

물체의 면 반사특성 추정과 측광정합을 이용한 3차원 형상복구

正會員 金 泰 銀*, 柳 碩 滋*, 宋 浩 根**, 崔 宗 秀***

Estimation of Surface Reflectance Properties and 3D Shape Recovery using Photometric Matching

Tae-Eun Kim*, Seok-Hyun Ryu*, Ho Keun Song**, Jong Soo Choi*** *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 밝기영상에서 물체의 반사특성을 해석하고, 반사특성 파라미터를 추정하여 물체의 형상을 복구하는 새로운 방법을 제안한다. 물체의 반사특성은 전반사 성분과 난반사 성분을 함께 갖는 혼성반사면을 그 대상으로 하며, 이러한 반사특성은 Torrance-Sparrow 모델로 설명될 수 있다. 단일 재질로 이루어진 표본구에 대해 물체의 반사특성을 LMS알고리즘을 이용하여 추정한다. 추정된 면 반사특성 파라미터를 이용하여 면법선과 밝기값으로 이루어진 참조영상을 생성할 수 있으며, 이것은 표본구와 동일한 재질로 이루어진 임의의 형상의 물체에 대해 3차원 형상을 복구하는데 사용된다. 본 논문에서 제안한 측광정합법은 주변 화소의 밝기 분포를 고려하여 참조영상과의 매칭을 통한 형상복구 알고리즘으로써 기존의 측광입체시법에 비해 매우 강력한 방법이다. 또한 본 논문에서는 간단한 설계만으로 구현이 가능한 관상 확산 조명을 구성하여 물체 표면상의 밝기분포가 고르게 하였다. 본 논문에서 제안한 알고리즘은 3차원 인식, 컴퓨터 시각검사 및 기타 응용 분야에 적용이 가능하리라 생각된다.

ABSTRACT

In this paper we propose a new method for analyzing the properties of surface reflectance and reconstructing the shape of object using estimated reflectance parameters. We have investigated the hybrid reflectance surface which has specular reflection and diffuse reflection, which can be explained by Torrance-Sparrow model. Sample sphere made of one material is used to estimate the reflectance properties by using LMS algorithm. We can make the reference image which consists of surface normal and brightness value using estimated reflectance parameters, and then

*중앙대학교 전자공학과 대학원

**한서대학교 전자계산학과 전임강사

***중앙대학교 전자공학과 교수

論文番號:96098-0322

接受日字:1996年 3月 22日

arbitrary shape object made of the same material as sample can be reconstructed by matching with reference image. Photometric matching method proposed in this paper is robust because it matches object image with the reference image considering its neighbor brightness distribution. Also, in this paper plate diffuse illumination is used to remove intensity disparity with simple scheme. It is expected that the proposed algorithm can be applied to 3D recognition, vision inspection system and other fields.

I. 서 론

컴퓨터 시각(computer vision) 연구의 궁극적인 목적은 인간의 시각과 같은 기능의 능력을 기계에 부여하는데 있다. 이러한 목적중에 가장 중요한 3차원 정보의 획득 및 인식이라는 문제를 놓고 과거에서부터 최근까지 활발한 연구가 진행되어 왔다. 중간단계(mid-level)의 컴퓨터 시각 연구에서 주된 관심사는 영상의 장면(scene) 내에서 그 영상이 가지는 본질적인 정보를 얻는데 있다. 면 방향, 반사특성, 거리정보등이 바로 그것이며, 이와 같은 정보는 상위 단계(high-level)의 시각연구에 단서가 된다. 물체의 반사특성에서 형상을 복구하는 방법(shape from shading: SFS)은 이와같은 중간단계의 시각연구에서 매우 중요한 분야가 되어 왔다. 과거의 SFS연구에서 주된 관심의 대상은 난반사(diffuse reflectance)성분이 지배적인 Lambertian 면에 한정되었다[1]. 그러나 실제 자연 세계의 물체는 난반사 뿐만 아니라 전반사(specular reflectance)성분이 함께 존재하는 혼성 반사(hybrid reflectance)의 특성을 갖는다[2]. 이와같은 혼성반사의 성질때문에 물체표면의 밝기분포가 모르지 않아 기존의 SFS방법으로는 정확한 형상을 복구할 수가 없었다. 따라서 밝기분포를 정확하게 예측하기 위해 반사특성을 알아 내야 할 필요가 생긴다. 이와 같은 목적을 위해 밝기 영상과 거리영상의 융합을 통해 반사특성을 검출하려는 방법도[3] 제안되었으나, 이 방법은 형상 복구의 문제를 위한 위한 것이 아닌 반사특성 자체의 검출을 목적으로 하고 있다. 또한 다중광원을 이용하여 전반사 성분이 발생하는 부분은 제외시키는 방법도[4] 제안 되었는데 이 방법 역시 어느 정도의 반사특성을 알고 있어야 하는 제한사항이 있다. 본 논문에서는 이와 같은 문제를 해결하기 위해 표분구를 이용한 방법을 제안한다. 표분구는 단일제절로 이루어져 있고 관찰자의 시각방향에 대해 거의

