

재귀반사 특성을 이용한 경면물체의 3차원 형상 측정

박원식*, 유영기**, 조형석*

Measurement of the 3-Dimensional Shapes of Specular Objects by Using Double Pass Retroreflection

W. S. Park*, Y. K. Ryu** , H. S. Cho*

ABSTRACT

This paper is aimed to develop an optical method for measuring 3-dimensional shapes of specular objects having curved surfaces. The existing methods measuring the shapes of specular objects have several common disadvantages: they may not work properly if the surface is highly specular like mirror surface or if the reflectance property is not uniform over the surface. And, they often require the a priori knowledge about the surface reflectance. To overcome these disadvantages, the measurement using double pass retroreflection method is proposed in this paper. For this measurement principle, an experimental measuring system is designed and prepared which is composed of a galvanometer scanner, a beam splitter, a laser source, a CCD camera, and a reflector made of retroreflective material. To verify the effectiveness of the measurement system a series of experiments are performed for various specular objects. The results observed from the experiments show that the developed optical sensing system can be an effective mean of measuring the 3-D shapes of specular objects.

Key Words: Specular Object(경면물체), Specular Reflection(경면반사), Double Pass Retroreflection(이중재귀반사), Retroreflective Material(재귀 반사체), Galvanometer Scanner(갈바노메터)

1. 서론

일반적으로 임의의 재료 표면에 빛이 입사하면 정반사와 난반사가 혼합된 반사 현상이 나타난다. 그런데 표면 조도가 작은 금속, 유리 등의 재료 표면은 정반사가 지배적인 반사형태를 보인다. 이러한 경면물체는 표면 검사, 컨베이어 상의 부품 집기 등 자동화된 공정에서 흔히 발

견할 수 있다. 따라서 공장 자동화에 광학적 인식 방법을 적용하는 경우, 경면물체에도 적용될 수 있는 시스템 개발이 필요하다.

임의의 조명하에서 경면물체의 카메라 영상을 보면 카메라 렌즈와 광원 간의 정반사 조건을 만족시키는 위치만 밝게 빛나고 그 외의 위치는 어둡게 나타난다. 이 때 대상 물체의 표면이 경면에 가까울수록 밝은 영역(이하 경면반

* 한국과학기술원 기계공학과

** 선문대학교 전자공학과

사 화소라 한다)과 어두운 영역의 명암 분포는 더욱 뚜렷이 양분되어 나타난다. 그리고 각 영역 내부에서의 명암 분포는 거의 일정한 모양을 보인다. 따라서 명암의 분포로써 물체의 형상 정보를 구해내는 기존의 컴퓨터 비전 알고리즘 - 경계선 검출, 영역 분리(region segmentation), 스테레오 비전 등 - 으로는 이러한 경면물체의 형상을 측정하거나 인식하기가 어렵다.

이러한 난점을 해결하기 위해, Healy⁽²⁾ 등은 단순화된 Torrance-Sparrow 모델을 사용하여 경면물체의 곡률을 구하였다. 그러나 이 방법은 물체 표면의 반사도에 대한 사전 지식을 필요로 할 뿐 아니라 표면 전체에 걸쳐 균일한 반사도를 가져야 하는 제약을 가진다. 그리고 Ikeuchi⁽³⁾는 포토메트릭 스테레오(photometric stereo)를 사용하여 경면물체의 형상을 구하였다. 그런데 포토메트릭 스테레오는 표면 법선과 명암 분포 간의 관계를 사전에 구해 놓아야 하며, 대상 물체 표면의 반사도가 균일해야 한다. 따라서 이 방법 또한 Healy 등의 방법과 같은 단점을 가진다. 그리고, Solomon⁽³⁾ 등은 4개의 광원을 사용하여 경면물체의 형상을 측정하였다. 이 방법은 경면 반사 성분 뿐만 아니라 난반사 성분도 함께 사용하는데, 대상 물체의 표면이 거울처럼 매끈한 경우에는 적용하기 어려운 단점이 있다. 그리고 경면반사 성분을 이용한 예로, Nayar⁽⁴⁾ 등이 개발한 127개의 점광원을 사용한 경면물체 형상 측정 시스템이 있다. 이 방법은 표면의 반사도 정보를 필요로 하거나 균일해야 하는 제약은 없으나, 표면이 거울과 같이 매끈한 경면인 경우에는 적용되기 어렵다.

이와 같이 경면물체의 형상을 측정하기 위한 기존의 방법들은 다음에 나열된 단점들을 모두 가지거나 최소한 하나를 가지고 있다.

- 표면 반사도에 대한 사전 지식을 필요로 함
- 표면 전체에 걸쳐 균일한 반사도를 가져야 함
- 표면이 거울과 같이 완전한 경면인 경우 적용되기 어려움

본 논문에서는, 위에 나열된 단점들을 모두 해결한 경면물체 형상 측정 방법과 측정 장치 구성을 제안하고자 한다. 이 방법은 곡면의 경면물체의 형상을 측정할 수 있는 방법으로서, 표면 위의 한 점에 대한 정보, 즉 한 점의 위치 좌표와 표면 법선이 주어진 상태에서 사용 가능한 방법이며, 이 점을 초기 시작점이라 한다. 그리고, 측정 장치로는 헬륨-네온 레이저, 빔 스플리터(beam splitter), 갈바노미터⁽⁷⁾(galvanometer scanner), 재귀반사재질^(5,6)(retroreflective material)로 덮여진 반구형 반

사체, CCD 카메라로 된 광학 시스템을 구성하였다. 이와 같이 제안된 제안된 측정 방법의 원리를 검증하기 위해 경사진 평면, 볼록한 구면, 오목한 구면과 같은 기본적인 곡면에 대한 측정실험을 수행하였으며, 구하여진 형상 데이터로 3차원 형상을 재현할 수 있었다. 이와 같은 실험에서, 표면의 반사도 정보를 필요로 하거나 표면이 균일해야 하는 제약이 없었으며, 거울과 같은 매끈한 표면에 대해서도 적용이 가능함을 볼 수 있었다.

