韓國精密工學會 '97年度 秋季學術大會論文集 pp.402~406

위상이동 그림자 무아레방법에서 형상측정 정확도의 개선
Improvement of accuracy of surface measurement in the phase-shifting shadow moire method

유원재*(전북대 대학원), 강영준(전북대 공대),권용기(전주공업전문대)
W. J. Ryu*(Graduate School, Chonbuk Univ.),Y. J. Kang(Chonbuk Univ.) and Y.K.Kwon(ChonJu Tecnical Junior College)

ABSTRACT

The shadow moire is one the optical techniques which able to give contour lines of an object with respect to a master grating plane. The moire patterns are issued from the superposition of a grating and its shadow projected on the surface of an object. But in the conventional shadow moire method the reference grating and deformed grating are mutually dependent, it is impossible to obtain uniform phase shifts on the whole field by moving the reference grating. Here we propose one trial to apply phase shifting to conventional shadow moire. When, in the conventional arrangement, Phase-shifting that is actually constant regardless of fringe orders is achieved by moving the grating and the light source. Finally we obtained a better result by using this procedure and applied the phase shifting shadow moire to three dimensional measurement.

Key Words : shadow moiré(그림자 무아레), phase-shifting(위상 이동), contour line(등고선), grating(격자), superposition(중첩), shape measurement(형상측정)

1. 서 론

무아레무늬는 비슷한 주기를 갖는 두 개의 격자 무늬가 겹쳐질 경우 간섭이 발생하여 두 무늬에 비해 훨씬 큰 주기를 갖는 무늬이다. 이 방법은 일반 광원을 이용하므로 레이저등의 가간섭광원(coherent light)을 사용하는 홀로그래픽이나 위상측정간섭계(Phase measuring interferometry)에 비하여 정밀도는 떨어지지만 넓은 범위에 걸쳐 표면조도와 같은 미세형상을 무시한 거시적 형상을 재현할 수 있는 장점을 갖고 있다. 따라서 여러사람들이 많은 다른 시도들을 통해 무아레 방법의 정밀도를 향상시키는데 노력하였는데 그 중 효용성과 간편성이 뛰어난 위상이동방법이 가장 많이 적용되어져 왔다. 무아레 방법에 의한 측정 방법에는 시스템의 광학적 구성에 따라 크게 2가지로 나누는데, 영사식 무아레(projection moire) 방법과 그림자식 무아레(shadow moire) 방법으로 나눈다. 전자는 두 개의 격자를 설치하여 그 중 하나를 움직여 위상이동을 쉽게 할 수 있다. 그러나 이 방법은 시스템의 광학적 정렬이 매우 정밀해야 하는 반면에 후자는 시스템의 요소배열이 매우 단순하므로 측정이 용이하고 간단한 요소 변경만으로 오차를 줄일 수 있다.[1] 그러나 그림자 무아레 방법의 경우 단지 하나의 격자를 사용하기 때문에 무아레 무늬 차수에 관계없이 일정하게 위상이동을 할 수가 없다. 그래서 본 연구에서는 격자와 물체와의 거리를 변화시키고 동시에, 관찰점과 광원과의 거리를 변화시켜 거의 일정한 위상이동을 달성하고 지금까지의 무아레 방법의 결점인 낮은 분해능을 향상시켰다.

2. 기본 원리

일반적인 그림자 무아레의 원리가 Fig 1.에 나타나 있다. n번째 차수의 무아레 등고선 무늬는 기준

격자 G로부터 거리 z_n만큼 떨어진 곳에 생긴다. 이 위치 z_n은 다음과 같은 식[2]으로 표현된다.

$$z_n = \frac{nph}{d - np} \tag{1}$$

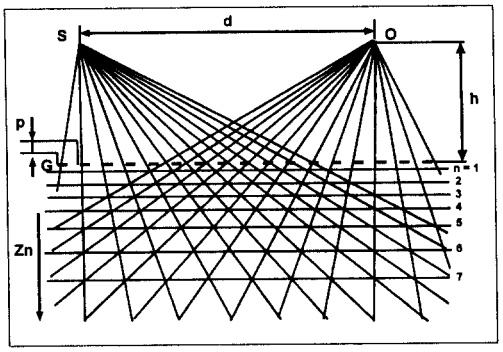


Fig. 1. Optical arrangement of conventional moire

여기서 점광원과 관찰점은 격자에서 같은 거리 h만큼 떨어져 있고 둘사이의 거리는 d이다. 그리고 p는 격자의 간격이다. 이때 n번째 차수의 등고선 무늬와 n+1번째 차수의 등고선과의 높이 차이 $\Delta z_{n,n+1}$은 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta z_{n+1,n} = z_{n+1} - z_n = \frac{dpl}{(d - np)[d - (n+1)p]} \tag{2}$$

