

# 간접 확산 조명을 이용한 혼성반사 표면의 3차원 형상 취득

正會員 金 泰 銀\*, 宋 浩 根\*, 崔 宗 秀\*\*

## Obtaining 3-dimensional Shape of Hybrid Reflectance Surfaces using Indirect Diffuse Illumination

Tae Eun Kim\*, Ho Keun Song\*, Jong Soo Choi\*\* *Regular Members*

이 논문은 한국과학재단 제어계측신기술연구센터 지원에 의해 연구되었음

### 要 約

본 논문에서는 간접 확산 조명을 이용하여 명암 영상으로부터 3차원 형상을 복원하는 새로운 방법을 제시한다. 일반적으로 측광 입체시법에서는 직접조명에 근간하는데 본 연구에서는 측광 입체시법에 간접 확산 조명을 도입하여 반사함수를 유도하고 난반사 성분과 전반사 성분의 합으로 이루어진 혼성 반사모델에 이 반사함수를 적용하였다. 혼성 반사물체와 간접 확산 조명으로 이루어진 환경 하에서, 대상물체면의 3차원 형상은 표면의 법선벡터로부터 복원되는데 이때 표면 법선벡터는 각 화소의 표면 거칠기, 전반사와 난반사의 비율 그리고 밝기값에서 계산된다. 본 방법은 3차원 참조표를 사용하기 때문에 연산 속도가 빠르며 기존 연구들에서 존재했던 반사함수에 대한 제약조건들을 간략화시켰고 기존의 연구들보다 복구효율도 좋을 수 있었다. 또한 본 방법은 일반적인 반사함수로 정의되었으므로 다양한 형태의 면에 적용이 가능하다.

### ABSTRACT

A new approach is presented for recovering the 3-D shape from shading image. Photometric Stereo Method (PSM) is generally based on the direct illumination. In this paper, the reflectance function is derived by introducing the indirect diffuse illumination in PSM and then applied to hybrid reflectance model which consists

\*중앙대학교 전자공학과  
Dept. of Electronic Eng., Chung-ang Univ.  
\*\* 한국과학재단 제어계측신기술연구센터  
Engineering Research Center for Advanced Control and  
Instrumentation by KOSEF  
論文番號: 95209-0610  
接受日字: 1995년 6월 10일

of two components: the Lambertian reflectance and the specular reflectance. Under the hybrid reflectance model and the indirect diffuse illumination circumstances, the 3-D shape of objects can be recovered from the surface normal vector extracted from the surface roughness, the surface reflectance ratio, and the intensity value of a pixel. This method is rapid because of using the reference table and simplifies the restriction condition about the reflectance function existing in prior studies. The recovery efficiency in our method is better than that in prior studies. Also, this method is applied to various types of surfaces by defining general reflectance function.

## 1. 서 론

컴퓨터 비전에서 영상의 밝기 정보로부터 물체의 3차원 정보를 얻고자 하는 문제는 과거 10여년 전부터 많은 연구가 진행 되어왔다. 이러한 문제의 해결은 물체인식 문제를 푸는데 필수적인 요소로서, 특히 산업 현장에서 실제적인 응용을 위해서도 많은 기여가 기대된다. 하지만 일반적으로 조명원, 면반사 특성, 물체에 대한 기하학적 정보등을 포함한 여러요소들에 대해 정확한 모델을 얻어야 하는 어려움이 존재하고, 좀더 일반화시키는 작업이 필요하다. 카메라로 입력된 영상에서 화소의 밝기는 물체의 모양, 물체 표면의 반사 성질, 조명 상태, 영상 획득 장치의 특성 등에 의해서 결정된다.<sup>[1]</sup> 특히 고정되어 있는 환경 하에서, 영상의 한 점의 밝기는 센서가 영상점 대응 물체 표면에서의 반사광량을 얼마만큼 수광했느냐에 의존하는데, 이 양은 물체표면 입사광량, 표면성질, 방향 등에 따라 달라진다. 그러므로 물체의 형상을 복구하기 위해서는 반사 성질을 잘 이해하고 정확하게 모델링하여야 한다.

기존의 형상복구 방법들에서는 표면의 반사 성질을 전반사(specular reflectance) 또는 난반사(Lambertian reflectance)등 한가지로 가정해 놓고 문제를 풀어 나갔다.<sup>[2]</sup> 그러나 실제로 우리가 접하는 많은 물체의 표면은 두 가지 성질을 모두 가지고 있는, 즉 반사량을 두 가지 성분의 선형 조합으로 나타낼 수 있는 혼성 반사(hybrid reflectance) 성질을 가진다.<sup>[3]</sup> 이러한 혼성 반사 표면에 대한 3차원 형상복구에 대한 연구들로서는 Bakshi의 General Shading logic algorithm (G.S.I.)과 K.M.Lee의 실제세계에 근접한 반사모델이 있다. Bakshi의 G.S.I algorithm에서는 표면 기울기의 변화가 완만하다는 가정과 임의의 면소 밝기는 이웃면소 밝기와 최소한의 변화를 갖는다고 가정하여 반복적인(iteration) 계산방법으로 평면 영상으로부터 표면

법선 정보를 얻어내고자 했다.<sup>[4]</sup> 그리고 K.M.Lee는 원근투사(perspective projection)와 면소를 작은 삼각형(triangular surface patch)의 집합이라는 개념을 도입하여 3차원 형상복구 문제를 해결하고자 했다.<sup>[6]</sup> 이러한 방법들은 난반사 표면에 적용되는 농담정보에서 형상복구(shape from shading)의 방법들을 혼성 반사면의 인식에까지 확장한 연구들로서 대상물체의 면반사 특성이 제약이 많고 대상물체의 형태도 완만한 변화를 가진 면이라는 한계가 있다. 앞서 언급한 모델과 다른 혼성 반사면 복구 연구들로는, Healey의 모델과 E.J.Jung의 모델이 있다. Healey는 면의 가장 밝은 부분에서 얻어진 광휘점(specular highlight)을 이용하여 면의 곡률특성을 결정하려 하였고<sup>[7]</sup>, E.J. Jung은 크기와 위치가 서로 다른 3개의 환형 조명을 사용하여 물체에서 가장 밝은 환형띠를 추출해서 전 반사 특성이 강한 물체의 형상복구를 시도하였다.<sup>[8]</sup> 그러나 이들 연구들은 광휘점을 이용하므로 혼성 반사면 형상복구에는 적용하기 어렵다.

