

줌 렌즈 CCD 카메라를 이용한 3차원 복원 정확도 평가

Evaluation for 3-D Reconstruction Accuracy Using Zoom-lens CCD Camera

김성삼* · 정상용** · 박홍기*** · 유환희****

Kim, Seong Sam · Jeong, Sang Yong · Park, Hong Gi · Yoo, Hwan Hee

- * 경상대학교 대학원 도시공학과 박사과정(055-751-5321; kimss333@netian.com)
- ** (주)NGT(02-3012-2319; jeongs@ngt.co.kr)
- *** 경원대학교 토목환경공학과 교수(031-750-5339; hgpark@mail.kyungwon.ac.kr)
- **** 경상대학교 건설공학부 도시공학전공 교수(055-751-5321; hhyoo@nongae.gsnu.ac.kr)

요 旨

최근 고해상력을 가진 줌 렌즈 CCD(Charge Coupled Device) 카메라가 출시되면서 디지털 영상을 쉽게 취득할 수 있게 되어 일상적인 활용에서부터 컴퓨터 시각(computer vision)이나 사진측량과 같은 전문적인 분야에 이르기까지 다양하게 응용할 수 있는 계기가 마련되고 있다. 현재 상용되고 있는 일반 줌 렌즈 CCD 카메라는 영상을 취득하는 데 많은 장점을 갖고 있으나 실제 영상 취득과정에서 다양한 줌의 이동으로 인하여 표정요소계산 및 카메라 렌즈 오차검정에 상당한 어려움이 발생하여 이에 대한 연구가 진행되어오고 있다.

본 연구에서는 기존에 비측량용 카메라에서 취득된 영상을 해석하는 기법으로 사진측량 분야에서 사용되어온 DLT(Direct Linear Transformation) 모델식과 컴퓨터 시각(computer vision)분야에서 카메라 검정 및 3차원 복원에 사용되고 있는 Tsai 모델식을 도입·적용하여 표정요소계산 및 3차원 복원정확도를 비교·분석하였다. 그 결과 Tsai 모델식에 의한 결과가 DLT 모델식에 의한 결과보다 정확도 및 안정성면에서 향상된 결과를 보여주고 있어서 Tsai 모델식에 대한 사용이 기대된다.

1. 서론

카메라 검정(camera calibration)은 임의의 영상점과 3차원 실세계상의 임의점과의 기하학적관계를 결정하는 과정에서 발생하는 영상왜곡을 검정하는 것으로서 카메라 왜곡이 정확하게 검정되어야 영상좌표로부터 정확한 3차원상의 실제 위치를 취득할 수 있으며, 또한 역으로 3차원 실제 좌표로부터 2차원의 영상좌표를 정확히 추정할 수 있다. 사진측량 분야에서는 소규모 지역을 대상으로 대축척의 상세한 3차원 지형정보 취득이나 선형적인 특정 시설물에 대한 관리와 모니터링을 위하여 기존의 복잡하고 고가의 항공촬영기법을 탈피하여 경비행기나, 헬기, 비행선 등에 고해상력의 CCD 카메라를 탑재하고 이를 GPS나 INS 등과 통

합하여 대상지역을 항공촬영함으로써 보다 정밀한 GIS 데이터를 취득하려는 연구가 수행되고 있다. 영상좌표를 이용한 3차원 위치결정은 스테레오 시각 인식 혹은 동적 조명원 등에 의한 3차원 형상 인식이나 로봇의 자동 부품 조립을 위한 위치 인식, 시각 검사를 위한 기준점 인식 등의 응용분야에서 필요하며, 실제 3차원 좌표로부터 2차원 영상의 추정은 모델식을 이용한 시각 검사나 조립 등의 응용분야에서 활용되고 있다.

현재 상용되고 있는 일반 줌 렌즈 CCD 카메라는 영상을 취득하는 데 많은 장점을 갖고 있으나 실제 영상 취득과정에서 기하학적으로 불안정하고 촬영과정에서 다양한 줌의 이동으로 인하여 카메라 렌즈 검정이나 정확한 3차원 복원에 상당한 어려움이

따른다.

