

위상이동법을 이용한 3차원 형상측정법의 연구*

오동석 · 남기봉

한림대학교 물리학과

(1994년 3월 28일 받음)

본 연구에서는 물체의 형상을 측정하기 위하여 사용할 수 있는 여러 가지 방법중 위상이동법을 이용하여 주어진 물체의 형상을 재구성하였다. 투영하는 직선형 무늬는 Twyman-Green 간섭계를 이용하여 발생시켰고, PZT를 이용하여 이들 무늬를 공간적으로 이동시켰다. Hariharan의 위상복구 알고리즘을 사용하여 시료에 투영된 간섭무늬 영상을 해석하여 주어진 시료의 형상을 보정 상수의 범위이내로 재현할 수 있음을 보였다. 그러나 레이저광의 높은 가간섭성(coherence)에 의한 여러 잡음 성분들에 의한 부작용이 관찰되었으며, 정확한 보정의 문제도 주목되었다.

I. 서 론

주어진 물체의 형태를 계측하는 문제는 기계공학과 같은 분야에서 부품의 크기를 측정하는 용도가 주가 되지만 의학에서 신체부위의 크기와 형태를 전산자료화 하고자 할 경우,^[1] 기계 시력(machine vision)의 개발에서도 발생한다. 측정하고자 하는 물체가 단순한 형태인 경우에는 간단한 해석적 표현식으로 기술이 가능하겠지만, 대부분 측정대상 물체는 이처럼 간단하게 기술할 수 없는 경우가 많다. 그러므로 주어진 시료의 형태를 측정하는 것은 시료 표면을 이루는 각 점들의 상대적인 좌표를 측정하는 일로 귀착된다.

이와 같이 각 점들의 위치를 규명하는데 광학적 방법을 이용하면 비접촉식이라는 장점 외에도 비교적 큰 시료에도 이를 쉽사리 이용할 수 있는 등 실용성이 높기 때문에 이 분야에 많은 연구가 진행되어 왔다. 평면형 시료나 구멍의 직경들을 파악하는 용도의 기계시력장치(vision system)는 실질적으로 2차원의 대상시료를 다루며 이미 여러 분야에서 사용되고 있다. 이와 달리 3차원적인 시료의 형상을 측정하기 위해서는 시료에 일정한 형태의 유형을 투영하고 시료 표면에서 변형된 모습을 추적하여 높낮이를 추출하는 방법이 발달하였고 근래에는 측정속도와 정밀도를 높이는 방향의 연구가 진행되고 있다. 근래에 많이 선호되는 방법들로는 moiré topography,^[2]

위상 측정법(Phase Measuring Profilometry, PMP),^[3] 푸리에 변환법(Fourier Transform Profilometry, FTP),^[4] 그리고 공간위상검출법 (Spatial Phase Detection, SPD)^[5] 등을 들 수 있다. 위상측정법의 원리인 위상이동(phase shifting)기법^[6]은 간섭계에서 많이 이용되는데, 이 방법은 푸리에 기법에서 등장하는 공간주파수의 중첩과 같은 문제를 해결할 수 있는 장점이 있다.

위에 언급한 거의 대부분의 방법은 직각형의 무늬(grid)나 삼각함수형의 밝기를 가진 줄무늬를 물체에 투영하고 이 전체의 화면을 CCD 사진기를 통하여 컴퓨터에 입력한 뒤 소프트웨어를 이용하여 높낮이 정보를 추출하는 원칙을 적용한다. 물체에 따라서는 표면 반사도가 일정하지 않거나 혹은 국부적으로 그림자가 생기는 수가 있고, 또 표면이 불연속인 곳 등에서는 추적하는 무늬가 사라지거나 혹은 가시도(visibility)가 저하하여 측정결과 의 신뢰도가 저하하게 된다. 또한 무늬사이의 간격이 지나치게 가까워서 측정하는 CCD 각 소자 사이의 위상이 π 를 초과하면 aliasing의 문제가 야기되고 정확한 위상unwrap(phase unwrapping)를 할 수 없게 된다. Dresel,^[7] Lee^[8] 등은 coherence 거리가 짧은 광원을 이용하여 시료의 부분 부분이 불연속인 경우에도 그 위상을 정확하게 측정할 수 있는 방법을 소개하였는데, 처리하여야 하는 자료량이 지나치게 방대하여 (거의)실시간 적용은 어렵지만, 시간적으로 여유가 있는 경우에는 신뢰성 높은 결과를 얻을 수 있을 것으로 보인다.

