

거울映像을 利用한 3次元 座標解析에 關한 研究

A Study on Three-dimensional Coordinates Analysis Using Mirror Images

柳 福 模* 李 顯 職**
Yeu Bock-Mo Lee Hyun-Jik
鄭 永 同*** 吳 昌 洙****
Jeong Yong-Dong Oh Chang-Soo

要 旨

지상사진으로 3차원 대상물에 대한 모든면의 절대좌표를 구하기 위해서는 최소 세쌍 이상의 모델이 필요하게 된다. 본 연구에서는 거울을 영상매개체로 이용하여 한쌍의 입체모델을 촬영함으로써 대상물의 모든면에 대한 3차원 좌표를 분석할 수 있는 기법을 연구하였으며, 거울면의 왜곡을 보정하기 위한 오차보정함수를 도입하여 거울영상기법의 정확성과 효용성을 증진시키는데 목적이 있다.

거울평면 방정식을 이용하여 거울에 투영된 점을 실제대상물상의 동일점으로 변환한 결과 X좌표의 오차가 가장크게 나타났으며, Y, Z좌표에서는 1mm 정도의 절대좌표오차를 나타내었고, 좌우거울의 보정함수를 도입하여 거울에 의한 왜곡을 보정하므로써 근거리 사진측량의 기대정확도에 만족됨을 알 수 있었다.

ABSTRACT

Minimum three pairs of model are necessary to determine absolute coordinates of three-dimensional objects.

This paper researches the method of analyzing three-dimensional coordinates of all sides of objects by photographing a pair of stereo model through the medium of mirror. An objective lies in improving the accuracy and the efficiency of mirror images method by introducing an error correction function for distortion of the mirror. Projected-onto-mirror points are transformed on the object plane through mirror plane equation.

As the result, X-coordinates error is the largest and Y, Z-coordinates error represents about 1mm. Also, accuracy can be improved by introducing correction function for left and right mirror and correcting the distortion of mirror.

* 延世大學校 工科學 教授
** 延世大學校 工科學院
*** 朝鮮大學校 工科學 教授
**** 朝鮮大學校 工科學院

1. 서 론

지상사진을 이용하여 등근형태나 사각기둥형태의 대상물에 대한 모든면의 3차원 좌표를 구하기 위해서는 최소 세쌍 이상의 모델이 필요하게 된다.

그러나, 근거리 사진측량 시스템에서는 한쌍 이상의 모델에 대한 좌표결합에 많은 시간이 요구되며, 사진수가 많아짐에 따라 경제성도 극히 낮으므로 한쌍의 사진으로 대상물의 모든 면을 해석할 수 있는 방법이 필요시되어 왔다.¹⁾

이와같은 필요성에 따라 본 연구에서는 영상 매개체로 거울을 이용한 거울영상기법으로 한쌍의 거울사진을 촬영하여 대상물의 모든면에 대한 3차원 좌표를 분석할 수 있는 기법을 연구하였으며, 거울의 왜곡에 의한 오차를 보정하기 위하여 오차보정함수를 도입하여 보정함으로써 거울영상기법의 정확도 향상과 효용성을 증진시키는데 목적을 두고 있다.

본 연구에 이용된 대상물은 원통과 사각뿔의 복합형이며, 사이각 120°로 거울을 배치하여 촬영거리 1.4m에서 측정용 카메라인 Wild P-31으로 거울사진을 촬영하였다. 촬영된 사진은 정밀좌표측정기로 상좌표를 관측하고 선형상사변환에 의해 사진좌표로 변환했다. 사진좌표로부터 절대좌표를 구하는데는 공선조건식에 의한 Bundle조정을 이용하였으며, 거울영상에 대한 절대좌표는 거울면에 붙인 21개의 거울면 표정점에 의해 결정되는 거울평면 방정식을 이용하여 실제대상물의 동일점으로 변환함으로써 대상물의 모든면에 대한 3차원좌표를 계산하였다.

변환된 좌표의 정확도는 삼각수준측량에 의해 점의 좌표를 알고있는 Check Point들을 이용하여 분석하였으며, 거울면의 왜곡에 의한 오차를 보정하기 위해 오차보정함수를 결정하였다.

좌우거울의 오차보정모델을 변환된 좌표에 적용하여 거울의 왜곡에 의한 오차를 보정함으로써 절대좌표의 정확도를 향상시킨후, 대상물에 대한 모든면의 좌표를 재형성하여 한 시점뿐만 아니라 모든 3차원 시점에 대한 수치적 및 도

식적 자료를 얻게된다.

2. 거울영상의 해석이론

2.1 거울영상의 기하학적개념

거울영상을 얻기위한 거울의 위치는 양호한 기하학적 조건과 실제대상물 및 좌우 거울에 투영된 모델이 모두 약 60%의 완전한 중복도를 얻기위해 거울의 사이각이 120°로 대상물의 뒷면에 배치된다.

따라서, 카메라의 위치가 실제대상물과 좌우 거울상의 대상물 모두에 대하여 약 60%의 중복도를 얻을 수 있는 고정기선상에 배치되므로 한 쌍의 입체 사진에 의한 완전한 영상자료를 얻게된다.²⁾ 거울의 기하학적원리 및 거울에 의한 실제대상물의 중복은 그림 2-1 및 그림 2-2와 같다.

