

광촉침법에 의한 비접촉 3차원 형상측정에 관한 연구

강 영 준,* 신 성 국,** 三好隆志***

A Study on Non-contact Measurement of 3D-Objects by Optical Probe Method

Young-June Kang,* Seong-Kook Shin,** Takashi Miyoshi***

ABSTRACT

This paper presents a non-contact measuring system using one point measuring method to measure surface profiles of dies and clay models for practical use in the field of production engineering. The system has a laser beam probe similar to a measuring probe in a contact measuring system and CCD linear image sensor used to detect 300mm measurement range, displacement of measured surfaces, from an origin. There is no mechanical interference between this measuring system and a measured surface in this system.

In this measuring system, it was needed 500-600ms including data processing time to measure one point. The experiments showed that the standard deviation was 800 μm and the reproducibility was also 100-210 μm.

Key words : Optical probe(광촉침), Non-contact measuring system(비접촉 측정시스템), Surface profiles(표면형상), One point measuring method, CCD linear image sensor

1. 서 론

산업이 발달하고 소비자의 요구가 다양해짐에 따라 다품종 소량생산방식이 증가하고 제품의 수명주기가 짧아지고 있다. 이와 함께 각양각색의 기계부품이 사용되고 있으며, 외관이나 기능적 측면에서 자유곡면(Sculptured Surface)을 지닌 기계부품이 많이 사용되고 있

다. 특히 자동차, 사무기기, 가전제품 등의 외형과 부품의 대부분은 3차원 곡면으로 구성되어 있어서 설계도면만으로는 그 미묘한 곡면형상을 파악하는 것이 곤란하여 모형(Clay Model)을 제작하는 경우가 많이 있다.^{(1),(2)}

현재 Clay Model을 디지털타이징(Digitizing)함에 있어서 주로 접촉식인 3차원 측정기를 사용하는 것이

* 전북대학교 기계설계학과

** 전북대학교 대학원 기계설계학과

*** 오사카대학 산업기계공학과

일반적인 방법⁽³⁾이다. 그러나 접촉식의 Probe를 지닌 3차원 측정기는 기계부품의 형상이 복잡해짐에 따라 측정하는데 매우 많은 시간이 소요되고, 형상의 특성에 따른 Probe의 보정이 필요하며, Clay재가 유연한 재료에 손상을 입힐 수 있다.⁽⁴⁾ 또한 조작이 복잡해서 사용하기 어려운 점 등의 문제로 생산성 향상에 병목적 장애로 나타나고 있어서 비접촉 형상측정기의 개발이 요망되고 있다.⁽⁵⁾

따라서 본 연구에서는 상기의 문제점을 해결하기 위하여 광측침(Optical Probe)법⁽⁶⁾을 사용하였다. 피측정면의 경사각과 환경광의 영향하에서도 고분해능(Full Scale비 0.1%이하)을 지니며, Shadow효과도 없고, 측정범위가 300mm로 넓어서 일반적인 제품등은 변위 방향으로의 이동없이도 측정이 가능한 비접촉 3차원 형상측정법^{(7),(8)}을 제안하고, 그 유효성에 대하여 검토한다.

2. 측정원리와 이론해석

Fig 1은 본 연구의 측정원리를 나타낸 개략도이다. 렌즈(Lens) 1과 렌즈 2는 각각 초점거리 f_1, f_2 의 비구면 렌즈이고, 간격 $d(=f_1+f_2)$ 만큼 떨어진 곳에 설치되어 있다. 렌즈 3은 초점거리 f_3 로 렌즈 2의 뒤 쪽 f_2+f_3 의 위치에 놓이고, 그보다 더 뒤 쪽에는 l_0 만큼 떨어진 곳에 CCD Linear Image Sensor가 놓인다. 렌즈 3의 직후에는 Fig 2에 나타낸 것과 같은 Mask가 설치되어 있어 Laser광은 Slit만을 통과하여 CCD Sensor 상에 이른다.

