

줌렌즈 CCD 카메라의 기하학적 검정 정확도 평가 Evaluation for Geometric Calibration Accuracy of Zoom-lens CCD Camera

유환희¹⁾ · 정상용²⁾ · 김성삼³⁾

Yoo, Hwan Hee · Jeong, Sang Yong · Kim, Seong Sam

Abstract

Zoom lenses CCD(Charge Coupled Device) cameras have many desirable features but appear to be geometrically unstable and difficult to calibrate. It is well known that the zooming camera parameters change with zoom lens position. This paper presents a comparative study of two approaches, namely, DLT(Direct Linear Transformation) introduced by Abdel-Aziz and Karara and the model proposed by Tsai, to evaluate the camera parameters of zoom lenses CCD camera and 3D positioning accuracy. As a result, the accuracy for 3D positioning using Tsai and DLT model is similar in both methods when the set of GCPs and the object are arranged in the same space. However, Tsai model is more stable than DLT in the case that the object is apart from the set of GCPs. Also, the further study for the parameters optimization of conventional DLT is needed to improve accuracy for 3D positioning.

요 지

줌 렌즈 CCD 카메라는 사용상 많은 장점을 갖고 있으나 기하학적으로 불안정하여 카메라 검정이 어려운 문제점을 가지고 있으며 이것은 일반적으로 알려진 것과 같이 줌 카메라의 변수가 줌 위치에 따라 변화하기 때문이다. 본 연구에서는 줌 렌즈 CCD카메라의 변수계산과 3차원 위치정확도를 평가하기 위하여 Abdel-Aziz와 Karara가 제안한 DLT기법과 Tsai 기법을 비교분석하였다. 그 결과, 기준점을 대상물이 위치한 공간에 함께 배치할 경우에 Tsai와 DLT모델식에 의한 3차원 위치정확도는 두 방법 모두 비슷하였으나, 기준점과 대상물이 이격되는 경우 DLT에 비해 Tsai가 더 안정적임을 알 수 있었다. 따라서, 그 동안 많이 사용해 온 DLT기법의 변수 최적화를 위한 추가적인 연구가 3차원 위치 정확도 향상을 위해 필요하다고 판단된다.

핵심용어(Keywords) : 줌렌즈 CCD 카메라(zoom lens CCD camera), 카메라 모델(camera model), 기하학적 검정(geometric calibration), 3차원 위치(3D positioning)

1. 서 론

최근 고해상력을 가진 줌 렌즈 CCD(Charge Coupled Device) 카메라가 출시되면서 디지털 영상을 쉽게 취득할 수 있게 되어 일상적인 활용에서부터 건축, 컴퓨터 비전이나 사진측량과 같은 전문적인 분야에 이르기까지 다양하게 응용할 수 있는 계기가 마련되고 있다. 카메라 검정(camera calibration)은 임의의 영상점과 3차원 실제계상의 임의점과의 기하학적관계를 결정하는 과정에서 발생되는

영상왜곡을 검정하는 과정으로서 카메라 왜곡이 정확하게 검정되어야 영상좌표로부터 정확한 3차원상의 실제 위치를 취득할 수 있으며, 또한 역으로 3차원 실제 좌표로부터 2차원의 영상좌표를 정확히 추정할 수 있다(Cornelis, 2002 ; Salvi 등, 2002 ; Willey 등, 1995). 컴퓨터 시각분야에서의 영상좌표를 이용한 3차원 위치결정이나 실제 3차원 좌표로부터 2차원 영상의 추정에 관한 연구는 수학적인 기하모델식을 통하여 입체 시각 인식 혹은 동적 조영원 등에 의한 3차원 형상 인식이나 로봇의 자동 부품 조립을

1) 정희원 · 경상대학교 건설공학부 도시공학전공 교수, ERI 연구원(E-mail:hhyoo@nongae.gsnu.ac.kr)

2) 정희원 · (주)NGT선임연구원(E-mail:jeongs@ngt.co.kr)

3) 정희원 · 경상대학교 대학원 도시공학과 박사과정(E-mail:kimss333@netian.com)

위한 위치 인식, 시각 검사를 위한 기준점 인식 등의 응용 분야에서 활용되고 있다. 최근 사진측량 분야에서는 소규모 지역을 대상으로 대축척의 상세한 3차원 지형정보 취득이나 선형적인 특정 시설물에 대한 관리와 모니터링을 위하여 기존의 고가의 항공촬영기법을 탈피하여 경비행기나, 헬기, 비행선 등에 고해상력의 CCD 카메라를 탑재하고 이를 GPS나 INS등과 통합하여 대상지역을 항공촬영함으로써 보다 신속하고 저렴하게 GIS 데이터를 취득하려는 연구(유환희 등, 2002 ; 이학균 등, 2002 ; Dare 등, 2000a ; Dare 등, 2000b ; Um 등, 1999)가 수행되고 있다.

현재 상용되고 있는 일반 줌 렌즈 CCD 카메라는 영상을 취득하는데 많은 장점을 갖고 있으나 실제 영상 취득과정에서 기하학적으로 불안정하고 촬영과정에서 다양한 줌의 이동으로 인하여 카메라 렌즈 검정이나 정확한 3차원 위치 결정 시 상당한 어려움이 따른다(Chen 등, 2000 ; Chen 등, 2001 ; Li 등, 1996 ; Salvi 등, 2002 ; Weng 등, 1992).

따라서 본 연구에서는 컴퓨터 시각이나 사진측량분야에서 활용 가능한 고해상의 줌 CCD 카메라를 이용하여 DLT 모델식과 컴퓨터 시각 분야에서 사용되고 있는 Tsai 모델식을 도입·적용하여 자동 줌 렌즈 카메라에 대한 검정 및 3차원 위치 정확도를 분석하였다. 특히 기존의 사진측량에서는 기준점과 대상물점이 같은 공간에 존재하는 경우에 대한 정확도 평가가 주를 이루었으나, 본 연구에서는 기준점이 고정된 공간에 분포하고 대상물이 이격되어 이동할

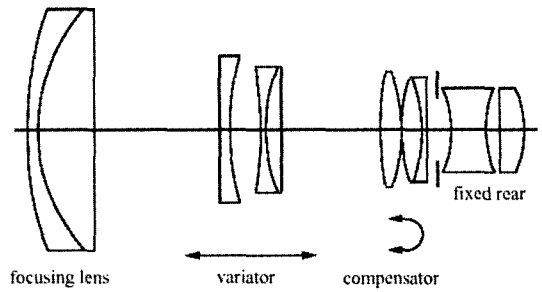


그림 1. 줌렌즈의 구조

경우 3차원 위치 정확도를 분석하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 줌카메라 특성

줌 렌즈 CCD 카메라를 이용한 영상취득시 줌(zoom), 포커스(focus), 구경(aperture)등의 3가지 광학요소가 고려되며, 초점거리 조절을 통하여 다양한 해상도의 영상을 제공하는 줌 렌즈는 초점 렌즈(focusing lens), 줌 렌즈(variator lens), 보조 렌즈(compensator lens)와 같은 몇 개의 조합된 렌즈군으로 구성된다(그림 1).