모든 법법선(surface normal)성분을 가지고 있기 때문에 밝기분포를 예측하기에 유리하다. 단일광원에서 정사영된 표분구의 표분점들에 대해 Torrance-Sparrow모델[1][5]을 적용한다. Torrance-Sparrow모델의 반사특성 파라미터를 추정하기위해 LMS알고리즘을 이용하며 추정된 반사특성 파라미터를 이용하여 서로다른 세 위치의 광원에서 법법선 성분과 밝기값으로 이루어진 참조영상을 만든다. 이렇게 만들어진 참조영상과 동일제절의 입의 형상의 물체로부터 주변 회소의 분포를 고려하여 밝기값을 매칭하는 3차원 영상복구 방법을 제안한다. 본 논문은 다음과 같이 구성되었다. 제2장에서 Torrance-Sparrow모델을 근거로 한 반사특성을 설명하고, 제3장에서는 표분구를 이용한 반사특성 파라미터의 추정방법 및 관찰 좌표기(diffuser)를 이용한 조명 방법을 제시한다. 그리고 제4장에서는 참조영상과의 매칭에 형상복구 방법을 기술하고, 제5장에서는 본 논문에서 제안한 방법을 실제 영상에 적용한 실험결과를 보인다. 그리고 마지막 장으로 제6장에서 결론을 제시한다.

II. 물체의 반사특성

기존의 SFS연구에서는 물체의 반사특성을 Lambertian 모델로 가정했다. 그러나 실제 물체는 난반사 성분 뿐만 아니라 전반사 성분도 어느 정도 혼합된 혼성반사 면으로 이루어져 있다. 이와같은 반사특성을 설명할 수 있는 모델로써 Torrance-Sparrow모델[1][5]을 대표적으로 들 수 있는데 이 모델은 기하광학적인 메커니즘에 근거를 두고 빛의 물리학적 성질을 간략화시켜 만든 모델이다. Torrance-Sparrow 모델은 물체의 표면이 거울과 같은 미소면들이 불규칙적인 분포를 가지고 구성되어 있다고 가정된 모델로써, 물체의 반사특성을 다중반사(multiple reflection)와 내부산란(internal scattering)에 의한 난반사 성분과 거울면 면

사와 같은 전반사 성분의 선형적인 합으로 이루어져 있다. 난반사 성분은 Lambertian 법칙에 근거하고 전 반사 성분은 Gauss 분포를 갖는 확률적 베킨니즘을 사용한다. 따라서 단일 점광원이 물체를 비출때 물체 표면의 한점에서 밝기값을

$$I = I_{diff} + I_{spec} = k_d f_d + k_s f_s, \quad (1)$$

$$k_d + k_s = 1$$

과 같이 나타낼 수 있는데, 여기서 k_d, k_s, f_d, f_s 는 각각 난반사와 전반사 가중치와 밝기의 세기(intensity)를 나타낸다. 난반사와 전반사의 양방향 반사분포함수 (bidirection reflection distribution function)로써

$$f_d = \frac{\rho}{\pi} \mathbf{n} \cdot \mathbf{s}, \quad f_s = \frac{FGP(\alpha, \sigma)}{4 \cos \theta_i \cos \theta_r} \quad (2)$$