Laser광은 거울에 의하여 방향이 바뀌어 렌즈 1의 중앙을 통하여 피측정면에 조사된다. 반사산란광은 렌즈 1과 렌즈 2에 의하여 집광되어 렌즈 2의 뒤 쪽의 P점에 결상하는데, 이 때 $d \neq f_1+f_2$ 라고 가정하면,

i) $z_2 > 0$ 인 경우(결상점 P가 렌즈 2의 초점거리내

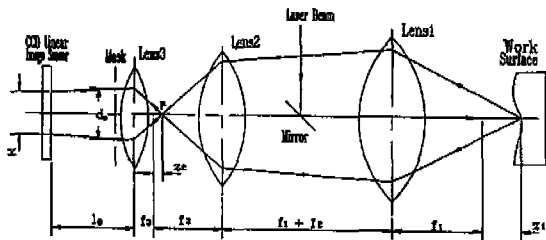


Fig. 1 Principles of Measuring System

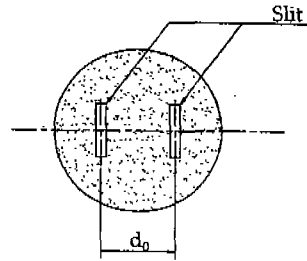


Fig. 2 Mask

에 있는 경우)

$$z_2 = \frac{f_2^2 \cdot z_1}{f_1^2 + (f_1 + f_2) \cdot z_1 - d \cdot z_1} \tag{1}$$

ii) $z_2 < 0$ 인 경우(결상점 P가 렌즈 2의 초점거리를 벗어난 경우)

$$z_2 = \frac{f_2^2 \cdot z_1}{f_1^2 - (f_1 + f_2) \cdot z_1 - d \cdot z_1} \tag{2}$$

여기서 식 (1)과 식 (2) 모두에서 $d=f_1+f_2$ 로 놓으면, 양 식은 똑같이

$$z_2 = z_1 \cdot \left[\frac{f_2}{f_1} \right]^2 \tag{3}$$

로 표현된다. 식 (3)은 렌즈간 거리를 2개의 렌즈의 초점거리의 합이 되도록 광학계를 설정하면, 변위 z_1 과 z_2 사이에는 선형관계가 성립하고, 그 비례상수는 초점거리의 비의 제곱과 같다는 것을 의미한다. 따라서 P점의 변위를 알면 변위 z_1 을 구할 수가 있다.

이 관계가 성립하기 위한 결상조건은

$$-f_1 < z_1 < \frac{f_1^2}{f_2} \tag{4}$$

과 같이 결정되며, 이 식은 본 형상측정법의 측정범위를 결정하는 조건이 된다.

다음으로 P점의 변위를 알아내기 위하여 P점 뒤 쪽의 렌즈 3에 산란된 광을 모아서 Mask에 있는 2개의 Slit에 의해 2개의 광선으로 나누어 CCD Sensor에 입사시킨다. CCD Sensor상의 2개의 광점의 간격 x 와 P점의 변위 z_2 사이에는 앞의 i)과 ii)의 경우에 상관없이 모든 z_2 에 대하여 광학계 설정시 결정되는 다음의 함수관계가 성립한다.

$$x = \frac{d_0 \cdot (f_3^2 + f_3 \cdot z_2 - l_0 \cdot z_2)}{f_3 \cdot (f_3 + z_2)} \quad (5)$$

피측정면의 변위 z_1 과 결상점 P의 변위 z_2 와의 관계는 식 (3)과 같으므로, 식 (3)을 식 (5)에 대입하면, 다음과 같이 z_1 과 두 광점 간격 x 의 관계가 구해진다.

$$x = \frac{d_0 \left\{ \left[\frac{f_1 \cdot f_3}{f_2} \right]^2 + (f_3 - l_0) \cdot z_1 \right\}}{f_3 \cdot z_1 + \left[\frac{f_1 \cdot f_3}{f_2} \right]^2} \quad (6)$$

그러므로 CCD Sensor에 의하여 광점의 위치를 검출하여 그 간격 x 를 구하면 P점의 변위 z_2 가 구해지고 피측정면의 변위 z_1 을 구할 수 있다. 식 (6)에 있어서 f_1, f_2, f_3, l_0, d_0 은 모두 광학계 설정시에 결정되는 상수이므로, CCD Sensor에 의하여 광선의 조사위치를 검출하는 것에 따라 그 간격을 구할 수 있으며, 변위 z_1 을 산출하는 것이 가능하다.

