論文97-34S-6-3

혼성 반사면의 반사 특성 추출 및 형상 복구(Ⅱ)

(Shape Recovery and Extraction the Reflection Properties of Hybrid Reflectance Surface(Ⅱ))

金 泰 銀 *, 崔 宗 秀 **

(Tae-Eun Kim and Jong-Soo Choi)

요 약

본 논문에서는 명암 영상으로부터 표면의 반사 특성을 추출하고 3차원 형상을 복원하는 새로운 방법을 제시한다. 일반적으로 측광 입체시법(Photometric Stereo)에서는 직접조명에 근간하는데 본 연구에서는 측광 입체시법에 간접 확산 조명(Indirect Diffuse Illumination)을 도입하여 반사함수를 유도하고 난반사 성분과 전반사 성분의 합으로 이루어진 혼성 반사모델에 이 반사함수를 적용하였다. 혼성 반사물체와 간접 확산 조명으로 이루어진 환경 하에서 대상물체 샘플면의 표면반사특성을 법선성분 샘플러(Normal Sampler)를 이용하여 추출하고, 이 추출된 특성값을 참고로 하여 실험대상물체의 3차원 형상을 복구한다. 본 방법은 3차원 참조표를 사용하기 때문에 연산 속도가 빠르며 기존 연구들에서 존재했던 반사함수에 대한 제약조건들을 간략화 하였고, 또한 복구 효율도 높음을 확인 할 수 있었다. 아울러 본 방법은 일반적인 반사함수로 정의되었으므로 다양한 형태의 면에 적용이 가능하다.

Abstract

In this paper, we propose a new approach for recovering 3-D shape and extracting the reflectance properties of surface from intensity images. Photometric Stereo Method(PSM) is generally based on the direct illumination. In this paper, the reflectance function is derived by introduceing the indirect diffuse illumination in PSM and then applied to hybrid reflectance model which consists of two components; the Lambertian and the specular reflectance. Under the hybrid reflectance model and the indirect diffuse illumination circumstance, the reflectance properties of sample surface can be extracting by Normal Sampler and then 3-D shape of an object can be recovered based on extracting reflectance properties. 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.

Ⅰ. 서 론

컴퓨터 시각 시스템은 관찰자를 둘러싸고 있는 환경이나 물체표면의 기하학적 및 물리적인 성질을 유추해야 하는 문제에 직면하게 되는데 이들 시각 시스템이 얻을 수 있는 데이타는 카메라 또는 센서에 의하여 측정된 데이타이다. 그러므로 시각 시스템은 이러한 정보를 이용하여 3차원적인 성질을 찾아내야 한다. 대표적인 3차원 성질로는 물체까지의 거리, 물체의 형상, 방향, 표면 반사율, 그리고 순차적인 영상에서의 움직임 인자등을 들 수 있다. 컴퓨터 시각연구에 있어서 물체의 밝기 정보로부터 3차원적인 정보를 얻어내고자 하는 연구(shape from shading)가 활발하게 진행 되어

* 正會員, 中央大學校 電子工學科
(Dept. of Electronic Eng., Chung-ang Univ.)
** 正會員, 韓國科學財團 制御計測新技術研究센터
(Engineering Research Center for Advanced Control and Instrumentation by KOSEF)
接受日字: 1996年8月14日, 수정완료일: 1997年6月2日

져 왔다[1]. 카메라로 입력된 영상에서 화소의 밝기는 물체의 모양, 물체 표면의 반사성질(reflectance property), 조명상태와 영상획득장치의 특성등에 의해서 결정된다[2]. 특히 고정되어 있는 환경 하에서 영상의 한 점의 밝기는 해당하는 물체 표면의 점에 입사하는 빛을 센서의 방향으로 반사하는 양에 의해 결정된다. 그러므로 물체의 형상을 복구하기 위해서는 반사현상에서 일어나는 다양한 메커니즘을 잘 이해하고 정확하게 모델링하여야 한다. 그러나 많은 제약조건이 따르고 반사 메커니즘 또한 실 세계와는 많은 차이를 보임으로써, 그 적용이 상당이 제한된 상황하에서 이루어졌다. 이것은 물체의 반사특성을 해석하고자 하는데 있어서 고려해야 할 요소들이 많기 때문이다.

