

두 대의 CCD 카메라를 이용한 물체의 깊이정보 측정

전정희*, 노정완, 김충원
조선대학교 컴퓨터공학과
광주광역시 동구 서석동 375. (501-759)
redjung@shinbiro.com

Measurement of Object Depth Information Using Two CCD Camera

Junghee Jun*, Kyeongwan Roh, Choongwon Kim
Department of Computer Engineering, Chosun University
#375, seoseok-dong, Dong-gu, Kwangju 501-759
redjung@shinbiro.com

Abstract

For camera calibration, this paper describes two steps to camera constants and camera parameters. The former is the radial distortion of lens, image center and focal length etc.. The latter is translation, rotation etc.. Camera calibration use Tsai's algorithm.

In this paper, the solutions are introduced into overdetermined system as matching points that are acquired from two CCD and measured object depth information.

1. 서론

컴퓨터를 기반으로 하는 생산자동화 체제는 최근 작업의 난이도가 높아지고 종류가 다양해짐에 따라 유연성과 적응성이 절실히 필요하게 되었다. 자동화 시스템이 적응성과 유연성을 갖추려면 정교한 센싱 시스템이 필요한데 지금까지는 주로 근접센서, 접촉센서, 힘센서 등에 의해 많은 성능의 향상을 이루어 졌다. 그러나 시각 시스템의 중요성이 내두되면서 하드웨어의 개발과 더불어 다방면으로 연구가 진행되어 왔으며 특히 3차원 거리정보를 통한 물체의 인식은 시각 시스템의 궁극적인 목표로서 연구가 진행되어 왔다.^{[1][2][3]}

3차원 정보는 요구되는 작업의 종류에 따라 적절하고안된 시각 시스템에 의하여 계측될 수 있으며, 측정된 3차원 정보는 유용한 알고리즘에 의하여 유용한 작업에 적용될 수 있다. 일반적으로 스테레오 기법에 의한 거리측정은 삼각측량법의 원리에 근거를 두고 있다. 두장의 2차원 이미지를 이용하여 실세계좌표를 구하기 위

해서는 카메라의 초점거리, 렌즈의 왜곡, Translation, Rotation, Scale등의 카메라 파라메타등을 구하는 칼리브레이션을 행하여야만 한다.

본논문에서는 크게 두단계로 나누어 파라메타를 찾는다.^{[4][5][6]} 첫째, 기본적인 카메라 모델을 바탕으로 3차원 실세계 좌표가 컴퓨터의 2차원 영상좌표로 표현되는 과정에 대한 모든 제한사항을 추정한다. 둘째, 동일평면을 이용하여 컴퓨터에서 표현되는 2차원 영상좌표가 3차원 실세계 좌표로 변환되는 과정에서의 모든 파라메타를 구한다. 그리고 이러한 카메라의 칼리브레이션을 바탕으로 두 대의 카메라로부터 영상을 입력 받아 3차원정보를 구한다.

2. 카메라 칼리브레이션 및 좌표변환

물체를 투사하는 두 대의 카메라에 대하여 실세계좌표를 중심으로 얼마만큼 이동 되었고 회전되었는가를 먼저 유도하고 이렇게 유도된 식을 바탕으로 프레임 그라버에 영상이 저장 될 때 카메라의 초점거리, Image Plane의 크기, 영상의 중심, 렌즈의 왜곡등을 고려한 칼리브레이션을 하여야 한다. 칼리브레이션의 정확도에 따라 측정하고자 하는 실세계 오차가 작아 되므로 카메라와 컴퓨터 사이에 관련된 모든 제한 사항을 고려 하여야 한다. 이를 위한 기본적인 모델이 Fig. 1에 있다.

먼저, 실세계좌표를 컴퓨터에 표현하기 위한 기하학적 변환식을 유도한 후 변환식을 바탕으로 칼리브레이션 파라메타를 구한다. 3차원 실세계좌표계에서 2차원 영상좌표계로의 변환과정은 다음 4단계로 구분된다.