줌 렌즈의 초점거리는 광축을 따라 렌즈군들이 이동함으로써 포커스와 줌의 변화가 다양하게 발생하게 된다. 초점거리가 변화할 때, 렌즈의 포커스를 일정하게 유지하기

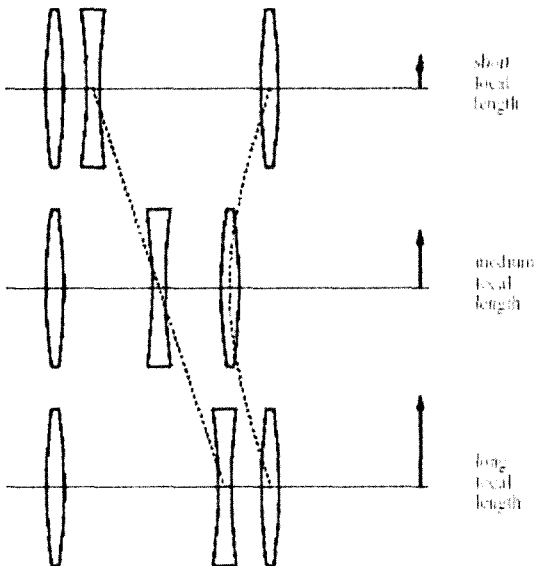
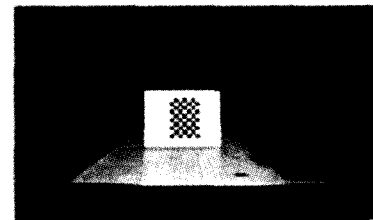
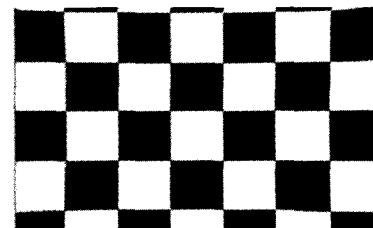


그림 2. 줌 렌즈의 이동에 따른 영상의 크기 변화



(a) 초점거리가 짧은 경우



(b) 초점거리가 길 경우

위하여 그림 2에서처럼 하나의 렌즈 군이 비선형적으로 이동하게 된다. 그림 2는 줌 렌즈가 이동함에 따라 영상이 어떻게 변하는 가를 보여주는 그림으로 줌 아웃(Zoom out) 영상은 짧은 초점거리에서 얻어지는 반면, 줌 인(Zoom in) 영상은 긴 초점거리에서 얻어짐을 알 수 있다.

2.2 줌 카메라의 렌즈 왜곡

이상적인 광학체계에 대한 사진기의 왜곡요소는 그림 3에서처럼 식 (1)의 방사방향 왜곡오차(radial distortion error)와 식 (2)의 접선방향 왜곡오차(tangential distortion error) 등으로 표현된다. 여기서, k_1, k_2, k_3 는 방사방향 왜곡계수, r 은 주점으로부터 방사거리, P_1, P_2 는 접선방향 왜곡계수이다.

$$dr = k_1 r + k_2 r^3 + k_3 r^5 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} d_x &= P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2xy \\ d_y &= 2P_1xy + P_2(r^2 + 2y^2) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta x &= x(k_1 r + k_2 r^3 + k_3 r^5) + P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2xy \\ \Delta y &= y(k_1 r + k_2 r^3 + k_3 r^5) + 2P_1xy + P_2(r^2 + 2y^2) \end{aligned} \quad (3)$$

2.3 줌카메라 검정

2.3.1 Tsai 모델식에 의한 검정

Tsai가 제안한 카메라 모델식은 3차원 공간좌표위의 기준점 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 과 영상 투영점 $P_d(x_d, y_d)$ 간의 관계식, 즉 그림 4에서 선분 $\overline{O_R P_d}$ 가 $\overline{P_{Oz} P_w}$ 와 평행하다는 가정을 통해 3차원 공간 좌표와 영상간의 관계식을 정립하고 카메라 내·외부표정요소를 구한다(Salvi 등, 2002).

우선 식 (4)를 이용하여 대상물 공간좌표 $P(X_w, Y_w, Z_w)$

를 카메라 좌표계의 공간좌표 $P(x, y, z)$ 로 변환한다.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + T \quad (4)$$

식 (5)에서 f (focal length)를 이용하여 카메라 좌표계의 좌표 $P(x, y, z)$ 를 영상좌표계 (x_u, y_u) 로 변환시킨다.

$$x_u = f \frac{x}{z} \quad y_u = f \frac{y}{z} \quad (5)$$

다음 단계에서는 렌즈에 의한 방사방향 왜곡을 고려하여 식 (6)에 의해 (x_u, y_u) 는 왜곡변수 k_1 에 따라 왜곡된 좌표 (x_d, y_d) 로 변환된다.

$$x_d + D_x = x_u, \quad y_d + D_y = y_u \quad (6)$$

여기서, $D_x = x_d(k_1 r)$, $D_y = y_d(k_1 r)$, $r = \sqrt{x_d^2 + y_d^2}$ 이며, 왜곡변수 중 k_1 만을 고려한 이유는 왜곡변수가 증가함에 따른 상관관계를 고려하지 않고 최소 변수만 고려하여 검정하기 위함이다.

