韓國精密工學會 '95年度 春季學術大會論文集 pp.408~413

광링식 3차원 형상 측정법에 관한 연구

Study of 3-dimensional measurment of object shape by optical ring method

朴 正 煥* · 姜 永 準
Park Jung-Hwan Kang, Young-June
(全北大學校 大學院) (全北大學校)

ABSTRACT

Nowadays, manufacturing system is trending toward integrated circumstance by helping of CAD/CAM/CAT. To use this system effectively, it is necessary to get exact 3_dimensional surface data of an object. We have been using contact method to measure 3_dimensional object profile. But this method has demerit of leaving scrach or small distortion on the object. To improve this, a non-contact measuring method using optical system is adopted. In this paper, We propose optical ring method. With this system, We could measure displacement of the object in the range of 45mm having 150μm resolution with no scratch or distortion.

1. 서론

금형가공용 System의 구성은 일반적으로 3차원 곡면 가공용 CAD/CAM System과 3차원 형상측정 System을 조합한 통합적 System으로 되어가고 있으며 System의 효과적인 사용을 위해서는 제품모형의 자유곡면에 대한 정확한 3차원 점Data가 필요하다. 물체의 형상을 측정하는 데에는 접촉식 3차원 좌표측정기가 사용되고 있는데, 이 측정법은 Probe의 접촉에 의해 물체를 측정하기때문에 피측정면이 손상을 받기 쉽고 센서를 측정물에 직접 접촉할 수없는 경우 측정이 불가능하다. 이러한 결점을 보완하기 위해 광학적인 방법을 이용한 비접촉 측정법이 활발히 연구되고 있다. 국내에서는 몇가지 방법이 접촉식 측정법의 결점을 보완하면서 실용화 단계에 와있지만 이 방법도 결점이 있다. 예컨데 3각측량법에서는 피측정물의 형상에 따라서는 반사광이 피측정물에 차단되어 측정불가능한 경우가 있다(Shadow Effect) 또 측정량과 피측정면의 좌표값 사이에 선형성이 성립하지 않는다. 선형성이 성립하지 않으면 오차의 범위가 변화해서 측정정밀도가 변화하므로 바람직하지 않다. 또한 급경사면이면 측정이 곤란한 것등이 어려운 점으로 남아있다.
본연구에서는 측정범위및 정밀도가 좋고, 전술한 결점을 보완하기 위한 형상측정법에 대해서 연구하고자 한다. 본시스템에서는 피측정 물체의 측정지점에 레이저광을 비춘어 산란된 광을 광학계를 통과시켜 광링을 만든후 이 광링을 CCD카메라에 받아 이 영상정보를 해석하므로서 물체의 변위를 구하였다. 본실험에서는 이 측정방법에 관한 이론해석과 측정실험을 통하여 그 유효성을 검토하고 계측시스템의 정밀도 향상을 도모하였다.

