

렌즈에 의해 왜곡된 원영상의 교정

최 춘호, 문 철홍

광주대학교 전자공학과

Circle calibration distorted by camera lens

Chunho Choi, Cheohong Moon

Department of Electronics Engineering, Kwangju University

abstract

A circular image in a space don't appear as an exact circular image and appear as an oval in image buffer because distortion of camera lens, number of horizontal pixel of CCD photographing element and number of horizontal pixel of image buffer are not in accordance. By using familiar 3-D coordinate, know as circle's diameter, and circle's center, you correct a pin-hole camera and get an exact circle with reprojection a circle into image buffer, according to a perspective.

I. 서론

카메라의 기하학적 특성을 평가하는 카메라 교정이란 스테레오 시각 장치에 필수적인 과정이며, 카메라 내부의 기하 구조와 광학적 특성(내부 매개 변수)을 결정하는 과정(단일 카메라의 기하학적 특성)과 어떤 세계(world)좌표계에 대한 카메라 프레임의 3 차원 위치와 방향(외부 매개 변수)을 결정하는 것(두 카메라 사이의 회전 행렬 R과 이동 벡터 T)이다[3,4]. 카메라 교정의 목적은 3차원 세계 좌표와 컴퓨터에 의해서 바라보이는 2차원 영상 좌표의 관계를 형성하기 위한 것이다. 한 번 이러한 관계가 형성되면 2차원 정보로부터 3차원 정보를 추론하거나 역순이 가능하다. 2차원 영상과 3차원 공간과의 관계는 어떠한 응용에서도 필요하며 카메라 교정이 필히 행해져야 한다. 3차원 센싱과 계측은 로봇트 비전, 생산검사, 자동화 조립 등에 사용된다.

직접적으로 기계적인 계측하지 않고 광학적 교정을 사용하여 스테레오 시스템의 내부 및 외부변수를 평가하는 논문들이 많이 발표되었으나 이들은 모두 카메라와 물체가 일정한 각도를 유지하였을 때 적용이 가능하며 물체와 카메라가 수직이었을 때는 측정이 불가능

하다. 따라서 본 논문에서는 물체와 카메라가 수직인 상태에서 파이프와 같은 원을 정확하게 측정할 수 있도록 물체와 카메라가 수직인 상태에서 적용 가능한 방법을 연구하였다.

II. 본론

1. 카메라 모델

그림1에 카메라 모델의 기초적 기하 구조[4]를 나타낸다. (x_s, y_s, z_s) 은 3차원 세계 좌표계에서 물체점 p의 3차원 좌표이다. (x, y, z) 는 3차원 카메라 좌표계에서 같은 점 p의 3차원 좌표이다. 점p는 z축이 광축 일 때 광학 중심점 "0"에 집중된다. (x, y) 는 0 (영상 평면과 광축 z가 교차하는 점) 이 중심인 영상 좌표계이며 x와 y축에 평행하다.

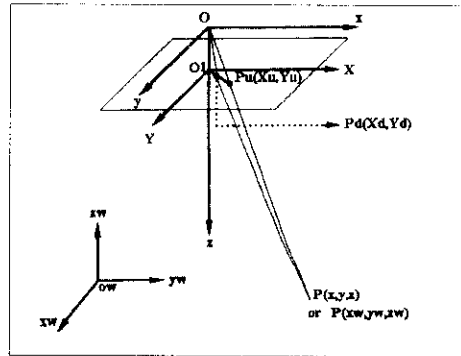


그림 1. 카메라의 오차

유효 초점 거리 f는 영상 평면과 중심과의 거리이다. (x_u, y_u) 는 완전한 바늘구멍(pin hole) 카메라 모델이 사용되었을 때의 영상 좌표계이다. (x_u, y_u) 혹은 (x, y)

(이후로는 간략하게 사용한다.)는 카메라 왜곡 때문에 발생하는 실제 영상 좌표이다. (x_r, y_r) 에 대하여 컴퓨터에서 사용되는 좌표계에서의 단위는 프레임 메모리에서 이진영상에 대하여 픽셀의 수로 나타낸다. 영상 평면에서의 영상 좌표계와 컴퓨터 영상 좌표계의 관계를 명확하게 하기 위해서 또는 교정하기 위해서 부가적인 변수(척도 및 중심)를 필요로 한다. (x_s, y_s, z_s) 에서 (x_r, y_r) 까지의 모든 변환은 네 가지 과정으로 이루어진다.

