

포토메트릭 스테레오를 이용한 물체표면방향의 인식

이종훈 전태현 김도성 이명호

연세대학교 공과대학 전기공학과

Recognition of surface orientations in an object
using photometric stereo method

Jonghun Kim Taehyun Jeon Dosung Kim Myoung-Ho Lee

Dept. of Electrical Engineering

Yonsei University

ABSTRACT

This paper is pre-stage for getting EGI which can be used for modeling of an object. It discusses the construction of the vision processing system and its algorithm for getting needle diagram from the object image. We realize the algorithm with monocular camera system, using Reflectance Map theory and photometric stereo method.

We can calculate the surface normal at any point in the image if we take multiple images at the different lighting conditions. From the 3 images taken from different lighting conditions through the experiment, we get the needle diagrams of the sphere and the object. We confirm the validness of the surface normal acquisition algorithm comparing the experimental needle diagram with the ideal one obtained from the surface normal of the known object.

1. 서론

물체의 형상(shape)을 단일 카메라의 화상(image)로부터 추론하기 위해서는 몇 가지의 조건이 필요하다. 서로 상이한 조명상태에서 다중의 화상을 얻는다면 화상내의 어느점에서도 그 표면방향을 계산할 수 있다 [6]. 이러한 과정을 "shape from shading"이라고 한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 본 논문 2장에서 표면방향과 측정된 화상의 광도(light intensity)와의 관계를 규정하는 reflectance map이론과 이를 응용한 photometric stereo 방법을 검토한다. 3장에서는 photometric stereo 방법을 사용하여 화상의 각점을으로부터 실제 대상의 표면 해당점의 방향을 계산하는 과정을 설명한다. 또한 이 표면방향으로부터 대상물체의 니들 다이어그램을 구하는 과정을 설명한다. 4장에서는 3장의 방법으로 구한 표면방향으로부터 대상물체의 니들 다이어그램을 구하는 과정을 설명한다. 5장에서는 실험을 통하여 3가지의 상이한 조명환경에서 얻은 화상으로부터 기준구와 대상물체의 니들 다이어그램을 구한다.

기지의 대상물체 표면 방향으로부터 얻은 이상적인 니들 다이어그램과의 오차를 계산함으로써 본 논문의 표면방향 확률 알고리즘의 유효성을 확인한다.

2. 음영변화로부터의 모양추출

2.1 REFLECTANCE MAP

RM은 표면방향과 밝기사이의 관계를 명확하게 해준다. 이는 표면반사성질과 광원들의 분포에 대한 정보를 가지며 영상으로부터 표면 모양을 복원하는데 쓰이는 대표적 방법이다.

Lambertian 표면을 비추는 radiance E의 광원을 생

각하자. scene radiance 는

$$L = \frac{1}{n} E \cos\theta_i \quad \text{for } \theta_i \geq 0 \quad (1)$$

여기서 θ_i 는 표면법선과, 표면을 향하는 방향사이의 각이다. 각각에 해당하는 단위 벡터의 dot-product 를 취하면

$$\cos\theta_i = \frac{1 + p_{sp} + q_{sq}}{\sqrt{1 + p^2 + q^2} \sqrt{1 + p_s^2 + q_s^2}} \quad (2)$$

이 된다. 이것은 밝기가 어떻게 표면방향에 의존하는지를 잘 보여준다. 이 결과는 RM 이리 불리우며 R(p, q)라 쓴다. RM은 물체의 표면물질의 성질과 광원의 분포에 의존한다 (주목할 것은 radiance는 0보다 작을 수 없다. 그러므로 $0 \leq \theta_i \leq \pi/2$ 이란 제약을 두어야 한다. radiance는 이범위 밖에서는 0이 될 것이다.). 영상 radiance는 여러 상수에 비례한다. 예를 들어 f수의 제곱의 역수, 광원의 고정된 밝기 등이 있다. 이런 이유 때문에 RM은 일반적으로 정규화된다. 1개의 광원에 의해 비추어지는 Lambertian 표면에 대해서 우리는

$$R(p, q) = \frac{1 + p_{sp} + q_{sq}}{\sqrt{1 + p^2 + q^2} \sqrt{1 + p_s^2 + q_s^2}} \quad (3)$$

을 사용할 수 있다. 그러므로 고정된 비례상수를 제외하고는 RM은 표면방향에 대한 scene radiance 를 나타내 준다.