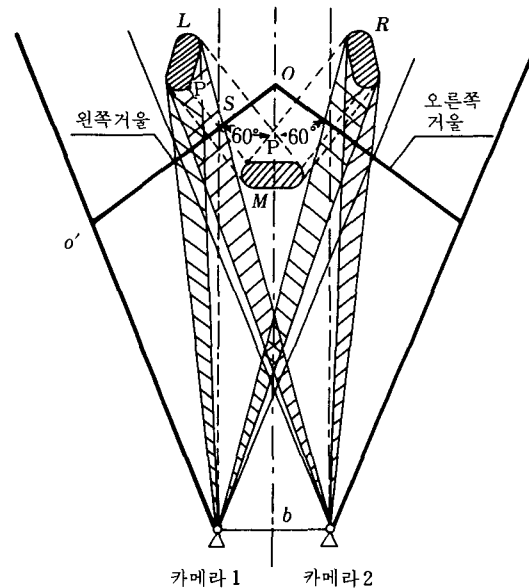


그림 2-1. 거울의 일반기하

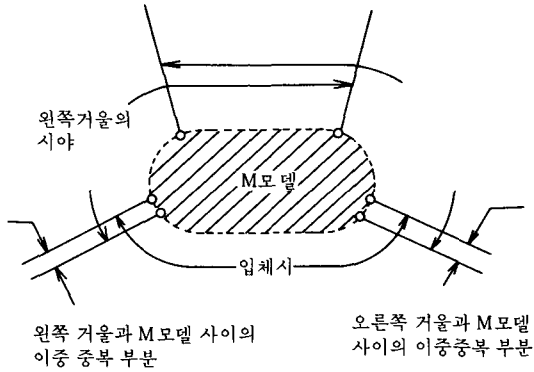


그림 2-2. 대상물의 중복

실제대상물의 좌표 (X, Y, Z) 가 기본 右手좌표계인데 비해, 거울영상모델 형성에 이용되는 좌표계 $(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z})$ 는 거울에 투영된 모델좌표를 나타내므로 左手좌표계가 된다. 이용된 모든 좌표계는 Z축이 연직인 지상좌표계이며 모델좌표의 계산은 임의의 우수좌표계상에서 진행된다.³⁾

거울영상모델은 임의좌표계상에서 연속적으로 역변환하여 형성되며, 이용되는 좌표계는 그림 2-3과 같다.

2.2 거울영상의 수학적개념

거울을 이용하여 거울영상모델을 형성하게 되

면 이 모델상의 좌표를 실제대상물의 좌표로 변환하여야 하므로 거울평면 방정식이 필요하게 된다.⁴⁾

거울의 평면방정식을 구하기 위해서는 거울표면을 평면으로 간주하여 거울면에 최소 세점 이상의 지지점이 위치한다면 최소제곱법에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = - (A^T A)^{-1} A^T \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix},$$

여기서 $A = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & Z_n \end{bmatrix}$ 이다. (2-1)

식 (2-1)에 의해 거울면의 계수 a, b, c 가 결정되면, 이 방정식을 이용하여 거울에 투영된 좌표를 다음과 같이 실제대상물의 좌표로 변환된다.

그림 2-1에서 선분 $P\bar{P}$ 는 거울면과 연직이며, 거울면으로부터 P, \bar{P} 는 같은 거리에 있으므로, 동일 거울면상의 점 S 의 좌표는 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} X_s &= 0.5 (X + \bar{X}) \\ Y_s &= 0.5 (Y + \bar{Y}) \\ Z_s &= 0.5 (Z + \bar{Z}) \end{aligned} \right\} \quad (2-2)$$

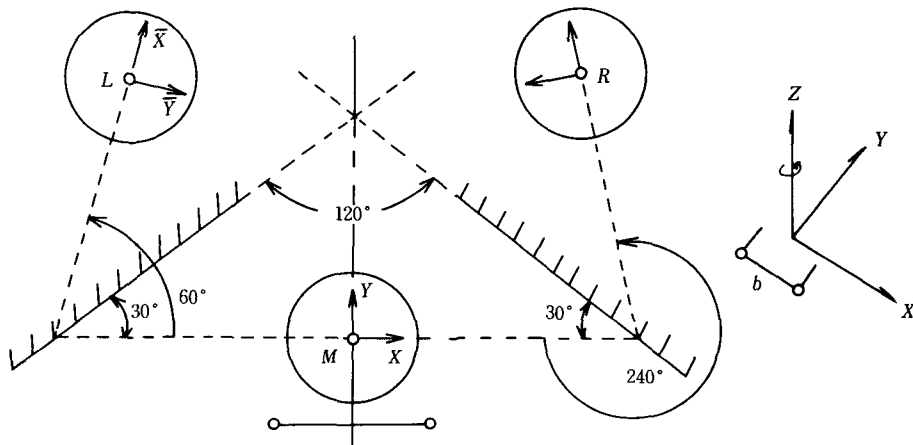


그림 2-3. 모델 형성을 위한 좌표계

이 좌표는 거울면의 방정식을 만족하여야 하므로
 $aXs + bYs + cZs + 1 = 0$ (2-3)
 이 되며, 식(2-2)에 의해 정리하면 다음과 같다.

$$aX + bY + cZ + (a\bar{X} + b\bar{Y} + c\bar{Z} + 2) = 0 \quad (2-4)$$

식(2-4)에 의해 결정되는 면은 거울면에 대해 평행하게 놓여있으며, P점을 통과하는 평면의 방정식이다.

거울면에 대해 연직인 $P\bar{P}$ 선의 방정식은

$$\frac{X - \bar{X}}{a} = \frac{Y - \bar{Y}}{b} = \frac{Z - \bar{Z}}{c} \quad (2-5)$$

이 되며, 이 식을 공통비 t 로 놓으면

$$\left. \begin{aligned} X &= at + \bar{X} \\ Y &= bt + \bar{Y} \\ Z &= ct + \bar{Z} \end{aligned} \right\} \quad (2-6)$$

이 되므로 공통비 t 를 결정하여 식(2-6)에 대입하면 대상점 P의 좌표가 결정된다.

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{-2a}{a^2 + b^2 + c^2} (a\bar{X} + b\bar{Y} + c\bar{Z} + 1) + \bar{X} \\ Y &= \frac{-2b}{a^2 + b^2 + c^2} (a\bar{X} + b\bar{Y} + c\bar{Z} + 1) + \bar{Y} \\ Z &= \frac{-2c}{a^2 + b^2 + c^2} (a\bar{X} + b\bar{Y} + c\bar{Z} + 1) + \bar{Z} \end{aligned} \right\} \quad (2-7)$$

식(2-7)은 거울의 왜곡이 전혀없는 경우에만 수정된 좌표를 제공하므로 거울면의 왜곡을 보정하기 위한 오차보정함수를 식(2-7)에 첨가하게 된다.