2. 기본 원리

2 - 1 측정원리

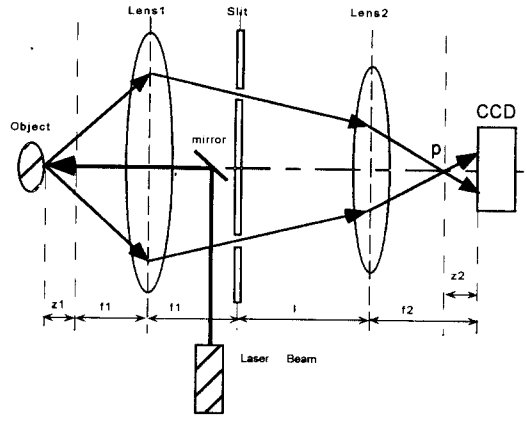


Fig.1 Principles of Measuring System

렌즈 1과 2는 각각 촛점 거리 f1, f2이고 간격d(=f1+1)만큼 떨어져 있다. 렌즈2뒤 f2 지점에는 CCD카메라가 놓여 있다. 렌즈1과 2 사이에는 원형슬릿을 놓아 광은 이 슬릿을 통과하여 링 모양으로 ccd카메라 센서상에 나타난다.
실험에 사용한 광원은 출력 5.0mW의 He-Ne 레이저로서 레이저빔의 반경은 0.82mm이다. 레이저빔은 Mirror에 의하여 방향을 바꾸어 렌즈1의 중앙를 통해 피측정면에 조사된다. 피측정면에서 반사산란된 광은 렌즈1에 의해 원판모양으로 집광된후 원형슬릿을 통과하면서 링모양을 형성하게 되고 이것이 렌즈 2를 통해 집광되어 CCD카메라 센서상에 임의의 반경을 가진 링모양으로 나타나게 된다. 또한 광학계의 초기 설정에 의하여 렌즈1의 촛점거리로 부터 피측정면과의 거리 Z1과 CCD센서에 나타나는 광링의 반경 r 사이에는 선형관계가 성립하고 그 비례상수는 두 렌즈의 촛점거리와 슬릿의 폭 a에 따라 결정된다. 그러므로 광링 r의 크기를 알면 변위 Z1을 구할수 있다. P점의 위치에 따라 CCD카메라에 맺히는 광링의 크기도 특정한 값을 가지게 되므로 화상처리기법을 통하여 광링의 반경 r이 계산되면 피측정면의 변위 Z1을 알수있게된다.

2 - 2 광링반경 r과 변위 Z1의 관계및 결상 조건

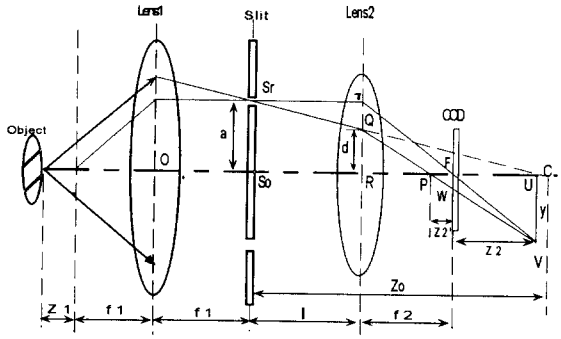


Fig.2 Geometrical Relationship Between Z_1 and r

렌즈2가 없는 경우 반사산란한 광이 렌즈1에 의해 집광되어 결상하는 점을 C , C 점의 변위를 Zo'라 하면 렌즈1의 전후의 변위와 촛점거리의 관계는,

$$Z_o = f_1^2 / Z_1 \qquad (1)$$

슬릿의 반경을 a라 할때, 렌즈1을 통과후 슬릿을 통해 렌즈2에 입사되는 반사광의 spot반경을 d' 라하면
△SrSoC ~ △QRC 에 의해,

$$d' = a(Z_o - l)/Z_o \qquad (2)$$

위 두식으로 부터,

$$d' = a - (al/f_1^2) * Z_1$$

의 관계가 성립한다. (3)
또, 렌즈2 전후의 변위와 촛점거리 관계는,

$(l - f_2)Z_2 = f_2^2$ 이며,

△TRF~△VUF에의해, $y/a = Z_2/f_2$ (4)

△QRP~△VUP에의해, $y/d' = (Z_2' + Z_2)/(f_2 - Z_2')$ (5)

△QRP~△WFP 에 의해, $r/d' = Z_2'/(f_2 - Z_2')$ (6)

위 식들로 부터 $a*f_2 = r*l + f_2*d'$ 가 되고, 결국 광링의 반경 r은,

$$r = \frac{a * f_2}{f_1^2} Z_1 \qquad (7)$$

이때, 광링의 반경 r과 물체의 변위 Z_1의 범위를 살펴보면,

물체의 변위가 0 일때 광링은 그 반경이 최소가 되어 CCD센서상에 촛점을 맺게 되며, Lens1을 통과한 반사산란광은 Lens2에 입사되기전에 결상되지 않아야하므로,

$0 < Z_1$, $Z_o > f_2$ 즉,

$$0 < Z_1 < f_1^2/f_2 \qquad (8)$$

광링의 반경은 CCD센서가 감지할수 있도록 0보다는 커야하고, 그 최대 크기는 CCD 센서의 범위를 벗어나면 아니되므로,

0mm < r < 2.4mm 와 같이 된다.