제1단계:실세계좌표계 $(x_w, y_w, z_w) \rightarrow$ 카메라좌표계 (x, y, z)

제2단계:카메라좌표계 \rightarrow 이상적 영상좌표 (f, u)

제3단계: 이상적 영상좌표 → 왜곡된 영상좌표 (p_d)

제4단계: 왜곡된 영상좌표 → 컴퓨터 영상좌표계

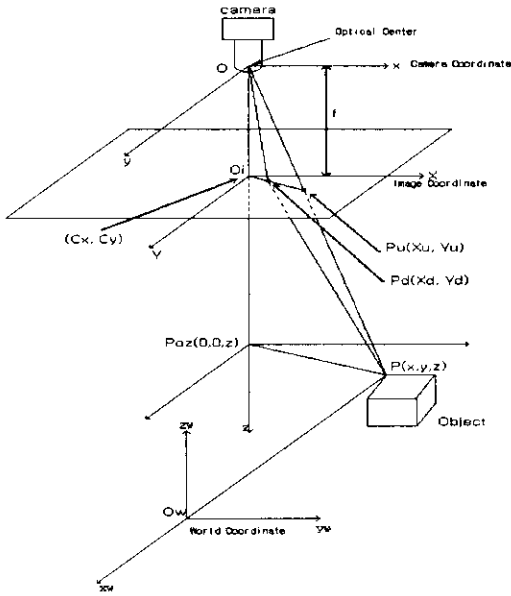


Fig.1 카메라 모델

2.1 단계에 따른 파라미터

2.1.1 제1단계 : 실세계좌표계 → 카메라좌표계
제1단계는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_u \\ y_u \\ z_u \end{bmatrix} + T \text{-----(1)}$$

$$R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}$$

2.1.2 제2단계 : 카메라좌표계 → 이상적 영상좌표

제2단계는 님은 삼각형의 성질을 이용하여 유도하면 다음과 같이 표현 된다.

$$X_u = f \frac{x}{z} \text{-----(2)}$$

$$Y_u = f \frac{y}{z}$$

2.1.3 제3단계 : 이상적 영상좌표 → 왜곡된 영상좌표

이상적인 좌표 X_u, Y_u 는 렌즈의 왜곡으로 인하여 왜곡된 좌표인 X_d, Y_d 가 된다. 그래서 점 P의 좌표를 왜곡을 고려한 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} X_d + D_x &= X_u \\ Y_d + D_y &= Y_u \\ D_x &= X_d \cdot k \cdot (X_d^2 + Y_d^2) \end{aligned} \text{-----(3)}$$

2.1.4 제4단계 : 왜곡된 영상좌표 → 컴퓨터영상좌표

왜곡된 영상 좌표(X_d, Y_d)를 컴퓨터 영상 좌표로 표현하기 위해서는 몇가지 사항을 고려 하여야 한다. Noise를 포함

하는 Image Plan의 정보는 컴퓨터에 순서대로 기록이 된다. 그런데 왜곡된 영상좌표(X_d, Y_d)는 Fig. 1에 도식되어 있는바와 같이 O_i 에서 X와 Y의 방향으로 좌표가 몇번째 픽셀에 위치하느냐 이다. 또한 프레임 그라버는 영상을 저장하기 위하여 이미지플랜의 좌표가 (0, 0)인 픽셀의 위치에서부터 X축의 방향으로 순서대로 저장 한다. 그리고 CCD 카메라 촬상소자면과 픽셀 크기와의 관계를 알아야 만 깊이를 결정할 수가 있다. 즉 전체 영상 크기를 결정하는 s_x 와 X 방향으로 서로 이웃하는 센서 사이의 거리를 고려해야 된다. 그러므로 왜곡된 영상좌표(X_d, Y_d)을 컴퓨터 영상좌표로 변환하기 위한 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} X_f &= s_x d_x^{-1} X_d + C_x \text{-----(4)} \\ Y_f &= d_y^{-1} Y_d + C_y \end{aligned}$$

결국 3차원 실세계좌표계에서 2차원 영상좌표계로의 변환 과정에서 추정할 파라미터는 다음과 같다.

- 카메라의 자세와 위치(Rotation Matrix R, Translation Matrix T)
- 유효 초점 거리(Effective focal length f)
- 렌즈의 반경 방향 왜곡계수(Distortion factor k)
- 영상의 스캔 파라메타(Scanning parameter S_x)

2.2 동일평면을 이용한 파라메타의 추정

본 논문에서는 두 대의 카메라좌표에 실세계의 칼리브레이션 포인트들이 정확히 $z=0$ 에 투영된다는 가정하에 즉, 동일평면에 존재한다는 가정하에 칼리브레이션 파라메타를 구하며 또한 전체영상의 크기는 1.0으로 고정 시킨다. 이에 따른 장비와 실험환경은 4.실험 및 고찰에 있다.

