

링 조명에 의한 경면 반사 물체의 형상 인식

김 종 형,* 김 천 호,** 조 형 석***

Obtaining Shapes of Specular Objects Using Ring Illumination

J. H. Kim, * C. H. Kim, ** H. S. Cho***

ABSTRACT

Specular reflection appears with metals, plastics, glasses and many other solid objects which are required to be inspected, assembled, moved, or processed automatically. Recognizing such shiny objects with specular reflections is a hard problem for computer vision, since specular reflections appear, disappear, or change their shapes abruptly, due to tiny movements of the view. Traditionally, such specular reflections are discarded as annoying noise for recognition purposes. In this paper a technique is represented for obtaining shapes of specular objects using ring illumination to get over such difficulties in recognizing specular objects. The ring illumination system employes a ring source which is positioned on the axis of the camera. The concept of the proposed method is that if specular objects are illuminated by the ring they show their own distinctive specular features in surface from which we can infer the shape of the object. A series of experiments are performed to evaluate the performance of this system.

Key Words : Computer Vision(컴퓨터 비전), Specular Objects(경면 반사물체), Iso-Inclination(등경사도), Ring Illumination(링 조명), Specular Reflection(경면 반사)

1. 서 론

조립, 이동, 가공, 검사와 같은 작업을 자동화하기 위해서는 대상이 되는 물체의 자세나 형상을 인식하여야 한다. 그런데 실제의 경우 자동화의 대상이 되는 많

은 물체는 금속, 플라스틱, 유리와 같이 경면반사의 특성을 가지고 있다. 따라서 경면 반사의 특성을 가지는 물체를 인식하는 기술의 개발은 자동화에 있어서 매우 중요하다.

한번에 대상 물체에 대한 많은 정보를 얻어서 처리

* 삼성전자(주) 생산기술센터

** 기아자동차(주)

*** 한국과학기술원 정밀공학과

및 인식할 수 있는 컴퓨터 비전 시스템은 그 잇점 때문에 많이 사용되어지고 있다. 그러나 표면에 입사된 빛을 좁은 폭을 가지고 특정한 방향으로만 반사하는 특징을 갖는 경면반사 물체의 인식은 컴퓨터 비전에서 매우 어려운 문제이다. 수광부 또는 광원부의 미소한 움직임만으로도 경면 반사가 수광부에 나타나기도 하고 사라지기도 할 뿐만 아니라 그 형상 또한 갑작스럽게 변하기 때문이다. 또한 경면 반사로부터는 물체의 인식에 중요한 경계선 추출이나 영역 분리를 위해 기본이 되는 명암을 이용할 수가 없다. 이러한 어려움 때문에 기존의 많은 연구들은 경면 반사 성분을 불필요한 노이즈로 취급하고 제거하여 난반사 성분만을 사용하여 물체를 인식하는데 초점을 맞추었다. E. N. Coleman⁽⁹⁾ 등은 4개의 점 광원을 사용하여 이들 중 영상면에 경면 반사를 유발하는 광원을 선택하여 이를 제외한 다른 3개의 광원에 의한 명암의 정보만을 사용하여 표면의 법선 방향 및 반사 계수를 구하고, 이로부터 구(sphere)나 피라미드와 같은 기본적인 3차원의 형상을 복원 하였다. 이는 검사하고자 하는 표면의 반사 특성이 어느 정도 난반사 성분이 포함되어야만 가능하다.

그러나 한편으로 경면 반사 특징치-경면 반사를 보이는 화소의 영역-는 매우 강하고 뚜렷하고 포화된 밝기를 갖기 때문에 이진화처치리(binazation)와 같은 간단한 영상 처리로 찾아낼 수 있고 신뢰성 있는 정보를 제공한다는 장점을 가지고 있다.

이러한 경면 반사 물체의 특징을 효과적으로 사용하여 경면 반사 물체를 인식하려는 연구들이 있었다. Birk, Kelly와 Martine은 실린더 형상의 경면 반사 물체에서 나타나는 직선의 경면 반사 특징치를 이용하여 통(bins)안에 쌓여 있는 실린더 형상의 물체를 인식 하였으며⁽¹⁾ Healey와 Binford는 경면 반사 물체의 specular peak 주위에서 물체의 곡률을 구하기 위해서 간단화된 Torrance-Sparrow 반사 모델을 사용하였고⁽²⁾ Ikeuchi는 경면 반사 표면의 경사도를 측정하기 위해 3개의 확장 개념의 광원(extended sources)을 사용하였으며⁽³⁾ Nayar, Weiss, Simon와 Sanderson은 경면 반사 물체의 형상을 구하기 위해서 127개의 점 광원을 반구상에 일정한 간격으로 배열하고 순차적으로 점등하면 그때마다 나타나는 specular peak에서의 표면의 법선(normal)은 이때 점등한 점 광원의 방향과 카메라의 방향을 이등분한다는 입사-반사의 법칙을 이용하였고⁽⁴⁾ 김등은 링 조명으로부터 얻은 특이한 경면

반사 특징치로부터 실린더, 원뿔, 구 평면의 형상 파라미터와 공간상의 자세를 구하였다.⁽⁶⁾

이러한 연구들은 경면 반사 물체의 특성을 적극적으로 이용하기 위하여 특수한 조명 장치를 사용한 예로서 경면 반사 성분의 유용성을 보여준다. 그러나 이러한 방법들이 신뢰성과 속도가 요구되어지는 실제 현장에 사용되어지기에는 아직 많은 문제점을 안고 있으며, 신뢰성 있고 빠른 인식을 위해서는 물체의 경면 반사 성분을 안정되게 추출할 수 있는 조명 장치 및 물체와의 기하학적 모델과 경면의 물리적 반사모델의 연구가 보다 많이 진행되어야 한다.