2.3 근거리 사진측량의 좌표해석

사진의 투영중심과 상점 및 대상점이 일직선에 있어야 한다는 공선조건은 일반적인 투영변환에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁵⁾

$$\left. \begin{aligned} x - x_0 &= -C \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Z - Z_0) + m_{13}(Y - Y_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Z - Z_0) + m_{33}(Y - Y_0)} \\ y - y_0 &= -C \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Z - Z_0) + m_{23}(Y - Y_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Z - Z_0) + m_{33}(Y - Y_0)} \end{aligned} \right\} \quad (2-8)$$

식(2-8)의 일반 공선조건식은 사진측량 관측값에 포함되어 있는 정오차에 의해 만족하지 못하게되나, 오차보정함수에서 정오차가 보정되므로 식(2-8)만으로도 본 논문의 공선조건식이 만족된다.

근거리 사진측량의 공선조건식인 식(2-8)을 간단히 나타내면

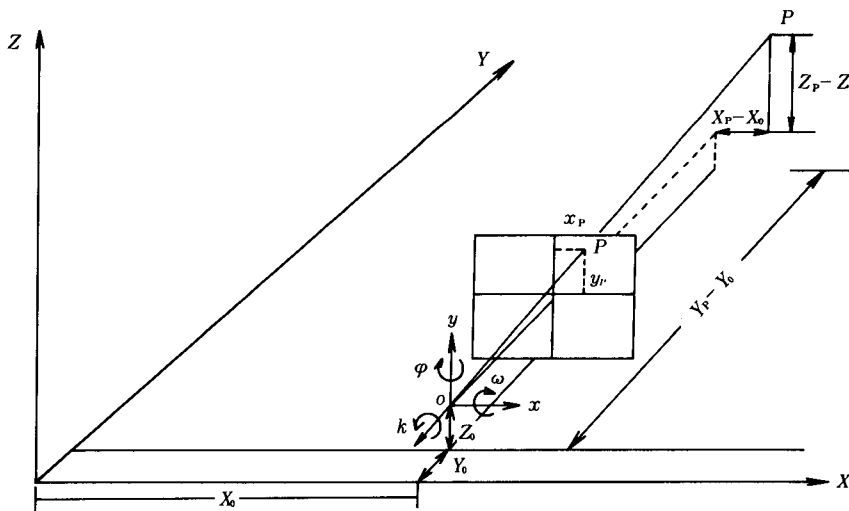


그림 2-4. 근거리 사진측량 좌표계

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{L_1 X + L_2 Z + L_3 Y + L_4}{L_9 X + L_{10} Z + L_{11} Y + 1} \\ y &= \frac{L_5 X + L_6 Z + L_7 Y + L_8}{L_9 X + L_{10} Z + L_{11} Y + 1} \end{aligned} \right\} (2-9)$$

이 되며, 측정된 상좌표는 정오차이외에도 우연 오차인 V_x, V_y 를 포함하고 있으므로, 식 (2-9)는 다음과 같이 된다.

$$\left. \begin{aligned} (x + V_x)(L_9 X + L_{10} Z + L_{11} Y + 1) &= L_1 X + L_2 Z + L_3 Y + L_4 \\ (y + V_y)(L_9 X + L_{10} Z + L_{11} Y + 1) &= L_5 X + L_6 Z + L_7 Y + L_8 \end{aligned} \right\} (2-10)$$

식 (2-10)를 임의점에 대한 조건 방정식으로 나타내어 최소제곱법의 조건을 이용하면 미지수 행렬 Δ_i 가 다음과 같이 구해진다.⁹⁾⁷⁾

$$\Delta_i = -[B^T W B]^{-1} B^T W D \quad (2-11)$$

식 (2-11)에 의해 Bundle조정의 미지 변수가 결정되면 식 (3-5)에서 대상물에 대한 3차원 절대좌표가 다음과 같이 결정된다.⁹⁾⁹⁾

j 사진의 i 점에 대한 조건방정식을 행렬로 나타내면

$$V_i + B_i \Delta_i + C_i = 0 \quad (2-12)$$

이 되며, P 개의 사진에 대해서는 $V + B \Delta_i + C = 0$ 이 되므로 최소제곱해는

$$\Delta_i = -[B^T W B]^{-1} B^T W C = -N^{-1} C^* \quad (2-13)$$

같이 결정되어진다.

3. 관측 및 결과분석

3.1 사진촬영 및 기준점측량

본 연구에서 사용된 Test-Field는 거울의 기하학적 조건과 완전한 중복도를 고려하여 철제 앵글로 그림 3-1처럼 제작하였으며, 거울면의 왜곡을 보정하기 위해 $\phi 0.4\text{mm}$ 의 피아노선을 6개 매달았다.

피아노선은 미소진동을 없애기 위해 추를 매달아 설치 2일후에 촬영과 기준점 측량을 실시하였다.

거울은 두께는 4mm의 전면거울로 광학적 성질을 갖지 않는 일반거울을 사용하였으며, 전 모델상에서 60% 중복도를 얻기 위해 거울의 각도를 120도로 하였고, 좌우거울 사이에 거울에 투영된 표정점의 조도를 전면부의 조도와 맞추기 위해 간유리를 설치하였다.

본 연구에 이용된 표정점은 2가지 종류로 피아노선상에 $2 \times 2\text{cm}$ 의 표정점을 각 선당 3개씩 18개 배치하였으며, 거울의 평면 방정식을 결정하기 위해 좌우거울에 21개의 거울면 표정점을 배치하였다.