이러한 이유로 기존의 형상복구 방법들에서는 표면의 반사 성질을 전반사(specular reflectance) 또는 난반사(Lambertian reflectance)등 한가지로 가정하고 문제를 해결하였다[1][2]. 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[3][4]. 이러한 혼성반사 표면에 대한 3차원 형상복구에 대한 연구들로써는 Bakshi의 General Shading logic algorithm (G.S.l.)[5]과 K.M.Lee[6]의 실 세계에 근접한 반사모델이 있다. Bakshi의 G.S.l algorithm에서는 표면 기울기의 변화가 완만하다는 가정과 임의의 면소 밝기는 이웃면소 밝기와 최소한의 변화를 갖는다고 가정하여 반복적인(iteration) 계산방법으로 명암 영상으로부터 표면법선 정보를 얻어내고자 했다. 그리고 K.M.Lee는 원근투사(perspective projection)와 면소를 작은 삼각형(triangular surface patch)의 집합이라는 개념을 도입하여 3차원 형상복구 문제를 해결하고자 했다. 이러한 방법들은 난반사 표면에 적용되는 명암정보에서 형상복구(shape from shading)의 방법들을 혼성 반사면의 인식에까지 확장한 연구들로서 대상물체의 면반사 특성이 제약이 많고 대상물체의 형태도 완만한 변화를 가진 면이라는 한계가 있다.

본 연구에서는 명암 영상으로부터 물체의 3차원 정보를 얻어 내고자 할 때 상대적으로 중요한 조명원, 면반사 특성 및 기하광학 관계를 정성적으로 해석하고 최종적으로 3차원 정보를 얻는 새로운 접근방식을 제시한다.

본 논문에서는 3차원 참조표를 이용하므로 속도가 빠르고, 기존 연구들에 존재했던 반사 함수[5][6][7]에 대한 제약 조건들을 상당부분 극복하였다. 또한, 반사함수를 보다 일반적인 함수로 유도하였으므로 다양한 종류의 표면에 적용이 가능하다. 적용 가능한 분야로서는 혼성 반사 성분이 강한 플라스틱면, 공구 표면, 부품 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. Ⅲ장에서는 본 논문에서 제안된 알고리듬의 타당성 검증을 위해 기존논문에서 사용된 표준영상을 대상으로 모의실험을 하여 계산된 결과값들을 보이고 분석한다. Ⅵ장에서는 실 세계물체의 표면 반사 파라미터를 추출하는 알고리듬 및 추출된 반사특성을 표준 구에 적용하여 3차원 참조표 작성과정과 실험결과를 보인다. Ⅴ장에서는 본 연구의 의미부여 및 결론을 내린다.

Ⅱ. 간접 확산 조명 기법(Indirect Diffuse Illumination Method)[8][9][10]

1. 원반형 광원에 대한 기하광학 모델

원반형 광원에 대한 기하수학적 광학 모델은 그림 1에 보였다.

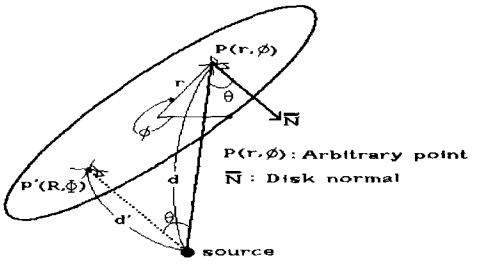


그림 1. 원반형 광원에 대한 기하광학 모델
Fig. 1. Geometrical optics model for a disk light.

원반형 난반사면에 점광원을 투사하였을 때 점광원과 한점 P(r, ϕ)와의 거리는 d로, 다른 한점 P'(R,Φ)와의 거리는 d'로정하고 점 P(r, ϕ)에서의 법선 벡터 ($\overline{N}$)와 점광원의 입사방향이 이루는 사이각을 θ로 정의한다. 이와 같이 설정된 기하 광학 모델 구조에서 원반형면의 임의의 점에서의 밝기 $I_{disk}(r, \phi)$는

$$I_{disk}(r,\phi) = \frac{I_p \cdot K_a \cdot d'}{(d'^2 + (r\cos\phi - R\cos\Phi)^2 + (r\sin\phi - R\sin\Phi)^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (1)$$

로 주어지며, 여기서 I_p는 광원의 세기를 K_a는 알베도 상수(Albedo constant)를 나타낸다.

2. 표면 반사 함수 유도

Ⅱ-1절에서 언급된 원반형 광원위에 있는 임의의 면소광원 P(r, ϕ)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) I는

$$I = I_{diff} + I_{spec} \tag{2}$$

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[1] [2]. 결국 미소의 단위 밝기를 가진 점광원에 의한 난반사 밝기성분 I_{diff}은

$$I_{diff} = k_L \bar{s} \cdot \bar{n} \tag{3}$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 $\bar{s}$는 광원 방향의 단위벡타를, $\bar{n}$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[3]을 많이 사용한다. 이 모델에서는 전반사를 일으키는 표면을 매우 작은 거울 미소면(facet)들이 불규칙한 방향으로 놓여 있다고 가정하였다. 이들 매우 작은 미소면는 표면의 법선 벡터 방향을 중심으로 일정한 분포를 가지는데 T.S.모델에서는 이를 가우스(Gauss) 분포로 묘사하였다. 이러한 가정하에 그림 2에 나타낸것과 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 표면의 기하학적 모델에 근거하였을 뿐, 빛의 파장 특성이나 다른 전기적 특성을 고려하지 않으므로 이를 보통 기하학적 반사모델이라 부른다.