와 같이 정의된다. 여기서 $\rho, \mathbf{n}, \mathbf{s}, F, G$ 는 각각 반사도를 의미하는 알베도 상수, 면법선 벡터, 광원의 위치벡터, 입사광과 반사광의 세기의 비를 나타내는 Fresnel 계수, 그림자(shadowing)와 가려짐(masking) 효과를 고려한 기하감쇠항(geometric attenuation factor)을 의미한다. 또한 함수 P 는 미소면의 면기울기를 Gauss 분포로써 정의하는데, 그림 1에서와 같이 미소평면의 단면을 고려할때

$$P(\alpha, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

과 같이 나타내며, σ 는 면기울기를 나타내고, α 는 면의 평균방향과 미소면의 사이각도를 뜻한다.

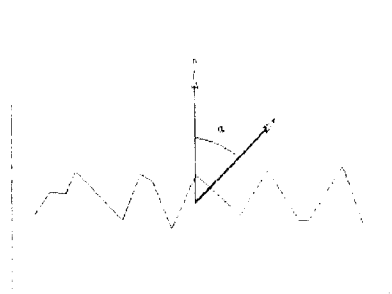


그림 1. 미소평면의 단면모델
Fig 1. The model of micro-facet cross section

Torrance-Sparrow모델의 기하학 모델을 그림 2에서 보인다. 여기서 벡터 h 는 시각벡터 v 와 광원벡터 i 의 이분각 벡터로 정의된다.

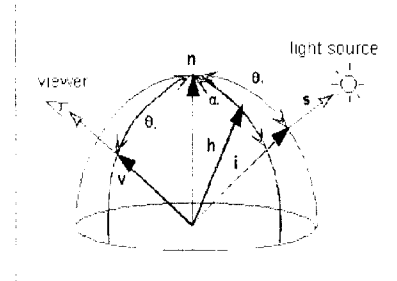


그림 2. Torrance-Sparrow 모델
Fig 2. Torrance-Sparrow model.

Ⅲ. 확산 조명과 반사특성의 추정

3.1 확산 조명

확산 조명(diffuse illumination)[4][6][7]은 물체의 표면을 고르게 비출 뿐만 아니라 강전반사(specular spike) 성분과 광휘점(highlight)을 줄이는 목적으로 사용된다. 기존의 확산 조명은 반구형태를 가지고 측광표본법(photometric sampling method)에서 제안되었다[4]. 그러나 반구 형상의 확산기(diffuser)는 기하학적 해석이 힘들 뿐만 아니라 확산기 내에서 발생하는 상호 다중 반사(multiple reflection)때문에 해석상 어려움이

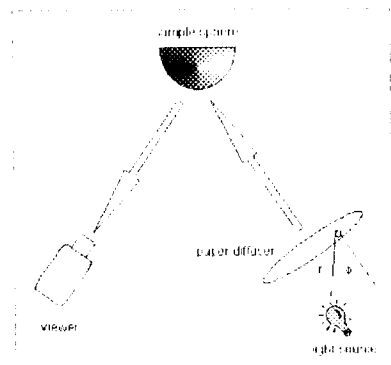


그림 3. 판상 확산조명
Fig 3. The geometry of plate diffuse illumination

따른다. 본 논문에서는 반투명한 얇은 재질을 이용한 판상 확산기(plate diffuser)를 이용한다. 광원이 판상 확산기상의 한 점에 조사될때 그 점에서의 조도 E(irradiance)는 $E = \frac{I_{source} \cos \phi}{r^2}$ 과 같이 나타낼 수 있는데, 여기서 I_{source} 는 광원의 세기를 나타내고, r과 ϕ 는 각각 광원과 확산기 사이의 거리와 법선각도를 뜻한다. 따라서 확산기 전체를 투과하는 평도의 세기(radiance)는 $L = \iint_s \tau E ds$ 와 같이 조도 E를 면적분 함으로써 구할 수 있다. 여기서 τ 는 확산기를 투과하는 광원의 감쇠 상수이다. 그림 3에서 판상 확산조명의 개략도를 보인다.