1) (x_s, y_s, z_s) 에서 (x, y, z) 으로의 변환(세계 좌표계에서 카메라 좌표계로의 변환)

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \text{-----} 1)$$

2) 바늘구멍 카메라 기하구조에서 원근 방정식은
$$X_u = f \frac{x}{z} \quad Y_u = f \frac{y}{z} \text{-----} 2)$$

3) 2차 다항식으로 구성된 광학 렌즈의 왜곡은
$$\begin{aligned} X &= X_d = X_u(1+kR^2)^{-1} \\ Y &= Y_d = Y_u(1+kR^2)^{-1} \end{aligned} \text{-----} 3)$$

단 $R^2 = X_d^2 + Y_d^2$
 실험에 의하면 카메라 렌즈의 왜곡은 정밀한 3차원 계측에서 대단히 중요하다. 단지 단 하나의 왜곡 변수 k를 갖는 제곱의 접근 형태는 렌즈 왜곡을 무시한 경우와 비교해서 대단히 교정 에러를 감소시킨다.

4) 실제 영상 좌표 (X, Y) 에서 컴퓨터 영상 (버퍼) 좌표 (X_r, Y_r) 로의 변환

$$\begin{aligned} X_r &= d_x^{-1} X + C_X \\ Y_r &= d_y^{-1} Y + C_Y \end{aligned} \text{-----} 4)$$

(C_X, C_Y) : 컴퓨터 영상 중심 좌표
 (d_x, d_y) : 영상 평면에서 컴퓨터 pel사이의 거리

d_x 는 이미지 센서에서 근접 열간의 단순한 거리이다. 수직 척도 인자는 정확하게 하나이기 때문에 교정할 필요가 없다.

2. 카메라의 내부변수
 불연속인 카메라 어레이의 수평 척도 인자 (horizontal scale factor) 컴퓨터 영상 그림의 엘레먼트와 센서 엘레먼트 사이의 변환 인자이다. 근접 엘레먼트사이의 실제 공간은 카메라 제작사의 규격에서 크기(μ 단위)를 알 수 있다. 수평 척도 인자란 컴퓨터 프레임 버퍼에서의 영상 특징점 좌표를 초점 평면에서의 실제 영상 좌표로 옮긴 것이다. 수직 척도 인자는 TV 스캔 변환 때문에 교정이 필요 없다. 컴퓨터 프레

임상의 한 줄과 센서 어레이의 한 줄 사이는 정확하게 1:1로 대응한다. 센서 엘레먼트 사이의 수직 공간을 알고 있으므로 불확실한 요소가 없다. 수평척도 인자의 불확실성은 카메라 하드웨어와 컴퓨터 영상 입력 하드웨어간의 정합이 불확실한 데 기인한다. 스케닝 과정에서 센서 어레이의 각 열에 의해서 공간적으로 불연속한 신호를 취득하고 먼저 아날로그 파형으로 변환하고, 이것을 컴퓨터 영상 입력 하드웨어에 의해서 공간적으로 불연속한 샘플들 (512)을 표본화하여 프레임 버퍼의 열에 입력한다. 분명히 척도 인자는 센서 어레이의 열에 있는 센서 엘레먼트의 숫자와 컴퓨터 영상 프레임 버퍼 열에 있는 그림 엘레먼트 (pels) 숫자 사이의 비율이다. 그러나 시간적인 부정합 때문에 약간의 에러가 있다.

2.1 수평 척도 인자
 다음 기술은 단지 이산 어레이 카메라 (CCD, CID, MOS 등) 에 적용한다. 수평 척도 인자 S_x 는 영상 센서에서 근접 pel간의 공간 d_x '를 결정하는 데 사용한다. 이것은 프레임 메모리에 나타난다.

$$d_x = S_x d_x \text{-----} 5)$$

d_x : x 스캔 라인 방향에서 근접 센서 엘레먼트 사이의 거리
 S_x 에 대한 대략적인 평가는

$$S_x = \frac{N_{cx}}{N_{fx}} \text{-----} 6)$$

N_{cx} : x스캔 라인 방향에서 센서 엘레먼트의 숫자
 N_{fx} : 컴퓨터에 의해서 표본화된 선의 그림 엘레먼트의 숫자
 식 6) 은 카메라의 비디오 라인의 활성 영역에 대한 시간에 디지털 회로의 것과 동일할 때만 가능하다. 이것은 정확하게 맞는 것이 아니다. 5% 이상의 분산이 관찰되었다. 수평 척도 인자는 실제적으로는 다음과 같다.

$$S_x = \frac{f_c}{f_f} \text{-----} 7)$$

f_c : 카메라의 pel 클럭 주파수
 f_f : A-D 변환기의 표본화 주파수
 만약 A/D 변환기와 카메라 센서가 알고 있는 클럭과 안정된 주파수로 작동된다면 식 6)은 척도 인자에 대하여 매우 정확한 평가를 얻을 수 있다. 비록 두 개가 모두 크리스탈에 의한 것이라도 그들의 고유 주파수를 사용할 수 없는 것은 보통 1 개의 메인을 TV동기 신호를 통하여 다른 클럭들과 페이스 록 (phase-lock) 시키기 때문이다. 실제 주파수를 측정하는 것도 수평 척도 인자를 결정하는 하나의 방법이다.

2.2 영상 중심

영상 중심이란 영상 평면과 광축이 교차하는 프레임 비퍼 좌표(C_x, C_y)로 정의된다. 이것은 영상처리의 원점으로 사용되고 원근의 방정식에서 나온다. 매우 정밀한 응용에서는 광학적인 렌즈 왜곡의 중심으로 이용된다.

본 논문에서는 레이저를 이용하는 직접적인 광학에 의한 방법을 사용하였다. 이 방법은 거울을 사용하지 않고 렌즈 어셈블리 자신을 반사 면으로서 사용한다. 레이저 빔이 렌즈 어셈블리에서 일점화 되었을 때, 빔이 유리로 들어 올 때 혹은 떠날 때 빛의 일부분이 반사된다. 빔이 렌즈 내부에서 반사될 때 많은 반사가 일어나고, 초기 빔을 위한 조그만 구멍을 가진 한 장의 종이 레이저 전면에 부착되어 있다면 광축의 정렬에 의한 반사를 관찰할 수 있다.

사용하였고 1/3" 16mm C마운트 렌즈를 사용하였다. 카메라 마운트에서 물체까지의 거리는 556mm이다.

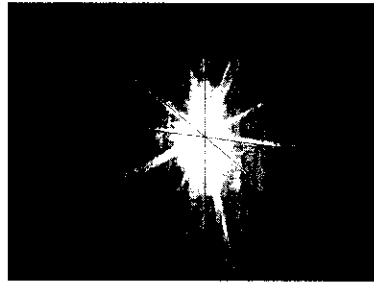


그림 2. 영상의 중심

레이저를 이용하는 직접적인 방법을 사용한 영상의 중심은 (342, 235)이다.

3. 렌즈의 왜곡

입력된 영상에서 임의의 원에 대한 중심은

$$(CC_x, CC_y) = \sum_{i=1}^N (x_i, y_i) / N \text{으로 표현되고, 영상}$$

중심(C_c, C_y)에서 원의 중심을 통과하는 직선의 교점 (X₁, Y₁)과 (X₂, Y₂)를 구한다. 식 3)을 이용하여 왜곡된 영상 면에서의 좌표를 구할 수 있으며, 두 좌표사이의 길이는 CCD면에서의 왜곡된 원의 지름을 식2)와 식 3)에 의해 다음 식으로 표현되며

$$CR = fr/z(1 + kR^2) \text{ ----- 8)}$$

r : 세계 좌표 상의 원의 지름

식 8)의 길이는 다음 식 9)에 의해 CCD에 영상으로 표현된다.

$$CR = \left(\left((X_1 - X_2) d_x' \right)^2 + \left((Y_1 - Y_2) d_y' \right)^2 \right)^{1/2} \text{ ----- 9)}$$

실제 길이를 알고 있는 두 개 이상의 원이 영상 면에 있다면 렌즈의 유효 초점과 래디얼 왜곡을 구할 수 있다.

$$k = CR_1 - CR_2 / R_1^2 - R_2^2 \text{ ----- 10)}$$

$$f = \text{const}(CR(1 + kR^2)) / (CR(1 + kR^2) + r)$$

$$\text{const} = f + z \text{ ----- 11)}$$

III. 실험 결과

실험에 사용된 카메라는 삼성 CCS-724 카메라로 768(H)×494(V)의 픽셀로 구성되어 있으며, 1픽셀의 크기는 6.35μm×7.4μm이며, 영상처리보드는 IC-PCI를

원의 지름이 20mm이며 원과 원의 중심은 30mm 간격인 영상에 대하여 640×480 영상으로 입력된 영상을 그림 3에 나타냈으며, 그림3의 윤곽선 및 영상의 중심에서 원의 중심을 통과하는 직선을 그림 4에 나타냈다.

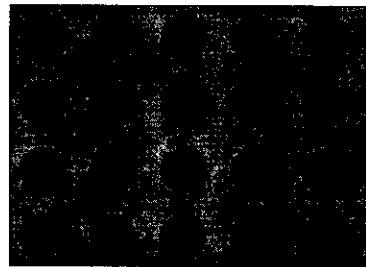


그림 3. 입력영상

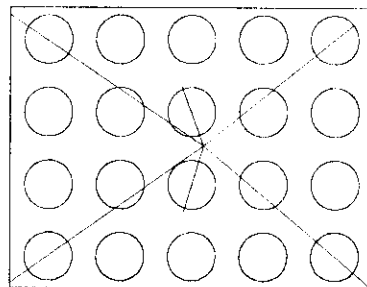


그림 4. 원과 직선의 교차점

표 1. 원의 중심과 픽셀거리

번호	원의 중심	픽셀 거리
1	(66, 55)	166356
2	(321, 177.5)	1810
3	(574.5, 54.5)	86636.5
4	(67.5, 424)	168581.25
5	(321.5, 301.5)	7200
6	(575, 424)	90010

단: 픽셀거리는 원의 중심에서 영상중심까지의 영상 버퍼에서의 거리이다

1번 원과 2번 원을 이용한 래디얼 왜곡은 식 10)에서 $k=5.713 \times 10^{-8}$ 이고, 식 11)에서 렌즈의 유효초점은 $f=17.1536\text{mm}$ 이며, 유효초점 거리와 유효초점에서 물체까지의 거리를 더한 $\text{const}=573.526\text{mm}$ 이다. 식 9)에 의한 CCD상의 왜곡된 원의 지름과 래디얼 왜곡변수에 의하여 교정된 원의 지름을 표 2에 나타냈다.

표 2. 교정된 원의 지름

번호	CCD상의 지름(mm)	교정된 원의 지름	오차(%)
3	0.61413	20.0178	0.089
4	0.60754	19.8951	0.52
5	0.61378	19.916	0.42
6	0.61055	19.9063	0.47

IV. 결론

실험에는 같은 방향에서 가장 가까운 원과 가장 먼 원인 번호 1번과 2번 원의 지름(20mm)과 CCD면에서의 픽셀거리를 이용하여 카메라 렌즈의 래디얼 왜곡과 렌즈의 유효초점거리를 계산하였다. 따라서 1번과 2번 원의 계측 지름은 거의 오차를 발생하지 않았으며, 카메라의 왜곡은 영상중심을 기점으로 멀어질수록 많이 발생하기 때문에 영상중심에서 멀리 떨어져 있는 3, 4, 6번 원과 영상중심에서 가까운 5번 원에 대하여 실험을 진행하였다. 영상의 외곽인 3, 4, 6번에서는 최대 오차 0.52%가 발생하였으며, 5번 원은 0.42%가 발생하였다. 입력영상의 윤곽선 추출과정이나 영상중심으로 이어지는 직선과 원의 교차점 선정과정에서 최소 0.5 픽셀 단위로 설정하였다. 그러나 1픽셀의 오차는 세계좌표에서 0.24mm로 1.2%의 오차를 발생시키기 때문에 실험과정에서 정확한 교차점의 설정이 중요하며,

나아가서 픽셀이하 단위로 교차점을 결정할 수 있는 새로운 연구 방법이 필요하다.

참고문헌

- [1] 문 철홍, 구자일, "카메라 렌즈에 의해 왜곡된 직선 영상의 교정, 96 추계 대한전자공학회 학술대회, pp1119-1122
- [2] 문철홍, 한영환, 홍승홍, "전동휠체어자동 주행을 위한 복도영상 해석", 대한의용생체공학회지, 제 15권 1호, pp.27-34, 1994
- [3] R.M.Haralick and Linda G. Shapiro, "Computer and robot vision, Vol 2, Addison-Wesley, 1993
- [4] Roger T. Tsai, " A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-shelf TV Cameras and Lenses", IEEE Robotics and Automation, Vol RA-3 NO. 4, PP 323-344, 1987