마지막으로, 식 (7)과 같이 왜곡을 포함한 영상좌표 (x_d, y_d) 를 센서 영상 좌표계 (X_f, Y_f) 로 변환한다.

$$\begin{aligned} X_f &= s_x d_x^{-1} x_d + C_x \\ Y_f &= d_y^{-1} y_d + C_y \end{aligned} \quad (7)$$

이 때, s_x, d_x, d_y, C_x, C_y 는 각각 scale factor, X/Y방향 CCD소자 간격거리, 영상의 주점좌표를 나타낸다.

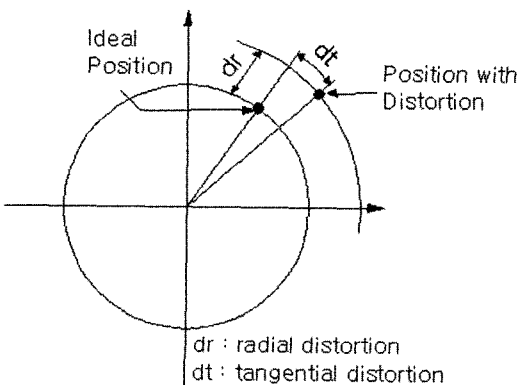


그림 3. 방사왜곡과 접선왜곡

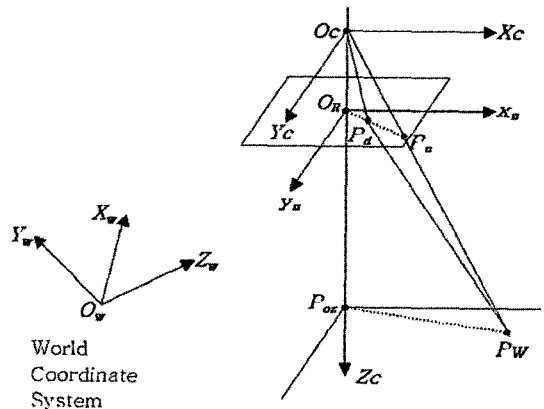


그림 4. Tsai의 카메라 모델

따라서, 식 (7)을 식 (6), (5)에 차례로 대입하면, 식 (8)을 얻을 수 있으며 이 식과 Tsai 카메라 모델의 평행조건에 의해 카메라 내·외부 표정요소를 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} s_x^{-1}d_x'X + s_x^{-1}d_x'Xk_1r^2 &= f \frac{r_1x_w + r_2y_w + r_3z_w + T_x}{r_7x_w + r_8y_w + r_9z_w + T_z} \\ d_yY + d_yYk_1r^2 &= f \frac{r_4x_w + r_5y_w + r_6z_w + T_y}{r_7x_w + r_8y_w + r_9z_w + T_z} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, $\overline{ORP_d} // \overline{OozP_w}$, $\overline{ORP_d} \times \overline{OozP_w} = 0$ 이므로, $(x_d, y_d) \times (X_w, Y_w) = 0$, $x_dY_w - y_dX_w = 0$ 으로 표현될 수 있다.

s_x 의 초기값을 1로 설정하여 모든 점에 대한 왜곡 좌표 값 (x_{di}, y_{di}) 를 초기값으로 설정한다. 주점좌표는 전체 영상의 행, 열의 1/2로 설정한다. 위의 가정 하에 구해진 모든 기준점의 3차원 공간좌표 $P(X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi})$ 에 대하여 아래 식 (9)와 같은 선형방정식의 해를 구한다.

$$\begin{bmatrix} y_{di}x_{wi} \\ y_{di}y_{wi} \\ y_{di}z_{wi} \\ y_{di} \\ -x_{di}x_{wi} \\ -x_{di}y_{wi} \\ -x_{di}z_{wi} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} T_y^{-1}s_xr_1 \\ T_y^{-1}s_xr_2 \\ T_y^{-1}s_xr_3 \\ T_y^{-1}s_xT_x \\ T_y^{-1}r_4 \\ T_y^{-1}r_5 \\ T_y^{-1}r_6 \end{bmatrix} = X_{di} \quad (9)$$

식 (9)로부터 회전 및 평행이동에 관한 R과 (T_x, T_y) 를 구하기 위하여 먼저, a_i 를 다음과 같이 계산한다.

$$\begin{aligned} a_1 &= T_y^{-1}s_xr_1 & a_2 &= T_y^{-1}s_xr_2 \\ a_3 &= T_y^{-1}s_xr_3 & a_4 &= T_y^{-1}s_xT_x \\ a_5 &= T_y^{-1}r_4 & a_6 &= T_y^{-1}r_5 \\ & & a_7 &= T_y^{-1}r_6 \end{aligned} \quad (10)$$

이때, $|T_y|$ 는 식 (11)과 같이 구할 수 있다.

$$|T_y| = (a_5^2 + a_6^2 + a_7^2)^{-1/2} \quad (11)$$

다시 a_1, a_2, a_3 를 이용하여 식 (12)에서 s_x 를 구한다.

$$s_x = (a_1^2 + a_2^2 + a_3^2)^{1/2} |T_y| \quad (12)$$

이 때, T_y 의 부호를 다음과 같은 방법으로 결정한다. 영상으로부터 임의의 점 (X_{fi}, Y_{fi}) 를 선택하고 T_y 의 부호를 양수(positive)로 설정한 후, 식 (13)을 계산한다.

$$\begin{aligned} r_1 &= (T_y^{-1}s_xr_1)T_y s_x^{-1} \\ r_2 &= (T_y^{-1}s_xr_2)T_y s_x^{-1} \\ r_3 &= (T_y^{-1}s_xr_3)T_y s_x^{-1} \\ T_x &= (T_y^{-1}s_xT_x)T_y s_x^{-1} \\ r_4 &= (T_y^{-1}r_4)T_y \\ r_5 &= (T_y^{-1}r_5)T_y \\ r_6 &= (T_y^{-1}r_6)T_y \\ x &= r_1x_{wi} + r_2y_{wi} + r_3z_{wi} + T_x \\ y &= r_4x_{wi} + r_5y_{wi} + r_6z_{wi} + T_y \end{aligned} \quad (13)$$

만약 x 와 x_{di} 의 부호가 같으면, T_y 의 부호는 양수이고 그렇지 않으면 음수가 된다.