3.2 반사특성 추정

Torrance-Sparrow 모델로 정의할 수 있는 물체에 대해 목적으로 하는 반사 특성은 전반사 가중치, Fresnel 계수, 먼거칠기등이다. 이와 같은 반사특성 계수들은 상호 독립적이지만 비선형적으로 이루어져 있기 때문에 그 추정이 어렵다. 앞절에서 보인 식(1), (2), (3)의 관계에서 반사특성 파라미터 $[k, F, 1/2 \sigma]$ 를 추정하기 위해 본 논문에서는 LMS(least mean square)방법을 표본구에 적용하여 각 계수를 계산한다. 광원의 위치가 표본구에 대해 충분히 거리를 두고 있고, 표본구의 지름이 작으면 표본구의 중심에 가까운 점들에 대해 광원은 수직 입사된다고 가정할 수 있다. 본 논문에서는 물체해결을 간략하게 하기 위해 광원이 수직입사되는 부분에 대해 해석한다. 광원으로부터 입사되는 빛의 단면을 전자파면으로 생각할 수 있다. 빛이 매질 1에서 매질2로 입사될 때, 각 매질의 굴절률을 η_1, η_2 라고 하면 Fresnel 계수 F를 정의함에 있어서 수직 입사를 가정하면 입사각 θ_i 와 투과되는 각 θ_t 는 서로 같다. 따라서 Fresnel 계수는 각 매질의 굴절률과 입사 및 투과각으로 나타낼 수 있다.

$$F = \frac{\eta_2 \cos \theta_t - \eta_1 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_t + \eta_1 \cos \theta_i} \Big|_{\theta_i = \theta_t = 0} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \quad (4)$$

표본구 영상은 중심으로부터 몇개의 작은 영역으로 나누고 전반사 가중치 ks와 Fresnel 계수 F는 0에 가까운 임의의 값으로 초기화 된다. 각 영역에서 밝기값의 SSE(sum squared error)를 줄이도록 반사특성

계수를 갱신한다. 오차함수는 표본구의 실제 밝기값과 계산된 밝기값의 차의 제곱으로 정의할 수 있다.

$$e(x, y) = \sum_x \sum_y (I_{real}(x, y) - I_{estimate}(x, y, k_s, F, \sigma))^2 \quad (5)$$

이러한 오차함수를 목적함수로 둔다. 반사특성 계수는 오차함수가 최소가 되도록 스텝사이즈(step size) μ 만큼씩 갱신된다. 먼거칠기 성분인 σ 를 고정시키고 나머지 두개의 반사특성계수를 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} k_s(n+1) &= k_s(n) + \mu \hat{\nabla}_{k_s} \\ F(n+1) &= F(n) + \mu \hat{\nabla}_F \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 편미분항은 각 영역내에서 각각의 반사특성 파라미터에 대한 오차의 편미분의 합으로 이루어진다.

$$\hat{\nabla}_{k_s} = \sum_x \sum_y \frac{\partial e(x, y)}{\partial k_s} \quad (7)$$

$$\hat{\nabla}_F = \sum_x \sum_y \frac{\partial e(x, y)}{\partial F}$$

반사 특성계수 추정을 위한 LMS 알고리즘을 그림 4에서 개략적으로 보인다.

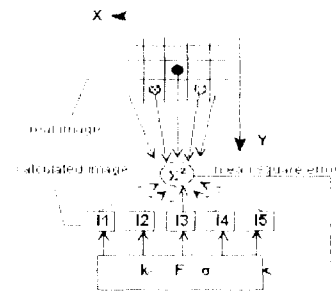


그림 4. 반사특성 추정을 위한 LMS 알고리즘
Fig. 4. LMS algorithm for estimation of reflection properties