2. 측정 방법

2.1 측정장치 구성

본 연구에서 도입한 이중 재귀반사 광로를 구현하기 위해 헬륨-네온 레이저, 빔 스플리터(beam splitter), 갈바노미터(galvanometer scanner), 반구형 재귀반사재질(retroreflective material) 반사체, 줌 렌즈, CCD 카메라를 Fig. 1과 같이 구성하였다.

헬륨-네온 레이저를 광원으로 하여, 갈바노미터로 측정 대상 물체 위를 스캐닝(scanning)하면 재귀반사재질로부터의 반사광이 갈바노미터를 통해 회귀하여 CCD 카메라에 입사하도록 하였다. 여기서 빔 스플리터는 레이저 광선과 CCD 카메라의 광축이 근접하도록 하기 위해 사용되었다. 그리고 측정장치에 사용된 요소들의 사양 및 제조원은 표1에 나타난 바와 같다.

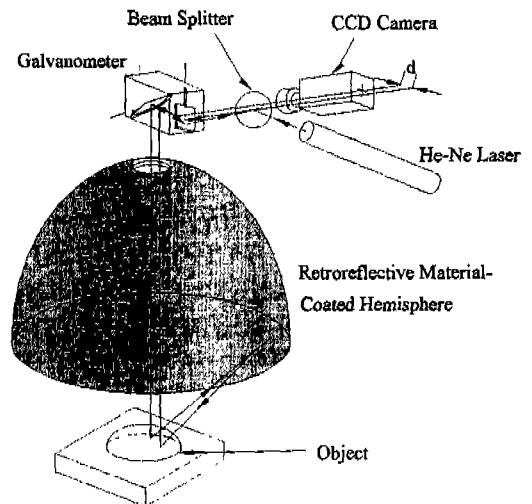


Fig. 1 Configuration of measurement system

Table 1 Functions and specifications of optical components

component	specification	maker
He-Ne laser	power : 7mW beam dia. : 1mm	Melles Griot
beam splitter	RT ratio : 50:50	Melles Griot
galvanometer scanner	aperture : 10mm axis offset : 13mm	General Scanning
retroreflector	color : white reflectance : row	3M, Scotchlite
zoom Lens	focal length : 11-88 mm	Canon
CCD camera	resolution : 768x493	Sony, XC-77

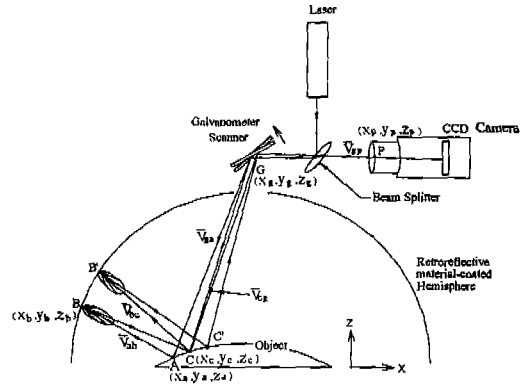


Fig. 2 Principle of measurement

2.2 이중 재귀반사 광로의 원리

Fig. 2에는 본 연구에서 개발한 경면물체 측정장치가 2차원으로 도식화되어 나타내어져 있다. 빔 스플리터 (beam splitter)에서 반사한 레이저 광선과 CCD 카메라의 광축은 작은 간격을 두고 평행하게 정렬되어 있다. 그리고 이 두 광축은 갈바노메터의 두 거울을 경유하여 경면물체의 표면을 스캐닝(scanning) 할 수 있다. 이 때 경면물체로부터의 반사광을 CCD 카메라 쪽으로 되돌리기 위하여 반구형의 반사체를 사용하였다. 이 반사체의 안쪽면은 카메라 쪽으로 강한 빛을 회귀시키기 위하여 재귀반사 재질(retroreflective material)로 입혀져 있다.

이와 같은 구성하에서 레이저 광원으로부터 광선이 출발하면 빔 스플리터, 갈바노메터의 두 거울을 경유하여 경면물체 표면 상의 A점에 입사한다. 그리고 경면물체에서의 정반사 성분은 반구형 반사체의 안쪽 표면의 B점에 입사한다. 이 B점은 재귀반사 재질이기에 때문에 정반사, 난반사, 재귀반사로 구성된 반사 분포를 보인다⁽⁶⁾. Fig. 2에서는 B점에 재귀반사 분포가 나타내어져 있다.