2.2.1 파라메타 T(Translation), R(rotation)의 추정

프레임 그라버로 획득한 칼리브레이션 포인트에서 임의의 한점 i의 컴퓨터 영상 좌표를 X_{fi}, Y_{fi} 라 하면 식(4)의 왜곡된 영상 좌표 X_{di}, Y_{di} 다음과 같은 식이 된다.

$$\begin{aligned} X_{di} &= s_x^{-1} d_x (X_{fi} - C_x) \text{-----(5)} \\ Y_{di} &= d_y (Y_{fi} - C_y) \end{aligned}$$

(5)식에서 $i=1, 2, 3, \dots, N$ (N은 칼리브레이션 포인트의 총개수)이며 $N_{cx}, N_{fy}, d_x, d_y, C_x, C_y$ 는 카메라와 프레임 그라버의 제조회사 사용설명서에 나타나 있다. 그러므로 식(2),(3) 그리고 (5)로부터 식(6-1)과 (6-2)가 유도된다.

$$s_x^{-1} d_x X + s_x^{-1} d_x X k_1 r^2 = f \frac{x}{z} \text{-----(6-1)}$$

$$d_y Y + d_y Y k_1 r^2 = f \frac{y}{z} \text{-----(6-2)}$$

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

여기에서 $X = X_f - C_x, Y = Y_f - C_y$ 이다.

식(6-1), (6-2)에 식(1)을 대입하여 풀면 각각 다음과 같다.

$$s_x^{-1} d_x X + s_x^{-1} d_x X k_1 r^2 = f \frac{r_1 x_u + r_2 y_u + r_3 z_u + T_x}{r_7 x_u + r_8 y_u + r_9 z_u + T_z} \text{-----(7-1)}$$

$$d_y Y + d_y Y k_1 r^2 = f \frac{r_4 x_u + r_5 y_u + r_6 z_u + T_y}{r_7 x_u + r_8 y_u + r_9 z_u + T_z} \text{-----(7-2)}$$

Fig.2의 카메라모델에서 $\overline{O_i P_d} // \overline{P_\infty P} // \overline{O_i P_u}$ 는 $\overline{O_i P_d} \times \overline{P_\infty P} = 0$ 이므로 (8)식과 같이 표현된다.

$$X_d \cdot y - Y_d \cdot x = 0 \text{ -----(8)}$$

$$-X_d(r_4 x_u + r_5 y_u + r_6 z_u + T_x) = Y_d(r_1 x_u + r_2 y_u + r_3 z_u + T_x) \text{ -----(9)}$$

그런데 칼리브레이션 포인트는 z=0인 동일평면에 존재한다. 그러므로 (9)식을 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$[Y_d x_u \quad Y_d y_u \quad Y_d z_u \quad -X_d x_u \quad -X_d y_u] \begin{bmatrix} T_x^{-1} r_1 \\ T_x^{-1} r_2 \\ T_x^{-1} T_x \\ T_x^{-1} r_4 \\ T_x^{-1} r_5 \end{bmatrix} = X_d \text{ -----(10)}$$

따라서 파라미터 T(Translation)는 (10)식으로 구해진다. 파라미터 R(Rotation)의 구하기 위한 식은 다음과 같다.

$$R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & (1-r_1^2-r_2^2)^{1/2} \\ r_3 & r_5 & s(1-r_4^2-r_5^2)^{1/2} \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \text{ -----(11)}$$

$$\begin{aligned} r_1 &= (T_x^{-1} r_1) \cdot T_x \\ r_2 &= (T_x^{-1} r_2) \cdot T_x \\ r_4 &= (T_x^{-1} r_4) \cdot T_x \\ r_5 &= (T_x^{-1} r_5) \cdot T_x \\ T_x &= (T_x^{-1} T_x) \cdot T_x \\ s &= -\text{sgn}(r_1 r_4 + r_2 r_5) \end{aligned}$$

식 (11)에서 r_7, r_8, r_9 는 Rotation에 대한 오른손 법칙으로 결정된다.

2.2.2 파라미터 f(초점거리), T_z , k(Kappa), s_x (Scale factor)의 추정

(7-1)식과 (7-2)에서 초점거리와 T_z 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f y_i - d_y Y_i &= d_y Y_w \\ y_i &= r_4 x_w + r_5 y_w + r_6 \cdot 0 + T_x \\ w_i &= r_7 x_w + r_8 y_w + r_9 \cdot 0 \end{aligned}$$

그러므로 초점거리와 T_z 를 행렬식으로 표현하면 (12)식이 된다.

$$[y_i - d_y Y_i] \begin{bmatrix} f \\ T_z \end{bmatrix} = w_i d_y Y_i \text{ -----(12)}$$

랜즈의 왜곡은 (3)식을 통하여 구하며 k_1 의 초기값을 0으로 가정하고 s_x 는 1.0으로 추정하였다.