식 (14)에서 $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6, T_x$ 를 구한다.

$$\begin{aligned} r_1 &= a_1 T_y s_x^{-1} & r_2 &= a_2 T_y s_x^{-1} \\ r_3 &= a_3 T_y s_x^{-1} & r_4 &= a_4 T_y \\ r_5 &= a_5 T_y & r_6 &= a_6 T_y \\ T_x &= a_7 T_y s_x^{-1} \end{aligned} \quad (14)$$

r_7, r_8, r_9 는 $\text{determinant}(R) = 1$ 이라는 특성과 r_1, r_2, r_3 와 r_4, r_5, r_6 의 외적을 통해 구할 수 있다. 마지막으로 Tsai 카메라 모델의 평행 조건에 따라서 식 (15)와 같이 표현되며,

$$\begin{bmatrix} y_i \\ -a_y Y_{fi} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} f \\ T_z \end{bmatrix} = w_i d_y Y_{fi} \quad (15)$$

이때 y_i 와 w_i 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y_i &= r_4x_{wi} + r_5y_{wi} + r_6z_{wi} + T_y \\ w_i &= r_7x_{wi} + r_8y_{wi} + r_9z_{wi} \end{aligned} \quad (16)$$

따라서, 점정판상의 기준점을 이용하여 f 와 T_z 를 변수로 하는 직선방정식의 해를 구할 수 있다. 이러한 과정을 반복하여 알고자 하는 카메라 내·외부 표정요소들 $(R, T, f, C_x, C_y, k_1, s_x)$ 을 구한다(Tsai, 1987; Willson, 1994). Tsai 모델식의 정확도를 향상시키기 위해 최적화 알고리즘을 적용하는데 처리과정은 다음과 같다. 방사방향 렌즈왜곡계수인 $k_1 = 0$ 즉, 렌즈왜곡을 고려하지 않는 전제조건하에 R, T_x, T_y, S_x 를 선형 방정식(linear optimization)으로 직접 계산한 다음, 동일한 조건하에서 f 와 T_z 를 계산한다. 여기서, f, T_z 에 k_1 를 고려하여 비선형 최적화 기법(non-linear optimization)으로 반복 계산하여 최적의 f, T_z, k_1 를 계산한다. 최적의 f, T_z, k_1 가 구해지면 11개의 내·외부 표정요소에 대하여 다시 비선형식으로 반복 계산하여 최적값을 구한다.

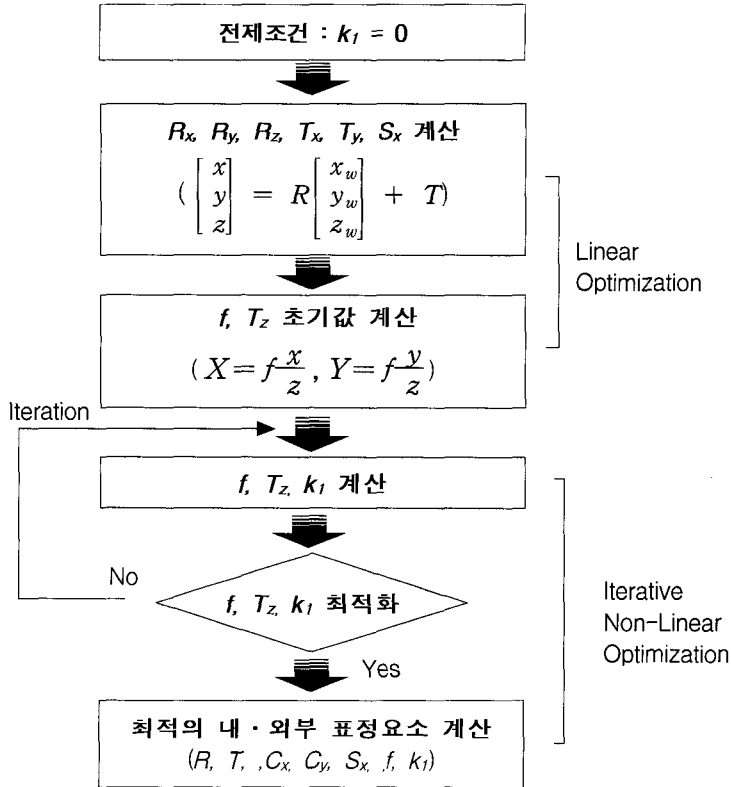


그림 5. Tsai 모델식의 최적화 흐름도

2.3.2 DLT 모델식에 의한 검정

DLT는 카메라의 렌즈 중심과 사진상의 영상점 그리고 이에 대응하는 실제 3차원 공간상의 대상점이 일직선에 놓여야 한다는 공선조건 방정식을 DLT 모델식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 x + \Delta x &= \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \\
 y + \Delta y &= \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1}
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

계산된 $L_1 \sim L_{11}$ 계수값을 이용하여 내부표정요소(x_0, y_0, f)와 외부표정요소($K, \phi, \omega, X_0, Y_0, Z_0$)를 계산한다(유환희 등, 1998).

3. 검정판 제작 및 카메라 제원

3.1 검정판 제작

카메라와 검정 대상물간의 기하학적인 조건은 카메라 검정에 있어 상당한 영향을 미친다. 카메라 렌즈조건이나

촬영거리 변화 등 실험 환경이 변화하면 동일한 형태의 검정판을 이용하더라도 표정요소 계산 결과나 검정 정확도에 영향을 미칠 수 있다(Li 등, 1996). 본 연구에서는 그림 6에서처럼 폭이 30cm이고 두께가 3cm인 직사각형 스티로폴을 벽에 높이차가 발생하도록 증첩하여 붙여서 검정판을 제작하였으며(그림 6), 3차원 해를 구하는 과정에서 동일한 평면에 기준점이 존재하는 경우 발생할 수 있는 singularity를 해결하고자 높이차를 주었다. 또한, 본 연구에 사용된 카메라가 줌 카메라임을 감안하여 검정판 제작에 있어, 줌 인 영상에서도 충분한 수의 검정점들을 취득할 수 있도록 그림 6(b)처럼 검정판 중앙에는 5cm 간격으로 2×2cm 크기의 기준점을 배치하였고, 나머지 가장자리에는 25cm 간격으로 6×6cm 크기의 기준점을 설치하여 검정판을 제작하였다. 그림 6(c)는 데오লা이트(theodolite) 2대를 3.3m 기선으로 설치하여 간접삼각수준측량으로 검정벽면 143점에 대하여 3차원 좌표를 관측하였다. 또한, 검정점의 3차원 위치 결정을 위한 좌표체계는 X축을 기선방향, Z축을 연직 방향, Y축을 광축방향(촬영거리 방향)으로 설정하였다.

