

〈論 文〉

물체의 반사성질이 능동형광센서에 미치는 영향에 관한 연구

이철원* · 나석주**

(1994년 5월 23일 접수)

A Study on the Influence of the Object's Reflectance on the Active Range Finder

C. W. Lee and S. J. Na

Key Word : Active Range Finder(능동형 거리측정계), Specular Reflection(경면반사), Diffuse Reflection(난반사), Bidirectional Reflectance-Distribution Function(BRDF : 양방향 반사분포함수)

Abstract

Active range finders using laser beam have been widely used for the factory automation and quality assurance, but they may be unreliable if the object's slope is steep or its surface is specular. The reliability of an active range finder was analyzed for the variation of the reflected laser beam intensity. First, the properties of the object's reflection were modeled by using the bidirectional reflectance-distribution function(BRDF), and then the variation of the laser beam brightness was formulated for the different configuration of the object and sensor. The experimental data of the laser beam reflection were obtained for two materials, mild steel and stainless steel. The parameters of the proposed model were obtained by fitting the data of the mild steel to the model, and it was found that the results calculated from the proposed model were in good agreement with the experimental data.

1. 서 론

산업의 고도화에 따라 공장자동화와 품질관리를 위해 공작물의 형상을 측정할 수 있는 광 센서가 널리 쓰이고 있다. 산업현장에서 이용되는 대부분의 광센서는 신뢰도를 높이기 위해 레이저등의 외부광원을 이용하는데 이런 센서들은 외부광원을 이용하지 않는 수동형광센서(passive optical sensor)에 대해 능동형광센서(active optical sensor)로 구분된다. 능동형광센서는 다시 측정원리에 따라 광위상차를 이용한 방식과 광삼각법(optical triangulation)을 이용한 방식의 센서로 분류할 수 있다.

특히 광삼각법의 원리를 이용할 경우 짧은 시간에 제품의 3차원 형상을 정밀하고 신뢰성있게 얻을 수 있어 이 방식을 응용한 광센서의 개발이 활발히 이루어지고 있고 용접공정의 자동화에 널리 쓰이고 있다. 광삼각법을 응용한 능동형광센서에서는 먼저 레이저등의 단색광이 물체에 투사된 후 반사된 빛을 CCD소자등으로 감지한다. CCD소자에 맺힌 반사된 레이저광의 위치로부터 삼각법에 의해 물체까지의 거리를 측정하는 것이 광삼각법을 이용한 센서의 기본원리이다. 광삼각법을 이용한 능동형광센서는 크게 광원의 형태에 따라 투영된 패턴을 이용하는 방식과 점형태의 빛을 사용하는 주사빔(scanning beam)을 이용한 방식으로 구분할 수 있다.⁽¹⁾

광삼각법을 이용한 광센서는 외부광원을 사용하

*한국과학기술원 기계기술연구소

**정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

고 간단한 원리를 이용하여 물체까지의 거리 정보를 얻을 수 있으므로 알고리즘이 간단하고 신뢰도가 뛰어난 장점이 있으나 경면반사(specular reflection)와 경면반사에 의한 2차반사(secondary reflection) 및 그림자효과(shadow effect) 등의 문제를 지니고 있다.⁽²⁾ 특히 측정대상물이 경면성질을 지닐 경우 물체의 기울기에 따라 반사된 레이저빔의 차이가 심하여 물체의 정확한 3차원 형상을 얻는 것이 어려울 수 있으며, 2차반사에 의한 영상은 틀린 정보를 생성한다. 이와 같이 물체의 반사성질은 능동형광센서의 신뢰도와 밀접한 관련이 있으므로 능동형광센서의 신뢰도를 높이기 위해서는 물체의 반사성질을 고려하여 적절한 센서의 배치와 센서의 이동경로를 결정해야 한다. 본 연구에서는 센서의 신뢰도를 예측하여 최적의 센서배치와 센서경로를 결정하기 위해 측정대상물의 반사성질을 연구하였다. 먼저 측정물의 표면거칠기(surface roughness)에 따라 반사성질을 표면법선과 입사방향, 반사방향이 한 평면내에 있는 2차원배치에 대해 모델링하였고, 이로부터 이미지센서상의 레이저빔을 센서와 측정대상물의 기하학적 배치에 따라 수식화하였으며 두 물질에 대해 실험을 하여 수식화한 모델의 적용가능성을 검토하였다.

2. 수식화

2.1 반사모델

물체의 반사성질을 일반적으로 표현하기 위해 Fig. 1과 같이 국지좌표계(local coordinate system)를 사용하였는데, 임의의 방향은 국지좌표계에서 (ϕ, θ) 에 의해 표시된다. 이 좌표계에서 반사도의 일반적인 표기를 위해 BRDF(bidirectional reflectance-distribution function), f_r 을 다음과 같이 정의하였다.⁽³⁾

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; E_i)}{dE_i(\theta_i, \phi_i)} \quad (1)$$

여기서, $L_r(\theta_r, \phi_r)$ 은 (θ_r, ϕ_r) 방향으로의 복사도(radiance)를 뜻하고, $E_i(\theta_i, \phi_i)$ 는 (θ_i, ϕ_i) 방향으로의 조사도(irradiance)를 나타낸다. E_i 는 입사되는 복사도(incident radiance) L_i 에 의해 결정되고 다음과 같은 관계를 가진다.