본 연구의 목적은 앞에서 언급한 경면 반사 특징치의 장점을 적극적으로 이용하여 간단한 알고리즘으로 빠르게 경면 반사 물체를 인식할 수 있는 조명 장치와 알고리즘의 개발이다.

이를 위해서 본 연구에서는 같은 축에 위치한 한대의 카메라와 링광원으로 이루어진 조명 시스템을 사용한다. 링 조명은 링 원주 상에 연속적으로 배열된 일련의 점 광원들의 동시 조명과 같은 효과를 얻을 수 있는데 이렇게 함으로써 기존의 연구에서 사용된 점 광원에 비해 많은 정보를 동시에 얻을 수 있으며 물체의 형상에 의존한 특이한 경면반사 특징치를 얻을 수 있다. 실제로 링 조명에 의해 나타나는 경면 반사특징치는 카메라와 링 광원과의 사이각을 이등분하는 경사도를 갖는 표면의 집합이 된다. 따라서 실린더는 직선으로, 구는 원형의 경면 반사특징치가 나타나게 되는 것이다. 이러한 특징을 갖는 경면 반사특징치를 얻을 수 있는 링 조명을 사용하여 간단한 영상 처리 과정을 거쳐 경면 반사 물체를 유추할 수 있는 알고리즘을 개발하고자 한다.

이를 위해서 먼저 제2장에서는 점 광원에 대한 반사 모델을 확장하여 링 조명의 반사 모델을 유도하고 제3장에서는 링 조명을 scanning하여 얻은 경면 반사 특징치들로부터 물체의 3차원 형상을 구하는 알고리즘을 제안하며 제4장에서는 일련의 실험 결과를 보여줄 것이다.

2. 링 조명에 의한 경면 반사 모델

두개의 서로 다른 매개체의 경계면에 빛이 입사되면 빛은 일정한 법칙에 따라 반사하게 되는데 이 법칙을 수식화한 것을 반사모델이라고 한다. 입사된 빛은 표면에서 크게 두 가지의 서로 다른 작용에 의하여 반사되는데 난 반사(lambertian reflectance)와 경면반사

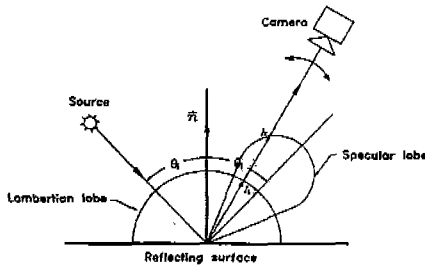


Fig. 1 Polar plots of the two reflection components as functions of the sensor direction for a fixed source direction

(specular reflectance)라고 한다. Fig. 1은 점 조명 하였을 때 카메라의 방향에 따라 카메라에 들어오는 난 반사와 경면 반사의 세기를 보여준다. 이때 경면 반사는 표면 법선을 중심으로 크기는 입사각, θ_i 와 같고 반대 방향으로 매우 좁은 범위에 걸쳐 강하게 반사된다.

일반적으로 모든 물체는 두 가지의 반사 성분을 모두 가지고 있는데 표면의 성질에 따라 각 성분의 크기가 다르다. 종이와 거울은 어느 한 성분만이 지배적인 예로써 종이는 난 반사 성분이 강하고 반면에 거울은 경면 반사 성분이 강하다. 이와 같은 물체를 강한 성분에 따라 각각 난반사 물체 (Lambertian object) 또는 경면 반사 물체 (specular object)라고 한다.

일반적으로 화면상의 한 점에서의 밝기 (intensity), I 는 다음과 같이 표면에서 반사되는 난 반사 성분과 경면 반사 성분의 합으로 표시할 수 있다.

$$I = I_L + I_S \tag{1}$$

여기서 I_L 는 난 반사 성분이고 I_S 는 경면 반사 성분을 나타낸다. 그러나 본 연구에서는 경면 반사 물체만을 대상으로 하기 때문에 $I_S \gg I_L$ 인 조건하에서 식(1)을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I \approx I_S \tag{2}$$

2.1 점 조명에 의한 경면 반사 모델

링 조명에 의한 경면 반사 모델 식(2)를 구하기 위해서 링 조명은 링 원주 상의 미소한 점광원들로 이루어져 있다고 가정할 수 있으므로 먼저 하나의 점 조명에 의한 경면 반사 모델을 살펴보고 다음절에서 링조명에 의한 경면 반사 모델을 전개하도록 한다.

경면 반사 모델로서 Torrance-Sparrow model⁽⁶⁾은 실제와 잘 일치하는 것으로 알려져 있다. 이 모델에서는 표면은 작고, 거울과 같은 입자들이 불규칙하게 기울어져 있다고 가정하였으며, 이웃한 입자간의 가림과 그림자짐의 영향까지 고려하였다. Torrance와 Sparrow에 따라 평균 표면법선을 중심으로한 미소 입자의 방향 분포를 가우시안 분포 함수를 사용하면 미소 점 광원에 의한 경면 반사 모델을 다음과 같이 간단하게 표현할 수 있다.

$$\delta I_S = B \exp\left(\frac{-\alpha^2}{4\sigma^2}\right) \tag{3}$$

여기서 δI_S 는 미소 점광원에 의한 표면의 한 점으로부터 반사되어 카메라로 들어오는 경면 반사의 크기 (intensity)를 나타내고, σ 는 표면의 거칠기를 나타내는 파라미터이며 B 는 입사 에너지 중에서 경면 반사되는 에너지의 비를 나타내는 표면 경면 반사 파라미터 (specular reflectance parameter)이고 α 는 Fig. 2에서 보여지듯이 점 광원 방향의 단위 벡터인 \vec{s} 와 카메라 방향의 단위 벡터인 \vec{c} 를 이등분하는 단위 벡터 \vec{n}' 와 표면 법선 벡터 \vec{n} 과의 사이각이다. 이 각의 크기는 경면 반사방향의 단위 벡터 \vec{v} 와 카메라 방향의 단위 벡터 \vec{c} 와의 사이각의 반에 해당한다. 즉 다음과 같은 관계가 있다.

