

혼합반사 물체의 형상인식

김태은

*남서울대학교 공학부 멀티미디어학과

Shape Recognition of Hybrid Reflection Object

Tae-Eun Kim

*Dept. of Multimedia, Nam-Seoul Univ.

요약문

본 논문에서는 기준 영상으로부터 면의 반사특성을 검출하고, 구해진 반사특성을 임의의 물체에 적용하여 3매의 명암영상을 얻는다. 이 영상을 측광입체시법(photometric stereo method)에 적용하여 3차원 형상인식하는 방법을 제시한다. 본 연구에서 목적으로 하는 물체의 반사특성은 난반사(diffuse reflection)성분과 전반사(specular reflection)성분이 혼합된 혼합 반사면(hybrid reflectance surface)을 그 대상으로 하며, 이러한 면의 반사특성은 Torrance-sparrow 모델로 가정하여 문제를 해결해 나간다. 본 연구에서 목적으로 하는 대상 물체는 동일한 재질로 이루어졌다는 가정 하에서 몇개의 표본점들을 취해 반복수치 계산하기 때문에 계산속도가 빠르며, 각 표본점들로부터 계산된 면특성 파라미터들의 평균값을 취해서 다시 Torrance-sparrow 모델에 적용함으로써 측광입체시법의 해석을 가능토록 한다. 즉, 3차원 형상인식 과정시 계산된 면특성 파라미터를 사용해 생성한 참조표와 명암영상과의 비교에 의해 빠른 면방향 복구를 행할 수 있다.

1. 서론

컴퓨터시각 연구에 있어서 물체의 밝기 분포로부터 3차원적인 정보를 얻어내고자 하는 연구(shape from shading)가 과거 활발하게 진행되어 왔다. 그러나 많은 제약조건이 따르고 반사특성 또한 실제 세계와는 많은 차이를 보임으로써, 그 적용이 상당히 제한된 상황하에서만 이루어졌다. 이것은 물체의 반사특성을 해석하는데 있어서 고려해야 할 요소들이 많기 때문이며, 이러한 이유로 기존의 shape from shading 연구에서는 반사특성에 대한 기지의 정보를 이용하여 물체의 형상복구에 중점을 두었다. 최근에는 물체의 반사특성을 검출해 내는 연구가 진행되었는데, 밝기 영상과 거리 영상을 서로 결합하는 융합(fusion)방법을 이용하거나^{[6][8]} 복수 개의 광원으로부터 반복적인 계산에 의한 방법등^{[2][3]} 여러 가지 방법적인 연구가 시도되고 있다. 본 연구에서는 자동화 인식 및 표면상태 검사를 목적으로 물체의 반사특성을 검출해 내기 위해 표본구영상을 이

용하며, 검출된 반사특성으로부터 동일 재질 물체의 형상 인식하는 방법을 제안한다. 단일 광원하에서 CCD 카메라에 정사영된 표본구로부터 표본점들을 택해 Torrance-Sparrow 모델을 가정한 물체의 밝기 값과의 관계를 반복적인 수치해석법을 사용해 반사특성을 구한다. 이 방법은 단일 광원을 사용할 뿐만 아니라 몇 개의 표본 점만을 택하여 계산하므로 수행속도가 빠르다. 그리고 물체의 형상 인식는 다중 광원에 의한 측광입체시법을 사용하여 행해진다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 제2장에서 Torrance-Sparrow 모델을 근거로한 반사 모델을 설명하고 제3장에서 표본 구를 사용한 반사특성 검출방법을 제시한다. 그리고 제4장에서 측광입체시법에 의한 형상인식 방법을 간략하게 기술하고, 마지막으로 제5장에서 결론 및 향후 연구에 대해 논하였다.