3. 깊이정보 추출

(7-1), (7-2)식은 실세계 좌표와 영상 좌표와의 관계를 나타내는 식으로, 두장의 2차원 영상의 매칭점을 이용해 실세계 좌표를 구할 수 있다. 그러므로 x좌표에 관한 식인 (7-1)의 좌변을 P, y좌표에 관한 식인 (7-2)의 좌변을 Q로 두면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} (P r_7 - f r_1) x_u + (P r_8 - f r_2) y_u + (P r_9 - f r_3) z_u + (P T_z - f T_x) &= 0 \\ (Q r_7 - f r_4) x_u + (Q r_8 - f r_5) y_u + (Q r_9 - f r_6) z_u + (Q T_z - f T_x) &= 0 \end{aligned}$$

윗 식을 좌/우측 CCD 카메라로부터 얻어진 매칭된 영상에 대한 픽셀의 좌표로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (P_1 r_7 - f r_1) x_u + (P_1 r_8 - f r_2) y_u + (P_1 r_9 - f r_3) z_u + (P_1 T_z - f T_x) &= 0 \\ (Q_1 r_7 - f r_4) x_u + (Q_1 r_8 - f r_5) y_u + (Q_1 r_9 - f r_6) z_u + (Q_1 T_z - f T_x) &= 0 \\ (P_2 r_7 - f r_1) x_u + (P_2 r_8 - f r_2) y_u + (P_2 r_9 - f r_3) z_u + (P_2 T_z - f T_x) &= 0 \\ (Q_2 r_7 - f r_4) x_u + (Q_2 r_8 - f r_5) y_u + (Q_2 r_9 - f r_6) z_u + (Q_2 T_z - f T_x) &= 0 \end{aligned}$$

여기에서, 첨자 1, 2은 각각 좌/우 영상의 매칭점을 의미한다. 그런데 위식은 알고있는 방정식과 구하고자하는 미지수의 개수가 일치하지 않는 Overdetermined System이 된다^[7]. 그러므로 이를 Singular-Value DecomPosition으로 풀기 위하여 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_u \\ y_u \\ z_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} \text{ -----(15)}$$

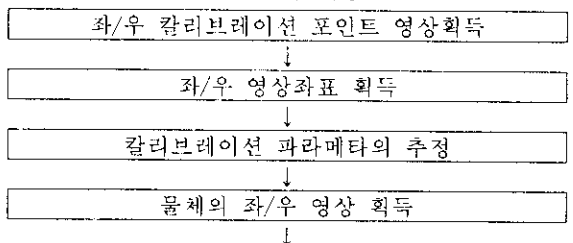
(15)식을 계산하여 물체의 3차원정보를 구하고 물체의 깊이정보는 카메라에서 z=0인 물체의 평면까지 거리와 카메라에서부터 물체에 이르는 거리의 차로써 깊이정보를 구한다.

4. 실험 및 고찰

칼리브레이션 파라미터를 구하기 위해 Tsai's Algorithm을 이용했으며 전체적인 시스템의 사양, 실험과정 그리고 칼리브레이션 포인트와 측정하고자하는 물체의 영상이 각각 table 1, Fig.2, Fig.3, Fig.4에 있다. 그리고 좌/우 카메라 칼리브레이션 파라미터의 추출값과 물체의 14개 포인트에 대한 3차원 정보 추출값이 각각 table 2와 table 3에 있다.

항목	사양
CCD 카메라(2대)와 조명장치	SAC-410NDX Color(SAMSUNG) 활상면적 : 7.95 mm × 6.45 mm 유효화소 : 768 × 494
Frame Grabber	Matrox Meter Board : 768×576화소
System controller	586 Pentium, RAM 32MB Monitor(2대):SAMSUNG SPM-14HS
Calibration points plane	50×38cm 평면
Calibration points	24×18개의 Points Points 간의 거리 : 2 cm Points의 지름 : 0.9 cm
Object	Points 간의 거리 : 1.5 cm Points의 지름 : 0.9 cm 물체의 높이(z) : 4.5 cm

