

원형 표식을 이용한 Camera Calibration에 대한 연구

한 민 홍 이 상 용

포항 공과 대학 산업공학과

CAMERA CALIBRATION USING A CIRCULAR PATTERN

Min-Hong Han, Sang-yong Rhee

Department of Industrial Engineering

Pohang Institute of Science and Technology

[Abstract]

This paper describes a method of calculating the viewing parameters of a camera using a perspective view of a circular pattern. The proposed method determines the angle of pan, tilt, and swing, as well as the distance from the camera to the reference point of a world coordinate system, using simple equations. The proposed method is so simple and accurate that when used in a well-controlled environment as in robot vision systems or visual inspection systems it may even seem trivial.

1.0 개요

Perspective transform은 한 점의 3-D 좌표를 image상의 2-D 점으로 변환시키는 과정으로서 stereo reconstruction, robot vision, 무인 차량 운행, 자동

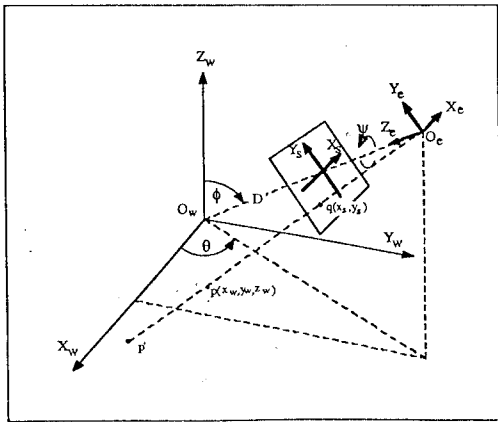
시각 검사 장치, 그리고 영상 이해 등의 분야에 광범하게 사용되어져 왔다. 이러한 Perspective transform의 matrix를 결정하기 위해서는 camera의 viewing parameter를 측정하여야만 한다.

Camera calibration 방법에 대해서는 많은 연구가 있어 왔다. Fischer와 Bolles[3]는 주어진 3 점의 3-D좌표와 이에 대한 영상 좌표로써 카메라의 시축 방향과 위치를 계산했다. Haralick[5]는 사각형의 perspective projection으로 부터 camera의 parameter를 계산하는 방법을 개발했다. 이와 유사한 연구가 Strat[14]에 의해 이루어 졌다. 그는 실험적으로 얻어진 transformation matrix의 element 들로 부터 camera의 parameter를 구해 냈다. Chen[1] 등은 물체의 위치를 결정하기 위한 calibration object로서 하나의 입방체를 사용하였다.

본 논문은 하나의 원형 표식을 사용하여 camera의 parameter를 구하는 데 있어 연립 방정식을 동시에 풀어야 하는 이전의 방법들과는 다르게 하나의 방정식을 각각 개별적으로 풀으로써 camera의 parameter들을 결정한다. Robot vision system이나 visual inspection system처럼 작업 환경이 잘 관리되는 실제 응용에서 본 논문이 제안하는 방법은 단순하면서도 정확한 것으로 평가되었다.

## 2.0 The Model

3개의 좌표 시스템-월드 좌표 시스템, 눈 좌표 시스템, 그리고 영상 좌표 시스템-은 [그림 1]과 같이 정의한다. 월드 좌표 시스템은 기준 좌표 시스템으로서  $(X_w, Y_w, Z_w)$ 로 정의되며 원점은  $O_w$ 이다. 눈 좌표 시스템은  $(X_e, Y_e, Z_e)$ 로 정의되며 원점은  $O_e$ 이고  $Z_e$ 는 카메라의 시축 방향과 일치한다. 영상 면 위의 영상 좌표를 표현하는 영상 좌표 시스템은  $(X_s, Y_s)$ 로 정의된다.

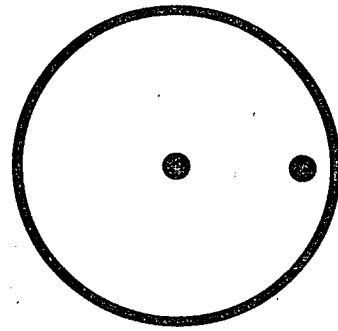


[그림 1]

카메라의 시축 방향이 월드 좌표 시스템의 원점을 향하는 것으로 가정한다. 만약 그렇지 않으면, 좌표 변환을 통하여 참조점(reference point)이 새로운 좌표 시스템의 원점이 되도록 한다. 본 모형에서 pan각( $\theta$ )은 카메라 시축이 월드 좌표 시스템의 x-y평면위로 project된 선과 X<sub>w</sub>축이 이루는 각으로 정의된다. tilt각( $\phi$ )은 Z<sub>w</sub>축과 Z<sub>e</sub>축이 이루는 각으로 정의한다. 눈 좌표 시스템의 원점, O<sub>e</sub>,으로 부터 월드 좌표 시스템의 원점, O<sub>w</sub>,까지의 거리를 D로 표시한다. 그리고, swing각( $\psi$ )은 Z<sub>e</sub>를 축으로 하는 눈 좌표 시스템의 회전에 의해 발생한다. 본 논문에서는 pan각, tilt각, swing각, 그리고 거리 D를 다음에 설명한 방법을 사용하여 계산한다.