본 연구에서는 위의 각 방법들 중 최소의 자원으로

* 본 연구는 92년도 교육부 학술연구조성비의 지원으로 수행되었음

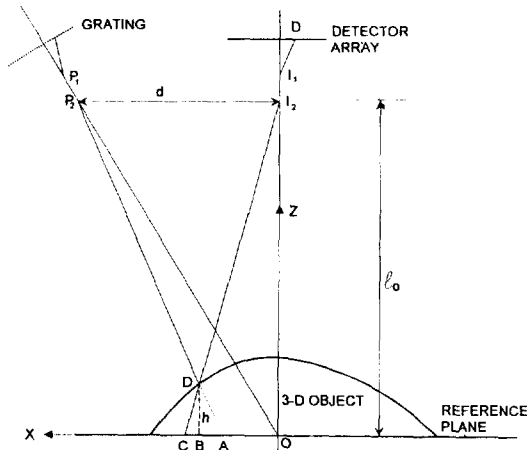


그림 1. 위상 측정법에서의 기하학적 구성.

검증할 수 있는 방법인 위상이동법에 의하여 물체의 형태를 측정하는 과정을 구현하였다.

II. 위상 이동법에 의한 3차원 Profilometry

1 이론적 배경

일반적으로 직선형의 격자무늬(grating, grid)를 투영하고 기록하는 설비를 그림 1과 같이 가정한다. 반드시 요구되는 조건은 아니지만 그림에서 l_0 로 표기한 높이는 투영, 기록 시스템 모두가 같다고 가정한다. 이 조건을 이용하면 결과를 해석하는 수식을 간단하게 할 수 있기 때문이다. 삼각함수형의 밝기를 가지는 격자를 투영하면 기준면 R상에서 관찰되는 밝기의 관계는 다음과 같다.

$$I_R = a(x, y) + b(x, y) \cos \phi(x) \quad (1)$$

(1)식에서 a , b 는 각각 밝기의 직류성분, 즉 배경밝기와 무늬의 명암대비(visibility)를 나타낸다. 위상 ϕ 는 x 좌표에 대하여 증가하기는 하지만 선형적으로 증가하지는 않는다. 이는 그림 1에서 x 축으로 진행함에 따라 단위 거리당 투영광학계에서 보는 solid angle이 감소하기 때문이다. 그러나 기준면 R에서 각 점은 어느 기준점에 대하여 고유한 위상값을 갖는다. 예를 들어 그림 1의 C점에는

$$\phi_c = 2\pi m + \phi_c' \quad (2)$$

와 같은 위상값이 주어진다. 당연히 n 은 순차적으로 정해지는 정수이며 ϕ_c' 는 0에서 2π 사이의 값을 갖는다. 검출기 배열소자(detector array)는 기준면이나 물체에 투영된 격자의 밝기신호를 검출하고, 여기에 위상이동

기법^[5]을 적용하여 각 점에서의 위상을 산출한다. 즉 한번 영상신호를 전산기에 저장한 뒤, 격자를 p_0/N 만큼 줄무늬 방향에 직각으로 이동시키고 다시 영상신호를 저장한다. 여기에서 p_0 는 줄무늬 사이의 간격, N 은 2보다 큰 정수이다. 이렇게 하여 N 개의 영상이 저장되면, 각 점의 위상은 다음의 관계로 산출한다.

$$\tan \phi_c' = \frac{\sum_{n=1}^N I_n \sin(2\pi n/N)}{\sum_{n=1}^N I_n \cos(2\pi n/N)} \quad (3)$$

(3)식에 의한 위상은 2π 의 계단형으로 나타나지만 실제의 위상 분포는 연속이기 때문에 위의 (2)식을 이용하여 n 값을 구하게 된다. 여기에는 간섭계에서와 같이 (3)으로 구한 위상이 급격히 2π 정도 변화하는 불연속점을 찾아서 이 불연속점이 연속이 되도록 n 값을 조정한다. 위와 같이 산출된 위상값은 적절한 기하학적 관계를 이용하여 기준면 R로부터의 높이로 환산하는 과정을 거쳐야 한다. 그림 1에서 삼각형 ADC와 P_2DI_2 의 관계로부터 다음의 식을 유도할 수 있다.

$$h(x, y) = \frac{AC}{d} \frac{l_0}{1 + AC/d} \quad (4)$$

여기서 $h(x, y)$ 는 기준면상 x, y 점의 높이를 나타낸다. 일반적으로는 36 mm크기의 격자를 1 m 정도로 확대하여 투영하게 되므로 $d \gg AC$ 가 성립하며 따라서 위 식은 다음과 같이 어렵할 수 있다.

$$h(x, y) = \frac{AC}{d} l_0 \quad (5)$$

선분 AC는 위상 ϕ_0 가 ϕ_1 와 같다는 조건으로부터 유도할 수 있다. 이에 관한 자세한 내용은 관련 문헌^[3,4]을 참조한다.

