

# 구면거울 모델링을 이용한 물체의 거리 추정

°이 재 훈, 김 주 영, 고 광 식

경북대학교 전자전기공학부

전화 : (053) 950-5540 / 팩스 : (053) 950-5505

## Depth Estimation Using Spherical Mirror Modeling

°Jae-Hun Lee, Ju-Young Kim, Kwang-Sik Koh

School of Electronics Engineering Kyungpook National University

E-mail : aquarius@palgong.knu.ac.kr

### Abstract

In this paper, we consider the problem of finding the depth of a object in two images taken with cameras. For solving this problem, we introduce a spherical concave mirror model. First, a virtual concave mirror is assumed, and then a scene is obtained by camera at two different position which are on the surface of the mirror. The depth of object is calculated from two scenes by using the spherical-mirror equation. The algorithm has been tested on a real scene containing several objects, and showed that it is more useful for farther object.

### I. 서론

3차원 물체에 대한 깊이(depth) 정보는 2차원 영상에서 추출된 정보를 이용하여 실세계를 구성하는데 사용된다. 깊이 정보를 추출하는 방법에는 빛을 주사하고 반사되는 정보를 이용하여 깊이를 찾는 방법과, 좌우 두 영상의 영상 차이를 삼각측량법을 이용하여 깊이 정보를 찾는 스테레오(stereo) 방법이 있다 [1][2]. 전자는 결과의 신뢰성이 높고, 고속화 할 수 있다는 장점이 있지만, 측정되는 환경과 대상이 한정되는 단점이 있다. 반해서 후자의 경우에는 특별한 조명이나 환경의 조건에 제약을 받지 않지만, 영상의 정합을 하여야 하므로 속도와 정확도에서 상대적으로 단점을 가진다.

본 논문에서는 스테레오와 같은 방식으로 영상을 얻

은 후에 구면거울 모델링을 통해 물체까지의 거리를 구하는 새로운 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 오목거울에서 한 점으로부터 나온 광선은 거울면에 반사되어 한 점으로 모인다는 점을 이용하여, 상까지의 거리를 구하게 되면 이를 토대로 물체의 거리를 거울의 공식을 사용하여 계산할 수 있다. 실제로 거리를 구하는 과정을 보면 카메라를 통해 들어온 광선을 구면거울로 들어오는 것으로 가정하여 상의 위치를 구하고, 계산된 상거리를 이용하여 물체까지의 거리를 구한다.

### II. 오목거울에서의 상맺힘

본 절에서는 구면의 오목거울에 의해 상이 맺히는 것과 상의 위치로부터 물체까지의 거리를 구하는 방법을 소개한다 [3].

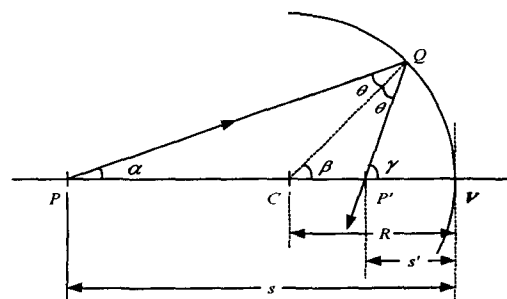


그림 1. 오목거울에 의한 상맺힘  
Fig. 1. Image formed by a concave mirror

먼저 그림 1과 같은 곡률반경이  $R$ 인 구면으로 된 구면거울을 고려한다. 구면거울에서는 곡률중심  $C$ 와 구면의 정점  $V$ 를 이어 주는 선을 중심축으로 정의한다. 또 모든 광선 중에서 물체로부터 거울쪽으로 나오는 광선 중에 거울의 축과 아주 작은 각을 이루며 입사되는 광선을 근축광선(paraxial ray)이라고 정의하며, 앞으로 구해지는 모든 식에서는 이 근축광선만을 고려하기로 한다.