$$dE_i(\theta_i, \phi_i) = L_i(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i d\omega_i \quad (2)$$

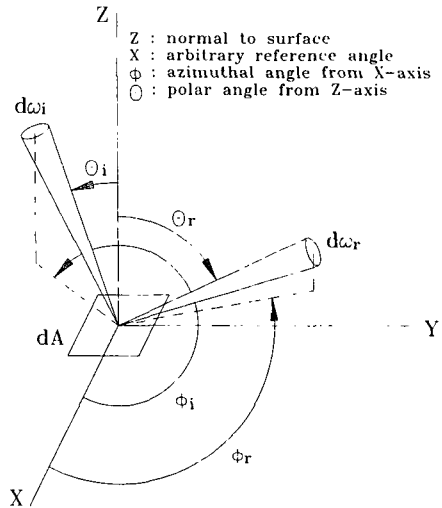


Fig. 1 Local geometry for defining BRDF⁽³⁾

여기서, $d\omega = \sin \theta d\theta d\phi$ 로 미소 스테라디안(steradian)이다. 식(2)를 표면반구상의 모든 방향에 대해 적분하면 그 점에서의 조사도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E_i = \int_{\omega} L_i \cos \theta_i d\omega_i \quad (3)$$

마찬가지로 식(1), (2)로부터 복사도 L_r 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$L_r = \int_{\omega} f_r L_i \cos \theta_i d\omega_i \quad (4)$$

지금까지 물체표면이 반사를 모델링하기 위해 많은 연구가 이루어져 왔으나 너무 복잡하여 수치해석에 의한 값만 얻을 수 있거나 혹은 너무 간단하여 실제와 일치하지 않는 경우가 많았다.⁽⁴⁾ 따라서 본 연구의 해석을 위해서는 대부분의 물체반사에 대한 BRDF f_r 이 크게 난반사성분 f_{ra} 와 경면반사 성분 f_{rs} 로 나누어질 수 있음을 고려하였다.

$$f_r = f_{ra} + f_{rs} \quad (5)$$

여기서, 난반사 성분은 보통 모든 방향으로의 복사가 일정한 Lambertian 모델로 표현되고 실제와 잘 일치하는 것으로 알려져 있다. 이 경우 BRDF는 일정하므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{ra} = a (= \text{constant}) \quad (6)$$

여기서, a 는 난반사의 정도를 나타내는 상수이다. Lambert의 cosine 법칙(Lambert's cosine law)에

Table 1 Calculation formulas for $G(\theta_i, \theta_r)$

$0^\circ \leq \theta_i \leq 45^\circ$		$45^\circ \leq \theta_i \leq 90^\circ$	
θ_r	$G(\theta_i, \theta_r)$	θ_r	$G(\theta_i, \theta_r)$
$-90^\circ \leq \theta_r \leq \frac{\theta_i - 180^\circ}{3}$	Eq.(a)	$-90^\circ \leq \theta_r \leq -\theta_i$	Eq.(a)
		$-\theta_i \leq \theta_r \leq 3\theta_i - 180^\circ$	Eq.(a) with $\theta_i \leftrightarrow \theta_r$
$\frac{\theta_i - 180^\circ}{3} \leq \theta_r \leq \frac{\theta_i + 180^\circ}{3}$	1	$3\theta_i - 180^\circ \leq \theta_r \leq \frac{\theta_i + 180^\circ}{3}$	1
$\frac{\theta_i + 180^\circ}{3} \leq \theta_r \leq 90^\circ$	Eq.(a)	$\frac{\theta_i + 180^\circ}{3} \leq \theta_r \leq 90^\circ$	Eq.(a)

*Eq.(a)

$$G(\theta_i, \theta_r) = 1 - \frac{1 - [1 - A^2]^{1/2}}{A}, \quad A = \frac{\sin^2 \theta_r - \cos^2[(\theta_r - \theta_i)/2]}{\cos^2[(\theta_r - \theta_i)/2] - \cos[\theta_r - \theta_i] \sin^2 \theta_r}$$

의해 난반사에 의한 복사도 L_d 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_d = a \int_{\omega} L_i \cos \theta_i d\omega; \quad (7)$$

따라서 난반사에 의한 복사도는 입사되는 에너지의 양에 비례함을 알 수 있다.

경면반사성분은 표면거칠기(surface roughness)에 따라 변하는데, 이는 보통 표면거칠기 R_q (rms value)와 빛의 파장 λ 의 비에 따라 다음과 같이 모델링된다.⁽⁵⁾

2.1.1 $R_q/\lambda > 1.5$ 인 경우

Torrance 등은 거친 물체의 표면이 임의로 배열된 경면요소들로 구성된 것으로 가정하여 그의 모델이 실제 실험치와 잘 일치됨을 보였으며, 실험치와의 비교를 통해 물체의 프레즈넬반사(Fresnel reflectance)가 BRDF의 형상에 큰 영향을 미치지 않음을 보였다.^(6,7) 각도변화에 따른 프레즈넬반사의 변화를 무시하고, 표면법선과 입사, 반사가 같은 평면에서 이루어질 경우, 즉 $\phi_i - \phi_r$ 이 $180^\circ, 0^\circ$ 일 때 Torrance-Sparrow 모델은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$f_{rs} = b[G(\theta_i, \theta_r)/\cos \theta_r] \exp(-c^2 \alpha^2)/\cos \theta_i \quad (8)$$

여기서, α 는 입사방향과 반사방향을 이등분하는 선이 표면법선과 이루는 각으로 $\alpha = (\theta_r - \theta_i)/2$ 이

다. b 는 경면반사성분의 비를 나타내고, c 는 경면요소 방향의 확률적 분포를 나타내며, $G(\theta_i, \theta_r)$ 은 인근의 경면요소에 의한 영향을 고려한 항으로 Table 1에 이를 정리하였다.