2.2 PHOTOMETRIC STEREO

RM은 물체의 모양에 대한 묘사로부터 영상이 얻어지는 컴퓨터그래픽스에 매우 유용하다. RM이 주어지면 p, q에 의해 규정된 표면방향으로부터, radiance로의 유일한 mapping이 존재한다. 그러나 역은 존재하지 않는다. 수많은 표면방향이 똑같은 밝기를 만들어 낼 수 있다. $R(p, q)$ 의 contour는 RM에서 그러한 방향들을 연결한다.

표면방향은 보통 어떤 특별한 점, 예를 들어 그 밝기가 최대 혹은 최소인 $R(p, q)$ 를 갖는 점에 대해 유일하게 결정될 수 있다. 예를 들어 Lambertian 표면에 대해서는 $(p, q) = (p_s, q_s)$ 일때 $R(p, q) = 1$ 이 된다. 그러나 일반적으로 밝기로부터 표면방향으로의 mapping은 유일하지 않다. 왜냐하면 밝기는 자유도 1을 가지는 반면 방향은 자유도 2를 갖는다.

부분적으로 표면방향을 복원하기 위해서는, 추가의 정보가 필요하다. 두개의 미지수 p, q를 결정하기 위해서는 두개의 방정식이 필요하다. 서로 다른 조명하

3. 표면 사용法 PHOTOMETRIC STEREO

에서 취해진 2개의 영상은, 각각의 영상점에 대해서 2개의 방정식을 만든다 (그림 2.1):

$$R_1(p, q) = E_1 \quad (4)$$

$$R_2(p, q) = E_2 \quad (5)$$

만약 이 방정식이 선형적이고 독립이라면, p, q 에 대한 유일하게 존재할 것이다.
예를 들어

$$R_1(p, q) = \sqrt{\frac{1+p_1p+q_1q}{r_1}} \quad (6)$$

$$R_2(p, q) = \sqrt{\frac{1+p_2p+q_2q}{r_2}} \quad (7)$$

여기서

$$r_1 = \sqrt{1+p_1^2+q_1^2} \quad \text{이고} \quad r_2 = \sqrt{1+p_2^2+q_2^2}$$

그러면, $p_1/q_1 \neq p_2/q_2$ 인 조건하에서

$$p = \frac{(E_1^2 r_1 - 1)q_2 - (E_2^2 r_2 - 1)q_1}{p_1 q_2 - q_1 p_2} \quad (8)$$

$$q = \frac{(E_2^2 r_2 - 1)p_1 - (E_1^2 r_1 - 1)p_2}{p_1 q_2 - q_1 p_2} \quad (9)$$

그러므로, 서로 다른 조명조건하에서 취해진 2 개의 영상들에 대해 각 점에서의 표면방향이 유일하게 구해 진다. 이것이 포토메트릭 방법을 설명한 것이다. 만약 방정식들이 비선형이라면, 해가 없거나 여러해가 존재 하게 된다(그림 2.1)

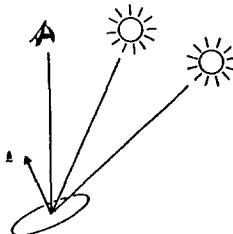


그림 2.1 포토메트릭 스테레오에서 관찰위치는 고정하고 하나이상의 영상이 다른 조명조건하에서 취해진다. 표면조각의 밝기는 일반적으로 다른 조명하에서는 서로 다를 것이다.