이때, 0mm < Z_1 < 48mm (9)

본 광학계는 아래와 같이 설정되었다.

f_1 = 150 mm, f_2 = 70 mm, a = 16 mm, l = 75 mm

위 값에 따라, 앞서 유도된 식으로 부터,

링의반경 $r = 4.89 * 10^{-2} * Z_1$ mm (10)

측정범위 0 mm < Z_1 < 48 mm 가 된다. (11)

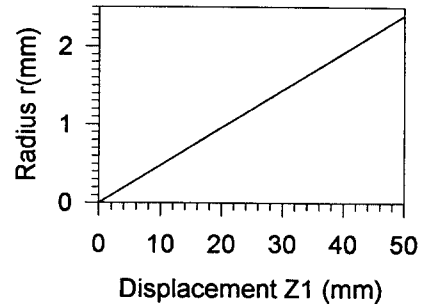


Fig.3 Relationship Between Z1 and r

3 화상데이타 처리 방법

3-1 CCD 센서및 MONITOR상 광링간의 화상정보흐름

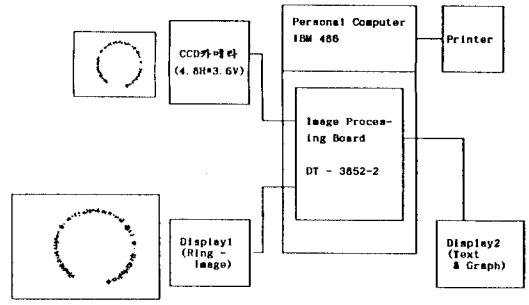


Fig.4 FLOW OF IMAGE DATA

3 - 2 광링의 휘도 분포

산란한후 렌즈1에 의해 모아진 광은 원형Slit으로 입사하게 되는데, Slit을 통과한후 나타나는 광의 휘도는 정규분포형태이고 슬릿폭 중앙부에서 최대값을 가지게 된다. 다음 그림은 실제로 폭 0.2mm의 슬릿을 통한 광링을 CCD카메라로 촬 한후 고주파 잡음을 제거한 광링의 휘도분포이다.

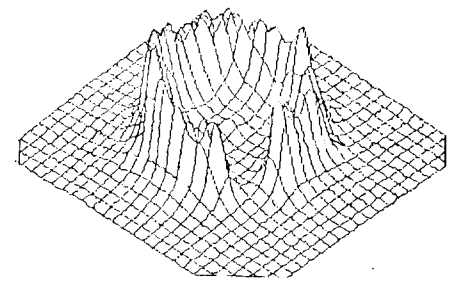


Fig.5 3-Dimensional Distribution of Ring's Intensity

3-3 최대 휘도 위치의 검출 및 보정

광링원주상의 최고 휘도점을 검출하기 위해서 아래와 같이 광링의 중심부로 부터 반경방향으로 추적하여 원주상의 최고 휘도점을 검출한다. 본 시스템에서는 최고 24개의 프로그랩스캐너를 사용하여 검출하였다. 스캐너의 수가 많을수록 원의 반경은 더욱 정밀하게 나타난다.

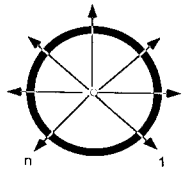


Fig.6 Program Scaner

아래 그림은 물체의 임의의 변위에 대해 나타나는 광링을 위의 방식으로 추적한 결과의 반경방향의 휘도분포이다.

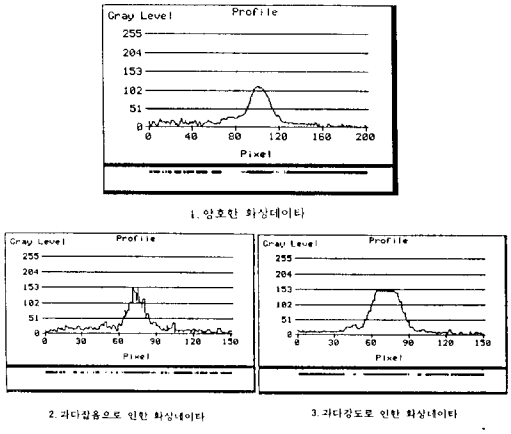


Fig.7 Intensity Distribution

그림에서 보듯이 Slit을 통한 광의 Slit중심부로부터의 정상적 휘도분포 곡선과는 차이가 난다. 이는 화상에 Random한 노이즈가 들어가 불규칙성이 증대했기 때문이다. 이는 또한 시스템에서 채택하는 Slit에 의한 영향도 큰데 이에 대해서는 뒤에서 언급하겠다. 위 DATA중 1번같은 경우는 양호한 경우지만 2번,3번 같은 경우는 최고휘도점에 대한 정확성이 다소 문제가 된다. 그래서 다음과 같이 고주파 잡음을 제거하는 일반적인 3 * 3 평활화필터를 채택하여 검출된 휘도값을 Scan Line을 중심으로 평활화시켜 노이즈를 제거하여보았다.