2. 물체의 반사특성

기존의 연구에서 밝기 영상을 해석하는 방법으로 반사특성 모델을 설정하고 이를 해석하는 연구가 진행되었다. 이러한 반사특성 모델은 Lambertian 모델, Torrance-Sparrow 모델, Beckmann-Spizzichino 모델등으로 대표될 수 있다. Lambertian 모델은 이상적인 난반사(diffuse

reflection)특성을 갖는 반사모델이다.
 Torrance-Sparrow 모델과 Beckmann-Spizzichino 모델은 전반사(specular reflection)특성과 난반사특성을 함께 갖는 혼합반사 모델로써 전자는 기하광학에 근거를 둔 간략화된 모델이고, 후자는 물리광학적 방법에 의한 모델로써 전자기과의 특성을 Maxwell 방정식에 근거하여 해석하고자 한 모델이다. 본 논문에서는 Torrance-Sparrow 모델을 근거로하여 반사특성을 해석한다. 일반적인 반사모델은 난반사 성분과 전반사 성분을 모두 포함하고 있을 뿐만 아니라 배경 반사(ambient reflection)와 물체의 상호반사(interreflection) 성분 등을 포함하기 때문에 점광원에 의한 반사모델과는 약간의 차이가 있다. 이러한 반사 성분중에 중요한 부분인 난반사와 전반사 성분을 그림 1.에 보인다.

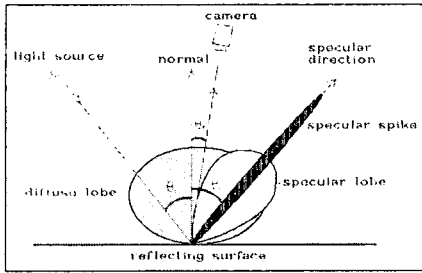


그림 1. 일반적인 반사모델

2.1 Torrance-Sparrow 모델에 의한 반사특성

Torrance-Sparrow 모델은 물체의 표면이 거울과 같은 미소면들이 불규칙적인 분포로 구성되어 있다고 생각한 모델이다.^[7] 이 모델에서는 난반사 성분과 전반사 성분이 선형적 조합으로 이루어져 있다. 영상 내의 한점에서의 밝기 값 $I(x,y)$ 는 이들 두성분의 합으로 나타낼 수 있는데,

$$I(x, y) = I_d + I_s$$

$$I_d = k_d (l \cdot n(x, y))$$

$$I_s = B \exp(-k \alpha^2) \quad (1)$$

여기서 B, k_d, σ, α 는 각각 전반사와 난반사 계수, 면거칠기와 전반사 각도를 나타내고, l 과 $n(x,y)$ 는 점광원의 방향과 면법선을 나타낸다. 전반사 계수 B 는 전반사 비율 k_s 와 물체표면에서 빛의 입사각과 굴절률에 대한 Fresnel 반사계수와 마스킹(masking), 섀도잉(shadowing)효과에 따른 감쇠 상수(attenuation factor)를 포함한다. 본 논문에서는 미소면들을 통계적으로 해석한 기울기 분포(slope distribution)에 근간한 모델을 사용하는데, 이 모델은 물체 표면이 미소평면들의 집합으로 이루어져 있고, 각각의 미소평면의 법선각도 α 를 확률분포의 변수로 가정하고 모델링 한 것이다. 확률분포에 의한 밝기값을 Gauss 함수를 사용하여 나타내면

$$I_s = \frac{k_s}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

와 같이 되고, σ 는 미소면 법선각도의 표준편차를 의미한다. 미소면의 법선각도 α 는 한점에서 전반사되는 방향과 그 점에서의 법선벡터와 이루는 각도를 의미한다. 이렇게 정의된 전반사 식의 k_s 와 (1)식에서 정의된 난반사 식에서의 계수 k_d 와의 관계는 $k_s + k_d = 1$ 로 나타낼 수 있는데^[4] 이것은 전반사와 난반사의 비율의 합이 1임을 뜻한다. 따라서 결과적으로 본 논문에서 사용한 Torrance-Sparrow 모델은

$$I = k_d (l \cdot n(x, y)) + \frac{k_s}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$k_d + k_s = 1 \quad (3)$$