2. 위상이동법(PMP)의 특성

Profilometry에 사용되는 방법중 위상이동법과 공간 위상측정법은 원칙적으로 삼각함수꼴 격자를 사용하는 것을 가정한다. 실제로 이러한 특성을 가진 격자는 정확하게 제작하기가 어렵기 때문에 대부분의 응용사례에서는 Ronchi 격자를 사용하고 있다. 이와 같이 밝기가 직각함수(rectangular) 모양이면, PMP의 (3)식이 정확하게 만족되기 어려울 수 있다. 즉 (3)식은 격자를 이동시킬 때마다 그 밝기가 삼각함수의 꼴을 취하는 가정을 하고 있기 때문에, 밝기 자체가 이에서 벗어나면

이 관계식을 적용하여 얻은 결과의 신뢰도가 높을 수 없게 될 것이다. 푸리에 변환법이나 공간위상측정법에서는 이 영향이 비교적 적는데, 이는 이들 방법들이 각각 대역투과필터와 삼각함수의 직교성을 이용하여 직각함수꼴의 밝기 분포에서 얻어지는 체배주파수 성분을 제거하기 때문이다. 이들 두 방법에서는 격자 무늬를 아주 좁은 간격으로 투사하여야 하는 점도 특징이다. 푸리에 변환법(FTP)에서는 주위 배경 밝기와 격자의 저주파 성분이 넓게 나타날 수가 있으므로, 이 DC 성분과 주반송주파수(carrier frequency)를 명확하게 분리시키려면 반송주파수를 높게 잡아야 하고, 이는 바로 측정대상시료에 무늬를 좁게 비추어야 함을 의미한다. 공간위상법에서는 구하는 위상이 두 줄무늬 사이점에서의 평균위상값이다. 그러므로 공간분해능을 올리기 위하여서는 투영하는 격자무늬의 간격을 충분히 좁게 하여야 한다. 사진 필름과 같은 연속성 기록 매질에서는 이 줄무늬 간격의 한계는 결상렌즈의 해상력과 필름 감광막의 입자크기에 의하여 결정되지만, 필름대신 CCD 소자를 사용하여야 하는 실질적인 경우에는 빛을 감광하는 diode의 횡적인 크기 (약 $10\ \mu\text{m}$)와 인접한 diode와의 간격 (역시 약 $10\ \mu\text{m}$)의 합에 의하여 결정된다.

이들 세가지 방법 모두 광학적으로 격자를 대상시료면에 투사하도록 되어있는 부분이 이들 방법에 또 하나의 문제점을 제기하게 된다. 편이상 무늬를 사각으로 투영하고 기록광학계를 기준면에 수직인 방향으로 설치하는데, 투영대상면이 넓게 분포하게 되면 투영, 결상 양쪽 광학계의 유한한 촛점심도가 측정의 정밀도에 영향을 미치게 된다. 투영광학계에서도 시료면 전체에 균일하게 또렷한 영상을 맺을 수 없고, 결상계에서도 유사한 문제가 발생하지만 통상 투영계 쪽에서의 문제가 더 크게 제기된다. 결상계는 시료면을 수직으로 내려다보게 되어 있으나 투영광학계는 시료면을 사각으로 조명하여야 하며, 또한 대개의 경우 결상계의 광학계통의 품질이 투영계통의 품질보다 우수하기 때문이다. 촛점심도는 대략 $f/\#$ 에 비례^[9]하기 때문에 촛점심도를 깊게 하려면 $f/\#$ 가 큰 렌즈를 사용하는 것이 권장되지만, 이 값이 큰 렌즈를 사용하면 영상이 어두워지므로 s/n 값이 저하한다.

