

회전다면경을 이용한 줄무늬 격자 영사방법에 관한 연구

박윤창*, 정경민*, 장석준**, 박경근**

A Study on the Grating Projection Method using Polygon Mirror

Yoon-chang Park*, Kyung-min Jeong*, Seok-jun Jang**, and Kyung-keun Park**

ABSTRACT

Recently Moire and PMP(Phase Measuring Profilometry) are adopted as a practical methodology for non-contact 3-D measurement of free surface. These methods extract the 3-D informations from the images of the object projected with stripe-pattern light. This paper presents a simple projector generating stripe-pattern light using expensive polygon mirror. In this projector, slit-beam is generated with a Laser diode and a rod lens and the laser diode is switched on/off synchronizing with the rotation of the polygon mirror. So its structure is very simple and light-weighted compared to the existent projection methods using several lenses and it is also easy to change the pitch and the phase of the stripe pattern. Experimental results show that the intensity profile of the stripe pattern can be approximated with sinusoidal curve by reducing the pitch of the stripe pattern.

Key Words : Moire(모아레), PMP(위상측정에 의한 형상측정법), Grating Projection(격자 영사), Rotating polygon mirror(회전다면경), Laser diode(레이저 다이오드)

1. 서론

삼차원 자유곡면형상 측정은 가공물의 검사, 기존 산업제품의 역 복원, 의료/의류 분야와 같이 인체를 측정대상으로 하는 분야, 삼차원 웹(Web) 쇼핑과 같은 인터넷에 이르기까지 그 응용 범위가 매우 넓어지고 있다.

이러한 자유곡면형상 측정에서 광학적인 방법을 사용하는 비접촉식 형상측정법은 접촉식에 비해서 측정정도는 다소 떨어지지만 고속측정이 가능하다는 장점 때문에 많은 관심이 모아지고 있다.

자유곡면에 대한 측정속도의 문제점을 극복하기 위한 구체적인 대안으로 슬릿광(slit beam)형상 측정법이 활발히 연구되어 왔으며 다양한 상용제품이 개발되어 있다.^[1-7] 이 방법은 측정물의 한 단면의 삼차원 좌표를 측정하기 때문에 전체 형상을 측정하기 위해서는 기계구동시스템을 사용해 측정 단면을 이송해 주어야 한다. 이 측정법과 함께 광삼각법의 원리에 기초를 두고 있는 측정법으로 다중슬릿광법^[1,7]이나 액정소자를 사용하여 특수한 패턴을 측정물 위에 형성시켜 측정을 수행하는 공간 부호화기법^[3]등의 방법들이 있다.

2001년 2월 2일 접수

* 선문대학교 기계 및 제어공학부

** 선문대학교 기계공학과 대학원

광삼각법 이외의 대표적인 비접촉 삼차원 형상 측정법으로는 위상측정 형상측정법(PMP법: phase measuring profilometry)^[14,16]과 영사식 모아레법(projection moire)^[8,9]이 있다. 이들은 영사된 직선줄무늬격자의 위상을 이송시켜서 줄무늬격자 자체의 위상 혹은 줄무늬격자의 간섭으로 인한 모아레무늬의 위상을 검출하는 방법, 즉 위상천이법^[11]을 이용함으로써 조명의 밝기, 물체의 반사도등의 영향을 배제시키기 때문에 광삼각법을 이용한 측정에 비해 10배 이상의 분해능 향상을 이룰 수 있게 되었으며^[12], 또한 격자의 주기가 다른 두 가지이상의 격자를 사용한 맥놀이파장을 이용하여 측정영역을 확장하고 있다.^[13-15]