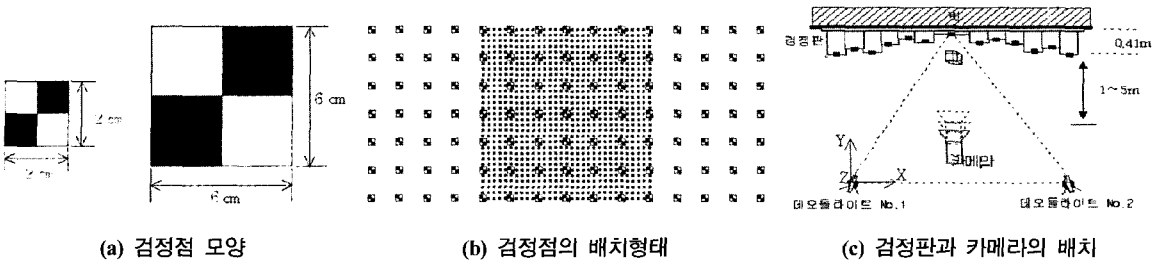
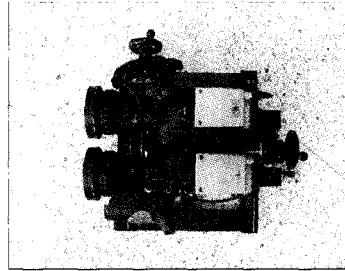
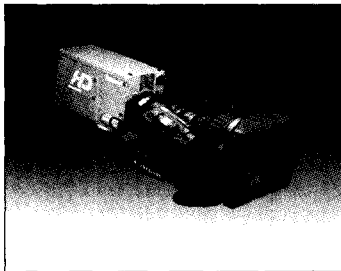


그림 6. 검정판과 촬영조건

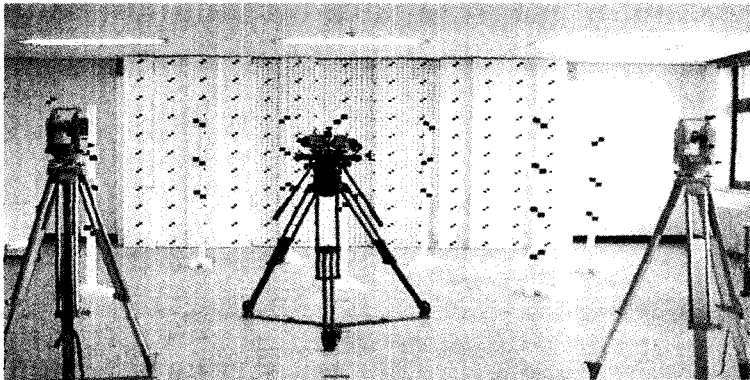
3.2 줌 카메라 제원

본 연구에서는 고화질 방송용카메라인 Ikegami사의 HDL-40 HDTV 카메라 2대를 그림 7(a)와 같이 좌우측에

나란히 장착하여 입체 영상을 취득하였으며, HDL-40 카메라에 대한 세부 사양은 표 1과 같다.



(a) Ikegami사의 HDL-40카메라를 이용한 입체카메라 구성



(b) 카메라 설치와 기준점측량 현황

그림 7. 카메라와 촬영 현황

표 1. HDL-40 세부사양

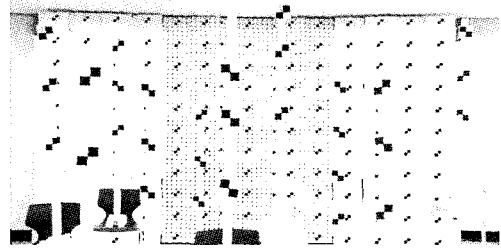
구분	세부내용	구분	세부내용
주사체계	1125(59.94Hz) interlaced	수평해상도	1000 TVL
광학체계	2/3-inch 3 CCD, f1.4	출력신호	HD SDI signal (BNC 2ch): Video signal (1ch):
CCD소자 크기	5 μ m \times 5 μ m	S/N	54dB
유효영상	H1920 \times V1080 (2,200,000 화소)	크기/무게	W90 \times H103 \times D180mm / 1.8kg

4. 줌 카메라 검정 및 3차원 위치 정확도 평가

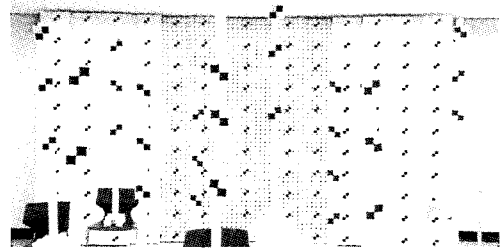
4.1 줌 카메라 검정

본 연구에서는 줌 카메라를 검정하고 3차원 위치 정확도를 평가하기 위해 Tsai 기법과 DLT 기법을 적용하여 분석하였다. 특히 Tsai 기법인 경우 카메라 변수와 3차원 위치 정확도를 향상시키기 위해 최적화과정을 거쳤다. 그림 8(a)와 (b)는 줌 카메라 검정에 사용된 좌우 입체영상을 나타내고 있으며, 검정 벽면에 설치된 143점의 기준점뿐 만 아니라 벽면으로부터 1-4m 범위의 임의의 공간상에 세로로 세운 표척에 30점의 기준점을 설치하여 카메라 검정을 수행하였다.