위의 식에서 알 수 있듯이 등고선 무늬의 위치는 무아레 무늬의 차수 n에 의존하게 때문에 어떤 두 등고선들 사이의 높이는 항상 다르고 차수 n에 의해 결정된다. Fig 1에서 격자를 격자평면에 대해 수직으로 움직이면 무아레 무늬의 위상이 변하게 된다. 수직으로 Δh만큼 움직였을 때 위상이동은 다음과 같이 나타낸다.

$$2\pi\Delta h/\Delta z_{n+1,n} = \frac{2\pi\Delta h(d - np)[d - (n+1)p]}{dph} \tag{3}$$

위 식에서 위상변화량은 일정하지 않고 차수 n에 의존한다는 것을 알 수 있다. 따라서 격자 하나만을 움직여서는 위상을 일정하게 이동시키지 못하게 된다. 따라서 일정한 위상이동을 실현하려면, 격자와 광원을 동시에 이동시키는 방법을 적용하려고 한다.

격자를 물체를 향하여 수직으로 Δh만큼 움직이고 동시에 광원을 관찰점을 향하여 수평으로 Δd만큼 움직이면 격자에서 거리 z_n'의 위치에 n번째 차수의 무아레 무늬가 생긴다. Fig 2에서 나타나는 이 위치에 대한 식은 다음과 같다.

$$z_n' = \frac{np(h + \Delta h)}{d - \Delta d - np} \tag{4}$$

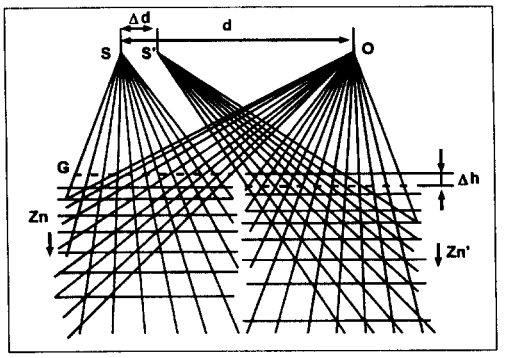


Fig. 2. Shift of moire contours by moving both a grating and a light source.

n+1번째 등고선 무아레 무늬는 원래의 격자로부터 다음식의 위치에 있다.

$$z_{n+1} = \frac{(n+1)ph}{d - (n+1)p} \tag{5}$$

만약 광원과 격자를 동시에 움직여서 변화된 n번째 무아레 무늬의 위치가 원래 무늬의 n번째와 n+1번째 사이에 생기게 한다면, 아래의 식이 성립된다.

$$z_n + (z_{n+1} - z_n)(\Phi/2\pi) = z_n' + \Delta h \tag{6}$$

여기서 Φ는 n차 무아레 무늬의 위상이동량이다. n번째 차수 무늬의 이동에 대해 그림 3에 나타나 있다.

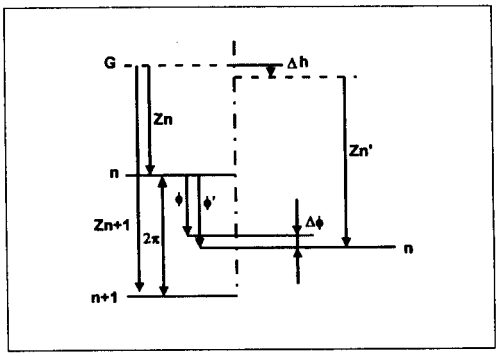


Fig. 3. The n'th order of contour in shadow moire varies with the movement of the grating and the light source

우리가 구현하고자 하는 것은 무아레 무늬의 차수 n에 관계없이 위상이동량 Φ가 일정한 것이다. 식 (3), (4), (5)식을 (6)식에 대입하여 n에 대해 내림차순으로 정리하면 다음과 같다.

$$f(h,\Delta h,\ d,\Delta d,p)n^2+g(h,\Delta h,d,\Delta d,p,\Phi)n + h(h,\Delta h,d,\Delta d,p,\Phi)=0 \tag{7}$$

여기에서 f(h, Δh, d, Δd, p)는 h, Δh, d, Δd, p의 함수를 의미하고 나머지항도 마찬가지이다.

