

X선 영상 시스템의 정밀 캘리브레이션 기법

조영빈*, 권대갑*

An Accurate Calibration Technique for X ray Imaging System

Young Bin Cho*, Dae Gab Gweon*

ABSTRACT

This paper presents an accurate algorithm for geometric calibration of X-ray imaging system. Calibration is a very important process for improving an imaging system performance. There has been a lot of previous works using linear camera modeling technique, where lens distortion is neglected and/or center of distortion is assumed to be known. Geometrical distortion of image intensifier, however, is very large and its center of distortion should be calculated. This paper presents a new calibration method to estimate the intensifier position and orientation, scale factor, distortion coefficient, magnification factor, and center of distortion using the least square method. We investigate the properties of the algorithm by computer simulation. Simulation results show that the parameters can be estimated accurately using the proposed algorithm.

Key Words : X-ray Image Intensifier (X선 영상 증배관), Calibration (캘리브레이션), Distortion (왜곡 Tomography (토포그래피), Laminography (라미노그래피))

1. 서론

영상장치의 기하학적, 광학적 특성과 기준 좌표계에 대한 상대 위치와 방향을 결정하는 캘리브레이션은 시스템의 정확성에 직접적인 영향을 주는 매우 중요한 과정이다. 카메라와 이미지 그래버로 구성된 영상 시스템은 그 적용 분야가 넓어서 이 시스템의 캘리브레이션에 대해서는 특히 많이 연구되어 왔다. Tsai^{[1][7]}는 두 단계의 선형 알고리즘으로 렌즈수차를 포함하는 핀홀 모델에 대한 캘리브레이션을 수행하였다. 그는 첫 번째 단계에서 영상장치의 위치 및 방향을 구하고 두 번째 단계에서 렌즈

에 대한 파라미터를 구하였다. 그는 영상의 중심점을 아는 것으로 가정하였고 렌즈의 왜곡계수는 비선형적인 방법으로 결정하였다. 그의 또 다른 논문에서는 영상 중심과 스케일 계수를 정밀하게 구하는 방법도 제시하였다. Chang^[12]은 Tsai의 방법에 칼만 필터를 적용하여 실험하였다. Martin^[11]은 두 개의 평면 캘리브레이션 방법을 제안하여 선형적인 모델을 구하였으나 미지수가 많고 캘리브레이션 점의 수가 정확성에 많은 영향을 미치는 문제점이 있다. Liu^[13]는 3차원 공간상의 직선과 영상 평면상의 직선과의 대응관계를 이용한 캘리브레이션을 제시했는데 카메라의 초점거리를 아는 것으로 가정하여 실제의 적용에는 많은 제한이 있다. 김정국^[10]은

* 한국과학기술원 기계공학과

Liu의 모델을 확장 개선하여 초점거리뿐 아니라 영상 스케일 계수까지도 파라미터로 추정하였지만 렌즈의 왜곡과 왜곡 중심을 무시하였다. X선 장치에 대한 연구는 대부분 의학분야에서 많이 진행되었다.^{[3][4][5]} X선 영상 시스템의 보정에 관한 연구는 Noble^[4]에 의해 수행되었는데 그는 X선 영상 시스템 전체를 선형 카메라 모델로 가정하고 기준 좌표에 대한 상대 위치와 방향을 구하는 방법을 제시하였다. 그러나 그는 영상 시스템의 왜곡을 고려하지 않았다. X선 영상 시스템은 기존의 카메라 외에 X선 영상을 가시상으로 바꾸어 주는 장치가 추가되는데 현재 가장 널리 사용되는 실시간 영상 변환 장치중 하나인 영상 증배관은 기하학적 왜곡이 매우 크다. 최근 영상증배관이 의료분야에만 국한되지 않고 라미노그래피와 토모신서시스와 같은 산업용 단층 촬영 장치에 적용되면서 이 장치의 캘리브레이션이 중요하게 인식되었다.^{[8][9]} 지금까지 개발된 많은 캘리브레이션 기법들이 X선 영상 장치의 왜곡 계수와 왜곡 중심을 구하기에는 어려움이 많다.

본 연구에서는 왜곡이 큰 X선 영상 시스템을 정밀 캘리브레이션하는 효과적인 알고리즘을 제시하고자 한다. 이를 위하여 X선 영상 시스템의 왜곡 계수뿐 아니라 왜곡 중심, 스케일 계수, 확대 계수를 모두 추정하였으며, 특히 많은 알고리즘이 왜곡 중심이나 왜곡 계수를 비선형식의 해로부터 구하는데 비하여 본 논문에서는 모든 파라미터를 선형식으로 계산하는 새로운 방법을 제시한다. 또한 시스템의 파라미터를 3단계로 나누어 구하므로 매우 빠르고 정확하게 해를 구할 수 있으며 필요한 대응점의 수도 최소화 할 수 있다. 영상 증배관의 정밀한 캘리브레이션은 최근 많은 관심을 끌고 있는 라미노그래피와 토모신서시스의 3차원 영상 복원 성능에 결정적인 영향을 미치는 단계로서 시스템 구축에 매우 중요한 역할을 수행하리라 기대한다

2. 시스템 모델링

Fig. 1에는 실시간 영상 촬영이 가능한 X선 장치의 전형적인 예를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 X선원과 영상 증배관 사이에 놓인 물체 (x_b, y_b, z_b) 는 기하학적인 관계에 따라 영상 증배관 상면 (x_i, y_i) 에 상을 형성한다. 영상증배관

은 X선 영상을 가시상으로 만들어 CCD에 전달하고 이 신호는 이미지 그래픽에서 디지털 데이터로 변환, 저장된다.

