가 큰 형상에 대해서도 측정이 가능한 장점을 제공한다. 그림 5는 영사식 모아레의 가장 보편적인 광학계를 보여준다. 영사식 모아레는 크게 영사격자의 투영을 위한 영사부(projection system)과 투영된 격자 이미지의 결상을 위한 결상부(viewing system)로 나누어진다. 광원으로는 일반적으로 텅스텐 할로겐 백색광이 사용되어 지고, 광원과 투영격자의 사이에는 광원의 빛을 격자면에 균일하게 집광하기 위한 집광렌즈(condenser)가 위치한다. 한쌍의 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 론기-롤링(Ronchi-ruling)격자를 사용한다. 광원에 의해서 조명되어진 투영격자는 투영렌즈(projection lens)에 의해서 측정대상물체에 투영되어진다. 이렇게 투영된 직선형태의 격자는 물체의 높낮이에 따라서 휘어지게 되고, 이 변형된 격자는 다시 결상렌즈(viewing lens)에 의해서 기준격자상에 결상되게 된다. 이 때 모아레무늬는 기준격자상에 형성되어지고 최종적으로 릴레이렌즈(relay lens)에 의해서 CCD 카메라에 결상되게 된다. 이 광학계에서 모아레 무늬의 등차수면(equi-order plane)이 평면으로 형성되기 위해서는 투영렌즈의 광축과 결상렌즈의 광축이 평행해야 하고 두

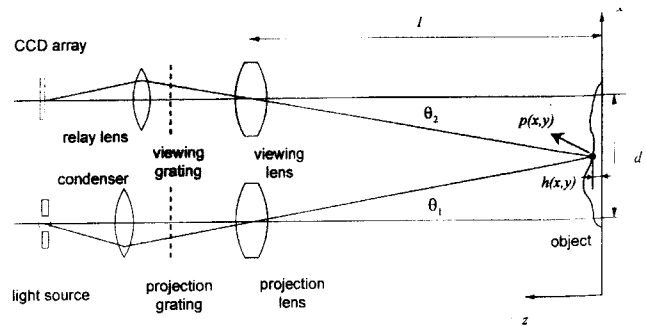


그림 5. 영사식 모아레의 기본 원리.

렌즈는 같은 평면상에 위치해야 한다. 즉, 투영부와 결상부에서 격자와 렌즈가 광축과 평행한 임의의 한 축에 대해서 대칭적으로 구성되어야 한다.

일반적으로 영사식 모아레에 사용되는 직선 격자의 투과도(transmittance)가 조화함수의 분포를 가진다고 가정하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

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

여기서  $T_p(x)$ 는 격자의 투과도를 나타내고,  $A$ 와  $g$ 는 각각 투과도의 진폭과 격자의 피치를 나타낸다. 이 격자가 투영렌즈를 통해서 물체에 결상되었을 경우 격자의 이미지는 다음과 같이 결정된다.

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

여기서  $m_p$ 는 투영렌즈의 배율,  $h(x, y)$ 는 임의의 측정점  $P(x, y)$ 의 광축방향으로의 높이,  $\theta_1$ 는 측정점  $P(x, y)$ 에서의 투영각도,  $I_s$ 는 광원의 광강도,  $R(x, y)$ 는 측정대상물체의 반사도를 나타낸다. 위의 수식 (2)에 있는 광강도분포를 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.

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

$\delta$ 는 투영격자와 기준격자사이의 위상의 차이를 변위로 나타낸 값이다. 수식적인 유도를 간단하게 하기 위해서 변형된 격자 이미지가 기준격자에 결상되는 과정을 역으로 기준격자가 결상렌즈를 통해서 측정물체에 가상적으로 투영된다고 생각을 하게 되면, 가상투영된 기준격자의 광강도분포는 다음과 같이 표

현된다.