본 연구에서는 이와 같은 점들을 종합하여 PMP법을 적용하기로 하였다. 이 방법은 투사되는 줄무늬수에 관계하지 않으며, 무늬가 반드시 직선형으로 주어져야 하지도 않는 등 응용이 편리하지만, 무늬의 밝기가 간섭계에서와 같은 형태로 주어져야 한다는 점은 위에서 지적한 바와 같다. 그러므로 가능한 한 $1 + \cos^2 \pi$ 형태의

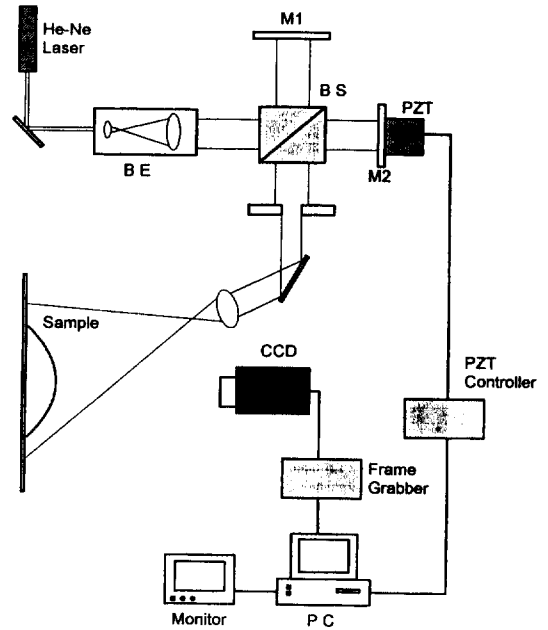


그림 2. 본 실험의 설비도. 결상렌즈와 투영렌즈의 위치는 대략적으로만 보임.

격자를 사용할 필요가 있지만 이런 투과특성을 가진 격자는 제작이 어렵기 때문에 직접 Twyman-Green 간섭계에서 얻어지는 피조우(Fizeau) 무늬를 사용하기로 하였다.

이와 같은 무늬를 격자무늬로 사용하면 투영하는 무늬의 간격이나 각도 등을 임의로 조절할 수 있으며, 투영계의 촛점심도 문제는 고려하지 않아도 되는 등 장점이 있다. 물론 이 경우에는 레이저를 광원으로 사용하여야 하고, 진동·대류 등 간섭무늬의 안정을 방해할 요소들을 잘 조절할 수 있는 환경이 필요하는 등 몇가지 단점이 있으나, 간섭계를 잘 조절된 광학대 위에 설치하면 이들 제약조건을 상당수 무시할 수 있다. 레이저를 광원으로 사용함으로써 얻어지는 화면상의 반점(speckle)에 의한 영향이 나타나게 되는 단점이 있는데, 이 문제는 공간여과기(spatial filter) 등을 이용하여 해결할 수 있을 것으로 예상되었다. 경우에 따라서는 이러한 Ronchi 격자를 대상면상에서 의도적으로 촛점이 맞지 않도록 하여 삼각함수꼴의 격자를 모사(simulation)하여도 얻어진 해상도(spatial resolution)는 대부분의 경우 만족할 만 하였다는 보고도 있었다.^[10]

III. 위상이동법에 의한 형상측정실험

1. 실험 개관

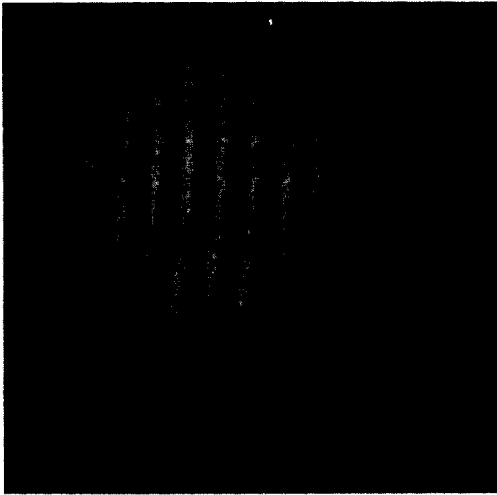


그림 3. 기준평면에 투영된 간섭무늬의 모양. 파면 만곡이 관찰된다.