구면거울에 의하여 맺혀진 상의 위치를 구하는 과정은 다음과 같다. 그림 1에서 입사의 광선  $PQ$ 는 반사의 법칙에 따라  $Q$ 점에서 반사하여 광선  $QP'$ 와 같이 경로를 바꾸었다고 가정한다. 그러면 삼각형  $PQC$ 와  $PQP'$ 에서 관계식

$$\beta = \alpha + \theta \quad (1)$$

$$\gamma = \alpha + 2\theta \quad (2)$$

을 얻을 수 있다. 이 두 식에서  $\theta$ 를 소거하면

$$\alpha + \gamma = 2\beta \quad (3)$$

이 된다. 본 논문에서 취급하고자 하는 광선을 근축광선으로 제한하였으므로 여기서 생각하는 모든 각이 충분히 작다고 가정하여  $\alpha = QV/s$ ,  $\beta = QV/R$ ,  $\gamma = QV/s'$  이라고 볼 수 있다. 이것을 이용하여 거울의 공식

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{R} \quad (4)$$

을 얻을 수 있다. 여기서  $s$ 는 물체거리이고  $s'$ 는 상거리이다. 따라서 물체까지의 거리  $s$ 를 상까지의 거리  $s'$ 와 곡률반경  $R$ 의 값으로부터 구할 수 있다.

### III. 물체까지의 거리 추정

오목거울에서 상의 위치를 구하기 위해서는 최소한 둘 이상의 입사광선이 필요하다. 따라서 곡면을 따라 두 군데 이상의 위치에서 입사되는 광선을 측정할 수 있다면 물체까지의 거리를 추정할 수가 있게 된다. 본 논문에서는 입사광선을 카메라를 사용하여 측정한다. 카메라를 광축이 중심축과 평행하도록 가상의 곡면 위의 서로 다른 두 곳에 위치시킨다. 카메라로 들어오는 광선을 그 위치에서 오목거울로 입사되는 광선으로 간주하는 것이다. 이 때 사용한 카메라는 핀홀(pin-hole) 모델로 가정한다.

반대로 카메라의 위치가 먼저 결정되었다면 두 카메라를 지나가는 가상의 구면을 정의하여 물체거리를 구할 수 있다. 그런 경우 만약 두 카메라가 같은 거리에 위

치한다면 그 구조는 그림 2와 같다. 기준점  $O$ 로부터 떨어진 거리가 같으므로, 카메라의 위치각  $\beta$ 는 같은 값을 가지며, 거리  $d$ 는 기준점으로부터 중심축인  $z$ 축 방향으로 측정된 거리이다.  $F_l$ 과  $F_r$ 은 두 카메라의 중심점  $C_l, C_r$ 로부터 초점거리만큼 떨어진 점이 된다. 그림 2에서 물체까지의 거리는 다음과 같은 과정을 통해 구해질 수 있다.

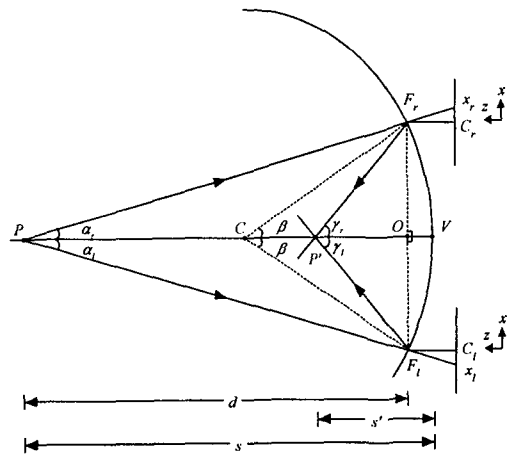


그림 2. 물체까지의 거리 추정  
Fig. 2. Depth estimation of object

그림 2에서 삼각형  $PF_lO$ 와  $x_rF_lC_l$ , 삼각형  $PF_rO$ 와  $x_rF_rC_r$ 이 닮은 꼴이므로 중심축과 카메라로 입사되는 광선이 이루는 각은

$$\alpha_l = \tan^{-1} \frac{x_l}{f_l} \quad (5)$$

$$\alpha_r = \tan^{-1} \frac{x_r}{f_r} \quad (6)$$

여기서  $f_r, f_l$ 은 각각 오른쪽과 왼쪽 카메라의 초점거리이다.