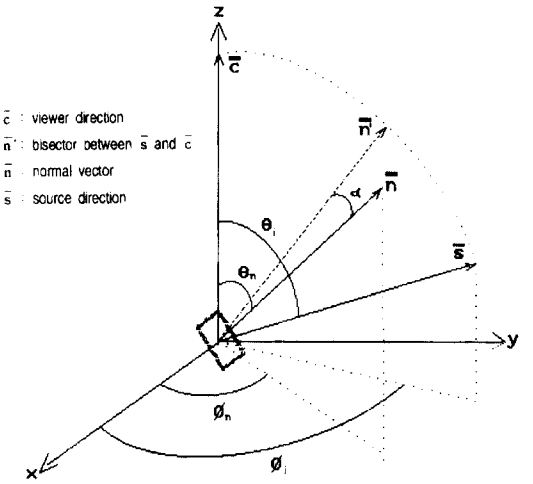


그림 2. Torrance-Sparrow(T.S.) 모델
Fig. 2. Torrance-Sparrow model.

그림 2에서 미소 점광원에 의한 전반사 모델은

$$I_{spec} = B\exp\left(\frac{-\alpha^2}{2\sigma^2}\right) \tag{4}$$

와 같이 근사시켜 표현할 수 있다. 여기서 σ는 표면의 거칠기를 나타내는 파라메터이며 이는 가우스(Gauss) 분포 함수의 표준 편차에 해당하는 값이다.

입사 에너지 중에서 전반사되는 에너지의 비를 나타내는 표면 전반사 파라메터 B는

$$B = K_s \cdot F \cdot G \tag{4-1}$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 F 와 G는 각각 Fresnel 반사계수(Fresnel reflection coefficient) 및 기하학적 감쇠 계수(geometrical atenuation factor)를 나타낸다. 그리고 K_s는 정규화을 위한 하나의 상수이다. 그림 2는 T.S.모델을 나타냈는데 $\bar{s}(\theta_i, \phi_i)$는 점광원 방향의 단위 벡터이며, $\bar{c}$는 카메라 방향의 단위 벡터이며, $\bar{n}$ (θ_n, ϕ_n)는 표면 법선 벡터이고, $\bar{n}'$는 $\bar{s}(\theta_i, \phi_i)$와 $\bar{c}$를 이등분한 단위벡터이다. $\bar{n}'$은 주어진 점광원과 카

메라 방향에 대한 전반사 조건을 만족하는 방향이므로 α는 전반사 방향과 표면 법선 방향과의 사이각이다.

즉

$$\bar{n}' = \frac{(\bar{s}+\bar{c})}{\|\bar{s}+\bar{c}\|}$$
$$\alpha = \cos^{-1}(\bar{n}\cdot\bar{n}') \qquad (4\text{-}2)$$

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 15배 정도 멀고, 카메라 방향으로의 밝기 값은 영상 디지타이저 상의 밝기값으로 정해진다고 가정하였다.

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

즉, 120^0 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 점P(r, ϕ)의 광량은 조명원 (S1, S2, S3)의 세기, 조명원과 점P(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 D로 정의하고 물체 표면의 기울어진 정도를 방위각(tilt) 및 천정각(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

$$I' = \frac{I_{disk}(r,\phi)\cdot\cos(S_{slant})}{d_s^{\,2}} \qquad (5)$$

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

따라서, 대상물체의 한 면소에 대한 밝기(I)는

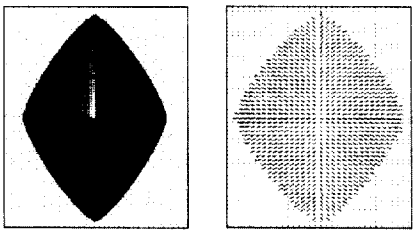
$$I = I_{spec} + I_{diff}$$
$$= k_s\cdot I'(r,\phi)\cdot S(slant,tilt,S_{slant},S_{tilt}) + k_d\cdot I'(r,\phi)\cdot L(slant,tilt,S_{slant},S_{tilt}) \qquad (6)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서, k_s, k_d는 전반사와 난반사 비율을 나타내며 S(slant, tilt, S_{slant}, S_{tilt})와 L(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(7)과 같이 혼성 반사 물체의 표면 반사 함수를 구할 수 있다.

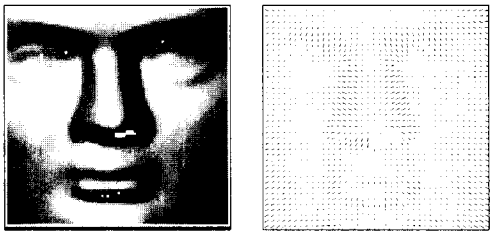
$$I_{(sum)} = \int_0^R\int_0^{2\pi} I\ r\ dr d\phi = \int_0^R\int_0^{2\pi} I_{spec}+I_{diff}\ r\ dr\, d\phi$$
$$= \int_0^R\int_0^{2\pi} (k_s\cdot I'(r,\phi)\cdot S(slant,tilt,S_{slant},S_{tilt}) + k_d\cdot I'(r,\phi)\cdot L(slant,tilt,S_{slant},S_{tilt}))\ r\, dr d\phi \qquad (7)$$

III. 모의실험 [10]

본 논문에서 제안된 알고리듬의 성능을 평가하기 위하여 기존의 논문에서 사용된 표준영상을 대상으로 모의실험을 하였다.



(a)Superellipsoid



(b)Moz81

그림 3. 모의 실험에 사용된 표준 영상과 모의실험결과

Fig. 3. Standard images used for simulation and simulation result.

기존의 연구에서 사용된 표준영상으로는 Superellipsoid 영상, Moz81 영상이 있다. 여기서 Superellipsoid영상은 Bakshi의 General Shading logic algorithm (G.S.l.) [5]에서 사용된 데이타로 전반사 난반사 비율 및 표면 특성이 Bakshi가 사용한 영상데이타와 같다. 또한 Moz81 영상은 K.M.Lee등이 사용

한 U.S.C 데이타[6]로 오목 볼록한 면을 모두 가지고 있는 영상이다. 그림 3은 표준영상과 표준영상에 본 논문에서 유도한 표면반사함수를 적용하여 명암영상을 생성하고, 명암영상으로부터 복원한 모의실험결과를 보인다.

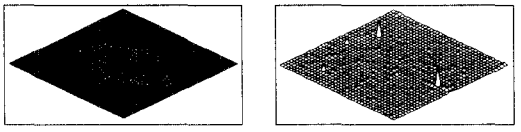
1. 오차 평가

제안한 알고리듬을 적용하여 2차원 명암영상에서 3차원 정보를 복구할 때 복구효율의 검증을 위해서 기지의 표준 영상과 복구된 영상을 비교하여 벗어난 정도를 알아본다.

표준 영상과 복원한 영상의 법선성분을 식(8)처럼 화소 대 화소(pixel by pixel) 비교를 하여 표준 영상의 법선벡터로부터 벗어난 상대 오차 각도를 구한다. 이는 표준영상 법선벡터 ($\overline{A}$)와 복원된 영상의 법선 벡터 ($\overline{B}$)에 내적을 취함으로써 얻을 수 있다.

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{\overline{A}\cdot\overline{B}}{|\overline{A}|\,|\overline{B}|}\right) \tag{8}$$

이와같은 방법에 의해 구해진 상대 오차 각도를 그림 4과 같이 보인다. Bakshi의 논문에서 사용된 Superellipsoid영상에서의 오차는 Bakshi의 G.S.I.에서는 3도 정도의 오차각을 보였으나[5] 본 알고리듬에서는 0.5도내의 오차를 보였다. U.S.C 데이타로 K.M.Lee등이 사용한 Moz81영상에 대해 전반사 비율(k_s=5)와 표면특성(k=10)을 K.M.Lee가 주었던 값[6]과 똑같은 값으로 주고 본 알고리듬에 적용한 결과 더 적은 오차각(약 1.5도)이 발생함을 알 수 있었다.



(a)Superellipsoid (b)Moz81
Mean error per pixel=0.28 Mean error per pixel=1.55

그림 4. 오차 평가 지도
Fig. 4. Error estimation map.

Ⅳ. 실 세계 물체의 반사 특성 파라메타 추출 알고리듬

원반형 광원에 대한 기하광학 실험환경은 그림 5에 보였다. 이와 같이 설정된 기하 광학 모델 구조에서 본 논문에서 제안한 법선성분샘플러(Normal Sampler)를 이용하여 실 세계물체의 반사특성을 해석하는 방법을 설명한다.

일반적인 물체의 표면구조는 전반사(k_s), 난반사(k_d) 그리고 표면거칠기(k)로 표현된다. 실험대상 물체의 표면반사 특성(k_s, k_d, k) 해석을 위해서 그림 5와 같은 실험환경및 정교하게 조정이 가능한 법선성분 샘플러을 제작하였다. 법선성분 샘플러는 방위각, 천정각을 수동적으로 측정 가능하게 구성되었고, 법선성분 샘플러 위에 동일한 법선을 가진 실험대상물체의 작은조각을 올려 놓고 서로 다른 세 방향으로 법선성분 샘플러를 조정하여 세 장의 명암영상을 취득한다. 이와같은 실험 환경에서 기지의 정보는 법선성분 샘플러 위에 놓인 실험대상물체 작은조각의 법선벡터와 작은조각을 서로 다른 세방향으로 조명을 조사해서 얻어진 명암영상의 밝기정보 그리고 조명원의 위치벡타이다.

이때, 법선성분 샘플러 위에 놓인 물체표면의 밝기는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} I &= I_{diff} + I_{spec} \\ &= k_d \bar{n}\cdot\bar{s} + k_s \exp(-k\alpha^2) \end{aligned} \tag{9}$$

여기서 k_d는 diffuse reflectance constant, k_s는 specular reflectance ratio, 그리고 표면거칠기 k는 $\frac{1}{2\sigma^2}$ 로 나타내진다.

I_{spec}(specular term)을 Taylor series로 확장 할 때 I_{spec}은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} I_{spec} &= k_s\exp(-k\alpha^2) = k_s\exp(-k\alpha^2)\,|_{k=0} \\ &+ k_s(-\alpha^2)\exp(-k\alpha^2)\,|_{k=0}\cdot k + \frac{k_s(\alpha^4)\exp(-k\alpha^2)}{2!}\,|_{k=0}\cdot k^2 + O(k^3) \end{aligned} \tag{10}$$

고차항에 대한 영향이 크지 않기 때문에 첫번째항에 대해서만 고려하면, I_{spec} 은 다음과 같이 간략화 시킬 수 있다.

$$I_{spec} = k_s(1-k\alpha^2) \tag{11}$$

I 에 대해서 Matrix 형태로 표현하면 식(12)와 같다.

$$\mathbf{I} = k_d \mathbf{N}\cdot\mathbf{S} + k_S(1-k\,\boldsymbol{\alpha}^T\boldsymbol{\alpha})\mathbf{E} \tag{12}$$

여기서,

$\boldsymbol{I}=[I_1\ I_2\ I_3]^T$: 밝기값(Intensity value)

$\boldsymbol{C}=[C_x\ C_y\ C_z]$: Camera 위치

$\boldsymbol{S}=[S_x\ S_y\ S_z]^T$: 조명 방향(Source position)

$\alpha = \cos^{-1}[N \cdot \frac{S+C}{det(S+C)}] = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3]^T$:표면 법선과 전반사방향과의 사이각

$N = \begin{bmatrix} n_{x1} & n_{y1} & n_{z1} \\ n_{x2} & n_{y2} & n_{z2} \\ n_{x3} & n_{y3} & n_{z3} \end{bmatrix}$: Surface normal

$E = [1\ 1\ 1]^T$: Unit Column vector

위에서 언급한 방정식은 미지수 k_d, k_s, 그리고 k에 관한 비선형 방정식이 된다.

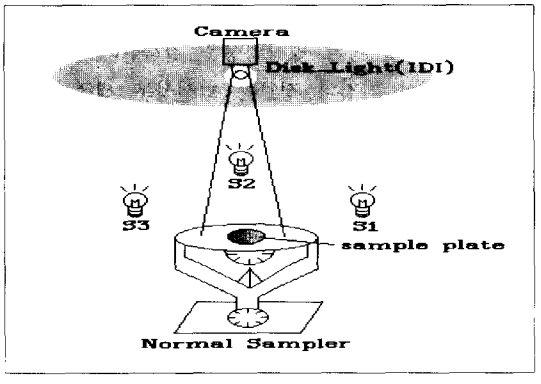


그림 5. 실험 환경
Fig. 5. The experiment circumstances.

1. 반사특성 추출(Extracting reflectance properties)

본 절에서는 Ⅵ장 앞절에서 언급한 비선형 방정식의 미지수 k_d, k_s, 그리고 k에 관해 구한 결과값을 보인다. 위에서 언급한 방정식은 미지수 k_d, k_s, 그리고 k에 관한 비선형 방정식이 된다.

$$I = k_d N \cdot S + k_S(1 - k\,\alpha^T \alpha)E$$

비선형 방정식을 연립하여 뉴톤-랩슨방법(Newton-Raphson method)으로 수렴하는 k값 및 k_s값을 구한다. Nut(k_s=0.61, k=10.2), Bottle(k_s=0.83, k=15.3)의 수렴된 값을 얻었고 자세한 수식전개는 부록에 첨부한다.

2. 실 세계 물체의 참조표(Reference table)

그림 6은 실 세계 물체의 반사특성 파라미타가 적용된 참조표를 보인다. Ⅵ-1절에서 구해진 표면반사특성 파라미타를 이용하여 실 세계 물체의 참조표를 작성하는 과정에 대해 설명한다. 참조표은 앞장에서 언급한 알고리듬에 의해 구한 실제물체의 표면 반사특성 (k_d, k_s, $k = \frac{1}{2\sigma^2}$)을 표준 구 영상에 적용하여 작성 하였다. 참조표는 모든 방향의 천정각, 방위각 그리고 밝기값의 조합으로 구성 되었고 또한, 전반사, 난반사 및 표면의 거친 정도를 고려하여 작성하였다. 최종적으로 간접 확산 조명 환경하에서 취득된 임의의 형상의 명암영상이 입력되었을 때 실시간으로 3차원 정보인 법선벡터(surface normal)을 구하는데 이용된다. 120도 간격으로 위치하는 간접 확산 조명이 대상물체면과 반사특성이 같은 구 영상에 차례로 조사되었을때 대상물체면에서의 밝기분포는 식 (13)과 같이 표현할 수 있다. 물체면의 명암분포는 간접 확산 조명의 위치가 바뀔때마다 각각 다르게 나타난다. 만일 표면반사특성이 난반사(Lambertian)면이라면, 세개의 명암분포(I_1,I_2,I_3)는 균배공간(gradient space)상에서 등명도 곡선들이(Reflectance Map)이 각각 하나의 점들에서 교차하게 된다. 그러나 혼성반사(Hybrid)면인 경우는 때때로 세개의 등명도 곡선이 공통의 한점에서 만나지 못하는 경우가 있다. 이와같은 경우에는 세개의 등명도 곡선에서 밝기값이 가장 큰 두개 등명도 곡선을 선택한다. 선택된 한쌍의 등명도 곡선은 두개의 점에서 교차해서 만난다. 이때, 두 개의 공통점은 근사화된 해이다. 두개의 근사화된 해와 약한 밝기의 나머지 등명도곡선상의 밝기값은 수렴된 근을 구하는데 이용된다. 수렴한 근을 구하기 위해서 수치해석방법을 사용한다.

표면 밝기 분포 함수는 아래와 같다.

$$I_{(sum)} = \int_0^R \int_0^{2\pi} I\, r\, dr d\phi = \int_0^R \int_0^{2\pi} I_{spec} + I_{diff}\, r\, dr\, d\phi$$

$$= \int_0^R \int_0^{2\pi} (k_s \cdot I'(r,\phi) \cdot S(slant, tilt, S_{slant}, S_{tilt}) + k_d \cdot I'(r,\phi) \cdot L(slant, tilt, S_{slant}, S_{tilt}))\, r\, dr d\phi \quad (13)$$

여기서, k_s, $I'(r,\phi)$, k_d, S_{slant}, 와 S_{tilt}는 기지의 값이다. 그러므로, 반사율지도(R(slant, tilt))는 다음과 같다.

$$R(slant, tilt) = \int_0^R \int_0^{2\pi} (k_s \cdot I'(r,\phi) \cdot S(slant, tilt, S_{slant}, S_{tilt}) + k_d \cdot I'(r,\phi) \cdot L(slant, tilt, S_{slant}, S_{tilt}))\, r\, dr d\phi . \quad (14)$$

밝기값(I)의해서, 함수f와 함수g를 정의하면, 다음과 같다.

$$f(slant, tilt) = R_1(slant, tilt) - I_1$$
$$g(slant, tilt) = R_2(slant, tilt) - I_2. \quad (15)$$

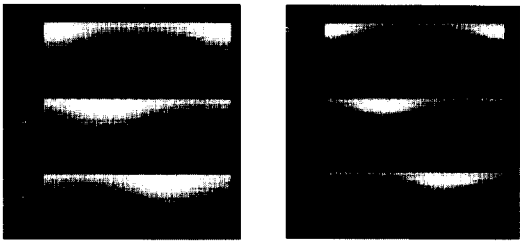
간접 확산 조명위치가 바뀌면, $I'(r,\phi)$, S_{slant}, and

S_{tilt},는 함수f와 함수g에서 다른값을 갖게된다.

$$X^{[j+1]} = X^{[j]} - (F')^{-1}F \quad , \qquad (16)$$

여기서, $X=(slant,tilt)^T$와, $F=(f, g)^T$ 와 $(F')^{-1}$는 Jocobian matrix의 역변환이다.

위와같은 과정을 거쳐 천정각(tilt), 방위각(slant),과 밝기(intensity)값을 가지고 참조표(reference table)을 만든다. 간접 확산 조명 환경에서 실험대상물체의 작은 샘플면의 전반사, 난반사, 그리고 표면거칠기 비율은 대략 Nut인 경우 k_s=0.61, k=10.2 그리고 Bottle인 경우는 k_s=0.83, k=15.3에 수렴된 값을 얻었다. 이러한 반사특성값을 입력파라미타로 밝기참조표를 작성하였다(그림 6).



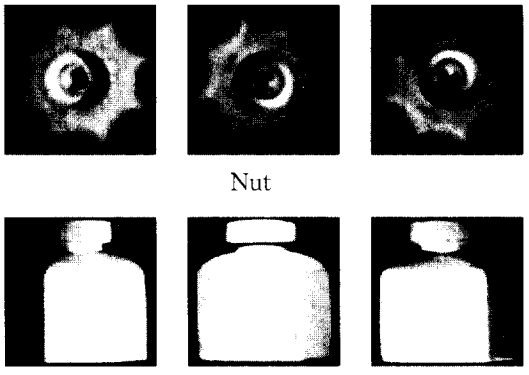
k_s=0.61 k=10.2 k_s=0.83 k=15.3

그림 6. 참조표(Nut, Bottle)
Fig. 6. Reference table (Nut, Bottle).

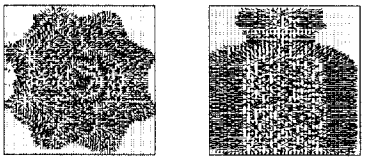
3. 실 세계 물체을 대상으로한 실험 결과

간접 확산 조명 환경에서 취득된 세 장의 명암영상이 입력되면 각각이 명암영상의 화소(pixel) 밝기값은 기지의 3차원 참조표와 비교하고 매칭시켜 실험대상물체의 법선(normal) 성분을 구해낸다.

그림 7은 구해낸 법선 성분을 2.5차원 바늘지도로 보인다.



Nut Bottle



Nut Bottle

그림 7. 명암영상과 바늘지도(2.5D)
Fig. 7. Shading images and Needle Map(2.5D).

V. 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 반사면등 다양한 면 특성을 가진 물체에 조사하기가 용이하며 균일한 밝기 분포를 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 알고리듬은 기존의 난반사면을 대상으로 연구되었던 명암정보로부터 형상복구(shape from shading)하는 방법을 확장하고 일반화시켰다. 알고리듬의 성능을 평가하기 위해서 기존 논문에서 사용된 표준실험영상을 사용하여 거리 정보 추출 및 에러를 평가해 봄으로써 본 논문에서 제안한 알고리듬의 우수성을 확인하였다. 그리고, Nut, Bottle등의 실 세계의 물체면에 대해 반사특성을 추출하는 알고리듬을 제안하였고 추출된 실제물체의 표면반사 파라미타값을 근거로 참조표를 작성, 혼성반사면을 가진 실 세계물체의 형상을 복원한 결과를 제시하여 혼성반사 모델의 타당성과 제안한 알고리듬이 반사특성추출 및 3차원 정보를 효율적으로 구해 낼 수 있음을 밝혔다. 개선점으로는 더 정확한 복구 성능을 위하여 조명장치와 주변환경들이 이론치에 가깝게 잘 통제된 환경 하에서의 실험이 필요하고, 설정된 계측조명 환경에서 좀더 복잡한 반사특성을 가지는 각각의 대상 물체면에 대한 표면반사 특성, 반사 비율(전반사, 난반사 비율등)해석 및 3차원 참조표 작성 등을 하여 실제 산업 현장에서 적용할 수 있도록 하여야 한다.

부 록(Appendix)

$$\bar{n_i}' = \frac{\bar{s_i} + \bar{c_i}}{|\bar{s_i} + \bar{c_i}|}$$

$$\alpha_i = \cos^{-1}(\bar{n_i} \cdot \bar{n_i}') \qquad i = 1,2,3$$

$$k_d + k_s = 1$$

여기서,

$\bar{n}'$는 $\bar{s}(\theta_i, \phi_i)$와 $\bar{c}$를 이등분한 단위벡터이고 α는 전반사 방향과 표면 법선 방향과의 사이각이다.