Fig. 2.1 In photometric stereo, more than one image is taken from the same viewpoint with different lighting. The brightness of a patch of the surface will generally be different under the two lighting conditions.

2장에서 논한 photometric stereo로부터 3개의 화상이 주어질 때 모든 화소의 실제대상표면에서의 방향을 구할 수 있음을 알 수 있다[8]. 여기서 복잡한 계산과정을 피하기 위해 look up table을 사용하여 기준구와 같은 환경에서 얻은 대상의 회상으로부터 간단하게 표면방향을 구할 수 있다. reflectance map의 폐행해를 구할 수 없을 때 실험적인 결정이 가능하다. 또한 look up table은 관측된 광도로써 지정되므로 표면방향 계산에 필요한 과다한 계산과정을 요하지 않게 된다. 이 look up table을 구성하기 위해 실험적인 방법을 사용한다. 기지의 형상을 갖는 calibration대상에 대해 세 가지 다른 조명환경하에서 세 화상을 얻고, 특정점에서 얻은 계조도로써 table의 entry를 지시하는데 사용한다. 기지의 calibration대상의 형상으로부터 표면방향을 계산하고 이를 table내에 기록한다. calibration대상의 sampling점이 해당방향을 갖고 있지 않을 때는 보간법(interpolation)을 사용하여 방향을 계산한다. 그림 3.1에 look up table의 구성을 보인다. 이 그림에서 E_1, E_2, E_3 축은 각기 상이한 조명환경 하에서의 계조도의 측이이며 특정한 점의 방향(orientation)을 지시하는 look up table을 구성한다.

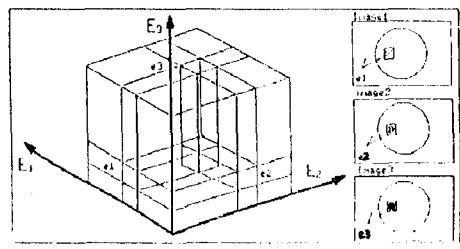


그림 3.1 표면방향 look up table의 구성
Fig. 3.1 Construction of look up table for surface orientation

look up table의 구조는 그림 3.2와 같다.

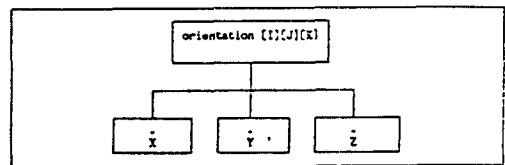


그림 3.2 표면방향 look up table의 구조
Fig. 3.2 Structure of look up table for surface orientation

그림 3.2에서 orientation[i][j][k]는 그림3.1의 양자화된 계조도 축 E_1, E_2, E_3 에 속한 값들 $I=E_1, J=E_2, K=E_3$ 들로 지정된 구조내에서 물체해당표면

의 단위방향벡터의 x, y, z 성분을 가리키게 된다.
즉 $\hat{x}^2 + \hat{y}^2 + \hat{z}^2 = 1$ (10)

일단 기준 calibration 대상으로부터 lookup table을 구성하면 이와 같은 환경에서 얻은 다른 대상의 화상들로부터 각 화소들의 실제표면방향을 측정할 수 있게 된다. calibration 대상과 다른 재질의 대상에 대해서는 albedo 를 구하는 과정을 추가함으로써 동일한 lookup table을 사용할 수 있다[6].

