

비측량용 사진에 의한 位置解析의 正確度 研究 A Study on Accuracy of Position Analysis by Non-metric photo

이종출* · 이병걸** · 심봉섭***

Lee, Jong-Chool · Lee, Byung-Gul · Sim, Bong-Seob

要 旨

본연구의 목적은 근거리사진측량기법을 이용하여 비측량용사진의 정확도 해석이다. 비측량용사진을 이용한 근거리사진측량은 경제성이 높고, 취급하기가 용이한 것으로 알려져 있으나 사진의 정확도에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 이러한 사진의 정확도를 연구하기 위하여 우선 지형모델을 설정하고, 측량용카메라와 비측량용카메라를 이용하여 설정된 모델을 촬영하여 비교·연구였다. 해석방법은 Bundle조정법과 직접선형변환법으로 해석하여 Bundle조정법이 비측량용 사진의 해석에도 양호하다는 결과를 얻었다. 그러므로 비측량용사진의 정확도 분석에는 Bundle 조정법을 사용하여 해석하였으며, 비측량용사진도 정확도가 양호하여 실용성이 큰 것으로 나타났다.

Abstract

The purpose of this study is to analyse the accuracy of non-metric photos by close-range photogrammetry. Close-range photogrammetry using non-metric photos is economical and convenient to handle, but it is insufficient of study on accuracy. To execute this study, first, the terrain model was made and then taken photographs of this model with metric and non-metric cameras. The Bundle adjustment and the Direct linear transformation methods are used for the analysis close-range photogrammetry. The results of the analysis showed that the Bundle adjustment method is a appropriate method for the analysis of the non-metric photo. Therefore, we concluded that the accuracy of the non-metric photo by close-range photogrammetry is applicability for the photogrammetry.

1. 서 론

근거리 사진측량은 사진측량의 기본원리인 중심투영(perspective projection)의 원리를 이용하여, 사진상에 나타난 2차원 기하형상으로부터 피사체의 3차원 형상을 추구하는 관측기술로써, 사진기의 취급이 비교적 간단하고 사진기의 노출점을 임의로 결정하여 사진기와 피사체의 관계를 자유로이 조정 할 수 있으므로 소규모 대상물을 측량하는데 효과적으로 이용할 수 있다. 또한 근거리 사진측량은 대상물에 접근하지 않고 측량 할 수 있으며 단시간내에 수 많은 점들에 대한 동시 3차원측량이 가능하며, 신속하고 비교적 정확한 사진측량 기법이며, 이 기법의 발달은 정확도의 향상이 요구된다고 할 수 있

다. 그리고 사진기와 피사체의 관계를 자유로이 또는 일정한 관계를 갖게 할 수 있는 특징을 갖고 있으며, 항공 사진측량으로서는 불가능한 여러가지측량을 정밀히 할 수 있다.¹⁾ 이용분야가 광범위한 근거리 사진측량의 연구는 대부분 그 관측대상이 비 지형(non-topography)인 분야에서 많이 행하여졌으며, 지형분야에서는 항공사진 측량방법으로 연구발전되어 왔다. 그러나 항공사진측량방법은 소규모 측량이나 국지적 측량이 필요한 경우에는 비 경제적이며, 특히 높은 정확도가 요구되는 소규모 대상물인 경우에는 근거리 사진측량방법이 더 효과적이다.

근거리 사진측량에 대한 본격적인 연구는 정밀좌표 관측기와 입체도화기가 발명되고 계산에서 자동화가 이루어진 20세기 초부터 이루어 졌다. 1920년 Pulfurich에 의해서 정밀좌표 관측기가 개발되어 해석사진 측량학이 진일보하게 되었으며, 1971년 Matos²⁾는 다중 사진해석에 관하여 연구하였으며, 1972년 Wong³⁾은 측

*부산공업대학교 토목공학과 부교수

**부산대학교 해양산업개발연구소 선임연구원

***부산공업대학교 산업대학원

지관측을 동시 조정하는 SAPGO 프로그램을 개발하여 스트립과 블록조정을 하였다. 1974년 karara와 Abdel-Aziz⁹⁾는 비측량용사진에 있어서 렌즈왜곡수차 및 필름 변형의 선형성분에 관하여 연구하였으며, Erandson과 Veress⁵⁾는 지상사진측량의 표정요소에 관하여 연구하였고, Abdel-Aziz⁶⁾에 의하여 수렴사진에의한 정확도 분석이 발표되었다. 1976년 Hottier⁷⁾는 비측량용사진을 포함한 근거리 사진측량의 정확도와 정밀도에 관하여 많은 실험결과를 발표하였다. 1988년 Fraser⁸⁾는 비행기 제작공장에서 비행기 날개나 터빈의 제작상태를 점검 하므로서 정밀기계분야에 근거리 사진측량의 이용가능성을 제시하였으며, 같은해에 Kawame⁹⁾는 근거리 사진측량을 이용하여 교량구조물의 변형을 조사하였다. 1989년 Hintz¹⁰⁾등은 근거리 사진측량을 이용하여 포장면의 균열과 바퀴자국을 정밀해석한 바 있다.

