

# 측광 입체시법 (Photometric Stereo Method)

김태은, 최종수

중앙대학교 전자공학과

## 1. 서 론

감각기능이 없는 로봇(robot)은 외부의 정보를 수집하여 사용할 수 없으므로, 미리 정해진 작업만을 수행하게 된다. 따라서, 그러한 로봇은 외란(disturbance)에 약하며 작업에 대한 유연성(flexibility) 또한 없다. 지능로봇은 감각기능을 갖추고 있어야 하며, 감각기구 중에서도 시각(視覺)은 가장 중요한 부분을 차지하고 있다. 시각은 다른 물체와의 접촉없이 정보를 수집할 수 있으며, 주변환경을 전체적으로 볼 수 있다는 장점이 있다. 이러한 시각 시스템은 관찰자를 둘러싸고 있는 환경이나 물체표면의 기하학적 및 물리적인 성질을 유지하는 문제에 직면하게 되는데 이들 시각 시스템이 얻을 수 있는 데이터는 카메라 또는 센서에 의해 측정된 빛의 세기이며 이는 주로 2차원 영상으로 나타내진다. 이러한 2차원 영상으로부터 표면의 3차원적 성질을 찾아낼 수 있는데 대표적인 3차원 성질로는 관찰자와 물체 표면사이의 거리, 물체의 형상, 방향, 무늬, 표면의 반사율, 그리고 순차적인 영상에서의 움직임 인자 등을 들 수 있다.

이와같이 인간의 시각능력을 기계에 부여하고자 하는 연구는 1960년대 말에 미국에서 시작되었다. 처음에는 다면체의 영상으로부터 3차원 정보를 추출한 다음 이를 재구성하는 연구가 행하여졌으나 안정된 영상을 어떻게 얻을 것인가, 얻어진 영상을 어떻게 고속으로 처리 할 것인가가 문제로 대두되었다. 1970년대 초에는 물체를 이루는 면을 구속하게 되면 3차원 물체도 2차원의 물체 인식문제로 축소될 수 있다는 점에서 우선 2차원 기계시각(machine vision)에 대한 연구가 시작되었다. 1970년대 후반에 들어서는 2차원 영상을 이용한 영상처리장치가 실용화되어 여러분야의 생산공정에서 부품의 선별 및 위치인식 등에 사용되었다. 1980년대에는 “영상내의 각 점에서의 밝기는 광원의 위치와 물체표면

의 기울기로 부터 얻어진다” 라고 하는 밝기 해석법(Shape from shading)의 한 방법으로써 측광 입체시(Photometric stereo)가 제안되었다[1,2].

컴퓨터 시각에서는 크게 복구(reconstruction)와 인식(recognition)의 두 부류로 나눌 수 있다. “복구”라는 것은 표면의 깊이나 방향, 물체의 경계, 조명원의 방향 등과 같은 시각 세계에서의 물리적인 요소들을 구하자는 것이고 “인식”은 어떤 결정이나 판단을 얻기 위한 물체에 대한 기술(description)이나 분류(classification)로서 복구된 정보를 이용한 처리 과정까지 수반하고 있다.

제대로 인식 작용을 하기 위해서는 먼저 정확한 3 차원적 성질들을 복구해야 하는데 이처럼 관찰자 주변에 존재하는 물체나 장면의 물리적인 성질들을 2 차원 영상으로부터 구하고자 하는 시각 모듈들의 집합을 초기 시각(early vision)이라 한다[3]. 초기 시각의 범주에 속하는 것들로는 윤곽선 검출(edge detection), 광학적 흐름 계산(computation of optical flow), 양안 입체시 정합(binocular stereo matching), 3 차원 표면 보간(3-dimensional surface interpolation), 그리고 X로부터 형상의 복구(shape from X)등이 있다. 여기서 X 라는 것은 형상을 유추할 수 있는 “실마리(cue)”로서 명암 분포(shading), 등고선(contour), 무늬(texture), 입체시(stereo), 그리고 움직임(motion) 등이 이에 해당한다. 이러한 형상의 복구 문제에 있어서 명암 분포를 실마리로 이용하는 경우에는 주어진 영상을 직접 입력으로 사용하지만 무늬 또는 등고선을 이용할 때는 영상에서 생성한 중간 단계의 표현인 일차적 스케치(primal sketch)를 입력으로 사용하여 형상을 복구한다[4]. 특히 이 중에서 영상의 명암 분포는 표면의 방향(surface orientation)과 밀접한 관계가 있고, 영상의 밝기 정보로부터 그 영상이 형성된 3차원 표면의 법선(surface normal)을 추출할 수 있다

는 사실이 Horn에 의해 처음으로 밝혀졌다[2]. 영상의 밝기란 엄밀히 말해서 밝기의 변동(variation of brightness)을 의미하며 밝기의 공간적인 변동은 면소(surface patch)의 방향이 다르면 조명과 이루는 각도가 달라지게 되어 나타나는 현상으로, 이 변동을 명암 분포(shading)라고 한다[5]. 이러한 명암 분포의 정보를 가지고 있는 하나의 영상으로부터 물체의 표면 모양을 구하는 것이 명암으로부터의 형상 복구(shape from shading : SFS)이다. 즉, 물체가 만들어 내는 2차원 영상으로부터 3차원 표면의 높이, 또는 깊이를 복구하는 것이 SFS의 목적이다. 영상에서 화소의 밝기는 물체의 모양, 물체 표면의 반사성질(reflectance property), 조명상태와 영상획득장치의 특성등에 의해서 결정된다[5], 특히 고정되어 있는 환경 하에서 영상의 한 점의 밝기는 해당하는 물체의 표면의 점에 입사하는 빛을 센서의 방향으로 반사하는 양에 의해 결정된다. 그러므로 물체의 형상을 복구하기 위해서는 반사성질을 잘 이해하고 정확하게 모델링하여야 한다. 제약조건 없는 일반적인 경우에 대한 반사성질을 알아낸 후에는 특정 응용에 적합한 가정을 삽입하여, 목적에 맞는 반사성질을 도출해내고 그것을 바탕으로 형상복구 등의 작업을 수행할 수 있다.