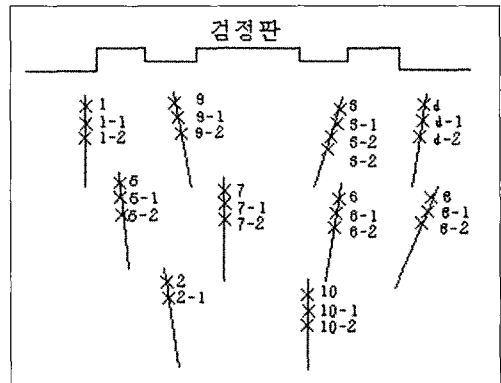
줌 CCD 카메라에 대해 검정판에 설치된 기준점을 이용하여 카메라 요소를 Tsai 모델식과 DLT 모델식으로 계산한 결과 표 2와 같은 결과를 얻었다. 표 2에서 두 모델식에 의해 계산된 카메라 요소들이 미소한 차이를 보이고 있으나, 초점거리나 보정계수(k_l) 및 회전요소 등 일부 요소들은 차이가 있는 것으로 분석되었다. 당초 실험계획은 한국표준과학연구원에서 줌 카메라의 초점위치와 줌 변화에 따른 초점거리 변화량을 정확하게 검정하여 그 값을 검정자료로 고려하고, 줌 변화에 따라 실험을 하여 초점거리 변화에 대한 카메라 요소를 구하려 하였으나 한국표준과학연구원에서 검정자료를 얻을 수 없었으며, 단순히 검정판에 설치된 기준점을 이용하여 초점거리 변화에 따른 카메라 요소를 계산하는 것은 비교평가 기준이 없는 관계로 본 논문에서는 제외시켰다. 그 이유는 실험과정에서 줌 변화량을 정확하게 측정할 수 있는 줌 모터 설치가 어려웠으며, 줌의 변화에 따라 기준점으로 사용되는 점이 변화하여 기하학적으로 변화가 발생하는 관계로 카메라 검정값을 계산하는데 기준점의 배치 및 오차가 미치는 영향을 판별하기가 어렵다고 판단하여 차후 정밀검정에 대한 부분을 보완한 후 연구결과를 발표할 예정이다. 따라서, 본 연구에



(a) 좌측 영상



(b) 우측 영상



(c) 공간상의 기준점 분포

그림 8. 검정 실험영상 및 검정점 배치

서 계산된 카메라 변수에 대한 정확도평가는 할 수 없었으며, 3차원 위치의 정확도만 평가하였다.

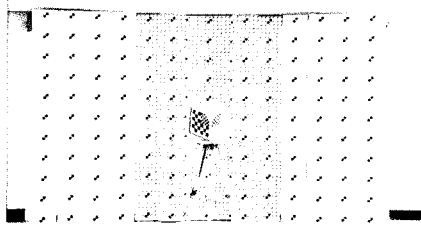
표 2. 줌 카메라 검정 결과

검정식	영상	카메라 내부변수				카메라 외부변수					
		$Xp(\text{pix.})$	$Yp(\text{pix.})$	$f(\text{mm})$	k_l	$k(\text{deg})$	$\phi(\text{deg})$	$\omega(\text{deg})$	$Xo(\text{mm})$	$Yo(\text{mm})$	$Zo(\text{mm})$
Tsai	좌	956.05	569.39	16.74	-6.27e-4	-1.85	-0.74	90.91	1563.3	-991.3	-100.1
	우	949.88	565.12	16.53	-6.26e-4	-1.35	0.12	90.98	1676.1	-816.2	-104.2
DLT	좌	949.39	566.05	13.52	-1.26e-8	-1.82	-0.59	89.16	1578.9	-1001.0	-102.1
	우	939.46	555.67	13.34	-2.21e-8	-1.30	0.41	89.23	1635.4	-1017.0	-106.4

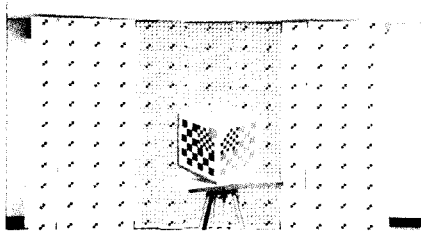
4.2 3차원 위치오차 평가

4.2.1 이격거리별 큐빅 위치오차 평가

본 연구에서는 기준점과 대상물이 같은 공간에 존재하



(a) 이격거리 1m인 경우



(b) 이격거리 4m인 경우

그림 9. 이격거리에 따른 큐빅영상

는 경우를 일반적인 것으로 고려하는 기존의 사진측량방법과는 달리 기준점이 설치된 벽면에서 대상물이 떨어져 위치할 경우 이격거리에 따른 오차를 분석하였다. 이것은 고정된 검정벽면이 있을 때 공간상에서 이동하는 물체의 3차원 위치결정에 활용하기 위해 시도하였다. 우선, 검정벽면으로부터 6m 거리에 카메라를 설치하고, 검정벽면 상의 기준점을 이용하여 카메라 검정을 수행하고 벽면에서부터 일정거리를 둔 큐빅(cubic) 모서리점의 위치를 결정함으로써 기준점이 설치된 벽면과의 이격거리에 따른 대상물의 위치 정확도를 평가하고자 하였다. 실험영상은 큐빅을 1m씩 벽면에서 이격시켜가며 4m까지 촬영하여 취득하였으며, 아래 그림 9(a)는 검정 벽면으로부터 1m(카메라

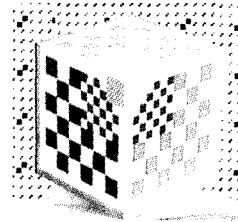


그림 10. 정확도 평가를 위한 큐빅

표 3. 큐빅의 3차원 위치 오차(1)