## 3.0 Calibration Method

Calibration을 위한 표식으로서 내부에 2개의 점을 포함하는 임의의 반경의 원을 사용한다. 사용된 원형 표식은 [그림 2]와 같다. Center Dot이라 불리는 하나의 점은 원형 표준 지표의 중심 위치를 나타내며, direction dot이라 불리는 또 다른 한 점은 방향에 대한 정보를 제공한다. 원형 표식은 Center dot이 월드 좌표 시스템의 원점과 일치하고 direction dot이 X<sub>w</sub>축 상에 있도록 놓여 진다. 카메라 시축은 center dot이 영상 좌표 시스템의 원점에 놓이도록 조정된다.

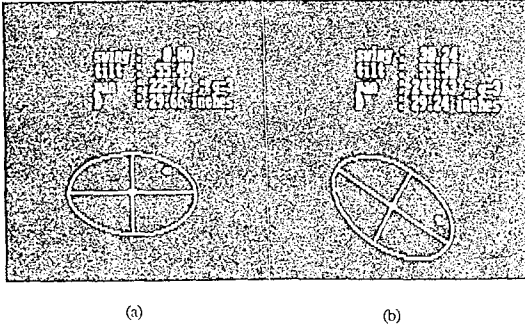


[그림 2]

### 3.1 Swing각의 결정

[그림 3-a]에 보인 영상은 X<sub>e</sub>축이 월드 좌표 시스템의 x-y 평면에 평행할 때 얻어진 것으로 장축이 영상 면의 X<sub>s</sub>축과 일치하는 타원 모양이다. 여기서, 장축은 center dot과 center dot으로부터 가장 멀리 떨어져 있는 타원상의 한 점에 의해 결정되는 선이다. 하지만, 카메라가 시축을 축으로 하여 회전하게 되면 X<sub>e</sub>축은 월드 좌표 시스템의 x-y 평면에 평행하지 않게 된다. 이러한 경우 표준 지표의 영상은 [그림 3-b]와 같이 나타난다.

타원의 장축과 X<sub>s</sub>축이 이루는 각은 카메라의 swing각을 결정한다.



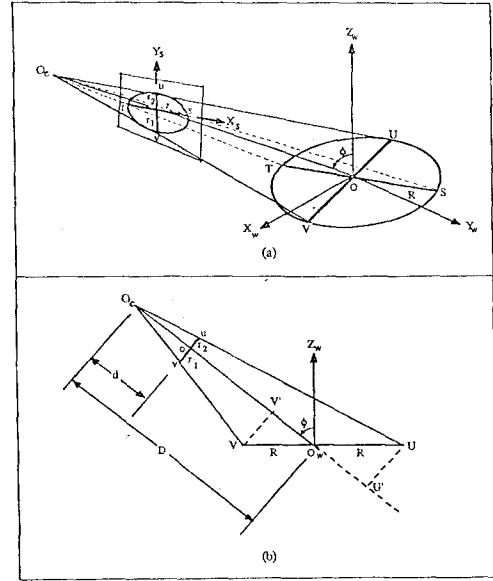
[그림 3]

### 3.2 Tilt각의 결정

Tilt각이 없을 때는 원형 표식의 영상이 swing각에 무관하게 완전한 원으로 나타난다. 하지만 tilt각이 커짐에 따라 영상은 한 쪽 방향으로 찌그러진 타원의 모양으로 나타나게 된다. 따라서, 영상의 찌그러짐의 정도는 카메라의 tilt각에 대한 정보를 제공한다.

카메라의 시축이 월드 좌표 시스템의 원점을 향한다고 가정하자. [그림 4-a)는 원형 표준 지표와 이의 영상 면 위의 영상 간의 관계를 보여 준다. 여기서,  $r$ 은 타원의 장축 길이의 반을 나타내며,  $r_1$ 과  $r_2$ 는 타원의 장축으로부터 타원의 위쪽 부분의 최대 길이와 아래 쪽 부분의 최대 길이를 각각 나타낸다. tilt각이 0보다 클 때에는  $r_1$ 이  $r_2$ 보다 크게 나타난다는 점에 주목해야 한다. 이는  $OV$ 와 관계있는 원의 한 쪽 부분이  $OU$ 와 관계있는 원의 다른 쪽 부분보다 카메라에 가깝기 때문이다. [그림 4]로부터 tilt각은 삼각법에 의해 타원의 치수만을 사용하여 다음 식과 같이 구해진다.