측정 대상인 경면물체가 곡면이라면 B점에서의 재귀반사 분포 중의 일부 광선은 경면물체 표면의 C점에서 정반사하고 갈바노메터의 두 거울, 빔 스플리터를 차례로 경유하여 카메라로 입사한다. 이때 카메라 렌즈가 핀 홀(pin hole)에 가까울수록, 즉 카메라의 노출이 작을수록 카메라로 회귀하는 광선은 얇아진다. 그리고 카메라와 레이저와의 간격이 작을수록 경면물체 위의 C점은 A점에 가까워진다. 여기서 카메라에 맺히는 C점의 상이 B점을 광원으로 한 경면반사 화소이다. Fig. 2와 같은 구성에서 카메라에는 A점의 난반사 성분과 C점의 정반사 성분이 입사한다. 그러나 카메라 노출을 작게 하면 카메라에는 C점만의 상이 맺히도록 하는 것이 가능하다. 이와 같이 광원과 근접한 센서, 재귀반사 재질의 반사체로써 대상 물체 위를 두 번 경유하도록 구성한 광로를 이중 재귀반사 광로라 한다.

2.3 이중 재귀반사를 이용한 측정 방법

본 연구에서는 이중 재귀반사를 이용하여 곡면 표면을 갖는 경면물체의 형상을 측정하기 위해 반복적인 측정 진행 방법을 도입하였다. Fig. 2의 A점의 정보, 즉 위치좌표와 표면법선이 알려져 있다면 카메라에 입사한 C점의 경면반사 화소로써 C점의 위치좌표와 표면법선을 구해낸다. 그리고 갈바노메터를 조정하여 레이저 광선을 C점에 입사 시키면 또 다른 점의 위치좌표와 표면법선을 구할 수 있다. 이와 같이 반복적인 측정을 진행하여 경면물체의 형상을 측정할 수 있다. 그런데 이와 같은 이중 재귀반사 광로로써 경면물체의 형상을 측정하는 것은 직관적으로는 이해하기 쉽지 않다. 따라서 측정 원리가 성립함을 증명할 필요가 있다.

Fig. 2에 보이는 바와 같이 레이저 광원에서 발생한 레이저 광선이 빔 스플리터, 갈바노메터, A점을 순차적으로 경유하여 도달한 반구형 반사체 위의 B점의 위치좌표를 구하는 것은 빔 스플리터, 갈바노메터의 두 거울, 경면물체 위의 A점에서 빛의 정반사 법칙⁽⁸⁾을 적용하면 간단히 구할 수 있다. 그리고 이 광선 AB와 형상이 알려진 재귀반사 재질의 반사체와의 교점을 구하면 B점의 위치 또한 간단히 구할 수 있다. 그리고 카메라 영상에서의 C점의 경면반사 화소로써 광선 CG의 직선 방정식을 구하는 것도 C점의 경면반사 화소로 광선 GP를 구하고 갈바노메터에서의 정반사 법칙을 적용함으로써 간단히 구할 수 있다. 따라서 광선 CG의 직선 방정식과 B점의 위치로써 C점의 위치 (x_c, y_c, z_c) 와 C점의 법선벡터 \vec{n}_c 를 구하는 것이 가능함을 보이면 이중 재귀반사를 이용한 경면물체 형상 측정의 원리는 성립하게 된다.

Fig. 2에 보이는 바와 같이 (x_a, y_a, z_a) 를 A점의 좌

표, (x_b, y_b, z_b) 를 B점의 위치좌표, (x_g, y_g, z_g) 를 회귀 광선 CG와 갈바노메터 거울의 교점 좌표, \vec{v}_{cg} 를 회귀 광선 CG의 방향벡터, \vec{v}_{bc} 를 회귀 광선 BC의 방향벡터라 하면, 광선 CG는 C점과 G점을 잇는 직선과 일치하므로 직선 CG의 방정식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{x_g - x_c}{v_{cgx}} = \frac{y_g - y_c}{v_{cgy}} = \frac{z_g - z_c}{v_{cgz}} \quad (1)$$

여기서 광선 CG의 방향벡터 $\vec{v}_{cg} = (v_{cgx}, v_{cgy}, v_{cgz})$ 이다. 그리고 C점에서, 광선 BC가 정반사하여 광선 CG가 되었으므로 정반사 조건으로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{n}_c \cdot (\vec{v}_{cg} \times \vec{v}_{bc}) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\vec{v}_{bc} \cdot \vec{n}_c}{\|\vec{v}_{bc}\|} = -\frac{\vec{v}_{cg} \cdot \vec{n}_c}{\|\vec{v}_{cg}\|} \quad (3)$$

C점의 표면법선 벡터 $\vec{n}_c = (n_{cx}, n_{cy}, n_{cz})$ 를 단위벡터로 보면 다음과 같은 식을 부가할 수 있다.

$$\|\vec{n}_c\| = \sqrt{n_{cx}^2 + n_{cy}^2 + n_{cz}^2} = 1 \quad (4)$$

그리고 측정 대상 물체의 표면이 곡면이므로 근접한 두 점 A와 C 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$n_{cx}(x_c - x_a) + n_{cy}(y_c - y_a) + n_{cz}(z_c - z_a) = 0 \quad (5)$$

그런데, 광선 BC의 방향벡터 $\vec{v}_{bc} = (x_b - x_c, y_b - y_c, z_b - z_c)$ 이고 광선 CG의 방향벡터 $\vec{v}_{cg} = (x_c - x_g, y_c - y_g, z_c - z_g)$ 이므로, 위의 식 (1), (2), (3), (4), (5)는 6개의 미지수 (x_c, y_c, z_c) , \vec{n}_c 로 이루어진 독립적인 6개의 식이다. 따라서 이 연립방정식은 유한개의 근을 갖는다. 본 연구에서는 위의 연립방정식이 유일해를 갖는지는 증명하지 않았다. 그러나 수치적 해법으로 실시간에 근을 구할 수 있었으며 각기 다른 초기 추정치로부터 동일한 해를 구할 수 있었다.