위상천이법을 채택하여 상대적으로 우수한 분해능을 얻고 있는 이들 측정시스템에서는 직선줄무늬격자를 영사하는 영사광학계가 측정기에서 매우 중요한 비중을 차지하게 되는데, 현재 사용되고 있는 영사광학계는 크게 두 가지 형태로 대별된다. 그중 한가지는 유리에 크롬증착과 포토�칭 기술을 이용하여 제작되는 직선줄무늬격자를 영사하는 광학계이고, 나머지 한 가지는 액정소자 프로젝트를 영사광학계로 사용하는 것이다. 전자의 경우 측정대상물의 크기에 따라서 격자의 주기를 조정하기 위해서는 유리격자를 다시 제작해야하는 불편함이 따르고, 격자를 이송하기 위한 기구적인 장치가 필요하게 된다. 후자의 경우에는 개인용 컴퓨터와 연결되어 격자의 주기변경과 이송을 용이하게 할 수 있지만, 액정소자의 투과도가 떨어지기 때문에 비교적 큰 출력의 광원을 필요로 하고, 이로 인한 발열이 광학계의 정렬을 흐트러지게 하는 원인으로 되고 있다. 또한 이들 방식에서는 다수의 렌즈를 이용하여 격자의 상을 측정물에 영사시키기 때문에 무게와 부피가 커지게 된다.

본 논문에서는, PMP법과 영사식모아레법에 사용되고 있는 기존의 영사광학계에 비해서 무게와 크기, 그리고 광원의 전력을 대폭 축소시키면서 격자의 주기조정 및 위상이송을 용이하게 구현하는 직선 줄무늬격자 영사장치를 제안하고자 한다. 제안되는 방식에서는 레이저다이오드(laser diode : LD)와 실린더 렌즈를 이용하여 직선줄무늬 격자를 형성시키고, 회전다면경의 회전과 동기시켜 레이저다이오드를 On/Off 제어하여 격자의 주기조정 및 위상이송을 구현하고 있다.

2. 본 론

2.1 기본 원리

Fig. 1은 직선 줄무늬격자 영사부의 개략적인 구성을 보여주고 있는데, 이것은 일정한 속도로 회전하는 회전다면경(polygon mirror), 광원으로 사용되는 레이저다이오드(laser diode:LD), 레이저다이오드에서 나오는 레이저를 집광시키는 집광렌즈(condensing lens), 점광원을 슬릿빔(slit beam)으로 변환시키는 실린더 렌즈(cylinder lens) 그리고 회전다면경의 회전 각위치를 검출하는 포토다이오드(photo diode:PD)로 이루어져 있으며, 회전다면경의 회전속도와 LD의 On/Off를 제어하기 위해서 기준 클럭(main clock)과 타이머(timer)가 사용되고 있다.

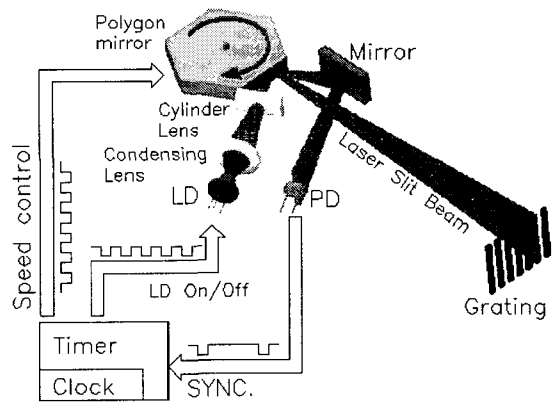


Fig. 1 Schematic of grating generation unit

LD 앞단에 설치된 집광렌즈는 측정대상물이 놓이는 거리에서 스팟징(spot size)이 최소로 되도록 위치가 조정되어있으며, 집광렌즈를 통과한 레이저는 실린더 렌즈를 통과하면서, 회전다면경에 의한 스캐닝방향에 대해서 직각방향의 슬릿빔으로 변환된다.

회전다면경이 일정한 속도로 회전하고 있는 상태에서 레이저가 조사되면, 회전다면경의 1면이 회전할 때마다 한번씩 레이저가 PD에 입사되고, 입사되는 순간에는 회전다면경의 반사면 방향이 항상 동일한 위치에서 놓이게 된다. 따라서 PD에 레이저가 입사되는 순간이 격자생성과 격자위상이송을 위한 동기신호로 이용될 수 있으며, 동기신호를 좀더 정밀하게 검출하면서, 격자영사부의 전

체 외형을 축소하기 위해서 회전다면경과 PD 중간에 평면거울(mirror)이 이용되고 있다.