앞에서 소개한 PMP 기법을 실험하기 위하여 그림 2와 같은 설비를 제진 설비가 갖추어진 광학대 위에 준비하였다. 간섭계는 Twyman-Green형을 사용하였고, 거울 M_2 는 PZT 소자에 부착하여 간섭무늬의 공간적 이동을 전산기를 통하여 임의 혹은 계획된 유형대로 조절할 수 있게 하였다. 간섭계의 광원으로 사용된 파장 0.6328 μm 인 레이저 입사광의 직경은 1 cm 정도로 조절하였고, 출사동공(exit pupil)으로부터 나온 간섭무늬는 렌즈를 이용하여 넓은 피사체에 확산 照射하였다. 이때 얻어지는 간섭무늬는 직선형이어야 하지만 간섭계 소자에 내재된 수차들에 의하여 실제로 얻어진 유형은 그림 3에 보인 바와 같이 변형되어 있었다. 비록 이상적인 직선형 간섭무늬 형태에서 벗어난다 하더라도 기준면과 시료면의 보정에 의하여 이들의 효과는 보상할 수 있기 때문에 그림 3의 유형을 그대로 실험에 사용하였다. 피사체에 의하여 더욱 변형된 이 유형의 영상은 피사체의 기준평면에 수직으로 놓인 CCD 사진기와 화상포획기(frame grabber)를 통하여 PC에 입력, 저장되었다. CCD에는 510 (H)×492(V)개의 감광소자가 있었으나, 본 실험에서는 CCD 사진기용 렌즈와 간섭무늬를 확대 照射하는 렌즈 사이의 FOV 차이로 화면의 중심부(대각선 길이의 70% 정도)에만 영상이 관찰되었기 때문에 이 부분에 해당하는 128 pixel×128 pixel 부분만을 사용하였다. 화상포획기는 8 bit의 분해능을 가지고 있어 화면의 밝기를 0~255 사이의 값으로 변환할 수 있으나, 화면 모니터의 동기 신호로 사용되는 control bit들의 값(수치로 55 정도) 보다

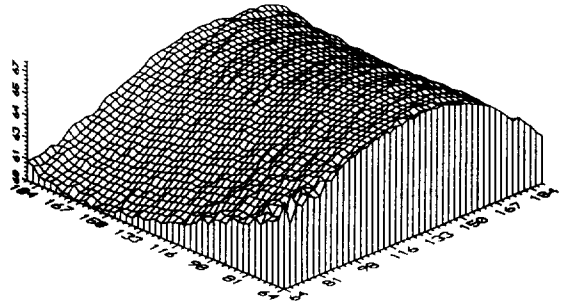


그림 4. 기준평면에서 복구된 위상도.

작은 pixel 값을 가질 수 없기 때문에 실제 사용이 가능한 변환값은 60~255의 범위에 국한되었다.

이와 같이 포착된 영상은 (3)의 관계식으로 처리하여도 되지만 동등한 원리이면서도 격자의 위상오차에 대한 최종결과와 민감도가 낮게 얻어지는 특징이 있는 Hariharan^[11] 알고리즘을 이용하여 위상으로 전환하였다. 이 알고리즘은 간섭계에서 통상 사용되는 것으로, 5장의 간섭무늬를 각각 90°씩의 위상차를 주며 측정된 뒤 이를 다음식에 의하여 위상으로 변환하게 된다. 아래의 식에서 I_i 는 주어진 pixel의 i 번째 밝기를 나타내는 값이다.

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_5 - I_1} \right) \quad (6)$$

위 식을 이용하는 소프트웨어는 본 실험실에서 C-언어를 이용, 자체 개발하여 자료 분석에 사용하였다.

2. 결과

그림 3은 기준면이 될 평면에 투사된 Twyman-Green 간섭계에서 얻어진 간섭무늬의 모양이다. 예상하였던 평행한 직선형의 무늬대신 많은 변형과 수차들을 포함하고 있음을 알 수 있다. 실제로 이 기준면에 대하여 위의 위상복구 알고리즘을 적용하여 복구된 위상의 모습을 그림 4에 보였다. 이 결과 그 자체에서는 큰 의미를 찾을 수 없으나 다만 그림 3에 보인 바와 같은 형태의 간섭무늬에서 얻을 가능성이 있는 位相圖(phase map)라고 추측할 수 있을 것이다. 그림 5는 직경이 대략 20 cm 정도 되는 반구형 물체 (실제로는 흰색 paint를 입힌 plastic 바가지) 에 무늬가 투영된 모습을 나타내고 있으며 그림 6은 이로부터 도출된 위상도이다. 특이한 점은 그림 6에서는 물체의 돌출부분이 침강한 형태로 나타나고 있다는 점이다. 이 반전된 위상의 출처에 대해서는 명확한 추적을 하지는 못하였지만 가장 심증이 크게 가는 부분은