CCD Sensor의 해상도를 Δx 라 하면, 본 형상측정법의 분해능 Δz_1 은 다음 식으로 표현된다.

$$\Delta z_1 = \frac{\Delta x \left\{ \left[\frac{f_1 \cdot f_3}{f_2} \right]^2 + f_3 \cdot z_1 \right\}}{d_0 \cdot l_0 \left[\frac{f_1 \cdot f_3}{f_2} \right]^2} \quad (7)$$

2개의 광점은 반드시 CCD Sensor상에 있어야 하므로, CCD Sensor의 길이를 L 로 하고, 두 광점의 최소 간격을 LD 라 하면

$$LD < x < L \quad (8)$$

이어야만 한다. 따라서 본 형상측정법의 측정범위는 식 (4)와 식 (8)로부터 구할 수 있다.

실제로 장치를 제작하는데 있어서 광학계를 어떻게 구성하느냐하는 것은 매우 중대한 문제이다. 본 형상측정 시스템의 목적은 Sensor를 고정시킨채로 큰 금형모형을 고분해능으로 고속측정하는 것이다. 그래서 목표치를 측정범위 300mm 이상, 분해능 Full Scale비 0.1% 이하로 정할 때, 측정범위는 상술한 식 (4), (6)과 (8)로부터, 분해능은 식 (7)을 이용하여 최적해를 몇 개 구한 결과, 실현가능한 것으로 아래와 같은 광학

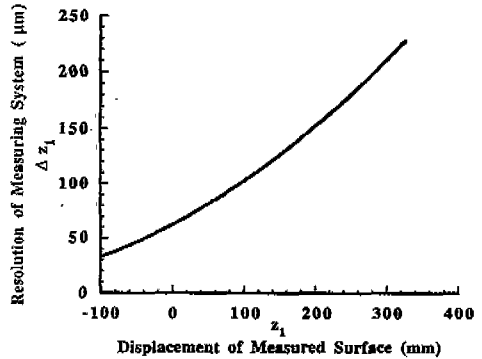


Fig. 3 Relationship between z_1 and Δz_1

계를 설정했다.

$$f_1 = 150mm, f_2 = 50mm, f_3 = 40mm, \\ l_0 = 90mm, d_0 = 20mm$$

이와 같은 값을 식 (6)과 식 (7)에 대입하면, 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$x = \frac{20 \cdot (360 - z_1)}{360 + z_1} (mm) \quad (9)$$

$$\Delta z_1 = \frac{7 \cdot (360 + z_1)^2}{14400} (\mu m) \quad (10)$$

(CCD Linear Image Sensor는 분해능 7 μm의 것을 사용했다.)

Fig. 3은 식 (10)의 관계를 그래프로 나타낸 것이다. 또한 측정범위는 식 (4)로부터

$$-150 < z_1 < 450 \quad (11)$$

로 표현된다. 다음으로 식 (8)에 식 (9)을 대입하고, LD는 두 광점의 간격이 가장 근접한 경우로 1mm, L은 CCD Linear Image Sensor의 길이, 35mm로 설정하면

$$1 < \frac{20 \cdot (360 - z_1)}{360 + z_1} < 35 (mm) \quad (12)$$

과 같이 표현되고, 이 식을 풀면

$$-98 < z_1 < 325 (mm) \quad (13)$$

이 된다. 측정범위는 식 (11)와 식 (13)로부터 CCD

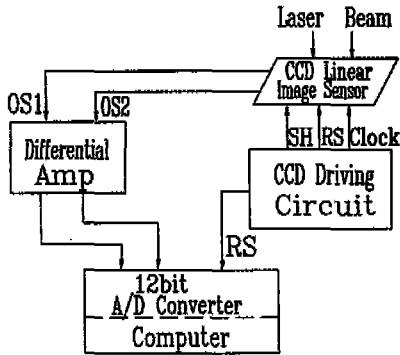


Fig. 4 Block Diagram of Signal Processing System

Sensor의 길이를 고려한 식 (13)으로 결정되며, 약 400mm정도가 된다. 정밀도는 피측정면이 렌즈 1으로부터 멀어질수록 나빠져 가는 경향이 있지만, Fig 3에서 알 수 있는 바와 같이 최저치를 취해도 230 μ m이고, Full Scale비가 0.1%이하로 되어 충분히 목표치를 만족할 수 있음을 알 수 있다.