$$\vec{n} = \frac{(\vec{s} + \vec{v})}{\|\vec{s} + \vec{v}\|} \tag{4}$$

$$\vec{n}' = \frac{(\vec{s} + \vec{c})}{\|\vec{s} + \vec{c}\|} \tag{5}$$

$$\alpha = \cos^{-1}(\vec{n} \cdot \vec{n}') \tag{6}$$

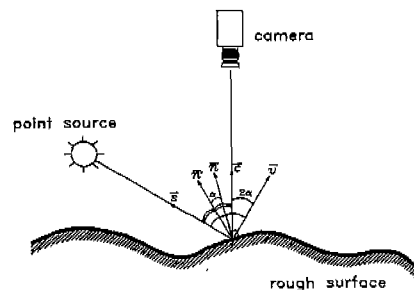


Fig. 2 Geometry for Torrance-Sparrow model; assumes that a surface is composed of small, randomly oriented, mirror-like facets

2.2 링 조명에 의한 경면 반사 모델

링에 의한 경면 반사 모델은 위에서 유도한 미소 점 광원에 대한 반사모델 식(3)을 링의 원주를 따라가며 적분함으로써 얻을 수 있다.

$$I_s(\theta_n, \theta_s) = \int_{-\psi}^{\psi} \{B \exp(\frac{-\alpha^2}{4\sigma^2})\} d\phi \quad (7)$$

여기서 ϕ 는 Fig. 3에서 미소 점광원의 원주 방향으로의 위치를 나타내며, ϕ 는 $(\vec{s} \cdot \vec{n}) \geq 0$ 을 만족하는 링 원주 상의 점광원의 영역이다. 이 조건은 빛의 표면에 입사될 수 있는 점광원의 위치 범위를 제한한다. 식(7)을 닫힌 해(closed form)로 정확히 풀 수는 없지만 경면 반사되는 방향의 영역이 매우 좁기 때문에 적분 영역을 다음과 같이 가정하고 근사해를 구하기로 한다.

$$\phi_n - \xi \leq \phi \leq \phi_n + \xi \quad (8)$$

여기서 ϕ_n 는 표면 법선의 azimuth angle을 나타내며 ξ 는 미소양을 의미하고 이 범위에서 적분 기호 내의 값은 일정하다고 가정하면 식(7)은 다음과 같이 근사화될 수 있다.

$$I_s(\theta_n, \theta_s) = B' \exp(\frac{-(\theta_n - \theta_s/2)^2}{4\sigma^2}) \quad (9)$$

여기서 B' 는 새로운 링 조명에 의한 표면 경면반사 계수이고 θ_n 는 표면의 경사도, θ_s 는 링 광원의 입사각을 나타낸다. 식(9)의 결과로부터 카메라와 동축상에 놓인 링 조명에 의한 반사는 다음과 같은 특징을 가지고 있다. 경면 반사 성분의 밝기는 표면의 경사도가 ϕ_n 에는 무관하게 $\theta_n = \theta_s/2$ 만을 만족하는 점들에서 가장 크며 이

점들을 이으면 하나의 곡선-이후로 등경사도 곡선이라고 할-을 이룬다. 이 등경사도 곡선은 영상상에서 높은 밝기를 나타내며 물체 형상에 따라 다른 모양을 하기 때문에 간단한 영상 처리를 통해 경면 반사 물체의 형상을 유추할 수 있다. 이를 위해서 다음 장에서 물체의 형상과 등경사도 곡선과의 관계를 유도하도록 한다.

3. 물체의 형상 추정

몇 개의 형상 파라미터로 표현할 수 있는 구, 실린더, 평면, 원뿔과 같은 기본이 되는 형상은 몇 개의 등경사도 곡선만을 가지고 물체의 형상과 파라미터를 구할 수 있다.⁽⁶⁾ 그러나 자유 곡면을 갖는 경면반사의 물체를 유추하기 위해서는 많은 등경사도 곡선이 필요하며 본 연구에서는 이를 위하여 링 광원을 카메라 동축상에서 scanning함으로써 여러 조명 입사각에서 등경사도 곡선을 sampling하는 방법을 사용한다. 이렇게 얻은 등경사도 곡선을 모으면 난 반사 물체를 한 조명 입사각에서 링 조명하였을 때 나타나는 등밝기 곡선의 모임과 같게된다. Scanning하는데 시간이 걸린다는 단점은 있지만 각 등경사도 곡선상에서 표면의 경사도를 정확한 반사 모델 없이 링 광원의 입사각의 정보만으로 쉽게 구할 수 있다는 장점을 갖는다. 따라서 scanning하여 얻은 등경사도 곡선으로부터 형상을 유추하는 문제는 한장의 난 반사영상으로부터 형상을 유추하는 문제와 같게 된다. 한장의 난 반사영상으로부터 형상을 유추하는 알고리즘은 오래 전부터 연구되었는데 본 연구에서는 경면 반사 물체의 경우 등경사도 곡선에 해당하는 등밝기곡선으로부터 직접 형상을 유추할 수 있는 알고리즘을 제안한다.

카메라와 조명이 물체로부터 멀리 떨어져 있고 물체 표면이 상수의 반사 계수를 갖을 경우 영상 밝기는 물체의 표면에서의 위치와는 상관없이 표면의 기울기에만 관계한다. 이와 같이 영상 밝기와 표면의 기울기와의 관계를 나타낸 것이 반사 모델식인데 물리 법칙으로부터 유도될 수 있다.⁽¹⁰⁾ $z = z(x, y)$ 로 표시되는 물체 표면의 작은 patch에서의 반사 모델식은 다음과 같다.

$$E(x, y) = R(p(x, y), q(x, y)) \quad (10)$$

여기서 $E(x, y)$ 는 영상 좌표 (x, y) 점에서 영상 밝기이고 $R(p(x, y), q(x, y))$ 는 다음의 편미분으로 주어지는 기울기를 갖는 표면 patch의 scene radiance이다.