□:T sai, □:DLT

거리	측점 번호	계산된 큐빅좌표 (cm)			오차 (cm)				거리	측점 번호	계산된 큐빅좌표 (cm)			오차 (cm)			
		X	Y	Z	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔP			X	Y	Z	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔP
1m	1	-	-	-	-	-	-	-	2m	1	-	-	-	-	-	-	-
	2	144.4	490.7	-1.7	1.4	-5.4	-3.9	6.8		2	143.4	397.8	-1.5	2.3	-10.7	-4.2	11.7
		144.3	572.7	-5.8	1.5	-87.4	0.2	87.4		2	140.8	508.9	-4.9	4.9	-121.8	-0.8	121.9
	3	-	-	-	-	-	-	-		3	-	-	-	-	-	-	-
	4	-	-	-	-	-	-	-		4	-	-	-	-	-	-	-
	5	143.2	504.0	-27.2	1.3	-8.9	-4.5	10.1		5	142.9	402.30	-27.7	2.0	-5.9	-4.3	7.6
		144.4	564.1	-32.1	0.1	-69.1	0.2	69.1		5	141.0	510.0	-42.9	3.9	-113.6	10.8	114.2
6	162.6	484.1	-34.9	1.7	-7.4	-4.6	8.9	6	161.7	384.0	-35.1	2.1	-6.7	-4.3	8.2		
	164.0	532.9	-39.5	0.3	-56.1	0.0	56.1	6	168.2	510.09	-55.2	-4.2	-132.8	15.8	133.8		
7	-	-	-	-	-	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-		
오차 평균								8.6	오차 평균								9.2
								70.9									123.3
3m	1	-	-	-	-	-	-	-	4m	1	-	-	-	-	-	-	-
	2	144.0	290.9	-2.0	2.6	-4.9	-3.9	6.8		2	141.1	205.0	-3.6	3.8	-17.9	-2.4	18.5
		145.1	454.0	-12.4	1.5	-168.0	6.5	168.1		2	143.0	373.6	-6.0	1.9	-186.6	0.0	186.6
	3	-	-	-	-	-	-	-		3	163.3	220.0	3.2	2.5	-15.3	-3.0	15.8
	4	-	-	-	-	-	-	-		3	169.7	414.5	2.8	-3.9	-209.8	-2.6	209.8
	5	143.0	299.2	-28.1	2.3	-3.7	-4.0	5.9		4	-	-	-	-	-	-	-
		144.1	447.2	-36.8	1.2	-151.6	4.7	151.7		4	-	-	-	-	-	-	-
6	162.3	272.9	-35.0	2.8	4.2	-4.7	6.9	5	-	-	-	-	-	-	-		
	167.7	448.9	-48.1	-2.6	-171.8	8.4	172.0	5	-	-	-	-	-	-	-		
7	183.2	302.9	-30.1	1.8	-6.9	-3.6	8.0	6	160.3	187.3	-36.6	3.1	-10.5	-2.8	11.3		
	193.2	476.5	-41.8	-8.2	-180.5	8.1	180.9	6	166.5	399.5	-54.1	-3.0	-222.7	14.7	223.2		
오차 평균								6.9	오차 평균								15.2
								168.2									206.5

에서 5m)에서 촬영된 영상이며, 그림 9(b)는 검정 벽면으로부터 4m(카메라에서 2m)에서 촬영된 영상이다. 거리에 따른 대상물 위치 정확도는 그림 10과 같이 큐빅 모서리 점에 대한 관측된 좌표값과 두 모델식을 통하여 계산된 좌표값을 비교하여 그 정확도를 평가하였다.

표 3은 검정 벽면으로부터 큐빅이 1-4m까지 이격된 경우 큐빅 모서리점들의 3차원 위치 오차를 나타내고 있으며, 관측 불가능한 점은 분석에서 제외시켰고, 좌표는 큐빅 중심좌표로 표시하였다. Tsai 및 DLT모델식에 의한 3차원 위치 오차는 검정 벽면에서는 각각 6.8cm, 6.9cm로 나타났다. 그러나 검정 벽면에서 1m 떨어진 큐빅을 3차원 위치를 결정했을 때 Tsai 모델식은 8.6cm, DLT 모델식은 70.9cm 였고, 2m에서는 9.2cm와 123.3cm, 3m에서는 6.9cm와 168.2cm, 4m에서는 Tsai 모델식이 15.2cm, DLT 모델식은 206.5cm였다. 큐빅의 위치가 기준점이 분포된 벽면공간으로부터 이격되면서 기하학적 조건이 불안정해져서 두 모델 모두 X, Z 방향에 비해 촬영거리방향(Y)으로 오차가 크게 발생하였다. 특히 DLT의 경우 검정벽면과 대상물간의 거리가 멀어질수록 촬영거리방향오차, 즉 Y축 오차가 크게 발생하였다. 큐빅을 벽면으로부터 이격시키면서 줌카메라로 촬영할 때 줌과 포커스가 자동으로 변화하는 관계로 카

메라의 내부기하조건도 동시에 변화하는 특성이 있어서 과거 사진측량에서 나타났던 현상에 비해 오차 발생량이 매우 크게 나타나고 있다. 본 연구에서와 같이 기준점과 대상물이 위치한 공간이 이격될 경우, Tsai 모델은 최적화 기법에 의해 3차원 위치결정을 실시하는 것에 반하여 DLT는 이러한 최적화 과정이 없어 오차발생이 큰 것으로 판단된다.

4.2.2 검정 벽면과 공간상에 설치된 기준점을 이용한 위치오차 평가

3차원 위치오차 평가를 위한 2번째 실험으로 검정 벽면에 기준점을 설치하고 큐빅이 이동하는 공간(벽면으로부터 1-4m 범위)에도 표적을 세워 기준점을 설치하였으며, 앞 절의 실험과 동일하게 큐빅을 검정벽면으로부터 이격시키면서 3차원 위치 정확도를 평가하였다.

표 4는 검정판 벽면과 공간상의 기준점을 이용하여 카메라 검정을 수행하고 큐빅이 이동하는데 따른 3차원 위치오차를 나타낸 것으로서, 검정 벽면에서 1m 떨어진 큐빅을 위치 결정했을 때 Tsai 모델식의 오차가 1.3 cm, DLT 모델식은 9.7cm였고, 2m에서는 1.8cm과 5.3cm, 3m에서는 2.8cm와 8.7cm, 4m에서는 4.6cm와 6.4cm였으며, 이격거

표 4. 큐빅의 3차원 위치 오차(2)