이렇게 얻어지는 동기신호를 기준으로 LD를 On/Off시키면서 격자를 생성하게되는데, 이 과정은 Fig.2에 나타나 있다. 먼저 PD로부터 동기신호가 입력되면 초기지연시간(T_a)만큼 지연후 LD를 격자의 주기(pitch, T_b)에 해당하는 간격으로 On/Off시키면서 격자를 생성시킨 후, 다음 동기신호를 얻기 위해서 LD를 On시키게된다. 이러한 과정에서 초기지연시간 T_a 를 조정하여 격자의 위상이송을 시킬 수 있으며, On/Off주기 T_b 를 조정하여 격자의 주기를 설정하게 된다.

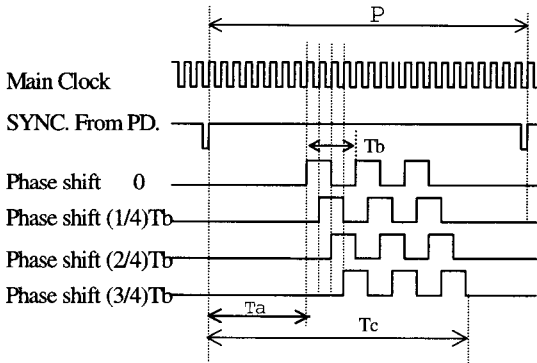


Fig. 2 Timing chart for grating generation

2.2 실험장치 제작

앞 절에서 기술된 원리를 구현하기 위해 제작된 실험장치의 사진이 Fig. 3에 표시되어 있다.

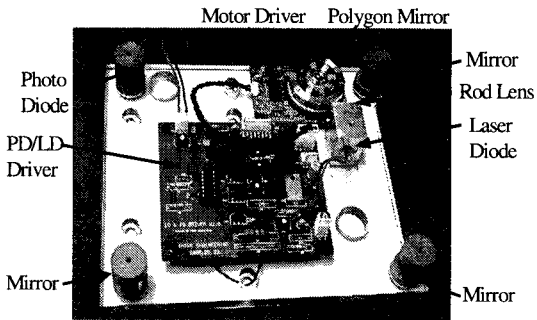


Fig. 3 Photograph of grating generation unit

여기에 사용된 회전다면경(Copal Electronics Co., LTD)은 외접직경이 42mm이면서, 30도로 등

각 분할된 12면의 반사면을 가지고 있으며, 본 실험에서는 8,000rpm으로 등속 회전하고 있는데, 속도를 제어하는 클럭(clock)에 따라서 6,000-10,000rpm범위에서 가변될 수 있도록 되어있다. 광원으로는 655nm의 파장으로 50mW LD가 사용되었으며, 초점거리 4.6mm의 집광렌즈와 직경 8mm의 로드렌즈(rod lens)에 의해 슬릿빔이 만들어지고 있다. 그리고 회전다면경과 PD 사이에는 동기신호의 검출정밀도를 향상시키면서 외형을 줄이기 위해서 3개의 평면거울(mirror)이 설치되었으며, PD 관련 회로와 LD를 구동하기 위한 회로가 제작되었다. 그리고 PD로부터 동기신호를 입력받아서 LD를 On/Off 제어하는 타이머회로(timer circuit)는 개인용컴퓨터에 내장되어 있는데, 여기서는 격자의 주기를 가변하고, 위상을 변화시키기 위해서 개별적인 동작이 가능한 3개의 타이머를 가진 8254가 사용되었으며 기준클럭으로는 8MHz를 이용하고 있다.

Fig. 4는 이의 신호흐름과 구성을 나타내고 있으며, Fig. 5은 최종적인 LD신호를 만들어 내는 과정을 타이밍차트(timing chart)로 표시하고 있다.