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

$m$ 는 결상렌즈의 배율,  $\theta_2$ 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 광강도분포중에 가장 낮은 주파수를 가지는 항이 바로 모아레 무늬를 나타낸다. 수식 (2)와 수식 (4)의 곱셈후의 네가지 항중에서 모아레무늬를 나타내는 항만을 적어보면 다음과 같이 나타내진다.

$$I(x, y) = B(x, y) \left[ 1 + \cos \left[ \frac{2\pi}{mg} (h(x, y)(\tan \theta_1 - \tan \theta_2) + \delta) \right] \right] \quad (5)$$

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

#### 4. 위상천이 격자이송(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 평균광강도(mean intensity),  $v(x, y)$ 는 간섭무늬의 정규화된 가시도(normalized visibility),  $\phi(x, y)$ 는 측정대상의 초기위상,  $\Delta$ 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.

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

위 식에서  $\lambda_{eq}$ 는 모아레무늬에 있어서 등가파장으로 정의된다. 식 (6), (7)에서 초기위상  $\phi(x, y)$ 와 등가파장  $\lambda_{eq}$ 를 구함으로써 측정점의 높이정보를 구할 수 있다. 하지만 식 (7)에서 보는 바와 같이 등가파장의 값이 상수가 아니라 측정점의 높이에 따른 변수  $\theta_1, \theta_2, m$ 에 따라서 변화하게 된다. 그림 1에서 표시한대로 기하학적인 관계를 고려해서 등가파장  $\lambda_{eq}$ 의 분포 부분을 표현해 보면 다음과 같다.

$$\tan \theta_1 - \tan \theta_2 = \frac{d}{1 - h(x, y)} \quad (8)$$

$l$ 은 동작거리(working distance),  $d$ 는 두 광축사이의 거리를 나

타낸다. 이와같이 결상렌즈 및 투영렌즈의 배율  $m$ 을 다시 나타내본다.

$$m = \frac{1 - h(x, y)}{f} \quad (9)$$

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

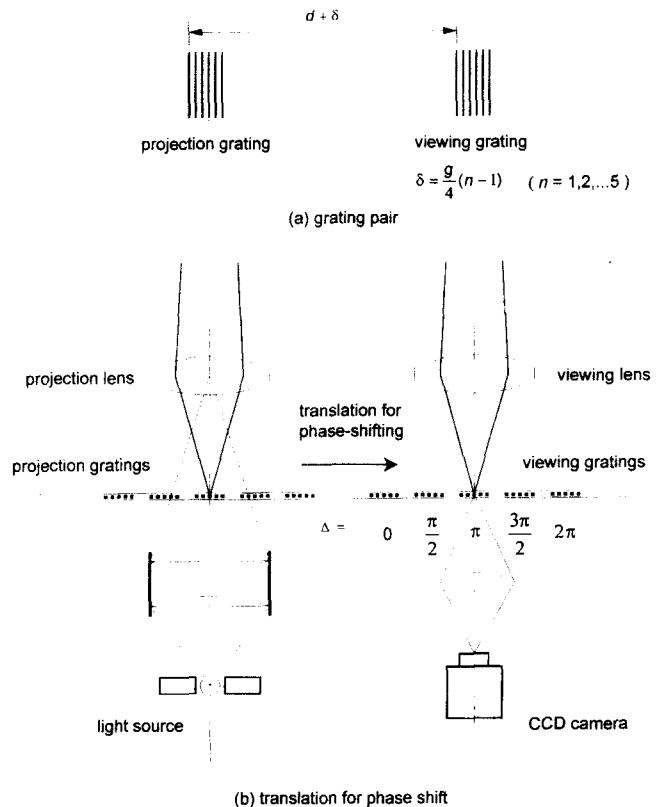


그림 6. 위상천이 영사식 모아레의 원리.

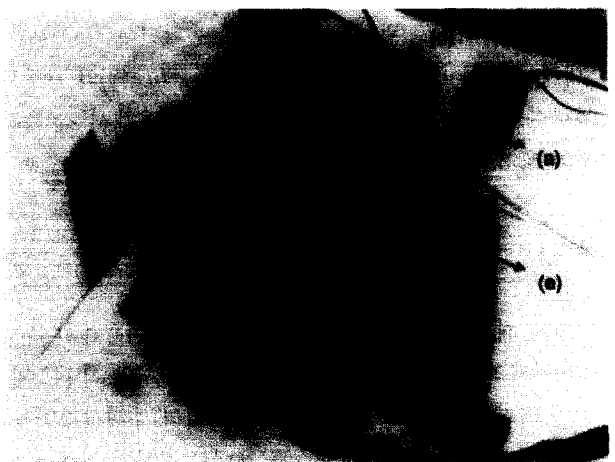


그림 7. 위상천이 영사식 모아레 장치.