□:Tsai, □:DLT

거리	측점 번호	계산된 큐빅좌표 (cm)			오차(cm)				거리	측점 번호	계산된 큐빅좌표 (cm)			오차(cm)					
		X	Y	Z	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔP			X	Y	Z	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔP		
1m	1	-	-	-	-	-	-	-	2m	1	-	-	-	-	-	-	-		
	2	145.4	484.3	-5.5	0.4	1.0	-0.1	1.1		144.8	388.3	-5.2	0.9	-1.2	-0.6	1.6			
		145.8	485.2	-5.3	0.0	0.2	-0.3	0.4		145.5	390.7	-5.2	0.2	-3.6	-0.5	3.6			
	3	-	-	-	-	-	-	-		3	-	-	-	-	-	-	-		
	4	-	-	-	-	-	-	-		4	-	-	-	-	-	-	-		
	5	143.8	498.4	-31.6	0.7	-3.4	-0.3	3.5		5	144.3	398.8	-31.5	0.7	-2.3	-0.5	2.5		
		144.8	487.6	-31.4	-0.8	0.4	-0.5	0.4			144.6	401.1	-32.1	0.3	-4.6	0.0	4.6		
		163.5	276.8	-40.41	0.9	1.1	-0.7	1.6		6	163.2	376.5	-38.7	0.8	0.8	-0.7	1.3		
		165.4	273.1	-40.7	0.1	-21.1	1.1	21.1			164.2	385.0	-40.3	-0.3	-7.7	0.9	7.8		
	7	-	-	-	-	-	-	-		7	-	-	-	-	-	-	-		
	오차 평균									1.3	오차 평균								1.8
										9.7									5.3
	3m	1	-	-	-	-	-	-		-	4m	1	-	-	-	-	-	-	-
		2	146.4	288.9	-5.5	0.2	-2.9	-0.4		2.9		2	144.1	189.5	-5.7	0.7	-2.5	-0.3	2.6
146.4			277.2	-6.4	0.2	8.8	0.5	8.8	144.2	181.6			-5.1	0.7	5.5	-0.8	5.6		
3		-	-	-	-	-	-	-	3	165.2		212.5	1.0	0.6	-7.8	-0.8	7.9		
4		-	-	-	-	-	-	-		166.9		200.5	2.1	-1.1	4.2	-1.9	4.7		
5		144.9	299.6	-31.9	0.4	-4.0	-0.3	4.0	4	-		-	-	-	-	-	-		
		145.4	282.7	-31.7	0.1	12.9	-0.4	12.9		5		-	-	-	-	-	-	-	
		164.3	276.8	-39.1	0.8	0.4	-0.6	1.1	6	162.5		179.8	-39.0	0.9	-3.0	-0.4	3.2		
165.4		273.1	-40.4	-0.3	4.1	0.6	4.2	163.9		167.8		-41.0	-0.5	8.9	1.5	9.0			
6		164.3	179.8	-39.0	0.9	-3.0	-0.4	3.2	7	-		-	-	-	-	-	-		
7		163.9	167.8	-41.0	-0.5	8.9	0.9	9.0	오차평균								4.6		
오차평균								2.8									6.4		
								8.7											

리에 따른 오차 영향 보다는 관측상 발생하는 오차에 의해 3차원 위치 오차 크기가 나타나는 것으로 볼 수 있다고 판단된다. 따라서, 앞 절의 결과와는 다르게 기준점이 큐빅 이동공간에 함께 분포함으로써 두 방법에 대한 위치오차 차이가 크지 않음을 알 수 있었다. 즉, 기준점을 대상물이 위치한 공간에 함께 배치할 경우에 두 방법에 의한 3차원 위치 정확도는 비슷하였으나, 기준점과 대상물이 이격되는 경우 Tsai에 비해 DLT가 매우 민감하게 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

5. 결론 및 향후과제

현실적으로 정확한 카메라 검정자료를 취득하기 어려운 줌 CCD 카메라를 컴퓨터 시각이나 사진측량분야에서 활용하기 위하여 Tsai 기법과 DLT 기법으로 카메라 검정을 수행하고 특정 대상물에 대하여 3차원 위치 정확도를 평가함으로써 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 기준점을 대상물이 위치한 공간에 함께 배치할 경우에 Tsai와 DLT모델식에 의한 3차원 위치결정 정확도는 두 방법 모두 비슷하였으나, 기준점과 대상물이 이격되는 경우 Tsai에 비해 DLT가 매우 민감하게 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

2. 기준점이 배치된 공간과 이격된 공간에서 움직이는 대상물에 대한 3차원 위치 결정을 실시할 경우 Tsai 모델식의 적용이 기대되며, 이런 경우에 대한 DLT모델의 정확도 향상을 위한 연구와 줌과 포커스변화에 따른 카메라 변수값의 분석도 정밀 카메라검정과정을 거쳐 향후 연구되어야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

유환희, 조해용, 송영선 (1998), 카메라와 테오도라이트를 이용한 실시간 3차원 위치결정시스템 개발, 대한토목학회논문집, 18권, III-2호, pp. 195-205.
 유환희, 제정형, 김성삼 (2002), 비행선촬영시스템을 이용한 영상

지도 제작, 한국측량학회지, 제20권 제1호, pp. 59-67.
 이학균, 제정형, 김기열, 유환희 (2002), 항공 비디오 영상의 Geo-Correction, 2002년도 학술발표회 논문집, 대한토목학회.
 Chen, D. B. and Huang, Y. D. (2000), Automated Calibration of a Zoom Lens CCD Image System For VideoGrammetry, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIII, Part B4, pp. 180-185.
 Chen, Y. S., Shih, S. W., Hung, Y. P., and Fuh, C. S. (2001), Simple and Efficient Method of Calibrating a Motorized Zoom Lens, *Image and Vision Computing*, Vol. 19, No. 14, pp. 1099-1110.
 Cornelis, K., Pollefeys, M. and Gool, L. V. (2002), Lens distortion recovery for accurate sequential structure and motion recovery, *ECCV*, pp. 186-200.
 Dare, P. M. and Fraser, C. S. (2000a), Linear infrastructure mapping using airborne video imagery and subsequent integration into a GIS. *In proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*.
 Dare, P. M., Fraser, C. S. and Judd, M. (2000b), Linear infrastructure mapping using airborne video imagery. *In proceedings of the ASPRS Annual Conference*, Washington DC.
 Mengxiang, L. and Lavest, J. M. (1996), Some Aspects of Zoom Lens Camera Calibration, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 18, No. 11, pp. 1105-1110.
 Salvi, J., Armangue, X. and Batle, J. (2002), A Comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation, *Pattern Recognition* 35, pp. 1617-1635.
 Tsai, R. Y. (1987), 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 Automation*, Miami, Florida, June 22-26.
 Um, J. S. and Wright, R. (1999), Video Strip Mosaicking: a two-dimensional approach by convergent image bridging, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 20, No. 10, 10th July, pp. 2015-2032.
 Weng, J., Cohen, P., and Herniou, M. (1992), Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 14, No. 10, pp. 965-980.
 Willey, A. G. and Wong, K. W. (1995), Geometric Calibration of Zoom Lenses for Computer Vision Metrology, *PE&RS*, Vol. 61, No. 1, pp. 69-74.
 Willson, R. G. (1994), *Modeling and Calibration of Automated Zoom Lenses*, Ph D dissertation, Carnegie Mellon University.

(접수일 2003. 7. 23, 심사일 2003. 8. 12, 심사완료일 2003. 9. 27)