3. 실험장치의 구성

실험장치는 5000개의 유효화소(7 μ m \times 7 μ m)를 지닌 CCD Linear Image Sensor와 그 Driving Circuit, A/D Converter와 He-Ne Laser 등으로 구성되며, 렌즈의 배열에 있어서 기하학적인 작용을 고려한 조합이 증시된다.

Fig 4는 본 형상측정장치의 신호처리에 대한 시스템의 구성도이다. CCD Sensor의 출력신호는 차동증폭기에 의하여 0~10V까지 증폭된 후 12bit A/D Converter에 입력된다. A/D변환된 Data는 Computer로 계산처리되어 필요에 따라 CCD Sensor상의 광의 강도 분포와 그 밖의 Data를 CRT 또는 Printer등에 출력하는 것이 가능하다.

Fig 5는 본 측정법의 Flow Chart를 나타낸 것이다. 고속측정을 하기 위해서는 가능한 한 Sampling시간을 짧게 하여야 하지만, 현단계에서는 최저 42 s/pixel이상은 필요한 것으로 나타났다. 이상을 근거로 자체 제작한 CCD Driving Circuit의 Timing Chart를 그리면 Fig 6과 같아서 CCD Sensor의 노광 시간은 최저 216.1ms 이상이 되어야 한다.

이러한 장치를 사용하여 Fig 7에 나타낸 것과 같은 실험장치를 구성하여 측정원리에서 논술한 바와 같이

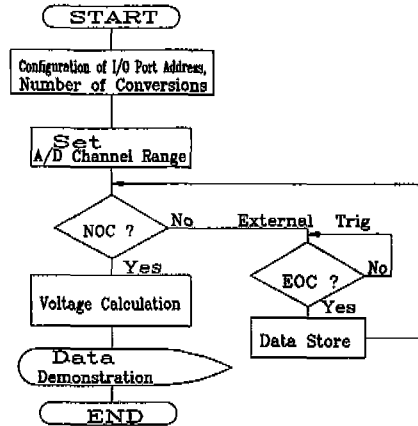


Fig. 5 Flow Chart of Data Accessing Program

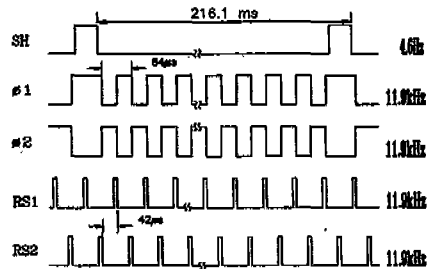


Fig. 6 Timing Chart of CCD Driving Circuit

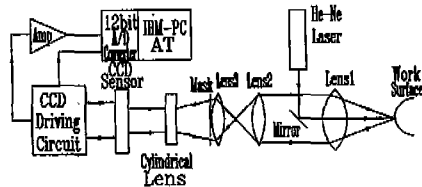


Fig. 7 Schematic Diagram of the System

CCD Sensor상의 2개 광점을 검출하고, 그 간격을 측정할 수 있다. Fig. 8는 피측정면을 광축에 대하여 평행이동시켰을 때의 CCD Sensor상의 광의 강도분포를 Printer로 출력한 것이다. 강도분포에는 예리한 Peak가 있고, 이 Peak의 위치가 광선이 닿는 점이다. 또한 이 2개의 Peak 위치의 간격은 Fig 8의 (a)에서와 같이 피측정면이 렌즈 1에 가까우면 넓게 되고, Fig 8(b)와 같이 멀어질수록 좁게 되어 식 (9)와도 일치된다.