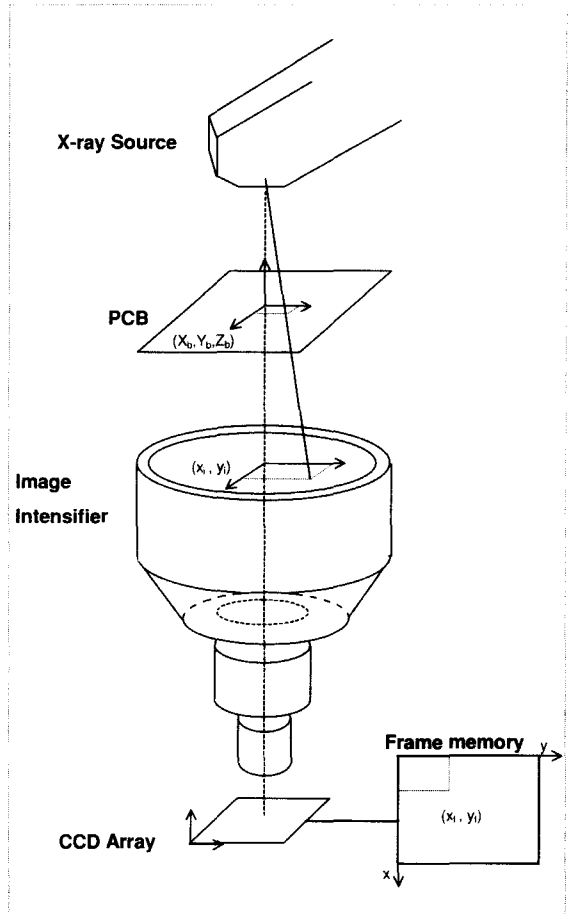


Fig. 1 The geometry of X ray imaging system

캘리브레이션 시편의 기준점들이 하나의 평면에 존재하고 시편이 영상증배관의 상면과 잘 밀착할 경우 두 좌표계 사이의 관계는 아래와 같이 간단히 표현된다.

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

여기서 $R = \begin{vmatrix} c & s \\ -s & c \end{vmatrix}$, $T = \begin{vmatrix} T_x \\ T_y \end{vmatrix}$ 이다. 이 식에서 추정 되어야 할 파라미터는 회전 변환행렬 R 과 위치변환벡터 T 이다. (x_w, y_w) 는 캘리브레이션 시편의 좌표점이고 (x, y) 는 영상증배관 상면의 중심에 놓인 좌표점이다. Fig. 2에서와 같이 얇은 평판에 정밀하게 구멍을 가공하고 영상증배관 상면에 잘 밀착시키면 두 좌표계사이의 관계는 식 (1)에 의해 설명될 수 있다.

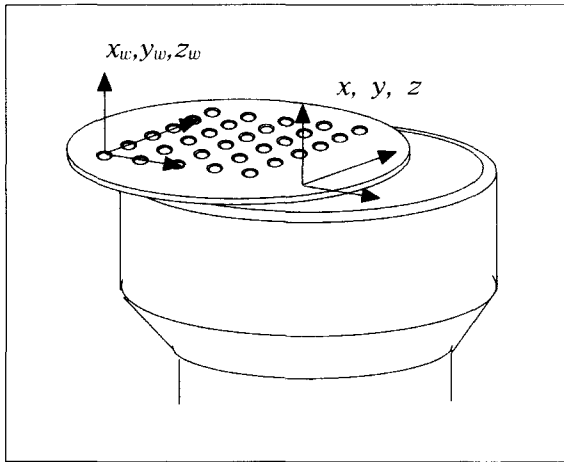


Fig. 2 Coordinate system of the calibration specimen and the imaging system

만일 영상시스템의 기하학적인 왜곡을 무시한다면 Fig. 3에서 보는 바와 같이 영상 증배관 상면에 형성된 좌표점은 단순히 확대 혹은 축소되어 영상 증배관 하면에 장착된 CCD카메라의 영상면 위에 상을 형성한다.

$$\begin{aligned} X_u &= S \cdot x \\ Y_u &= S \cdot y \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 S 는 확대 계수이고, (X_u, Y_u) 는 왜곡되지 않은 가시영상의 좌표이다. 이 식에서 추정 되어야 할 파라미터는 확대계수 S 이다.