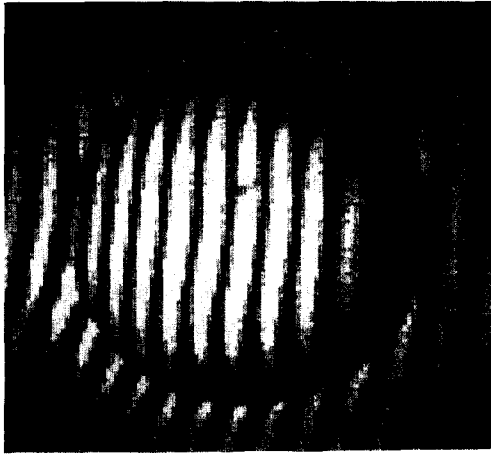


그림 5. 시료에 투영된 무늬.

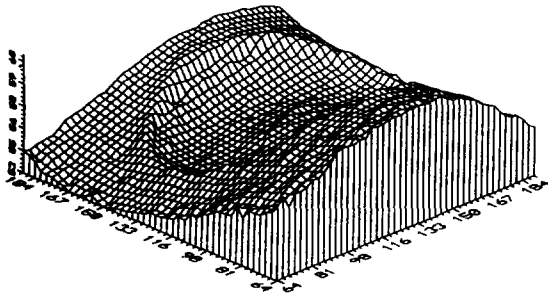


그림 6. 그림 5의 시료에서 복구된 위상도.

피사체의 촬영과정이라 할 수 있다. 즉 CCD 사진기로 피사체를 촬영하면서 좌우 상하가 반전되는 과정에서 위상정보가 역으로 입력되었을 것으로 볼 수 있기 때문이다. 그러므로 반전된 위상은 이를 역으로 환산하면 이 결상에 의한 효과를 보상할 수 있다.

그림 7은 기준면과 시료의 위상을 동시에 고려한 복구 위상도이다. 앞의 그림들에서와 마찬가지로 x, y 축 상의 수치는 pixel 번호를 의미하므로 실제 위치와 일차적인 관계가 있는 양이다. z 축의 축척은 위상의 단위(radian)로 주어지는데 이도 역시 실제 높이와 (5)를 통하여 연결되는 양이다. 현재 알려진 정확한 관계식은 푸우리에 공간주파수를 이용하여 다음과 같이 주어진다.^[3,4]

$$h(x, y) = \frac{l_0 \phi(x, y)}{2\pi d_0 + \phi(x, y)} \quad (7)$$

여기서 $\phi(x, y)$ 는 2π 의 정수배이므로 다음의 관계가 도출된다.

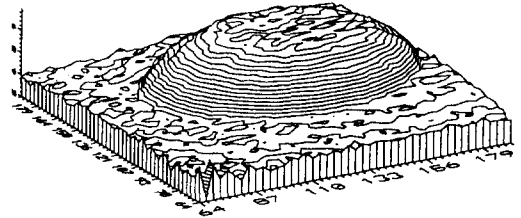


그림 7. 기준면의 위상을 보정한 복구도. 수직, 수평방향의 비는 실물체와 같도록 조절하였음.

$$\begin{aligned} h(x, y) &= \frac{l_0 f(x, y)}{d_0 f_0 + f(x, y)} \\ &\approx \frac{l_0 f(x, y)}{d_0 f_0} = \frac{l_0}{2\pi d_0 f_0} \phi(x, y) \quad (8) \end{aligned}$$

여기서 $f(x, y) = \pi(x, y)/2\pi$ 이며, 그림 7에서 볼 수 있듯이 ϕ 값은 2π 의 범위를 벗어나지 않는다. 따라서 $f(x, y) < 1$ 이며, $f_0 \approx 1/\text{cm}$, $d_0 \approx 15 \text{ cm}$ 의 상대적인 크기 비를 가지므로 (8)에 사용된 어림셈이 가능해진다. 위의 관계식에서 f_0 를 정확하게 산출하기 위해서는 화면 전체에 대한 푸우리에 변환을 시행하여야 하는데, 본 실험에서는 공간주파수의 개념을 사용하지 않고자 하였기 때문에, 위상을 높이로 환산하는 방법은 보정에 의존하였다. 즉 위상도의 좌우:높이가 실물의 비와 같도록 조절하였다.