table. 1 시스템 사양



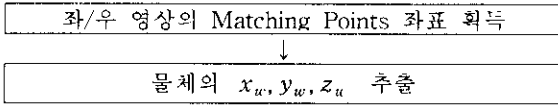


Fig. 2 실험과정

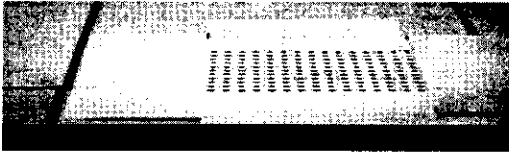


Fig. 3 칼리브레이션 포인트



Fig. 4 대상 물체

	Left Camera	Right Camera
Rotation matrix R	0.99995 -0.00761 0.00592 -0.00948 -0.88811 0.43952 0.00176 -0.45955 -0.88814	0.99982 -0.00573 0.01754 -0.01304 -0.89182 0.45218 0.13054 -0.45234 -0.89174
Translation matrix T	-140.86188 116.29130 1047.70444	-277.99380 108.89447 1067.71493
Effective focal length f	12.23679	11.59596
Distortion factor k	0.001368	0.001571
Scale parameter	1.000000	1.000000

table 2. 파라메타 추출값

	x_u	y_u	z_u
1	311.72438	209.36259	45.60321
2	297.59072	204.34144	45.50244
3	283.24486	199.15740	46.32166
4	269.00661	194.90431	45.12014
5	254.63379	188.98410	46.90234
6	240.56875	185.49331	44.75626
7	226.44696	179.79027	46.09697
8	212.29008	175.67985	45.03284
9	198.25629	169.85846	46.71074
10	184.12886	166.52481	43.92820
11	170.02705	162.72719	42.88919
12	155.72764	157.17898	43.77652
13	141.53296	152.64829	43.73488
14	127.21474	148.23079	43.19051

table 3. 물체의 깊이정보(z_u) 추출값

위 실험결과 얻어진 값들의 단위는 모두 mm이며, 165개의 칼리브레이션 포인트를 사용했다. 그런데 실제로 측정 한 물체의 높이가 45mm였으므로 실험결과도 깊이정보인 z_u 가 45mm로 모두 동일해야 하나 점들의 위치에 따라

약간씩 차이가 나고 있다.

이는 칼리브레이션 포인트가 $z=0$ 인 평면위에 존재하지 않았고 카메라 렌즈의 왜곡이 입력되는 영상에 미치는 영향을 정확하게 추정하지 못하여 발생하는 오차로 생각된다.

5. 결론

본 논문에서는 두 대의 CCD 카메라를 이용하여 물체의 깊이정보를 추출하기 위해 비전시스템을 개발했다. 동일 평면에 존재하는 좌/우측 두 대의 카메라로부터 칼리브레이션 포인트의 영상을 획득하여 카메라가 가지고 있는 모든 제한사항인 카메라 렌즈의 왜곡, 초점거리, 영상의 중심 등의 파라메타를 찾는 과정을 자세히 상술했고 Tsai's algorithm을 이용하여 칼리브레이션 하였다. 이런 정보를 바탕으로 물체를 찍은 좌/우 영상의 매칭점으로부터 Overdetermined System을 유도하였으며 이 시스템을 풀어 대상 물체의 깊이정보를 측정하였다. 실제 두 대의 CCD 카메라 시스템은 정확히 $z=0$ 인 동일 평면상에 존재하는 카메라가 아니고 이상적인 Pin-hole 카메라도 아니므로 이것을 보정하기 위한 본 논문에서와 같은 파라메타 추정은 매우 효과적이었다. 그러나 측정결과 약간의 오차가 발생하였다. 여기에는 여러 가지 원인이 있다고 생각되며 향후 상세히 연구해 보고자 한다.

그리고 물체의 3차원 정보를 측정하는 방법에는 이밖에도 여러 가지가 있으나 사용자에게 편리한 비전 시스템개발과 zoom렌즈를 이용한 물체의 3차원 정보 추출을 하고자 한다.

6. 참고문헌

- [1] 조영민, "자기조직 신경회로망을 이용한 Axial 스테레오 비전시스템의 대응문제 해결에 관한 연구", 한국과학기술원, 1993. 2
- [2] 윤정남, "원격작업을 위한 물체위치 추정 및 가상공간 교정방법", 한국과학기술원 1996. 12.
- [3] 김영문, "여러장의 거리영상 정합에 의한 3차원 형상 복원", 한국과학기술원 1996. 1
- [4]. ROGER 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
- [5]. Reg G. Willson, "Modelling and Calibration of Automated Zoom Lenses", The Robotics Institute Carnegie Mellon University Pittsburgh, Pennsylvania 15213, January 1994. CMU-RI-TR-94-03
- [6]. David W. Jacobs, "Recognizing 3-D Objects Using 2-D Images", Massachusetts Institute of Technology, 1992.
- [7]. William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, Brian P. Flannery, *Numerical Recipes in C. The Art of Scientific Computing Second Edition*. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS