평면 패턴 영상을 이용한 단순 카메라 캘리브레이션

김동근*, 김진용**
*서남대학교 컴퓨터 영상 정보통신학부
**혜천대학 컴퓨터통신 계열 컴퓨터게임전공
e-mail:dgkim@tiger.seonam.ac.kr
jykim@hcc.ac.kr

A Simple Camera Calibration using a Planar Patern Image

*Dept. of Computer Science and Information Communications, Seonam University
**Dept. of Computer Game, Hye-Chon College

요약

본 논문에서는 캘리브레이션 패턴을 카메라와 평행한 평면에 위치시켜 카메라의 회전 요소를 없게 하여 회전 행렬이 단위 행렬이 되게 한 상태에서 카메라를 캘리브레이션 하였다. 카메라의 투영중심에 대한 투영면과 프레임 버퍼에서의 영상 중심 위치(C_x, C_y), 촛점거리(f) 등의 내부 파라메타와 세계 좌표의 원점에 대한 카메라의 상대 위치(T_x, T_y, T_z)를 서로 다른 거리에서 획득한 두 장의 패턴 영상을 이용하여 효과적으로 계산하였다.

1. 서론

카메라에 의해 투영된 영상을 이용하여 3차원의 실세계 정보를 알기 위해서는 카메라 캘리브레이션 과정이 필요하다. 카메라 캘리브레이션은 카메라 모델에 의한 투영에서 사용하는 카메라의 촛점거리, 왜곡계수, 위치, 방향 등의 파라메타를 구하는 과정을 말한다. 카메라 모델은 대부분 바늘구멍(pinhole) 모델에 의한 원근 투영(perspective projection)을 사용한다[1,2,3]. Tsai[2,3]는 방사형 왜곡을 고려한 제약조건을 이용하여 이단계 캘리브레이션 방법을 제안하였다. 단계 1에서는 카메라의 회전(R)과, 카메라의 위치 x축과 y축의로의 이동(T_x, T_y)를 구하고, 단계 2에서는 카메라의 촛점거리 f와 T_z, 왜곡계수를 경사법(steepest descent) 또는 비선형 최적화 방법 Levenberg-Marquardt 방법을 사용하여 구하였다. 카메라의 투영면과 캘리브레이션 패턴이 있는 면이 평행하면 선형 종속 문제로 인하여 촛점거리 f와 T_z를 구할 수 없다.

본 논문에서는 카메라 캘리브레이션을 위해 캘리브레이션 패턴을 카메라와 평행하게 위치시켜 카메라의 회전 요소를 없게 하여 회전 행렬이 단위 행렬이 되게 한 상태에서 카메라를 캘리브레이션 하였다. 또한 카레라의 랜즈에 의한 왜곡을 MIL 라이브러리를 이용하여 보정하여 사용하여 캘리브레이션을 단순화하였다. 캘리브레이션 패턴은 반경이 5mm인 원 패턴을 10mm 간격으로 행과 열로 배열한 15×21개의 원 패턴을 사용하였다. 패턴을 위치시킨 평면을 세계 좌표계에서 $z_w=0$으로 하였다. 서로 다른 거리에서 획득한 두장의 영상의 패턴의 대응점을 이용하여 영상의 중심(C_x, C_y)과 촛점거리 f을 계산하였으며, 영상 중심을 이용하여 x축과 y축의로의 이동(T_x, T_y)을 계산하고, 이들을 이용하여 패턴이 위치한 면으로부터의 떨어진 거리인 T_z를 계산하였다.

2장에서는 카메라 모델에 대해 설명하고, 3장에서는 영상의 중심을 계산하는 방법을 설명한다. 4장은 카메라의 촛점 거리를 구하는 방법을 설명하고, 5장에서는 카메라의 이동 위치를 계산하는 방법을 설명하고, 6장에서는 실험 및 결과를 다루고, 7장에서 결론을 맺는다.

2. 카메라 모델

랜즈 왜곡이 없는 이상적인 바늘구멍 카메라 모델의 원근투영(perspective projection)은 식(1)과 같이 모델링 될 수 있다.

$$X_u = f\frac{r_1 x_w + r_2 y_w + r_3 z_w + T_x}{r_7 x_w + r_8 y_w + r_9 z_w + T_z}$$
$$Y_u = f\frac{r_4 x_w + r_5 y_w + r_6 z_w + T_y}{r_7 x_w + r_8 y_w + r_9 z_w + T_z} \quad (1)$$

식 (1)은 3차원 공간상에 있는 점(x_w, y_w, z_w)이 2차원 센서의 투영면(X_u, Y_u)에 투영되는 관계를 정한다. 이때 파라메타는 촛점 거리(f), 카메라의 이동 위치(T_x, T_y, T_z), 카메라의 회전($r_1, \ldots, r_9$) 등이다. 실제 카메라에서는 랜즈의 왜곡이 일어난다. 본 논문에서는 MIL(matrox imaging library)를 이용하여 왜곡 보정한 영상을 사용하여 왜곡 계수를 식에 포함하지 않았다.