기존의 형상복구 방법들에서는 표면의 반사성질을 전반사(specular reflection) 또는 난반사(Lambertian reflection) 등 한가지로 가정해 놓고 문제를 풀어나갔다[1,6]. 그러나 실제로 우리가 접하는 많은 물체의 표면은 두가지 성질을 다 가지고 있는, 즉 반사량을 두가지 성분의 선형조합으로 나타낼 수 있는 혼성반사성질을 가진다[7,8,9].

본 논문에서는 3 차원 입체의 형상을 영상으로부터 복원하는 문제에 대해서 국내에서 이루어진 연구들을 소개한다. 물체의 반사성분을 난반사와 전반사 두가지 성분의 합으로 보는 혼성반사모델(Hybrid reflectance model)을 기반으로 하는 방법들이다.

본 논문의 구성은 2장에서는 밝기 분포로부터의 형상복구(Shape from shading)의 한 방법인 고전적인 Photometric stereo method에 대해서 개략적으로 고찰해 보고 3장, 4장에서는 혼성반사모델(Hybrid reflectance model)을 기반으로 하는 2종류의 확장된 Photometric stereo방법 대해 설명하고, 각 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 2.5차원 및 3차원 형상으로 보이고 고찰한다. 5장에서는 결론 및 고찰에 대해서 언급하고 논문을 마친다.

## 2. Photometric Stereo Method

Photometric Stereo Method은 물체의 3 차원적인 정보를 2 차원 영상에서 복구하고자 하는 연구의 한 방법으로서, 서로 다른 위치에서 조사되는 여러 조명원으로 부터 얻어지는 복수의 영상에 담겨 있는 물체 표면의 명암분포 정보를

연립시켜서 물체의 3 차원적 형상을 복구하는 방법을 일컫는다. PSM은 반사함수가 입사각과 면의 법선이 이루는 각의 cosine값에 비례한다는 간략화한 모델에 근거한다. 이 기법은 Woodham에 의해 처음 정립되었으며, Silver, Ikeuchi 등에 의해 발전되어 왔다[1,2,7]. PSM은 단일 영상을 사용하는 shape from shading경우와는 달리 세 장의 영상을 사용한다. 이때, 이들 세 장에 대한 영상조도방정식을 연립시켜서 해석적인 해를 구하게 되는데, 한 장의 명암영상을 사용할 때 발생하는 불량설정문제(ill-posed problem)가 생기지 않으므로 계산 부담이 적고 계산과정이 복잡해지지 않는 등의 장점이 있다. 또한 상대적으로 조도측정 오차에 덜 민감하고, 계산의 구현이 쉬워 고속병렬처리 구조에 적합하여, 특히 bin-picking과 같은 산업응용 목적에 유용하게 사용될 수 있다.

일반적으로 PSM에서는 조사 빔(beam)과 면 법선벡터가 이루는 사이각이  $\theta$ 라 할 때 그 위치에서의 밝기는 식 (1)와 같이  $\cos\theta$ 값에 비례한다는 사실로부터 근거하여, 서로 다른 세 조명원에 대해 얻어지는 밝기  $I_1, I_2, I_3$ 를 연립하여 식 (2)와 같은 영상조도방정식을 얻어, 그 위치에서의 면 법선 벡터  $\bar{N}$  값을 얻게 된다.

$$I = I_{\max} \cos \theta \quad (1)$$

$$\bar{N} = \frac{I_1(\bar{N}_b \times \bar{N}_c) + I_2(\bar{N}_c \times \bar{N}_a) + I_3(\bar{N}_a \times \bar{N}_b)}{[\bar{N}_a \cdot (\bar{N}_b \times \bar{N}_c)]} \quad (2)$$

여기서  $I_{\max}$ : 면 법선벡터와 조사빔이 이루는 사이각이 0도 일때의 밝기값

$\bar{N}_a, \bar{N}_b, \bar{N}_c$ : 세 조명원에 대한 각각의 위치벡터

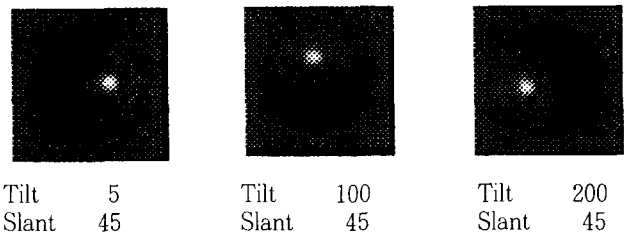


그림 1. 명암영상 (전반사 50%).

### 2.1 Reflectance Map

Woodham은 구배공간(Gradient space)에서 물체의 명암 분포와 물체면의 방향 벡터사이의 관계를 Reflectance Map으로 기술하였다. Woodham이 제안한 이 알고리즘을 Reflectance map Technique라 부른다[1,7].