본 논문에서는 평면 영상으로부터 물체의 3차원 정보를 얻어 내고자 할 때 상대적으로 중요한 조명원, 면반사 특성 및 기하광학 관계를 정성적으로 해석하고 최종적으로 3차원 정보를 얻는 새로운 접근방식을 제시하였다. 물체의 반사 성분을 난반사와 전반사의 두 가지 성분의 합으로 보는 혼성 반사 모델(hybrid reflectance model)을 대상으로 농담정보에서 형상복구의 한 분야인 측광 입체시법(Photometric Stereo Method)<sup>[9]</sup>에 근접한 간접 확산 조명 기법을 도입하였다. 구체적으로는 혼성 반사 모델과 간접 확산 조명 방식하에서, 대상 물체면의 밝기 분포 비율과 표면 법선 벡터와의 관계로부터 반사합수를 유도하고, 이 함수를 카메라로 입력된 물체 화소의 밝기값에 적용하여 얻어진 법선 벡터로부터 물체의 3차원 형상을 복구할 수 있다. 이 방법은 3차원 참조표를 이용하므로 속도가 빠르고, 기존 연구들에 존재했던 반사 합

수<sup>5,6</sup>에 대한 제약 조건들을 간략화시켰고 반사함수를 보다 일반적인 반사 함수로 유도하였으므로 다양한 종류의 표면에 적용이 가능하다. 특히, 간접 확산 조명 방법은 표면의 거침(roughness)정도가 균일하고 임의로 크기를 조절할 수 있는 원반면에 빛의 세기가 일정한 광원을 조사 하였을 때 반사되어 나오는 조도(illumination) 즉, 산란 정도가 고르고 높은 포괄적 비방향적(non-directional) 조도를 조명원으로 이용하기 때문에 대상면의 반짝임을 감소시키거나 제거하는 효과가 크다. 따라서 간접 확산 조명은 전반사 또는 밝은(shinny) 부분에 조사(illumination)하기가 용이하다.<sup>[11]</sup> 또한, 간접 확산 조명 방법은 일반 산업 현장에서 실제적으로 적용할 수 있도록 시스템 구조가 간단하며, 작업장에서 흔히 볼 수 있는 대상물체의 혼성 반사면에 대한 복구 효율도 좋음을 볼 수 있다. 적용 가능한 분야로서는 혼성 반사 성분이 강한 전자 부품, 공구 표면, 동전 면 인식, 납땀 면 시각 검사 등에 응용할 수 있다.

본 논문의 구성은 II장에서 간접 확산 조명 기법에 대한 설명과, 원반형 광원의 기하광학 모델에 대한 설정, 그리고 표면 반사 함수 유도과정을 설명한다. 또한 유도된 표면 반사 함수를 반구에 적용하여 만들어진 3차원 참조표(밝기 분포도)를 보인다. III장에서는 표면 반사 함수를 실험 깊이영상(experimental depth image)에 적용하여 생성한 명암영상(shading image)을 보이고 IV장에서는 간접 확산 조명기법이 적용된 명암영상과 II장에서 이미 만들어진 3차원 참조표(밝기 분포도)와의 사상화(matching)에 의해서 계산된 결과값들을 보인다. V장에서는 기지의 깊이영상(depth image)의 3차원 정보(normal vector)와 제안한 알고리즘을 이용하여 복구한 정보(normal vector)와의 화소대 화소(pixel by pixel) 비교에 의해 오차각을 계산하고 분석한다. 끝으로 VI장에서는 본 연구의 의미부여 및 결론을 내린다.

## II. 간접 확산 조명 기법

간접 확산 조명 기법은 산란 정도가 높은 포괄적 비방향적(non-directional) 조명으로 반짝임을 감소시키거나 제거하고, 전반사 또는 반짝거리는(shinny) 부분에 조사시키기가 용이하다.<sup>[11]</sup>

### II-1. 원반형 광원에 대한 기하광학 모델

간접 확산 조명 기법(Indirect Diffuse Illumination Method)의 원반형 광원에 대해 설명한다. 원반형 난반사면에 점광원을 투사(projection)시켰을 때 임의의 한점에서의 밝기는

$$I_{\text{disk}} = \frac{I_p \cdot K_a \cdot \cos(\theta)}{d^2} \quad (1)$$

로 주어지며,  $\cos\theta$ 에 비례하고  $d^2$ 에 반비례한다.

원반형 광원에 대한 기하수학적 광학 모델은 그림 1에 보였다. 원반형 난반사면에 점광원을 투사하였을 때 점광원과 한점  $P(r, \phi)$ 와의 거리는  $d$ 로, 다른 한점  $P'(R, \Phi)$ 와의 거리는  $d'$ 로 정하고 점  $P(r, \phi)$ 에서의 법선 벡터 ( $\vec{N}$ )와 점광원의 입사방향이 이루는 사이각을  $\theta$ 로 정의한다. 이와 같이 설정된 기하 광학 모델 구조에서 원반형면의 임의의 점에서의 밝기  $I_{\text{disk}}(r, \phi)$ 는

$$I_{\text{disk}}(r, \phi) = \frac{I_p \cdot K_a \cdot d'}{(d^2 + (r \cos \phi - R \cos \Phi)^2 + (r \sin \phi - R \sin \Phi)^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (2)$$

로 주어지며, 여기서  $I_p$ 는 광원의 세기를  $K_a$ 는 알베도 상수(Albedo constant)를 나타낸다.