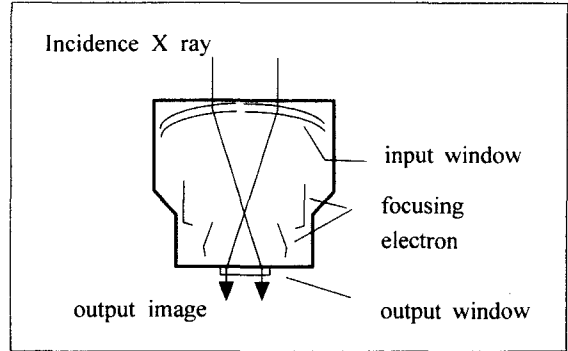


Fig. 3 Image formation in image intensifier

영상 시스템의 기하학적인 왜곡의 종류로는 좌표 반경방향의 왜곡(radial distortion), 렌즈 요소의 광학중심 불일치로 인한 왜곡 그리고 조립과정에서 발생하는 왜곡으로 크게 3가지로 분류하는데[2] 일반적으로 반지름 방향의 고려만으로도 충분한 것으로 보고되어 있다.[1] 반지름 방향의 왜곡은 아래의 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} X_d(1 + k r_d^2) &= X_u \\ Y_d(1 + k r_d^2) &= Y_u \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 (X_d, Y_d) 는 왜곡된 좌표점이고 k 는 왜곡 계수이다. 이 식에서 추정해야 할 파라미터는 왜곡 계수 k 이다. 반경 방향의 왜곡은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 2가지의 형태로 나눌 수 있는데 배럴 왜곡(barrel distortion)은 왜곡 계수가 양수로, 핀쿠션 왜곡(pincushion distortion)은 음수로 표현된다. 이렇게 형성된 왜곡 영상은 카메라에 의해 아날로그 신호로 변환되고 이미지 그래버에 의해 디지털 데이터로 변환 저장된다. 이때 영상 신호와 이미지 그래버의 샘플링 속도차이로 인해 가로, 세로의 영상비가 이상적인 값과는 약간 달라지게 되는데 이를 고려하기 위하여 스케일 계수 s_x 를 사용한다.

$$\begin{aligned} X_f &= s_x \cdot X_d + C_x \\ Y_f &= Y_d + C_y \end{aligned} \tag{4}$$

여기서 (C_x, C_y) 는 왜곡의 중심을 나타내며 (X_f, Y_f) 는 영상 좌표를 의미한다. 여기서 추정되어야 할 파라미터는 스케일계수 s_x 그리고 왜곡 중심 (C_x, C_y) 이다.

3. 캘리브레이션 알고리즘

본 절에서는 캘리브레이션을 3 단계로 나누어 선형적으로 파라미터를 구하는 방법을 설명한다. 첫 번째 단계에서는, 반경방향의 왜곡을 이용하여 스케일 계수를 선형적으로 구하고 두 번째 단계에서는 계산된 스케일 계수를 이용하여 확대계수, 왜곡계수 그리고 회전변환 행렬과 위치변환벡터를 역시 선형적으로 구한다. 마지막 단계에서는 왜곡 모델을 분석하여 왜곡 중심을 효과적으로 추정하는 매우 효과적인 방법을 제시한다.

3.1 스케일계수의 캘리브레이션

스케일 계수 s_x 는 왜곡이 반경 방향으로만 일어난다는 제한 조건을 이용한다. 반경 방향 왜곡 제한 조건은 다음의 식 (5)와 같이 표현될 수 있다.

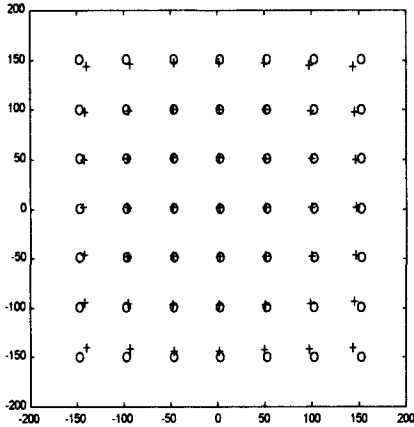
$$\frac{y}{x} = \frac{Y_d}{X_d} = \frac{s_x Y_d}{X'_d} \quad (5)$$

여기서 $X'_d = \frac{X_d}{s_x}$ 이다. 만일 회전 변환 행렬 R 을 알고 있다면 식(5)는 다음과 같이 정리된다.

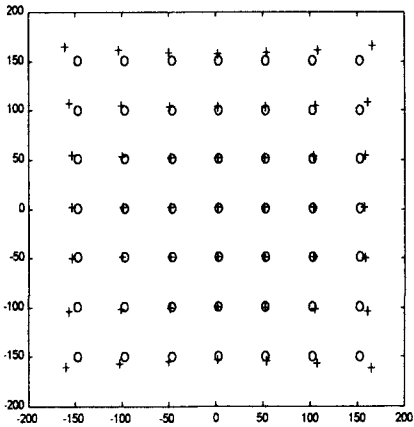
$$X'_d = [Y_d(cx_w + sy_w), Y_d, X'_d(sx_w - cy_w)] \cdot L \quad (6)$$

여기서 $L^T = [s_x/T_y, s_x T_x/T_y, 1/T_y]$ 이다. 식 (6)으로부터 3개 이상의 대응점을 사용하면 스케일 계수와 위치변환 벡터를 구할 수 있다. 회전 변환 행렬의 초기 가정에서 오차가 크다면 식 (6)에 의한 결과도 큰 오차를 가질 것이다. Fig. 5는 대응점의 좌표축이 영상 좌표축에 대해 θ° 회전하였을 때 스케일 계수의 상대 오차를 나타낸 것이다. 가로축은 식 (1)의 회전변환행렬의 회전각 θ° 을, 세로축은 상대오차 $E_s = \frac{\hat{s}_x - s_x}{s_x}$ 를 의미한다. 여기서

\hat{s}_x 는 스케일 계수의 추정치이고 s_x 는 참값이다. 그림에서 알 수 있듯이 캘리브레이션 시편을 영상 좌표계의 방향과 잘 일치시킬수록 추정치는 참값에 근접한다.