평활화 처리를한 데이타는 잡음이 제거된 양호한 값을 갖게 되지만 실험에서 얻어진 상당수의 휘도 데이타들은 최대치를 중심으로 정확한 정규분포를 이루지 못하고 한쪽으로 치우쳐 나타나는 경향이 있다. 또 슬릿을 통과하는 빛의 강도가 너무 강해 휘도분포가 삼각형 모양으로 분포하지 않고 사다리꼴 형태로 나타나는 경우도 있다. 이때 최대 휘도치가 나타나는 부분을 중심이라고 생각하여 원의 최소자승법에 적용하면 개개의 중심값들은 구해진 회귀원에 대해 큰 편차를 가지게 되고 실제로 물체의 변위 측정에 있어서 안정적인 값을 얻기가 힘들어진다.

이를 보강하기 위하여 최대휘도치뿐만아니라 최대휘도치에서 일정한 범위의 휘도치들까지 고려해서 다음과 같이 이 부분의 도심을 구해 이 값을 중심으로 한다. 본 실험에서는 최고휘도치로부터 30%되는 지점까지의 휘도치들도 고려해 도심을 구하였다. 범위를 10%보다 작게하면 데이타 교정의 효과가 작게 나타났고 20 - 40 % 사이값이 양호하게 나타났다.

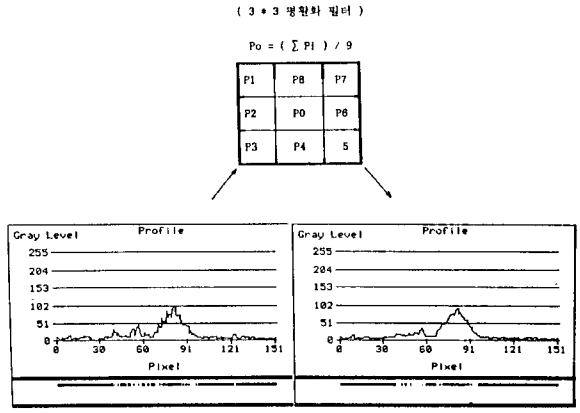
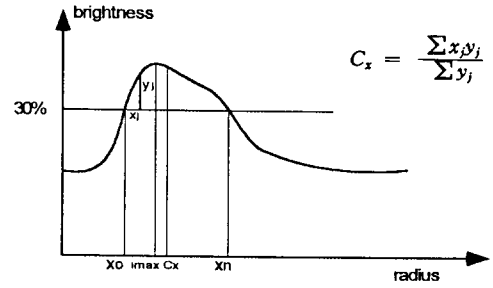
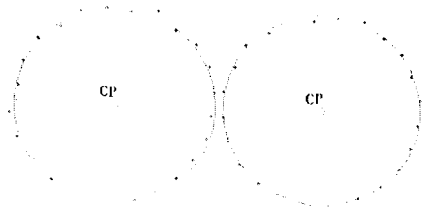


Fig.8 Removing Noises Using The Filter





C_P x: 317.1 y: 244.2 C_P x: 318.3 y: 242.6
S_D: 3.09 S_D: 2.30

[최고휘도점을 중심이라고 생각한 경우] [30%범위를 고려한 경우]

Fig.9 Data Correction

그림에서 보는바와 같이 데이타 교정전에는 중심점 분포가 산만하여 편차가 크나, 위의 방법으로 교정된 중심값의 분포는 회귀원과 근사하게 일치하고 편차도 상대적으로 작게 나타난다.

다음은 위의 DATA보정방법을 적용하여 광링을 가로지르는 한 Scan Line에 대한 검출결과를 2차원그래프로 보여주는 것이다.