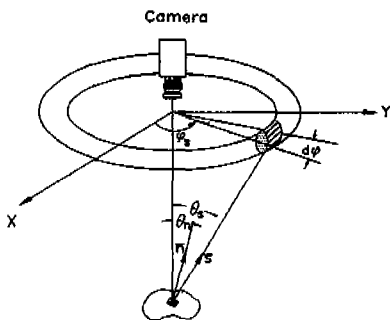


Fig. 3 Illumination of a ring which is positioned on the same axis with the camera's; Ring can be modeled as a set of point sources

$$p = \frac{\partial z}{\partial x}, \quad q = \frac{\partial z}{\partial y} \quad (11)$$

카메라와 동축상의 링 조명에 의한 경면 반사 물체의 경우 식(10)은 식(9)와 기하학을 이용하면 동경사도 곡선상에서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E(x, y) = \tan^2(\theta_s/2) = p^2 + q^2 \quad (12)$$

식(12)는 한 장의 영상으로부터 얻을 수 있는 표면 법선과 영상 밝기 정보와의 유일한 조건식이다. 그러나 표면의 법선은 식(11)에 의해 주어지는 두 개의 변수로 이루어지기 때문에 유일한 해를 구하기 위해서는 추가의 조건이 필요하다. 그러나 해를 알고있는 경계에서 출발하여 특정한 방향으로 전파함으로써 추가의 조건이 필요 없이 해를 구할 수 있는데 본 연구의 알고리즘의 핵심이 된다.

자세히 살펴보면 Fig. 4는 영상 좌표 상에서 등밝기 곡선들을 보여주는데 I_0 의 등밝기 곡선을 초기 곡선이라고 하고 이 초기 곡선 상의 임의의 점의 좌표를 (x_0, y_0) 라고 하자. 이 초기 곡선 사이의 모든 점에서 $z(x_0, y_0)$ 을 알고 있다고 가정하자. Fig. 4에서와 같이 점 (x_0, y_0) 을 등밝기 곡선에 수직한 방향으로 진행시키기 위해 x, y 의 변화량을 다음과 같이 취한다.

$$\begin{pmatrix} \delta x \\ \delta y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} \delta \xi \quad (13)$$

여기서 $\delta \xi$ 는 다음 등밝기 곡선으로 진행하기 위한 작

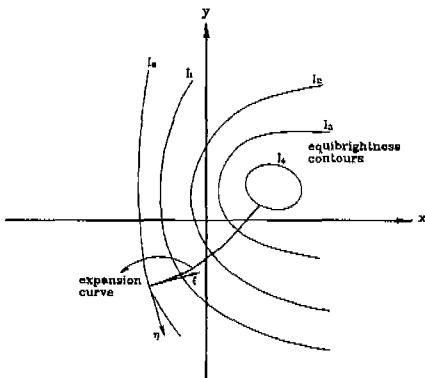


Fig. 4 the expansion curves are perpendicular to the equibrightness contours. We can calculate p, q, z along the curves which expand simultaneously

은 양이고 아래 첨자는 편미분을 뜻한다. 이때 I_0 의 등밝기 곡선 상의 모든 점들은 식(13)에 의해 다음 등밝기 곡선, I_1 으로 동시에 전파해 나간다. 따라서 $\delta \xi$ 는 각 점들마다 다를 수 있다. 그러면 다음 식에 의해 등밝기 곡선, I_1 상의 점에서 z 를 구할 수 있다.

$$\delta z = p \delta x + q \delta y \quad (14)$$

I_1 의 등밝기 곡선에서 다시 다음의 등밝기 곡선, I_2 로 전파하여 z 를 계속적으로 구하기 위해서는 I_1 의 등밝기 곡선 상의 점에서 p, q 또한 구해야 하는데 다음 두 식에 의해 직접 구할 수 있다.

$$E(x_1, y_1) = R(p(x_1, y_1), q(x_1, y_1)) \quad (15)$$

$$\frac{\delta z_1}{\delta \eta} = p \frac{\delta x_1}{\delta \eta_1} + q \frac{\delta y_1}{\delta \eta_1} \quad (16)$$

여기서 η 는 I_1 의 등밝기 곡선상을 움직이는 파라미터이고 x_1, y_1, z_1 은 I_2 의 등밝기 곡선상의 임의의 점에서의 영상 좌표와 높이를 나타낸다. 식(15)는 반사 모델식에 의해서 주어지는 식이며 식(16)에서 z_1 는 I_0 상의 모든 점에서 동시에 I_1 상의 점으로 전파하였기 때문에 이미 계산된 값이다. 따라서 식(15)와 식(16)을 연립함으로써 I_1 상의 점에서 p, q 를 구할 수 있다. 이와같은 방법으로 모든 등밝기 곡선으로 전파해 나가면 전영역에 걸쳐 높이 정보와 표면 법선을 구할 수 있다.

이렇게 구한 z, p, q 는 다음과 같이 표현되는 에너지 함수를 영이 되게 하는 해임을 보일 것이다.

$$\iint \{ [E(x, y) - R(p, q)]^2 + \mu \{ (z_x - p)^2 + (z_y - q)^2 \} \} dx dy \quad (17)$$

여기서 μ 는 식(11)과 식(12)의 상대적인 비중치를 나타내는 파라미터이고 아래 첨자는 편미분을 나타낸다. 이 식은 variational approach(7)에서 정의한 에너지 함수와 같다.

먼저 p, q 는 식(15)을 만족하므로 식(17)의 첫번째 항을 영으로 한다. 다음으로 식(17)의 두번째 항이 영이 됨을 보이기 위하여 식(14)와 식(16)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} \delta z / \delta \xi \\ \delta z / \delta \eta \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \delta x / \delta \xi & \delta x / \delta \eta \\ \delta y / \delta \xi & \delta y / \delta \eta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} \quad (18)$$

Chain rule을 사용하여 좌변을 다시 쓰면 다음과

같다.

$$\begin{pmatrix} \delta z / \delta \xi \\ \delta z / \delta \eta \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \delta x / \delta \xi & \delta x / \delta \eta \\ \delta x / \delta \eta & \delta x / \delta \eta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \delta z / \delta x \\ \delta z / \delta y \end{pmatrix} \quad (19)$$

위의 두 식으로부터 다음의 다음과 관계를 얻을 수 있다.

$$\delta z / \delta x = p \quad \delta z / \delta y = q \quad (20)$$

식(20)은 식(17)의 두번째 항을 영으로 함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 등각기 곡선을 이용한 형상 추정 방법은 식(17)의 에너지 함수를 영이 되게 하는 최적해임을 알 수 있다.

링 조명을 scanning하여 얻은 일련의 등경사도 곡선에 이 알고리즘을 적용하면 초기 경계 조건이 주어졌을 경우 경면 반사 물체의 3차원 형상을 구할 수 있다.

4. 실험 및 토의

위에서 유도한 알고리즘을 검증하기 위해서 Fig. 5에서 보는 바와 같이 해석적으로 3차원 형상을 미리 알 수 있는 구 및 사각뿔과 자연스럽게 경면을 이루고 있는 PCB 기판상에서 납땜을 모형화한 모형 납땜을 대상으로 실험을 하였다. 실험 대상 구의 지름은 20mm이고 사각뿔의 밑면 길이는 15mm, 납땜부의 폭은 10mm이다.



Fig. 5 Test samples: sphere, pyramid, and prototype solder joint

4.1 실험 과정

Fig. 6은 실험을 위한 전체 시스템의 구조를 보여주는데 링 광원을 수직 방향으로 scanning하기 위한 스카라 로봇과 같은 축 상에 있는 약 30만개의 화소를 갖는 C.C.D. 카메라와 링 광원, 그리고 영상을 처리하기

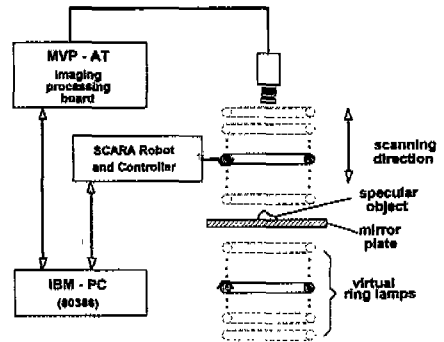


Fig. 6 The system for scanning a ring lamp to get continuous specular contours from which the object shape can be inferred

위한 영상 처리 보드와 컴퓨터로 이루어져 있다. 링 광원은 외경이 240mm가 되는 고주파 형광등을 사용하였다. 또한 링 조명의 입사각은 링 광원이 그림에서 거울면까지 내려 왔을 때 최대값이 90°가 되고 이때 구할 수 있는 표면의 최대 경사도는 식(9)로부터 45°가 된다. 이를 극복하고 90°까지의 경사도를 구하기 위하여 물체 밑면에 거울을 설치하여 링 조명의 입사각이 90°에서 180°까지 가능한 허상의 링조명을 구현하였다. 실험 대상물의 크기는 제한되어야 한다. 대상물의 크기가 너무 클 경우는 대상물 표면의 위치에 따라 링 광원에서 투사되는 입사각이 달라지므로 영상상의 밝은 궤적이 등경사도 곡선이라고 보기는 어렵다. 본 실험에서는 대상물의 크기가 링 광원의 외경의 1/10이내로 제한하였다. 이 범위에서는 입사각의 편차가 3° 미만이다.

실험의 실행은 컴퓨터에서 스카라 로봇에게 scanning 지시를 하면 링 광원은 다음 위치로 가고 영상 처리 보드를 통해서 영상을 받는다. 영상처리를 한 후 다음 scanning을 위해 위 과정을 반복하게 된다.

본 시스템을 이용하여 형상의 정보를 추출하기 위한 전체 과정을 요약하면 다음과 같다.

단계 1: 링 광원을 초기 위치로 보낸다. 첫번째 화면을 받는다.

단계 2: 첫번째 화면의 명암 값을 평균화하고 이진화 처리를 한 후, 세션화 과정을 거쳐 초기 등 경사도 곡선, I_0 을 화면상에 형성한다.

단계 3: I_0 을 따라 일정한 간격으로 초기점을 설정하고 각 점에 대한 높이 값을 입력한다. 본 알고리즘은 이러한 점들을 따라서 계산하여 가므로 이들을 계산점이라 칭한다.

단계 4: 링 광원을 다음 지정된 위치로 옮기고 다음 화면을 받는다.

단계 5: 단계 4에서 받은 화면의 명암값을 평균화, 이진화, 세선화 과정을 거쳐 등 경사도 곡선을 추출한다.

단계 6: 단계 3의 초기 계산점들에서 출발하여, 식 (13)에 의하여 (E_x, E_y) 의 방향으로 단계 4의 경사도 곡선과 만나는 점을 찾는다. 이점들을 새로운 곡선의 계산점으로 간주하고, 계산점까지의 $(\delta x, \delta y)$ 를 구하고 식 (14)로부터 높이값의 증분을 구한다.

단계 7: 다음 등경사도 곡선의 계산을 위하여 현재 등 밝기 곡선상의 표면 법선의 값을 식 (15)와 (16)을 이용하여 구한다.

단계 8: 계산되어 구한 등경사도 곡선 상의 높이값 및 표면법선 값을 새로운 계산점의 초기 값으로 설정하고, 단계 4부터 새로이 시작한다. 모든 작업은 마지막 링의 scanning 위치까지 계속한다.

영상 처리된 과정을 실험 시료인 구의 형상에 대해 살펴보면, Fig. 7에서와 같다. Fig. 7(a)는 구에 한개의 링 조명을 하였을 때 얻은 영상으로 거울을 사용하였기 때문에 두 개의 원형의 등경사도 곡선이 나타났다. (b)는 경면 반사의 정확한 위치를 구하기 위해서 평

균화(averaging)한 후의 모습이고 (c)는 (b)의 이미지를 이진화한 후의 모습이며 (d)는 (c)의 이미지를 세선화(thinning)하여 얻은 등경사도 곡선이다.

시료로부터의 링 광원의 입사각의 변화는 12단계에 걸쳐 얻어지며, 이로 인하여 얻을 수 있는 등경사도 곡선의 경사도 값은 각각 $\theta_n = 10.27^\circ, 14.05^\circ, 17.83^\circ, 21.60^\circ, 25.38^\circ, 29.16^\circ, 60.84^\circ, 64.62^\circ, 68.4^\circ, 72.17^\circ, 75.95^\circ, 79.73^\circ$ 이다. 이중 앞부분의 6개는 직접 링 광원에 의해 형성된 것이고, 나머지 6개는 거울에 의한 허상 링 광원에 의해 얻어진 것들이다.

4.2 실험 결과 및 토의

첫번째의 실험은 경면 구를 대상으로 실시하였다. 구는 완전히 곡면만으로 이루어지고 모든 표면법선을 포함하고 있다. 그리고 쉽게 초기값을 설정할 수 있었다. Fig. 8(a)는 scanning하는 동안 간단한 영상처리로 얻은 총 12개의 등경사도 곡선을 중첩하여 얻을 결과이다. 영상에서 구의 중심에서 외곽으로 갈수록 화소(pixel)간의 거리에 비해 경사면의 변화가 심하므로 등경사도 곡선의 간격이 매우 촘촘히 나타난다. 이에 반하여, 구 중심부는 화소 거리에 비해 경사면의 변화가 심하지 않음을 알 수 있다. Fig. 8(b)이 구의 경계를 나

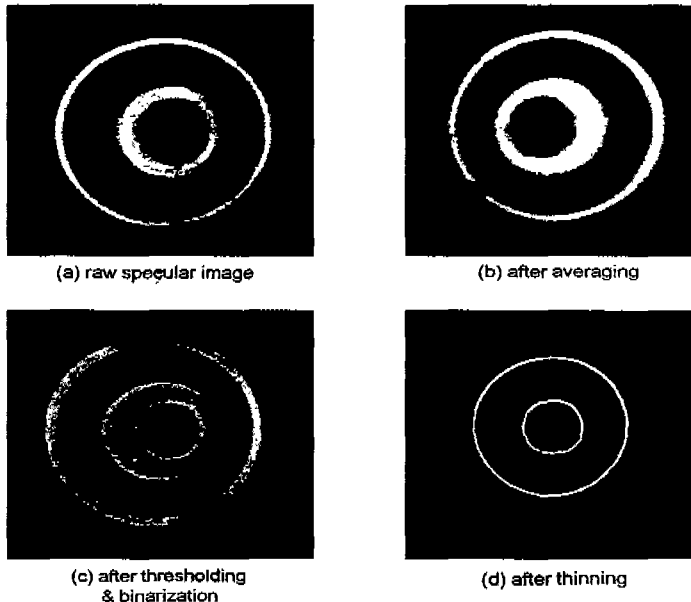


Fig. 7 the results by image processing sequence for detecting the specular contour in the case of a sphere illuminated by a ring with a mirror beneath

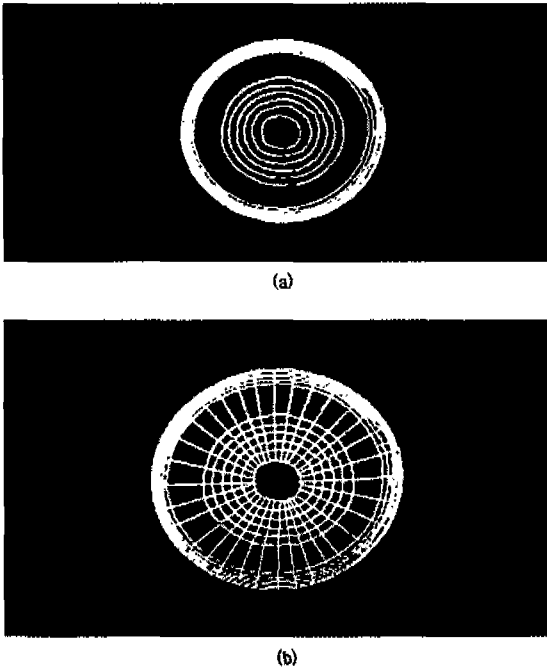


Fig. 8 the specular sphere:(a) specular contours and (b)expansion curves

타내는 가장 큰 원형의 등경사도 곡선을 초기 곡선으로 하여 형상을 구하기 위해서 등경사도 곡선에 식(13)에 의해 수직으로 전파해 나간 궤적을 보여준다. 본 실험에서 계산을 위한 초기 계산점은 32개로 잡아서 Fig. 9는 이 등경사도 곡선을 사용하여 얻은 3차원 형상이다. 링이 축상에서 이동할 수 있는 범위가 제한되어있기 때문에 경사도가 영에 가까운 부분은 등경사도 곡선

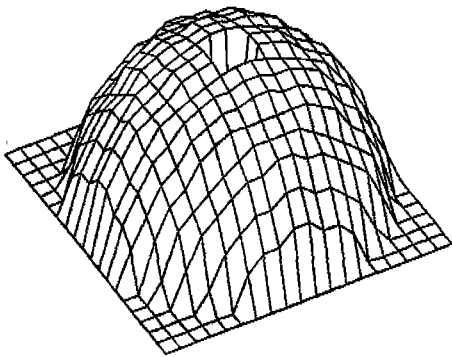


Fig. 9 The height of the specular sphere is estimated from the specular contours

을 얻을 수 없다. 구의 중앙 부분이 들어간 것은 이 때문이다. 그러나 이 부분은 거의 편평한 부분이므로 주위의 3차원 정보를 이용하여 fitting하여도 큰 오차는 없을 것이다. sampling 간격을 좀 더 짧게 하면 더욱 정밀한 형상을 구할 수 있다.