센서의 투영면의 점 (X_u, Y_u)와 영상획득 장치(frame grabber)의 프레임 버퍼의 위치 (X_f, Y_f)는 다음 관계를 갖는다.

$$X_f = \frac{X_u}{d_x'} + C_x$$
$$Y_f = \frac{Y_u}{d_y} + C_y \quad (2)$$
$$\text{여기서, } d_x' = d_x \frac{N_{cx}}{N_{fx}}$$

(C_x, C_y)는 카메라의 z축과 투영면의 교점에 대한 프레임 버퍼 위치인 영상 중심점(image center)이다. d_x는 센서(렌즈)의 수평 방향 단위 센서 요소 간격이고, d_y는 렌즈의 수평 방향 단위 센서 요소 간격이다. N_{cx}는 센서(렌즈)의 수평 방향 센서 요소의 수(해상도)이고, N_{fx}는 프레임 버퍼에서의 수평 방향 해상도이다. CCD 카메라를 사용할 경우 라인과 라인 간격사이는 d_y는 고정된 상수이다.

본 논문은 카메라 캘리브레이션을 위한 패턴으로 내부가 채워진 원을 사용하여 일정 간격(10mm)으로 배열한 패턴을 사용하였다. 패턴을 위치시킨 평면을 세계좌표계에서 $z_w=0$ 으로 하였다. 또한 패턴이 위치한 평면과 카메라를 평행하게 위치시켜 카메라의 회전 요소를 없게 하였다.

세계좌표에서 $z_w=0$에 패턴을 고정시키고, 카메라가 패턴이 위치한 평면과 평행하면 카메라 캘리브레이션을 위한 식은 다음과 같이 단순해진다.

$$X_u = f\frac{x_w + T_x}{T_z}$$
$$Y_u = f\frac{y_w + T_y}{T_z} \quad (3)$$

식 (3)에서 영상 중심 (C_x, C_y), 촛점 거리(f), 카메라의 이동 위치(T_x, T_y, T_z)을 구하는 방법에 대해 설명한다.

3. 영상 중심 계산 (C_x, C_y)

카메라 좌표계의 z축과 투영면(view plane)의 교점인 영상 중심(image center) 위치가 카메라 시스템과 영상 획득장치에서 불일치 문제 때문에 프레임 버퍼의 중심에서 벗어 나 있을 수 있다.

카메라를 z축 방향으로 패턴으로부터 점점 멀리 움직이면 고정된 점의 대응되는 투영 점들이 영상 중심으로 움직이는 원리를 이용하여 영상 중심을 계산할 수 있다. z축 방향으로 이동하며 획득한 두 영상의 캘리브레이션 패턴의 대응점의 영상 좌표를 $P_1(X_{fi,1}, Y_{fi,1})$, $P_2(X_{fi,2}, Y_{fi,2})$, $i=1,\ldots,N$이라 하자. 이때 영상 중심은 각 대응되는 쌍에 의해 정의되는 직선의 교점을 구하여 계산할 수 있다. 이때 $N>2$이면 Pseudo inverse 방법에 의한 최소 자승법으로 오차를 최소화하는 교점을 구한다. 두 영상에서의 대응점에 의해 정의되는 직선의 방정식 $y=m_i x+b_i$를 구할 수 있다. N개의 대응점에 대한 직선의 방정식을 행렬 형태로 표현하면 다음과 같다.

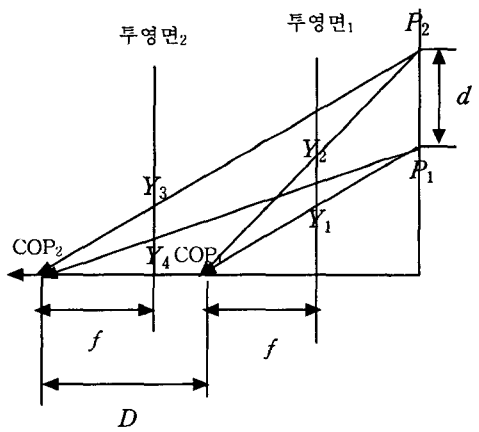
$$AX = b \quad (4)$$
$$\text{여기서, } A=\begin{bmatrix} m_1 & -1 \\ m_2 & -1 \\ \cdots & \\ m_N & -1 \end{bmatrix},\ X=[x\ \ y],\ b=\begin{bmatrix} -b_1 \\ -b_2 \\ \cdots \\ -b_N \end{bmatrix}$$