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

$$\lambda_{eq} = \frac{(1-h(x,y))^2 G}{fd} = \frac{I^2 g}{fd} (1-h(x,y)I)^2 \quad (10)$$

즉, 영사식 모아레에 있어서 위상천이법을 적용할 경우 등가과장의 길이는 측정물체의 높이에 따라서 비선형적으로 변화함을 알 수 있다. 임의의 측정점의 높이가 증가하게 되면 등가과장의 길이는 짧아지게 된다. 하지만 동작거리가 측정물의 높이에 비해서 상대적으로 매우 크게 될 경우에는  $h(x,y)I \ll 1$  이 되어 등가과장을 다음과 같이 상수로 가정할 수 있게 된다.

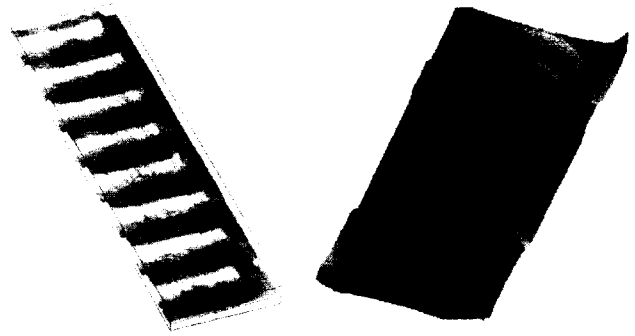
$$\lambda_{eq} \approx \frac{I^2 g}{fd} \quad (11)$$

위에서 언급한 등가과장의 조건이 만족할 경우에 한해서 위상천이법은 영사식 모아레에 적용이 가능하게 된다.

위상천이 기법을 적용하기 위해서 정밀하게 제작된 위상천이격자를 사용한다. 그림 6(a)에서 보는 바와 같이 위상천이격자는 투영격자와 기준격자를 한 쌍으로 해서 두 격자사이의 상대거리를  $d+\delta_i$  (단,  $\delta_i = g/(n-1)/(i-1)$ ,  $n$ 은 위상천이법에서 bucket의 수, 본 연구에서는  $n=5$ ,  $i$ 는  $i$ 번째 bucket)로 하고 하나의 수정유리(quartz glass)위에 반도체 리소그래피기술을 이용해서  $n$ 쌍을 새겨넣어 제작한다. 이렇게 제작된 위상천이격자를 이용하면 위상천이를 매우 용이하게 얻을 수 있다. 그림 6(b)에서 보는 바와 같이 각 격자쌍들의 상대적인 위상이송량은 순차적으로  $\Delta=0, \pi/2, \pi, 3\pi/2, 2\pi$ 가 된다. 상용화된 반도체 리소그래피기술의 위치정밀도가  $0.025 \mu\text{m}$ 이므로,  $g=25 \mu\text{m}$ 인 격자를 사용할 경우 위상이송시의 각 bucket에서의 위상천이오차는  $0.007\text{rad}$  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 위상천이격자가 이송되면서 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. 그림 7은 본 연구를 통해서 지금까지 언급한 내용을 중심으로 설계, 제작된 위상천이격자를 이용한 영사식 모아레장치를 보여주고 있다.



(a) 솔더페이스트의 3차원 형상 (b) 동전의 3차원 형상  
그림 8. 미세물체 표면형상 측정 결과.

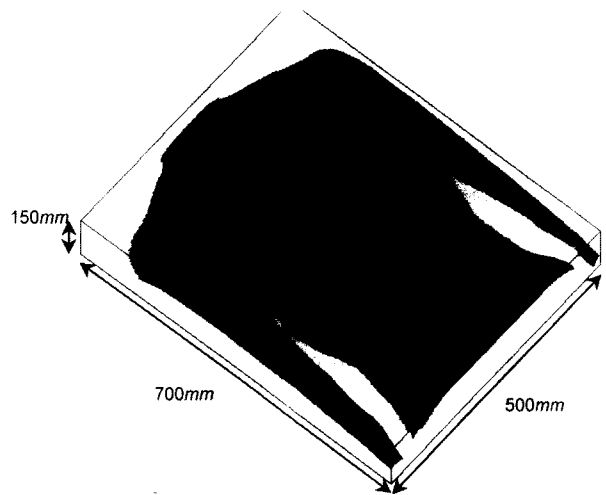


그림 9. 대형물체(인체 형상)의 삼차원 측정 결과.