다음은 피라미드 형상인 사각뿔에 대하여 실험하였다. 사각뿔은 곡면이 없는 경사면 만으로 이루어진 물체이다. Fig. 10(a)는 사각뿔의 specularity를 보여주는 데 모든 면에서 경사도가 같기 때문에 등경사도 곡선이 아니라 사각형의 등경사도 영역을 얻었다. Fig. 10(b)는 (a)를 thresholding한 후의 모습을 보여준다. 이와 같이 specularity가 넓은 영역으로 나타날 경우에는 곡선의 등경사도 곡선을 구할 수 없기 때문에 앞의 알고리즘을 그대로 사용할 수 없다. 이처럼 곡면이 없는 경우 본 알고리즘을 적용하기 위해서는 초기 등경사도 곡선에서 다음 경사도 곡선으로의 전파되는 양, $\Delta\theta$ 을 미리 결정한 후 다음의 등경사도 곡선을 찾아가며 계산을 전개해 나간다. 넓게 나타난 specularity의 경계를 초기 등경사도 곡선이라고 보고 Fig. 10(c)와 같이 일정한 간격을 가지고 전 곡선에 수직하게 따라 올라가면 구의 경우와 같은 여러 개의 곡선의 등경사도 곡선을 구할 수 있다.

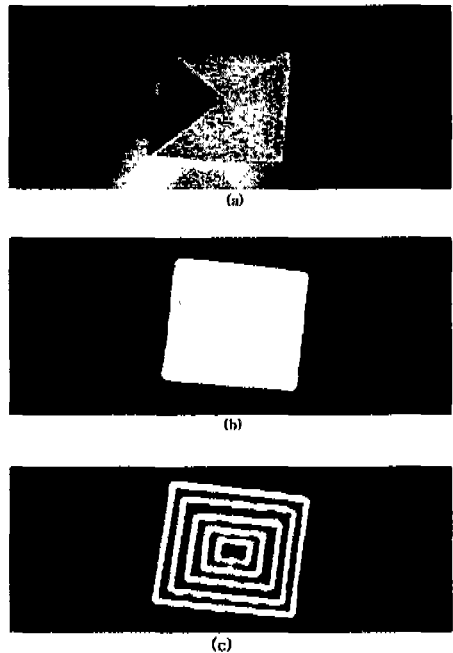


Fig. 10 (a) The image of the specular pyramid, (b) specular contours and (c) expansion curves

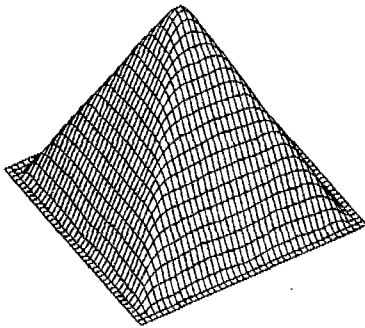


Fig. 11 The height of the specular pyramid is estimated from the specular contours

이때 모든 곡선은 같은 경사도를 나타내게 된다. Fig. 11은 이를 이용하여 3차원 정보를 구한 결과이다. 사각뿔의 밑면으로부터 4각형을 이루는 4개의 직선에 수직하게 따라 올라가면 사각뿔의 꼭지점에서 만나야 되는데 실제의 경우 영상 상의 노이즈와 양자화(quantization)오차로 인해 수렴하는 점이 어긋나게 된다. Fig. 11은 이러한 노이즈의 영향을 없애기 위하여 평균화에 의한 필터링을 한 결과이다. 모서리가 곡면을 이루고 있는 이유는 이 때문이다.

앞선 두 예제는 형상이 완전한 곡면과 경사면만이 존재하는 물체에 대하여 실험적으로 3차원 높이를 구하는 방법에 대하여 설명하였다. 좀 더 일반적이고 응용할 수 있는 대상으로 본 연구에서는 모형의 납땀에 대하여 실험하였다. 이러한 모형 납땀은 곡면과 경사면들이 섞여있으면서 평활한 면을 이루고 있다. Fig. 12(a)는 Fig. 5의 납땀에 모형을 본 실험 장치 내에서 잡은 카메라 영상이며, Fig. 12(b)는 링광원을 scanning하면서 얻은 등경사도 곡선을 나타낸다. 역시 거울을 사용하여 12개의 등경사도 곡선을 얻었다. 중간 부위는 등경사도 곡선의 간격이 매우 넓게 나타나는데, 이는 Fig. 5의 실제 형상을 보더라도 이 부분이 곡면이라기 보다는 넓은 경사면을 이루고 있음을 알 수 있다. 초기 등경사도 곡선은 Fig. 12(b)에서 제일 왼쪽의 곡선으로 잡아 초기 계산점을 선정하였다. 이 초기 곡선의 3차원 상의 높이는 납땀 바닥면의 높이와 일치한다고 가정하여 모두 0으로 초기 계산점의 값을 지정하였다. Fig. 12(c)는 이러한 등경사도 곡선을 따라 미리 정해진 계산점들로부터 식(13)에 의해 전파해 나간 궤적을 보여준다. Fig. 13은 본 알고리즘에 의해 계산된 모형 납땀의 3차원 높이값을 그린 결과이다. 실제로 모형 납땀부의

표면은 납을 입혀두었기 때문에 매우 경면이어서 일반적인 레이저와 같은 삼각도법의 원리를 이용한 3차원 측정기에서는 납표면의 경면 반사 특성 때문에 경면에 대해서는 측정이 불가능하다. 일반적으로 이러한 측정 장치들은 측정 표면이 거칠고, 편평한 면에서만 측정될 수 있으며, 경사면에서의 측정은 그 신뢰성이 떨어져서 실험시료인 모형 납땀에 대하여도 측정할 수 있는 범위가 매우 제한적이다. 이에 비하여 본 알고리즘에 의한 방법은 경사면에서도 측정이 가능하므로 이러한 제한점을 극복했다고 볼 수 있다.