(a) barrel distortion



(b) pinchusion distortion

Fig. 4 Radial distortion [object(o), image(+)]

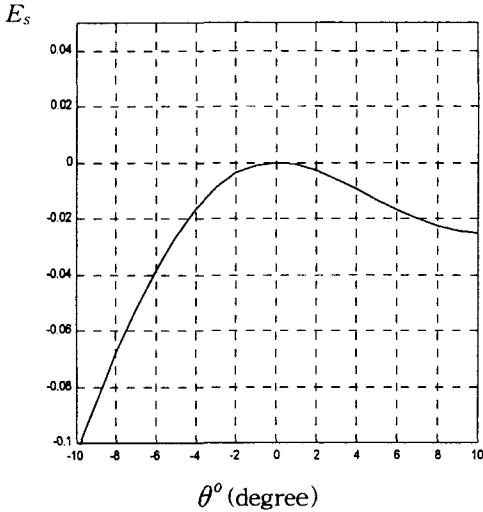


Fig. 5 Relative error of scale factor S_x estimation with respect to rotation angle of R in case of no-rotation assumption

3.2 S, k, R, T의 캘리브레이션

본 절에서는 대응점간의 거리 벡터식을 사용하여 캘리브레이션을 수행하는 방법을 소개한다. 두 점 사이의 거리벡터를 아래첨자 ij 를 사용하여 다음과 같이 정의하기로 하자

$$x_{ij} = x_i - x_j \tag{7}$$

여기서 x_i 는 i 번째 대응점의 x 좌표이다. 식 (2)와 (3)을 이용하여 식 (7)을 전개하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} Sx_{ij} &= X_{uij} = X_{dij} + k(X_{di}R_{di}^2 - X_{dj}R_{dj}^2) \\ Sy_{ij} &= Y_{uij} = Y_{dij} + k(Y_{di}R_{di}^2 - Y_{dj}R_{dj}^2) \end{aligned} \tag{8}$$

여기서 $X_{uij} = X_{ui} - X_{uj}$ 이고 $X_{dij} = X_{di} - X_{dj}$ 이다. 식 (1)을 사용하면 식 (8)은 다음과 같은 선형 방정식으로 정리된다.

$$\begin{bmatrix} -X_{di}R_{di}^2 + X_{dj}R_{dj}^2 & x_{wij} & y_{wij} \\ -Y_{di}R_{di}^2 + Y_{dj}R_{dj}^2 & y_{wij} & -x_{wij} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k \\ S_c \\ S_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{dij} \\ Y_{dij} \end{bmatrix} \tag{9}$$

이 식으로부터 왜곡계수와 확대계수 그리고 회전 변환 행렬을 구할 수 있다. 이렇게 구해진 파라미터와 식 (1)을 사용하여 위치 변환 행렬을 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} T_x &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x_i - (cx_{wi} + sy_{wi})] \\ T_y &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i - (-sx_{wi} + cy_{wi})] \end{aligned} \tag{10}$$

위치 변환 행렬은 식 (6)에서도 구해지지만 이 식은 회전 변환 행렬을 가정한 상태에서 구한 것이므로 식 (10)이 보다 더 정확한 결과를 나타낸다. 실제 캘리브레이션을 수행할 때에는 2단계에서 얻어진 회전 변환 행렬을 이용하여 1단계를 다시 계산하면 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있다.

3.3 왜곡 중심의 캘리브레이션

왜곡의 중심을 추정하는 방법은 레이저 스캔 장치를 이용한 방법, 줌렌즈를 구동시키는 방법 그리고 반경방향의 왜곡 제한조건을 이용하는 방법으로 크게 3가지로 구별된다.^[7] 이 중에서 가장 정확한 결과를 나타내는 것은 왜곡 제한 조건을 이용하는 방법으로 알려져 있다. Tsai는 이 3가지 방법들을 비교 실험하였으며 특히 왜곡 제한 조건으로부터 유도된 비 선형식에 최적화 기법을 적용하여 왜곡 중심을 구하는 방법을 제시하였다. 본 논문에서는 기하학적 왜곡의 기본특성을 이용하여 선형적으로 왜곡 중심을 구하는 보다 간결하고 효과적인 캘리브레이션 기법을 제시하고자 한다. 식 (3)을 정리하여 r_d 와 r_u 의 관계 A를 다음과 같이 기술하자.

$$A : r_u = r_d + k r_d^3 \tag{11}$$

만일 왜곡 중심을 오차 Δr_d 로 잘못 추정하고

있을 경우 영상의 왜곡관계 B는 다음과 같이 표현된다.

$$B : r_u = r_d + k r_d^3 - \Delta r_u \quad (12)$$

여기서 $\Delta r_u = \Delta r_d + k \Delta r_d^3$ 이다. 그러므로 잘못 추정된 왜곡 중심에 대하여 캘리브레이션을 수행하는 것은 식 (12)의 관계를 다음의 식 (13)으로 추정하는 것이 된다.