## 5. 측정 예

그림 8은 100원짜리 동전에 대한 측정결과를 보여준다. 측정대상물의 전체적인 높이는  $0.2 \text{ mm}$  이내에 분포하고 있다. 그림 8(a)는 동전위에 형성된 모아레무늬를 보여준다. 기존의 프린지추종방법을 이용할 경우에는 측정이 불가능한 형태의 간섭무늬를 볼 수 있다. 본 연구에서 제안한 방법을 이용해서 측정을 할 경우 영상획득시간은 3초, 형상을 재현하는데는 2초, 따라서 총 측정시간이 5초가 소요되었다. 본 방법의 측정분해능은 등가과장의 길이와 간섭무늬의 가시성에 의해서 결정된다. 8비트 AD변환기를 사용하는 프레임그래버의 경우 이론적으로는  $(0.5 \text{ mm})/(2^8) = 0.002 \text{ mm}$ 로 계산되어 진다. 실제상황에서 측정분해능을 향상시키기 위해서는 모아레무늬의 가시도를 최대한로 하기위해서 AD변환기의 이득값(gain)과 오프셋(offset)을 잘 조정하는 작업이 요구된다. 그림 9는 대형 물체에 대한 측정 예로써 인체에 대한 삼차원 형상 측정 결과를 보여준다. 앞에서 언급한 바와 같이 대형 물체의 경우 격자의 피치를 조

정하여 측정 범위를 손쉽게 변경할 수 있다. 측정에 소요되는 시간은 앞의 예제에서의 경우와 동일하다. 대형의 물체의 경우에도 격자 피치의 1/100 정도의 분해능을 구현할 수 있다. 또한 컴퓨터를 통한 측정결과의 도시와 분석을 통해 척추측만의 정도를 수치적으로 정량화된 자료를 얻을 수 있다.

## 6. 결 론

이제까지 삼차원 영상인식을 위해 개발되어 오고 있는 모아레 토포그래피에 대한 전반적인 기술 소개를 하였다. 특히 위상천이 영사식 모아레에 대해 세부적인 소개를 하였으며 다양한 측정 결과를 통해 성능을 검토하였다. 앞으로 삼차원 영상 인식에 대한 기술의 수요는 다양한 분야에서 창출될 것으로 예상되며 이에 대응하여 모아레 기술도 다른 광계측기술과 더불어 많은 발전을 이룩할 것으로 기대된다.

## 참고문헌

1. 스테레오 시각에 대한 참고문헌은 여러 교과서 및 많은 수의 논문에서 찾을 수 있어, 특별한 문헌의 지칭을 생략함.

2. 최이배, "위상천이 모아레 토포그래피를 이용한 3차원 물체의 미세형상 측정", 박사학위논문, 한국과학기술원, 1998.
3. Lord Rayleigh, *Philos. Mag.* **47**, 81,193 (1874); **47**, 193 (1874).
4. D. Meadows, W. Johnson, and J. Allen, "Generation of surface contours by moire patterns", *Appl. Opt.* **9**(4), 942 (1970).
5. H. Takasaki, "Moire topography", *Appl. Opt.* **9**(6), 1467 (1970).
6. K. Gasvik, "Optical metrology", John Wiley & Sons, chapter 7 (1995).
7. K. Creath, "Phase-measurement interferometry techniques", *Progress in Optics*, Vol.26, pp.349-398 (1988).
8. M. Kujawinska, "Use of phase-stepping automatic fringe analysis in moire interferometry", *Applied Optics*, Vol.26, No. 22, pp.4712-4714 (1987).
9. S. Kim, Y. Choi, and J. Oh, "Projection moire for 3D inspection of printed circuit boards", *SPIE Vol.3023*, 129 (1977).
10. S. Kim and Y. Choi, "Phase-shifting projection moire topography", *SPIE, Int'l Tech. Working Group on Robotics and Machine Perception*, 1 (1998).