

두 보정면과 사교좌표 매핑을 이용한 카메라 보정법

안정호*

Camera Calibration with Two Calibration Planes and Oblique Coordinate Mapping

Jeong Ho Ahn*

ABSTRACT

A method to find the line of sight ray in space which corresponds to a point in an image plane is presented. The line of sight ray is defined by two points which are the intersections between the two calibration planes and the sight ray. The intersection point is found by the oblique coordinate mapping between the image plane and the calibration plane in the space. The proposed oblique coordinate mapping method has advantages over the transformation matrix method in the required memory space and computation time.

Key Words : camera calibration(카메라보정), oblique coordinate mapping(사교좌표 매핑)

1. 서론

특정한 관심점의 3차원 공간좌표 측정을 위한 방법에는 여러 가지가 있다. 그 중의 하나로 많이 사용하고 있는 방법은 임의의 두 지점에서 얻어진 각각의 영상에 나타난 동일 관심점의 영상평면상의 좌표로부터 관심점의 공간좌표를 측정하는 입체화상법이다. 카메라에서 얻어진 영상은 3차원 공간을 렌즈를 통하여 2차원 영상평면으로 투영시킨 것이다. 투영된 영상으로부터 3차원 공간좌표를 결정하기 위하여 카메라 보정은 필수적이다. 카메라 보정을 통하여 결정하여야 하는 변수들은 내부변수와 외부변수로 나눌 수 있다. 내부변수들은 카메라 렌즈의 광학적 특성 및 관심점의 영상좌표계에서의 좌표를 결정하는 것이고, 외부변수들은 월드좌표계에 대한 카메라 좌표계의 위치와 방향 또는 서로 다른 카메라 사이의 상대위치를 결정하는 변수들이다⁽¹⁾⁽²⁾.

카메라 보정방법에서는 공간좌표계의 관심점과 영상평면으로 투영된 관심점 사이의 관계를 변환행렬로 표현하고 있다. 공간좌표계와 영상좌표계의 관계를 살펴보면, 공간좌표계의 임의의 점에 해당되는 영상좌표계에서의 좌표를 구하기 위한 투시투상과 영상좌표계의 임의의 점의 공간좌표계에서의 영상선을 구하기 위한 역투상의 두 경우로 나눌 수 있다⁽³⁾. 두 개의 서로 다른 영상평면에 투영된 점의 공간좌표를 계산하기 위해서는 각각의 영상평면에 투영된 점의 영상선에 대한 공간좌표계에서의 방정식을 찾아내야 하는 역투상이 필수적이다.

카메라 보정방법에는 카메라의 위치 및 자세, 초점거리, 반경방향 렌즈 왜곡과 광축 등과 같은 카메라의 특성을 수식에서 고려하는 방법과 카메라의 특성을 고려하지 않는 방법으로 크게 두 부류로 나눌 수 있다. 본 논문에서 제시하는 방법은 후자이다⁽⁴⁾.

* 숭실대학교 기계공학과

카메라 보정방법에서는 공간좌표계의 관심점과 영상평면으로 투영된 관심점 사이의 관계를 변환행렬로 표현하고 있다. 공간좌표계와 영상좌표계의 관계를 살펴보면, 공간좌표계의 임의의 점에 해당되는 영상좌표계에서의 좌표를 구하기 위한 투시투상과 영상좌표계의 임의의 점의 공간좌표계에서의 영상선을 구하기 위한 역투상의 두 경우로 나눌 수 있다⁽³⁾. 두 개의 서로 다른 영상평면에 투영된 점의 공간좌표를 계산하기 위해서는 각각의 영상평면에 투영된 점의 영상선에 대한 공간좌표계에서의 방정식을 찾아내야 하는 역투상이 필수적이다.

카메라 보정방법에는 카메라의 위치 및 자세, 초점거리, 반경방향 렌즈 왜곡과 광축 등과 같은 카메라의 특성을 수식에서 고려하는 방법과 카메라의 특성을 고려하지 않는 방법으로 크게 두 부류로 나눌 수 있다. 본 논문에서 제시하는 방법은 후자이다⁽⁴⁾.