이와 같이 C점의 위치좌표와 표면법선이 구해지면 이 C점을 이용하여 또 다른 점의 위치좌표와 표면법선을 구할 수 있다. 이러한 과정을 반복하면 대상 물체에 대한 일련의 형상 정보를 구하는 것이 된다.

2.4 이중 재귀반사 광로 모델의 수치적 해법

본 절에서는, Newton 방법을 이용하여 식 (1), (2),

(3), (4), (5)로 이루어진 연립방정식의 해를 구하는 과정을 설명한다. 제시된 연립방정식은 본 논문에서 제안한 측정 방법이 원리적으로 타당함을 보이기는 하나, 실제 측정 시에 그 해를 구하는 것은 쉽지 않다. 따라서, 이 연립방정식의 물리적 의미를 그대로 유지하면서 그 해를 용이하고 빠르게 구할 수 있는 방법을 보이교자 한다.

구하고자 하는 점 C는 광선 CG 위의 점이므로, 광선 CG 상의 점들 중 식 (2), (3), (4), (5)를 만족하는 것이 점 C의 좌표 (x_c, y_c, z_c) 가 된다. 그러므로 점 (x_c, y_c, z_c) 의 후보 $(\hat{x}_c, \hat{y}_c, \hat{z}_c)$ 을 다음과 같이 1개 독립 변수 t의 함수로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{x}_c &= x_g + v_{cgx}t \\ \hat{y}_c &= y_g + v_{cgy}t \\ \hat{z}_c &= z_g + v_{cgz}t \end{aligned} \quad (6)$$

식 (2), (3), (4)는 점 C에서의 정반사 조건을 표현한 것이다. 정반사 조건에 의하면, 입사광의 방향벡터 \vec{v}_{bc} , 표면법선벡터 \vec{n}_c , 반사광의 방향벡터 \vec{v}_{cg} 는 한 평면에 포함되고, 표면법선벡터 \vec{n}_c 와 각 방향벡터 간의 입사각, 반사각이 동일해야 한다. 여기서 우리는 입사광의 방향벡터 \vec{v}_{bc} 와 반사광의 방향벡터 \vec{v}_{cg} 가 주어진 상태에서 표면법선벡터 \vec{n}_c 를 구하기 위해 간단한 벡터 덧셈의 성질을 이용할 수 있다. 크기가 동일한 두 벡터를 합하면, 합하여진 결과 벡터는 각각의 두 벡터와 동일한 각을 이루며, 두 벡터와 동일한 평면에 존재한다. 이를 이용하면, 우리는 표면법선벡터 \vec{n}_c 를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{n}_c = k \left\{ \frac{\vec{v}_{cg}}{\|\vec{v}_{cg}\|} - \frac{\vec{v}_{bc}}{\|\vec{v}_{bc}\|} \right\} \quad (7)$$

여기서, k는 임의의 양수이며, 우변 둘째 항의 음의 부호는, 입사광의 방향벡터 \vec{v}_{bc} 와 표면법선벡터 \vec{n}_c 는 둔각을 이루기 때문이다. 그러므로 $\hat{v}_{bc} = (x_b - \hat{x}_c, y_b - \hat{y}_c, z_b - \hat{z}_c)$, $\hat{v}_{cg} = (\hat{x}_c - x_g, \hat{y}_c - y_g, \hat{z}_c - z_g)$ 라 하면 \vec{n}_c 의 후보 \hat{n}_c 는

$$\hat{n}_c = k \left\{ \frac{\hat{v}_{cg}}{\|\hat{v}_{cg}\|} - \frac{\hat{v}_{bc}}{\|\hat{v}_{bc}\|} \right\} \quad (8)$$

가 된다.

이와 같이, 임의의 독립변수 t 에 대해 구하여진 $(\hat{x}_c, \hat{y}_c, \hat{z}_c)$ 와 \hat{n}_c 가 식 (5)를 만족하면 식 (1), (2), (3), (4), (5)를 만족하는 해가 되는 것이다. 따라서, $(\hat{x}_c, \hat{y}_c, \hat{z}_c)$ 와 \hat{n}_c 의 적합성을 식 (5)로써 검사한다. $\hat{n}_c = (\hat{n}_{cx}, \hat{n}_{cy}, \hat{n}_{cz})$ 라 할 때, 적합도 함수 $f(t)$ 를

$$f(t) = \hat{n}_{cx} (\hat{x}_c - x_a) + \hat{n}_{cy} (\hat{y}_c - y_a) + \hat{n}_{cz} (\hat{z}_c - z_a) \quad (9)$$

와 같이 정의하면,

$$f(t) = 0 \quad (10)$$

인 점이 연립 방정식 (1), (2), (3), (4), (5)의 해가 되는 것이다.