3.1 Calibration object 의 설정

물리적인 모든 표면 방향을 나타내는 calibration 대상으로는 구(sphere)가 있다. 그림 3.3에서와 같이 반경이 r 인 구를 calibration 대상으로 선택할 때 표면 상의 점 $p(x, y, z)$ 에서 식(11)이 성립한다.

$$x^2 + y^2 + z^2 = r^2 \quad (11)$$

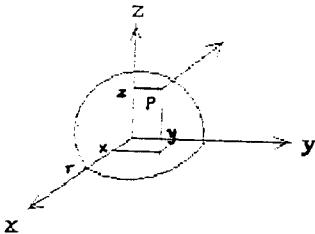


그림 3.3 Calibration 물체와 표면 방향

Fig. 3.3 Calibration object and surface normal

이제 점 p 의 표면방향벡터는 점 p 에서 표면에 수직인 단위벡터 \hat{d} 이다.

$$\text{즉 } \hat{d} = (x/r, y/r, z/r), \quad |\hat{d}|=1 \quad (12)$$

3.2 Calibration 대상화상의 sampling

모델링을 위한 물체의 표면방향의 분포도에 따라 적절한 정도(resolution)의 sampling을 선택할 수 있다. 반구의 경수직상에서 카메라로 얻은 화상은 본 시스템에서는 256×256 화소들로 구성된다. 이중에 원내부에 나타나는 화소들의 수는 12750개이다. 이 모든 점들은 상이한 방향을 갖는 점들이 된다. 실험의 명료성을 위하여 구이 화상인 원을 한정된 갯수의 방향을 갖는 영역으로 분할된다. 64×64 화소로 화상을 sampling하면 여기서 원의 화상은 797개의 상이한 방향을 갖는 화소들로 분할된다.

화상으로부터 원의 경계선을 추출하기 위하여 Laplacian filter를 사용하였다. 일단 경계선을 추출하면 원의 외부 화소들은 계조도를 0으로 놓는다. 3 화상의 계조도들로써 방향을 지정(index)할 수 있는지를 검증하기 위하여 그림 3.4와 같이 원내부의 일부에 대해 3 화상의 계조도들을 도시하였다.

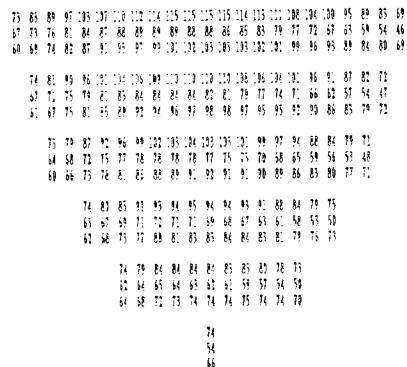


그림 3.4 계조도로 엔코우드된 반구의 표면방향

Fig. 3.4 Surface orientation of hemisphere encoded by gray value

그림 3.4에서 보면 동일한 계조도의 순서쌍들을 관찰할 수 있다. 이는 실험환경에서 잡음의 영향으로 간주할 수 있다. 그림 3.5에 서로 다른 순서쌍들을 숫자로 표시하여 상이한 표면방향과 상이한 계조도의 순서쌍들을 검사한다.

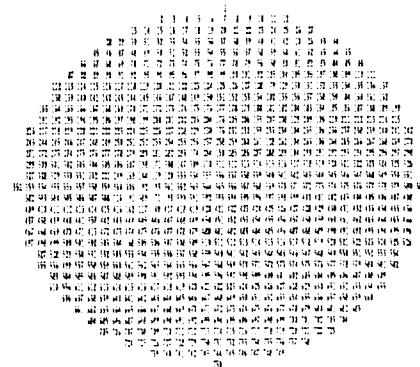


그림 3.5 상이한 표면방향벡터를 나타내는 계조도 순서쌍

Fig. 3.5 Gray value triples representing different surface normal vector

그림 3.4와 그림 3.5으로부터 약 750개의 방향을 본 실험을 통해서 정확히 확인할 수 있음을 알 수 있다.