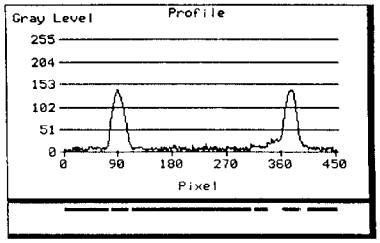
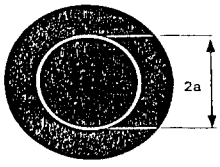


Fig. 10 INTENSITY PROFILE ON A SCAN LINE

3-4 Slit폭의 결정

본 System에 있어서 원형 Slit은 측정정도및 분해능에 있어서 지대한 영향을 끼친다. Slit의 반경이 커질수록 분해능은 좋아지나 측정물체의 측정범위는 상대적으로 작아진다. 본 시스템에서는 측정범위가 50㎜에 근접하고 분해능도 200㎛보다 좋게하기 위해 Slit반경을 16㎜로 택하였다. 또, 광점위치를 결정할때 Slit폭이 너무 넓으면 CCD센서에 조사되는 광의 면적이 크게 되어 Peak위치가 불량하게 나온다. 또 Slit폭이 너무 좁아지면 광의 강도가 지나치게 약해져 변위 Z1이 클때와 측정면이 급경사일 때 반사산란광의 강도가 약해져 환경광의 영향이 커지므로 Error의 확률이 높아진다. 이러한 사항들을 고려해 볼때 본시스템에 알맞는 최적의 Slit폭을 결정하기 위하여 여러개의 Slit폭에 대하여 동일강도광하에서 실험을 행하였다.(범위 0.1 - 1.0)



반 경 (㎜)	Width (㎜)
16	1.0
16	0.6
16	0.3
16	0.1

Fig.11 Slit Width

물체의 경사각 45· 변위 Z1 = 20㎜ 로 했을때 면상의 한점에 Laser광을 조사하여 Slit폭의 변화에 따른 광의 강도 분포를 관찰했다.

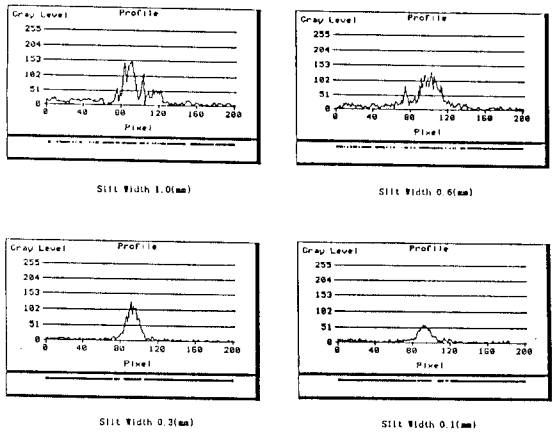


Fig. 12 Intensity Profile Depending on Slit Width

실험에서 보듯이 slit폭이 0.1 - 0.3 에서는 peak위치 부근이 예리하게 분포되어 있는데 그 이상으로 커지면 peak치 근방의 산이 여러개의 피크치를 가지는 난잡한 모양이나 혹은 일직선이 되어 버려 강도가 강한 부분이 꼭 광점의 중앙 위치라고는 생각할 수 없다. 실험상으로 Slit폭이 작을 수록 데이타 검출은 양호하게 나타났으나 Slit폭이 너무 작으면 물체의 경사각이 커졌을때 반사산란광의 강도가 지나치게 작아져 데이타 검출이 불가능하므로 본 System에서는 Slit폭을 0.2㎜로 택하였다..

4. 원의 최소 자승법

변위 Z1에 대해서 CCD센서 상에는 광링이 나타나게 되고 이 신호가 화상처리장치를 통하여 모니터 1 에 나타나는데 이 광링은 CCD센서상에 맺히는 광링의 크기에 비례해서 크기가 결정되므로 본실험에서는 모니터상의 광링의 반경을 구하므로서 CCD센서 상의 광링반경을 추정할 수 있고 이 반경의 변화에 따른 변위 Z1도 구할수가 있다. 이제 모니터 1 에 나타난 광링의 반경을 구하기 위해 다음과 같이 원의 최소자승법을 생각해보자.