두 면 보정법에서 영상평면의 한 점을 통과하는 영상선은 두 보정면에서 영상점에 대응하는 점들을 연결하는 직선이다. 영상평면의 한 점에 대응하는 보정면에서의 점은 3x3 변환행렬을 이용하여 계산한다. 두 면 보정법에서는 3x3 변환행렬을 구하기 위하여 Linear interpolation, Quadratic interpolation과 Linear spline 방법을 사용하였다. Linear spline 방법이 가장 좋은 결과를 보여 주나 3개의 보정점 마다 하나의 3x3 변환행렬을 계산하여야 하며, 그 과정에서 역행렬을 계산하여야 하는 등 많은 계산이 필요하다⁽⁴⁾. Linear spline 방법에서 정밀도를 향상시키기 위해서는 보정점의 개수를 늘려야 한다. 이는 변환행렬의 증가를 가져오므로 많은 메모리 공간과 계산 시간을 사용한다. 두 면 보정법은 역투상만 가능하나 두 개의 영상으로부터 공간좌표를 계산하는데 적용방법이 간단하고 정확하여 많이 사용되고 있다.

두 면 보정법의 정밀도 향상을 위한 방법으로는 유한요소보정법이 있다. 이는 측정범위내의 전체 공간을 여러 개의 보정면을 사용하여 작은 영역으로 분할한 후, 각 보정면과 보정면 사이의 유한한 영역 내에서만 영상선이 직선을 유지하는 것으로 가정하였다. 하나의 보정면을 다시 직사각형의 유한 요소들로 분할한 후, 이 유한요소별로 각각 영상면과의 변환 관계를 구하였다⁽⁵⁾.

기존의 보정면을 이용한 보정법에서 정밀도 향상을 위해서는 많은 보정점과 변환행렬이 필요하

다. 이는 변환행렬을 구하기 위한 계산시간과 변환행렬 저장을 위해 많은 메모리를 필요로 한다. 따라서, 본 논문에서는 변환행렬을 사용하지 않고 사교좌표 매핑을 이용하여 카메라를 보정하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 영상선 계산

영상선은 동일한 굴절률을 지닌 매질로 구성된 공간에서 직선이며 영상면에는 하나의 점으로 투영된다. 따라서, 영상면의 한 점은 공간에서 직선에 해당되는 영상선으로 직선벡터식으로 표현할 수 있다.

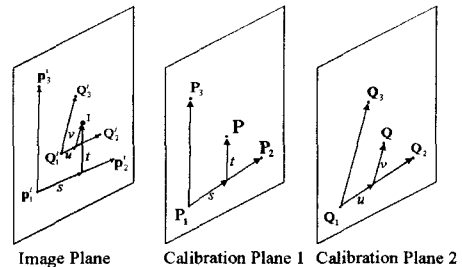


Fig. 1 Oblique coordinate mapping between the image plane and the calibration planes

Fig.1에서 영상면의 영상점(P_1^i, P_2^i, P_3^i)들의 영상선은 각각 공간좌표계의 보정점 (P_1, P_2, P_3)를 지나며, 보정점(P_1, P_2, P_3)는 제 1 보정면을 구성한다. 영상점 I 에 대한 영상선과 제 1 보정면 사이의 교차점 계산을 위한 사교좌표 매핑은 다음 순서와 같다.

1. 영상면의 영상점(P_1^i, P_2^i, P_3^i)들로 구성된 사교좌표계에서 영상점 I 의 좌표값에 해당하는 매개변수 (s, t)들의 값을 계산한다.
2. 계산된 매개변수들의 값을 보정면에 세 개의 보정점 (P_1, P_2, P_3)들로 구성된 사교좌표계에 입력하여 계산된 점 P 가 교차점이다.

영상점 I 에 대한 영상선과 제 2 보정면 사이의 교차점 Q 도 위와 같은 방법으로 계산한다.

제 1 및 2 보정면상의 두 교차점 P 와 Q 를 지나 는 직선이 영상점 I 에 대한 영상선이다. 영상선 계산을 위한 자세한 수식은 다음과 같다.