본 연구에서 제시한 조명 장치와 알고리즘의 유용성을 보이기 위해서 위와 같이 3가지의 실험을 하였다. Characteristic strips expansion[®] 보다 안정된 해를 빠르게 구할 수 있었다. 본 연구에서는 초기 곡선을 구하기 위해서 거울을 사용하였는데 거울을 사용할 수 없는 경우는 다른 방법을 고안해야 하며, 이 알고리즘

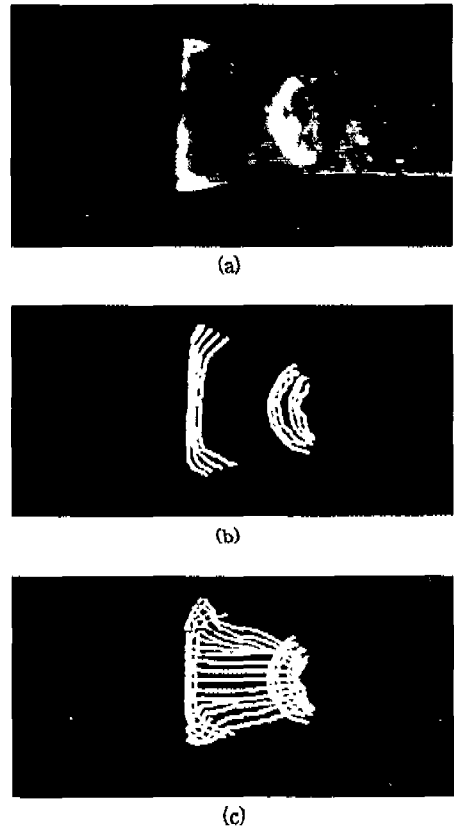


Fig. 12 (a) The image of the specular solder object, (b) specular contours and (c) expansion curves

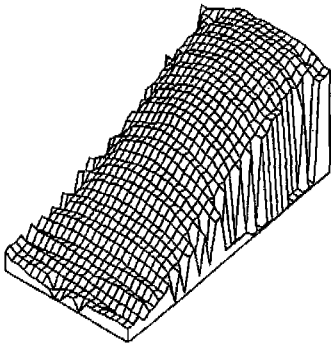


Fig. 13 The height of the specular solder object is estimated from the specular contours

의 정밀도에 대한 실험은 추후 과제로 한다.

5. 결 론

가공 물체의 맑은 부분을 차지하고 있는 경면 반사 물체는 입사한 빛을 매우 좁은 범위의 방향으로만 반사 시키기 때문에 제한된 조명과 고정된 카메라에 의해서 경면 반사 물체를 인식하는 것은 매우 어렵다는 것을 알았다. 따라서 특수한 조명 시스템의 설계와 알고리즘이 요구되는데 본 연구에서는 경면 반사 물체를 인식하기 위해서 링 조명을 사용하였고 물체의 형상에 의존한 등경사도 곡선을 얻었다. 우리는 링 조명을 scanning 하여 얻은 일련의 등경사도 곡선과 물체의 형상과의 관계를 유도함으로써 간단한 영상 처리로 3차원 경면 반사 물체의 형상을 구할 수 있었다.

그러나 경계선에서의 초기 조건이 필요하다는 점과 scanning해야 하는 문제점을 가지고 있다. 이를 해결하기 위하여 서로 다른 입사각을 갖는 몇 개의 링 광원을 동시에 조명하여 얻은 등경사도 곡선들을 사용하고 특정한 응용 분야에서 대상 물체가 취할 수 있는 자세나 형상에 제한을 설정함으로써 경계선에서의 초기 조건 없이 경면 반사 물체의 형상을 유추할 수 있는 알고리즘을 연구하고 있다.

참고문헌

1. R. Birk, R. B. Kelly, and H. A. S. Martines, "An orienting robot for feeding workpieces stored in bins," *IEEE Trans. Systems Man Cybernet.* SMC-11(2), pp.151~160, 1981.
2. G. Healey and T. O. Binford, "Local shape from specularly," *Computer Vision Graphics Image Processing*, 42, pp.62~86, 1988.
3. K. Ikeuchi, "Determining surface orientations of specular surfaces by using the photometric stereo method", *IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell.*, PAMI-3(6), pp.661~669, 1981.
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. on Robotics and Automation*, 6(2), pp.208~218, 1990.
5. 김천호, 김종형, 조형석, "등경사도 곡선을 이용한 경면 반사 물체의 인식", '93 기계공학춘계학술대회, pp.509~514, 1993.
6. K. Torrance and E. Sparrow, "Theory for off-specular reflection from roughness surfaces," *Journal of the Optical Society of America*, 57, pp.1105~1114, 1967.
7. B. K. P. Horn and M. J. Brooks, "The variational approach to shape from shading," *Comput. Vision Graphics Image Process*, 33, pp.174~208, 1986.
8. P. R. Garabedian, "Partial Differential Equations", Wiley, New York, 1964.
9. E. N. Coleman. Jr. and R. Jain, "Obtaining 3-D shape of textured and specular surfaces using four-source photometry," *Computer Graphics Image Process* 18, pp.309~328, 1982.
10. B. K. Horn, *Robot Vision*, McGraw-Hill Book Co., 1986.