3 고찰

본 실험에서는 PMP법을 이용하여 주어진 피사체의 공간적 윤곽(profile)을 성공적으로 측정할 수 있었으며 측정 소프트웨어의 발달에 따라 소요되는 시간을 수초 이내로 할 수도 있음을 알 수 있었다. 그러나 본 실험에서 관찰된 문제로는 다음과 같은 것들을 들 수 있다.

3.1 레이저 광원과 optical noise의 문제

본 실험에서는 $0.6328 \mu\text{m}$ 의 파장을 가진 He-Ne 레이저를 간섭계의 광원으로 사용하였다. 이는 격자무늬를 투영하는 과정에 수반되는 defocusing의 문제를 최소화하기 위하여 취해진 조치로서 그 목적은 훌륭하게 달성되었지만, 레이저를 광원으로 하는 경우에 흔히 관찰되는 noise에 의한 효과가 겹쳐서 관찰된 것으로 보인다. 간섭무늬를 투영하면 많은 경우, 의도한 간섭무늬 이외에 광학계의 불순물 혹은 먼지, 내부반사 등의 원인에 의하여 부분적인 얼룩이 관찰된다. 이런 얼룩은 반점(Speckle)과도 다른 레이저의 또 다른 특성이며, 광소자들을 청소하는 등의 방법으로는 쉽사리 제거되지 않는 잡음

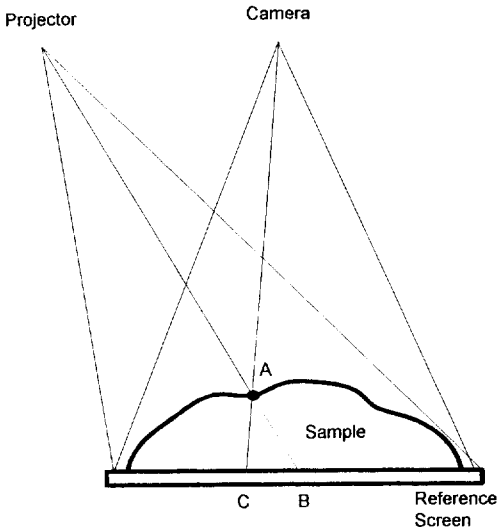


그림 8. 시료와 보정기준면의 어긋남에 의한 보정의 오차문제.

성분이다. 이 잡음은 광학계 고유의 특성으로서 보통은 투영하는 간섭무늬가 이동하여도 움직이지 않으므로 자연히 복구된 위상에도 이에 의한 영향이 있을 것으로 예상된다. 예를 들어 어느 특정한 화소에 대응되는 피사체 상의 한 점에 검은 반점이 형성되어 있다고 하자. PZT를 구동하여 간섭무늬를 이동시켜도 이 특수한 점의 밝기는 여전히 어두운 채로 있게 된다. 즉 $I_i = \text{constant}$ 를 유지하여, (6)식의 결과가 不定 으로 나오게 될 것이다. 실제로 위상도를 계산하는 과정에서 over flow 혹은 division by zero와 같은 error를 자주 접하게 되는데, 이 부분들이 바로 noise에 의하여 밝기가 변화하지 않음으로서 이와 같은 문제들을 야기했던 것으로 볼 수 있을 것이다. 통상 이와 같은 잡음은 일련의 변화하는 간섭무늬를 포착한 뒤 공통되는 배경을 제거하는 방법으로 제거하는 것이 통례이나, 소프트웨어를 이용하여 이와 유사한 효과를 낼 수 있을 것이다. 즉 그 주어진 화소의 다섯개 수치가 모두 같다면 그 부분은 위의 잡음신호를 기록하고 있는 부분이므로 읽어 들인 수치를 무시하고 그 주위 값의 평균에 해당하는 위상값을 부여하면 될 것이다. 만약 이 잡음의 크기가 CCD 한 화소를 채울 정도의 크기가 아니면 위와 같은 오차는 면할 수 있겠지만 여전히 복구된 위상의 값은 참값에서 떨어진 값을 주의하여야 할 것이다. 이와 같은 광잡음은 그림 2에 보인 투사렌즈의 초점에 공간여과기를 설치하면 그 효과를 최소화 할 수 있다. 단 여기서 초점의 크기는 가능하면 Airy 원반 정도의 값을 가지는 것이 바람직하나,

본 실험에 사용한 렌즈는 잔여 수차가 커서 초점의 크기가 크고 따라서 적절한 공간여과기의 효과를 눈에 띄게 관찰할 수는 없었다.