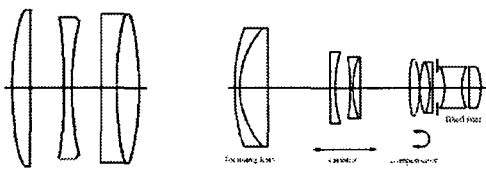
따라서 본 연구에서는 컴퓨터 시각이나 사진측량분야에서 활용 가능한 고해상의 줌 CCD 카메라를 이용하여 DLT 모델식과 컴퓨터 시각 분야에서 사용되고 있는 Tsai 모델식을 도입·적용하여 자동 줌 렌즈 카메라에 대한 검정 및 3차원 복원 정확도를 분석하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 줌카메라 특성

줌렌즈 CCD 카메라의 광학요소에는 줌(zoom), 포커스(focus), 구경(aperture)등으로 구성된다. 줌은 초점거리를 변화시켜 다른 해상도를 갖는 영상을 취득할 때 사용되고, 포커스는 촬영 거리가 변했을 때 피사체의 초점을 맞추거나 초점이 맞지 않는 영상에서의 심도(depth of field)를 구할 때 사용되며, 구경은 렌즈를 통해 입사되는 광선의 양을 조절하는 데 사용된다.

줌 렌즈는 초점렌즈부분(focusing lens group), 줌 렌즈부분(zoom lens group), 보조 렌즈 부분(auxiliary lens)과 같은 몇 개의 조합된 렌즈군으로 구성되어 있다(그림 1).



a. 단일 초점렌즈 b. 줌 렌즈
그림 1. 단일 초점렌즈와 줌렌즈

포커스와 줌의 변화가 다양한 줌 렌즈의 초점거리는 광축을 따라 렌즈군들 사이로 이동함으로써 변하게 된다. 초점거리가 변화할 때, 렌즈의 포커스를 일정하게 유지하기 위하여 그림 2에서처럼 하나의 렌즈 군이 비선형적으로 이동하게 된다. 그림 2는 줌 렌즈가 이동함에 따라 영상이 어떻게 변하는 가를 보여주고 있는 데, 줌 아웃(Zoom

out) 영상은 짧은 초점거리에서 얻어지는 반면, 줌 인(Zoom in)영상은 긴 초점거리에서 얻어짐을 알 수 있다.

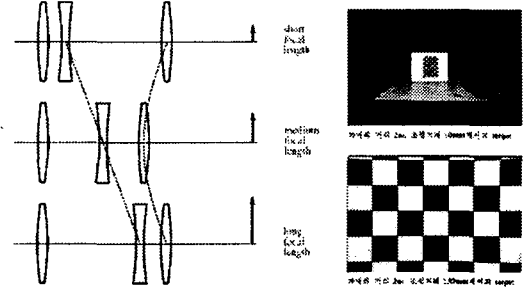


그림 2. 줌 렌즈의 이동에 따른 영상의 변화

2.2 줌 카메라의 렌즈 왜곡

이상적인 광학체계에 대한 사진기의 왜곡은 방사방향오차(radial distortion error)와 접선방향오차(tangential distortion error) 등이 있으며, 방사방향왜곡과 접선방향왜곡은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta r = k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7 + \dots \quad (1)$$

$$\begin{aligned} d_x &= P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2xy(1 + p_3r^2 + \dots) \\ d_y &= 2P_1xy + P_2(r^2 + 2x^2)(1 + p_3r^2 + \dots) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, k_1, k_2, k_3 는 방사왜곡계수, r 은 주점에서의 방사거리(radial distance), P_1, P_2, P_3 는 렌즈 편심왜곡의 계수이다.

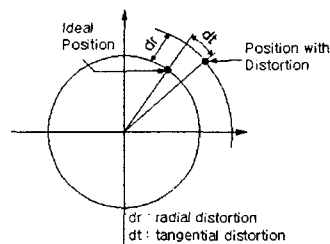


그림 3. 방사왜곡과 접선왜곡

2.3 줌카메라 검정

2.3.1 Tsai 모델식에 의한 검정

그림 3은 3차원 공간좌표 $P(x_w, y_w, z_w)$

와 방사왜곡에 의해 영상에 투영된 좌표 $Pd(X_d, Y_d)$, 방사왜곡이 없는 영상좌표 $Pu(X_u, Y_u)$ 는 방사왜곡 정도나 카메라와의 거리에 상관없이 항상 식 (3)과 같은 평행한 조건이 성립한다는 평행조건(parallelism constraint)을 가정한 Tsai 카메라 모델을 나타낸다.