실제로 형상측정 시스템을 제작하는데 있어서 본 시스템의 측정정도 향상에 있어 중요한 역할을 하는

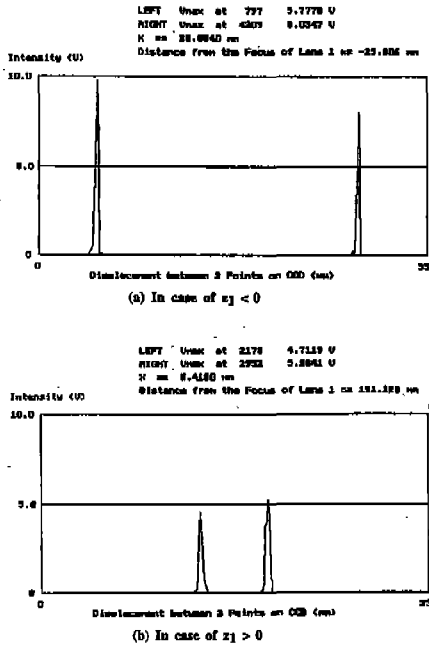


Fig. 8 Intensity Distributions on CCD Sensor

Mask에 장치되는 Slit에 대하여 검토할 필요가 있다. CCD Sensor를 사용하여 2개의 광점위치를 검출하는 경우, Slit의 폭을 넓게 하면 CCD Sensor상에 조사되는 광의 면적이 크게 되어 Peak위치를 결정하기 어렵게 된다. 반대로 Slit의 폭을 좁게 하면 피측정면이 멀리 떨어져 있는 경우와 급경사면을 측정하는 경우 CCD Sensor에 조사되는 반사산란광의 강도가 약해져 환경의 영향을 받기 쉽다라는 문제가 발생한다. 이러한 것을 고려하여 최적의 Slit폭을 결정하여야 한다.

앞에서 이미 구성된 실험장치에 있어서 2개의 Slit이 있는 Mask를 대신해서 Slit폭 조정기능을 지닌 Mask(Micrometer부착)를 동일한 위치에 설치하여, 0.3mm이하 Slit폭을 사용하여 강도분포가 양분되는 측정점을 찾기위하여 경사각 0°인 점에 대하여 실험을 한 결과를 Fig 9에 나타낸다. Slit폭 0.1mm까지 Speckle Pattern의 영향이 있고, Slit폭이 0.05mm로 작아짐에 따라 정규분포에 가까운 분포로 되고 있다. 즉 Slit폭은 좁으면 좁을수록 양호한 것이 된다. 그러나 측정범위내의 모든 점을 측정하기 위해서는 0.05mm에서는 반사광강도가 약해서 측정이 불가능하

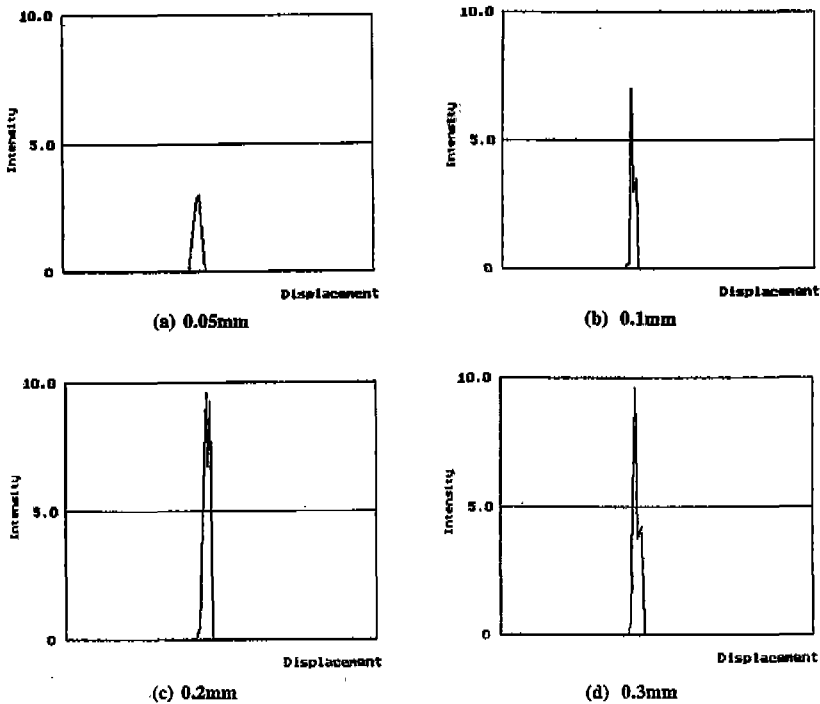


Fig. 9 Intensity Distributions depending on Slit Widths

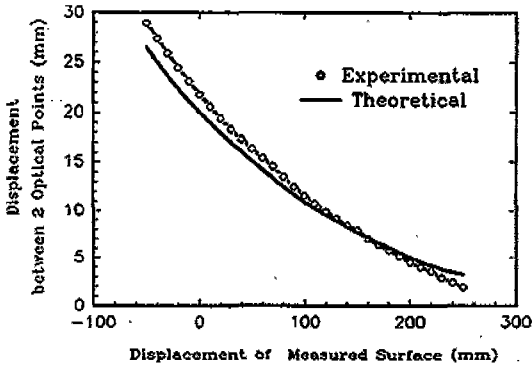


Fig. 10 Relationship between z_1 and x

다. 따라서 Slit은 폭 0.1mm의 것을 사용했다.