IV. 측광정합에 의한 형상복구

4.1 참조영상 생성과 측광정합법

표본구와 동일한 재질로 이루어진 물체의 형상복

구를 위해서 참조영상을 만든다. 참조영상은 표본구와 동일한 크기의 구영상으로써 서로 다른 세 위치의 광원이 조사되었을 경우에 대해 추정된 반사특성 파라미터를 Torrance-Sparrow 모델에 적용하여 생성한다[6]. 따라서 참조영상은 모든 방향의 법선벡터와 밝기값으로 이루어진다. 본 논문에서 제안하는 형상복구 방법은 각기 다른 세 방향의 광원에서 생성된 참조영상과 표본구와 동일재질로 이루어진 입의의 형상을 갖는 물체의 영상간의 매칭을 통해 이루어진다. 매칭의 전략으로 실제 영상의 밝기값에 대해 참조영상 내의 후보점들의 주변 화소를 고려하여 오차가 가장 작은 참조영상의 법선 벡터를 해당 점의 법선 벡터로 택하는 방법을 사용한다. 이 방법은 한 화소의 밝기값이 아닌 주변 화소의 밝기 분포에 영향을 고려하였으므로 갑작스런 밝기의 변화에 의한 오차를 줄이고, 평활화(smoothing) 연산의 효과를 갖기 때문에 후처리과정이 필요없다.

즉, 첫번째 영상의 한 점 (x_0, y_0) 에 대해 대응하는 참조영상의 후보점들이 $C = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$ 으로 결정된다. 각각의 후보점들에 대해 나머지 두장의 영상에서 각각의 참조영상에서 인접 화소와의 절대오차의 합이 가장 작은 점을 그 점의 법선 벡터 V 로 결정한다. 이와같은 관계는 $N \times N$ 인접 화소에 대해 고려할때,

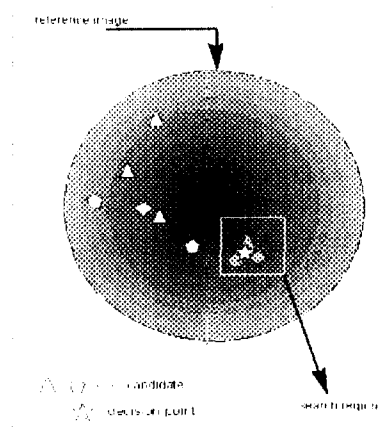


그림 5. 측광정합에 의한 형상복구
Fig 5. Shape reconstruction method using photometric matching

$$V(x, y) = \min \left[\sum_{x=x_0}^{x_0+N} \sum_{y=y_0}^{y_0+N} |I_1(x_0, y_0) - S_1(x, y)| + |I_2(x_0, y_0) - S_2(x, y)| \right]$$

와 같은 식으로 나타낼 수 있으며, 여기서 I_1 과 I_2 는 각각 실제영상의 밝기값이고, S_1 과 S_2 는 대응하는 참조영상의 밝기값을 나타낸다. 참조영상과 정합에 의한 형상 복구방법을 도식적으로 그림 5에 보인다.

4.2 기존의 측광입체시와의 성능비교

기존의 측광입체시법(photometric stereo method)은 밝기값과 면법선 벡터의 구배공간상(gradient space)의 매칭을 기본으로 전체한다[11]. 구배공간은 시각 방향을 기준으로 했을때, 영상면의 방향에 대한 기울기 공간을 의미한다. 이러한 구배공간은 3차원 좌표계상의 입의의 한 평면을 2차원 좌표계상의 한점으로 매핑하는데 기존의 측광입체시법에서는 각영상에 대해 구배공간상에서 반사도가 같은 점을 계산하여 법

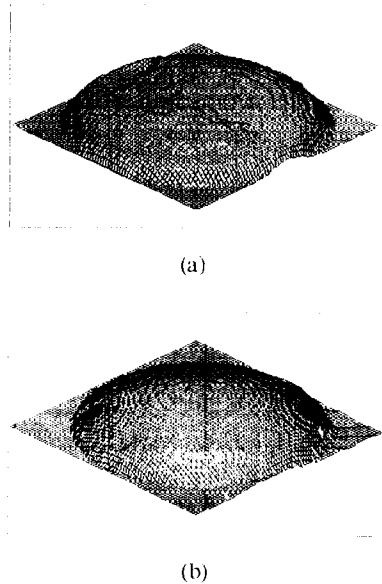


그림 6. 복구된 면의 비교
(a) Woodham의 측광입체시법
(b) 제안된 측광정합법

Fig 6. Comparison of reconstructed surface
(a) Woodham's method
(b) Proposed method