과 같은 식이 된다. Torrance-Sparrow 모델에서는 난반사 성분과 전반사 성분중 약한부분(specular lobe)의 해석을 할 수 있으나, 반면 광휘점(specular spike)은 해석상 매우 어렵다. 또한, 입사광의 파장을 λ 라고 하면, 면의 거칠기와 입사광의 파장과의 비가 매우 작은 경우는 거울과 같은 매끄러운 면에 해당하는데, 즉 $\sigma/\lambda \ll 1$ 일 때에도 해석이 곤란하다.^[8] 그러나 대부분 목적으로 하는 대상 물체는 어느 정도 이상의 거칠기를 갖고 있고, 기타 도료가 칠해져 있기 때문에 해석이 가능하다.

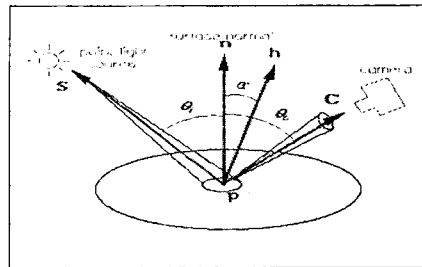


그림 2. Torrance-Sparrow 모델

3. 반사특성의 검출

식 (3)으로 정의된 Torrance-Sparrow 모델의 물체에서 반사특성을 검출하기 위해 본 논문에서 제안하는 방법은 목적으로 하는 물체의 재질과 동일한 구에 대해 수치해석법을 사용하여 구하는 방법이다. CCD 카메라에 의해 얻어진 구 영상에 대해 영상내의 한점의 좌표를 (x',y') 라 하고 대상 물체상의 대응점을 (x, y) 라 하면, $x' = mx, y' = my, m = \frac{f}{-z_0}$

인 관계가 성립하는데, 여기서 $f, -z_0, m$ 은 각각 초점거리, 물체에서 카메라까지의 평균거리, m 은 확대 및 축소 비율을 나타낸다. 따라서 영상내의 한점으로부터 구표면의 깊이를 구방정식에 의해

$$z = \sqrt{R^2 - x'^2 - y'^2}$$

로부터 구할 수 있다. 점광원의 위치와 영상내 한점에서의 법선벡터와 밝기 값을 기지의 정

보로 하여, 반사특성 계수 k_d, k_s, σ 를 구하는 것이 목적으로 하는 반사특성 검출이다. 비선형 방정식의 간략화를 위해 전반사 성분을 나타내는 식(2)를 변수 β 에 관해 Taylor 급수전개 하면,

$$I_s(k_s, \beta) \doteq I_s |_{\beta = \delta\beta} + \frac{\partial I_s}{\partial \beta} |_{\beta = \delta\beta} \cdot (\beta - \delta\beta) + O(\beta^2) \quad (4)$$

와 같이 되고 2차 이상의 항이 매우 작다고 가정하면, 결과적으로

$$I = I_d(k_d) + I_s(k_s, \beta) = c_1 k_d + k_s [c_2(\beta - \delta\beta) + c_3]$$

$$k_d + k_s = 1 \quad (5)$$

와 같은 비선형 방정식이 되는데 여기서 c_1, c_2, c_3 은 α 와 $\delta\beta$ 로 표현되는 Taylor 급수상의 상수이다. 전반사각도 α 는 $\alpha = \cos^{-1}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{h})$ 로 나타낼 수 있으며 벡터 \mathbf{h} 는 점광원과 카메라 위치벡터의 이분 벡터를 뜻한다. 식(5)로부터 영상내의 임의의 두점을 잡아 그점의 밝기값과 β, k_s 와의 비선형 연립방정식을 세울 수 있는데 본 논문에서는 이를 Newton-Rapson법을 사용하여 풀었다. 구하고자 하는 해의 초기 벡터를 $\mathbf{x}_0 = (k_{s0}, \beta_0)$ 로 놓으면,

$$\mathbf{x}_1 = \mathbf{x}_0 - G(\mathbf{x})^{-1}f(\mathbf{x}) \text{이고,}$$

$$\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_i + c \text{ 인 관계로부터 벡터 } \mathbf{x} \text{를 구}$$

할 수 있다. 여기서 $c = G(\mathbf{x})^{-1}f(\mathbf{x})$ 이고 $G(\mathbf{x})$ 는 Jacobian matrix가 된다.