또한 가상의 곡물에 의해 반사되는 광선과 중심축이 이루는 각은 식 (3)에 의해

$$\gamma_l = 2\beta - \alpha_l \quad (7)$$

$$\gamma_r = 2\beta - \alpha_r \quad (8)$$

따라서 가상의 곡물을 따라 반사되는 광선의 직선방정식은

$$x = \tan \gamma_l z + R \sin \beta \quad (9)$$

$$x = -\tan \gamma_r z - R \sin \beta \quad (10)$$

이다. 식 (9), (10)으로부터 두 광선이 만나는 곳, 즉 상이 생기는 곳의 위치를 구할 수 있다.

$$z = -\frac{2R \sin \beta}{\tan \gamma_r + \tan \gamma_l} \quad (11)$$

$$x = \frac{R \sin \beta (\tan \gamma_r - \tan \gamma_l)}{\tan \gamma_r + \tan \gamma_l} \quad (12)$$

그림 2에서  $\overline{OV}$ 의 길이는  $R - R \cos \beta$  이므로 상 거리  $s'$ 는

$$s' = R - R \cos \beta + \frac{2R \cos \beta}{\tan \gamma_r + \tan \gamma_l} \quad (13)$$

이다. 따라서 식 (4)를 적용하면 구면의 정점  $V$ 로부터 물체까지 거리, 즉 물체거리는

$$s = \frac{Rs'}{2s' - R} \quad (14)$$

이다. 기준점  $O$ 에서  $z$ 축 방향으로의 물체까지의 거리  $d$ 는

$$\begin{aligned} d &= \overline{PO} = s - \overline{OV} \\ &= \frac{Rs'}{2s' - R} - (R - R \cos \beta) \end{aligned} \quad (15)$$

이다. 따라서 식 (15)는 가상의 곡률 반경  $R$ 과 카메라의 위치각  $\beta$ , 구해진 상까지의 거리  $s'$ 를 이용하여 물체까지의 거리를 구할 수가 있음을 보여준다. 그러나 제안된 방법에서는 가상의 상을 만드는 광선이 근축광선이어야 하므로 다음과 같은 가정이 있다.

첫 번째, 카메라의 위치각  $\beta$ 가 작아야 한다. 즉, 카메라가 중심축으로부터 떨어진 거리에 비해 가상의 곡률반경이 많이 커야한다.

두 번째, 거리를 구하고자 하는 점에서 나온 광선의 카메라 입사각  $\alpha$ 가 작아야 한다. 이로 인해 기준점에서 물체까지의 거리가 커야하며, 중심축으로부터 떨어진 거리는 상대적으로 작아야한다.

이런 조건을 만족시키기 힘든, 상대적으로 가까운 물체의 경우 오차율이 커지게 된다. 오차율을 줄이기 위해서는 카메라의 위치각  $\beta$ 의 크기를 줄여야한다. 이를 위해서 중심축으로부터 카메라의 거리를 줄이거나, 곡률반경을 가능한 크게 선택하여야 한다. 그러나, 멀리 떨어진 물체의 경우에는 조건을 만족하기 때문에

정확한 거리의 추정이 가능하다.

#### IV. 실험 및 결과

실험은 실내에서 서로 다른 거리에 있는 물체에 대해 세 번의 실험을 하였다. 비교적 가까운 거리의 첫 번째 실험에서는 Kodak DC220 디지털 카메라를 사용하였다. 이 때 카메라의 초점거리  $f$ 는 25mm로 두었다. 더 먼 거리의 두 번의 실험에서는 Pentax ME모델의 카메라를 사용하였는데, 이 때 렌즈는 초점거리 50mm의 표준렌즈를 사용하였으며, 실험에 쓰인 필름은 ISO 100의 일반 필름이다.

첫 번째 실험은 비교적 가까운 거리에 있는 물체에 대한 실험으로, 물체는 중심축 위에 위치하며, 거리가 800mm에서 1000mm 사이가 되도록 실험을 하였다. 이 때 가상 오목거울의 곡률반경  $R$ 은 500mm이며, 중심축으로부터 각 카메라까지의 거리는 88.9mm이다. 따라서 구해진 카메라의 위치각은  $10.082^\circ$  이다. 실험 결과가 표 1에 나타나 있다. 거리가 멀어질수록 상의 위치를 찾는데 사용되어진 광선이 근축광선에 가까워지므로 좀 더 정확한 거리를 찾음을 알 수 있다.