차수 n에 관계없이 일정하게 위상이동을 하려면 (7)식의 함수항 f, g, h가 모두 0이어야 한다. 즉,

$$f(h,\Delta h,d,\Delta d,p)=0 \tag{8}$$

$$g(h,\Delta h,d,\Delta d,p,\Phi)=0 \tag{9}$$

$$h(h,\Delta h,d,\Delta d,p,\Phi)=0 \tag{10}$$

위 식들을 Δd에 대해 정리하면 다음과 같은 식들을 얻을 수 있다.

$$\Delta d=\frac{d\Delta h}{h+\Delta h} \tag{11}$$

$$\Delta d=\frac{dhp(\Phi/2\pi)-2d^2\Delta h+dp\Delta h}{hp-dh+p\Delta h-2d\Delta h} \tag{12}$$

$$\Delta d=a \tag{13}$$

위 식들을 잘 살펴보면 세식을 모두 만족하는 Δd는 없다는 것을 알수 있다. 왜냐하면 식 (13)의 의미는 광원과 관찰점이 일치가 되는 것인데, 그렇게 되면 무아레 무늬가 사라지게 되는 것이다. 따라서 세식을 모두 만족하는 해는 존재하지 않으므로 엄격한 의미에서는 그림자 무아레방법에 위상이동법을 적용하는 것은 불가능하다는 것을 알 수 있다. 그러나 식 (11)로부터 근사해를 얻어낼 수는 있다. 물론, 식 (12)도 사용할 수 있지만 계산이 복잡해지는 단점이 있다. 식 (1), (4), (5), (11)을 (6)에 대입하여 정리하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta h=\frac{(dph-np^2h)(\Phi/2\pi)}{d^2-(n+1)dp+np^2(\Phi/2\pi)} \tag{14}$$

식 (14)를 식(11)에 대입하면 다음 식을 얻는다.

$$\Delta d=\frac{(dp-np^2)(\Phi/2\pi)}{d-(n+1)p+p(\Phi/2\pi)} \tag{15}$$

광원과 격자를 각각 Δd와 Δh만큼 이동시켰을 때 무아레 무늬가 위상Φ만큼 이동되게 된다. 그러므로 Δd와 Δh는 n에 따라 결정되기 때문에 우선 n=1로 놓고 Δd와 Δh를 결정하면 다음식을 얻게된다.

$$\Delta h=\frac{ph(d-p)(\Phi/2\pi)}{d^2-2dp+p^2(\Phi/2\pi)} \tag{16}$$

$$\Delta d=\frac{p(d-p)(\Phi/2\pi)}{d-2p+p(\Phi/2\pi)} \tag{17}$$

격자만을 움직이거나 광원만을 움직여 n에 관계없이 위상을 일정하게 이동시킬 수는 없다.

격자를 움직였을 때 생기는 위상오차는 광원을 이동시켜서 보정이 된다. 그러나 완전히 제거하지는 못하는데 이때의 위상오차 $\Delta\Phi$가 Fig 3에 나타나 있다. 위의 근사 조건에서의 오차 $\Delta\Phi = \Phi' - \Phi$는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\Phi=\frac{2\pi(z_n'+\Delta h-z_n)}{z_{n+1}-z_n}-\Phi \tag{18}$$

그러나, 식(18)에는 많은 변수들이 있기 때문에 오차에 대해 정확히 알기가 힘들다. 그래서 이 식을 컴퓨터 시뮬레이션을 실행해보자. 실행 조건은 위상이동량 $\Phi = \pi/2$, h = 400mm, d = 200mm, p = 0.125mm인 실험조건과 같은 조건에서 실행했다. n = 1에서 100까지의 결과가 Fig 4.에 나타나 있다.

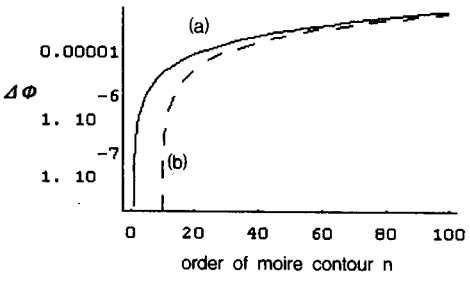


Fig 4. Calculated error of shifted phase caused by this trial in the case h=400mm, d=200mm, p=0.125mm. Shifts Δh, Δd for $\Delta\Phi=\pi/2$ are determined on (a)n=1 (b)n=10

위 결과에서 n이 1에서 100까지의 등고선 무늬의 위상오차가 1/100보다 훨씬 작으므로 위상이동방법을 적용할 수 있는 충분히 작은 오차를 나타내고 있다. 또한 위상 Φ=0, π, $3\pi/2$에서도 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 Fig 4(b)는 n=10일때의 결과인데 10번째 등고선 무늬에서 오차가 제일 작음을 알 수 있다. 또한 격자만 움직일 때(Δd=0)의 계산오차가 Fig. 5에 나타나 있다.