Mask의 뒤에는 Slit의 가로방향으로만 반사산란광을 모으고, CCD Sensor에 조사되는 2개 광점의 위치를 변화시키지 않고 광의 강도를 증폭시키는 역할을 하는 원통 렌즈(40×20mm, 초점거리 30mm)인 렌즈 4를 설치했고, 가장 후방에 2개의 Spot사이의 거리측정용 CCD Sensor와 그 Driving Circuit을 설치하였다.

4. 실험 및 고찰

Fig. 10은 석고원통면을 Translation Stage에 고정시키고, 경사각 0°인 점을 측정점으로 Translation Stage를 광축방향을 따라 10mm씩 300mm의 범위를 이동시켜 정지된 상태에서 CCD Sensor상의 두 광점간격 x 를 측정한 결과이다. 실선은 식 (9)로 표현된 이론치이고, \circ 를 Plot한 점이 실험결과이다. 다소의 오차가 있기는 하지만, 피측정면의 변위 z_1 은 -50mm로부터 250mm까지 300mm의 범위에 있어서 변위측정이 가능하다는 것을 Fig 10으로부터 알 수 있다. 또한 두 개의 곡선의 차이는 렌즈간 거리설정에 있어서 이론치와의 근소한 차이와 렌즈의 수차에 있는 것으로 생각되어지고, 곡선의 경향이 양호한 일치를 보이는 것으로부터 식 (6)은 설계단계에 있어서 충분히 이용이 가능하다는 결론을 얻었다.

결과적으로 측정범위는 이론적으로는 400mm이었지만, 구성된 실험장치로는 300mm정도만이 측정가능하였다. 따라서 앞으로의 측정실험은 이 구간내에서만을 대상으로 한다.

여기서 z_1 에 대하여 측정치에 최소제곱법(Least

Square Method)을 적용하면

$$z_1 = \frac{-13920.6x + 288000}{21.9604x + 993.28} \quad (14)$$

로 된다. 이것은 본 형상측정법에 있어서 실제의 $x-z_1$ 의 관계식이므로 이후로의 실험에서는 식 (14)를 식 (9)의 교정곡선으로서 $x-z_1$ 변환에 사용한다.

본 형상측정법에 사용되는 전자회로가 열의 영향 때문에 오차의 원인이 될 가능성이 있기 때문에 30분에 걸쳐서 동일점을 고정시켜 놓은 채로 반복하여 50번 측정하는 작업(약 30초에 한 번)을 전원을 On시킨 직후로부터 8시간후 까지 2시간 간격으로 실험하였다. 그 결과는 Fig. 11에 나타낸 바와 같다. Fig. 11(a)는 실험개시 직후의 30분간의 빈도분포를 나타내며 빈도가 두 부분으로 나뉘어져 있는데, 개시 직후의 15분간에 측정된 값은 Graph의 우측에 분포되고, 그 이후 15분간에 측정된 값은 좌측에 분포되었다. 이 후반 15분간에 측정된 값은 2시간 후의 분포인 Fig. 11(b)와 4시간 후의 분포인 Fig. 11(c)와 거의 일치하고 있다. 이것으로부터 전원이 On된 직후의 15분 정도는 전자회로와 전기장비등의 온도상승 때문에 분포가 변화하지만, 그 후로 8시간 정도까지는 어느 정도의 범위내에서 시간적 재현성이 있는 것을 알 수 있다. 그러나 8시간 후의 빈도분포를 보여주는 Fig. 11(d)가 다소 차이가 있는 것은 자체 제작한 회로가 쉽게 열영향을 받기 때문이라고 생각된다.