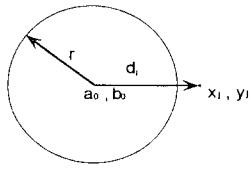


Fig. 13 Least Square Method of Circle

본시스템에서는 모니터 1상의 광링에 대하여 광링의 중심부에서부터 반경방향으로 추적하여 광링상의 최대휘도를 가지는 지점(화면좌표)을 N Point 검출한다. 이 Point들은 광링의 최고 휘도치로부터 검출된것이기 때문에 circle형태로 배치되는데, 이 점들을 가지고 최소자승법을 이용하여 광링의 반경 r을 구해낼 수 있다. 구하고자 하는 CCD센서에 맺힌 광링의 반경을 r, 중심을 a_0 , b_0 라고 생각하면,

원의방정식은, $(x - a_0)^2 + (y - b_0)^2 = r^2$ (12)

이제 모니터에 나타난 광링의 추정중심 a_0 , b_0 에서 원주상 최대휘도점 x_j , y_j 까지의 거리는,

$$d_j = \sqrt{(x_j - a_0)^2 + (y_j - b_0)^2} \quad (13)$$

이때, $\sum (d_j - r)^2$ 가 최소로 되도록 r , a_0, b_0 를 결정하면 된다.

$d_j > 0$, $r > 0$ 인 양의 정수이므로,

$\sum (d_j^2 - r^2)^2$ 이 최소가 될때 $\sum (d_j - r)^2$ 도 최소가 된다. 계산상 편의를 위해 최대 휘도점들을 평균값에 대해 평행 이동시켜 보면,

$x_k = x_j - m_x$, $y_k = y_j - m_y$ 로하면 (m_x , m_y 는 각각 x_j , y_j 의평균), $a = a_0 - m_x$, $b = b_0 - m_y$ (14)

$\sum x_k = 0$, $\sum y_k = 0$ (j=0,1,..n-1:k=0,1,..n-1)

이제, $P_j = (d_j^2 - r^2)^2$ 로 놓으면

$$= ((x_j - a_0)^2 + (y_j - b_0)^2 - r^2)^2, \quad (15)$$

$$P_k = ((x_k - a)^2 + (y_k - b)^2 - r^2)^2 \quad (16)$$

이 되고, $\sum P_k$ 가 최소로 될때 $\sum(d_j^2 - r^2)^2$ 도 최소가 된다.

$\sum P_k$ 가 최소가 되려면,

$$\frac{\partial \sum_{k=1}^{n} P_k}{\partial a} = 0, \quad \frac{\partial \sum_{k=1}^{n} P_k}{\partial b} = 0, \quad \frac{\partial \sum_{k=1}^{n} P_k}{\partial r} = 0 \quad (17)$$

연립방정식을 풀어보면,

$$a = \frac{(\sum x_k^3 + \sum y_k^2 x_k)\sum y_k^2 - (\sum y_k^3 + \sum x_k^2 y_k)\sum x_k y_k}{2(\sum x_k^2 \sum y_k^2 - (\sum x_k y_k)^2)} \quad (18)$$

$$b = \frac{(\sum x_k^3 + \sum y_k^2 x_k)\sum x_k y_k - (\sum y_k^3 + \sum x_k^2 y_k)\sum x_k^2}{2(\sum x_k^2 \sum y_k^2 - (\sum x_k y_k)^2)} \quad (19)$$

$$r = \sqrt{\frac{1}{n}(\sum x_k^2 + \sum y_k^2) + a^2 + b^2} \quad (20)$$

여기에서원의중점은, $a_0 = a + m_x$, $b_0 = b + m_y$ (21)

5. 실험 및 고찰

5 - 1 변위 Z1과 광링의 반경R 사이의 실험적 관계규명및 관계식 설정

모니터1 상에 나타나는 광링의 반경 R과 물체의 변위 사이에 이론식과 같은 선형성이 있는지를 확인하기 위하여 물체의 변위를 0 - 50㎜까지 변화시키면서 광링 반경의 변화를 살펴보았다.
실제 실험 결과 물체의 변위가 5㎜이하가 되면 산란한 광이 링 모양으로 형성되지 않고 Spot 형태에 가까와져 Data검출이 어렵게 되고 변위가 45㎜이상으로 커지면 광링의 강도가 약해져 프로그램 스케너에 의해 검출되는 Data의 갯수가 작아 정확한 측정이 힘들어진다. 이에 따라 물체의 최소변위는 5㎜로 하고 최대변위를 45㎜로 하여 Data를 검출한 결과 변위 Z1과 광링의 반경 R사이에는 양호한 선형성 관계가 있음을 확인할 수 있었고, 각 Data들의 Error율을 최소로하는 실험식은,

Z1 = 0.170897 * R - 0.469874 가 된다.