다른 하나의 표정점은 $1 \times 1\text{cm}$ 의 크기로 대상물의 각 특징 부분에 부착하였으며, 실제대상물

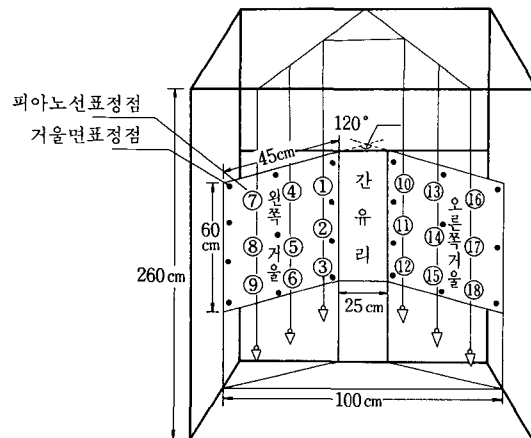
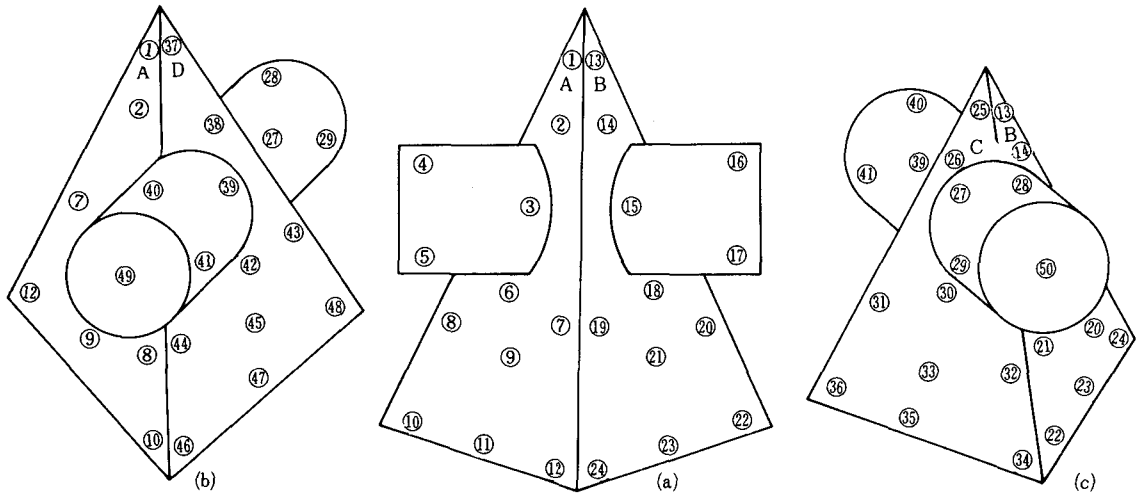


그림 3-1. Test-Field 및 표정점번호



(b) 왼쪽거울에 비친 대상물표정점

(a) 실제대상물상의 표정점

(c) 오른쪽거울에 비친 표정점

그림 3-2. 대상물의 표정점배치

과 거울에 투영된 표정점에서 동시에 나타난 점은 거울상에 나타난 좌표를 실제대상물의 동일 좌표로 변환하는데 이용되었다.

사진촬영에 이용된 카메라는 지상사진측정용 Wild P-31이며, 촬영에 이용된 조명기구는 대상물의 전방과 상단에 총 7KW를 설치하여 Kodak Plus-Xpan 필름으로 촬영하여 즉시 현상처리 하였다. 촬영거리에 따른 추가영상의 심도를 고려하여 1.4 m ring과 1.8m ring을 부착하여 좌우 3장씩 총 6장을 촬영하였으며, 그중 최적인 1번과 5번 사진을 선택하여 좌표해석에 이용하였다. 촬영점의 배치는 그림 3-3과 같다.

기준점 측량은 Wild T2에 의해 관측하였으며, 관측된 표정점의 절대좌표는 수평각과 연직각을 사용하여 삼각수준측량방법에 의하여 계산하였다.¹⁰⁾

촬영된 필름의 상좌표는 Kern MK-2 monocomparator를 사용하여 측정되었으며, 선형상사변환에 의해 사진좌표로 변환하여 절대좌표 계산에 이용하였다.

3. 2 오차보정함수결정 및 비교고찰

3.2.1 거울영상 좌표변환의 오차

사진좌표가 결정되면 식(2-11)에 의해 Bundle조정의 미지변수가 결정되고, 식(2-13)에 의해 모든 표정점의 3차원 절대좌표가 구해진다.

계산된 절대좌표중 좌우거울면에 부착된 거울면 표정점에 대한 절대좌표를 이용하여 좌우거울의 평면 방정식이 결정되고, 이 방정식을 이용하여 거울면의 절대좌표를 실제대상물의 동일 점 좌표로 변환하게 된다.

변환된 좌표의 정확도는 기준점 측량으로 3차원 절대좌표가 계산된 피아노선의 표정점을 Check Point로 이용하여 분석하였으며, 그 결과는 表 3-1 및 그림 3-4와 같이 나타났다.

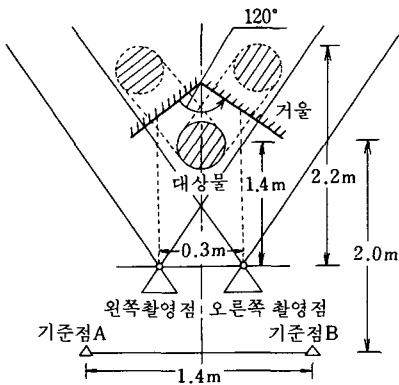


그림 3-3. 촬영점 및 기준점 배치

表 3 - 1. 거울영상좌표변환의 오차

(a) 왼쪽거울 (단위 : mm)

표 정 점	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔT
2	1.3	-2.0	1.1	2.551
5	0.3	-0.3	1.2	1.273
6	1.6	-1.6	0.7	2.302
7	2.1	0.1	1.7	2.704
8	-4.1	1.6	1.1	4.536
9	1.6	0.9	0.7	1.965
RMSE	2.371	1.416	1.243	3.001

(b) 오른쪽거울 (단위 : mm)

표 정 점	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔT
11	-0.6	1.5	1.1	1.954
13	-2.3	2.8	2.1	4.188
14	-4.3	-0.2	1.2	4.469
15	0.1	2.5	0.4	2.534
16	-5.2	-1.1	0.4	5.330
17	-3.9	-0.4	0.0	3.920
18	-2.9	-0.3	0.1	2.917
RMSE	3.531	1.724	1.110	4.083

$\Delta T = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}$

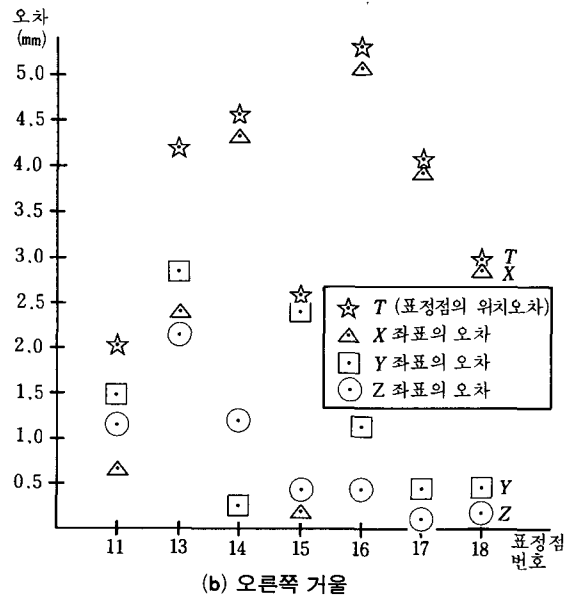
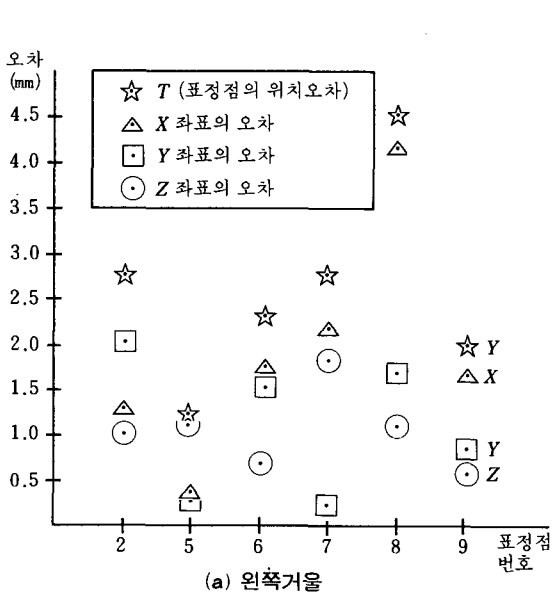


그림 3-4. 거울영상좌표변환의 오차

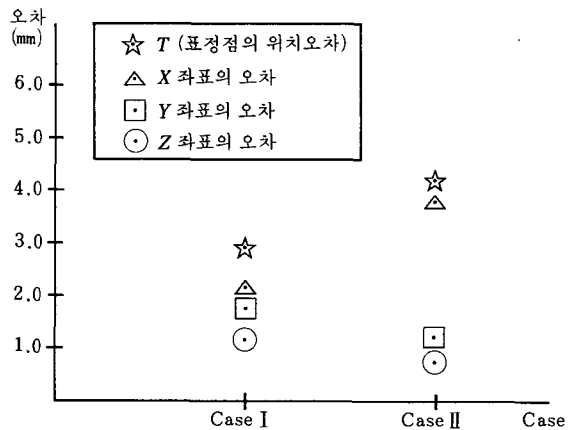
그림 3-4에서 볼 수 있는 것처럼 좌우 거울 상에 투영된 모든 점에서 X좌표의 오차가 가장 컸으며, Y좌표나 Z좌표에서는 1mm 정도의 절대 좌표오차가 일어났다.

또, 거울상에 배치된 표정점의 분포에 따른 오차를 분석하면 表 3-2 및 그림 3-5와 같다.

表 3 - 2. 표정점 분포에 따른 오차분포

(단위 : mm)

Case	ΔY	ΔY	ΔZ	ΔT
Case I	2.179	1.929	1.314	3.193
Case II	3.858	0.984	0.976	4.099



Case I은 거울의 안쪽에 투영된 표정점이며, Case II는 거울의 외곽에 투영된 표정점으로서, Case I에 비해 Case II가 오차가 컸으며, 특히 X좌표의 오차가 Case I에 비해 전체좌표의 정확도에 많은 영향을 미쳤다.

두가지 경우에 대해 분석한 결과, 거울면의 왜곡은 X좌표의 정확도에 가장 큰 영향을 미치며, 특히 거울의 외곽에 투영된 점에 대해서는 정확도가 현저히 저하됨을 알 수 있었다.

또, 임의점에서 거울면까지의 연직거리인 d 에 따른 오차분포는 表 3-3과 같다.

表 3 - 3. d 에 따른 오차분포

왼쪽거울

d (cm)	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)	ΔT (mm)
11.38	3.4	0.1	0.9	3.518
17.44	-3.8	2.6	1.2	4.614
26.01	-6.8	0.8	0.5	6.865
42.50	-23.8	6.1	3.0	24.752
56.32	-29.1	7.3	3.9	30.254

오른쪽거울

d (cm)	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)	ΔT (mm)
10.52	-0.8	0.0	-0.1	0.806
15.86	0.4	0.5	0.7	0.949
24.79	2.0	-0.1	0.8	2.156
40.88	10.1	1.0	-3.2	10.642
52.66	11.3	1.0	-2.4	11.595

d 에 따른 오차분포 곡선은 表 3-3의 자료이 외에도 피아노선상의 모든 표정점의 값을 최소 제곱근사법에 의해 3차까지의 근사다항식으로 구하였다.

오차분포곡선에서 d 에 따른 오차를 분석한 결과 본 연구에서 이용된 좌우거울 모두 $d \approx 20$ cm 이내에서만 정확도가 양호했으며, 20cm를 초과한 점들에서는 X좌표의 오차가 급증하여 정확도가 현저히 저하되었다.

따라서, 거울면에서 많이 떨어진 점에 대해 높은 정확도로 좌표변환을 하고자 할때는 거울의 내부표정요소를 알 수 있는 양질의 광학거울을 사용하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

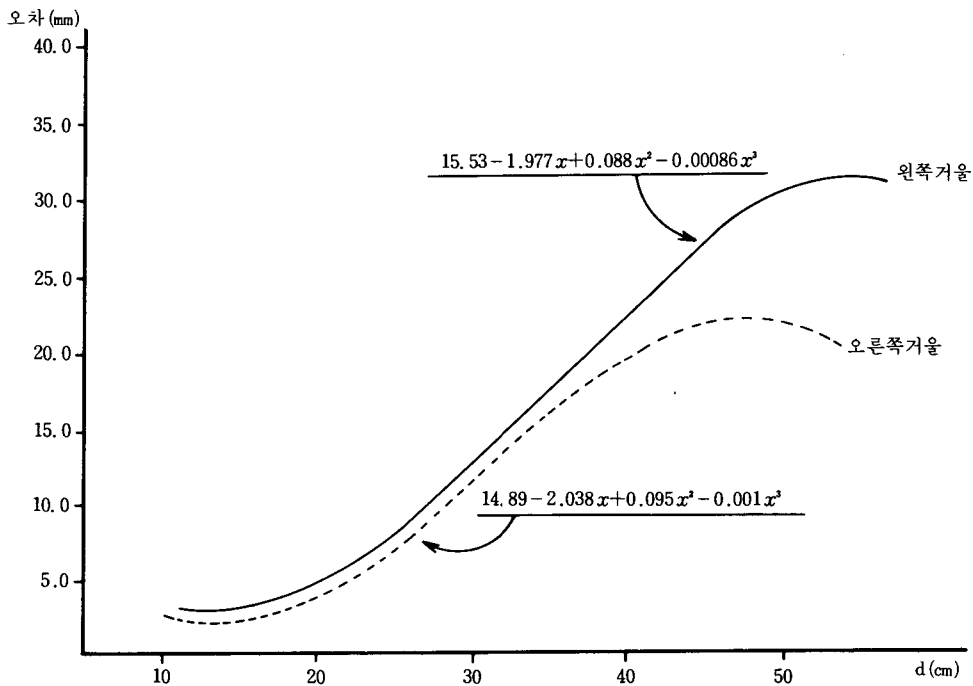


그림 3-6. d 에 따른 좌우거울의 오차분포

3.2.2 오차보정함수의 결정

본 연구에서는 각 점들의 특징을 나타내는 하나의 대표곡선을 최소제곱법으로 구하여 오차보정함수를 결정하였다.¹¹⁾

오차보정함수는 d 의 함수이므로 식(2-7)의 X 항에 대한 보정함수는

$$f_i(d, X) = a_0 + a_1 d_i + a_2 d_i^2 + a_3 d_i^3 + \dots \quad (3-1)$$

이 되며, 임의점의 X 좌표에 대한 최확값을 \hat{X} 라 하고 식(2-7)의 우변을 A 라 하면,

$$a_0 + a_1 \hat{d} + a_2 \hat{d}^2 + a_3 \hat{d}^3 + \dots = \hat{X}_i - A_i \quad (3-2)$$

이 되므로, 행렬식으로 표시하여 해를 구하면 다

음과 같다.¹²⁾

$$\therefore X = (B^T B)^{-1} B^T C \quad (3-3)$$

마찬가지로, Y, Z 에 대해서도 보정함수가 결정되며, 각 보정함수를 식(2-7)에 대입하여 변환된 좌표에 포함된 거울 왜곡에 의한 오차를 보정하게 된다.

본 논문에서는 보정함수의 계수를 결정하기 위해 \hat{X}, X, \bar{X} 를 모두 아는점으로 각 7점을 택하여 3차항(d^3)까지 처리한 후 $\hat{X} - X$ 의 잔차의 표준 편차가 가장 작은항까지로 결정하였으며, 왼쪽거울은 1차항(d), 오른쪽 거울은 2차항(d^2)이 최적이었다. 본 연구에서 결정된 좌우거울의 오차보정함수는 다음과 같다.

表 3 - 4. 보정함수의 차수결정

(단위 : cm)

거울	좌표	차수	a_0	a_1	a_2	a_3	$(X_i - A_i)$ 의
왼쪽 거울	X	a_0	- 1.01				1.04726628 E-02
		a_1	0.08043805	- 0.0748028			0.242641523E-02
		a_2	52.7305063	- 0.4873188	0.15598E-04		78.2326147
		a_3	181.156843	- 2.4103283	0.008527	-0.1094E-06	89.8923103
	Y	a_0	0.302857				2.69054779 E-02
		a_1	0.0100554	- 0.01661118			0.145628312E-02
		a_2	-13.86864	0.128891	-0.4396 E-05		20.4552514
		a_3	-64.58892	0.88835	-0.00336	0.4323E-06	23.5582454
	Z	a_0	0.1042857				00.100971492E-02
		a_1	0.0461335	- 0.02014482			0.0553322719E-22
		a_2	- 4.8744155	0.0452386	-0.13315E-05		7.40652925
		a_3	-18.030056	0.2422264	-0.8716 E-04	0.01121E-	8.51449723
오른쪽 거울	X	a_0	0.3771429				0.389688522E-02
		a_1	- 0.02929344	0.0320026			0.204085528E-02
		a_2	- 6.0664884	87.9344255	-320.588229		0.18063111 E-02
		a_3	-75.255945	1.037627	-0.004021	0.5236 E-06	16.8412798
	Y	a_0	0.0685714				0.851329492E-03
		a_1	0.055082716	- 0.000064420			0.84870407 E-03
		a_2	- 4.16800044	62.2347003	-219.805325		0.204107531E-03
		a_3	-19.859975	0.284849	- 0.001187	1.5501E-04	1.98662186
	Z	a_0	- 0.01857				0.175634899E-03
		a_1	0.017500787	- 0.00092453			0.147137819E-03
		a_2	- 1.76218318	27.9787679	-102.306847		0.031039811E-03
		a_3	-25.18570	0.379525	-0.001734	2.2570E-04	3.06648366

$$\left. \begin{aligned} f_i &= 0.000804380517 - 0.000748028451d \\ g_i &= 0.00010005546 - 0.000166111841d \\ h_i &= 0.000461335141 - 0.00020144825d \end{aligned} \right\} \quad (3-4)$$

$$\begin{aligned}
 f_R &= -0.060664884 + 0.879344255d - 3.20588229d^2 \\
 g_R &= -0.041680044 + 0.622347003d - 2.19805325d^2 \\
 h_R &= -0.0176218318 + 0.279787679d - 1.02306847d^2
 \end{aligned}$$

(3-5)

여기서 d 는 m 로 나타낸 값이며,

$$d = \sqrt{(X - \bar{X})^2 + (Y - \bar{Y})^2 + (Z - \bar{Z})^2} / 2 \text{이다.}$$

3.2.3 오차보정함수에 의한 변환좌표의 보정

좌우거울의 보정함수가 결정됨에 따라 식 (2-7)에 보정함수를 대입하여 변환된 좌표를 보정하였으며, 보정된 좌표의 절대좌표오차는 表 3-5와 같다.

表 3-5 보정된 절대좌표의 오차

(a) 왼쪽거울 (단위: mm)

표 정 점	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔT
2	0.6	-1.9	0.7	2.202
5	-0.4	-0.4	0.7	0.900
6	0.9	-1.5	0.3	1.860
7	1.4	0.0	1.2	1.844
8	-4.8	1.5	0.6	5.064
9	0.9	0.8	0.3	1.241
RMSE	2.329	1.335	0.769	2.818

(b) 오른쪽거울 (단위: mm)

표 정 점	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔT
11	1.1	0.5	0.0	1.208
13	-0.4	1.1	1.1	1.606
14	-2.6	-2.0	0.1	3.282
15	2.8	1.2	-0.4	3.072
16	0.0	0.6	0.4	0.721
17	0.0	0.2	-0.4	0.447
18	-2.0	-0.8	-0.8	2.298
RMSE	1.824	1.150	0.624	2.245

表 3-5를 변환된 좌표의 오차를 나타내는 表 3-1과 비교하여 각각 좌우거울의 X, Y, Z 좌표 및 위치오차의 평균제곱근 오차를 나타내면 그림 3-7과 같다.

그림 4-7에서 Case I, II는 왼쪽 거울에 대한 모든 표정점의 보정전·후의 오차이며, Case III, IV는 오른쪽 거울에 대한 보정전·후의 X, Y, Z, T 오차분포로서 왼쪽 거울에서 보다 오른쪽 거울에서 더욱 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

또, 오차보정함수를 적용하여 표정점 분포에

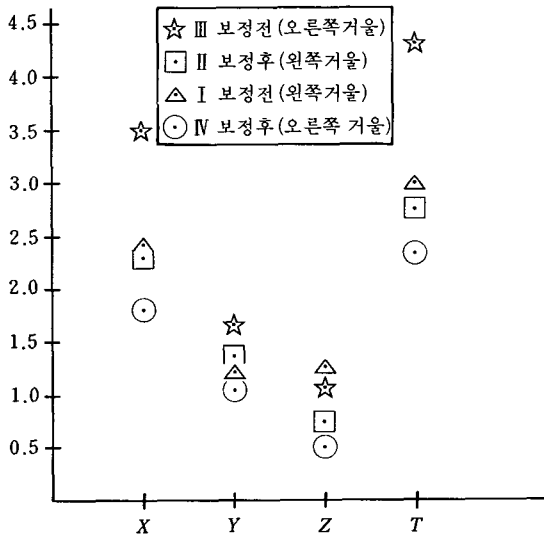


그림 3-7. 보정전·후의 X, Y, Z, T 오차

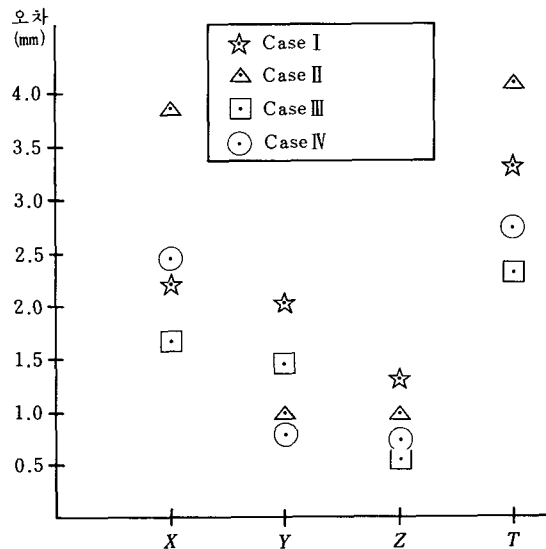


그림 3-8. 보정전·후의 표정점분포에 따른 오차

따른 오차를 表 3.2와 비교하면 表 3-6 및 그림 3-8과 같다.

表 3-6 보정전·후의 표정점 분포에 따른 오차 (단위: mm)

Case	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔT
Case I	2.179	1.929	1.314	3.193
Case II	3.858	0.984	0.976	4.099
Case III	1.698	1.467	0.639	2.358
Case IV	2.442	0.886	0.755	2.705

그림 3-8에서 Case I, II는 表 3-2와 동일하며 Case III, IV는 오차보정함수를 적용하여 보정한 것으로 거울의 좌우 부분인 Case II의 경우 절대좌표의 정확도 많은 영향을 주는 X좌표의 향상율이 Case I의 향상율보다 큼에 따라 절대좌표의 정확도가 높아졌으며, 좌우거울에 투영된 모든 표정점의 위치오차가 감소되었다. 이 결과를 정확도 향상율로 나타내면 表 3-7과 같다.

表 3-7 오차보정함수에 의한 정확도 향상율 (단위: %)

Case	X	Y	Z	T
I	22.07	23.95	51.37	26.15
II	33.70	9.96	22.64	34.01

表 3-7에서 절대좌표에 많은 영향을 미치는 X좌표의 정확도가 더욱 많이 향상된 거울의 좌우에 투영된 표정점에서 더욱 높은 정확도 향상율이 높음에 따라 근거리사진측량의 기대오차식에 본 연구의 촬영조건을 대입하여 계산한 결과 X좌표와 Z좌표의 기대정확도는 초과하나, 일반적인 근거리사진측량의 오차요인인 Y좌표의 오차가 작아지므로 좌우거울에 대한 절대좌표의 위치오차는 기대정확도에 만족되었다.¹³⁾

3.2.4 거울영상의 도화

거울영상시스템을 이용하여 대상물의 모든면에 대한 3차원 좌표를 구하면 공학이나 생의학 분야에서 높은 정확도를 요하는 경우 필요한 한시점뿐만 아니라 모든 3차원 시점에 대한 도식적 및 수치적 자료를 제공하게 된다.

거울영상의 도화는 실제대상물과 거울에 투영

된 모델에서 서로 다른 도화면으로 이루어지므로 거울영상 모델의 도화는 거울의 왜곡에 의한 X좌표의 오차가 커짐에 따라 일반사진 측량의 도화에서 거의 무시되어지는 X방향의 회전인자 ω 가 심하게 이동되는 불완전 모델을 형성하여 도화에 어려움이 많게 된다.

거울영상의 도화면은 그림 3-9와 같다.

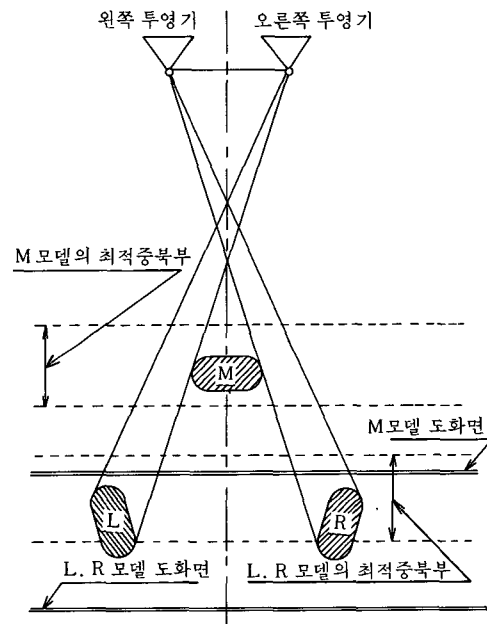


그림 3-9. 거울영상의 도화면

4. 결 론

본 연구를 통해서 거울영상을 이용한 3차원 좌표에 대한 분석을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 본 연구에서 이용된 좌우거울의 평면방정식에 의해 거울면에 투영된 점을 대상물상의 동일점으로 변환한 결과 촬영기선 방향인 X좌표의 오차가 거울의 왜곡에 따라 3mm 정도 가장 컸으며, 촬영거리 방향과 높이 방향인 Y, Z좌표에서는 1mm 정도의 절대좌표 오차를 나타내었다.

2. 좌우거울의 왜곡을 보정하기 위한 오차보정 함수를 구하였고, 이 보정함수를 이용하여 변환된 좌표를 보정한 결과 거울 안쪽에 투영된 표정점에 대해서는 26.15%, 거울 외곽에 투영된 표정점에 대해서는 34.01%의 정확도 향상을 나타내므로써 좌우거울에서 모두 근거리 사진측량의 기대정확도에 만족되었다.
3. 거울을 영상매개체로 하여 대상물의 모든면에 대한 3차원좌표를 결정하므로써 한 시점뿐만 아니라 모든 3차원 시점에서 수치적 및 도식적 모델을 재형성 할 수 있었다.

參考文獻

1. A. S. P., Manual of Photogrammetry, 4th ed., A. S. P., 1980, pp. 2-27.
2. Kratky, V., "Photogrammetric Digital Modeling of Limbs in Orthopaedics," P. E. & R. S., Vol. 41, No. 6, 1975.
3. Veress, S. A. and J. N. Hatzopoulos, "A Plotting Instrument for Close-Range Photogrammetry," P. E. & R. S., Vol. 44, No. 3, 1978.
4. Veress, S. A., "Spatio-Temporal Position from Mirror Images," P. E. & R. S., Vol. 49, No. 2, 1983.
5. Ghosh, S. K., Analytical Photogrammetry, Pergamon Press, 1979.
6. Fraser, C. S., "Accuracy Aspects of Multiple Forcal Setting Self-Calibration applied to Non-Metric Cameras," 14th Congress of ISP, 1980.
7. Hottier, "Accuracy of Close-Range Analytical Restitutions; Practical Experiments and Prediction," P. E. & R. S., Vol. 42, No. 2, 1976.
8. Brown, D. C., "The Bundle Adjustment-Progress and Prospects," Invited Paper Comm. 3, ISP Congress, Helsinki, 1976.
9. Knight, W. and P. Steeves, "Patial Solution of the Variance-Covarience Matrix for Geodetic Networks," The Canadian Surveyor, Vol. 28, No. 5, 1974.
10. 柳福模, 李在璣, 朴弘祺, "基準點 測量을 위한 데오돌라이트 觀測點의 最適位置에 관한研究," 大韓土木學會, 4卷4號, 1984.
11. 孫炳鎮, Fortran IV - 數值解法의 컴퓨터 응용, 塔出版社, 1982.
12. Veress, S. A., "Adjustment by Least-Squares, Monography," American Congress on Surveying and Mapping, 1974.
13. Abdel-Aziz, Y. I., "Photogrammetric Potential of Non-Metric Cameras," Ph. D. Dissertation, Univ of Illinois at Urbana-Champaign, 1974.