\mathbf{x} 벡터의 각 요소인 k_s, β 가 상대 허용오차 ϵ ($=10^{-6}$) 이내가 되도록 반복하면서 수렴되는 해를 구한다.

4. 측광입체시법에 의한 형상복구

본 논문에서 형상복구 알고리즘으로 측광입체시법을 사용하였다. 각기 다른 위치의 3개의 광원을 조사함으로써 기존의 측광입체시법에서 문제가 되는 유일해 결정 문제를 해결하였다. 각 광원에 대하여 검출된 반사특성을 사용하여 밝기값과 법선벡터에 관한 참조표를 만들 수 있다.^[5] 따라서 동일한 재질로 이루어진 물체를 3개의 광원에 의해 얻어진 영상의 밝기값과 작성된 참조표를 각 화소별로 비교함으로써 형상복구를 할 수 있다.

5. 실험 결과

본 논문에서 제안한 반사특성 검출 방법의 타당성을 검증하기 위해 합성 명암영상에 적용하고 검출된 각 요소에 대한 값들을 보인다. 합성된 반구 영상은 점광원의 위치가 tilt=240°, slant=45° 인 경우의 명암영상이다. 카메라의 위치는 tilt=0°, slant=0° 인 정사영된 영상이다. 합성된 구영상은 전반사 비율 ks가 0.8

이고, 먼거칠기성분 $\frac{1}{2\sigma^2}$ 이 5.5인 전반사성분이 비교적 강한 영상이다. 실험 구영상을 그림 1.에 보인다.

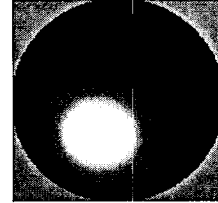
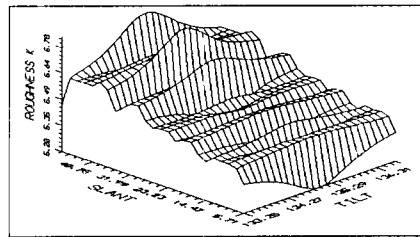
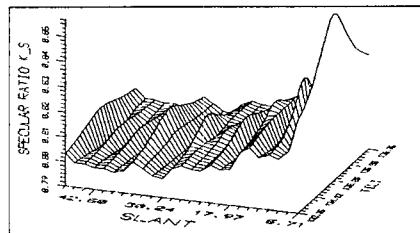


그림 2. 실험 구영상
수치해석을 위해 택한 구영상의 표본점들은 영상내의 중심으로부터 tilt가 133.1° 에서 136.8° 까지, slant가 5.7° 에서 46.7° 까지의 범위에 있는 30개의 점을 택해 계산했다. 이렇게 함으로써 가장 밝은 부분에서 밝기값이 정규화되면서 발생한 오차를 피할 수 있다. 검출된 먼거칠기와 전반사 비율을 그림 3.에서 보인다. 먼거칠기의 평균값은 5.511779이고 전반사 비율의 평균값은 0.803234로써 거의 비슷한 값으로 수렴했음을 보여준다. 그림 4.에서는 각 표본점들에서 구해진 반사특성 값을 Torrance-Sparrow 모델에 적용하여 계산된 밝기값과 실험영상의 밝기값과의 비교를 보여준다. 밝기값의 차이가 매우 작다는 것에서 반사특성이 거의 정확하게 검출되었음을 알 수 있다. 또한 측광입체시법으로 물체의 형상복구를 하기 위해 각 법선벡터에 따라 밝기값의 참조표를 형성할 수 있는데 이것을 그림 5.에서 보인다.