k_s	탁구공	아크릴
$1/2 \sigma^2$	0.5994	0.13158
F	1.0339	19.973
	0.6026	0.74752

표1. 추정된 반사특성

Table 1. Estimated reflectance properties

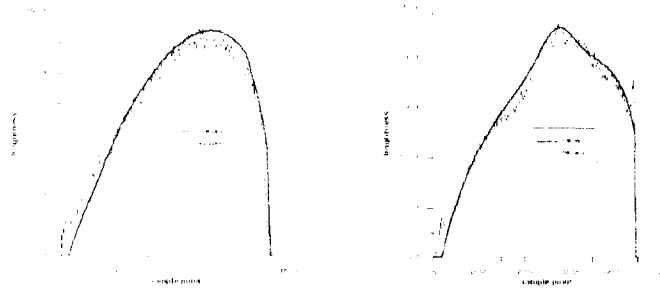


그림 10. 표본구의 밝기분포 (a)탁구공 (b)아크릴반구
Fig. 10. Brightness distribution of sample spheres
(a)Pingpong ball (b) Acril hemisphere

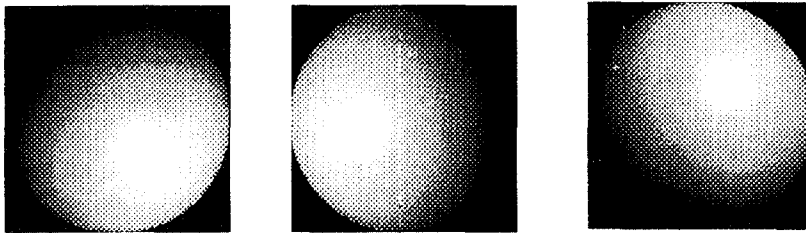


그림 11. 참조영상 (아크릴)
Fig. 11. Reference image(acril)

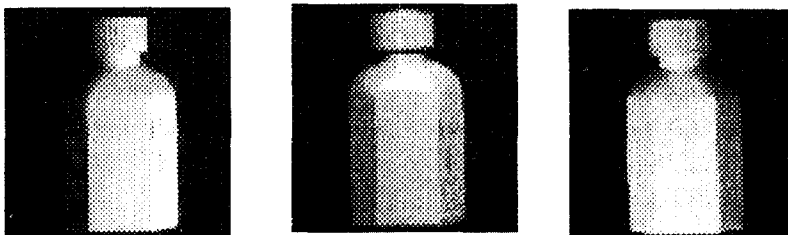


그림 12. 실제 밝기영상(아크릴병)
Fig. 12. Real brightness image(acril bottle)

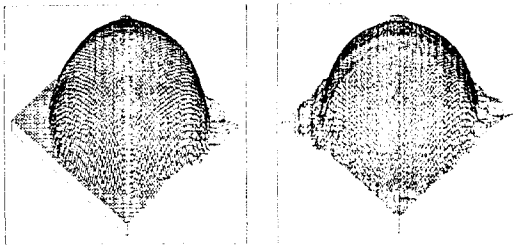


그림 13. 제안된 방법으로 복구된 표본구 (a) 탁구공 (b) 아크릴 반구

Fig 13. Reconstructed sample spheres using proposed method (a) pingpong ball (b) acrylic hemisphere