공간좌표계의 제 1 보정면에 존재하는 세 개의 보정점 (P_1, P_2, P_3)을 영상평면으로 투영하면 Fig. 1과 같이 세 점 (P_1^i, P_2^i, P_3^i)에 각각 대응 하게 된다. 영상평면에서 ($P_2^i - P_1^i, P_3^i - P_1^i$)을 축으로 하는 사교좌표계에서 영상점 I 의 좌표값 은 매개변수로 (s, t)이며 식 (1)과 같다. 식 (1)의 매개변수 (s, t)는 식 (2)와 같이 계산된다. 영상 점 I 에 대한 제 1 보정면상의 대응점 P 는 식 (3)과 같이 표현되며, 식 (2)의 (s, t)를 식 (3)에 대입함으로써 구할 수 있다.

$$I = P_1^i + s(P_2^i - P_1^i) + t(P_3^i - P_1^i) \quad (1)$$

$$s = \frac{(I - P_1^i) \times (P_3^i - P_1^i)}{(P_2^i - P_1^i) \times (P_3^i - P_1^i)} \quad (2)$$

$$t = \frac{(I - P_1^i) \times (P_2^i - P_1^i)}{(P_3^i - P_1^i) \times (P_2^i - P_1^i)}$$

$$P = P_1 + s(P_2 - P_1) + t(P_3 - P_1) \quad (3)$$

영상평면에 투영된 점 I 를 포함하며 보정점 (P_1, P_2, P_3)이 구성하는 평면과 일치하지 않는 제 2 보정면을 구성하는 세 개의 보정점 (Q_1, Q_2, Q_3)을 설정한다. (Q_1, Q_2, Q_3)을 영상 평면으로 투영하면 Fig. 1과 같이 세 점 (Q_1^i, Q_2^i, Q_3^i)에 각각 대응한다. 영상평면에서 ($Q_2^i - Q_1^i, Q_3^i - Q_1^i$)을 축으로 하는 사교좌표계에서 영상점 I 의 좌표는 식(4) 와 같으며, 매개변수 (u, v)는 식 (5)와 같다. 영상점 I 에 대한 제 2 보정면상의 대응점 Q 는 식 (6)과 같다.

$$I = Q_1^i + u(Q_2^i - Q_1^i) + v(Q_3^i - Q_1^i) \quad (4)$$

$$u = \frac{(I - Q_1^i) \times (Q_3^i - Q_1^i)}{(Q_2^i - Q_1^i) \times (Q_3^i - Q_1^i)} \quad (5)$$

$$v = \frac{(I - Q_1^i) \times (Q_2^i - Q_1^i)}{(Q_3^i - Q_1^i) \times (Q_2^i - Q_1^i)}$$

$$Q = Q_1 + u(Q_2 - Q_1) + v(Q_3 - Q_1) \quad (6)$$

영상평면에 투영된 점 I 의 영상선은 제 1 및 2 보정면의 점 P 와 Q 를 각각 지난다. 따라서, 영상점 I 를 지나 는 영상선 L 은 매개변수 l 을 사용하여 다음과 같은 벡터식으로 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$L = P + l(Q - P) \quad (7)$$

3. 실험

실험 장치는 Sony XC-75 카메라와 DT3155 영상 그래픽으로 구성된 영상획득장치와 보정면을 이송시 키기 위한 Servo CNC 탁상용 밀링머신으로 구성하 였다. 보정을 위하여 사용된 렌즈는 초점거리가 각각 16mm와 25mm이며 DT3155로 획득된 영상은 640x480의 해상도를 지니고 있다. 보정면은 격자 간의 간격이 5mm인 격자무늬를 사용하였으며 격자 점을 보정점으로 한다. 각 격자점은 곡선맞춤법⁽⁵⁾ 으로 격자선의 중심을 찾고 최소좌승법으로 격자선 을 찾은 1후에 격자선의 교차점을 얻음으로써 화소 이하의 해상도를 얻는다.

시스템의 전반적인 오차 측정을 위하여 보정면 의 영상을 카메라로부터 각각 220mm, 230mm 와 240mm 떨어진 지점에서 획득한다. 230mm 지점에서 얻어진 영상은 보정오차에 대한 평가평면으로 사용 한다. 보정오차는 230mm 지점에 위치한 평가평면 의 보정점의 영상좌표를 지나는 영상선과 보정점 사이의 수직거리로 한다. 보정오차는 영상선 계산을 위한 보정방법과 보정점의 영상좌표계에서의 좌 표값을 계산하기 위한 영상처리오차, 보정면의 보 정점 위치오차와 구동장치오차 등을 포함한 것이 다.

실험은 렌즈 자체의 결함만 고려한 경우와 렌즈 앞에 불균일한 두께를 지닌 투명 플라스틱을 위치 시킴으로써 인위적으로 영상에 왜곡을 준 경우에 대하여 행한다. 16mm 렌즈와 25mm 렌즈에서 각각 266개 및 99개의 보정점에 대하여 평가한다. 한 화소가 차지하는 폭은 16mm 렌즈에서는 0.152mm이 고 25mm 렌즈에서는 0.093mm정도이다.