3.2 기준면과 시료면의 위치 차이에 의한 보정의 오차

통상 측정치를 보정 하고자 할 때는 시료를 측정할 조건과 동일한 환경하에서 표준시료를 측정하여 서로를 비교하는 방식을 취하게 된다. 본 실험에서도 평면을 표준시료로 사용하여 보정을 시도하였으나, 이들 두 경우는 근원적으로 측정환경이 다르기 때문에 정확한 보정을 하였다고 할 수 없다. 그림 8에 이 경우의 문제점을 도시하였다. 이 그림에서 사진기 측에서는 A점에 대한 보정 정보를 C점에서 취하게 되는 문제점이 있다. 이 C점은 A점과 수평위치, 높이 등이 전혀 다른 위치에 있기 때문에 이 두 점 A와 C는 적절한 보정용 짝(calibration pair)가 될 수는 없는 셈이다. 이러한 보정은 사진기와 투영기(projector)의 높이가 시료의 높이에 비하여 충분히 높아, 사진기 측에서 보아 시료나 평면의 높이 차이가 무시할 수 있는 정도인 경우에만 적용이 가능할 것이다. 이와 같은 경우에 대한 정확한 보정법은 아직 발표된 바 없으므로 추후의 연구대상이 될 수 있을 것이다.

IV. 맺는말

본 연구에서는 형상측정기법 중 가장 신뢰도가 높을 것으로 예상된 PMP (위상측정 기법)을 이용하여 간단한 시료의 형상을 복구하였다. 투사하는 유형은 Twyman-Green형 간섭계로 생성하였고 이를 렌즈를 이용하여 피사체에 확대 투사하였다. 간단한 구조의 피사체는 Hariharan 알고리즘을 이용하여 위상도의 형태로 도출되었는데, 실제의 크기를 척도로 하여 실제와 유사한 형태의 형상을 추출할 수 있었다.

그러나 PMP법을 사용하면 레이저를 광원으로 사용할 경우에 나타나는 잡음 문제가 심하게 영향을 끼치게 됨을 관찰할 수 있었다. 추후의 연구에서는 간섭계의 밝기 분포와 유사한 투과특성을 가진 격자를 사용하여 이 문제를 해결 할 수 있을 것으로 예상되지만, 이때 수반되는 초점흐림의 효과는 차후의 연구에서 다루기로 한다.

사 사

본 연구를 수행함에 있어서 software의 여러 문제를 해결해 준 김선웅 군에게 사의를 표한다.

참 고 문 헌

[1] Optics in Biomedical Sciences G. Von Baily, P. Greguss. ed., (Springer Series in Optical Sciences) 31, Part VI, p. 244.

[2] H. Takasaki, Appl. Optics **9**, 1467(1970).

[3] V. Srinivasan, H. C. Liu, M. Halioua, Appl. Optics **24**, 185(1985).

[4] M. Takeda, K. Mutoh, Appl. Opt. **22**, 3977(1983).

[5] S. Toyooka, Y. Iwaasa, Appl. Opt. **25**, 1640(1986).

[6] J. H. Bruning, D. H. Herriot, J. E. Gallagher, D. P. Rosenfeld, A. D. White, B. J. Branqccio, Appl. Opt. **13**, 2693(1974).

[7] T. Dresel, G. H usler, H. Venzke, Appl. Opt. **31**, 919(1992).

[8] B. S. Lee, T. C. Strand, Appl. Opt. **29**, 3784(1990).

[9] W. J. Smith, *Modern Optical Engineering*, 2nd ed, (McGraw-Hill, New York) p. 146.

[10] Xian Su, Wen Zhou, G. von Baily, D. Vukicevic, Opt. Commun. **94**, 561(1992).

[11] P. Hariharan, B. F. Oreb, T. Eiju, Appl. Opt. **26**, 2504(1983).

3-D Profilometry by Phase Shifting Profilometry

Dong S. Oh and Kie B. Nahm

Dept. of Physics, Hallym University, Choon Chun 200-702, Korea

(Received: March 28, 1994)

We investigated the properties of various methods of 3 dimensional profilometry to choose the phase shifting technique for the reconstruction of the shape of a given specimen. The pattern was generated by a Twyman-Green interferometer and a PZT was used to shift the fringes on the target surface. The shape was calculated with Hariharan algorithm within the uncertainty of a scaling factor. The optical noise inherent in the laser source was observed to influence the final outcome to a great extent and the need for an exact calibration was noted.