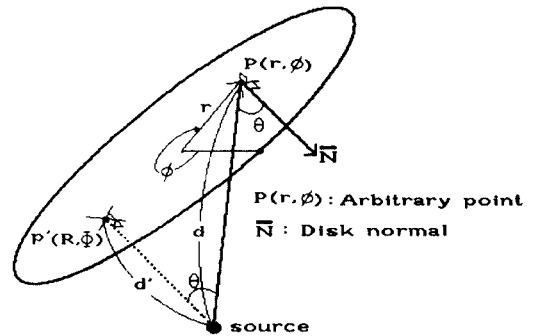


그림 1. 원반형 광원에 대한 기하광학 모델.

Fig. 1. Geometrical optics model for a disk light.

### II-2. 표면 반사 함수 유도

II-1절에서 언급된 원반형 광원위에 있는 임의의 면소광원  $P(r, \phi)$ 가 대상 물체로 조사 되었을 때 물체의 한점에서 반사되어 카메라로 입사되는 빛의 양을

결정하기 위해서는 대상 물체의 표면 반사 특성, 표면의 기울어진 정도, 면소 광원의 방향, 물체 표면과 면소 광원까지의 거리, 면소 광원에서 나오는 광에너지량 등을 알아야 한다. 일반적으로 모든 물체는 난반사와 전반사의 두 가지 반사 성분을 모두 가지고 있으며 표면의 성질에 따라 각 성분의 크기가 달라진다. 명암 영상의 한 점에서의 밝기(intensity)  $I$ 는

$$I = I_{diff} + I_{spec} \quad (3)$$

와 같이 표면에서 반사되는 난반사 성분과 전반사 성분의 합으로 표시할 수 있고 여기서  $I_{diff}$ 는 난반사 성분을 나타내며,  $I_{spec}$ 은 전반사 성분을 나타낸다.

한 개의 점 광원에 의한 난반사 표면의 밝기는 입사된 빛의 세기에 비례하고, 한 개의 물체 면소에 떨어지는 빛의 양은 광원의 위치에서 보여지는 면소의 면적에 비례하므로 표면의 밝기는 표면의 법선 방향과 광원의 방향이 이루는 사잇각의 여현(cosine) 함수가 된다. 결국 미소의 단위 밝기를 가진 점광원에 의한 난반사 밝기성분  $I_{diff}$ 은

$$I_{diff} = k_L \bar{s} \cdot \bar{n} \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다.

여기서  $\bar{s}$ 는 광원 방향의 단위벡터를,  $\bar{n}$ 는 표면의 법선 단위 벡터를, 그리고  $k_L$ 는 표면 난반사 상수(Lambertian reflectance constant)를 각각 나타낸다.

전반사 조건을 만족하는 모델로서 그림 2에 보이는 Torrance-Sparrow(T.S.) 모델<sup>[3]</sup>을 많이 사용한다.

이 모델에서는 전반사를 일으키는 표면을 매우 작은 기울 미소면(facet)들이 불규칙한 방향으로 놓여 있다고 가정하였다. 이들 매우 작은 미소면은 표면의 법선 벡터 방향을 중심으로 일정한 분포를 가지는데 T. S. 모델에서는 이를 가우스(Gauss) 분포로 묘사하였다. 이러한 가정하에 그림 2에 나타낸 것과 같이 점광원을 작은 표면에 투사시켰을 때, 카메라 방향으로 들어가는 전반사의 성분은 표면 내의 작은 입자들 중 전반사 조건을 만족하는 입자들에 의해 반사되는 빛의 밝기의 합으로 볼 수 있다. 또한 이 모델에서는 이웃한 입자간의 가림과 그림자 짐의 영향까지 고려하였다. 그러나, 이 모델은 전반사의 현상을 단순히 표

면의 기하학적 모델에 근거하였을 뿐, 빛의 파장 특성이나 다른 전기적 특성을 고려하지 않으므로 이를 보통 기하학적 반사모델이라 부른다. 본 연구에서는 T.S. 반사모델을 통하여 미세한 정량적 측정 보다는 형상을 인식하는 정성적 측정에 초점을 두고 있으므로 보다 자세한 전반사 모델의 고찰은 본 논문에서 제외하기로 한다.

그림 2에서 미소 점광원에 의한 전반사 모델은

$$I_{spec} = B \exp\left(\frac{-\alpha^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

와 같이 간단하게 표현할 수 있다.

여기서  $\sigma$ 는 표면의 거칠기를 나타내는 파라미터이며 이는 가우스(Gauss)분포 함수의 표준 편차에 해당하는 값이다.  $\sigma$ 값이 크다는 것은 표면내의 인접한 입자들 간의 방향 차이가 많이 난다는 것이고,  $\sigma$ 이 작다는 것은 입자들 간의 방향 차이가 없이 입자들이 거의 한방향으로 위치해 있다는 것을 의미한다.

입사 에너지 중에서 전반사되는 에너지의 비를 나타내는 표면 전반사 파라미터  $B$ 는

$$B = K_s \cdot F \cdot G \quad (5-1)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 Fresnel 반사계수(Fresnel reflection coefficient)  $F$ 는 각각의 미소 입자로부터 반사되는 광량을 모델화한 것이며 입사각과 표면의 재질에 따른 굴절율에 좌우 된다. 기하학적 감쇠 계수(geometrical attenuation factor)  $G$ 는 근접한 입접면들 사이의 마스킹(masking)과 새도우잉(shadowing)효과를 모델화 한 것으로 시각 방향에 좌우 된다. 그리고  $K_s$ 는 정규화를 위한 하나의 상수이다.

그림 2는 T.S. 모델을 나타냈는데  $s(\theta, \phi)$ 는 점광원 방향의 단위 벡터이며,  $\bar{c}$ 는 카메라 방향의 단위 벡터이며,  $\bar{n}(\theta_n, \phi_n)$ 는 표면 법선 벡터이고,  $\bar{n}'$ 는  $s(\theta, \phi)$ 와  $\bar{c}$ 를 이등분한 단위벡터이다.

$\bar{n}'$ 은 주어진 점광원과 카메라 방향에 대한 전반사 조건을 만족하는 방향이므로  $\alpha$ 는 전반사 방향과 표면 법선 방향과의 사이각이다.

즉

$$\bar{n}' = \frac{(\bar{s} + \bar{c})}{\|\bar{s} + \bar{c}\|} \quad (5-2)$$

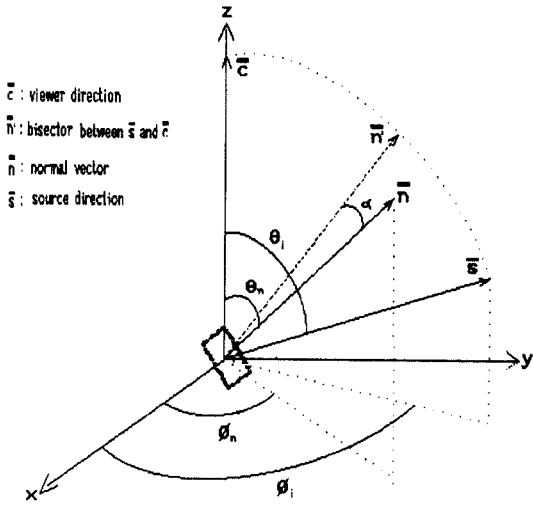


그림 2. Torrance-Sparrow(T.S.) 모델.  
Fig. 2. Torrance-Sparrow model.

$$\alpha = \cos^{-1}(\hat{n} \cdot \hat{n}')$$

로 나타낼 수 있다.

본 연구에서는 작은 혼성 반사 물체를 대상으로 하고 있으므로 실용적인 측면에서 직교(orthogonal) 모델을 사용하였으며, 카메라와 물체와의 거리는 물체 지름의 약 20배 정도 멀고, 카메라 방향으로의 밝기 값은 영상 디지털화저상의 밝기값으로 정해진다고 가정하였다.

따라서 위와 같은 혼성반사면으로 이루어진 물체면에 간접 확산 조명을 조사하였을 때 표면 반사 함수는 아래와 같이 나타난다.

즉, 그림 3에서와 같이 120° 간격을 둔 3개의 조명원 (S1, S2, S3)을 차례로 반지름이 r인 원반에 조사하면, 이 원반은 간접 확산 조명이 된다. 원반형 간접 확산 조명 위의 임의의 점 P(r, φ)의 광량은 조명원 (S1, S2, S3)의 세기, 조명원과 점 P(r, φ) 사이의 거리에 좌우한다. 간접 확산 조명 P(r, φ)에서 대상물체로 조사하였을 때 대상물체 위의 한점에서의 밝기는 물체표면의 방향, 간접 확산 조명 위의 P(r, φ)와 대상물체 위의 한점까지의 거리, 간접 확산 조명 P(r, φ)에서의 세기 등에 의해서 결정된다. 카메라를 원반의 중심에 위치시켰을 때, 카메라와 대상물체 까지의 거리를 D

로 정의하고 물체 표면의 기울어진 정도를 수평경사( tilt) 및 수직경사(slant)로, 미소단위의 간접 확산 광원의 방향을  $S_{tilt} = \phi$  및  $S_{slant} = \tan^{-1}(r/D)$ 로, 간접 확산 광원까지의 거리를  $ds = \sqrt{D^2 + r^2}$  로 각각 나타낼 때, 간접 확산 조명 위의 점 P(r, φ)에서의 세기 I'는

$$I' = \frac{I_{disk}(r, \phi) \cdot \cos(S_{slant})}{d_s^2} \tag{6}$$

으로 정의되며,

여기서  $\cos(S_{slant}) = D/d_s$ 로 주어진다.

따라서, 대상물체의 한 면소에 대한 밝기(I)는

$$\begin{aligned} I &= I_{spec} + I_{diff} \\ &= k_s \cdot I'(r, \phi) \cdot S(\text{slant, tilt, } S_{slant}, S_{tilt}) \\ &\quad + k_d \cdot I'(r, \phi) \cdot L(\text{slant, tilt, } S_{slant}, S_{tilt}) \end{aligned} \tag{7}$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서,  $k_s, k_d$ 는 전반사와 난반사 비율을 나타내며  $S(\text{slant, tilt, } S_{slant}, S_{tilt})$ 와  $L(\text{slant, tilt, } S_{slant}, S_{tilt})$ 은 각각 전반사와 난반사의 항을 의미한다. 결과적으로, 대상 물체의 한 면소에 대한 밝기 I (intensity)를 수치 해석 기법으로 이중 적분을 함으로써 식(8)과 같이 혼성 반사 물체의 표면 반사 함수를 구할 수 있다.

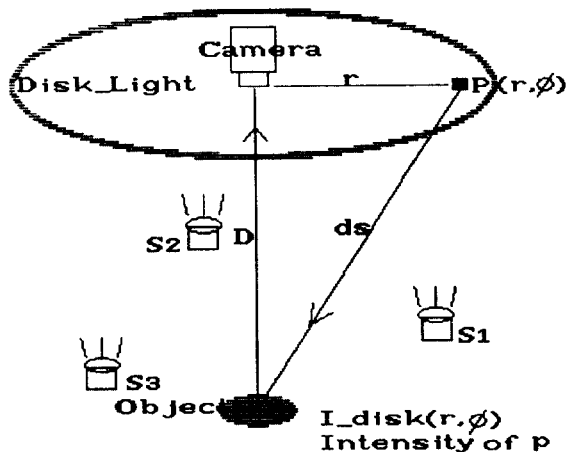


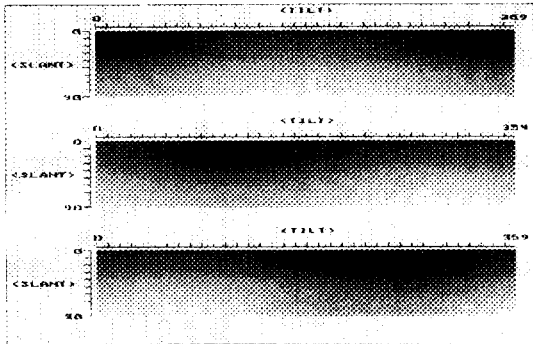
그림 3. 간접 확산 조명하에서 영상 형성 모델.  
Fig. 3. Image formation system under Indirect diffused illumination.

$$\begin{aligned}
 I_{(sum)} &= \int_0^R \int_0^{2\pi} I \, r \, dr \, d\phi = \int_0^R \int_0^{2\pi} I_{spec} + I_{diff} \, r \, dr \, d\phi \\
 &= \int_0^R \int_0^{2\pi} (k_s \cdot I'(r, \phi) \cdot S(\text{slant, tilt, } S_{\text{slant}}, S_{\text{tilt}}) \\
 &+ k_d \cdot I'(r, \phi) \cdot L(\text{slant, tilt, } S_{\text{slant}}, S_{\text{tilt}})) \, r \, dr \, d\phi \quad (8)
 \end{aligned}$$

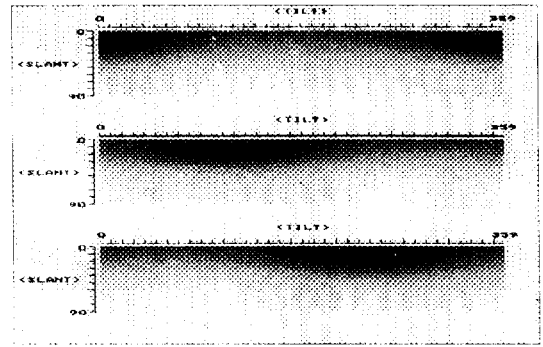
II -3. 간접 확산 조명에 의한 물체의 참조표  
(밝기 분포도)

세 장의 명암영상이 입력될 때, 각각의 명암영상의 화소(pixel) 밝기값은 3차원 참조표 위의 밝기값과 비교하고 사상화시켜, 최종적으로 최적해를 구한다. 이와같이 최적해를 구하는데 사용되는 3차원 참조표(밝기 분포도) 작성에 대해 설명한다.

II-2절에서 유도한 표면 반사 함수를 반구영상에 적용하여 반구영상의 각 화소에 대한 수직경사(slant) 0°-90°, 수평경사(tilt) 0°-359°의 조합과 밝기값과의 관계를 3차원 참조표로 작성하였다. 작성된 3차원 참조표는 면 반사특성이 같은 임의의 형상을 가진 명암영상이 입력되면, 화소(pixel) 밝기값을 비교하고 일대일 사상화시켜 3차원 정보를 정확하게 얻어낸다. 그림 4의 3차원 참조표(밝기 분포도)는 전반사(k<sub>s</sub>)와 난반사(k<sub>d</sub>)의 비율 및 표면 특성(k =  $\frac{1}{2\sigma^2}$ )을 고려하여 작성하였다. 3차원 참조표의 작성은 밝기비율 및 표면특성(k)이 같은 임의의 형상을 가진 물체의 3차원 정보를 실시간으로 얻어내는데 있어서 필수적인 과정이다.



(a) k<sub>s</sub> 0.5 k 10



(b) k<sub>s</sub> 0.9 k=10

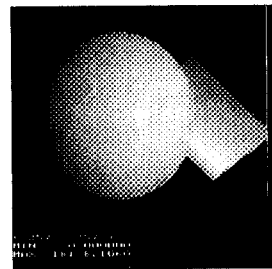
그림 4. 간접 확산 조명 하에서 얻어진 참조표.

Fig. 4. Reference table obtained by using the Indirect diffuse illumination.

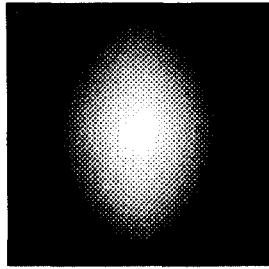
III. 실험에 사용된 거리 영상

본 논문에서 제안된 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 사용된 실험영상은 타원과 다면체를 결합시킨 오목(concave)한 부분을 지니고 있는 Eggblock 영상, Supereilipsoid 영상, Penny, Moz81 영상이 있다.

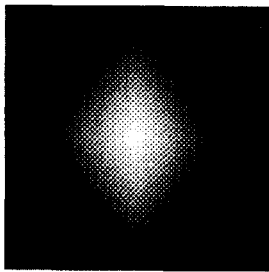
여기서 Superellipsoid 영상은 Bakshi의 General Shading logic algorithm (G.S.L.)<sup>[5]</sup>에서 사용된 데이터로 전반사 난반사 비율 및 표면 특성이 Bakshi가 사용한 영상데이터와 같도록 만들었다. 또한 Penny, Moz81 영상은 K.M.Lee등이 사용한 U.S.C 데이터<sup>[6]</sup>로 오목 부분만 밝을 값을 모두 가지고 있는 영상이다.



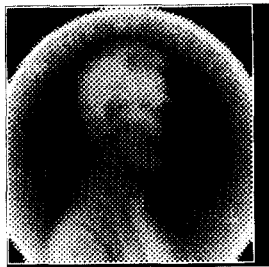
(a)Eggblock



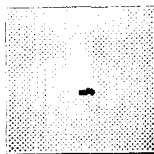
(b)Superellipsoid(1-2)



(c)Superellipsoid(1-6)



(d)Penny

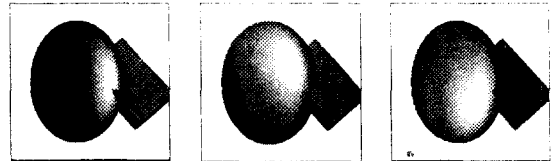


(e)Moz81

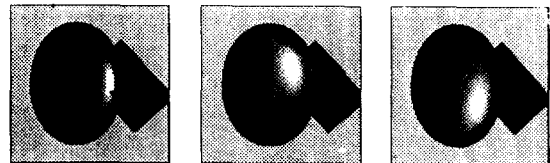
### III-1. 명암 영상

본 논문에서 제안된 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 그림 5의 실험 깊이영상(depth image) 각각에 대해 표면 반사 함수를 적용시키고 각각에 해당하는 3개의 명암영상들을 생성하였다.

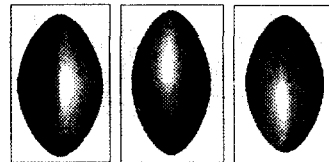
그림 6의 명암영상들은 120도 간격으로 조정된 간접 확산 조명방향 아래서 전반사비율( $k_s$ )과 표면특성( $k$ )의 값들이 각각  $k_s=0.5, k=10$ 인 경우와  $k_s=0.9, k=10$ 인 경우의 명암영상들이다. 특히 Superellipsoid 영상, Penny 영상 그리고 Moz81 영상에 대해서는 Bakshi와 K.L.Lee 등은  $k_s=0.5, k=10$ 인 경우에 대해서만 명암영상들을 보여주었는데 본 논문에서는 전 반사 비율이 큰 경우  $k_s=0.9, k=10$ 에 대해서도 3개의 명암영상을 생성 하였다.



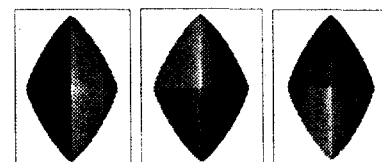
(a) Eggblock I ( $k_s=0.5, k=10$ )



(b) Eggblock II ( $k_s=0.9, k=10$ )



(c)Superellipsoid(1-2) ( $k_s=0.5, k=10$ )



(d)Superellipsoid(1-6) ( $k_s=0.5, k=10$ )

그림 5. 실험 깊이 영상.

Fig. 5. Depth images used for experiments.



(c) Penny I ( $k_s=0.5, k=10$ )



(f) Penny II ( $k_s=0.9, k=10$ )



(g) Moz81 I ( $k_s=0.5, k=10$ )



(h) Moz81 II ( $k_s=0.9, k=10$ )

그림 6. 표면 반사 함수를 이용한 명암 영상들.  
Fig. 6. Shading images obtained by using the surface reflection function.

#### IV. 실험 결과

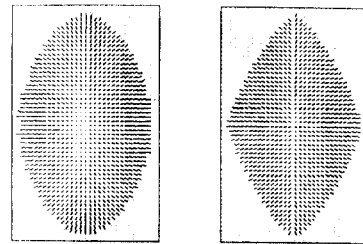
##### IV-1. 바늘 지도(needle map)

세 장의 명암영상이 입력되면 II-3에서 언급된 모든 방향성분과 밝기값과의 3차원 조합으로 구성된 기지의 3차원 참조표와 입력된 각 화소의 밝기 정보를 비교하여 최적의 해(법선)를 구해낸다.

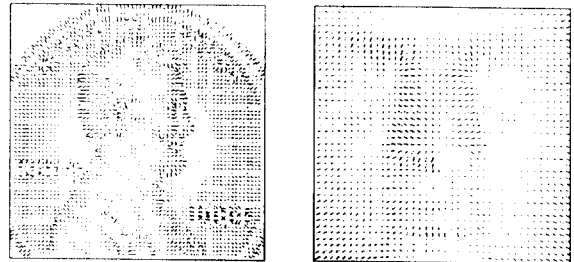
그림 8은 구해 낸 법선 성분을 2.5차원 바늘 지도로 보인다.

##### IV-2. 복원된 3차원 영상

제시한 알고리즘을 이용하여 복원한 3차원 영상을 그림 9에 보인다.



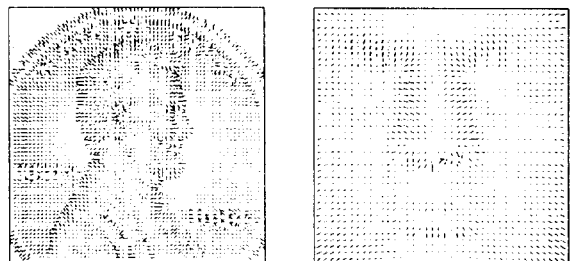
Superellipsoid(1-2) Superellipsoid(1-6)



Penny I

Moz81 I

그림 7. 세 장의 명암 영상 입력시 복원한 needle map ( $k_s=0.5, k=10$ ).  
Fig. 7. Needle map reconstructed by using three shading images( $k_s=0.5, k=10$ ).

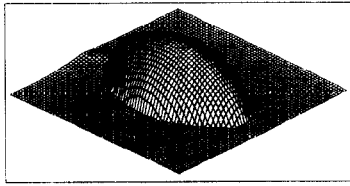


Penny II

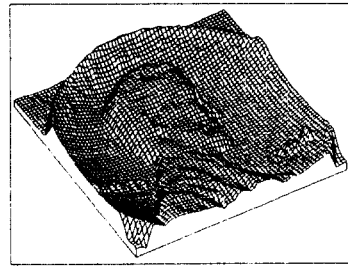
Moz81 II

그림 8. 세 장의 명암 영상 입력시 복원한 Needle map ( $k_s=0.9, k=10$ ).  
Fig. 8. Needle map reconstructed by using three shading images( $k_s=0.9, k=10$ ).

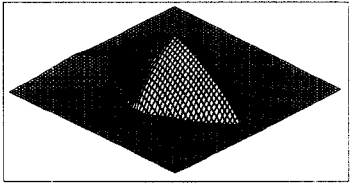




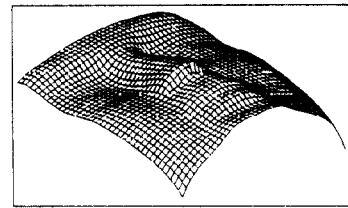
Superellipsoid(1-2)  
(a)  $k_s=0.5, k=10$



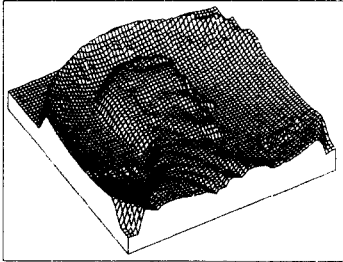
Penny II  
(e)  $k_s=0.9, k=10$



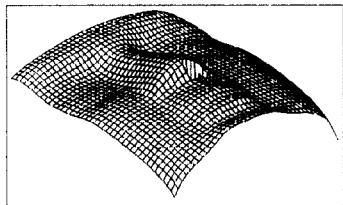
Superellipsoid(1-6)  
(b)  $k_s=0.5, k=10$



Moz81 II  
(f)  $k_s=0.9, k=10$



Penny I  
(c)  $k_s=0.5, k=10$



Moz81 I  
(d)  $k_s=0.5, k=10$

그림 9. 복원된 3차원 영상.  
Fig. 9. Reconstructed 3-D images.

## V. 오차 평가

본 장에서는 제안한 알고리즘을 적용하여 2차원 명암영상에서 3차원 정보를 복구할 때 복구효율의 검증 을 위해서 기지의 표준 영상과 복구된 영상을 비교하여 벗어난 정도를 알아본다.

### V-1. 오차 평가 함수

표준 영상(그림 5)과 복원한 3차원 영상(그림 9)의 법선성분을 화소 대 화소(pixel by pixel) 비교를 하여 그림 10에서 보인 바와 같이 식(9)을 이용해서 표준 영상의 법선벡터로부터 벗어난 상대 오차 각도를 구한다. 이는 표준영상 법선벡터 ( $\vec{A}$ )와 복원된 영상의 법선 벡터 ( $\vec{B}$ )에 내적을 취함으로써 얻을 수 있다.

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{\vec{A} \cdot \vec{B}}{|\vec{A}| |\vec{B}|} \right) \quad (9)$$

여기서 각 화소는 수직경사(slant)와 수평경사(tilt)으로 표현되고, 이러한 천정각과 방위각을 사용해 각 법선 벡터의 성분 (x, y, z)는

$$\begin{aligned} x &= \sin(\text{slant}) \cdot \cos(\text{tilt}) \\ y &= \sin(\text{slant}) \cdot \sin(\text{tilt}) \\ z &= \cos(\text{slant}) \end{aligned} \quad (10)$$

로 나타낼 수 있다.

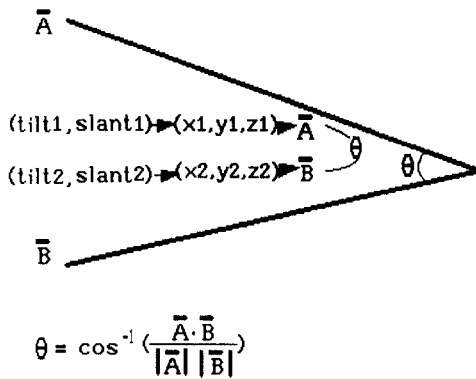
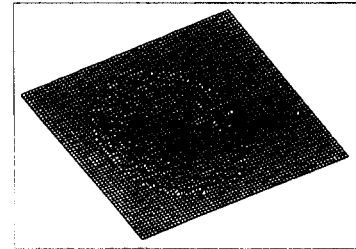


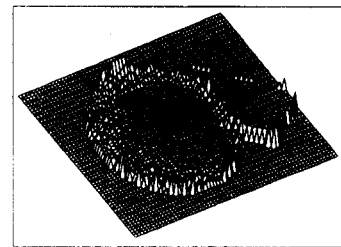
그림 10. 오차 각도.  
Fig. 10. Error angle.

### V-2. 오차 평가 지도

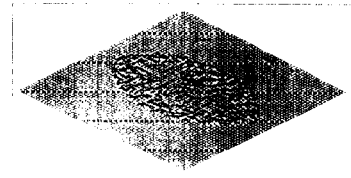
V-1절에서 소개한 오차 평가 방법에 의해 구해진 상대 오차 각도를 그림 11에 보인다. 오차 결과에서 알 수 있듯이 오목(concave)한 부분을 지니고 있는 Eggblock영상에서 상대적으로 오차각이 커지는 것을 확인할 수 있었고 전반사 비율이 높을수록 오차각이 커짐을 알 수 있었다. Bakshi의 논문에서 사용된 Superellipsoid(1-2)과 Superellipsoid(1-6)영상에서의 오차는 Bakshi의 General Shading logic algorithm (G.S.L.)에서는 3도 정도의 오차각을 보였으나 본 알고리즘에서는 0.5도내의 오차를 보였다. U.S.C 데이터로 K.M. Lee등이 사용한 Penny 영상과 Moz81영상에 대해 전 반사 비율( $k_s = 5$ )와 표면특성( $k = 10$ )을 K.M.Lee가 주었던 값<sup>6)</sup>과 똑같은 값으로 주요 본 알고리즘에 적용한 결과 더 작은 오차각(약 1.5도)이 발생함을 알 수 있었고, 또한 본 알고리즘은 전반사 비율이 좀더 큰 경우에도 적용할 수 있음을 보였다.



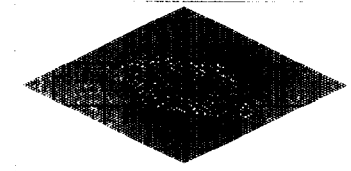
(a) Eggblock I  
Mean error per pixel=1.04



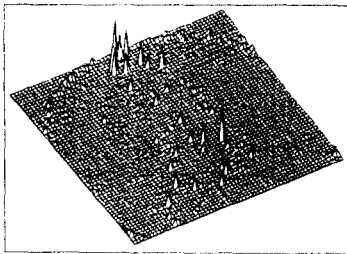
(b) Eggblock II  
Mean error per pixel=2.02



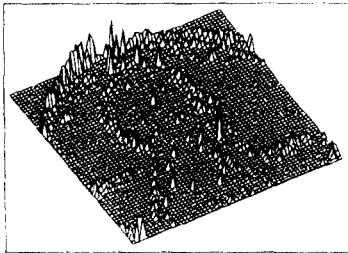
(c) Superellipsoid(1-2)  
Mean error per pixel=0.32



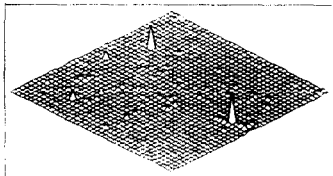
(d) Superellipsoid(1-6)  
Mean error per pixel=0.28



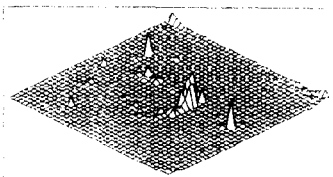
(c) Penny I  
Mean error per pixel=1.22



(d) Penny II  
Mean error per pixel=1.87



(e) Moz81 I  
Mean error per pixel=1.55



(f) Moz81 II  
Mean error per pixel=2.12

그림 11. 오차 평가 지도.  
Fig. 11. Error estimation map.

## VI. 결 론

본 논문에서는 혼성 반사면의 3차원 형상을 명암영상으로부터 복원하는 문제에 대해 측광 입체시법에 근간한 간접 확산 조명 기법을 도입하였다. 간접 확산 조명에 의한 조사는 난반사면, 혼성 반사면 등 다양한 면특성을 가진 물체에 조사하기가 용이하며 균일한 밝기분포를 갖는 명암영상 취득을 가능하게 한다. 간접 확산 조명 환경 하에서 유도한 표면반사 함수는 기하광학 이론에 근거하여 일반적인 대상면의 반사특성과 재질등의 관계로부터 유도되었다. 논문에서 제안한 혼성 반사면 복구 알고리즘은 기존의 난반사면을 대상으로 연구되었던 농담정보로부터 형상 복구(Shape from Shading)하는 방법을 확장하고 일반화시켰다. 표면 반사 함수를 적용한 반구 영상을 가지고 각 화소 밝기값과 법선벡터를 3차원 참조표(밝기분포도)로 작성하여 임의의 명암영상이 입력되면 정확하게 3차원 정보를 얻어냄을 보였다. 또한, 기존의 Bakshi의 General Shading logic algorithm (G.S.I.)에서 복원하기 어려웠던 오목한 면구조에 대해서도 훌륭하게 복구됨을 보였고, K.M.Lee등의 A generalized reflectance map model에서의 전반사 비율에 대한 제약도 극복하였다. 알고리즘의 성능을 평가하기 위해서 기존 논문에서 사용된 실험 영상을 사용하여 거리 정보 추출 및 에러를 평가해 봄으로써 본 논문에서 제안한 알고리즘의 우수성을 확인하였다. 그리고, Penny, Moz81 영상처럼 실제로 혼성 반사면을 가진 물체의 형상에 대한 복원한 결과를 제시하여 반사 모델의 타당성과 혼성 반사면 물체의 형상을 효율적으로 복구할 수 있음을 밝혔다.

이후 연구 과제로는 간접 확산 조명 하에서 다양한 물체에 대해 실험을 행하여서 다양한 반사특성을 가진 물체에 대한 표면반사 특성, 반사 비율(전반사, 난반사 비율등)해석 및 3차원 참조표 작성 등을 하여 실제 산업 현장에서 적용할 수 있도록 하여야 한다.

## 참 고 문 헌

1. B. K. P. Horn, "Understanding Image Intensities," *Artificial Intelligence*, vol. 8, pp. 201-231, 1977.
2. B. K. P. Horn, M. J. Brooks, *Shape from Shading*,

The MIT Press: Cambridge, Massachusetts, 1989.

3. K. E. Torrance and E. M. Sparrow, "Theory for off-specular reflection from roughened surface for ray reflection," *Journal of Optical Society of America*, vol. 65, pp. 531-536, 1975.
4. B. T. Phong, "Illumination for computer generated pictures," *Communications of the ACM*, vol. 18, pp. 311-317, June 1975.
5. Sanjay Bakshi, Y. H. Yang, "Shape from Shading for Non-Lambertian Surfaces," in *Proc. IEEE ICIP-94*. vol. II, pp. 130-134, Austin Texas, Nov. 1994.
6. K. M. Lee, C. -C. J. Kuo, "Shape from Shading with a Generalized Reflectance Map Model," *USC-SIPI Report # 235*, 1993.
7. G. Healey and T. Binford, "Local shape from specularity," *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, vol. 42, pp. 62-86, 1988.
8. Eun jin Jung, Il Dong Yun, and Sang Uk Lee, "Recovery of 3-D Shape Using Hybrid Reflectance Model," in *Proc. IEEE ICIP-94*. vol. II, pp. 120-124, Austin Texas, Nov. 1994.
9. S. K. Nayar, K. Ikeuchi, and T. Kanade, "Determining Shape and Reflectance of Hybrid Surfaces by Photometric Sampling," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 6, no. 4, pp. 418-431, July 1990.
10. Tae-Eun Kim, Tae-Gyu Chang and Jong-Soo Choi, "A study on the Analysis of the Error in Photometric Stereo Method Caused by the General-purpose Lighting Environment," *Journal of The Korean Institute of Tele. and Elect.*, Vol. 31-B, No. 11, pp. 53-62, 1994
11. Shozo Nomura, "Industrial Application of computer Vision Seminar Text" 서울대 자동차 시스템 공동 연구소 Nov. 1994.



**金 泰 銀(Tae Eun Kim) 정희원**  
 1964년 1월 29일생.  
 1989년 8월:중앙대학교 전기공학과 졸업(공학사).  
 1992년 2월:중앙대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사).  
 1993년 9월~현재:중앙대학교 대학원 전자공학과 박사과정 재학중.

※주관심 분야:로봇트시각, 영상처리, 컴퓨터비전, 신경회로망, 계층제어신호처리, 패턴인식, 인공지능 등임.



**宋 浩 根(Ho Keun Song)정희원**  
 1965년 1월 13일생.  
 1991년 2월:중앙대학교 전자공학과 졸업(공학사).  
 1993년 2월:중앙대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사).  
 1993년 3월~현재:중앙대학교 대학원 전자공학과 박사과정 수료.

1996년 3월~현재:한서대학교 전자계산학과 전임강사.  
 ※주관심 분야:영상처리, 영상 분할, 패턴 인식, 3차원 비전 등임.

**崔 宗 秀(Jong Soo Choi) 정희원**  
 1981년 9월~현재:중앙대학교 전자공학과 교수  
 한국통신학회 논문집 제 20권 제 5호참조