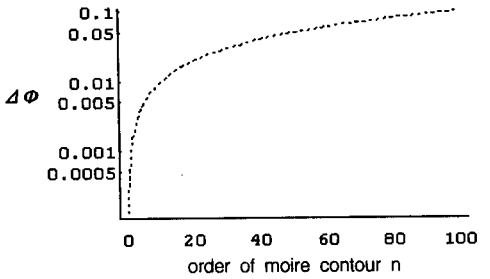


Fig. 5 Calculated error of shifted phase caused by this trial in the same case.(Δd=0)

오차가 전자의 경우보다 매우 크고 차수 n이 증가함에 따라 증가되어진다. 즉, 6(a)의 경우에서 오차값이 실제 측정을 위해 사용하기에 충분히 적으므로 효과적인 측정방법이라 하겠다.

3. 위상정보를 이용한 3차원 형상구현

화면에 잡힌 물체의 각 점에서의 강도(intensity)는 다음과 같이 나타낸다.

$$I(x,y)=I_0(x,y)\{1+\gamma(x,y)\cos[\phi(x,y)+\alpha_i]\} \quad (19)$$

여기서, $I(x,y)$는 한점의 강도, $I_0(x,y)$는 평균강도, $\gamma(x,y)$는 가시도(visibility), $\phi(x,y)$는 위상, 그리고 α_i는 이동하는 위상값이다.[3]

기준 격자에 수직으로 물체를 이동시키고 광원을 이동시킨 다음 측정 물체를 PC에 연결된 CCD 카메라로 4개의 상을 얻는다.

Four-Frame 위상이동법에 의하여 얻어진 4개의 화상의 강도는 각각 다음과 같이 나타난다.

$$I_1(x,y)=I_0(x,y)\{1+\gamma(x,y)\cos[\phi(x,y)]\} \quad (20)$$

$$I_2(x,y)=I_0(x,y)\left\{1+\gamma(x,y)\cos[\phi(x,y)+\frac{\pi}{2}]\right\} \quad (21)$$

$$I_3(x,y)=I_0(x,y)\{1+\gamma(x,y)\cos[\phi(x,y)+\pi]\} \quad (22)$$

$$I_4(x,y)=I_0(x,y)\left\{1+\gamma(x,y)\cos[\phi(x,y)+\frac{3\pi}{2}]\right\} \quad (23)$$

위상이동법으로 측정되어진 각 점에서의 위상 $\phi(x,y)$는

$$\phi(x,y)=\tan^{-1}\left[\frac{I_4(x,y)-I_2(x,y)}{I_1(x,y)-I_3(x,y)}\right] \quad (24)$$

그러나 이 위상값들은 $-\frac{\pi}{2}$에서 $\frac{\pi}{2}$사이의 값들만을 가지게 되므로 Demodulation과정을 거쳐서 최종적으로 물체 각점의 실제 위상을 구하게 된다.[4]

4. 실험 방법

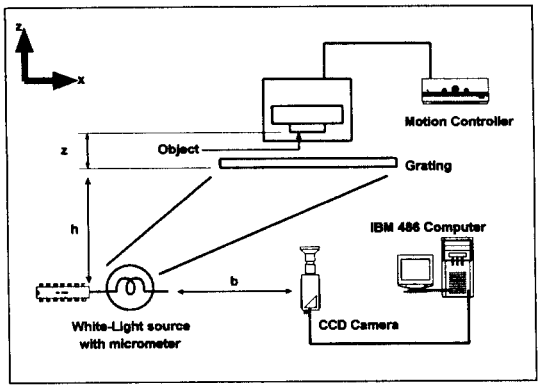


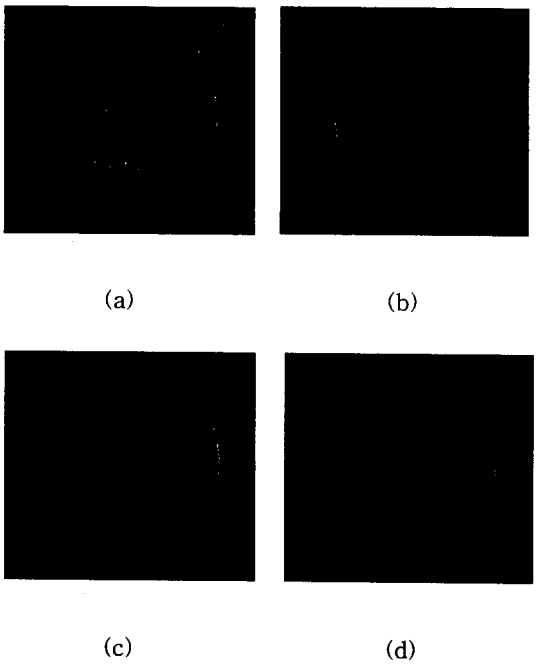
Fig 6. Experimental setup

실험장치의 개략도가 Fig. 6에 나타나 있다.