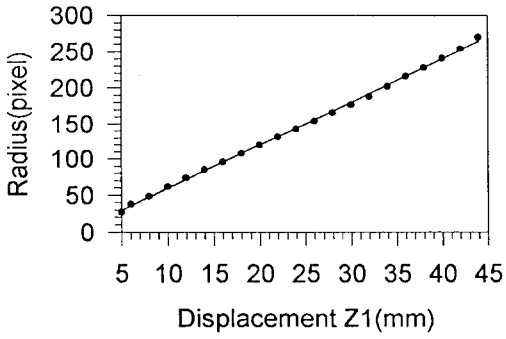


Fig. 14 **Relationship Between R and Z1**

5 - 2 시료 및 측정 방법

5 - 2 - 1 변위측정용 시료

재질 : 석 고
조도 : 최대변위 10㎛
외형

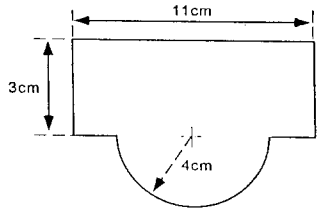


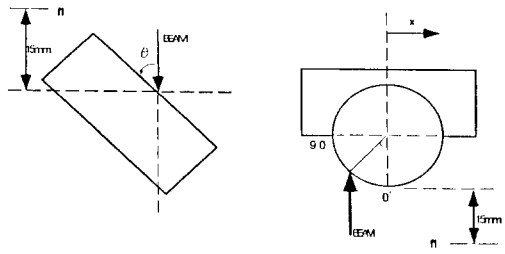
Fig. 15 Dimension of The Object

5 - 2 - 2 측정 방법

가) 경사면 측정 : Object의 측정면을 Lens1의 촛점거리에서 15mm에 일정하게 놓고 경사각을 증가 시키면서 측정하였다.

나) 원통면측정 : 레이저 빔이 Object의 원통면에 수직으로 입사되는 점을 0도로 하여 90도까지 변화 시키면서 측정하였다.

라)측정환경 : 측정 실험은 암실에서 행하였고 광학테이블상에서 실시하였으며, 측정시 실내온도는 섭씨 18도이었다.



[Measuring a Gradient Surface] [Measuring a Cylinder Surface]

fig. 16 Measuring Method

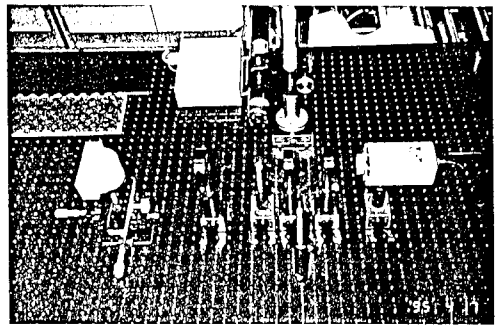
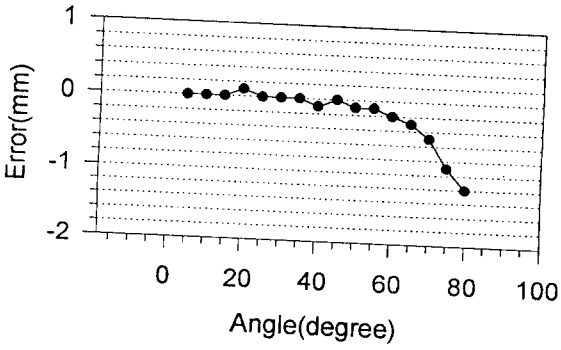


fig. 17 Photograph of The Optical Instrument

5 - 3 측정 결과

실험결과 본시스템의 최대측정범위는 45mm, 분해능 150μm를 나타냈고, 경사면 측정에서 경사각 65도이하에서는 최대 오차가 300μm이하로 양호하게 나타났다. 이각도를 벗어나면서부터는 오차가 크게 증대 되며, 경사각 80도 이상이 되면 측정이 어려운 것으로 나타났다. 원통면 측정 결과도 마찬가지로 오차가 100μm 를 크게 벗어나지 않으면서 측정할 수 있는 경사각은 50도 정도로 나타났다. 이 각도를 넘어서 최대한 80도 까지도 측정이 가능하나 측정오차가 300μm이상으로 커져버린다. 실험 도중 발생하는 오차는 수작업으로인한 오차, 렌즈의 수차및 잡음광의 침투등으로 인한 오차로 생각된다. 특히 물체의 변위와 광링의 반경간에 성립하는 선형성을 유지하기 위해서는 실험 초기에 레이저빔이 평행경로를 유지할수 있도록 광축설정을 정확하게 해야 하겠다.

Fig. 18 **Error Profile of Gradient Surface**



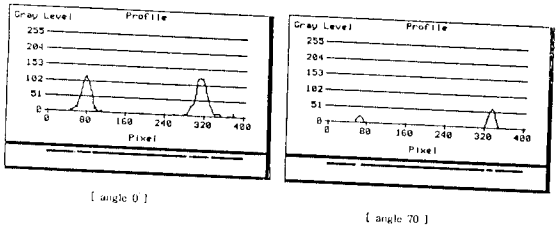
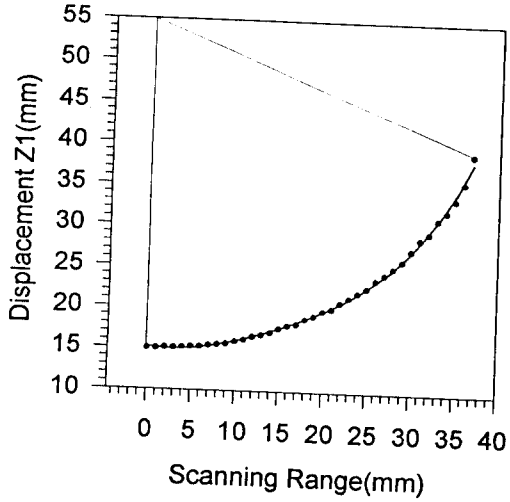


Fig. 19 Intensity Profile Depending on Degree

Measuring Result Of Cylinder

Fig. 20



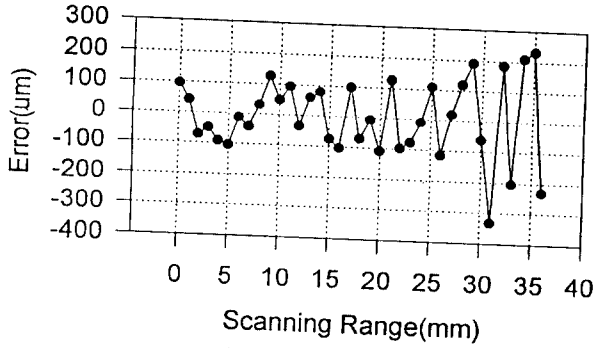


Fig. 21 Error Profile

6. 참고 문헌

[1] Donald C. O'Shea, W. Russell Callen and Willian T. Rhodes, "Introduction To Lasers and Their Application", Addison-Wesley, (1978)

[2] 李聖哲 , 精密計測工學 , 東明社 , 1991 , pp 47 - 53

[3] 이문호 , 퍼스컴을 이용한 화상처리 , 技多利 , 1992, pp 249 - 254

[4] J. Wilson, J.F.B. Hawkes, "Lasers Principles and Applications", Prentice Hall,(1987)

[5] George schaffer, "Machine Vision : A Sense of CIM", American Machinist, Special Report 767, pp 101 - 120 (June 1984)

[6] A. Rosenfeld and A.c.kak; Digital Picture Processing(2nd ed.) Academic Press,1982

[7] Max Born, Emil Wolf, "Principles of Optics", Maxwell Macmillan (1980)

[8] 南茂夫 , 科學計測の ための 波形テータ處理, CQ 出版社 pp 122 - 133, 1986

[9] 南茂夫 , 科學計測の ための 畵像テータ處理, CQ 出版社 pp 106 - 117, 1994