이제까지의 기본적인 실험결과를 토대로 본 형상측정 시스템이 가장 양호한 상태에서 정밀도실험을 행했다. 이 실험에서 사용한 피측정평면은 접촉식 3차원 측정기로 측정한 결과 표면의 최대높이 변위가 10 μ m이므로 본 형상측정 시스템의 분해능을 고려해 볼때 완전한 평면이라고 생각할 수 있다. 이 평면상에서 임의로 600개의 점을 측정하여 그 오차를 구한 것이 Table 1이다. Table 1의 윗부분은 피측정면이 대물 렌즈로부터 멀리 떨어진 경우이고, 아래가 가까운 경우이다. 결과는 상당히 커다란 오차를 나타내고 있지만, 정밀도도 피측정면이 대물 렌즈에 가까우면 가까울수록 양호한 결과를 나타내고 있다.

석고로 만든 원통면을 Translation Stage에 설치해 놓고 원통의 한 단면을 측정하는 실험을 하였다. 측정된 결과를 Fig. 12에 나타낸다. 측정에 사용한 원통면의 반경은 공칭값으로 35mm이지만, 접촉식 3차원 측

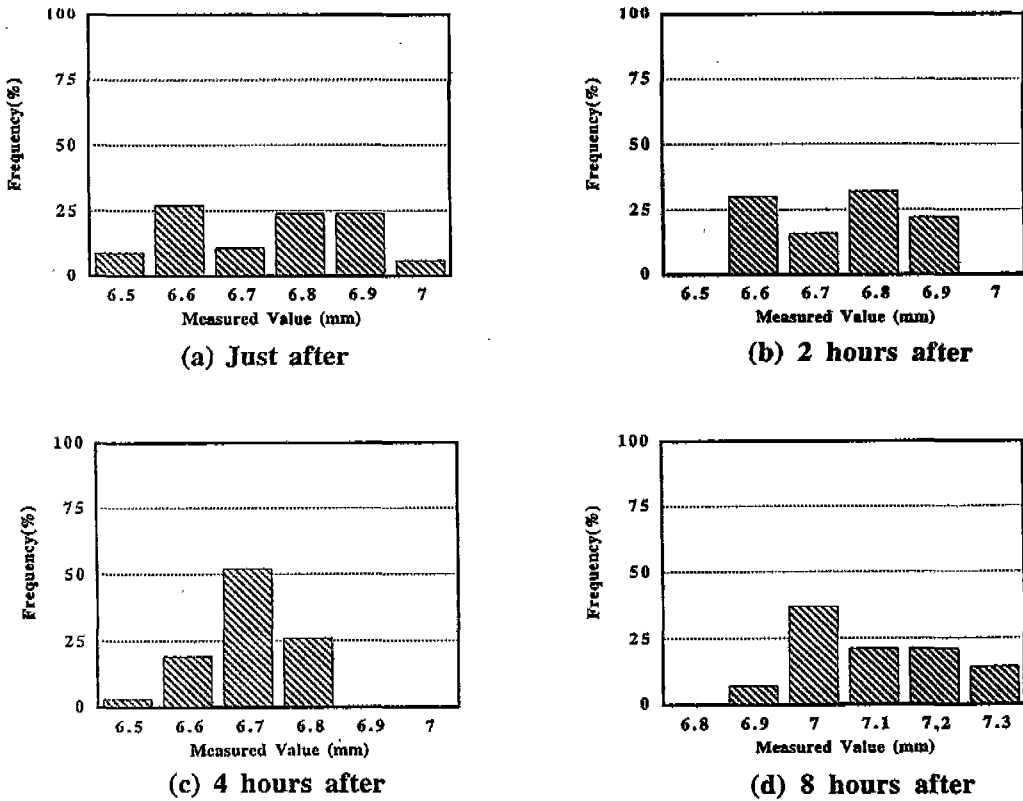


Fig. 11 Reproducibility

정기로 측정하여 최소자승법에 의해서 구한 회귀원의 반경은 35.07mm, 오차는 $\pm 1.4\text{mm}$ 이었고, 표준편차는 800 μm 이었다. 오차는 접촉식 측정의 결과로부터 구해진 원의 중심과 본 형상측정 시스템에 의하여 구해진 원의 중심을 일치시킬 때, 접촉식으로부터의 원과 본 시스템의 측정치와의 차로 나타낸다.

전체적으로 살펴볼 때 피측정면이 대물렌즈에서 멀어질수록 정도가 저하되는 것을 알 수 있고, 특히 급경사면에서 오차가 큰 것을 알 수 있다. 본 실험에서 측정할 수 있는 경사각의 한계는 75° 로 나타났고, 이 한계를 넘어선 경사각에서는 거의 반사산란광이 집광되지 않았다. 본 형상측정 시스템의 오차는 다음과 같은 원인에 의한다고 생각된다.