서로다른 위치에서 같은 물체면에 광원이 조사되고 Z축 상에 카메라가 위치 할 때 각 경우에 카메라에 취득된 물체면의 밝기 정보로부터 물체의 표면법선 벡터를 구하는 문제이다. 본 절에서는 이러한 Reflectance map Technique 사용하여 혼성반사면 특성을 가진 물체의 표면법선 벡터를 구하

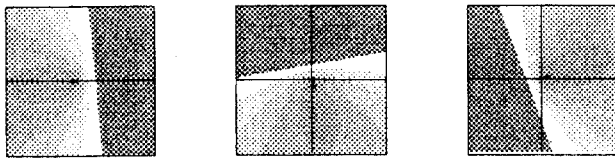
는 문제에 관해서 설명한다. 물체면의 반사특성을 광원의 세기와 물체면의 법선과 관련지어 정량적으로 나타내면,

$$I(x,y) = k R(p,q)$$

$$I = k_a \cdot \left\{ \frac{pp_s + qq_s + 1}{\sqrt{1+p^2+q^2} \cdot \sqrt{1+p_s^2+q_s^2}} \right\} + W(\theta) \cdot \left\{ \frac{pp_s + qq_s + 1 + \sqrt{p_s^2+q_s^2+1}}{\sqrt{1+p^2+q^2} \cdot \sqrt{2(1+p_s^2+q_s^2) + \sqrt{p_s^2+q_s^2+1}}} \right\}^n \quad (3)$$

와 같이 유도된다.

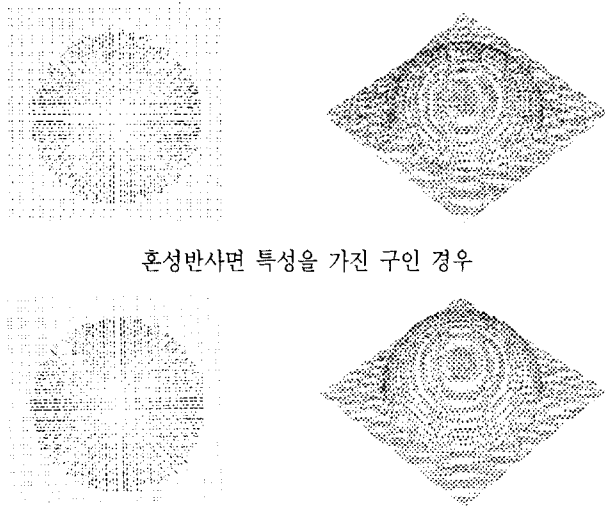
앞 절에서 보여준 명암영상에 대한 Reflectance Map을 구해보면 아래와 같다. 세 개의 Reflectance Map을 동시에 겹쳐 그린다면 세 등고선이 동시에 만나는 점이 생기고 이 한점에서의 p,q 값이 곧 영상(x,y)에서의 방향이 된다.



Re_Map	1	Re_Map	2	Re_Map	3
Tilt	5	Tilt	100	Tilt	200
Slant	45	Slant	45	Slant	45

그림 2. 반사율 지도.

● 세장의 명암영상 입력시 복원한 바늘 지도, 3차원 영상



혼성반사면 특성을 가진 구인 경우

난반사면 특성을 가진 구인 경우

그림 3. 복원한 바늘지도, 3차원 영상.

앞 절에서 제시한 Woodham의 알고리즘을 이용하여 세장의 구 명암영상을 가지고 표면 법선 벡터(surface normal)를 구하여 Needle Map(2.5차원)과 3차원으로 복원한 결과를 보인다. 완전한 난반사면을 전제로 하는 경우의 실험결과는 좋은 복구율을 보인 반면 약간의 혼성반사특성이

있는 경우에 대한 실험결과에서는 복구율이 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 여타 특수조명 및 알고리즘의 삽입에 필요하다 사료된다.

이와같이 초창기 photometric stereo에서는 Lambertian (perfect diffuse surface)면에 대해서만 3차원적으로 복원이 가능했다. 그러나 실 세계 물체의 대부분은 전반사와 난반사의 혼합체인 혼성반사특성을 갖고있다. 혼성반사물체의 종류로는 전반사 성분이 강한 거울면, 납땀면등이 있었고, 전반사, 난반사율이 거의 비슷한 플라스틱면이 있고, 난반사 성분이 상대적으로 많은 고무, 목재, 석고면등이 있다.

본 논문에서는 혼성반사면에서 전반사특성과 난반사특성이 거의 비슷하거나, 난반사특성이 우세한 물체면에 대해서 조명조건과 개선된 알고리즘을 적용하여 명암정보로부터 형상을 복구하는 몇가지 연구를 소개한다.

### 3. 확장된 측광입체시법

#### 3-1 간접 확산 광원(Indirect Diffuse Illumination Method)을 이용하는 방법

간접 확산 조명 방법은 표면의 거칠(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 이용하기때문에 대상면의 반짝임을 감소시키거나 제거하는 효과가 크다. 따라서 간접 확산 조명은 전반사 또는 밝은(shiny) 부분에 조사(illumination)하기가 용이하다[10,11].

#### 3-1-1 원반형 광원에 대한 기하광학 모델

간접 확산 조명 기법의 원반형 광원에 대해 설명한다. 원반형 난반사면에 점광원을 투사(projection)시켰을 때 임의의 한점에서의 밝기는

$$I_{disk} = \frac{I_p \cdot K_a \cdot \cos(\theta)}{d^2} \quad (4)$$

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

원반형 광원에 대한 기하수학적 광학 모델은 그림 4에 보였다. 원반형 난반사면에 점광원을 투사하였을 때 점광원과 한점  $P(r, \phi)$ 와의 거리는  $d$ 로, 다른 한점  $P'(R, \Phi)$ 와의 거리는  $d'$ 로정하고 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  $I_{disk}(r, \phi)$ 는

$$I_{disk}(r, \phi) = \frac{I_p \cdot K_a \cdot d'}{(d'^2 + (r \cos \phi - R \cos \Phi)^2 + (r \sin \phi - R \sin \Phi)^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (5)$$

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

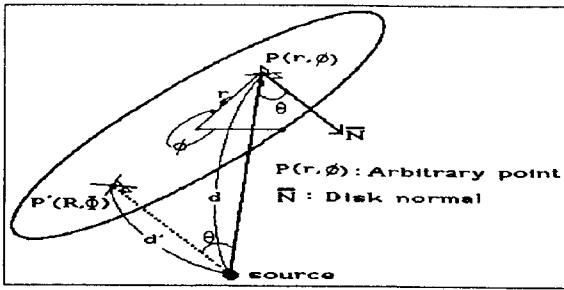


그림 4. 원반형 광원에 대한 기하광학 모델.

### 3-1-2 표면 반사 함수 유도

3-1-1절에서 언급된 원반형 광원위에 있는 임의의 면소 광원  $P(r, \phi)$ 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

$$I = I_{diff} + I_{spec} \quad (6)$$

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

$$I_{diff} = k_L \bar{s} \cdot \bar{n} \quad (7)$$

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 5에 보이는 Torrance-Sparrow(T.S.) 모델[12]을 많이 사용한다.

이 모델에서는 전반사를 일으키는 표면을 매우 작은 거울 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 5에 나타낸것과 같이 점광원을 작은 표면에 투사시켰을 때, 카

메라 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.

그림 5에서 미소 점광원에 의한 전반사 모델은

$$I_{spec} = B \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}\right) \quad \text{여기서, } (k + \frac{1}{2\sigma^2}) \quad (8)$$

와 같이 근사시켜 표현할 수 있다[7, 9, 13]. 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 없어 입자들이 거의 한방향으로 위치해 있다는 것을 의미한다.

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

$$B = K_s \cdot F \cdot G \quad (8-1)$$

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 입점면들 사이의 마스킹(masking)과 새도우잉(shadowing)효과를 모델화 한 것으로 시각 방향에 좌우된다. 그리고  $K_s$ 는 정규화를 위한 하나의 상수이다. 그림 5는 T.S.모델을 나타냈는데  $\bar{s}(\theta, \phi)$ 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  $\bar{s}(\theta, \phi)$ 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

$$\bar{n} = \frac{(\bar{s} + \bar{c})}{\|\bar{s} + \bar{c}\|} \quad (8-2)$$

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

로 나타낼 수 있다.

대상물체는 작은 혼성 반사 물체를 대상으로 하고 있으며

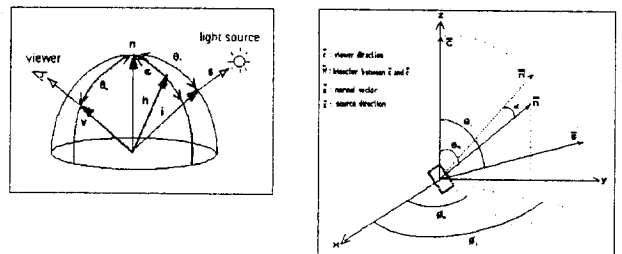


그림 5. Torrance-Sparrow(T.S.)모델에서의 작은 조각.

로 실용적인 측면에서 직교(orthogonal) 모델을 사용하였으며, 카메라와 물체와의 거리는 직교좌표로 인한 영향을 고려, 물체 지름의 약 15~20배 정도로 설정하는 것이 일반적이다. 카메라 방향으로의 밝기 값은 영상 디지털라이저 상의 밝기값으로 정해진다고 가정하였다[14].

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

즉, 그림 6에서와 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 대상물체까지의 거리를 D로 정의하고 물체 표면의 기울어진 정도를 방위각(tilt) 및 천정각(slant)으로, 미소단위의 간접 확산 광원의 방향을 S<sub>slant</sub>=ϕ 및 S<sub>slant</sub>=tan<sup>-1</sup>(r/D)로, 간접 확산 광원까지의 거리를 ds=√D<sup>2</sup>+r<sup>2</sup>로 각각 나타낼 때, 간접 확산 조명 위의 점 P(r, ϕ)에서의 세기 I'는

$$I' = \frac{I_{\text{disk}}(r, \phi) \cdot \cos(S_{\text{slant}})}{d_s^2} \quad (9)$$

으로 정의 되며, 여기서 cos(S<sub>slant</sub>)=D/d<sub>s</sub>로 주어진다.

결과적으로, 대상 물체의 한 면소에 대한 밝기 I (intensity)를 수치 해석 기법으로 이중 적분을 함으로써 식(10)과 같이 혼성 반사 물체의 표면 반사 함수를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} I_{(\text{sum})} &= \int_0^R \int_0^{2\pi} I_r \, r \, dr \, d\phi = \int_0^R \int_0^{2\pi} I_{\text{spec}} + I_{\text{diff}} \, r \, dr \, d\phi \\ &= \int_0^R \int_0^{2\pi} (k_s \cdot Y(r, \phi) \cdot S(\text{slant, tilt, } S_{\text{slant}}, S_{\text{tilt}}) \\ &\quad + k_d \cdot Y(r, \phi) \cdot L(\text{slant, tilt, } S_{\text{slant}}, S_{\text{tilt}})) \, r \, dr \, d\phi \end{aligned} \quad (10)$$

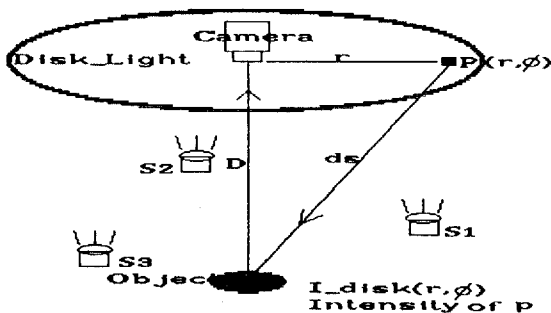
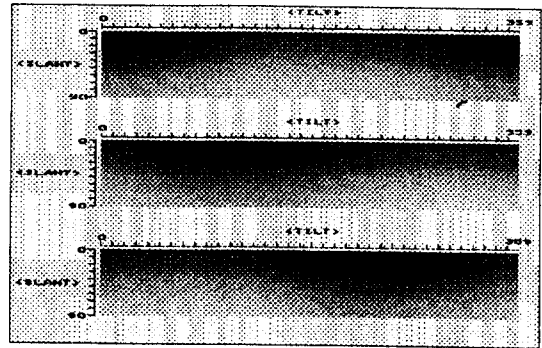


그림 6. 간접 확산 조명하에서 영상 형성 모델.

### 3-1-3 간접 확산 조명에 의한 물체의 참조표 (Reference table)

세 장의 명암영상이 입력될 때, 각각의 명암영상의 화소(pixel) 밝기값은 3차원 참조표 안의 밝기값과 비교하고 매칭시켜, 최종적으로 최적해를 구한다. 이와같이 최적해를 구하는데 사용되는 3차원 참조표는 3-1-2절에서 유도한 표면 반사 함수를 구형상에 적용하여 구형상의 각 화소에 대한 천정각(slant) 0° - 90°, 방위각(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 매칭시켜 3차원 정보를 정확하게 얻어낸다. 그림 7의 3차원 참조표는 전반사(k<sub>s</sub>)와 난반사(k<sub>d</sub>)의 비율 및 표면 특성을 고려하여 작성하였다.

3차원 참조표의 작성은 밝기비율 및 표면특성이 같은 임의의 형상을 가진 물체의 3차원 정보를 실시간으로 얻어내는데 있어서 필수적인 과정이다.

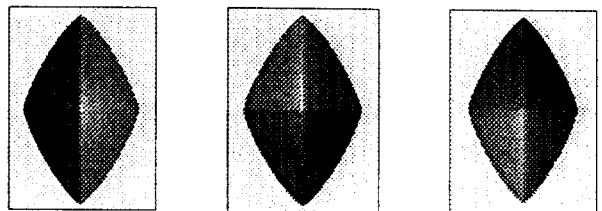


(a) k<sub>s</sub>=0.5 k<sub>d</sub>=10

그림 7. 간접 확산 조명 하에서 얻어진 참조표.

### 3-1-4. 명암 영상

명암영상들은 고른 조명의 조사방향을 고려 120도 간격



(b) Superellipsoid(1-6) (k<sub>s</sub>=0.5, k<sub>d</sub>=10)



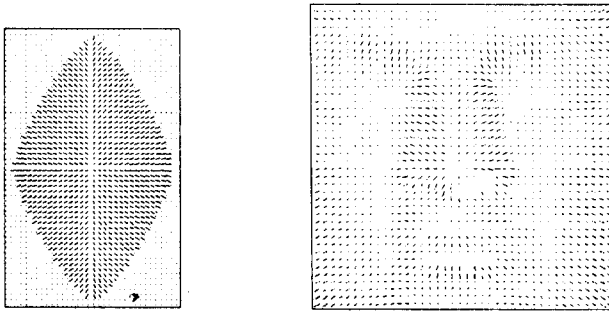
(c) Moz81 (k<sub>s</sub>=0.5, k<sub>d</sub>=10)

그림 8. 표면 반사 함수를 이용한 명암 영상들.

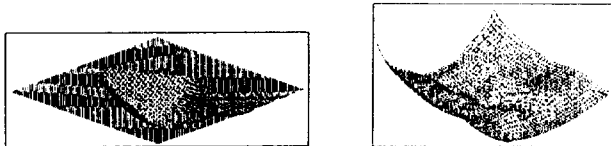
으로 조정된 간접 확산 조명방향 아래서 전반사비율( $k_s$ )과 표면특성( $k$ )의 값들이 각각  $k_s=0.5$ ,  $k=10$ 인 경우의 명암 영상들이다.

### 3-1-5. 바늘지도(needle map)

세 장의 명암영상이 입력되면 3-1-3에서 언급된 모든 방향성분과 밝기값과의 3차원 조합으로 구성된 기지의 3차원 참조표와 입력된 각 화소의 밝기 정보를 비교하여 최적의 해(법선)를 구해낸다. 그림 9는 구해 낸 법선 성분을 2.5차원 바늘 지도로 보인다.



(a) Superellipsoid(1-6) (b) Moz81  
 그림 9. 세 장의 명암 영상 입력시 복원한 needle map ( $k_s=0.5$ ,  $k=10$ ).



Superellipsoid(1-6) Moz81  
 (a)  $k_s=0.5$ ,  $k=10$  (b)  $k_s=0.5$ ,  $k=10$

그림 10. 복원된 3차원 영상.

## 4. 확산 조명(Diffuse illumination)을 사용한 photometric matching 방법

앞장에서 언급한 Torrance-Sparrow 모델에 대해서 간략하게 언급하면, 단일 점광원이 혼성반사면체를 비출때 물체 표면의 한점에서 밝기값을

$$I = I_{diff} + I_{spec} = K_d f_d + K_s f_s \quad (11)$$

$$K_d + K_s = 1$$

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 세기는 양방향 반사분포함수(bidirection reflection distribution function)로써

$$f_d = \frac{\rho}{\pi} \bar{n} \cdot \bar{s}, \quad f_s = \frac{FGP(\alpha, \sigma)}{4 \cos \theta_i \cos \theta_r} \quad (12)$$

와 같이 정의된다. 여기서  $\rho$ ,  $n$ ,  $s$ ,  $F$ ,  $G$ 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, 미소평면의 단면을 고려할때

$$P(\alpha, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}\right) \quad (13)$$

과 같이 나타내며,  $\sigma$ 는 면기울기를 나타내고,  $\alpha$ 는 면의 평균 방향과 미소면의 사이각도를 뜻한다.

### 4.1 확산 조명

확산 조명(diffuse illumination)[10,15]은 물체의 표면을 고르게 비출 뿐만 아니라 강전반사(specular spike) 성분과 광휘점(highlight)을 줄이는 목적으로 사용된다. 기존의 확산 조명은 반구 형태를 가지고 측광표본법(photometric sampling method)에서 제안되었다[15]. 그러나 반구 형태의 확산기(diffuser)는 기하학적 해석이 힘들 뿐 아니라 확산기 내에서 발생하는 상호 다중 반사(multiple reflection) 때문에 해석상 어려움이 따른다. 확산 조명방법에서는 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,  $r$ 과  $\phi$ 는 각각 광원과 확산기 사이의 거리와 법선각도를 뜻한다. 따라서 확산기 전체를 투과하는 광도의 세기(radiance)는  $L = \iint_s \tau E ds$ 와 같이 조도  $E$ 를 면적분 함으로써 구할 수 있다. 여기서  $\tau$ 는 확산기를 투과하는 광원의 감쇠 상수이다. 그림 11에서 판상 확산조명의 개략도를 보인다.

광원의 위치가 표본구에 대해 충분히 거리를 두고 있고, 표본구의 지름이 작으면 표본구의 중심에 가까운 점들에 대해 광원은 수직 입사된다고 가정할 수 있다.

본 방법에서는 문제해결을 간략하게 하기 위해 광원이 수직 입사되는 부분에 대해 해석한다. 광원으로부터 입사되는 빛의 단면을 전자파면으로 생각할 수 있다. 빛이 매질1에서 매질2로 입사될 때, 각 매질의 굴절률을  $\eta_1$ ,  $\eta_2$ 라고 하면 Fresnel 계수  $F$ 를 정의함에 있어서 수직 입사를 가정하면 입사각  $\theta_i$ 와 투과되는 각  $\theta_t$ 는 서로 같다. 따라서 Fresnel 계수는 각 매질의 굴절률과 입사 및 투과각으로 나타낼 수 있다.

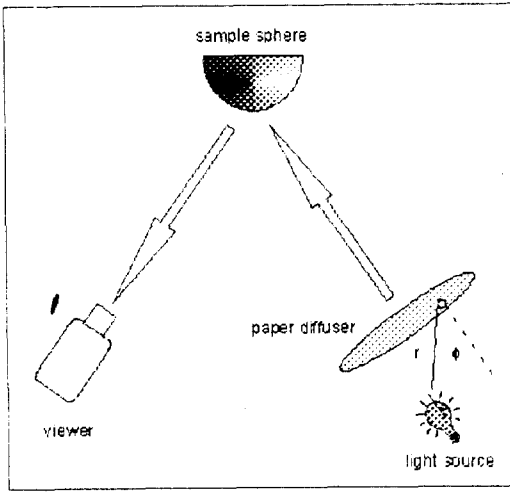


그림 11. 판상 확산조명.

$$F = \frac{\eta_2 \cos \theta_i - \eta_1 \cos \theta_r}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_r} \Big|_{\theta_r = \theta_i = 0} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \quad (14)$$

표본구 영상은 중심으로부터 몇개의 작은 영역으로 나누고 전반사 가중치  $k_s$ 와 Fresnel 계수  $F$ 는 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 있으며,

$$e(x, y) = \sum_x \sum_y (I_{real}(x, y) - I_{estimate}(x, y, k_s, F, \sigma))^2 \quad (15)$$

이러한 오차함수를 목적함수로 둔다. 반사특성 계수는 오차함수가 최소가 되도록 스텝사이즈(step size)  $\mu$ 만큼씩 갱신된다. 먼거칠기 성분인  $\sigma$ 를 고정시키고 나머지 두개의 면 특성계수를 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} k_s(n+1) &= k_s(n) + \mu k_s \\ F(n+1) &= F(n) + \mu F \end{aligned} \quad (16)$$

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

$$\begin{aligned} k_s &= \sum_{x=black} \sum_{y=black} \frac{\partial e(x, y)}{\partial k_s} \\ F &= \sum_{x=black} \sum_{y=black} \frac{\partial e(x, y)}{\partial F} \end{aligned} \quad (17)$$

#### 4-2 참조영상 생성과 측광정합법

표본구와 동일한 재질로 이루어진 물체의 형상복구를 위해서 참조영상을 만든다. 참조영상은 표본구와 동일한 크기의 구영상으로써 서로 다른 세 위치의 광원이 조사되었을 경우에 대해 추정된 반사특성 파라미터를 Torrance-Sparrow 모델에 적용하여 생성한다. 따라서 참조영상은 모든 방

향의 법선벡터와 밝기값으로 이루어진다. 본 논문에서 제안하는 형상복구 방법은 각기 다른 세 방향의 광원에서 생성된 참조영상과 표본구와 동일재질로 이루어진 임의의 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 주변화소의 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

$C = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_m, y_m)\}$ 으로 결정된다. 각각의 후보점들에 대해 나머지 두 장의 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,

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

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 12 에 보인다.

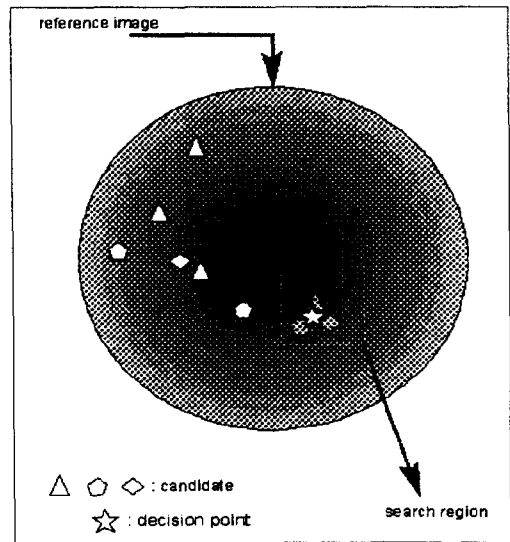


그림 12. 측광정합에 의한 형상복구.

실제 실험을 통해 제안된 알고리즘의 타당성을 입증 하기 위해 대상 물체로 전반사 성분이 강한 매끄러운 면으로 이루어진 아크릴 반구를 표본구로 사용했다. 형상복구를 위해 아크릴과 같은 재질로 이루어진 물체를 실험대상으로 사용

했다. 참조영상은 아크릴과 같은 반사특성을 갖도록 하여 만들었으며 이것을 그림 13에 나타냈다. 각 실험영상은 120 간격의 확산 조명을 조사하여 취득하였고, 그림 15에서 복구된 아크릴병의 바늘 지도와 3차원 형상을 나타냈다.

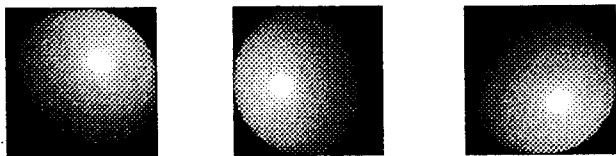


그림 13. 참조영상 (아크릴).

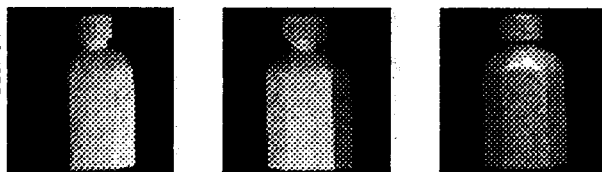
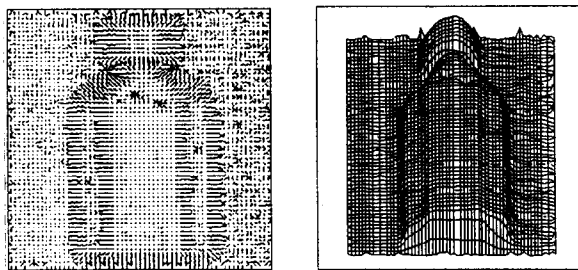


그림 14. 실제 밝기영상(아크릴병).



(a) 바늘지도

(b) 3차원 형상

그림 15. 복구된 아크릴병.

#### 4. 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 재질 등의 관계로부터 유도되었다. 논문에서 제안한 혼성 반사면 복구 알고리즘은 기존의 난반사면을 대상으로 연구되었던 명암정보로부터 형상복구(shape from shading)하는 방법을 확장하고 일반화시켰다. 또한, 표면 반사 함수를 적용한 구 영상을 가지고 각 화소 밝기값과 법선벡터를 3차원 참조표로 작성하여 임의의 명암영상이 입력되면 정확하게 3차원 정보를 얻어냄을 보였고, 혼성반사 모델의 타당성과 제안한 알고리즘이 반사특성추출 및 3차원 정보를 효율적으로 구해 낼 수 있음을 밝혔다.

또한, 3차원 형상복구를 위해 샘플표본구를 이용하는 방법을 소개했다. 난반사 성분과 전반사 성분이 혼합된 실제 물체에 대해 단일 재질로 구성된 샘플표본구로 부터 참조영상을 생성할 수 있다

강전반사 성분과 광휘점을 줄이기 위해 판상 확산기를 이용한 확산 조명 방법을 도입하였으며, 판상 확산 조명 하에서 참조영상을 생성할 수 있다. 본 소개된 방법에서는 샘플표본구로 직접 작성된 참조영상과 실제 영상의 정합에 의해 전반사 성분이 강한 물체에 대해서도 3차원 형상복구가 가능하기 때문에 기존의 측광정합법에 비해 훨씬 강력한 방법임을 알 수 있다. 실제 세계와 훨씬 더 유사한 반사모델에 대한 연구가 앞으로 병행되어야 하겠다.

기존의 측광입체시법(photometric stereo method)은 밝기값과 법선 벡터의 구배공간상(gradient space)의 매칭을 기본으로 전제한다[1]. 구배공간은 시각 방향을 기준으로 했을 때, 영상면의 방향에 대한 기울기 공간을 의미한다. 이러한 구배공간은 3차원 좌표계상의 임의의 한 평면을 2차원 좌표계상의 한점으로 매핑하는데 기존의 측광입체시법에서는 각 영상에 대해 구배공간상에서 반사도가 같은 점을 계산하여 법선벡터를 찾는다. 그러나 이러한 방법은 구배공간을 형성하는 과정에서 미분연산에 의해 발생하는 잡음과 불연속점에 대한 밝기값의 불일치 등의 문제를 발생시킬 뿐 아니라 구해진 법선벡터에 대해 3차원 정보를 복구해 낼 때 적분의 방향과 이로 인한 오차의 누적 문제가 발생한다[1]. 본 논문에서 이와같은 문제를 해결하기 위해 참조 영상과의 주변화소의 밝기분포를 고려한 매칭방법을 사용하였다. 기존의 방법에서 제기된 전체영역(global region)에 대한 오차 누적의 문제는 국부영역(local region)에서 물체의 주변화소값을 고려하여 오차를 다소 감소시켰다.

본 논문에서는 국내에서 연구되어진 몇몇 Photometric Stereo 방법에 대해서 간략하게나마 소개를 하였다. 이러한 명암정보로부터 형상을 복원하는 방법들은 아직까지 많은 제한된 상황에서 이루어지고 있다. 더 정확한 복구 성능을 위하여 조명장치와 주변환경들이 이론치에 가깝게 잘 통제된 환경 하에서의 실험이 필요하고, 설정된 계측 조명 환경에서 좀더 복잡한 반사특성을 가지는 각각의 대상 물체면에 대한 표면반사 특성, 반사 비율(전반사, 난반사 비율 등) 해석 및 3차원 참조표 작성 등을 하여[16] 실제 산업 현장에서 적용할 수 있도록 하여야 한다.

#### 참고문헌

- [1] R. J. Woodham, "Photometric method for determining surface orientation from multiple images," *Optical Engineering*, vol. 19, no. 1, pp. 139-144, Jan., 1980.
- [2] B. K. P. Horn, M. J. Brooks, *Shape from Shading*,



- The MIT Press : Cambridge, Massachusetts, 1989.
- [3] B. K. P. Horn, *Robot Vision*, The MIT Press : Cambridge, Massachusetts, 1986.
- [4] A. Rosenfeld, "Computer Vision : Basic Principles," *proc. IEEE*, vol. 76, pp. 863-868, August 1988.
- [5] B. K. P. Horn, "Understanding Image Intensities," *Artificial Intelligence*, vol. 8, pp. 201-231, 1977.
- [6] G. Healey and T. Binford, "Local shape from specularly," *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, vol. 42, pp. 62-86, 1988.
- [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] 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] 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] Carme Torras, *Computer Vision Theory and Industrial Applications*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg NewYork, pp. 407-412, 1992.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] S. K. Nayar, K. Ikeuchi, and T. Kanade, "Surface Reflection : Physical and Geometrical Perspectives," *IEEE Trans. on PAMI*, vol. 13, no. 7, pp. 611-634, July, 1991.
- [15] 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, August, 1990.
- [16] Tae-Eun Kim and Jong-Soo Choi, "Determining Hybrid Reflectance Properties and Shape Reconstruction by using Indirect Diffuse Illumination," in *proc. European Association for Signal Processing (EUSIPCO-96)* vol. III, Trieste, Italy Sept., 1996.

## 저 자 소 개



### 김 태 은

1964년 1월 29일생.

1989년 8월 중앙대학교 전기공학과 졸업(공학사).

1992년 2월 중앙대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사).

1993년 9월~현재 중앙대학교 대학원 전자공학과 박사과정 재학중.

관심 연구분야는 로봇트시각, 컴퓨터 비전, 영상처리, 계측신호처리, 인공지능 등임.

(156-756) 서울시 동작구 흑석동 221번지 중앙대학교 전자공학과 영상정보연구실

TEL, 02) 820-5295

### 최 종 수

1975년 인하대학교 전기공학과 졸업(공학사).

1977년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사).

1981년 Keio대학교 전기공학과 졸업(공학박사)

관심 연구분야로는 컴퓨터 비전, 영상처리, 영상코딩등임.

1981년~현재 중앙대학교 전자공학과 교수

(156-756) 서울시 동작구 흑석동 221번지 중앙대학교 전자공학과 영상정보연구실

TEL. 02) 820-5295