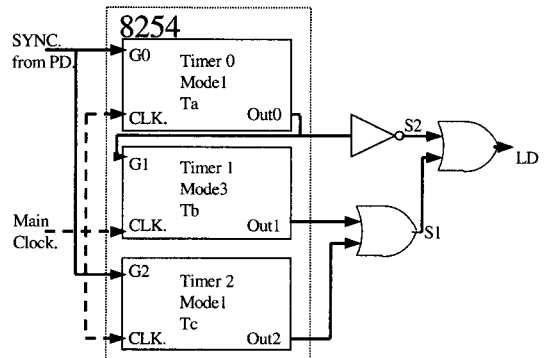


Fig. 4 Timer circuit for LD On/Off control

8254내부에 있는 세 개의 타이머(timer0,1,2)에는 모두 8MHz의 클럭이 입력되고, timer0와 timer2에는 PD로부터의 동기신호가 게이트신호로 입력되며, timer0의 출력신호인 Out0가 timer1의 게이트신호로 입력된다. timer0의 레지스터(register)에는 초기지연시간 T_a 값이 입력되어있으면서 mode1으로 설정되어 있기 때문에 동기신호의 상승엿지 이후 기준클럭의 첫 번째 하강엿지로부터 초기지연시간 T_a 이 경과한 후에 출력신호인 Out0

가 low에서 high로 반전된다. timer1의 레지스터에는 격자종료시간 T_b 값이 입력되어있으면서 mode3으로 설정되어 있기 때문에 Fig. 5에서 보는 바와 같이, Out0의 상승엿지부터 주기 T_b 로 On/Off를 반복하는 신호 Out1을 발생시키게된다.

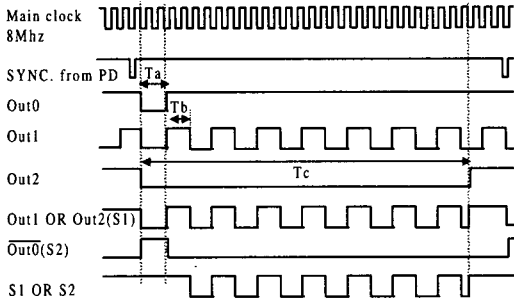


Fig. 5 Timing chart for LD On/Off control

레지스터(register)에 격자지속시간 T_c 값이 입력되어있으면서 mode1으로 작동하는 timer2의 출력신호인 Out2는 동기신호의 상승엿지 이후 기준클럭의 첫 번째 하강엿지로부터 격자지속시간 T_c 가 경과한 후에 low에서 high로 반전된다.

이렇게 얻어진 세 개의 출력신호(Out0,1,2)는 다시 Fig. 4에서 보는 바와 같이 디지털논리회로의 조합으로 LD를 On/Off 제어신호를 만들게되는데 이 과정은 Fig. 5에 잘 나타나 있다. 먼저 Out1와 Out2를 OR게이트에 연결하여 S1을 얻고, 이는 다시 Out0의 역상신호인 S2와의 OR게이트를 거치면서 최종적인 LD의 On/Off 제어신호가 만들어지게 된다.

이상과 같은 구조로 LD를 On/Off 제어하기 때문에, 세 개 타이머의 레지스터에 적절한 값을 입력함으로써, 위상(T_a), 격자의 주기(T_b) 및 격자 생성구간(T_c-T_a)을 자유로이 조정하는 것이 가능하게 되었고, 약 500g의 무게와 200x170x60(mm)의 크기로 제작되어 기존의 직선줄무늬 영사광학계에 비해서 크기와 무게가 대폭 감소되었다.

2.3 격자의 특성시험

본 논문에서 제작된 직선줄무늬격자 영사장치의 특성시험을 위해서 Fig. 6과 같은 실험장치가 구성되었다.