X는 N개의 직선이 교차하는 점으로 구하고자 하는 영상 중심점으로, 식 (2)의 (C_x, C_y)가 된다. $N>2$일 때 식 (4)의 영상 중심 X는 다음과 같이 Pseudo inverse에 의해 구할 수 있다.

$$X=(A^tA)^{-1}A^tb \qquad (5)$$

4. 카메라의 촛점 거리(f)

세계좌표에서 인접한 패턴 간격이 d인 두 점 P_1, P_2를 z축을 따라 거리 D만큼 이동하며 투영시킨 투영면의 x 좌표 또는 y 좌표가 있으면 f를 계산할 수 있다. P_1, P_2는 영상의 왜곡이 적게 발생하는 영상의 중심 근처의 인접한 두 점을 선택한다. CCD에서 y축 방향으로의 간격이 고정되어 있으므로 여기서는 y 좌표를 사용하여 계산하였다. Y_1, Y_2는 카메라의 위치 COP_1 지점에서 P_1, P_2를 투영면에 투영시킨 y 좌표이고, Y_3, Y_4는 카메라의 위치를 D만큼 이동하여 COP_2 지점에서 P_1, P_2를 투영면에 투영시킨 y 좌표이다.



(그림 1) 두 영상을 이용한 촛점거리(f) 계산

$$f=\frac{k_1k_2D}{k_1-k_2} \qquad (6)$$

여기서, $k_1=\frac{Y_2-Y_1}{d}$, $k_2=\frac{Y_4-Y_3}{d}$

5. 카메라의 이동 위치(T_x, T_y, T_z)

(1) T_x, T_y 계산

(T_x, T_y, T_z)는 세계좌표의 원점을 기준으로 카메라의 이동벡터이다. 카메라를 패턴이 위치한 세계좌표계의 $z_w=0$인 평면과 평행하게 위치 시켰기 때문에 카메라의 회전 행렬 R이 단위 행렬이다. 그러므로 (T_x, T_y)는 영상 중심 (C_x, C_y)와 같은 z축 상에 있다. 또한 패턴들이 일정 간격으로 배치되어 있고, 이 패턴들의 영상 좌표 위치를 알고 있다. 영상의 좌측 상단의 원 패턴의 위치를 세계좌표의 원점으로 하여, 영상의 중심 (C_x, C_y)가 어떤 패턴들 사이에 위치한가를 찾으면 (T_x, T_y)를 구할 수 있다. 영상의 중심 (C_x, C_y)가 속한 4개의 원 패턴들을 구한다. 이들 4개의 원 패턴들의 세계 좌표는 모두 알고 있으므로, 이들을 이용하여 영상 좌표 (C_x, C_y)에서의 세계좌표 (T_x, T_y)를 이중선형 보간하여 구한다.

(2) T_z의 초기값 계산

영상 중심(C_x, C_y)를 이용하여 계산한 (T_x, T_y)와 식 (6)에 의해 계산한 촛점거리(f)를 식(3)에 적용하여 T_z의 초기 값을 계산하였다.

(3)오차를 최소로 하는 T_z 계산

N개의 패턴들 각각에서 실제 영상 좌표와 식 (2), 식 (3)에 의해 계산한 영상 좌표 사이의 제곱오차를 계산하여 N개의 패턴들의 제곱오차의 합이 최소가 되는 T_z를 초기값 근처에서 선형 탐색하여 구하였다.

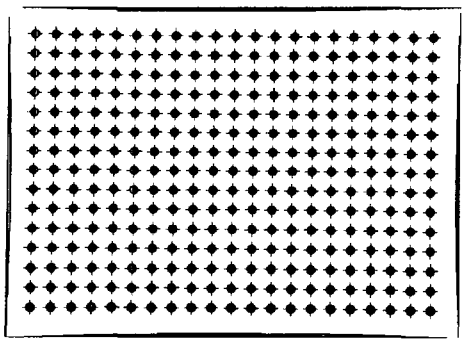
6. 실험 및 결과

카메라 캘리브레이션을 위한 패턴으로 반경이 5mm인 원 패턴을 10mm 간격으로 행과 열로 배열한 15×21개의 원 패턴을 사용하였다. 패턴을 위치시킨 평면을 세계 좌표계에서 $z_w=0$으로 하였다. 또한 패턴이 위치한 평면과 카메라를 평행하게 위치시켜 카메라의 회전 요소를 없게 하였다.

