

## 디지털 줌 카메라의 캘리브레이션 실험 및 분석

정유호<sup>o</sup> · 이종수  
컴퓨터정보통신공학부

### <요 약>

본 논문에서는 5단계의 줌 설정이 가능한 DC210 디지털 카메라의 특성들을 실험을 통해 구하고 정확도를 분석한다. 카메라의 특성을 구하는 방법으로는 'Tsai'[1][2]의 카메라 캘리브레이션 기법을 사용하였다. 실험결과로, 디지털 줌 카메라의 기하학적 및 광학적 특성의 정확도가 줌 설정에 따라 다름을 확인하였다.

### <Abstract>

In this paper, we obtained, by experiments, and analyzed camera characteristics of the DC210 digital zoom camera which has the five zoom stages. For the camera characteristics, we used the Tsai camera calibration technique[1][2]. The experimental results show that the obtained characteristics of the DC210 camera have different accuracies depending on the zoom stage set.

## 1. 서론

카메라 캘리브레이션은 카메라 내부의 기하학적이고 광학적인 특성들(내부 파라메타)과 실세계 좌표에 대한 카메라의 3차원 위치와 방위(외부 파라메타)를 구하는 과정이다. 이 카메라 캘리브레이션의 목적은 3차원 실세계 좌표와 컴퓨터에 의해 보여지는 2차원 이미지 좌표와의 관계를 확립하는 것이다. 이러한 관계가 한번 확립이 되면, 2차원 정보로부터 3차원 정보가 유도되어질 수 있고 반대의 경우도 마찬가지이다. 이러한 관계를 필요로 하는 응용분야에서는 카메라 캘리브레이션 과정을 꼭 거쳐야 한다[3][4].

본 논문은 먼저, Tsai의 카메라 캘리브레이션 설명을 기술하고, 다음에 실험을 통하여 디지털 줌 카메라의 내부 및 외부 파라메타를 구한다. 실험에서 사용되는 줌은 5 단계로서 디지털 카메라에 내장된 줌 기능을 이용하였다. 마지막으로 실험 결과를 제시하며, 정확도를 분석한다.

## 2. 카메라 캘리브레이션

아래 그림 1은 카메라 좌표계와 실세계 좌표와의 기본적인 모델이며 그림 2에서는 3차원 실세계 좌표계가 2차원 이미지 좌표계로 변환하는 과정을 나타내었다.

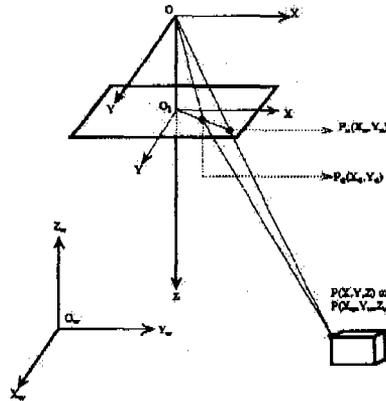


그림 1. 카메라 모델

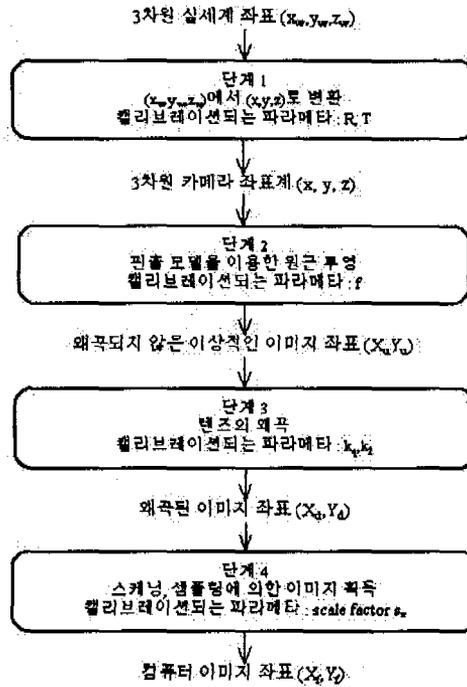


그림 2. 3차원 실세계 좌표에서 이미지 좌표 변환을 위한 4 단계

2.1 단계별 캘리브레이션 파라메타

단계 1은 3차원 실세계좌표(xw,yw,zw)를 3차원 카메라 좌표(x,y,z)로 변환하는 과정으로 아래의 식에 의한다.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + T \quad \text{-----} \quad (1)$$

$$R \equiv \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \quad \text{-----} \quad (2)$$

$$T \equiv \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} \quad \text{-----} \quad (3)$$

여기서, R과 T는 구해져야 하는 캘리브레이션 파라메타이며 각각 실세계좌표에 대한 카메라의 3×3 회전행렬과 이동벡터이다.

단계 2는 3차원 카메라 좌표(x,y,z)를 왜곡되지 않은 이미지 좌표(Xu,Yu)로 변환하는 과정으로, 왜곡이 없는 핀홀 카메라의 기하학적 특성으로 아래 식에 의한다.

$$X_u = f \frac{x}{z} \quad \text{-----} \quad (4-1)$$

$$Y_u = f \frac{y}{z} \quad \text{-----} \quad (4-2)$$

단계 2에서 구하여야 하는 파라메타는 초점거리인 f이다.

단계 3은 왜곡되지 않은 이미지 좌표(Xu,Yu)를 왜곡된 이미지 좌표(Xd,Yd)로의 변환이며 아래 식에 의한다.

$$X_d + D_x = X_u \quad \text{-----} \quad (5-1)$$

$$Y_d + D_y = Y_u \quad \text{-----} \quad (5-2)$$

여기서 (Xd,Yd)는 실제 이미지 평면상의 이미지 좌표이다.

$$D_x = X_d(k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots)$$

$$D_y = Y_d(k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots)$$

$$r = \sqrt{X_d^2 + Y_d^2}$$

단계 3에서 구해야 하는 파라메타는 렌즈의 왜곡 계수인  $k_i$ 이며, 일반적으로  $k_2$ 번째 이후의 계수들은 렌즈의 왜곡에 영향을 미치는 않을 정도의 작은 수이기 때문에 첫 번째 계수인  $k_1$ 만 구한다. 따라서,  $D_x, D_y$ 는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$D_x = X_d k_1 (X_d^2 + Y_d^2)$$

$$D_y = Y_d k_1 (X_d^2 + Y_d^2)$$

단계 4는 실제 이미지 좌표( $X_d, Y_d$ )에서 컴퓨터 이미지 좌표( $X_f, Y_f$ )로의 변환이며 아래 식에 의한다.

$$X_f = s_x d_x'^{-1} X_d + C_x \quad \text{-----} \quad (6-1)$$

$$Y_f = d_y^{-1} Y_d + C_y \quad \text{-----} \quad (6-2)$$

여기서,

( $X_f, Y_f$ ) : 이미지의 행과 열 픽셀 수

( $C_x, C_y$ ) : 이미지의 중심

$$d_x' = d_x \frac{N_{cx}}{N_{fx}}$$

$dx$  : CCD에서 X 방향으로 인접 센서와의 중심에서 중심까지 거리

$dy$  : CCD에서 Y 방향으로 인접 센서와의 중심에서 중심까지 거리

$N_{cx}$  : CCD의 X 방향으로의 센서 수

$N_{fx}$  : 획득된 이미지의 X 방향으로의 픽셀 수

위 네 개의 값들은 카메라의 설명서에 나타나 있다.

단계 4에서 구하여야 하는 파라메타는 영상의 스캔 파라메타인  $s_x$ 이다.

마지막 세 단계를 조합함으로써, 컴퓨터 이미지 좌표 ( $X, Y$ )와 실세계좌표 ( $x, y, z$ )와의 관계는 아래와 같이 나타난다.

$$s_x^{-1} d_x' X + s_x^{-1} d_x' X k_1 r^2 = f \frac{x}{z} \quad \text{-----} \quad (7-1)$$

$$d_y' Y + d_y' Y k_1 r^2 = f \frac{y}{z} \quad \text{-----} \quad (7-2)$$

$$r = \sqrt{(s_x^{-1} d_x' X)^2 + (d_y' Y)^2}$$

식 (1)을 (7-1)과 (7-2)에 대입하여 풀면,

$$s_x^{-1}d'_x X + s_x^{-1}d'_x Xk_1r^2 = f \frac{r_1x_w + r_2y_w + r_3z_w + T_x}{r_7x_w + r_8y_w + r_9z_w + T_z} \quad \text{-----} \quad (8-1)$$

$$d'_y Y + d_y Yk_1r^2 = f \frac{r_4x_w + r_5y_w + r_6z_w + T_y}{r_7x_w + r_8y_w + r_9z_w + T_z} \quad \text{-----} \quad (8-2)$$

와 같은 관계를 가지게 된다.

## 2.2 동일 평면상의 점들을 사용한 카메라 캘리브레이션

본 논문에서는 캘리브레이션을 하기 위한 점들이 동일 평면상에 있다는 가정하에 카메라 파라메타들을 구한다. 이 평면을 실세계 좌표계의 z평면으로 두면 모든 캘리브레이션 포인트들의 z성분 값은 0이 된다. 여기서 각 파라메타들은 두 단계에 의해 구해진다.

### 2.2.1 카메라의 회전 및 위치(Rotation Matrix R, Translation Vector T) 계산

우선, 왜곡된 이미지 좌표계를 계산하기 위하여 (6-1),(6-2) 식에 의해,

$$X_{di} = s_x^{-1}d'_x(X_{fi} - C_x)$$

$$Y_{di} = d_y(Y_{fi} - C_y)$$

여기서  $i = 1, \dots, N$  그리고  $N$ 은 캘리브레이션 포인트들의 총 갯수이다.

계산된  $(X_{di}, Y_{di})$  점들로 부터 다음과 같이  $T_y^{-1}r_1, T_y^{-1}r_2, T_y^{-1}T_x, T_y^{-1}r_4, T_y^{-1}r_5$ 를 구한다.

그럼 1의 카메라 모델에서  $\overline{O_iP_d} // \overline{O_{ox}P} // \overline{O_wP_w}$ 인 관계가 성립하고,  $\overline{O_iP_d} // \overline{O_{ox}P}$ 이면  $\overline{O_iP_d} \times \overline{O_{ox}P} = 0$ 이다.

따라서, 다음과 같은 식이 성립된다.

$$X_d \cdot y - Y_d \cdot x = 0$$

$$X_d(r_4x_w + r_5y_w + r_6z_w + T_y) = Y_d(r_1x_w + r_2y_w + r_3z_w + T_x) \quad \text{-----} \quad (9)$$

여기서  $z_w=0$ 이므로,

$$X_d(r_4x_w + r_5y_w + T_y) = Y_d(r_1x_w + r_2y_w + T_x)$$

양변에  $T_y$ 를 나누어 행렬로 표현하면,

$$\begin{bmatrix} Y_{di}x_{wi} & Y_{di}y_{wi} & Y_{di} & -X_{di}x_{wi} & -X_{di}y_{wi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_y^{-1}r_1 \\ T_y^{-1}r_2 \\ T_y^{-1}T_x \\ T_y^{-1}r_4 \\ T_y^{-1}r_5 \end{bmatrix} = X_{di} \quad \text{-----} \quad (10)$$

식 (10)에서 실세계 좌표값과 컴퓨터 이미지 좌표값을 대입함으로써  $T_y^{-1}r_1, T_y^{-1}r_2, T_y^{-1}T_x, T_y^{-1}r_4, T_y^{-1}r_5$ 를 구할 수 있고 구해진 값으로 캘리브레이션 파라메타인 R(Camera Rotation Matrix)과 T(Camera Translation Vector)를 구할 수 있다. R을 구하기 위한 식은 다음과 같다.

$$R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & (1-r_1^2-r_2^2)^{1/2} \\ r_4 & r_5 & s(1-r_4^2-r_5^2)^{1/2} \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \quad \text{-----} \quad (11)$$

$$r_1 = (T_y^{-1}r_1) \cdot T_y$$

$$r_2 = (T_y^{-1}r_2) \cdot T_y$$

$$r_4 = (T_y^{-1}r_4) \cdot T_y$$

$$r_5 = (T_y^{-1}r_5) \cdot T_y$$

$$T_x = (T_y^{-1}T_x) \cdot T_y$$

$$s = -\text{sgn}(r_1r_4 + r_2r_5)$$

## 2.2.2 파라메타 f, Tz, k값 계산

식 (8-1)과 (8-2)에서

$$d_y Y = f \frac{r_4 x_w + r_5 y_w + r_6 \cdot 0 + T_y}{r_7 x_w + r_8 y_w + r_9 \cdot 0 + T_z} \quad \text{-----} \quad (12)$$

이 되고 식을 간단히 하기 위해 다음과 같이 두면,

$$y_i = r_4 x_w + r_5 y_w + T_y$$

$$w_i = r_7 x_w + r_8 y_w + T_z$$

식 (12)은 아래와 같이 행렬로 표시될 수 있고  $f$ 와  $T_z$ 를 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} y_i - d_y Y_i \\ T_z \end{bmatrix} = w_i d_y Y_i$$

렌즈의 왜곡은 2.1의 단계 3에서 나타난 수식으로 구한다.

### 3. 실험 및 정확도 분석

#### 3.1 실험

실험에 사용된 카메라는 Kodak DC210 줌 카메라이며 사용된 초점거리는 4.4, 5.16, 6.22, 7.74, 8.8mm 인 다섯 단계의 줌을 이용하였다. 그림 3은 사용된 캘리브레이션 모델이다. 이 모델의 전체 크기는 20×30cm<sup>2</sup>이고 각 정사각형의 크기는 2.8×2.8cm<sup>2</sup>이다. 여기서 정사각형의 각 꼭지점이 캘리브레이션 포인트가 이며 모두 80개이다.

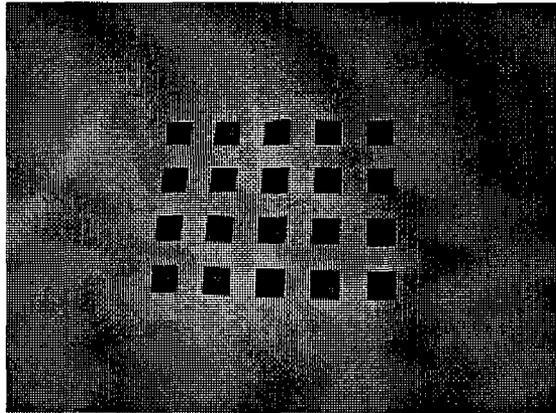


그림 3. 캘리브레이션 모델

우선 실험에 사용되어질 이미지를 획득하기 위하여 카메라를 적당한 위치에 두고 DC210 카메라의 줌 기능을 이용하여 5장의 이미지를 획득한다. 그림 4는 획득된 5개의 이미지이다. 각각의 이미지의 캘리브레이션 포인트 좌표들을 획득하는데 있어 정확도를 높이기 위해 Canny의 외곽선 검출을 사용하였으며 그림 5는 그 결과이다.

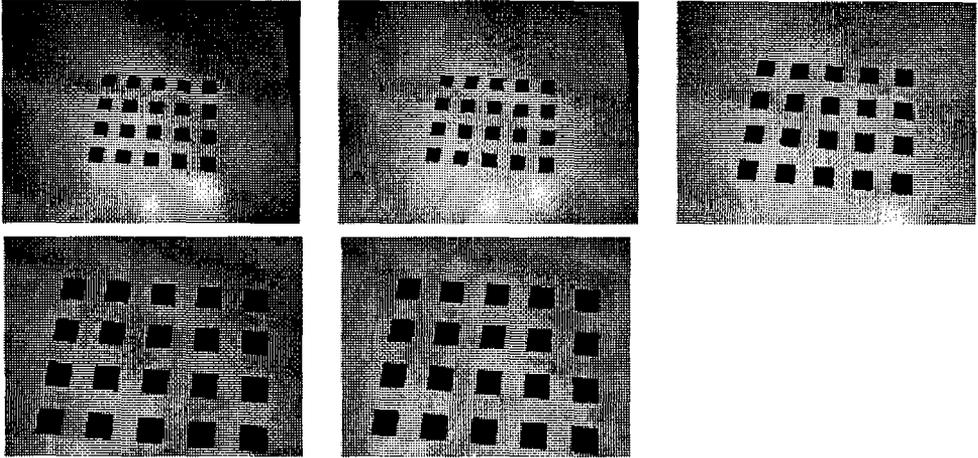


그림 4. 5단계의 줌에 의해 획득된 영상

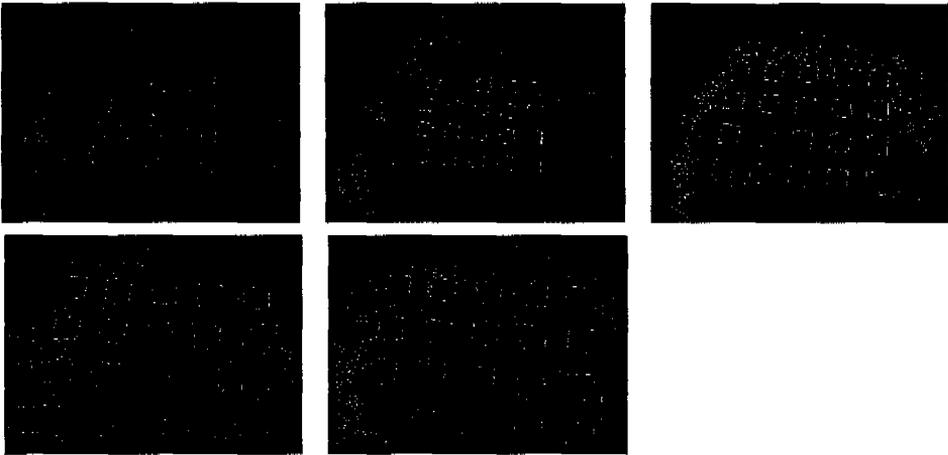


그림 5. Canny의 외곽선 검출을 이용한 결과

획득된 캘리브레이션 포인트들의 컴퓨터 이미지 좌표계의 좌표들과 실세계 좌표계의 좌표들을 입력값으로 하여 얻어진 결과가 표 1에 나타나 있다.

실제 초점거리 파라메타		4.4mm(29mm)	5.16mm(34mm)	6.22mm(41mm)	7.74mm(51mm)	8.8mm(58mm)
		Rotation R [deg]	Rx	-23.799887	-22.473581	-20.622821
	Ry	5.410695	4.935371	4.706907	5.220422	4.696396
	Rz	3.736148	3.820781	4.014952	4.441909	3.936953
Translation Vector T	Tx	-106.39496	-109.625915	-109.290883	-104.266715	-111.092517
	Ty	-47.041465	-62.660355	-83.363648	-65.961073	-74.812015
	Tz	627.92997	602.754079	567.500013	612.708392	590.518790
Effective focal length f [mm]		4.22	4.86	6.23	8.24	8.68
Distortion factor $k_1$ [ $1/mm^2$ ]		9.137170e-003	5.434135e-003	1.781888e-003	3.995720e-004	2.456831e-005

표 1. 계산된 캘리브레이션 파라메타들

### 3.2 정확도 분석

실험 결과에 대한 오차 분석은 실제 초점거리와 카메라 캘리브레이션에 의해 얻어진 초점거리를 비교하고 또 이미지 좌표계의 캘리브레이션 포인트들의 좌표를 계산된 캘리브레이션 파라메타들을 이용하여 실세계 좌표계로 다시 투영함으로써 실세계 좌표계의 좌표들과 얼마 만큼의 오차가 발생하는지를 보여준다. 표2와 표3이 이에 대한 결과이다.

실제 초점거리(mm)	4.4	5.16	6.22	7.74	8.8
측정된 초점거리(mm)	4.22	4.86	6.23	8.24	8.68
오차율(%)	2.72	5.08	0.16	5.29	1.36

표 2. 초점거리의 오차율

위 결과를 볼 때 제조회사에서 제공한 실제 초점거리와 측정된 초점거리는 5%내외는 오차율로써 계산되었다.

실제 초점거리 3차원 투영 결과	4.4mm	5.16mm	6.22mm	7.74mm	8.8mm
평균(mm)	0.753958	0.420438	0.355797	0.286817	0.255470
표준편차(mm)	0.296411	0.242823	0.188440	0.154017	0.146908
최대 오차 길이(mm)	1.468586	0.987038	0.956530	0.935083	0.695274

표 3. 3차원 실세계 좌표계로 재 투영한 결과의 오차

측정된 카메라 파라메타를 사용하여 2차원 좌표들을 3차원으로 다시 투영했을 때 평균 1mm내의 오차를 가짐을 볼 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 여러 단계로 줌 설정이 가능한 디지털 카메라의 특성을 실험을 통해 구하고 정확도를 분석한 결과 초점거리가 6.22mm인 줌 설정에서 가장 적은 0.16%인 오차가 있었으며 7.74mm인 줌 설정에서 가장 큰 5.29%의 오차가 있었으며 평균 2.92%의 오차가 측정되었다. 측정된 카메라 파라메타들을 사용하여 2차원 좌표들을 3차원으로 다시 투영했을 때의 평균 오차는 0.41[mm]이었다. 따라서, 카메라 캘리브레이션에 의해 구한 디지털 줌 카메라 특성의 정확도가 줌 설정에 따라 달라짐을 확인할 수 있다.

**[참고문헌]**

- [1] R. Y. Tsai, "A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses", IEEE Journal of Robotics Automation. Vol. RA-3. No.4, August 1987
- [2] R. K. Lenz, R. Y. Tsai, "Techniques for Calibration of the Scale Factor and Image Center for High Accuracy 3-D Machine Vision Metrology", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Vol 10. No.5. September 1988
- [3] R. G. Willson, S. A. Shafer, "A Perspective Projection Camera Model for Zoom Lenses", Robotics Institute Carnegie Mellon University Pittsburgh, Pennsylvania 15213, January 1994, CMU-RI-TR-94-03
- [4] J. M. Lavest, C. Delherm, B. Peuchot, and N. Daucher, "Implicit Reconstruction by Zooming", Computer Vision and Image Understanding Vol. 66. No. 3, June, pp. 301-315, 1997