$$C : r_u = (r_d - \Delta r_d) + \hat{k}(r_d - \Delta r_d)^3 \quad (13)$$

잘못 추정된 왜곡중심에 대하여 구해진 캘리브레이션 파라미터를 사용하여 구한 좌표(relation C)와 영상좌표계에서 관찰되는 좌표 (relation B)사이의 편차는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Er &= \int_{-R}^R (C-B) dr_d \\ &= \int_{-R}^R [\hat{k}(r_d - \Delta r_d)^3 - k r_d^3 + k \Delta r_d^3] dr_d \\ &= -2R \hat{k} [R^2 + \Delta r_d^2] \Delta r_d + 2Rk \Delta r_d^3 \end{aligned} \quad (14)$$

식 (14)를 정리하면 다음과 같은 식으로 간단히 정리된다.

$$\Delta r_d + \frac{(\hat{k}-k)}{\hat{k}R^2} \Delta r_d^3 = -\frac{1}{\hat{k}R^2} \frac{Er}{2R} \quad (15)$$

만일 $\frac{k-\hat{k}}{k}$ 가 매우 작다면 좌변항은 간단히 정리될 수 있다.

$$\Delta r_d \approx -\frac{1}{\hat{k}R^2} \frac{Er}{2R} \quad (16)$$

여기서 $\frac{Er}{2R}$ 은 두 곡선 B,C의 평균 편차를 의미하므로 왜곡계수 추정 오차는 아래와 같이 간단히 정리된다.

$$\begin{aligned} \Delta Cx &= a \cdot E[X_u - \hat{X}_u] \\ \Delta Cy &= a \cdot E[Y_u - \hat{Y}_u] \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 $a = -\frac{1}{R^2 \hat{k}}$ 이고 X_u, Y_u 는 앞 단계에서 구한 캘리브레이션 파라미터와 캘리브레이션 기준점으로부터 구한 좌표값 (relation C)이고 \hat{X}_u 와 \hat{Y}_u 는 영상으로부터 구한 좌표값 (relation B)이다. 여기서 E[.]는 평균을 의미한다.

4. 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 캘리브레이션 기법의 성능을 평가하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 시편의 대응점 갯수는 각각 4, 5, 6 개로 하고, 영상 좌표에 [-A A] 범위의 균일 분포 외란이 존재하는 것으로 가정하였다. 시뮬레이션에 사용된 영상시스템의 입력값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \theta &= 5^\circ \\ c &= \cos \theta \\ s &= \sin \theta \\ Tx &= -74.0\text{mm} \\ Ty &= -74.0\text{mm} \\ S &= 2.0 \\ sx &= 0.88 \\ k &= -1.8e-6 \\ Cx &= 235.0 \\ Cy &= 235.0 \end{aligned}$$

위와 같은 상황에서 영상모니터에 나타나는 시편의 모습은 아래의 Fig 6에서와 같다. 핀쿠션 왜곡으로 인해 캘리브레이션 좌표점들의 간격이 정방형을 이루지 못하고 있다. 좌표점들이 전체적으로 시계방향으로 약간 회전된 것 같은 모양은 시편이 영상증배관의 좌표축과 5° 의 차이를 가진다고 가정했기 때문이다. 그림에서 짐작할 수 있듯이 영상모니터를 보면서 시편을 설치하는 경우 5° 이내로 일치시키는 것은 어려운 일이 아니다. 사용된 영상시스템은 512X512의 영상 분해능을 가지는 것으로 가정하였다.

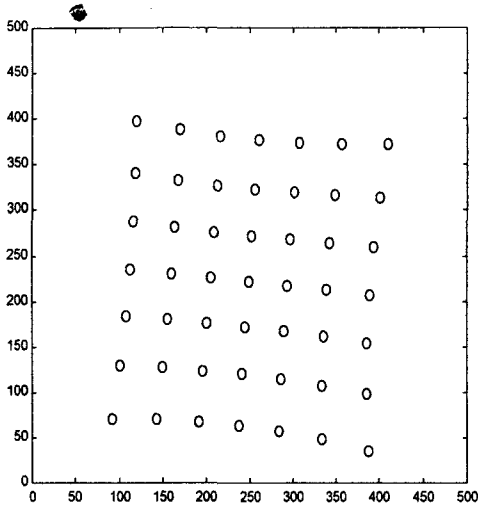


Fig. 6 Distorted image of calibration specimen used in this simulation

왜곡 중심은 영상의 중심으로 가정하는 것이 일반적이므로 초기 추정치는 (256, 256)으로, 회전행렬의 초기 추정치는 $\theta = 0$ 으로 하였다. 대응점의 갯수와 첨가된 외란의 영향에 대하여 각각 시뮬레이션을 30번을 수행하고 그 결과를 평균하여 정리하였다. 표 1에는 왜곡 중심을 제외한 나머지 변수들을 캘리브레이션 했을 때의 상대 에러를, 표 2에는 왜곡 중심도 함께 캘리브레이션 했을 때의 상대 에러를 나타내었다. 상대에러는 백분율로 나타내었고 캘리브레이션 오차 e_1 과 e_2 의 정의는 아래와 같다.

$$e_1 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum [(x_w - \hat{x}_w)^2 + (y_w - \hat{y}_w)^2]}$$

$$e_2 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum [(X_f - \hat{X}_f)^2 + (Y_f - \hat{Y}_f)^2]}$$

(18)

여기서 $\hat{}$ 는 캘리브레이션 수행후 파라미터를 이용하여 변환한 좌표값을 의미한다.