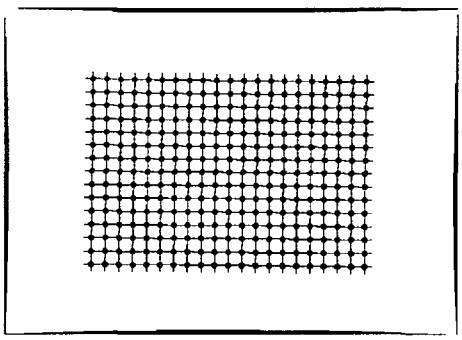
- 시스템 사양 : PENTIUM III 800MHz , 384M RAM
- 영상 하드웨어: Matrox Meteor-II
  (프레임 버퍼 해상도, 640×480)
- 사용 라이브러리: MIL(matrox imaging library) 6.1
- 카메라 렌즈 : Teli CS-8420 CCD Monochrome(촛점거리 12mm. 센서의 투영면 6.5mm×4.85mm, 센서의 해상도 768×494)

(1) 영상 획득 및 특징 패턴 검출

입력 영상을 이진화하고, 연결요소를 구하여 연결요소들의 무게 중심점(center of mass)을 찾는 것을 MIL(matrox imaging library) 라이브러리를 사용하여 구현하였다. 캘리브레이션 패턴의 좌표를 위에서 아래, 좌에서 우로 정렬시켰다. 카메라를 캘리브레이션하기 위해 일정거리를 이동하며 획득한 2개의 영상에 대한 특징점을 추출하기 위하여 카메라를 고정시키고 패턴이 위치한 평면을 카메라의 투영면과 평행하게 z축 방향으로 200mm 움직이며 획득한 두 영상을 이용하였다. (그림 2)와 (그림 3)은 MIL 라이브러리에 적용하여 영상 왜곡 보정을 한 영상에서의 특징점을 추출한 결과이다.



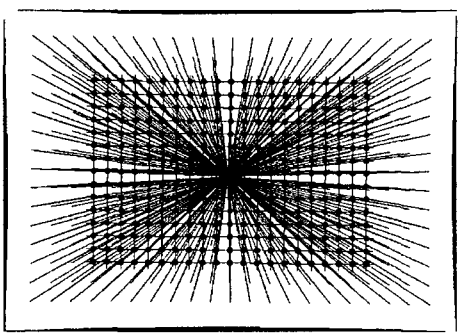
(그림 2) 왜곡 보정한 이진 영상에서 특징점 검출 1



(그림 3) 왜곡 보정한 이진 영상에서 특징점 검출2

(2) 영상 중심 계산 및 카메라 위치, 촛점 거리 계산

(그림 4)는 왜곡 보정을 한 영상에서 패턴의 중심을 추출한 영상인 (그림 2)와 (그림 3)을 이용하여 영상 중심(C_x, C_y)을 계산하고, 영상 중심에서 (그림 2)의 각 원 패턴 위치로 직선을 표시한 결과이다. (표 1)은 계산한 영상 중심(C_x, C_y), 카메라 촛점거리(f), 카메라의 위치(T_x, T_y, T_z)를 계산한 결과이다.



(그림 4) 왜곡 보정한 영상을 이용한 영상 중심점 계산

(표 1) 촛점거리, 영상 중심점, 카메라의 위치

	f (mm)	C_x, C_y 영상(pixel)	C_x, C_y 투영면(mm)	T_x, T_y, T_z (mm)
	12.06	(316.28, 247.60)	(3.21, 2.50)	(97.74, 73.46, 423.21)

7. 결론

본 논문에서는 캘리브레이션 패턴을 카메라와 평행한 평면에 위치시켜 카메라의 회전 요소를 없게 하여 회전 행렬이 단위 행렬이 되게 한 상태에서 카메라를 캘리브레이션 하였다. 또한 영상의 왜곡을 캘리브레이션 전에 미리 보정하여 사용하였다. 카메라의 투영중심에 대한 투영면과 프레임 버퍼에서의 영상 중심 위치(C_x, C_y), 촛점거리(f) 등의 내부 파라메타와 세계좌표의 원점에 대한 카메라의 상대 위치(T_x, T_y, T_z)를 두장의 영상을 이용하여 효과적으로 계산할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] Oliver Faugeras, Three-Dimensional Computer Vision, MIT Press, 1993.

[2] 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 and Aotomation, vol.RA-3, No.4, pp.323-pp.344, Auguest 1987.

[3] REIMAR K. and ROGER.Y.TSAI, "Techiniques for Calibration of the Scale Factor and Image Center for High Accuracy 3-D Machine Vision Metrology," IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Vision, vol.10, no.5, pp.713-720, Sept. 1988.

[4] Reg Willson, Tsai Camera Calibration Software,http://www.cs.cmu.edu/afs/cs.cmu.edu /user/rgw/www/TsaiCode.html.

[5] Matrox Imaging Library version 6.1 User Guide