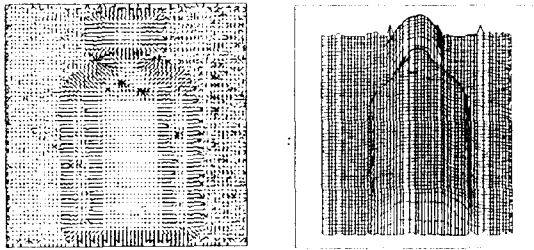


그림 14. 복구된 아크릴 병 (a) 바늘지도 (b) 3차원 영상

Fig 14. Reconstructed acrylic bottle (a) Needle map (b) 3D shape

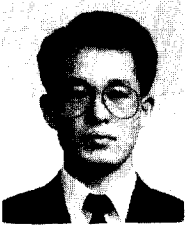
Ⅶ. 결 론

본 논문에서는 혼성반사면의 반사특성을 추정하고 3차원 형상복구를 위해 표본구를 이용한 새로운 방법을 제안했다. 난반사 성분과 전반사 성분이 혼합된 실제 물체에 대해 단일 재질로 구성된 표본구의 각 영역에 대하여 LMS 알고리즘을 이용하여 반사특성을 추정할 수 있다. 본 논문에서 구하고자 하는 반사특성을 전반사 가중치, Fresnel 계수, 먼거칠기 성분 등이며, 실제 영상에 대해 반사특성을 추정해서 밝기 오차가 매우 작음을 보였다. 또한 강전반사 성분과 광휘점을 줄이기 위해 판상 확산기를 이용한 확산 조명 방법을 도입하였으며, 판상 확산 조명하에서 추정된 반사특성 파라미터를 사용하여 밝기값과 면 법선으로 이루어진 참조영상을 생성할 수 있다. 본 논문에서 제안된 측광정합을 이용한 새로운 형상복구 알

고리즘은 참조영상과 실제 영상의 정합에 의해 전반사 성분이 강한 물체에 대해서도 3차원 형상복구가 가능하기 때문에 기존의 측광정합법에 비해 훨씬 강건한 방법임을 알 수 있다. 실제 세계와 훨씬 더 유사한 반사모델에 대한 연구가 앞으로 병행되어야 하겠다.

참 고 문 헌

1. Robert J. Woodham, "Photometric method for determining surface orientation from multiple images," *Optical Engineering*, vol. 19, pp. 139-144, 1980.
2. S. K. Nayar, K. Ikeuchi, and T. Kanade, "Surface Reflection: Physical and Geometrical Perspectives," *IEEE Trans. on PAMI*, vol. 13, no. 7, July 1991.
3. K. Ikeuchi and K. Sato, "Determining Reflectance Properties of an Object Using Range and Brightness Images," *IEEE Trans. on PAMI*, vol. 13, no. 11, pp.1139-1153, November. 1991.
4. S. K. Nayar, K. Ikeuchi, and T. Kanade, "Determining Shape and Reflectance of Hybrid Surface by Photometric Sampling," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 6, no. 4, August 1990.
5. K. E. Torrance and E. M. Sparrow, "Theory for off-specular reflection from roughness surface for ray reflection," *Journal of Optical Society of America*, vol. 65, pp.531-536, 1967.
6. 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, December 1995.
7. 류석현, 김태은, 최종수, "측광입체시뮬을 이용한 혼성반사면의 특징 추출 및 3차원 형상복구," 제8회 신호처리 합동학술대회 논문집, 제8권, pp. 1078-1081, 1995
8. S. Bakshi and Y. H. Yang, "Shape From Shading Non-Lambertian Surfaces," *Proc. of ICIP*, pp. 130-134, 1994.



金 泰 銀(Tae-Eun Kim) 정회원

1964년 1월 29일생

1989년 8월: 중앙대학교 전기공
학과 졸업(공학사)

1992년 2월: 중앙대학교 대학원
전자공학과 졸업(공
학석사)

1993년 9월~현재: 중앙대학교 대
학원 전자공학과 박
사과정 재학중

※주관심분야: 로봇시각, 영상처리, 컴퓨터비전, 신
경회로망, 로보틱스, 패턴인식, 인공지능
등임



宋 浩 根(Ho Keun Song) 정회원

1965년 1월 13일생

1991년 2월: 중앙대학교 전자공
학과 졸업(공학사)

1993년 2월: 중앙대학교 대학원
전자공학과 졸업(공
학석사)

1993년 3월~현재: 중앙대학교 대
학원 전자공학과 박
사과정 수료

1996년 3월~현재: 한서대학교 전자계산학과 전임강사

※주관심 분야: 영상처리, 영상 분할, 패턴 인식, 3차
원 비전 등임



柳 碩 滋(Seok-Hyun Ryu) 정회원

1971년 11월 3일생

1995년 2월: 중앙대학교 전자공
학과 졸업(공학사)

1995년 3월~현재: 중앙대학교 전
자공학과 대학원 석
사과정중

※주관심분야: 3차원비전, 신경회
로망, 영상코딩 등
임.

崔 宗 秀(Jong Soo Choi)

정회원

1981년 9월~현재: 중앙대학교 전자공학과 교수

한국통신학회 논문집 제20권 제5호 참조