Table 1. Averaged relative percent error without center correction

		Noise			
		0	1.0	2.0	3.0
4	c	0.0285	0.0294	0.0289	0.0229
	s	-3.7918	-3.9204	-3.9375	-3.1433
	T_x	12.6465	12.6228	12.6567	12.8670
	T_y	12.9792	13.0382	13.2059	13.1529
	S	5.6519	5.6932	6.1334	6.1893
	s_x	0.3391	0.3339	0.3575	0.6147
	k	-48.9054	-49.9629	-54.4651	-55.8111
	e_1	2.7434	2.7679	2.9268	2.9640
	e_2	5.6149	5.6599	6.0066	6.0949
5	c	-0.0615	-0.0588	-0.0596	-0.0711
	s	7.7332	7.3962	7.4111	8.7623
	T_x	13.8076	13.7463	13.7820	13.7395
	T_y	11.0316	11.0529	11.0340	10.8949
	S	1.3259	1.3640	1.4750	1.3698
	s_x	0.3547	0.3146	0.3597	0.0956
	k	-16.2514	-16.5637	-17.2478	-15.5394
	e_1	2.0673	2.1025	2.1604	2.2984
	e_2	4.0183	4.0898	4.2289	4.4936
6	c	0.0572	0.0597	0.0513	0.0649
	s	-7.7840	-8.1659	-7.0235	-9.1267
	T_x	13.0573	13.0610	13.1218	12.8908
	T_y	12.5507	12.6027	12.4836	12.7359
	S	-0.4953	-0.4903	-0.5235	-0.1622
	s_x	0.3599	0.3076	0.4106	0.4628
	k	-2.8948	-2.8895	-3.1820	-5.3783
	e_1	1.8776	1.8863	1.9606	2.0692
	e_2	3.7071	3.7320	3.8829	4.1037

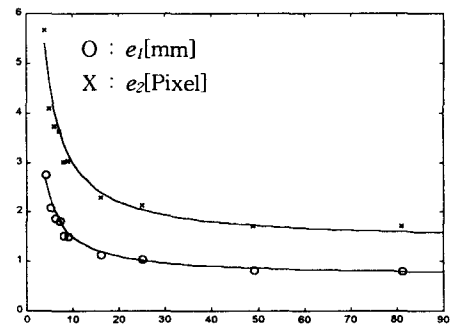
Table 1에는 T_x, T_y 의 오차가 12%정도로 매우 크게 나타나는데 이것은 왜곡 중심을 추정하지 않았을 때 발생하는 현상이다. 대응점의 갯수가 증가하면 왜곡 계수 k 의 오차, 평균에러, 그리고 외란에 의한 영향도 작아지는 경향을 보인다. 따라서 대응점의 갯수는 이론적으로 4개면 되지만 외란이 존재하는 실제의 경우에는 대응점의 갯수를 크게 하는 것이 좋을 수 있다. Table 2에는 왜곡 중심을 추정한 결과를 나타내었는데 앞서 설명한대로 T_x, T_y 의 오차가 매우 작은 것을 보여준다. 그러

나 이 경우 외란의 영향에 민감하므로 대응점의 수를 크게 할 필요가 있다. 이 시뮬레이션의 결과로부터 대응점의 갯수를 4개보다 충분히 크게하고 외란의 영향을 충분히 작게 하면 정확한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

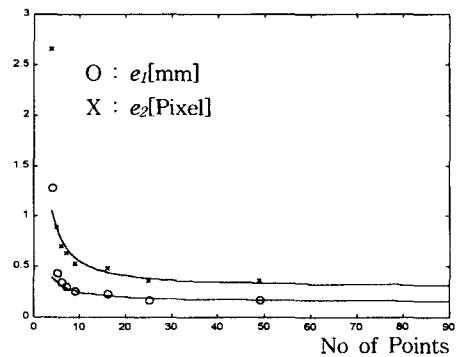
Table 2. Averaged relative percent error with center correction