Laser Beam이 피측정면에 조사되기 까지의 과정에서 완전한 평행광선을 유지하지 않는다는 것이다. Laser Beam이 거울에 반사되고 렌즈 1의 중심을 통과하여 렌즈 1의 결상점 부근에서 결상한 후 확대되므

Table 1 Result of the Precision Experiment

Average of Measured Value(mm)	195.97	107.69	25.91
Standard Deviation($\pm\sigma$ mm)	± 0.72	± 0.61	± 0.49
Maximum Error($\pm 3\sigma$ mm)	± 2.16	± 1.83	± 1.47

로 피측정면이 렌즈 1에서 떨어져 있을수록 피측정점에 Laser Beam의 중심이 정확히 조사되기 어렵다. 이것은 렌즈 1의 중앙에 Beam이 통과할 수 있는 구멍을 만들어 해결할 수 있다고 생각된다. 이밖에도 자체 제작한 전자회로의 불안정성도 고려할 수 있다.

5. 결 론

이상과 같이 이론의 해석결과에 따라 비접촉 형상측정 시스템을 구성하여 실험한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 환경광의 영향을 받지않고 300mm의 측정범위에

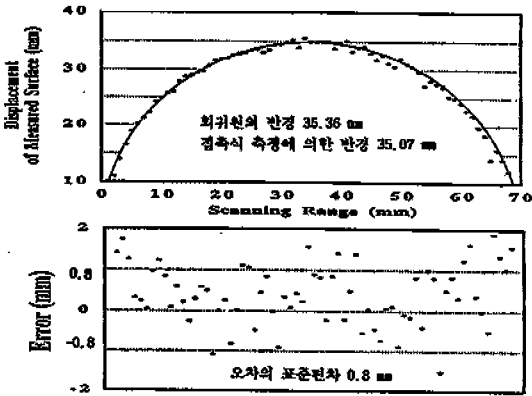


Fig. 12 Measuring Results

서 분해능 F.S.비 0.1% 이하에서 최대 경사각 75도까지 측정가능하다.

2) 측정정밀도는 급경사각에서도 $\pm 1.4\text{mm}$ 이며, 표준편차는 $800\ \mu\text{m}$ 이었다.

3) CCD linear 센서를 이용하기 때문에 장치가 소형이며 데이터 처리를 고속으로 할 수 있고, 또한 비접촉측정이기 때문에 자동화가 가능할 것으로 생각된다.

실제로 3차원 형상을 측정하는데 사용하기에는 오차가 너무 크게 나타났지만 금후 더욱 개량해서 고정밀도의 측정기가 되도록 추진중에 있다.

참고문헌

1. Hiroshi Dohi, Mitsuru Ishizuka, "A 3-D

Vision System Incorporating Solid Modeler and Geometric Reasoning", Proceedings of 10th International Conference on Pattern Recognition, pp.185-187, 1990.

2. G. T. Reid, R. C. Rixon, S. J. Marshall and H. Stewart, "Automatic On-line Measurement of Three Dimensional Shape by Shadow Casting Moire Topography", Wear, pp.297, 1986.

3. George Schaffer, "Machine Vision:a sense for CIM", American Machinist, Special Report 767, pp.101-120, 1984.

4. 宮本紘三, "接觸式と非接觸式による表面形狀測定", 精密機械, 第51卷, 第4號, pp.674-680, 1985.

5. D. Nitzan, "Three-dimensional Vision Structure for Robot Application", IEEE Trans., PAMI-10, pp.291-309, 1988.

6. 秋山伸幸, 牧平坦, 中田俊彦, "しまパターン投影式自動焦点合わせ法(第2報)", 精密工學會誌, 第56卷, 第12號, pp.2273-2279, 1990.

7. R. A. Jarvis, "A Perspective on Range Finding Techniques for Computer Vision", IEEE Trans., PAMI-5, pp.122-139, 1983.

8. Peter K. Allen and Ruzena Bajesy, "Integrating Sensory Data for Object Recognition Tasks", Computer Vision for Robots, SPIE Vol. 95, pp.225-232, 1985.