$$\phi = \pi/2 - \sin^{-1} \left( \frac{2r_1 r_2}{r(r_1 + r_2)} \right) \quad (1)$$



[그림 4]

### 3.3 Pan각의 결정

Swing이 없는 경우에 월드 좌표 ( $X_w, Y_w, Z_w$ )를 눈 좌표 ( $X_e, Y_e, Z_e$ )로 변환시키는 식은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_w & y_w & z_w & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -\sin(\theta) & -\cos(\theta)\cos(\phi) & -\cos(\theta)\sin(\phi) & 0 \\ \cos(\theta) & -\sin(\theta)\cos(\phi) & -\sin(\theta)\sin(\phi) & 0 \\ 0 & \sin(\phi) & -\cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & D & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

눈 좌표 시스템의 ( $X_e, Y_e, Z_e$ )에 있는 물체가 영상 면 상에서 ( $X_s, Y_s$ )로 나타난다면 좌표 값들 사이의 관계는 다음과 같다.

$$x_s = d x_e / z_e, \quad (3)$$

$$y_s = d y_e / z_e. \quad (4)$$

위의 perspective transformation에 의해, 월드 좌표 시스템 상에서 ( $R1, 0, 0$ )으로 나타나는 direction dot의 눈 좌표 ( $X_e, Y_e, Z_e$ )는 다음과 같이 계산되어진다.

$$x_e = -R_1 \sin(\theta), \quad (5)$$

$$y_e = -R_1 \cos(\theta) \cos(\phi), \quad (6)$$

$$z_e = -R_1 \cos(\theta) \sin(\phi) + D. \quad (7)$$

식(6)을 식(5)으로 나누고 식(3)과 식(4)를 참조하면 다음과 같은 결과가 얻어진다.

$$\begin{aligned} y_e/x_e &= \frac{-\cos(\theta) \cos(\phi)}{-\sin(\theta)} \\ &= y_s/x_s, \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,  $(X_s, Y_s)$ 는 카메라 swing이 없을 때의 영상 면상의 direction dot의 위치를 표시한다. Tilt각은 기지이므로 pan각은 식(8)에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{\cos(\phi)}{y_s/x_s} \right). \quad (9)$$

하지만 위의 식(9)는 카메라 swing이 없다는 가정하에서 정의된 식이기 때문에 swing각이 0이 아닐 때에는 식(9)로부터 pan각을 바로 계산할 수 없다. 따라서, 영상 좌표  $(X_s, Y_s)$ 를  $X_s$ 축이 월드 좌표 시스템의 x-y평면에 평행할 때의 위치  $(X_s', Y_s')$ 로 변형시켜야만 위의 식(9)을 pan각 계산에 사용할 수 있게 된다.

식(9)만으로는 월드 좌표 시스템 상에서 카메라의 위치를 포함하는 사분면에 대한 정보를 제공할 수 없다. 이 정보는 영상 내에서 direction dot의 위치로부터 유도될 수 있다. 예를 들어, 카메라의 위치가 월드 좌표 시스템의 제 1 사분면에 있다면 direction dot의 영상은 영상 좌표 시스템  $(X_s', Y_s')$ 의 제 3 사분면에 나타난다.

다음은 월드 좌표 시스템 상의 카메라의 사분면  $qw$ 와 영상 좌표 시스템 상의 direction dot 영상의 사분면  $qi$ 에 대한 관계이다.

$qi$	$qw$
1	3
2	2
3	1
4	4

월드 좌표 시스템의 사분면에 대한 정보와 부합하기 위해 카메라의 pan각은 다음과 같이 수정되어야 한다.

$$\theta_c = \begin{cases} \theta + \pi & \text{if } qi = 1, \\ \theta + \pi & \text{if } qi = 2, \\ \theta & \text{if } qi = 3, \\ \theta + 2\pi & \text{if } qi = 4. \end{cases} \quad (10)$$

### 3.4 거리 D의 결정

0e로부터 0w에 이르는 거리 D는 그림 4로부터 유도되어 지는 관계식  $r/R = d/D$ 와, 식(3), (5), 그리고 식(7)로부터 다음과 같이 결정된다.

$$z_e = \frac{d}{x_s} x_e, \quad (11)$$

$$D = z_e + R_1 \cos(\theta) \sin(\phi), \quad (12)$$

그리고 d는 관계식  $r/R = d/D$ 로부터 식(13)와 같이 계산되어진다.

$$d = \frac{Dr}{R}. \quad (13)$$

따라서, 식(11), (12), 그리고 식(13)에 의해

$$D = \frac{R_1 \cos(\theta) \sin(\phi)}{\left(1 - \frac{r x_e}{R x_s}\right)} \quad (14)$$

여기서,  $(X_e, Y_e, Z_e)$ 와  $(X_s, Y_s)$ 는 월드 좌표 시스템의  $(R1, 0, 0)$ 에 있는 direction dot의 눈 좌표와 영상 좌표이다.