본 논문에서는, 식 (10)의 해를 구하기 위해 1개의 독립변수 t 에 대한 Newton 방법으로써 해를 구할 수 있었다. 독립변수 t 의 초기치 t_0 는

$$t_0 = \frac{z_g - z_a}{v_{cgz}} \quad (11)$$

로 정하였다. 이 경우는, 광선 CG의 점 중에서 점 A와 동일한 높이의 점을 택한 것이다.

이러한 방법은, 본 논문 후반에 언급되는 몇 가지 측정 대상 물체들에 대한 적용에서, 빠르고 안정적인 해를 제공하였다.

3. 측정 실험

3.1 측정장치의 정렬(alignment) 및 보정(calibration)

광학 시스템에서는 각 요소의 내부 파라미터, 위치, 자세(orientation) 등에 관계된 정렬 및 보정이 매우 중요하다. 여기서 정렬이라 함은 요소의 위치와 자세를 원하는 값으로 맞추는 작업을 뜻하며, 보정은 정렬하기 어려운 위치, 자세, 내부 변수 등을 규명하는 작업을 뜻한다. 본 연구의 경면물체 측정장치에는 갈바노미터, 카메라, 레이저의 정렬 및 보정이 필요하다. 본 측정장치에서 카메라와 레이저는 갈바노미터를 통해서 작동되기 때문에 최우선으로 갈바노미터의 정렬 및 보정이 실행되어야 한다. 그리고 카메라 보정과 레이저 정렬이 뒤따른다. 이와 같은 순서는 Fig. 3에 보이는 (a), (b), (c), (d)의 순으로 실행된다.

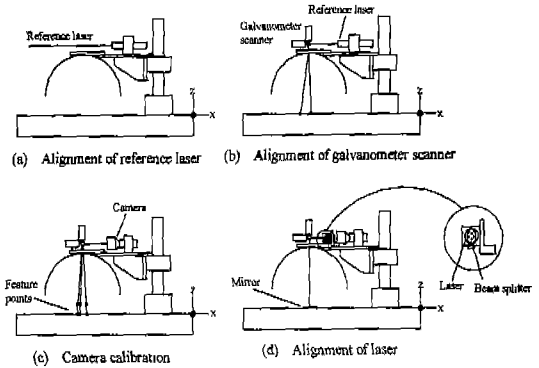


Fig. 3 Calibration and alignment of optical components

(a) 갈바노미터 정렬 및 보정

갈바노미터로써 레이저 광선을 스캐닝(scanning)하기 위해서는 갈바노미터의 두개 거울을 정확하게 필요한 각도로 회전시켜야 한다. 일반적으로, 정렬 또는 보정해야 할 갈바노미터의 변수는 몸체의 위치와 자세(orientation), 두 거울의 영점(home position), 거울의 회전각 분해도이다. 본 연구에서는 갈바노미터의 성능에 크게 영향을 미치는 변수로서 두 거울의 영점, 갈바노미터의 위치와 자세, 거울의 회전각 분해도를 정렬 또는 보정하였다.

갈바노미터와 같은 광학 요소를 광학적으로 정렬 또는 보정하기 위해서는 Fig. 3(a)와 같이 우선 광원을 정확히 정렬해야 한다. 가능하면 대상 광학 요소의 정렬과 광원의 정렬을 동시에 확인할 수 있는 구성이면 좋다. 따라서 본 연구에서는 갈바노미터의 영점을 보정하기 위하여 Fig. 4과 같은 광학계를 구성하였다. Fig. 4의 스크린(screen)에 1개의 레이저 광점(laser spot)을 확인하면 보정이 완료된다.

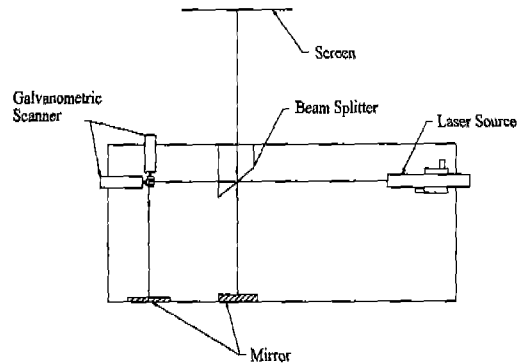


Fig. 4 Calibration of the home position of galvanometer scanner

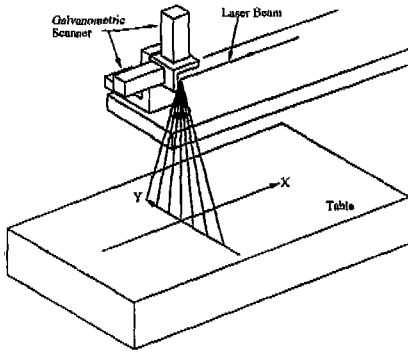


Fig. 5 Calibration and alignment of galvanometer scanner

갈바노메터의 위치와 자세에 관해서는 3차원 공간 상의 강체와 같이 6 자유도의 변수를 정렬 또는 보정해야 한다. 본 연구에서는 Fig. 3(b)의 수직축의 직각도를 충분한 것으로 가정하고 갈바노메터의 롤(roll) 회전각을 정렬하고 xy-평면 상에서의 갈바노메터 위치(translation)를 보정하였다. 이 경우에도 우선적으로 레이저를 정확히 정렬한 후, 레이저를 갈바노메터에 입사시키면서 Fig. 5에 보이는 바와 같이 한쪽 거울만으로 레이저를 y축 중심으로 스캐닝하여 생기는 정반 위의 레이저 직선 궤적을 관찰하며 갈바노메터의 롤(roll) 각을 정렬한다. 그리고 두 거울을 영점에 두고 레이저를 입사 시키면 정반에 수직하게 입사하게 된다. 이때 정반 상의 레이저 광점 좌표를 측정하면 갈바노메터의 x, y 위치좌표를 구할 수 있다.