세 방향의 광원에 의해 아래와 같은 조도방정식을 얻는다.

$$I_1 = k_d \cdot \bar{n_1} \cdot \bar{s_1} + k_s \cdot \sqrt{\frac{k}{\pi}} \exp(-\alpha_1^2 \cdot k) \qquad A(1)$$

$$I_2 = k_d \cdot \bar{n_2} \cdot \bar{s_2} + k_s \cdot \sqrt{\frac{k}{\pi}} \exp(-\alpha_2^2 \cdot k) \qquad A(2)$$

$$I_3 = k_d \cdot \bar{n_3} \cdot \bar{s_3} + k_s \cdot \sqrt{\frac{k}{\pi}} \exp(-\alpha_3^2 \cdot k) \qquad A(3)$$

$$k = \frac{1}{2\sigma^2}$$

여기서, $I_i, \bar{n_i}, \bar{s_i}$ α_i 기지의 정보이다.

$a_i = \sqrt{\frac{k}{\pi}} \exp(-\alpha_i^2 \cdot k)$ 라 정의하면

A(1) 식에서 $k_d = \frac{I_1 - k_s \cdot a_1}{\bar{n_1} \cdot \bar{s_1}}$ A(1)′

A(2) 식에서 $k_d = \frac{I_2 - k_s \cdot a_2}{\bar{n_2} \cdot \bar{s_2}}$ A(2)′

A(3) 식에서 $k_d = \frac{I_3 - k_s \cdot a_3}{\bar{n_3} \cdot \bar{s_3}}$ A(3)′

A(1)′ = A(2)′ 에서 $k_s = \frac{\bar{n_1} \cdot \bar{s_1} \cdot I_2 - \bar{n_2} \cdot \bar{s_2} \cdot I_1}{\bar{n_1} \cdot \bar{s_1} \cdot a_2 - \bar{n_2} \cdot \bar{s_2} \cdot a_1} = f_1$

이라 놓는다 A(4)

A(1)′ = A(3)′ 에서 $k_s = \frac{\bar{n_1} \cdot \bar{s_1} \cdot I_3 - \bar{n_3} \cdot \bar{s_3} \cdot I_1}{\bar{n_1} \cdot \bar{s_1} \cdot a_3 - \bar{n_3} \cdot \bar{s_3} \cdot a_1} = f_2$

이라 놓는다 A(5)

A(4) = A(5)로 놓고,

$f = f_1 - f_2$ 라 하면

$$f = \frac{\bar{n_1} \cdot \bar{s_1} \cdot I_2 - \bar{n_2} \cdot \bar{s_2} \cdot I_1}{\bar{n_1} \cdot \bar{s_1} \cdot a_2 - \bar{n_2} \cdot \bar{s_2} \cdot a_1} - \frac{\bar{n_1} \cdot \bar{s_1} \cdot I_3 - \bar{n_3} \cdot \bar{s_3} \cdot I_1}{\bar{n_1} \cdot \bar{s_1} \cdot a_3 - \bar{n_3} \cdot \bar{s_3} \cdot a_1} \qquad A(6)$$

여기서, 미지수는 a_1, a_2, a_3인데 a_i는 k만이 미지수이므로 f = 0 이 되는 k 값을 구한다. k값을 A(4) 또는 A(5)에 대입하여 k_s를 구하고 A(1), A(2) 또는A(3)에 대입하여 k_d를 구한다.

참 고 문 헌

[1] B. K. P. Horn, M. J. Brooks, *Shape from Shading*, The MIT Press : Cambridge, Massachusetts, 1989.

[2] B. K. P. Horn, "Understanding Image Intensities," *Artificial Intelligence*, vol. 8, pp. 201-231, 1977.

[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] 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.

[8] Tae-Eun Kim and Jong-Soo Choi, "3-D shape Recovery of Hybrid Reflectance Surface Using Indirect Diffuse Illumination," *in proc. IEEE ICIP-95*. vol. Ⅱ, pp. 354-357, Washington, D. C. Oct. 1995.

[9] Tae-Eun Kim and Jong-Soo Choi, "Shape Reconstruction of Hybrid Reflectance Object Using Indirect Diffuse Illumination," *IEICE Trans. on Information and Systems*, vol. E78-D, no. 12, pp. 1581-1590, Dec. 1995.

[10] 김태은, 송호근, 최종수, "간접 확산 조명을 이용한 혼성반사 표면의 3차원 형상취득," 한국 통 신 학회 논문집, 제 21권, 제 2호, pp. 301-312, 1996

저 자 소 개

金 泰 銀(正會員)

1964年 1月 29日生. 1989年 8月 중앙대학교 전기공학과 졸업(공학사). 1992年 2月 중앙대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1997年 2月 중앙대학교 대학원 박사학위취득(공학박사). 주관심 분야는 멀티미디어시스템, 멀티미디어영상처리, 가상현실, 컴퓨터비젼, 패턴인식, 3차원 신호처리 등임.

崔 宗 秀(正會員) 第 28卷 B編 第 5號 參照

현재 중앙대학교 전자공학과 교수