#### 4.0 Experiments

카메라 calibration 방법의 정확도는 물체의 계산된 월드 좌표와 그 물체의 실제 좌표를 비교함으로써 평가되어 진다. 이러한 실험을 위해 월드 좌표 시스템 상에 좌표를 알고 있는 위치( $X_w, Y_w, Z_w$ )에 물체를 놓고 2개의 calibrate된 카메라를 사용하여 물체의 위치를 계산한다. 이를 위하여 사용한 image digitizer board는 Chorus의 PC-EYE 1000이며, 화면의 resolution은 600 x 180이다.

[표 1]은 3개의 상이한 카메라 setup을 이용하여 계산된 3개의 상이한 물체 위치와 그의 실제 좌표를 비교한 결과이다. 결과치들을 살펴 보면, 모니터 화면의 낮은 resolution에도 불구하고, 계산된 위치가 실제 좌표 값에 상당히 근사하고 있음을 알 수 있다. 이러한 사실들은 본 연구에서 제안한 카메라의 calibration 방법이 정확하고 타당함을 나타낸다.

[표 1]

(unit : inch)

setup	True Position	Measured Position
1	( 1, 3, 1) ( 2,-2, 2) (-4,-2, 2)	( 1.05, 3.11, 0.90) ( 1.88,-2.05, 1.94) (-4.01,-1.95, 1.84)
2	(-3,-3, 3) ( 3, 0, 3) (-2,-2, 1)	(-3.10,-2.04, 2.92) ( 2.86, 0.07, 2.94) (-2.07,-1.89, 1.00)
3	(-2, 3, 1) ( 2, 3, 3) ( 3, 2, 1)	(-1.85, 2.91, 1.08) ( 2.09, 2.86, 3.06) ( 2.93, 2.12, 1.01)

#### 5.0 Conclusion

카메라 parameter들의 결정을 위한 연구는 많은 vision 응용에서 요구되어 지는 perspective transformation을 유도하는 방법을 제시한다는 점에서 실제적인 연구 주제가 되어 왔다. 본 논문은, 단순한 원형의 표식을 사용하며 robot vision system이나 자동 검사 시스템에 쉽게

활용되어 질 수 있는 간단한 카메라의 caibration 방법을 제시하는 데 목적을 두었다.

제안된 calibration 방법은 stereo vision에 의한 물체의 3-D좌표를 측정하여 3-D 부품 검사에 활용되고 있을 뿐 만 아니라 무인 차량의 복도 주행에 활용되고 있다.

#### 참고 문헌

1. Zen Chen, Din-Chang Tseng, and Jenn-Yee Lin, A Simple Algorithm for 3-D Position Determination Using a Single Calibration Object, Pattern Recognition, 22, 173 (1989).
2. O.D. Faugera and G. Toscani, The Calibration Problem for Stereo, in IEEE Int. Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, p.15, Miami, FL, June (1986).
3. Martin A. Fischler and Robert C. Bolles, Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography, Communication of the ACM, 24, 381 (1981).
4. M. H. Han and S. Rhee, Position Finding and Navigation Control for a Mobile Robot, Technical Report IE-TR-89-10, Pohang Institute of Science and Technology, Korea (1989).
5. Robert M. Haralick, Determining Camera Parameters From the Perspective Projection of a Rectangle, Pattern Recognition, 22, 225 (1989).
6. B.K.P. Horn, Robot Vision, The MIT Press (1986).
7. R.A. Jarvis, A Perspective on range finding techniques for computer vision, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., PAMI-5, 122 (1983).
8. Mansur R. Kabuka and Alvaro E. Arenas, Position verification of a mobile robot using standard pattern, IEEE J. Robotics and Automation, RA-3, 505 (1987).
9. A.C. Kak, Depth perception for robots, in Handbook of Industrial Robotics, p.185, S. Nof, Ed., Wiley, New York (1986).
10. Y. Liu, T.S. Huang, and O.D. Faugeras, Determining of camera location from 2-D to 3-D line and point correspondence, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., PAMI-12, 28 (1990).
11. H.D. Park, and O.R. Mitchell, CAD-based planning and execution of inspection, in IEEE Int. Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, Ann Arbor, Michigan, June (1988).
12. Andrej Sluzek, Identification of planr objects in 3-D space from perspective rojections, Pattern Recognition Letters, 7, 59 (1988).
13. I. Sobel, On calibrating computer controlled camera for perceiving 3-D scenes, Artificial Intelligence, 5, 185 (1974).
14. Thomas M. Strat, Recovering the camera parameters from a transformation matrix, Proc. DARPA Image Understanding Workshop, p.264, New Orleans, LA (1984).