

단파장 위상천이를 이용한 미세형상 측정 I

박윤창*, 김호열†

The measurement for micro shape by Phase Shift method I

Youn-chang Park*, Ho-yul Kim†

Abstract

The development of Shadow Moire in many kinds of methods for acquiring 3-dimensional information from an object is written in this paper. The fringe is appeared, when a grating mask makes its shadow on the object. The object is moved along x-axis more then 3 times to get phases from its fringe that contains data of the object's height. PMP(Phase Measuring Profilometry) is used for analyzing these images from a CCD camera. The calculated phase is remedied for expending the restricted results due to range of the \tan^{-1} .

1. 서론

1.1 모아레 현상

“모아레(MOIRE)”란 말은 처음으로 프랑스인들에 의해 불린 단어로써 고대 중국에서 수입된 비단 위에 새겨진 물결무늬(wave pattern)를 일컫는 말이다. 이렇게 불리어지던 모아레는 요즈음에 들어서서 두 개 이상의 주기적인 패턴(periodic pattern)이 겹쳐질 때 만들어지는 간섭무늬(interference fringe)를 지칭하는 말로써 다양한 분야에서 매우 광범위하게 사용되어 지고 있다. 이렇듯 물결무늬를 의미하는 불어에서 유래된 모아레 무늬를 좀 더 학문적으로 정의를 내리면 비슷한 주기를 갖는 여러 개의 격자가 겹쳐질 때 백놀이(beatting) 현상에 의해 발생하는 저주파의 고유한 무늬로 정의할 수 있다. 앞서 언급한 모아레 현상으로 설명되어지는 이 모아레 무늬(moire fringe)를 우리는 일상생활에서 어렵지 않게 발견할 수 있다. 겹쳐진 모기장이나 겹쳐져 있는 레이스 커튼 등에서 실제로 물체가 가지고 있는 격자 모양 이외에 그보다 넓은 간격을 가지는 새로운 무늬를 볼 수

있는데 이 무늬가 바로 모아레 무늬이다. 오른쪽 그림은 두 개의 방충망이 겹쳐있을 때 관찰되는 모아레 무늬의 예를 보여 주고 있다.

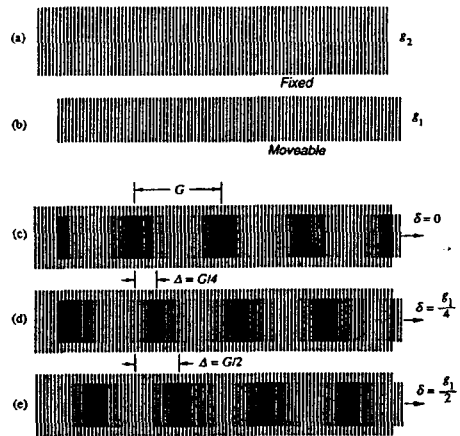


Fig.2. 주기가 다른 2개 격자에 의한 모아레 무늬

이 모아레 무늬는 여러 가지 재미있는 성질을 가지고 있다. 그 중에서도 우리가 특히 이 모아레 무늬의 성질에 주목하는 부분은 모아레 무늬의 변화가 실제 물체의 움직임을 상당히 증폭해서 나타낼 수 있는 것과 이 모아레 무늬의 형성과정에 따라 물체의 형상에 대한 3차원 정보를 가지고 있다는 사실이다. 우선 미소변위 증폭효과를 보기 위해서 Fig.2을 보면, (a)는 주기가 p 인 직선격자이고, (b)는 격자(a)와 약간의 차이를 갖는 주기를 가지는데 이 두 개의 격자를 겹치면 (c)와 같은 모아레 무늬가 얻어지는데 이 모아레 무늬는 격자의 작은 움직임을 크게 확대하여 보여준다. 따라서 이 모아레 현상이 가지는 일반적인 성질을 잘 이용할 경우 우리의 공학 전반에서 물체의 거동해석이나 물체의 비접촉 형상측정 분야에서 많은 응용이 가능해진다.

1.2 모아레 형상 측정법

격자 상을 물체 표면에 투영하고 다른 각도에서 투영된 격자의 그림자를 보면 물체 표면의 요철에 의해 격자상이 변화되어 보인다. 이 변형 격자의 상을 기준으로 하는 격자와 겹치면 격자가 변형되어 있는 개소(個所)에서는 피치가 달라지기 때문에 모아레 줄무늬가 발생한다.

대상물 바로 앞에 격자를 두고 점광원에서 발하는 빛으로 격자의 그림자를 물체에 떨어 뜨려 같은 격자를 통해 관찰하는 격자 조사(照射)형과, 기준 격자를 렌즈로 물체에 투영하고 물체의 요철에 의해 변형된 격자를 관찰한 상에 또 하나의 격자를 겹침으로써 모아레 줄무늬를 얻는 격자형 투영이 있다.

격자 조사 형에서는 측정 대상물 바로 앞에 격자를 두기 때문에 측정 장치에서부터 대상물까지의 거리가 별로 크게 잡히지 않아 대상물과 거의 같은 크기의 격자를 필요로 하는 것에 대해 격자 투영형에서는 대상물에서 어느 정도 떨어져 측정할 수 있고 렌즈에 의해 확대 투영되기 때문에 작은 격자로 측정할 수 있다.

그리고 렌즈의 배율을 바꿈으로써 대상물의 크기에 폭넓게 대응할 수 있는 등 형상 계측 장치로서는 유연성이 높다.

투영측과 관찰측의 격자와 렌즈가 각각 독립되어 있기 때문에 이들의 정밀도가 충분하지 않으면 측정 결과에 오차를 일으키므로 주의해야 한다. 관

찰측 격자를 광학적으로 겹치는 것이 아니라 기준 평면에 투영한 격자상을 기준 줄무늬로 이용하고 화상 처리에 의해 수치적으로 모아레 줄무늬를 발생시키는 방법도 있어 실질적으로 하나의 광학계로 처리함으로써 높은 정밀도를 얻을 수 있다.

모아레 줄무늬는 물체 표면의 등고선으로서 나타나기 때문에 3차원 형상을 얻으려면 줄무늬의 차수를 올바르게 알 필요가 있고 간격이 다른 두 종류의 격자를 이용하여 차수를 결정하는 방법 등 다양한 연구가 있다.

모아레법에 의한 측정은 하나의 화상을 촬영함으로써 모든 정보를 얻을 수 있기 때문에 시시가 각 변화하는 물체의 어느 순간의 형상을 포착하는 것이 가능하고 진동 해석에서 그 위력을 발휘한다.

1.3 위상 천이 간섭법

2광속 간섭계의 기준면에 정밀한 기동 기구를 부착하고 광로차를 약간씩 변화시켜 3장의 간섭 줄무늬를 촬영 한다. 3장 영상의 동일 위치에서 밝기의 변화를 사인 함수에 적용함으로써 각 점의 간섭 줄무늬 위상을 고정밀도로 구할 수 있다. 기준면의 이동 기구가 필요하고 광학계에 높은 안정성이 요구되나 파장의 1/50정도 되는 요철을 비교적 간단한 처리로써 검출할 수 있기 때문에 정밀 표면의 계측에 사용된다.

2.본론

2.1 단파장 위상 천이 기본 개념

단파장 위상 천이법은 모아레법을 기초로한 위상천이 간섭법을 사용한다.

물체를 측정하기 위해서는 기준면에 대한 위상이 필요하다. 기준면의 위상과 물체를 측정하여 얻어진 위상의 차이를 구하게 되면 모아레 무늬를 얻게 되고 이 무늬의 위상을 얻기 위해 격자를 이송하게 된다.

측정 절차로는 기준면이 되는 평면에 격자를 영사시키고 격자를 일정한 량씩 이송시키며 영상을 얻어 이 영상들을 해석하여 기준위상을 얻고 물체 위상은 물체에 격자를 영사시키고 같은 방법으로 얻어낸다. 이렇게 얻어진 위상의 차이는 기준면부터 물체표면까지의 거리 정보를 가지고 있는 모아레 무늬이다.

여기서 얻어진 모아레 무늬에는 측정대상물의 형

상에 따라 결정되는 격자의 그림자영상이 포함되어 있기 때문에 이 모아레 무늬를 해석함으로써 측정대상물의 형상 정보를 얻을 수 있다. 오른쪽 아래 Fig.2는 입술모양 석고상에서 물체영상 영상이다.

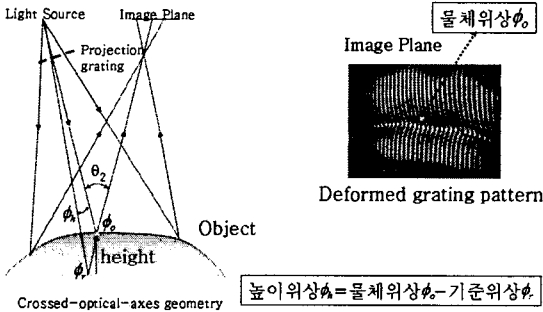


Fig.3. 물체위상

2.2 위상을 얻기 위한 위상천이

모아레 무늬의 해석에서는 전통적으로 간섭무늬 추적(fringe contouring)이 사용되기 때문에 측정 분해능이 떨어지게 된다. 그러나 현재는 푸리에 변환이나, 위상천이(phase shifting) 등의 방법으로 측정 분해능을 향상시키고 있으며, 얻어진 영상에서 측정대상물의 형상과는 관계가 없는 격자의 영상을 없애기 위해서 모아레 무늬 획득시 간동안 격자를 이동시키는 방법 등이 적용되고 있다.

왼쪽 아래 Fig.4는 이러한 단파장 위상천이법을 사용하면서 광원, 측정대상물과 카메라를 그대로 두고 격자를 X축 방향으로 위상천이 시키는 위상천이법으로 측정한다.

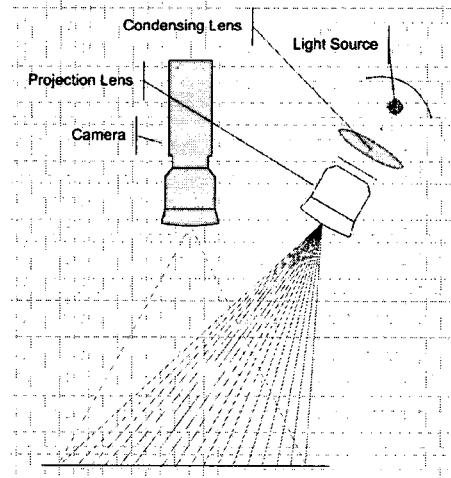


Fig.4. 장치 구성도

2.3 실험환경 및 구성

실험 구성요소로는 CCD-Camera(JAI사의 CV-M4+CL, 1280x1024, 2/3inch), Camera Lens(F:60mm), HCI 램프(150w), 크롬격자(Pinch:0.064mm)가 사용되었다.

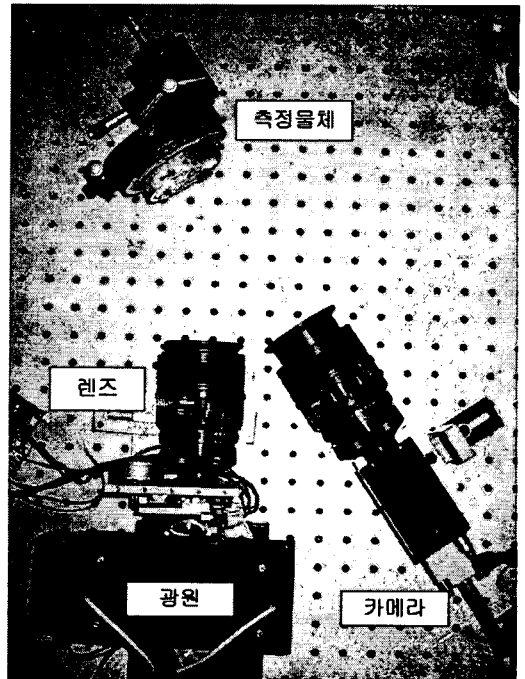


Fig.5. 실험 장치

카메라의 FOV는 10.8mm x 8.1mm 이고 등가 광장은 300um 이다.

이와 같이 구성된 실험 장치를 이용하여 측정 대상 물체를 0.064/4mm 만큼씩 4회 이송하면서 영상을 저장한다. 이렇게 저장된 영상들이 Fig.5이다.

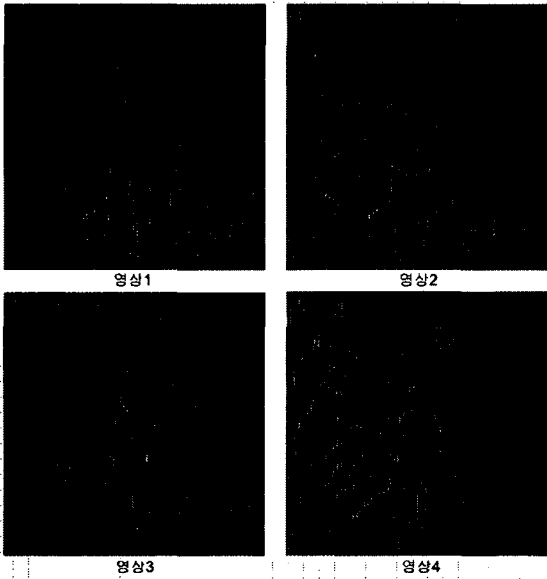


Fig.6.물체 영상

라인스캔방식의 방법을 이용하면 위에서 얻은 영상 중에 하나의 기준영상과 물체영상만으로도 높이 정보를 얻을 수 있다. 하지만 투영된 격자의 광분포와 물체 표면의 빛 반사량이 일정하지 않고, 주변광 등은 반사량에 영향을 주기 때문에 상대적인 빛의 반사량으로는 정확한 높이를 얻을 수 없다. 이것들의 영향을 줄이고, 더욱 정밀한 데이터를 얻기 위해 위상천이법을 적용한다.

2.4 Least-Squares Algorithms

여러 가지 위상을 찾아내는 방법 중 최소자승법을 이용한 알고리즘을 사용하여 여러 개의 데이터를 얻어 정확한 값을 찾을 수 있도록 하였다.

먼저, 반사된 빛의 절대량에 대한 광량을 아래의 [수식 1]로 표현 하였다.

$$I(x,y,t) = I'(x,y) + I''(x,y)\cos[\Phi(x,y) + \delta(t)]$$

[Equation 1]

I' = The intensity bias

I'' = Half the peak-to-valley intensity modulation

I 는 위에서 언급한 주변광이며, I' 는 표면의 빛 반사량이며, Φ 은 반사된 빛의 절대량이며, δ 은 물체를 이송하면서 변화 하는 빛의 변화량 이다. 아래 Fig.6은 위의 식을 그림으로 표현 하고 있다.

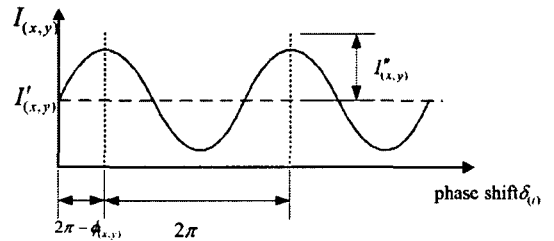


Fig.7.일반적인 정현파

위의 식에서 모르고 있는 계수는 $I'(x,y)$, $I''(x,y)$, $\delta(t)$ 이다. 즉, 3개의 계수를 알아내기 위해서는 3개의 데이터 즉, 3회 이상 이송된 영상을 이용하면 간단하게 구해 낼 수 있다. 그러나 물체를 정확하게 이송되지 못한 부분에서의 에러와 격자의 그림자는 정확한 정현파라는 가정에서 세워진 위 식의 에러로 인해 정확한 위상을 구해 낼 수 없다. 에러를 포함한 영상(데이터)을 통해 $\delta(t)$ 구하기 위해서 최소자승법을 이용한다.

한 주기 내에서 N번 $\delta(t)$ 만큼 위상 천이된 영상의 해석을 위한 일반적인 방법인 최소 자승법은 1974년에 Bruning에 의해 처음 소개 되어졌고 1984년에 Greivenkamp에 의해 정리 되었다. 이 방법을 살펴보면 [Equation 1]은 다시

$$I_i(x,y) = I'(x,y) + I''(x,y,\Delta)\cos[\Phi(x,y)]\cos(\delta_i) - I''(x,y,\Delta)\sin[\Phi(x,y)]\sin(\delta_i)$$

[Equation 2]

또는

$$I_i(x,y) = a_0(x,y) + a_1(x,y)\cos(\delta_i) + a_2(x,y)\sin(\delta_i)$$

[Equation 3]

$$a_0(x,y) = I'(x,y)$$

$$a_1(x,y) = I''(x,y,\Delta)\cos[\Phi(x,y)]$$

$$a_2(x,y) = -I''(x,y,\Delta)\sin[\Phi(x,y)]$$

이와 같이 표현될 수 있다.

이렇게 표현되어진 광 강도는 얻어진 광 강도의 차이들을 제공하여 합하여 오차가 가장 작게 하는 계수들을 구할 수 있다. 이를 위한 수식은

$$E^2 = \sum_{i=0}^n [I_i(x,y) - a_0(x,y) + a_1(x,y)\cos(\delta_i) + a_2(x,y)\sin(\delta_i)]^2$$

[Equation 4]

된다. 이를 편의상 행렬식으로 다시 표현하면

$$\begin{bmatrix} a_0(x,y) \\ a_1(x,y) \\ a_2(x,y) \end{bmatrix} = A^{-1}(\delta_i)B(x,y,\delta_i) \quad \text{[Equation 5]}$$

되며,

$$A(\delta_i) = \begin{bmatrix} N & \sum \cos(\delta_i) & \sum \sin(\delta_i) \\ \sum \cos(\delta_i) & \sum \cos^2(\delta_i) & \sum \cos(\delta_i)\sin(\delta_i) \\ \sum \sin(\delta_i) & \sum \cos(\delta_i)\sin(\delta_i) & \sum \sin^2(\delta_i) \end{bmatrix}$$

[Equation 6]

$$B(x,y,\delta_i) = \begin{bmatrix} \sum I_i \\ \sum I_i \cos(\delta_i) \\ \sum I_i \sin(\delta_i) \end{bmatrix} \quad \text{[Equation 7]}$$

이다. 여기서 위상을 구하기 위해

$$\Phi(x,y) = \tan^{-1}\left(\frac{-a_2(x,y)}{a_1(x,y)}\right) \quad \text{[Equation 8]}$$

을

$$\Phi(x,y) = \tan^{-1}\left(\frac{-\sum I_i \sin(\delta_i)}{\sum I_i \cos(\delta_i)}\right) \quad \text{[Equation 9]}$$

정리 한다. 이렇게 하여 한 점의 근사 위상을 구할 수 있다. 위 방법을 이용하여 각 점들의 근사 위상을 구한다.

위의 알고리즘을 통해서 4장의 물체영상과 4장의 기준영상을 이용하여 위상을 구하고 이들의 차이를 가지고 모아래 영상을 구하였다.

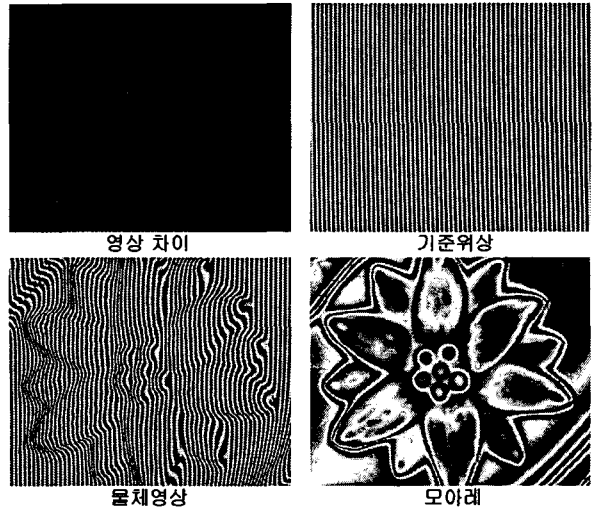


Fig.8 위상 및 모아래 영상

2.5 Unwrapping

위의 계산을 통해 얻어진 위상은 실제 높이를 나타내기 위해서는 한 가지 더 계산 과정을 거쳐야 한다. \tan^{-1} 의 결과인 위상들은 실제 표면과 다른 불연속적인 형상을 하고 있다. Fig.8은 연속적인 대상물이 π 범위로 측정되는 예이다.

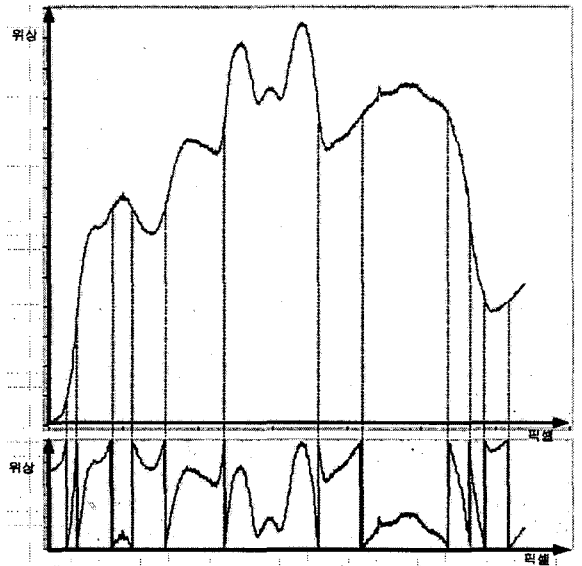


Fig.9. Unwrapping 전/후

\tan^{-1} 은 $-\pi/2$ 에서 $\pi/2$ 의 범위를 갖고 있기 때문에 실제 표면의 높이와 다르게 결과 값들은 이 범위로만 출력된다. 이것은 위의 알고리즘이 갖고 있는 하나의 단점이다. 그러나 이 문제를 교정하기 위한 방법이 있다. 만약 대상물의 표면이 연속적이라면 교정 가능하다.

Sine	Cosine	Correct Phase	Phase Range
0	+	0	0
+	+	Φ	0 to $\pi/2$
+	0	$\pi/2$	$\pi/2$
+	-	$\Phi + \pi$	$\pi/2$ to π
0	-	π	π
-	-	$\Phi + \pi$	π to $3\pi/2$
-	0	$3\pi/2$	$3\pi/2$
-	+	$\Phi + 2\pi$	$3\pi/2$ to 2π

[Table 2-1 : 각 부호에 따른 확장 표]

먼저 계산된 위상을 \tan 의 부호와 독립적인 \sin 과 \cos 의 부호를 통해서 0에서 2π 까지 확장할 수 있다. [Table 2-1]은 \sin 과 \cos 의 부호를 통해 위상을 확장하기 위한 표이다.

위 표를 통해 확장된 값들은 다시 앞뒤의 관계를 기준으로 연속적인 데이터를 만들어 낸다.



Fig.10.Unwrapping 전의 3차원 영상

Fig.10과 같이 불연속적으로 측정된 결과를 위의 방법을 이용하여 Fig.10과 같이 교정 하였다.

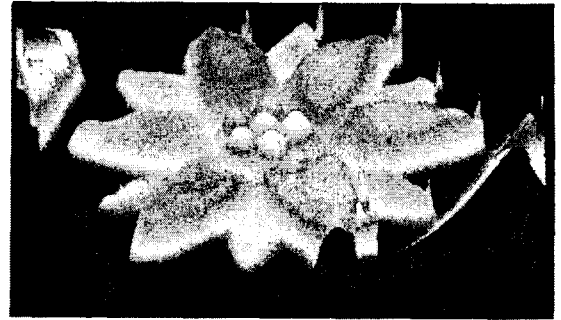


Fig.11.Unwrapping 후의 3차원 영상

3.결론

여러 가지 많은 3차원 측정 기술중 비접촉식 방법중 하나인 위상천이법을 이용하여 측정물체의 3차원 높이 데이터를 얻는 방법에 대해 연구하였다.

격자와 물체에 영사된 그림자를 통해 생긴 모아레 무늬로부터 정확한 위상을 알아내기 위해 위상을 이송해야하는 PMP법을 사용하였다. 이렇게 해서 보다 정확한 위상을 얻을 수 있었으며, 이렇게 얻어진 위상은 측정 범위를 확대하기 위해 unwrapping을 하였다.

위 과정을 통해 측정물체의 3차원 정보를 얻을 수 있었다.

참고 문헌

- [1] (주)Cad&Graphics, "The art of reverse engineering in the now and future.,"(2001)
- [2] Yi-Bae Choi, "Three Dimensional Human Face Profile Measurement System Using Projection Type Multi-Slit Beam Topography,"1993
- [3]Yi-Bae Choi. "Phase-shifting Moire Topography for Precision Measurement Of 3-Dimensional Profiles",1997
- [4]Kyeng-Gun Park. "A Study on the Moire Fringe Acquisition Method Using the Programmable Grating Mechanism",2000
- [5]K.M. Jeng and Y.C. Park, "A Study on the Phase Measuring Profilometry with

- Parallel-optical-axes," , Vol.17, No.6 (2000)
- [6]J.L.Li,H.J.Su and X.Y.Su, "Two-frequency grating used in phase-measuring profilometry," App.Opt.36,277-280(1997)
- [7]V.Srinivasan, H.C.Liu and M.Halioua, "Automated phase-measuring profilometry : a phase mapping approach," App.Opt.24, 185-188(1985)
- [8] Ming Chang, Der-Shen Wan, "On-Line Automated Phase-Measuring Profilometry," Optics and Laser in Eng.15,127-139(1991)