		Noise			
		0	1.0	2.0	3.0
4	c	0.0001	-0.0040	0.0055	-0.0025
	s	-0.0089	0.5007	-0.7717	0.2604
	T_x	-1.6288	-1.8839	-6.8501	-110.666
	T_y	1.2839	1.3738	9.3072	161.772
	S	1.1417	-0.0491	0.6720	3.2494
	s_x	-0.0145	-0.0740	0.0388	0.1483
	k	-10.4184	0.0047	-8.6119	-33.2735
	C_x	-0.9773	-1.1455	-4.4859	-73.3997
	C_y	0.8741	0.9445	6.7741	127.8343
	e_1	0.4463	1.2830	3.0254	18.4807
	e_2	0.9404	2.6596	6.2178	39.8020
	5	c	0.0000	-0.0014	0.0023
s		0.0000	0.1635	-0.3931	2.2436
T_x		0.0000	-0.3424	-2.3297	0.8971
T_y		0.0000	0.0350	2.6176	-1.0533
S		0.0000	0.0085	0.3504	-0.9057
s_x		0.0000	-0.0049	-0.0274	-0.4391
k		0.0000	-0.0482	-4.2259	9.1600
C_x		0.0000	-0.2213	-1.5517	0.4728
C_y		0.0000	0.0407	1.8887	-0.6873
e_1		0.0000	0.4440	1.1063	1.2386
e_2		0.0000	0.8892	2.2230	2.4839
6		c	0.0000	0.0010	-0.0020
	s	0.0000	-0.1425	0.1890	-0.7271
	T_x	0.0000	0.2743	-0.5462	-0.3042
	T_y	0.0000	0.1851	-0.1580	1.1911
	S	0.0000	0.0464	-0.0435	0.0524
	s_x	0.0000	-0.0106	-0.0375	0.1408
	k	0.0000	0.0470	0.1833	-1.7059
	C_x	0.0000	0.1773	-0.3438	-0.1091
	C_y	0.0000	0.0992	-0.0732	0.8055
	e_1	0.0000	0.3534	0.7147	1.0479
	e_2	0.0000	0.7038	1.4268	2.1108

Fig. 7에는 $[-1.0 \ 1.0]$ 픽셀 크기의 외란이 존재하는 조건에서 대응점의 갯수에 따른 평균오차를 나타낸 것이다. Fig. 7 (a)는 왜곡 중심을 추정하지 않았을 때이고 (b)는 왜곡 중심을 추정하였을 때의 평균 오차이다. 두 그림 모두 대응점의 갯수가 증가할수록 평균 오차가 줄어드는 경향을 보이는데 특히 왜곡 중심을 추정한 경우가 좋은 결과를 나타낸다. 대응점의 갯수가 충분히 큰 경우 (a)는 외란 크기의 약 2배 정도의 오차를 나타내고 (b)는 외란 크기의 1/2 이내로 캘리브레이션한다. 따라서 왜곡이 큰 영상 증배관의 정밀 캘리브레이션의 경우는 일반 카메라와 달리 왜곡중심의 추정이 매우 중요한 것임을 잘 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 7 Calibration Error with respect to the number of Corresponding Points (a) without distortion center calibration (b) with distortion center calibration

5. 실험

캘리브레이션 대상은 16인치의 입력 스크린과 25mm의 출력 스크린을 가진 영상증배관(TH 9428HP), CCD 카메라 그리고 이미지 그래버로 구성된 영상시스템이다. 시편은 두께 5mm의 알루미늄판위에 직경 7mm의 구멍을 56개 가공하여 제작하였고 구멍의 제작오차는 0.05mm 이내이다. 구멍은 직경 12mm, 깊이 3mm의 단을 가지고 있는데 이것은 시편의 두께가 얇을 수록 영상에서 보이는 원의 모습이 선명하기 때문이다. 이 시편의 X선 영상을 촬영하면 Fig. 8과 같다. 실제 캘리브레이션에서는 맨 윗줄의 7개 대응점은 사용하고 49개의 대응점만 사용하였다. 이 영상으로부터 이진 영상을 구하고 몇차례의 모폴로지 작업을 통하여 영상의 노이즈를 제거한 후 각각의 구멍에 대해 무게 중심을 찾아 대응점의 좌표를 구한다.

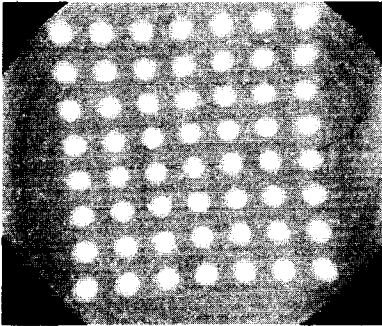


Fig. 8 X ray Image of Calibration Specimen

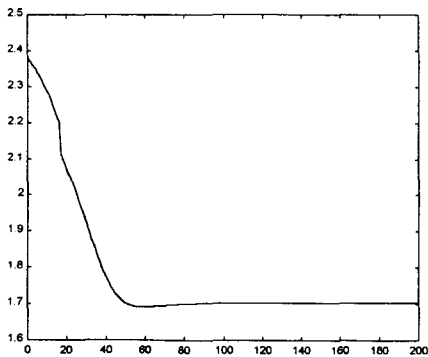


Fig. 9 Average error along the iterations

Fig. 9에는 이 시편을 사용한 캘리브레이션 결과를 나타내었다. 앞서 설명한 캘리브레이션 과정은 반복적으로 사용되어 파라미터의 정밀도를 개선하는데 대략 40회 정도면 수렴하는 것을 알 수 있다. 결과적으로 1.7픽셀 정도의 평균 오차를 나타내는데 이것은 시편이 두꺼워서 영상내에서 원의 경계가 뚜렷하지 않게 되고 이로 인해 대응점의 좌표를 구할 때 오차가 발생하는 것으로 보인다. 또한 영상 가장자리 부분의 원의 모양이 일그러져 정확한 중심을 구하지 못하는 것도 한 이유이다. 후후에 보다 얇고 밀도가 큰 재질을 사용하여 원의 경계를 뚜렷이 하고 대응점의 좌표를 정확히 구하면 캘리브레이션 오차는 더욱 줄어들 것으로 생각된다. Fig. 10은 캘리브레이션을 통해 구한 파라미터를 사용하여 시편의 좌표를 영상 좌표로 변환한 후 실제 영상처리를 통해 얻은 결과와 비교한 것이다.