$$\overline{O_dPd} \parallel \overline{P_{oz}P} \parallel \overline{O_uPu} \quad (3)$$

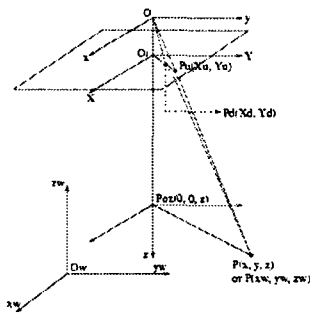


그림 4. Tsai의 카메라 모델

Tsai의 검정 방법은 식 (3)의 평행 제한 조건을 기반으로 하여 3차원 공간좌표위의 기준점과 영상 투영점간의 관계식을 통해 카메라 내·외부표정요소를 구한다.

아래 그림은 이러한 가정하에 3차원 공간 좌표 $P(x_w, y_w, z_w)$ 로부터 센서 영상 좌표 계로 변환하는 과정을 나타낸다.

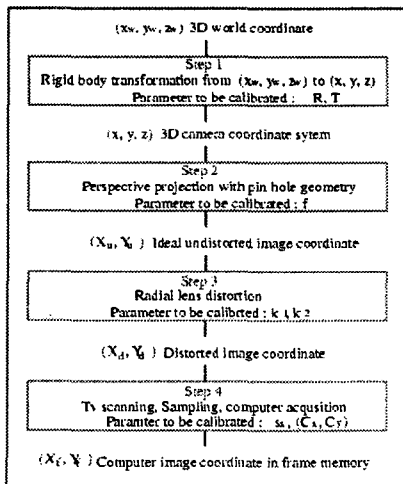


그림 5. 카메라 내·외부표정요소 계산 과정

검정 계산 과정은 먼저 초기값을 s_x 는 1로 초기화하여 모든 점에 대한 왜곡 좌표값 (X_{di}, Y_{di}) 를 초기값으로 설정한다. 주점좌표는 전체 영상의 행, 열의 1/2로 설정한다.

위의 가정 하에 구해진 모든 점(control point)의 3차원 공간좌표 $P(X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi})$ 에 대하여 아래 식(4)와 같은 선형방정식의 해를 구한다. 식 (4)의 $T_y^{-1}s_xr_1, T_y^{-1}s_xr_2, T_y^{-1}s_xr_3, T_y^{-1}s_xT_x, T_y^{-1}r_4, T_y^{-1}r_5, T_y^{-1}r_6$ 로부터 회전 및 평행이동에 관한 R 과 (T_x, T_y) 를 구해야 하는 데 먼저, a_i 를 다음과 같이 구해야 한다.

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

이때, $|T_y|$ 는 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$|T_y| = (a_5^2 + a_6^2 + a_7^2)^{-1/2} \quad (5)$$

다시 a_1, a_2, a_3 를 이용하여 식 (6)에서 s_x 를 구한다.

$$s_x = (a_1^2 + a_2^2 + a_3^2)^{1/2} |T_y| \quad (6)$$

이 때, T_y 의 부호를 다음과 같은 방법으로 결정한다.

영상으로부터 임의의 점 (X_{fi}, Y_{fi}) 를 선택하고 T_y 의 부호를 +1로 설정한 후, 식 (7)을 계산한다.

$$\begin{aligned} r_1 &= (T_y^{-1}s_xr_1)T_y s_x^{-1} \\ r_2 &= (T_y^{-1}s_xr_2)T_y s_x^{-1} \\ r_3 &= (T_y^{-1}s_xr_3)T_y s_x^{-1} \\ T_x &= (T_y^{-1}s_xT_x)T_y s_x^{-1} \\ r_4 &= (T_y^{-1}r_4)T_y \\ r_5 &= (T_y^{-1}r_5)T_y \\ r_6 &= (T_y^{-1}r_6)T_y \\ x &= r_1x_{wi} + r_2y_{wi} + r_3z_{wi} + T_x \\ y &= r_4x_{wi} + r_5y_{wi} + r_6z_{wi} + T_y \end{aligned} \quad (7)$$

$$[Y_{di}x_{wi} \ Y_{di}y_{wi} \ Y_{di}z_{wi} \ Y_{di} \ -X_{di}x_{wi} \ -X_{di}y_{wi} \ -X_{di}z_{wi}] \begin{bmatrix} T_y^{-1}s_x r_1 \\ T_y^{-1}s_x r_2 \\ T_y^{-1}s_x r_3 \\ T_y^{-1}s_x T_x \\ T_y^{-1}r_4 \\ T_y^{-1}r_5 \\ T_y^{-1}r_6 \end{bmatrix} = X_{di} \quad (4)$$

만약 x 와 X_{di} 의 부호가 같으면, T_y 의 부호는 +1이고, 그렇지 않으면 -1이 된다.