2.1.2 $R_q/\lambda \ll 1$ 인 경우

거울과 같은 반사형태를 나타내고, $\phi_i - \phi_r = 180^\circ, 0^\circ$ 인 경우 경면반사성분은 다음과 같이 모델링된다.

$$f_{rs} = \frac{b\delta(\theta_i - \theta_r)}{\sin \theta_i \cos \theta_i} \quad (9)$$

2.1.3 $R_q/\lambda \cong 1$ 인 경우

파동광학을 적용한 광학모델을 적용해야 하며 위와 같이 간단한 수식으로 표현하기가 어렵다. 거울에서 나타나는 경면반사에 의한 피크치가 나타나기 시작하며 이를 Torrance-Sparrow 모델로 표현할 경우 큰 오차가 발생할 수 있으나, 피크치가 나타나지 않는 범위($\theta_i \approx \theta_r$)에서는 Torrance-Sparrow 모델이 어느 정도 실제와 일치하는 것으로 알려져 있다.

위의 관계식들로부터 물체의 표면거칠기와 입사광의 파장비가 1.5보다 크거나 아주 작을 경우 물체의 반사성질이 센서의 기하학적 배치를 나타내는 입사각과 반사각의 두 독립변수의 간단한 수식으로 모델링되고, 이를 위해서 몇 개의 매개변수의 값을 알아야 함을 알 수 있다. 즉, 거친 물체에 대해

Torrance-Sparrow 모델을 적용하기 위해서는 난 반사성분 a 에 대한 경면반사성분의 크기를 나타내는 상수 b 와 경면요소의 확률적 분포를 나타내는 c 의 크기를 알아야 하고, 아주 매끄러운 물체에 대해서는 난반사성분에 대한 경면피크치 (specular peak)의 크기를 나타내는 b 의 크기를 구해야 한다. 본 연구에서는 Torrance-Sparrow 모델에 대한 매개변수를 실험을 통해 구하였다.

2.2 레이저광의 반사모델링

레이저를 이용한 광센서에서 사용되는 레이저는 그 방식에 따라 평면(투영된 패턴을 이용한 방식)이나 점(주사빔을 이용한 방식)의 형태를 이루게 된다. 투영된 패턴을 이용할 경우 원통형 렌즈를 사용하고, 주사빔 방식에서는 볼록렌즈를 사용한다. 보통 측정 깊이범위 (depth of field)를 크게 하기 위해 렌즈의 초점거리를 길게 하는데 이런 경우 일정 범위에서 이를 평행광으로 가정할 수 있다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 입사각 θ_{io} 로 조사되는 평행광의 입사되는 복사도는 확장된 광원 (extended source)의 특별한 경우로서 다음과 같이 표현할 수 있다.⁽⁸⁾

$$L_r = E_o \delta(\theta_i - \theta_{io}) / \sin \theta_{io} \quad (10)$$

여기서, E_o 는 표면이 평행광에 수직할 경우도 조사도이다. 식(4)와 식(10)으로부터 θ_{ro} 방향으로의 반사된 복사도 L_r 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$L_r = f_r(\theta_{io}, \theta_{ro}) E_o \cos \theta_{io} \quad (11)$$

2.3 영상화 모델링

레이저빔은 물체에 반사된 후 카메라렌즈에 의해 집광되어 영상면에 상을 이루게 된다. (Fig. 3) 물체의 한 점에서 반사에 의한 복사도 L_r 과 영상평면 (image plane) 상의 대응되는 점의 입사 E 의 관계는 다음과 같이 모델링할 수 있다.⁽⁴⁾

$$E = \left[\frac{\pi}{4} \cos^4 \zeta / (f/d)^2 \right] L_r \quad (12)$$

여기서, ζ 는 렌즈의 광축 (optical axis)이 렌즈중심과 대응되는 물체의 점을 잇는 선과 이루는 각이고, $(f/d)^2$ 는 카메라의 노출 (F number)이다. 레이저를 이용한 광센서에서 카메라가 보는 범위가 매우 작으므로 ζ 의 변화에 의한 항은 거의 무시할

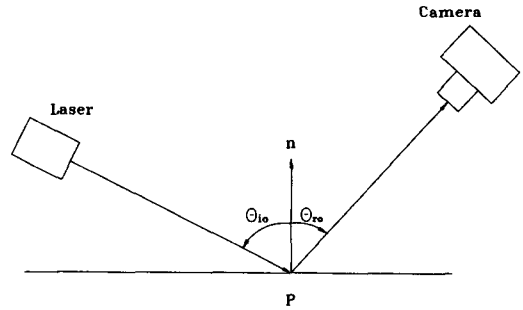


Fig. 2 Geometry for laser reflection modeling

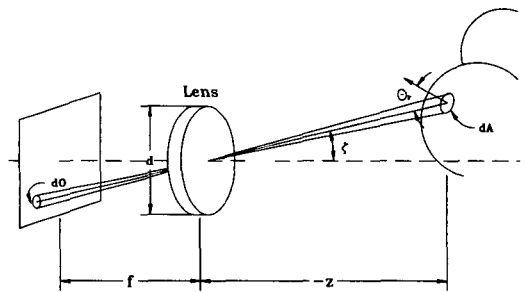


Fig. 3 Image forming system

만하다. 따라서 물체의 복사와 영상의 입사 E 는 서로 정비례하는 관계임을 알 수 있다.