3.3 화상의 화소좌표로부터 방향 벡터의 계산

그림 3.7에서와 같이 NNN Buffer frame의 1 화소의 실제 거리 dh 와 dv 는 식(13)으로 구할 수 있다. M 과 N 은 각각 구의 화상에서 수평 및 수직 화소들의 수이다.

$$\begin{aligned} dh &= \frac{L}{M} && \text{(수평축 거리)} \\ dv &= \frac{L}{N} && \text{(수직축 거리)} \end{aligned} \quad (13)$$

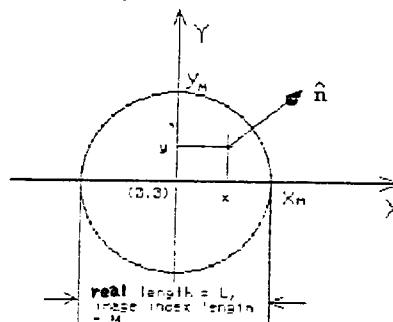


그림 3.6 화상(image)의 화소(pixel)거리와 실거리와의 관계

Fig. 3.6 Relation in pixel index span and real length

그림 3.6의 화소좌표 x, y 로부터 해당 물체의 표면점의 방향 벡터는 다음과 같이 계산할 수 있다.

r : 실제구의 반경

$$x_1 = x \cdot dh, \quad y_1 = y \cdot dv$$

$$Z^2 = r^2 - (x_1^2 + y_1^2)$$

$$Z = \sqrt{r^2 - (x_1^2 + y_1^2)} \quad (14)$$

그러므로 화상에서 $\text{index}(x, y)$ 의 단위 normal

벡터는 $\frac{(x_1, y_1, Z)}{r}$ 이 된다.

4. 화상으로부터 물체의 니들 다이어그램 구성

3장에서의 방법으로 물체상의 매 표면점의 방향 벡터를 일정한 시선방향에서 투영하여 니들 다이어그램을 도식할 수 있다. 정12면체의 이상적인 니들 다이어그램은 그림 4.1과 같다.

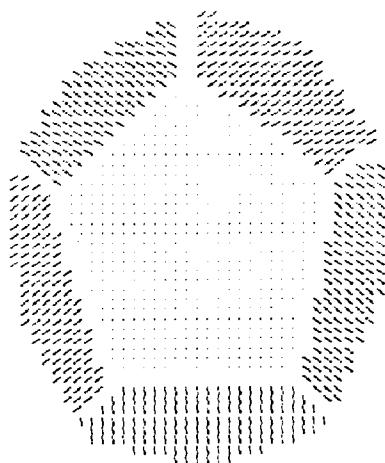


그림 4.1 정12면체의 이상적인 니들 다이어그램
Fig. 4.1 An ideal needle diagram of dodecahedron

니들 다이어그램의 구성과정을 그림 4.2에 보인다.

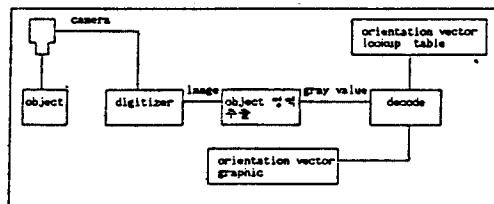


그림 4.2 니들 다이어그램 구성 블럭선도
Fig. 4.2 Block diagram of needle diagram construction

기준 calibration대상과 동일한 조명 환경하에서 대상의 화상 3 frame 을 얻어 각각의 화상으로부터 대상 내부영역을 추출한다. 이 내부영역의 계조도들로부터 특정 화소에 대한 계조도의 순서쌍(i, j, k)을 얻는다. 이 (i, j, k) 를 사용하여 이미 구성되어 있는 방향 벡터 look up table 을 탐색함으로써 방향 벡터를 결정한다.

5. 실험 및 결과고찰

기준 calibration 물체는 구로 선정하였다. 재질은 석고로 만들어졌으며 반경은 7.2[cm]이다. 대상물체는 정12면체로 선정하였다. 정12면체의 한 면은 정5각형으로 구성된다. 구성한 시스템은 CCD 카메라와 화상 digitizer, IBM PC AT로 구성된다.

먼저 기준 구의 화상 3 frame 을 얻는다. 이를 화상으로부터 반구의 화상인 원 내부를 판별하고 이 내부의 모든 화상 화소들의 가능한 방향에 대한 정보를 계조도로 지시된 표로써 encode 한다.

카메라로부터 얻은 한 화상은 256*256의 화소들로 구성된다. 이 중에서 표면방향을 얻고자 하는 대상의 영역을 구하기 위해 Laplacian Filter를 적용하였다. 기준 calibration대상의 정 수직방향에서 얻은 2차원 화상에서 원으로 나타나는 반구(hemisphere)는 12750화소로 구성된다. 따라서 반구의 모든 표면방향은 최대 12750개로 양자화할 수 있다. 실험을 간단히 하기위해 64*64개로 1 frame 화상을 얻을 때 반구의 표면방향은 약 797($=1/16*12750$)개로 양자화된다.

본 실험의 이론적인 예측을 검증하기 위해 다음과 같은 실험을 시행하였다. 단일 시선방향에 대해 120개의 요소로 나누어지는, 정12면체의 모자이크 모델을 사용하여 각 요소에 대해 정12면체 화상에서 구한 방향벡터의 수를 기록하였다. 그 결과는 그림5.1과 같다.

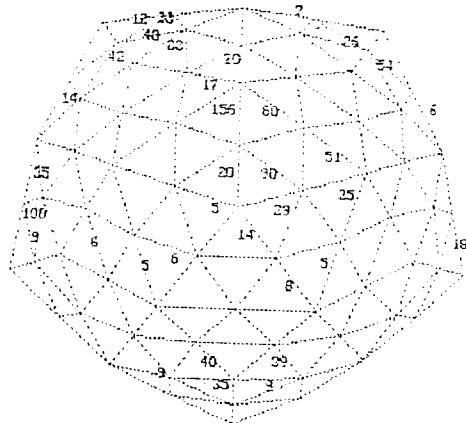


그림 5.1 모자이크 모델에 기록된 방향 히스토그램
Fig. 5.1 Orientation histogram of dodecahedron in tessellated model

정12면체의 정 수직상에서 얻은 화상의 방향벡터는 대략 6개의 방향에서 가장 큰 밀도를 나타내므로 본 실험의 유효성을 확인할 수 있다. 반구의 양자화된 방향은 797개 이지만 가능한 계조도의 space는 식(15)와 같이 구성된다.

$$X1 * Y1 * Z1 \quad (15)$$

X1:image1의 반구영역의 계조도 span

Y1:image2의 반구영역의 계조도 span

Z1:image3의 반구영역의 계조도 span

실험결과 반구의 최대 계조도는 화상1에서 155, 화상2에서 126, 화상3에서 139으로 나타났다. 여기서 look up table은 797개의 요소를 갖도록 계조도의 link를 사용하여 구성하였다. 이러한 sampling으로 얻은 방향을 갖지 않는 look up table의 요소는 보간법(interpolation)으로 구하여 채워 넣는다. 동일환경에서 얻은 정12면체의 표면방향을 구하고 니들 다이어그램으로 도시한 결과는 그림 5.2와 같다.

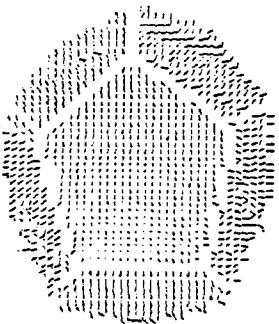


그림 5.2 실험으로부터의 정12면체의 니들 다이어그램
Fig. 5.2 Experimental needle diagram of dodecahedron

정12면체의 화상으로부터 계산된 표면 방향과의 오차를 구하면 표 1과 같다. 여기서 39%까지의 오차를 보이는 것은 그림 5.2에서 방향 벡터의 군(cluster)의 평균을 구하지 않고 상대적으로 고밀도인 요소를 설정했기 때문이다.