갈바노메터의 두 거울은 약 0.0003° 정도의 미세한 회전각 분해도를 갖는다. 그러나 정확한 구동을 위해 회전각 분해도를 보정해야 한다. Fig. 5에 보이는 바와 같이 두 거울 중 보정하고자 하는 거울을 일정한 각도로 움직이며 정반 위에 레이저를 스캐닝한다. 그리고 정반 상에서 레이저 궤적의 폭을 측정하면 거울의 회전각 분해도를 보정할 수 있게 되는 것이다.

(b) 카메라 보정

카메라 보정 역시 갈바노메터가 정렬되고 보정된 후에 실행한다. 카메라에 대한 변수에는 외부 파라미터(extrinsic parameter)로서 카메라의 위치, 카메라의 자세가 있고, 내부 파라미터(intrinsic parameter)로서 초점 거리, 영상 취득기(frame grabber)의 횡방향비(horizontal scale factor), 영상 중심(image center), 렌즈의 수차가 있으며, 이들 중 시스템의 특성에 맞게 일부 파라미터에 대한 보정을 생략할 수 있다. 본 논문에서는, 렌

즈의 초점거리가 긴 고배율 렌즈를 사용하였기 때문에 렌즈의 수차에 의한 영향은 무시하였으며, 또한 대상 물체의 높이가 크지 않은 경우에 대해서는 영상중심에 대한 보정도 생략할 수 있다⁽¹⁰⁾. 따라서 실제 보정된 파라미터는 카메라의 위치와 자세, 초점거리, 횡방향비이다.

Fig. 10에서 보이는 바와 같이, 한 점 P에 대한 기준 좌표계 O_w 와 카메라 좌표계 O_p 간의 관계는 좌표 변환 행렬 wT_p 로써 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} = {}^wT_p \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} \quad (12)$$

그리고, 초점거리 f 인 핀 홀 카메라에서, CCD 배열 상의 좌표는 다음과 같다.

$$X = f \frac{x_p}{z_p} \quad (13)$$

$$Y = f \frac{y_p}{z_p}$$

이와 같이 구하여진 CCD 배열 상의 좌표 (X, Y)와 영상 좌표 (X_f, Y_f)와의 관계는

$$X_f = (S_x \cdot d_x)^{-1} X + C_x \quad (14)$$

$$Y_f = d_y^{-1} Y + C_y$$

이다. 여기서 (d_x, d_y)는 각각 인접한 CCD 셀의 가로 방향, 세로 방향 간격이고, S_x 는 횡방향비로서

$$S_x = \frac{f_c}{f_f} \quad (15)$$

이다. 그리고 f_c 는 CCD 배열에서 횡방향의 스캐닝 주파수, f_f 는 영상 취득기에서의 A/D 샘플 주파수이며, (C_x, C_y)는 영상 중심의 좌표로서 영상의 가로, 세로 크기의 절반을 취하였다.

카메라 보정에 사용된 특징점(feature point)는 Fig. 3(c)에 보이는 바와 같이 수직축의 높이를 2단계로 변화시켜, 2개 평면에서 각각 10개씩 20개의 점을 취하였다. 그리고 구하여진 특징점들의 절대 좌표와 카메라 영상 좌표를 이용하여, 다음의 함수

$$G = \sum_{i=1}^{20} \left\{ ({}^iX_f - {}^i\hat{X}_f)^2 + ({}^iY_f - {}^i\hat{Y}_f)^2 \right\} \quad (16)$$

를 최소화하는 카메라 파라미터 $\{T_p, f, S_x\}$ 를 구한다. 여기서 (X_f, Y_f) 는 20개의 특징점 중 임의의 점 i 의 영상 좌표이며, (\hat{X}_f, \hat{Y}_f) 는 카메라 모델에 의해 계산된 영상 좌표이다.

(c) 레이저 정렬(alignment)

카메라가 정밀하게 정렬된 후 실제 측정에 필요한 레이저의 정렬이 필요하다. Fig. 3(d)에 보이는 바와 같이 갈바노미터의 두 거울에 레이저 광선이 통과되는 상태에서 정반 위에 거울을 놓고 레이저 광선이 다시 광원 쪽으로 되돌아 오도록 정밀하게 레이저의 각도 조절을 한다. 레이저 광선이 광원 쪽으로 되돌아 오도록 조정된 것은 레이저 광선이 정반에 수직하게 입사 함을 의미한다. 그리고 레이저 광원을 평행 이동 시켜서 원하는 위치에 고정 한다.

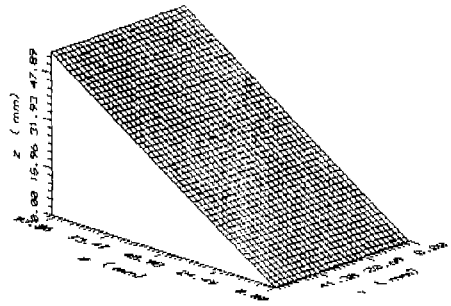
3.2 영상에서 경면반사 화소 추출

C점을 경유한 회귀광이 카메라 핀 홀에 입사하면 이는 영상에서 밝은 점, 즉 경면반사 화소로 나타난다. 이 경면 반사 화소를 적당한턱값(threshold)으로 이진화 한 후, 그 무게중심을 구하여 화소좌표로 취하였다.