이미지센서는 이렇게 센서에 입사된 조사도를 영상신호로 바꿔 주는데 이 영상신호를 G_I 라 한다면,

$$G_I = \rho E^\gamma \quad (13)$$

의 관계가 있다. 여기서, ρ 는 비례상수이고 γ 를 γ 특성이라 부르며 계측용으로는 이 값을 1로 설정하고 있다. 이 경우 센서에 입사된 조사도 E 와 영상레벨 (gray level)이 선형적으로 비례한다.

2.4 레이저의 영상 밝기

물체에서 반사된 레이저에 의한 영상밝기 G_I 는 식(11)~(13)로부터 다음과 같이 유도된다.

$$G_I(\lambda_c) = K [E_o f_r(\theta_{io}, \theta_{ro}) \cos \theta_{io}]^\gamma \quad (14)$$

단, 여기서, K 는 비례상수이다.

식(14)에서 보는 바와 같이 물체에 반사된 레이저의 밝기는 카메라의 γ 특성이 1일 경우 입사된 에너지의 양 $E_o \cos \theta_{io}$ 에 정비례한다. 한편 광원의 출력인 E_o 가 일정할 경우 레이저의 반사된 밝기는 물체의 BRDF와 입사각의 cosine항에 의해 결정됨

을 알 수 있다. 따라서 2-1의 기하광학을 이용한 반사모델을 적용할 경우 입사각과 반사각, 즉 센서와 측정물의 배치에 따라 물체에 반사된 레이저의 상대적인 영상밝기를 예측할 수 있음을 알 수 있다.

3. 실험

3.1 실험목적

2.4에서 수식화된 식(14)에서 보는 바와 같이 물체 기울기에 따른 반사된 레이저광의 밝기변화는 물체의 반사성질, 즉 BRDF에 의해 좌우되고, 이 BRDF는 물체 거칠기 대 광원의 파장비에 다르게 모델링된다. 따라서, 본 장의 실험목적은 표면거칠기에 따라 앞에서 모델링한 BRDF의 적용이 타당한지 확인하고 BRDF의 매개변수들을 구하는 것이다.

3.2 실험장치

전체적인 실험장치의 구성은 Fig. 4와 같다. 광원으로는 690 nm의 파장을 가진 평행광화된 점광원 형태의 다이오드 레이저를 사용하였고, 카메라로는 γ 특성이 0.45인 CCD카메라를 사용하였다. 앞의 반사모델링시 거칠기 대 파장비에 따라 반사모델을 세운 것에 맞추어 외부 광원의 영향없이 레이저파장대의 빛만을 투과시키도록 FWHM이 11 nm이고

중심파장이 레이저와 일치하는 대역필터를 카메라 앞에 부착시켰다. 실험대상시편으로는 SUS 304와 열연강판을 사용하였으며 각 시편의 표면거칠기 및 R_q/λ 비를 Table 2에 정리하였다.

3.3 실험방법 및 실험결과 처리

반사된 레이저광의 밝기는 식(14)에서 보는 바와 같이 레이저광의 출력, 카메라의 노출, 카메라의 이득 등에 따라 달라진다. 따라서 실험대상의 물체에 대해 BRDF의 분포를 알려면 기준위치에 대해 표준화를 해야 한다. 처음 실험에서는 입사각을 고정시킨 상태에서 반사각을 변화시키면서 측정된 레이저광을 각 입사각과 동일각의 반사각의 레이저밝기에 대해 표준화하였다. 실험시 각 입사각에 대해서는 레이저광의 출력, 카메라노출, 카메라이득 등을 일정하게 하였다. 이 경우 각 입사각에 대해 실험데이터들은 식(14)로부터 다음과 같이 표준화된다.

$$\frac{f_r(\theta_{io}, \theta_{ro})}{f_r(\theta_{io}, \theta_{io})} = \left[\frac{G_i(\theta_{io}, \theta_{ro}) - G_{off}}{G_i(\theta_{io}, \theta_{io}) - G_{off}} \right]^{1/\gamma} \quad (15)$$

여기서, G_{off} 는 각 측정배치에 대해 레이저를 발생시키지 않았을 때 주위 광원에 의한 영상밝기이다.

다음에는 각 입사각에 대한 BRDF의 형상을 알기 위해 반사각을 θ_{ro}^* 로 고정시킨 상태에서 입사각을 변화시키면서 반사된 레이저광을 측정하였다. 이 결과를 입사각이 10°인 경우에 대해 표준화하였는데 식(14)로부터 다음 식과 같은 방법을 사용하였다.

$$\frac{f_r(\theta_{io}, \theta_{ro}^*)}{f_r(10^\circ, \theta_{ro}^*)} = \left[\frac{G_i(\theta_{io}, \theta_{ro}^*) - G_{off}}{G_i(10^\circ, \theta_{ro}^*) - G_{off}} \right]^{1/\gamma} \frac{\cos 10^\circ}{\cos \theta_{io}} \quad (16a)$$

또한 연강에 대해서는 회귀분석(regression analysis)을 하기 위해 입사각이 50°인 레이저 밝기에 대해 표준화하였는데 표준화 공식은 식(16a)와 마찬가지로 다음과 같이 구해진다.

$$\frac{f_r(\theta_{io}, \theta_{ro}^*)}{f_r(50^\circ, \theta_{ro}^*)} = \left[\frac{G_i(\theta_{io}, \theta_{ro}^*) - G_{off}}{G_i(50^\circ, \theta_{ro}^*) - G_{off}} \right]^{1/\gamma} \frac{\cos 50^\circ}{\cos \theta_{io}} \quad (16b)$$

물체의 전체적인 BRDF의 분포는 식(15)와 식(16a)에 의해 $f_r(10^\circ, \theta_{ro}^*)$ 나 $f_r(50^\circ, \theta_{ro}^*)$ 에 대해 표준화하여 나타낼 수 있다.

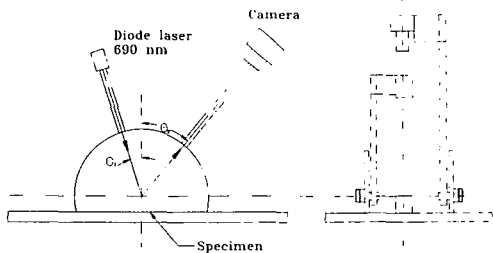


Fig. 4 Apparatus for measuring laser reflection

Table 2 Specimens for experiment

	Mild steel	SUS 304
$R_q(\mu m)$	1.44	0.16
R_q/λ	2.1	0.23
Processing	Hot rolled	Cold rolled

3.4 실험결과 및 고찰

Fig. 5는 Torrance-Sparrow 모델의 적용이 가능할 것으로 예상된 열연강판에 대한 실험결과로써, 10°에서 80° 사이의 입사각에 대해 반사각을 변화시키면서 반사된 레이저광의 밝기를 측정하는 것이

다. Fig. 5(a)는 CCD 카메라에 측정된 레이저의 영상밝기이고 Fig. 5(b)는 이를 식(15)에 의해 표준화한 결과이다. 경면로브(specular lobe)가 존재하고 입사각이 클 경우 거울반사의 형태를 보임을 알 수 있는데 이는 Torrance-Sparrow 모델과 일치

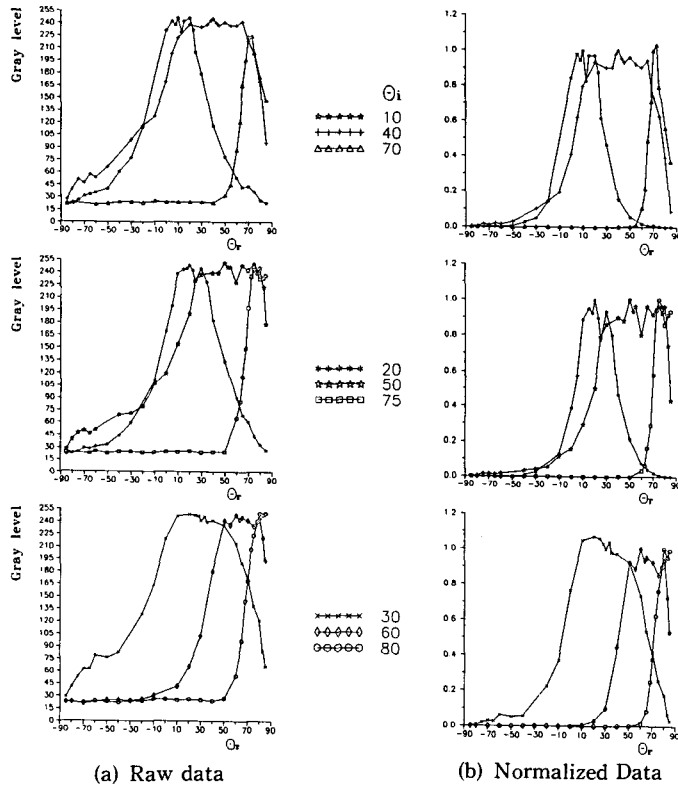


Fig. 5 BRDF distribution of mild steel

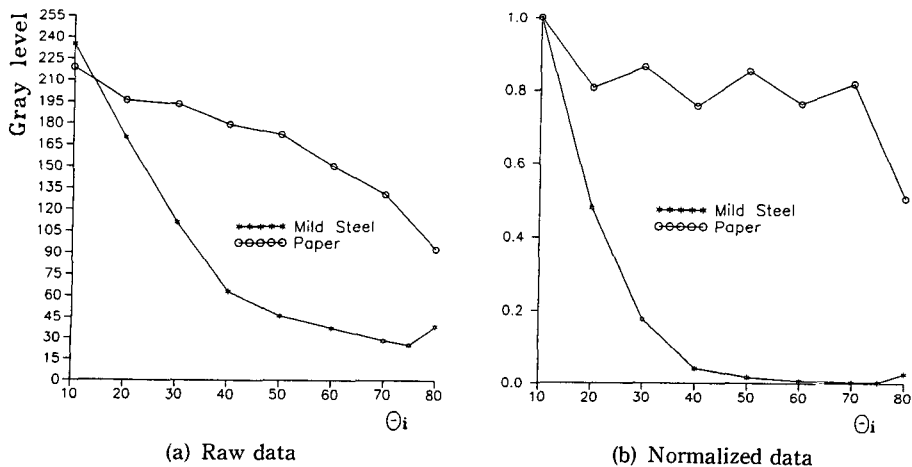


Fig. 6 Normal BRDF of paper and mild steel

하는 결과이다. 그러나, 실험에 사용한 CCD카메라가 측정할 수 있는 빛의 가장 큰 강도와 가장 작은 강도의 비인 동적영역(dynamic range)이 작아 경면반사영역에서는 CCD카메라가 포화되고, 난반사영역에서는 CCD카메라가 약한 빛의 세기를 측정할 수 없어 이부분의 BRDF의 형상을 얻기가 어려웠다.

Fig. 6(a)는 θ_i 가 0° 인 반사각에 대해 입사각을 변화시키면서 반사된 레이저의 밝기변화를 실험한 결과이고, Fig. 6(b)는 식(16a)에 의해 입사각이 10° 일 때의 레이저밝기에 대해 표준화한 결과이다. 비교를 위해 종이에 대해서도 같은 실험을 하였는데, 두 결과의 비교를 통해서 종이는 난반사물체의 특성을 보이는 반면 열연강판은 경면반사성질이 비교적 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이 입사각이 40° 보다 클 경우에는 열연강판에서 반사된 레이저의 밝기분포가 레이저를 발생시키지 않은 상태에서 CCD카메라에 감지되는 밝기크기와 거의 같아지게 되어 의미 있는 결과를 얻기가 힘들 것으로 예상되었고, 이 실험결과로부터 전체 BRDF의 형상을 추정할 경우 측정치는 이론치와 큰 차이를 보일 것으로 예상되었다. 따라서 Fig. 7에서와 같이 θ_i 가 50° 인 반사각에 대해 입사각을 변화시키면서 측정된 영상 밝기의 결과를 이용하였다. 그 결과 밝기분포가 경면최고치를 크게 벗어난 입사각에 대해서도 어느 정도의 영상밝기 수준이 유지되므로 Fig. 6(a)에 비해 그 부분의 데이터가 의미를 가짐을 알 수 있

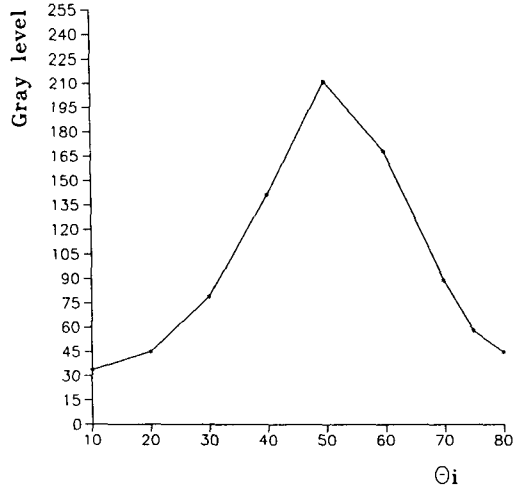


Fig. 7 Image intensity distribution of mild steel for $\theta_i = 50^\circ$

Table 3 Results of nonlinear regression for mild steel using Gauss-Newton method

	b/a	c ²
Obtained value	1.87	51.4
Asymptotic standard error	1.80	19.8

었다.

Fig. 7의 결과를 식(16b)에 따라 입사각과 반사각이 각각 50° 인 때에 카메라에 측정된 영상밝기에

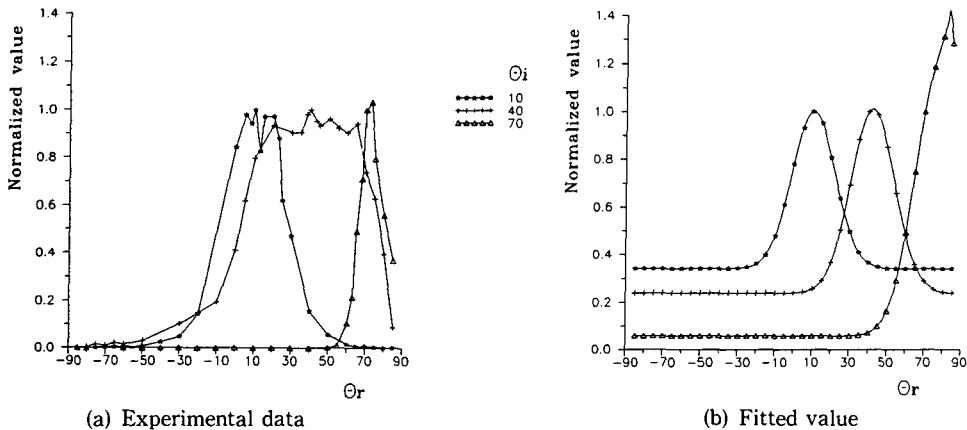


Fig. 8 Comparison between experimental data and theoretical BRDF of mild steel

대해 표준화하여 다시 이것으로 Fig. 5의 결과를 표준화하였다. 이렇게 얻은 BRDF 분포에 대해 식 (5)에 Lambertian 모델과 Torrance-Sparrow 모델을 적용한 식을 Gauss-Newton 방법을 이용하여 비선형 회귀분석하였는데, 회귀분석을 통해 얻은 반사모델의 매개변수는 Table 3에서와 같다. Fig. 8과 Fig. 9는 이렇게 얻은 매개변수를 이용하여 열연강판에 대해서 얻은 이론치와 실험치를 비교하기 위해 나타낸 것이다. 나타난 그래프들을 비교한 결과 Torrance-Sparrow 모델에 의해 실험치의 대체적 경향을 나타낼 수 있으나, 입사각과 반사각이 같을 때의 경면반사성분과 입사각과 반사각이 다를 때의 난반사성분의 비를 정확히 모델링할 수는 없음을 알 수 있었다. Fig. 8의 모델 해석결과로부터 열연강판에 대해 이론치와 해석치가 모두 Torrance-Sparrow 모델에서 예측되는 바와 같이 경면 최고치를 중심으로 한 경면로브의 존재를 보임을 알 수 있었다. 반면에 입사각이 작은 경우에 Torrance-Sparrow 모델에서 예측되는 모든 반사각 범위에 걸쳐 난반사성질이 커지는 현상을 실험 결과에서는 볼 수 없었다. 이 현상은 CCD 카메라의 각 화점(pixel)의 유한한 크기를 갖고 이에 따른 물체상의 측정범위가 유한한 크기를 갖기 때문에 발생하는 것으로 판단된다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 반사각이 증가할수록 화점에 해당하는 물체상의 면적이 증가하고, 레이저광의 밝기분포는 Gaussian 형태로 가정할 수 있으므로 해

당하는 물체상의 면적이 증가할수록 화점에 해당하는 레이저의 평균밝기가 감소한다. Fig. 11은 레이저광의 단면 밝기분포가 Gaussian 형태일 때 실험에 사용된 레이저의 밝기 분포와 카메라 배율에 대해 이 현상을 시뮬레이션한 결과이다. 입사각이 작을수록 반사각의 크기변화에 따른 밝기변화의 크기가 더 커짐을 알 수 있다.

Fig. 12는 스테인레스강에 대한 실험결과인데, 밝기변화가 카메라의 동적영역을 넘기 때문에 표준화는 할 수 없었다. 여러 가지 입사각에 대한 반사각에 따른 밝기변화의 결과로부터 경면반사 성질이 심하게 나타남을 알 수 있다. 카메라노출이 증가함

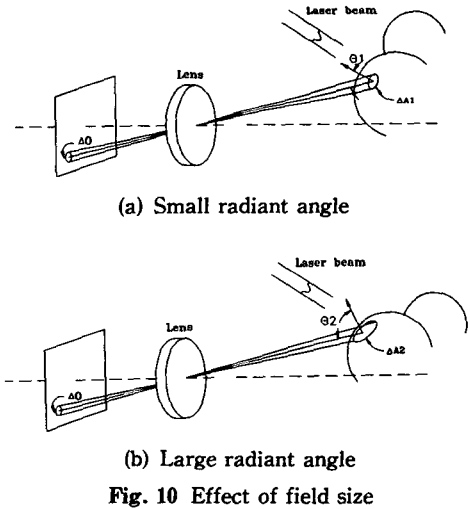


Fig. 10 Effect of field size

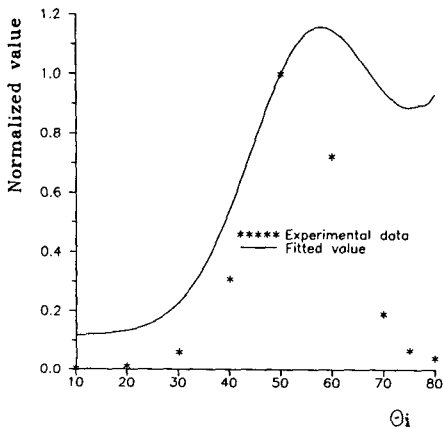


Fig. 9 Comparison between experimental data and theoretical BRDF distribution of mild steel for $\theta_i = 50^\circ$

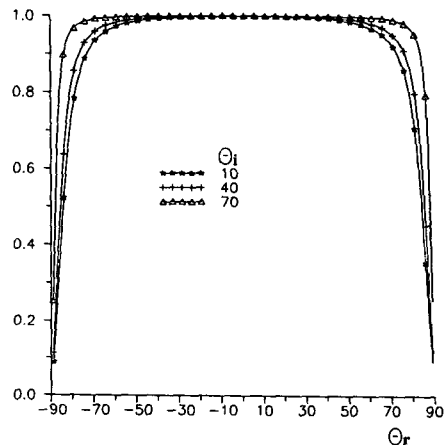
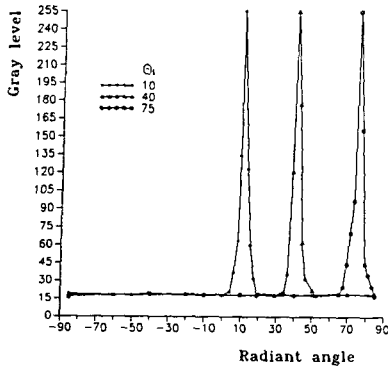
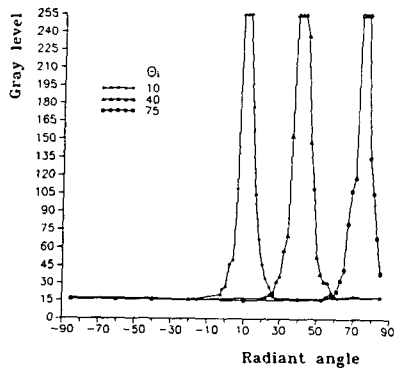