이제, 식 (8)에서 $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6, T_x$ 를 구한다.

$$\begin{aligned} r_1 &= a_1 T_y s_x^{-1} & r_2 &= a_2 T_y s_x^{-1} \\ r_3 &= a_3 T_y s_x^{-1} & T_x &= a_4 T_y s_x^{-1} \\ r_4 &= a_5 T_y & r_5 &= a_6 T_y \\ & & r_6 &= a_7 T_y \end{aligned} \quad (8)$$

r_7, r_8, r_9 는 determinant(R) = 1이라는 특성과 r_1, r_2, r_3 와 r_4, r_5, r_6 의 외적을 통해 구할 수 있다. 마지막으로 Tsai 카메라 모델의 Parallelism 제한 조건에 따라서 식 (9)와 같이 표현되며,

$$[y_i \ -d_y Y_{fi}] \begin{bmatrix} f \\ T_z \end{bmatrix} = w_i d_y Y_{fi} \quad (9)$$

이때 y_i 와 w_i 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y_i &= r_4 x_{wi} + r_5 y_{wi} + r_6 z_{wi} + T_y \\ w_i &= r_7 x_{wi} + r_8 y_{wi} + r_9 z_{wi} \end{aligned}$$

따라서, 여러개의 GCP를 통해 f 와 T_z 를 변수로 하는 직선방정식의 해를 구할 수 있다. 이렇게 알고자 하는 카메라 내·외부 표정요소 $R, T, f, C_x, C_y, k_1, s_x$ 등을 구한다.

2.3.2 DLT 모델식에 의한 검정

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

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

식 (10)에서 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.

3. 검정판 제작 및 촬영

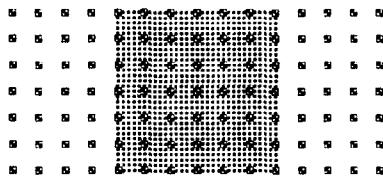
3.1 Test-field 계획

3.1.1 검정판 제작과 3차원좌표 계산

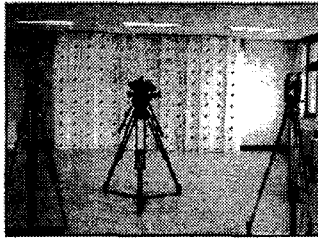
카메라와 검정 대상물(calibration object) 간의 기하학적인 조건은 카메라 검정에 있어 상당한 영향을 미친다. 본 연구에서는 그림 6에서처럼 0.3×2.5×0.03m 크기의 높이가 서로 다른 형태의 스티로폼 14개(4.2m)를 횡으로 붙여서 검정판을 제작하여 3차원해를 구하는 과정에서 높이가 동일한 평면에서 발생할 수 있는 singularity를 해결하고자 하였다. 연구에서 사용되는 카메라가 줌 카메라임을 감안하여 줌 인 영상에서도 충분한 수의 검정점들을 취득할 수 있도록 그림 6(a)처럼 검정판 중앙부분에는 5cm 격자마다 2×2cm 크기의 검정 타겟을 설치하였으며, 나머지 부분은 30×25cm 간격으로 6×6cm 크기의 검정판을 설치하였다. 그림 6(b)는 Test-field의 전경으로 데오도라이트(theodolite) 2대를 3.3m 기선으로 설치하여 간접삼각수준측량으로 검정벽면 143점에 대하여 3차원 좌표를 관측하였으며, 벽면에서 카메라 방향으로 다양한 거리(1~7m)에서 촬영이 가능하도록 하였다.

좌표축은 X축을 기선방향, Y축을 광축방향(촬영거리 방향), Z축을 연직 방향으로 설

정하였다.



a. 검정판 패턴



b. test-field 전경

그림 6. 검정판 패턴과 test-field 전경

3.1.2 줌 카메라

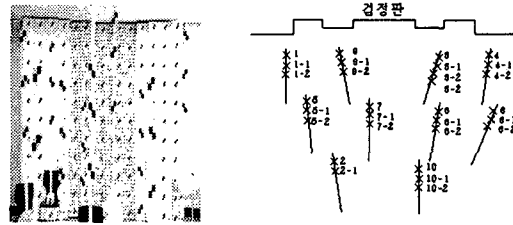
본 연구를 수행하기 위하여 HDL-40 HDTV 카메라(2/3" CCD, 8~120mm 줌, 2,200,000 영상소) 2대를 장착하여 입체 영상을 취득하였으며, 약 1~5m의 촬영거리에서 줌 카메라 검정 및 3차원 복원 정확도에 관한 실험을 수행하였다.

4. 줌 카메라 검정 및 3차원 복원 정확도 검정

4.1 줌 카메라 검정

본 연구에서는 줌 렌즈 카메라 모델을 DLT 기법과 Tsai 모델에 의한 단초점 렌즈 모델로 정립하고 각각의 카메라 내외부 표정요소들을 계산하였다. 그림 7은 줌 카메라 검정에 사용된 영상으로, 검정 벽면에 143점의 GCP와 검정 벽면에서 일정한 거

리에 세운 표척에 GCP 30점을 설치하여 카메라 검정을 수행하였다.



a. 영상

b. 공간상의 GCP 설치

그림 7. 검정 실험영상 및 검정점 배치

표 1은 그림 7(a)의 영상을 이용하여 Tsai의 non-coplanar 모델식과 DLT 모델식을 적용하여 계산된 카메라 표정요소를 나타내고 있다. 두 모델을 통해 계산된 카메라 내·외부 표정요소가 미소한 차이를 보이고 있음을 확인할 수 있었다.

4.2 3차원 복원오차 평가

4.2.1 거리별 큐빅 복원오차 평가

Tsai 모델식과 DLT 모델식의 3차원 복원오차 평가는 2가지 실험조건에서 수행되었다. 우선, 검정 벽면에서 약 6m 거리에 카메라를 설치하여 검정벽면에 설치한 GCP를 활용하여 카메라 검정을 수행하고 벽면에서부터 일정거리를 둔 큐빅(cubic)에 그 결과를 적용함으로써 검정 벽면과의 거리에 따른 대상물의 복원 정확도를 평가하고자 하였다. 큐빅을 1m씩 벽면에서 이격시켜가며 5m까지 촬영하였으며, 아래 그림 8(a)는 검정 벽면으로부터 1m, 카메라에서 약 5m 거리에서 촬영된 영상이며, 그림 8(b)는 검정판으로부터 4m, 카메라에서 약 2m 떨어진 거리에서 촬영된 영상이다. 거리에 따른 대상물 복원 정확도는 데오들라이트를 이용

표 1. 줌 카메라 검정 결과

검정방식	Scenc	카메라 내부변수						카메라 외부변수					
		Xp (pix)	Yp (pix)	f	$k1$	$k2$	$k3$	k (deg)	ϕ (deg)	ω (deg)	Xo	Yo	Zo
Tsai	L	956.05	569.39	16.74	-6.27e-4	-	-	-1.85	-0.74	90.91	1563.35	-1092.0	-70.36
	R	949.88	565.12	16.53	-6.26e-4	-	-	-1.35	0.12	90.98	1676.1	-1089.0	-74.77
DLT	L	949.39	566.05	13.52	-1.26e-8	-	-	0.34	-1.47	90.33	1563.5	-1099.0	-69.95
	R	939.46	555.67	13.34	-2.21e-8	-	-	0.48	-0.58	90.31	1676.1	-1097.0	-74.95

하여 그림 9에서처럼 큐빅의 5~7개의 모서리 점을 관측한 3차원 좌표값과 두 모델식을 통하여 계산된 좌표값을 비교하여 그 정확도를 평가하였다.

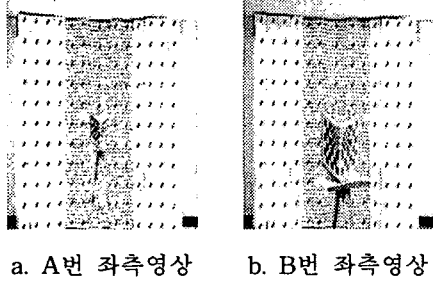


그림 8. 큐빅 3차원 복원 실험영상

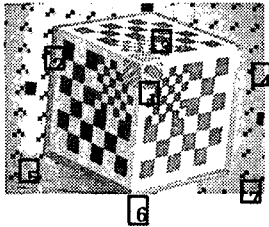


그림 9. 복원 정확도 평가를 위한 큐빅 관측점

표 2는 검정판 벽면과 1m 거리(A번 영상)와 4m 거리(B번 영상)에 있는 큐빅 모서리의 복원 오차를 나타내고 있다. GCP가 설치된 벽면에서 검사점을 취득하여 3차원 위치오차를 분석한 결과 Tsai 및 DLT 모델식에 대한 RMSE는 각각 6.8cm, 6.9cm로 나타났다. 또한 검정 벽면에서 1m 떨어진 큐빅을 3차원 복원했을 때 Tsai 모델식의 RMSE가 8.6cm, DLT 모델식은 70.9cm였고, 4m 떨어진 큐빅을 복원했을 때 Tsai 모델식은 15.2cm, DLT 모델식은 206.5cm였다. 촬영거리에 비해 좌·우측 카메라 간의 촬영기선이 짧아 기하학적으로 불안정한 촬영조건 때문에 두 모델 모두 X, Z 방향에 비해 촬영거리방향(Y)으로 상대적으로 오차가 크게 발생하였다. 특히 DLT의 경우 벽면상의 좌·우, 상·하 방향으로 발생하는 X, Z축에서는 1 cm 내외의 정확도를 보였지만 검정벽면과 복원 대상물간의 거리가 멀어질수록 촬영거리방향으로 발생하는 Y의 오차가 크게 발생함으로써 촬영거리방향의 GCP 배치조건에 따라 상당한 영향을 받

고 있음을 알 수 있었다. 표 2 중 오차분석에서 누락된 측정점들은 좌·우측 영상에서 동시 관측이 불가하여 검사점에서 생략하였다.

표 2. 큐빅 복원 오차(1) □:Tsai, ■:DLT

거리	측점 번호	계산된 큐빅좌표 (cm)			오차 (cm)				
		X	Y	Z	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔP	
1m	1	-	-	-	-	-	-	-	
	2	144.4	490.7	-1.7	1.4	-5.4	-3.9	6.8	
		144.3	572.7	-6.8	1.5	-87.4	0.2	87.4	
	3	-	-	-	-	-	-	-	
	4	-	-	-	-	-	-	-	
	5	143.2	504.0	-27.2	1.3	-8.9	-4.5	10.1	
		144.4	564.1	-32.1	0.1	-69.1	0.2	69.1	
4m	6	162.6	484.1	-34.9	1.7	-7.4	-4.6	8.9	
		164.0	532.9	-39.6	1.3	-56.1	0.0	56.1	
	7	-	-	-	-	-	-	-	
	오차 평균								8.6
									70.9
	1	-	-	-	-	-	-	-	
	2	141.1	205.0	-3.6	3.8	-17.9	-2.4	18.5	
	143.0	373.6	-6.0	1.9	-186.6	0.0	186.6		
3	163.3	220.0	3.2	2.5	-15.3	-3.0	15.8		
	169.7	414.5	2.8	-3.9	-203.6	-2.6	203.6		
4	-	-	-	-	-	-	-		
6	160.3	187.3	-36.6	3.1	-10.5	-2.8	11.3		
	166.5	399.5	-54.1	-3.0	-222.7	14.7	223.2		
오차 평균								15.2	
								206.5	

그림 9, 10은 두 모델식에서 벽면 GCP만으로 대상물을 3차원 복원했을 때 거리별로 X, Y 방향으로 발생하는 오차를 나타낸 그림이다. Z 방향의 오차는 X 방향오차와 비슷한 크기와 특성을 보이고 있어서 생략하고 X, Y오차만 표시하였다.

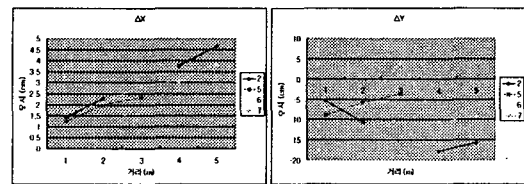


그림 9. Tsai 3차원 X, Y 복원오차(실험 1)

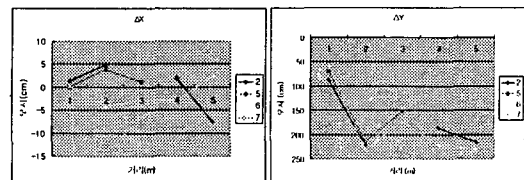


그림 10. DLT 3차원 X, Y 복원오차(실험 2)

4.2.2 검정판 벽면 GCP와 공간상 GCP 이용한 복원오차 평가

3차원 복원오차 평가를 위한 2번째 실험 환경으로 검정판 벽면상에 GCP를 설치하고 그림 7(b)에서처럼 검정판에서 일정한 거리에 세운 표적에 GCP를 설치하여 카메라 검정을 수행한 후 검정판 벽면과 표적 사이에 있는 큐빅 모서리점들을 검사점으로 하여 두 모델에 대한 복원 정확도를 평가해 보았다.

표 3은 검정판 벽면과 공간상의 GCP를 이용하여 카메라 검정을 수행하고 큐빅을 실제 관측한 값과 모델식을 통해 계산된 값과의 오차를 평가한 표이다. 검정벽면과 공간상의 GCP를 이용하여 카메라 검정을 수행하고 검정 벽면에서 1m 떨어진 큐빅을 복원했을 때 Tsai 모델식의 RMSE가 1.3cm, DLT 모델식은 9.7cm였고, 4m 떨어진 큐빅을 복원했을 때 Tsai 모델식의 RMSE는 4.6cm, DLT 모델식은 6.4cm였다. GCP 사이에 큐빅이 놓임으로써 촬영 방향으로 기하학적으로 안정되면서 Y축 오차가 상당히 향상됨으로써 DLT 모델식이 Tsai 모델식보다 촬영거리방향으로 GCP 배치에 따라 민감한 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

표 3. 큐빅 복원 오차(2) □:Tsai, ▣:DLT

거리	측점 번호	계산된 큐빅좌표 (cm)			오차(cm)			
		X	Y	Z	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔP
1m	1	-	-	-	-	-	-	-
	2	145.4	484.3	-5.5	0.4	1.0	-0.1	1.1
		145.8	485.2	-5.3	0.0	0.2	-0.3	0.4
	3	-	-	-	-	-	-	-
	4	-	-	-	-	-	-	-
	5	143.8	498.4	-31.6	0.7	-3.4	-0.3	3.5
		144.3	497.6	-31.4	-0.3	7.5	-0.5	7.5
6	163.5	475.6	-38.3	0.9	1.1	-0.7	1.6	
	164.2	497.3	-40.7	0.1	-21.1	1.1	21.1	
	7	-	-	-	-	-	-	-
	오차 평균							1.3
								9.7
4m	1	-	-	-	-	-	-	-
	2	144.1	189.5	-5.7	0.7	-2.5	-0.3	2.6
		144.2	181.6	-5.1	0.7	5.5	-0.8	5.6
	3	165.2	212.5	1.0	0.6	-7.8	-0.8	7.9
		166.9	200.5	2.1	-1.1	4.2	-1.9	4.7
	4	-	-	-	-	-	-	-
	6	162.5	179.8	-39.0	0.9	-3.0	-0.4	3.2
	163.9	167.8	-41.0	-0.5	8.9	1.5	9.0	
	오차평균							4.6
								6.4

그림 11, 12는 벽면 GCP와 촬영거리방향의 공간상에 GCP를 설치하고 대상물을 3차원 복원했을 때 거리별로 X,Y 방향으로 발

생하는 오차를 나타낸 그림이다.

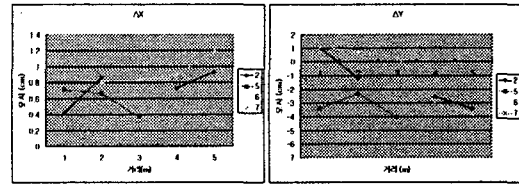


그림 11. Tsai 3차원 X,Y 복원오차(실험2)

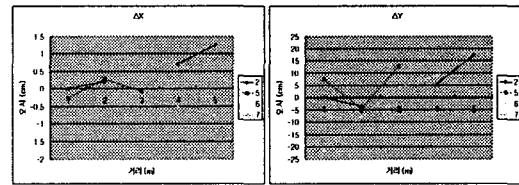


그림 12. DLT 3차원 X,Y 복원오차(실험2)

그림 13은 검정벽면의 GCP를 이용하여 카메라 검정을 수행하고 좌우측 입체 영상에서 특징점 추출과 영상정합을 통하여 벽면 앞에 놓인 큐빅을 3차원으로 복원한 그림을 보여주고 있다.

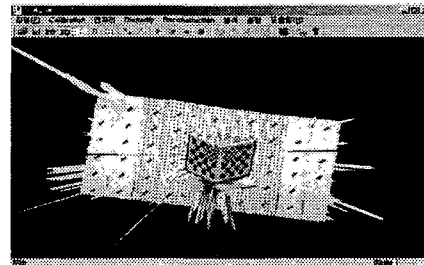


그림 13. 벽면과 큐빅 복원

5. 결론 및 향후과제

정확한 카메라 특성정보가 제공되지 않는 고해상의 줌 CCD 카메라를 컴퓨터 시각이나 사진측량분야에서 활용하기 위하여 Tsai 모델식과 DLT 모델식을 통하여 카메라 검정을 수행하고 3차원 복원 정확도를 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, Tsai 모델식과 DLT모델식에 대해 3차원 복원 정확도를 비교분석한 결과 Tsai 모델식이 DLT 모델식보다 정확도 및 안정성 측면에서 보다 향상된 결과를 보여 주고

있어서 향후 줌 카메라를 이용한 영상해석에서 Tsai 모델식의 활용이 기대되고 있으며, 그 동안 사용되어온 DLT 모델식의 개선이 요구된다.

둘째, 3차원 복원 정확도를 분석한 결과 DLT나 Tsai 모델식 모두 GCP의 배치가 3차원 위치결정에 상당한 영향을 미치고 있었으나, DLT 모델식이 Tsai 모델식보다 더 민감하게 영향을 받고 있어서 오차를 최소화할 수 있는 최적화기법 도입이 요구된다.

참고문헌

1. Anthony G. Willey and Kam W. Wong(1995), Geometric Calibration of Zoom Lenses for Computer Vision Metrology, PE&RS, Vol. 61, No. 1, pp 69-74.
2. DongBin Chen and YiDong Huang(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.
3. Joaquim Salvi, Xavier Armangue, Joan Batlle(2002), A comprative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation, Rattern Recongnition 35, pp 1617-1635.
4. Juyang Weng, Paul Cohen, and Marc Herniou(1992), Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation, IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.14, No. 10, Oct. 1992.
5. Mengxiang Li and Jean_Marc Lavest(1996), Some Aspects of Zoom Lens Camera Calibration, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 18, No. 11, pp 1105-1110.
6. R.Y. Tsai(1987), A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses, IEEE Robotics and Automation, Vol. e, No. 4, pp 323-331.
7. R.G. Willson(1994), Modeling and Calibration of Automated Zoom Lenses, Ph D thesis, Carnegie Mellon University.
8. Yong-Shen Chen, Sheng-Wen Shih, Yi-Ping Hung, and Chiou-Shann Fuh(2001), Simple and Efficient Method of Calibrating a Motorized Zoom Lens, Image and Vision Computing, Vol. 19, No. 14, pp 1099-1110.
9. R.Y Tsai (1986), An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision, IEEE
10. Sanjib K. Ghosh, Analytical Photogrammetry, 2nd edition, pp 98-99, Pergamon Press
11. J. Salvi, X. Armangue, J. Batle, A Comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation, Pattern Recognition 35, 2002, pp 1617-1635
12. J. Weng, P. Cohen, M. Herniou, Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 14 (1992) 965-980
13. K. Cornelis, M. Pollefeys, and L. V. Gool, Lens distortion recovery for accurate sequential structure and motion recovery, ECCV (2002), pp 186-200
14. R. Szeliski, R. Zabih, An Experimental comparison of stereo algorithms.
15. S. D. Cochran, 3-D Surface description from binocular stereo, IEEE Trans, Pattern Anal. Mach. Intell. 14 (1992), pp 981-994