표 1. 가까운 거리에 물체가 위치한 경우  
Table 1. Object at the short distance

실제 거리 (mm)	계산된 거리 (mm)	오차 거리 (mm)	오차율 (%)
1100	1088	-12	1.091
1000	987	-13	1.300
900	883	-17	1.889
800	783	-17	2.125

두 번째 실험은 좀 더 먼 거리에 있는 세 물체에 대해서 거리를 계산하였다. 2000mm 거리에 있는 물체는 중심축 위에 위치하며, 1800mm 떨어진 물체는 중심축에서 150mm 떨어진 곳에, 1600mm 거리에 위치한 물체는 중심축으로부터 200mm 떨어진 곳에 있다. 계산에 사용된 곡률반경  $R$ 은 1000mm이며, 카메라의 위치각은  $2.424^\circ$  이다. 실험결과는 표 2와 같다.

앞의 실험에서와 마찬가지로 거리가 멀어질수록, 즉 거리를 구하는데 사용된 광선이 근축광선에 가까워질수록 더 정확하게 거리를 구할 수 있다. 또한 중심축에서 멀리 떨어질수록 한 쪽 카메라에 입사되는 광선과 중심축이 이루는 각이 커지므로 역시 오차가 커진다. 그리고 일반 카메라의 경우 디지털 카메라보다 보정(Calibration)이 상대적으로 힘들기 때문에 이것으로 인한 오차로 인해, 첫 번째 실험보다 거리가 멀어졌음

에도 오차율이 큰 경우도 발생하였다.

참고 문헌

표 2. 중간 거리에 물체가 위치한 경우  
Table 2. Object at the medium distance

실제 거리 (mm)	계산된 거리 (mm)	오차 거리 (mm)	오차율 (%)
2000	1973	-27	1.350
1800	1770	-30	1.667
1600	1572	-28	1.750

세 번째 실험은 상대적으로 가장 먼 거리에 있는 세 개의 물체에 대해 거리를 구하였다. 역시 두 번째 실험에서와 같이 5000mm 거리에 있는 물체는 중심축 위에, 4800mm와 4600mm 떨어진 곳에 있는 물체는 각각 중심축으로부터 150mm, 200mm 떨어진 곳에 위치한다. 곡률반경  $R$ 은 2000mm이며, 카메라의 위치각은  $1.455^\circ$  이다. 결과는 표 3과 같다. 이번 실험에서도 떨어진 거리가 증가할수록 오차율이 낮아지며, 상당히 신뢰할만한 결과를 보여준다.

표 3. 먼 거리에 물체가 위치한 경우  
Table 3. Object at the long distance

실제 거리 (mm)	계산된 거리 (mm)	오차 거리 (mm)	오차율 (%)
5000.0000	4997	-3	0.060
4800.0000	4787	-13	0.271
4600.0000	4584	-16	0.348

V. 결론

본 논문에서는 구면거울 모델링을 도입하여 물체까지의 거리를 구하기 위한 새로운 방법을 제안하였다. 먼저 가상의 오목거울을 가정하고 거울면 위의 서로 다른 두 곳에 위치한 카메라로부터 영상을 얻는다. 얻어진 물체 영상으로 들어오는 광선을 거울면으로 들어오는 것으로 간주하여 상의 위치를 구하고, 거울의 공식을 이용하여 물체까지의 거리를 구하였다.

제안된 방법은 두 카메라 사이의 거리가 가상의 구면 곡률에 비해 많이 짧고, 물체가 중심축 주위에 있는 환경에서 더 좋은 결과를 가지게 된다. 일반적으로 물체의 거리가 카메라로부터 멀어질수록 이런 환경에 부합하게 되어 오차가 줄어들게 된다. 이 방법에 따라 행한 실험에서도 같은 결과를 보여주었다. 따라서 물체의 떨어진 거리가 충분히 크다면 제안된 방법은 물체까지의 거리를 신뢰성 있게 추정하는데 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

[1] G. Borgfors, "Distance Transformations in Digital Images," *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, vol. 34, pp. 344-371, 1986.

[2] R. A. Jarvis, "A Perspective on Range Finding Techniques for Computer Vision," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intelligence*, vol. PAMI-5, no. 2, March, 1983.

[3] J. R. Meyer-Arendt, *Introduction to Classical and Modern Optics*, Prentice Hall, 1989.

[4] R. I. Hartley, "Triangulation," *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 68, no. 2, pp. 146-157, November, 1997.

[5] N. Alvertos, "Camera Geometries for Image Matching in 3-D Machine Vision," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intelligence*, vol. 11, no. 9, pp. 897-914, September, 1989.