CCD 카메라는 무아레 무늬가 등고선의 의미를 가지도록 할로겐 램프와 Grating에서 같은 거리에 위치시켰다. 할로겐 램프를 평행하게 이동시키기 위해 마이크로미터가 부착된 Translation stage위에 부착했다. Grating은 8line/mm를 사용하였고, 동전은 0.1μm 단위의 Motion Controller위에 마운트 시켜 정밀한 이동을 할 수 있게 하였다. CCD 카메라에서 받은 4개의 상은 frame grabber를 통해 PC에서 처리될수 있게 하였다. Grating에서 CCD 카메라까지의 거리는 400mm, CCD 카메라에서 광원까지의 거리는 200mm로 하였고, 측정기준으로 삼은 무아레 무늬는 Grating에서 1.5mm떨어진 6차의 무늬로 측정하였다.

Fig 7은 4-frame 위상 이동법을 이용한 동전의 측정 모습을 보여주고 있다. 동전의 요철이 약 0.25mm이므로 기존의 일반적인 그림자 무아레 방법

으로는 측정할 수가 없다.



(a) (b)

(c) (d)

Fig 7. Four moiré images with shifted phases :
(a) shift ϕ=0 (b) $\phi=\pi/2$
(c) shift $\phi=\pi$ (d) $\phi=3\pi/2$

Fig. 8은 위상이동을 실행하여 얻어진 Phase map을 나타내고 있다.

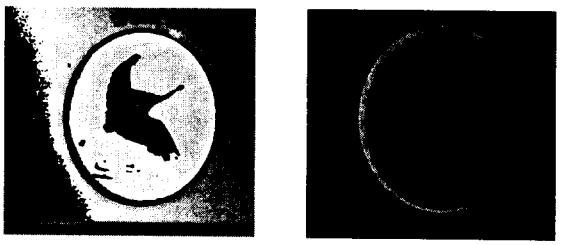


Fig. 8 Phase map Fig. 9 Demodulation Image

Fig. 9는 Fig. 8의 Phase map을 Demodulation 과정을 거쳐 실제 위상을 구한 image이다

Fig. 10에서는 Demodulation Image를 3차원의 형태로 나타내주고 있다.

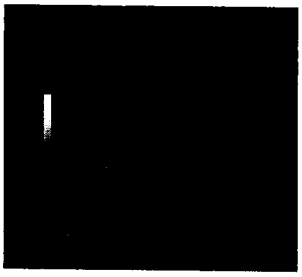


Fig. 10. 3D plot of a coin

위 결과에 따르면 기존의 그림자 무아레가 측정하지 못하였던 정밀한 3차원 형상이 phase shifting 방법에 의해 ㎛단위로 측정될수 있음을 보여주고 있다.

5. 결 론

물체의 3차원 형상을 측정하기에 적합한 무아레 방법의 결점인 낮은 분해능을 향상시키기 위해 위상이동방법을 도입하였다. 그림자 무아레 방법의 경우 단지 하나의 격자를 사용하기 때문에 무아레 무늬 차수에 관계없이 일정하게 위상이동을 할 수가 없다. 그래서 본 연구에서는 격자와 물체와의 거리를 변화시키고 동시에, 관찰점과 광원과의 거리를 변화시켜 거의 일정한 위상이동을 달성하고 지금까지의 무아레 방법의 결점인 낮은 분해능을 향상시켰다. 또한 복잡한 광학적 시스템을 도입할 필요가 없이 간단한 Computer-image processing 장비만 있어도 쉽게 실현 가능한 방법이라 하겠다.

참고문헌

(1) T. Yoshizawa and T. Tomisawa, "Shadow moiré topography by means of the phase-shift method", Opt. Eng. 32, pp. 1668-1674, 1993

(2) H. Takasaki, "Moire Topography" , Appl. Opt. 9, 1467-1472, 1970.

(3) K. Creath, "Phase-mesurement interferometry : BEWARE these errors", SPIE, Vol. 1553, pp. 213-220, 1991

(4) Ghiglia, D. C., et al., 1987, "Cellular-Automata Method for Phase Unwrapping", J. Opt. Soc. Am. 4., pp. 267-280.