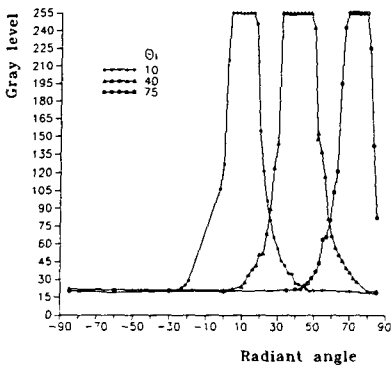
Fig. 11 Simulation results for effect of field size with different incident angle



(a) F no. = 16



(b) F no. = 8



(c) F no. = 4

Fig. 12 Reflectance distribution of stainless steel

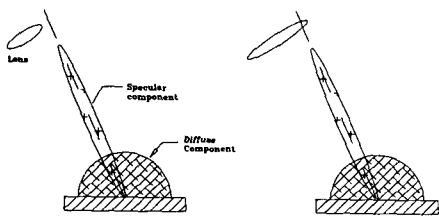


Fig. 13 Effect of lens diameter on specular reflection

에 따라 경면반사영역이 커지는 것처럼 보이는데 이는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 카메라의 유효적경이 증가하면서 측정지점에 대한 렌즈의 유효스테라디안이 증가하기 때문으로 추정된다.

4. 결론

능동형광센서를 이용하면 일반적으로 외부광원 등에 의해 큰 영향을 받지 않고 물체의 3차원 형상을 신뢰성 있게 측정할 수 있으나, 표면의 기울기변화가 심한 물체의 형상을 광센서로 측정하는 경우 경면반사, 레이저영상 밝기부족 등의 문제가 발생하여 센서의 신뢰도가 크게 낮아진다. 이런 현상들은 물체의 반사특성에 따라 발생하는 것으로 센서의 신뢰도를 높이기 위해서는 측정 대상물의 반사성질을 고려하여 센서를 설계해야 한다. 본 연구에서는 물체의 반사성질을 나타내는 BRDF로 반사모델을 세웠고 이를 이용하여 센서와 측정대상물의 2차원 배치에 따른 레이저광의 밝기를 수식화하였다. 두 가지 재질에 대해 실험을 수행하여 앞에서 설정한 반사모델을 적용할 수 있는지를 확인해 보았다. 회귀분석결과 열연강판에 대해서는 Torrance-Sparrow모델로 실험결과를 대체적으로 모델링할 수 있음을 알 수 있었고 스테인리스강에 대해서는 렌즈의 유효 직경을 고려함으로써 거울반사모델을 적용할 수 있다고 판단되었으나 실험에 사용한 CCD카메라의 동적영역이 작아 경면반사성분의 크기 대 난반사성분의 크기의 비를 정확히 구할 수는 없었다. 앞으로 동적영역이 큰 이미지 센서를 사용하여 실험을 하거나, 평행광원이 아닌 확장된 광원을 사용하여 실험함으로써 이 문제를 해결할 수 있으리라 생각된다.

본 연구결과를 이용하면 기울기변화가 심한 물체의 3차원 형상을 능동형광센서로 측정할 때 광원과 이미지센서의 배치와 물체에 대한 광센서의 이동 경로를 최적으로 결정하여 3차원 영상정보 습득에 대한 신뢰도를 높일 수 있을 것으로 기대된다. 제안된 모델을 개선하기 위해서는 측정물의 프레즈넬 반사와 광학계의 유효 스테라디안, 이미지센서의 화점 크기 등을 고려하여 반사모델을 보완할 필요가 있다. 또한 표면법선과 입사방향, 반사방향이 같은 평면에 있지 않는 3차원 배치에 대해 수식화함으로써 본 연구결과와 효율도를 높일 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 1993년도 국민은행 기술개발 지원사업의 연구비지원에 의한 결과의 일부로서 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Richardson, R. W., 1988, "Control of Welding Using Optical Sensing," *Industrial Optical Sensing, SPIE*, Vol. 961, pp. 95~113.
- (2) Nitzan, D., 1988, "Three-Dimensional Vision Structure for Robot Applications," *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 10, No. 3, pp. 291~309.
- (3) Nicodemus, F. E., Richmond, J. C., Hsia, J. J., Ginsberg, I. W. and Limperis, T., 1977, "Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance," *NBS Monograph 160, National Bureau of Standards, Washinton, D. C.*
- (4) Horn, B. K. P., 1986, "Robot Vision," MIT Press
- (5) Nayar, S. K., Ikeuchi, K. and Kanade, T., 1990, "Determining Shape and Reflectance of Hybrid Surfaces by Photometric Sampling," *IEEE Trans. on Robotics and Automations*, Vol. 6, No. 4, pp. 418~431.
- (6) Torrance, K. E. and Sparrow, E. M., 1967, "Theory for Off-Specular Reflection from Roughened Surfaces," *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 57, No. 9, pp. 1105~1114.
- (7) Torrance, K. E. and Sparrow, E. M., 1966, "Off-Specular Peaks in the Directional Distribution of Reflected Thermal Radiation," *Journal of Heat Transfer — Trans. of ASME(C)*, Vol. 88, No. 2, pp. 223~230
- (8) Horn, B. K. P. and Sjoberg R. W., 1979, "Calculating the Reflectance Map," *Applied Optics*, Vol. 18, No. 11, pp. 1770~1779