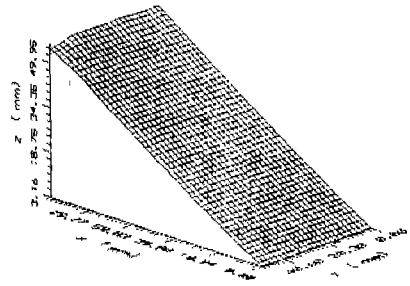
3.3 측정실험 및 토의

일반적인 자유곡면도 부분적으로는 평면, 원통형 표면, 구면과 같은 기본적인 곡면으로 이루어졌다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 경면물체 형상측정 장치에서 이러한 기본적인 곡면들을 측정해 보았다.

본 측정장치는 임의의 위치에서 측정 대상 물체의 높이를 측정하는 것이 아니고, 초기 시작점으로부터 이어지는 일련의 경로를 따라 위치좌표와 표면법선을 측정하며 진행한다. 따라서 어떠한 측정 대상 물체의 3차원 형상을 측정하기 위해서는 측정 대상 영역 전체를 스캐닝하도록 초기시작점의 위치를 옮겨가며 측정을 반복해야 한다. 이러한 방식으로 평면, 볼록한 구면, 오목한 구면 형상을 가진 경면물체에 대해 측정을 실행하였다. 시료로써 경사진 평면(시료 1), 곡률반경이 120mm인 볼록한 구면(시료 2), 곡률반경이 280mm인 오목한 구면(시료 3)에 대해 측정을 실행하였고 측정된 위치좌표로써 3차원 형상을 재현한 결과가 원래의 형상과 비교되어 Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8에 나타내어져 있다. 그리고 단면 형상이 일정한 원통형 표면(시료 4)의 측정 결과와 실제 형상이 비교되어 Fig. 9에 나타내어져 있다.

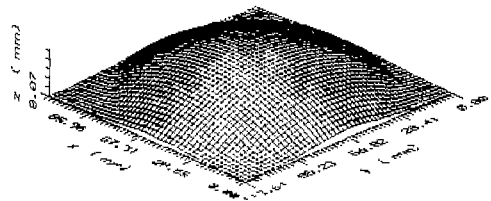


(a) Original shape

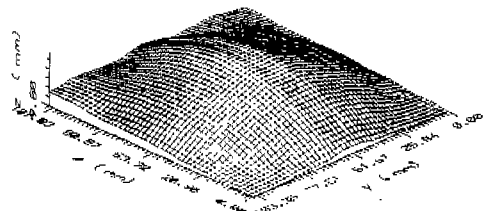


(b) Reconstructed shape

Fig. 6 Measurement of the shape of planar surface (object 1)



(a) Original shape



(b) Reconstructed shape

Fig. 7 Measurement of the shape of convex spherical surface (object 2)

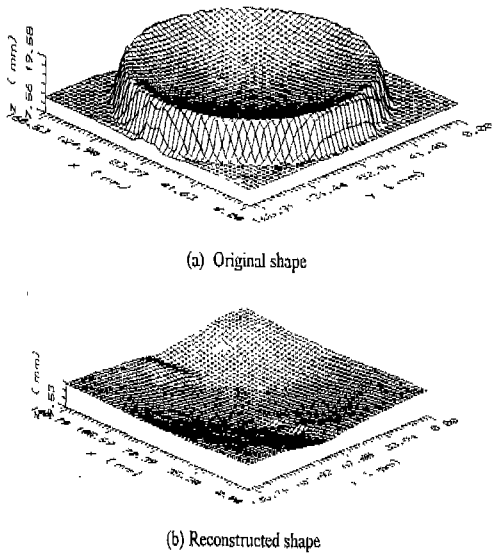


Fig. 8 Measurement of the shape of concave spherical surface (object 3)

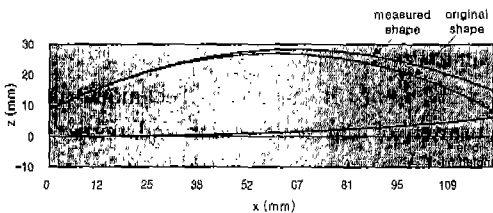


Fig. 9 Measurement of the shape of cylindrical surface (object 4)