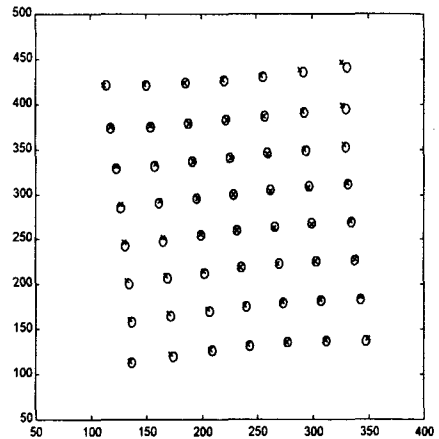


Fig. 10 Image Calibration using the estimated parameters [O:image, X:Calibrated Coordinate]

6. 결론

본 연구는 영상증배관으로 구성된 X선 영상 시스템의 파라미터 추정을 위한 효과적이고도 빠른 캘리브레이션 알고리즘을 제시한다. 기존의 캘리브레이션 연구가 대부분 왜곡 중심을 추정하지 않거나 왜곡 자체를 무시하고, 혹은 왜곡 중심과 왜곡

계수를 구하기 위하여 복잡한 비선형 방정식을 풀어야 하는 것에 비해 본 연구에서 제시한 방법은 선형방정식으로부터 왜곡 중심과 왜곡 계수를 포함한 모든 파라미터를 구할 수 있게 한다. 또한 파라미터의 추정은 모두 3단계로 나뉘어져 계산량이 적고 매우 효율적이다. 시뮬레이션을 통하여 영상 증배관과 같이 왜곡이 큰 영상 시스템의 캘리브레이션에 있어서 왜곡 중심을 추정하지 않는 기존의 알고리즘은 많은 오차를 나타내지만 제안된 알고리즘에서와 같이 왜곡 중심을 추정하면 캘리브레이션 오차가 크게 개선됨을 확인했다. 이론적으로 3개의 대응점만으로 모든 파라미터가 구해지므로 기존의 알고리즘에 비해 요구되는 대응점의 수가 적고 계산이 빠르다는 장점이 있다. 또한 실험을 통하여 영상증배관과 카메라로 이루어진 시스템을 평균 1.7픽셀 이내의 오차로 캘리브레이션할 수 있었다. 대부분의 오차는 영상의 바깥쪽에서 발생하였는데 영상의 바깥쪽에 놓인 구멍의 중심좌표를 구할 때는 많은 오차가 발생하기 때문이다. 영상의 중심에서 멀수록 왜곡이 심하므로 원의 모양이 일그러지고 시편의 두께에 의한 영향을 더 크게 받기 때문에 특징점의 윤곽이 분명히 드러나지 않기 때문이다. 따라서 이러한 영향을 최소화 하기 위한 시편 설계와 영상처리 기법의 개발과 같은 추후 연구가 필요한 것으로 생각된다.

참고문헌

1. Roger Y. Tsai, "An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision," IEEE Proceedings of International Conf. on Robotics and Automation, pp 364-374, 1986.
2. Juang Weng, Paul Cohen, and Marc Herniou, "Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation," IEEE PAMI, Vol 14, No 10, 1992.
3. Koichi Kitamura, et al, "Estimating the 3D Skeletons and Transvers Areas of Coronary Arteries from Biplan Angiograms," IEEE Trans. on Medical Imaging, Vol 7, No 3, 1988.
4. A Noble, et al, "CAD based Inspection using X ray Stereo," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp 2361-2366, 1995.
5. Y. Yakimovsky and R. Cunningham, "A System for extracting three Dimensional Measurements from a stereo pair of TV Camera," Computer Graphics and Image Processing 7, pp 195-210, 1995.
6. Keith. D. Gremban et al, "Geometric Camera Calibration using System of Linear Equation," IEEE Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation, pp 562-567, 1988.
7. Reimar K. Lenz and Roger Y Tsai, "Techniques for Calibration of the Scale Factor and Image Center for High Accuracy 3D Machine," IEEE PAMI Vol 10, No 5, pp 713-720, 1988.
8. Y. B. Cho, D.G. Gweon, et al "Development of axial Laminographic System for electronic packaging Inspection," Journal of the Institute of Circuit Technology, Vol 24, No 1, pp 28-29, 1997.
9. J.U. An, Y. B. Cho and D.G. Gweon, "A New Method for Image Separation from Overlapped Image on the Two-Layered Printed Circuit Board," Image and Vision Computing, Vol 15, pp 861-866, 1997.
10. 김정국, 이범희, "직선 대응관계를 이용한 카메라 캘리브레이션에 관한 연구," 전기학회논문집 40권 11호 pp 1183-1193, 1991.
11. 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.
12. Y.L. Chang and P. Liang, "On Recursive calibration of cameras for robot hand-eye systems," Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation, Vol 1. pp 838-843, 1989.
13. Y. Liu, T.S. Huang and O.D. Fqgeras, "Determination of camera location from 2D to 3D line and point correspondences," IEEE Tran. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol 12. No 1, Jan, 1990.