Table 1. Average calibration error

	Lens focal length [mm]	Pixel resolution [mm/pixel]	Linear interpolation error		Oblique coordinate Mapping error	
			[mm]	[pixel]	[mm]	[pixel]
Without distorted plastic panel	16	0.152	0.129	0.849	0.012	0.079
	25	0.093	0.043	0.462	0.009	0.097
With distorted plastic panel	16	0.152	0.147	0.967	0.019	0.125
	25	0.093	0.106	1.140	0.010	0.108

보정방법은 Linear interpolation⁽⁴⁾과 사교좌표 매핑으로 하였다. 보정오차는 mm 와 화소 단위로 하였으며 그 결과는 Table 1과 같다.

4. 실험결과 고찰

사교좌표 매핑기법은 전반적으로 Linear interpolation보다 좋은 결과를 보여주고 있다. 이와 같은 경향은 Martins의 논문에서 보여준 결과와 같다⁽⁴⁾. 렌즈 앞에 인위적인 왜곡을 발생시키기 위한 투명 플라스틱이 없는 경우에 16mm 와 25mm 렌즈의 화소단위 오차를 비교하여보면 Linear interpolation에서는 0.849 화소에서 0.462 화소로 오차가 감소하였다. 이는 16mm 렌즈가 25mm렌즈에 비하여 왜곡이 심한 것으로 판단된다. 그러나 사교좌표 매핑의 경우는 0.079화소에서 0.097화소로 오차가 증가하였다. 이는 보정점의 개수가 16mm 렌즈의 경우에는 266개이고 25mm 렌즈에서는 99개로 16mm 렌즈의 경우는 보정점 개수의 증가로 렌즈의 왜곡에 대한 보정성능이 향상된 것에 기인한 것으로 판단된다. Fig. 2 는 렌즈 앞에 왜곡을 발생시키기 위한 플라스틱이 없는 경우 각 보정점의 보정오차를 보정점으로부터 굵은 선으로 과장하여 나타내었다.

렌즈 앞에 인위적인 왜곡을 발생시키기 위해 투명 플라스틱이 있는 경우에 16mm 와 25mm 렌즈의

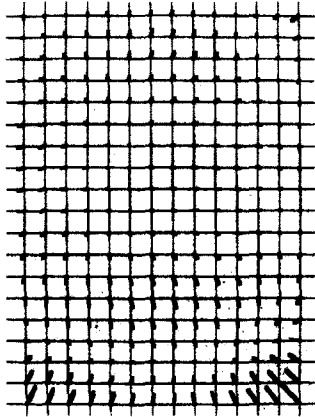
화소단위 오차를 비교하면 0.967화소에서 1.140으로 증가하였다. 그러나 사교좌표 매핑은 0.125에서 0.108로 감소하였다. 이는 투명 플라스틱에 의해 왜곡된 영상이 잡히는 영역이 16mm 와 25mm렌즈에서 차이가 있기 때문으로 판단된다. Fig. 3은 렌즈 앞에 왜곡을 발생시키기 위한 플라스틱이 있는 경우 각 보정점의 보정오차를 굵은 선으로 과장하여 표시한 것이다.

5. 결론

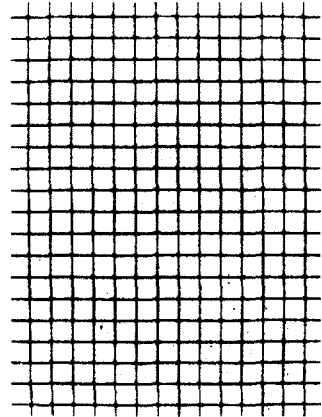
공간좌표계에 각각 세 개의 보정점으로 정의되는 두 개의 보정면과 영상면에 투영된 보정점들 사이에 사교좌표 매핑을 이용한 카메라 보정법을 제시하였다. 실험결과 렌즈의 심한 왜곡에도 약 0.1 화소의 평균 보정오차 범위에서 카메라 보정이 이루어졌다. 제시된 방법은 변환행렬을 사용하지 않으므로 역행렬 계산 시간과 변환행렬을 저장하기 위한 메모리를 절약할 수 있다.