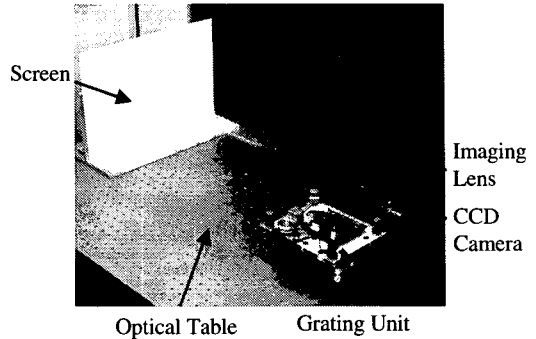


Fig. 6 Experimental setup

여기서는 격자생성부에서 레이저가 조사되고, 스크린에 형성된 격자를 CCD카메라로 포착하여 격자의 특성을 분석해 보았다. 격자생성부는 앞에서 기술된 바와 같이 제작되어 개인용 컴퓨터에 의해서 제어되고, 스크린으로 사용되는 모형제작용 압축스티로폼에 영사된 격자는 CCD 카메라(Sony XC-75 1/2"CCD camera, pixel:640x480)로 입력되어 프레임그래버(frame grabber)에 의해 8bit로 디지털값으로 변환된다.

Fig. 7은 회전다면경을 8,000rpm으로 회전시키면서 LD를 200KHz(main clock = 8MHz, $T_b=20$ pulse)로 On/Off시켰을 때 CCD카메라에 포착된 영상의 가운데 일부분이다.

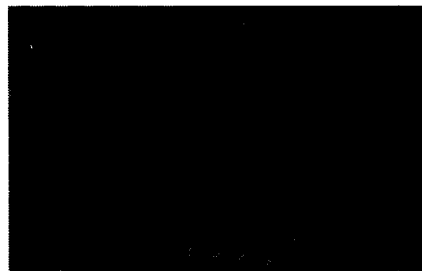


Fig. 7 Captured image of gratings

이 영상에서 240번째 수평라인의 가운데 부분에 위치한 50개 CCD 픽셀의 밝기값 분포는 Fig. 8에 표시되어 있는데, 다소 일그러진 정현파와 같이 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이러한 현상은 격자생성부 자체의 광학적 특성, 스크린의 부분적인 반사도 차이와 CCD 픽셀(pixel)들의 균일하지 못한 감도(sensitivity)가 주된 원인이라고 생각된다.

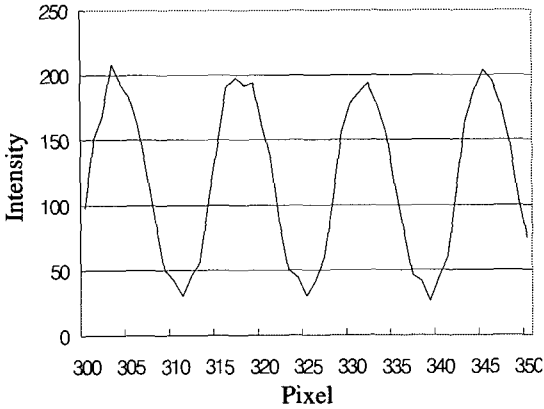


Fig. 8 Intensity of captured image

격자의 광강도 분포에서 종이의 반사도와 CCD 픽셀의 감도로 인한 영향을 배제하기 위해서 정해진 주기의 격자를 일정한 간격으로 위상을 이송시키고, 스크린 상의 한 점에서의 광강도 변화를 실험하였다.

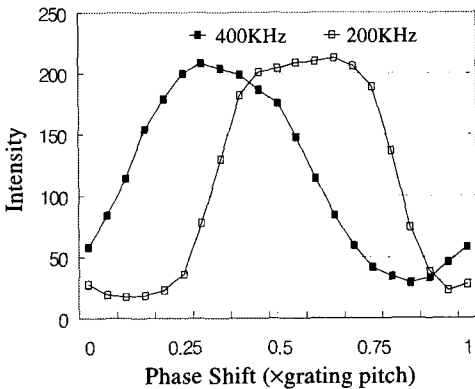


Fig. 9 Intensity variation with phase shifting

Fig. 9는 LD를 400KHz(main clock=8MHz / $T_b=20\text{pulse}$)와 200KHz(main clock=8MHz / $T_b=40\text{pulse}$)로 On/Off시켜서 격자를 만들고, 격자의 초기지연시간 T_a 를 격자주기의 1/20씩 20회 증가시켜 격자를 한 주기동안 위상이송시킬 때 (320,240)에 위치한 CCD 픽셀의 밝기값 변화를 표시한 것이다. 400KHz에서의 밝기값 변화를 보면, 실제 LD를 제어하는 신호는 On/Off형태의 사각파이지만, 레이저빔의 가우시안 분포(Gaussian

distribution)와 고속에서의 LD 동작특성(rising & falling time)에 의해 전체적으로 정현파 형상을 띠게 되는데, 이는 스크린의 부분적인 반사도 차이와 CCD 픽셀(pixel)들의 균일하지 못한 감도(sensitivity)영향이 포함된 Fig. 8에서보다 훨씬 양호한 결과를 보여주고 있다. 하지만, Fig. 9의 200KHz에서 볼 수 있듯이, 격자의 주기가 길러지면 사다리꼴 형상과 유사하게 된다.(삼차원 형상 측정에서는 측정정밀도를 높이기 위해서 대부분 짧은 주기의 격자가 사용된다.)

격자 혹은 격자의 간섭으로 생긴 모아레무늬의 밝기값이 정현파 형태를 가진다는 가정하에서 위상천이법을 적용하는 위상측정 형상측정법(PMP법)과 위상천이 모아레법등에서 일반적으로 On/Off형태의 투과도를 가진 격자(Ronchi-ruling grating)를 사용하고 있는 점을 감안 할 때, 본 논문에서 제안되는 방식이 좀더 개선된 결과라고 생각된다.

다음은 본 논문에서 제안된 격자영상장치를 이용하여 위상천이법을 적용해 보기 위해서, Fig.8의 격자($T_b=20\text{pulse}$)에서 T_a 값을 1/4 주기(5pulse)씩 증가시키는 방법으로 4번 위상이송시켜 Fig. 10과 같은 광강도분포를 얻었다.

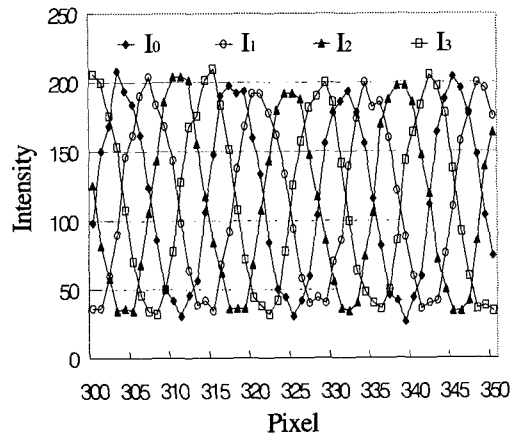


Fig. 10 Four-bucket intensity

이렇게 위상이송하면 한 개의 CCD 픽셀에서 4개의 광강도값이 얻어지는데, 위상이송량이 0, 1/4 주기, 2/4주기, 3/4주기에서의 광강도값을 각각 I_0 , I_1 , I_2 , I_3 라고 하면, 식(1)에 표시된 4버킷

(four-bucket)알고리즘^[11]에 의해서 위상이송 0일 때 격자에 대한 위상값 ϕ 이 Fig. 11과 같이 구해진다.

$$\phi = \tan^{-1} \frac{I_1 - I_3}{I_0 - I_2} \quad (1)$$

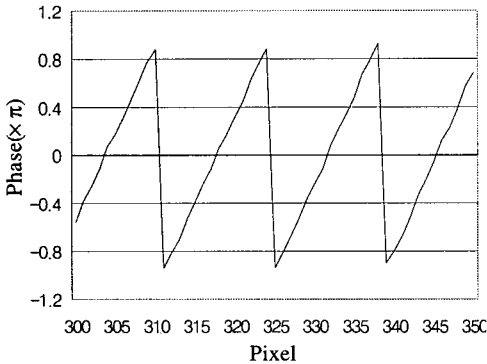


Fig. 11 Measured phase of screen

Fig. 11에 표시된 위상값은 스크린의 형상정보를 가지게 되는데, 이를 참조위상(reference phase)이라 하고, 스크린 대신에 삼차원형상을 가진 측정물에 대해서 같은 방법으로 위상을 측정하여 이를 물체위상(object phase)이라 하면, 이들 두 위상의 차이값(moire phase)은 스크린면을 기준으로 하는 높이정보를 가지게 되어 삼차원형상 측정이 가능하게 된다.^[16] 이에 대한 구체적인 과정은 차기 논문에서 기술될 예정이다.