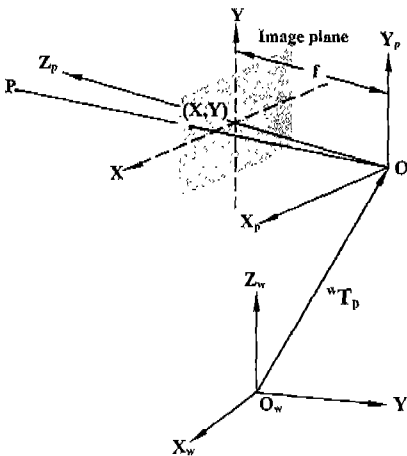


Fig. 10 Camera model and coordinate system

결과 그림에서 보이는 바와 같이 측정 진행에 따라 오차가 커지는 경향을 볼 수 있다. 이는 초기시작점을 기초로 한 반복적인 측정 방법에 의한 현상이다. 이와 같은 오차 누적 현상을 단위 측정 진행 거리에 대한 오차 증가량으로 보면, 경사진 평면(시료 1)의 경우에 약 4%, 볼록한 구면(시료 2)은 9%, 오목한 구면(시료 3)은 3%, 원통형 표면(시료 4)이 9%로 나타난다. 이러한 오차 증가는 초기시작점으로부터 측정 종료까지의 측정스텝수, 즉 데이터 샘플 개수에 비례한다⁽⁶⁾. 그런데 초기시작점으로부터 측정 진행한 거리가 동일하여도 측정스텝수는 물체의 형상에 따라 다르다. 표2는 본 논문에서 예시된 4가지 측정 시료들의 곡률과 일정거리당의 측정스텝수를 도표화하여 서로 비교할 수 있도록 나타낸 것이다. 표2에서 음의 곡률은 위로 볼록한 면을 뜻하며 양의 곡률은 오목한 면을 뜻한다. 표2에 의하면 곡률이 클수록 측정간격이 넓어져 일정거리당의 측정스텝수는 적어지고 곡률이 작을수록 측정간격이 좁아져 측정스텝수는 많아진다. 즉 곡률이 양인 오목한 물체보다 곡률이 0인 평면의 측정스텝수가 많고, 평면보다 곡률이 음인 볼록한 물체의 측정스텝수가 많다. 따라서 외곽의 크기가 유사한 물체를 측정한다 하여도 곡률이 다르면 일정거리당의 측정스텝수가 다르기 때문에 누적된 오차량은 다르게 나타난다.

Table 2 Curvatures, numbers of sample points per 50 mm and error growing rates of the objects

	planar surface (object1)	convex spherical surface (object2)	concave spherical surface (object3)	cylindrical surface (object 4)
curvature (1/ρ) [mm ⁻¹]	0	-0.008183	0.003587	-0.008283
radius of curvature (ρ) [mm]	∞	-122	279	-108
error growing per unit distance	4 %	9 %	3 %	9 %
number of sample points per 50 mm	20	132	15	164

4. 결론

본 논문에서는, 경면물체의 형상을 측정하기 위한 새로운 방법 및 측정 장치를 제안하였다. 그리고, 제안된 방법을 검증하기 위한 측정 실험에서 몇 가지 기본적인 곡면들에 대해 실제 측정을 수행하여 보았다. 이 방법은 곡면의 경면에 대해, 최초의 한 점(초기 시작점)이 알려진 상태에서 사용 가능한 방법으로, 기하광학을 기초로 구성된 방법이다. 이 방법의 장점은, 기존의 방법들에서 흔히 요구되는 표면 반사도 정보, 반사도의 균일성에 대한 제약

이 없으며, 거울과 같은 매끈한 경면에도 잘 적용된다.

그러나, 초기 시작점을 시작으로 측정을 진행해 나감에 따라 오차가 증가하는 현상을 보인다. 실제 실험에서 예시된 대상 물체의 경우에 관측된 오차 증가량은 물체의 형상에 따라 다르게 나타나는데, 경사진 평면의 경우에는 측정 거리의 4%이며, 오목한 구면의 경우에는 이보다 적어져서 3%, 볼록한 구면의 경우에는 증가하여 9%로 나타났다. 이와 같은 오차 증가 현상은, 반복적인 측정 진행 방식으로 인해 발생하는 현상으로서, 여러 실험을 통해 물체 형상과 밀접한 관계가 있는 것으로 관찰되었다. 따라서 이에 대한 현상을 파악하고 규명하여, 발생한 오차를 보상하기 위한 연구가 계속적으로 진행될 예정이다.

참 고 문 헌

1. G. Healy and T. O. Binford, "Local shape from specularity," *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, vol. 42, pp. 62-86, 1988.
2. K. Ikeuchi, "Determining the surface orientations of specular surfaces by using the photometric stereo method," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. 3, no. 6, pp. 661-669, November, 1981.
3. F. Solomon and K. Ikeuchi, "Inspection specular lobe objects using four light sources," *Proc. of IEEE Conference on Robotics and Automation*, Nice France, pp. 1707-1712, 1992.
4. S. K. Nayar, A. C. Sanderson, L. E. Weiss, and D. D. Simon, "Specular surface inspection using structured highlight and gaussian images," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 6, no.2, pp. 208-218, 1990.
5. R. L. Reynolds and O. L. Hageniers, "Optical enhancement of surface contour variation for sheet metal & plastic panel inspection," *SPIE* 954, pp.208-216
6. 박원식, "곡면표면을 갖는 경면물체의 3차원 형상에 대한 광학적 측정", 석사학위논문, 한국과학기술원 서울분원, 1994.
7. General F. Marshall, "Laser beam scanning", Marcel Dekker Inc., 1985.
8. Kingslake, "Applied optics and optical engineering", vol. III, Chap.7, Academic Press, 1965.
9. Monteross, "Laser applications", vol. 2, Academic Press, 1971.
10. R. K. Lenz, R. Y. Tsai, "Technique for calibration of the scale factor and image center for high accuracy 3-D machine vision metrology," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. 10, no. 5, pp. 713-720, 1988.