후기

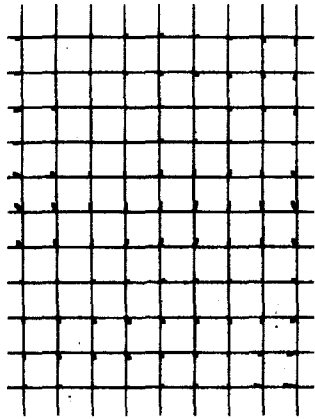
본 연구는 과학재단 과제번호 93-0200-02-03-3의 지원으로 이루어진 것입니다.



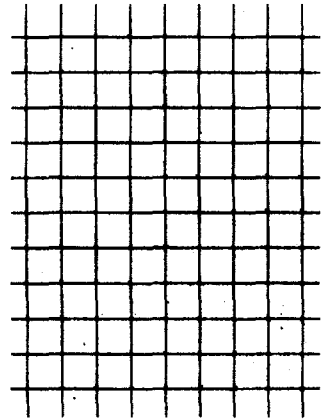
2-a) 16mm lens with linear interpolation



2-b) 16mm lens with oblique coordinate mapping

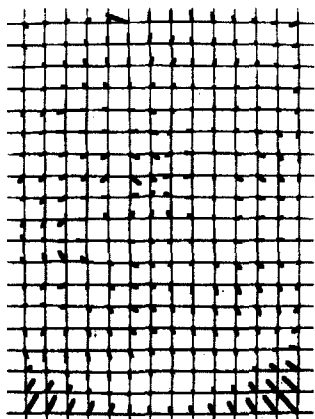


2-c) 25mm lens with linear interpolation

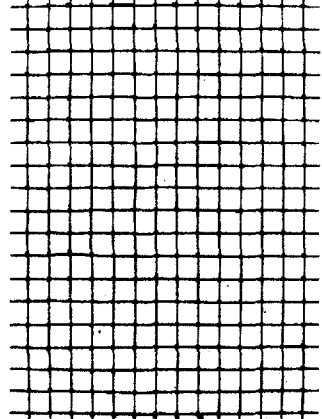


2-d) 25mm lens with oblique coordinate mapping

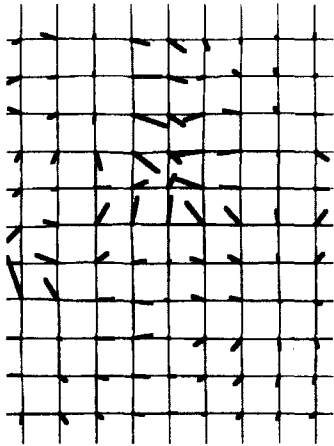
Fig. 2 Calibration error without distort plastic panel



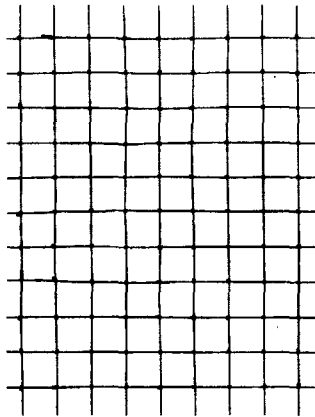
3-a) 16mm lens with linear interpolation



3-b) 16mm lens with oblique coordinate mapping



3-c) 25mm lens with linear interpolation



3-d) 25mm lens with oblique coordinate mapping

Fig. 3 Calibration error with distorted plastic panel

참고문헌

1. F1. R. Y. Tsai, "A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3-D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses," IEEE J. Robot. Automat. RA-3(4), pp. 323-344, 1987.
2. J. Weng, P. Cohen, and M. Herniou, "Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation," IEEE transactions on pattern analysis

and machine intelligence, Vol. 14, No. 10, pp. 965-980, 1992.

3. S. Shih, Y. Hung, and W. Lin, "Accurate linear technique for camera calibration considering lens distortion by solving an eigenvalue problem," Optical engineering Vol. 32 No. 1, pp. 138-149, 1993.
4. H. A. Martins, J. R. Birk and R. B. Kelley, "Camera models based on data from two calibration planes," Computer Graphics and Image Processing, Vol. 17, pp. 173-180, 1981.
5. 박현구, "슬릿광을 이용한 3차원 자유곡면 형상의 비접촉식 자동측정 및 검사," 한국과학기술원 박사학위논문, 1994.