$$\begin{aligned} \text{ERROR} &= |\hat{v}_o - \hat{v}_n| \\ &= \sqrt{(x_o - x_n)^2 + (y_o - y_n)^2 + (z_o - z_n)^2} \end{aligned} \quad (16)$$

표 1 실험적인 표면방향벡터의 오차
Table 1 Experimental error for surface orientation vector

방향 Vector	data	Real	Experiment	ERROR
v_1	(0, 0, 1)	(0.10, 0.14, 0.99)	(0.10, 0.14, 0.99)	0.17
v_2	(-0.51, 0.71, 0.49)	(-0.63, 0.70, 0.34)	(-0.63, 0.70, 0.34)	0.19
v_3	(-0.83, -0.27, 0.49)	(-0.98, -0.11, 0.17)	(-0.98, -0.11, 0.17)	0.39
v_4	(0.00, -0.87, 0.5)	(-0.10, -0.93, 0.35)	(-0.10, -0.93, 0.35)	0.19
v_5	(0.84, -0.25, 0.49)	(0.98, -0.08, 0.17)	(0.98, -0.08, 0.17)	0.39
v_6	(0.51, 0.71, 0.49)	(0.63, 0.70, 0.34)	(0.63, 0.70, 0.34)	0.19

이상의 오차는 i) 물체표면의 완전방사면(perfectly diffusing surface) 가정
ii) 카메라 센서의 sampling 정도의 한계 등에 기인한다.

6. 결론

본 연구에서는 이산 EGI(확장된 이산 가우시안 화상)를 얻기 위한 과정의 전 단계로서 니들 다이어그램을 얻는 과정을 실험적으로 구현하였다. 정12면체의 화상(image)으로부터 일정한 시선방향에서의 이상적인 표면방향의 수를 나타내는 6개의 방향 벡터의 군을 얻었다.

구현된 시각 정보 처리 시스템은 유일한 표면 방향을 얻는 필요충분조건인 3개의 화상(image)으로부터 비교적 정확한 니들 다이어그램을 얻었다.

계산은 IBM PC AT(80286) 12MHz clock으로 수행하였으며 256 X 256 의 화상 frame으로부터 반구(hemisphere)의 양자화된 방향 벡터의 수를 797로 하였다. 본 연구의 결과는 제한된 환경의 대상 물체 화상으로부터 방향 히스토그램을 구성함으로써 EGI를 사용한 물체의 모델링에 사용할 수 있다.

7. 참고문헌

- O.D.Faugeras, Robert Kelley, "Computer Vision for Robots," IEEE proceedings Volume 595, 1985.
- King-sun Fu, T.L.Kunii : Picture Engineering , Springer-Verlag, 1982
- I.Aleksander : Artificial Vision for Robots, CHAPMAN & HALL, 1983
- P.H.Winston, R.H.Brown :Artificial Intelligence : An MIT Perspective , The MIT Press, vol.1, vol.2, 1979.
- Katsushi Ikenchi, Berthold K.P.Horn, "Numerical Shape from shading and Occluding Boundaries," Artificial Intelligence 17, 1981, pp.141-184.
- Katsushi, "Determining Surface orientations of specular surfaces by using the photometric stereo method," IEEE Trans. PAMI-3, No.6, pp.661-669, 1981.
- Yoshiaki Shirai : Three-Dimensional Computer Vision. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1987.
- B.K.P.Horn: Robot Vision, Cambridge, Massachussettes, London, England, MIT press, 1986.
- K.Ikeuchi, "Shape from regular pattern," Artificial Intelligence 22 , pp.49-75, 1984
- Rafael C. Gonzalez , Paul Wintz : Image Processing, 2nd ed., 1987
- D.H.Ballard, C.M.Brown : Computer vision, Prentice-Hall, Inc. , 1982
- 김 도성 외 3인, "카메라 영상에 의한 물체와의 거리측정에 관한 연구", 대한전기학회 추계종합학술대회 논문집 pp.415-420 , 1989.11.25