(a)



(b)

그림 3. 검출된 반사특성
(a) 먼거칠기($\frac{1}{2\sigma^2}$) (b) 전반사비율(ks)
평균값=5.511779 평균값=0.803234

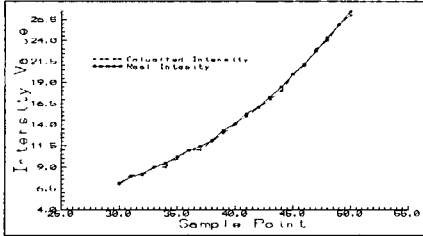


그림 4. 측정된 밝기값과 계산된 밝기값의 비교

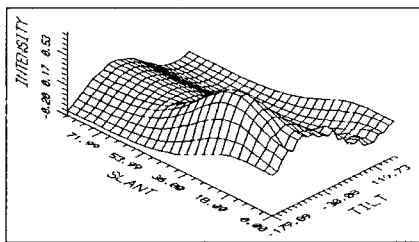
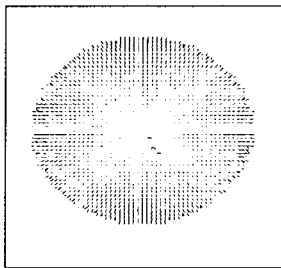
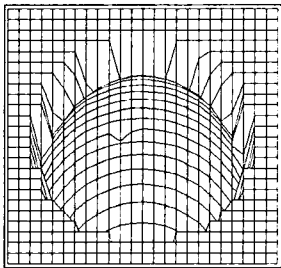


그림 5. 밝기 참조표 (광원: tilt=240° , slant=45°)



(a)



(b)

그림 6. 복구된 구영상 (a) 바늘지도 (b) 거리정보

6. 결론

본 논문에서는 전반사 성분과 난반사 성분이 혼합된 혼합 반사면의 반사특성 검출을 목적으로 표본구를 사용하여 수치해석법을 적용하였다. 혼합 반사모델로써 Torrance-Sparrow 모델을 이용하여 목적으로 하는 반사특성을 전반사 비율 k_s 와 면 거칠기 σ 로 정의하고 선택된 표본점들에 대해 Newton-Rapson법을 적용하여 반복적으로 구해 냈다. 검출된 반사특성은 서

로 다른 위치의 3개의 조명이 조사되었을 때의 법선벡터와 밝기값의 참조표를 생성해서 표본구와 동일한 재질의 물체의 형상복구를 행할 수 있다. 추후 연구과제로 실세계에 보다 가까운 반사모델을 대상으로 그 특성을 해석하고 적용하도록 해야겠으며, 또한 상호반사(interreflection)와 조명특성을 고려한 형상인식 알고리즘도 이루어져야 하겠다.

참고문헌

- [1] K. Ikeuchi, "Determining Surface Orientations of Specular Surfaces by Using the Photometric Stereo Method," *IEEE Trans. on PAMI*, vol. 3, no. 6, pp.661-668, November 1981
- [2] A. Okamoto, Y. Nomura, and S. Fuji, "Shape Estimation of Multiple Objects by Photometric Stereo", Proc. of ACCV, pp.101-104, 1993
- [3] S. K. Nayar, K. Ikeuchi, and T. Kanade, "Determining Shape and Reflectance of Hybrid Surfaces by Photometric Sampling", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 6, no. 4, August 1990
- [4] S. Bakshi and Y. H. Yang, "Shape From Shading Non-Lambertian Surfaces", Proc. of ICIP, pp.130-134, 1994
- [5] T. E. Kim and J. S. Choi, "3-D Shape Recovery of Hybrid Reflectance Surface Using Indirect Diffuse Illumination", Proc. of ICIP, 1995
- [6] 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, NOV. 1991.
- [7] 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
- [8] M.J. Brooks, W. Chojnacki, R. Kozera, "Impossible and ambiguous shading patterns, *Int. J. Computer Vision* 7 (2) (1992) 119-126.