3. 결론

본 논문에서는 광학식 비접촉 3차원 형상 측정 방법으로 많이 연구되고 있는 위상천이 모아레법과 PMP법에 적용될 수 있는 직선줄무늬격자 영사장치 개발이 제안되었다. 이 장치에서는 50mW의 레이저 다이오드와 로드렌즈를 이용하여 슬릿빔을 만들었고, 회전다면경의 회전과 동기를 맞추어 레이저 다이오드를 On/Off함으로써 격자의 주기조정과 위상이송을 구현하였다. 다수의 렌즈를 이용하고 있는

기존의 영사광학계에 비해서 기구적으로 단순한 구조를 가지고 있으며, 크기와 무게도 대폭 축소되었으며, 적절한 격자의 주기가 사용되면 정현파에 가까운 광강도분포가 얻어질 수 있음을 보였다.

후 기

본 논문은 선문대학교의 공조기술연구센터의 연구비지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

1. Y.Sato, H.K. Itagama and H.Futita, "Shape measurement of curved object using multiple slit-ray projection," IEEE Tans. on Pat. Anal. and Mech. Intel., Vol. PAMI-4, pp. 641-646, 1982.
2. S.J. Joo, "Three-dimesional geometric data acquisition and surface recognition using structured light system," M.S.Thesis, KAIST, 1990.
3. K. Sato and S. Inokuchi, "Range-imaging system utilizing nematic liquid crystal mask," IEEE First Intl. Conf. on Computer Vision, pp. 657-661, 1987.
4. R.L. Keizer, H.S Jun and S.M. Dunn, "Structured light : theory and practice," Proc. of SPIE, Vol. 1406, pp. 88-97, 1991.
5. H.jun, P. DeCosta and S.M. Dunn, "Body surface area measurement with structured light," 91 Northeast Bioengineering Conf., pp. 95-96, 1991.
6. W.Y KIm, "Range data analysis using cross-strip structured light system," SPIE Vol.1385 optics, illumination, and Image Sensing from machine Vision, pp. 216-228, 1990.
7. 김승우, 박현구, 최이배, 김문상, "93 대전엑스포 꿈돌이 조각가 로봇의 인물형상측정시스템," 대한기계학회논문집, 19권 3호, pp. 1999-2000, 1995.
8. 김승우, 최이배, 정문식, 오정택, "위상천이격자를 이용한 영사식모아레," 한국정밀공학회 논문

- 문집, 22권 5호, pp. 850-857, 1998.
9. H. Takasaki, "Moire topography," *App. Opt.*, Vol. 152, pp. 875-850, 1973.
 10. M.idesawa, T.Yatagai, and T. Soma, "Scanning moire method and automatic measurement of 3-D shape," *Appl. opt.*, Vol. 16, pp. 2152-2162, 1977.
 11. K. Creath, "Phase-Measurement Interferometry Technigues," *Progress in Optics Vol. 26*, pp. 349-398, 1988.
 12. M. Kusawinska, "Use of phase-stepping automatic fringe analysis in moire interferometry," *App. opt.* Vol. 26, No. 22, pp. 4712-4714, 1987.
 13. T.Matsumoto, Y.Kitagawa, T.Minetomo, "Sensitivity-variable moiré topography with a phase shift method," *Optical Eng.*, Vol. 35, No. 6, pp. 1754-1760, 1996.
 14. J.L Li, H.J Su, X.Y Su, "Tow-frequency grating used in phase-measuring profilometry," *Appl. Opt.*, Vol. 36, No. 1, pp. 277-280, 1997.
 15. Y.B Choi, "Phase-shifting Moire topography for precision measurement of 3-D profiles," Ph.D.Thesis, KAIST, 1998.
 16. 정경민, 박윤창, 박경근, "평행광축에서의 위상 측정형상측정법에 관한 연구," *한국정밀공학회지*, 17권 6호, pp. 210-217, 2000.