한편 국내에서는 1970년대부터 근거리사진측량에 관한 연구가 활발히 진행되어, 1984년 양¹¹⁾, 1985년 강¹²⁾, 1986년 이¹³⁾에 의하여 경사사진측량과 다중사진측량 및 비측량용사진측량에 관한 연구가 발표되어 근거리 사진측량의 활용분야를 확대시켰으며, 정확도 향상에 크게 이바지 하였다. 1987년 유¹⁴⁾는 지상사진측량에 의한 3차원변형측량의 신뢰도를 분석하였고, 1988년 유¹⁵⁾는 좌표계산과정에서 부가변수를 갖는 번들조정법의 program을 작성하여, 이에 적합한 오차보정식을 유도하여 정오차에 대한 영향을 최소화 하고자 하였으며, 1989년 이¹⁶⁾는 측량용사진과 비측량용사진을 이용하여 지형의 3차원위치해석에 있어서 오차를 분석하여 정확도 향상에 기여하였다. 이처럼 국내의 연구동향을 보면 측량용 사진에 의한 연구가 많이 행하여졌으나, 비측량용 사진에 의한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 근거리 사진측량방법을 이용하여 지반변위, 산사태, 지진, 구조물의 미소변위등의 해석에 기초가 되는 피사체의 위치해석에 있어서 오차특성을 비측정용사진을 사용하여 분석하고, 측량용사진과의 정확도특성을 비교·연구하여 그 효용성을 제고하는데 기여하고자 한다. 특히 비측량용사진에 대한 위치해석의 정확도를 심도있게 연구할 것이다.

2. 연구방법 및 범위

근거리 사진측량에 있어서 구하고자하는 점들의 위

치해석 방법중의 하나인 해석적방법은 사진상에서 정오차를 보정할 수 있고, 각 사진의 내부표정요소를 정확하게 할 수 있으며, 기계적 방법 및 반해석적 방법보다 더 많은 점들을 이용하여 입체모형을 재구성 할 수 있기 때문에 정확도가 높다.

본 연구에서는 해석적 방법으로서 근거리 사진측량을 이용하여 구하는 점들의 3차원위치를 정확히 해석하고자 하며, 근거리 사진측량방법중 측량용사진기(metric-camera) 및 비측량용 사진기(non-metric camera)에 의하여 모델의 수평사진 및 수렴사진을 촬영하였다.

계산방법은 정밀좌표관측기를 이용하여 측량용사진 및 비측량용 사진으로부터 얻은 기계좌표를 사진좌표로 좌표변환하였으며, 이 사진좌표를 이용하여 번들조정법과 직접선형 변환법에 의하여 대상점의 3차원 좌표를 계산하였고, 이계산결과에서 산출된 각 대상점의 표준오차의 크기로서 정확도와 오차특성을 분석하였다.

3. 근거리 사진측량에 의한 3차원 위치해석

3.1 번들(Bundle)조정법에 의한 3차원 위치해석

번들조정법은 사진측량의 블록조정을 하는 방법중 광속을 단위로 하는 조정법이며, 블록내에 포함된 기준점과 중점합점 및 변수를 사용하여 각 사진의 외부표정요소를 최소제곱법에 의해서 동시에 결정하는 방법이다. 이 조정법의 이론은 공선조건식을 기초로 하고 있으며, 현재 해석사진측량의 조정계산에 널리 이용되고 있으며, 그 원리를 나타내는 그림은 Fig. 1과 같다.

3.1.1 번들 조정법의 기본이론

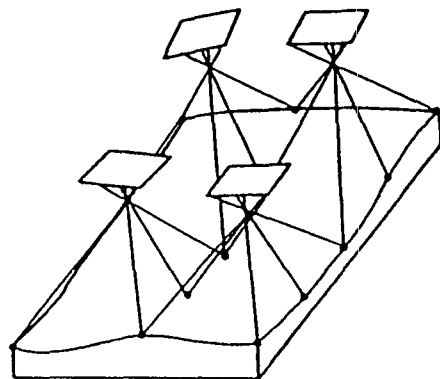


Fig. 1. Block adjustment by bundle adjustment.

번들 調整法에는 各 寫眞上에서 觀測된 基準點과 中, 暎점합점의 寫眞座標를 觀測값으로 취급하며, 이들 좌표 값에 대해 잔차의 제곱을 最少化하여 各寫眞의 외부 표 정요소($X_0, Y_0, Z_0, k, \psi, \omega$) 및 中·暎점합점의 絶對座標 (X, Y, Z)를 해석한다. 번들 調整法의 기본적인 數學的 모델은 다음과 같은 共線條件式으로 나타낼 수 있다.

$$F_{x_{ij}} = F[x_{ij}, (X_0, Y_0, Z_0, \Omega, \Phi, k)_i, (X, Y, Z)_j] \quad (3-1)$$

$$G_{y_{ij}} = G[y_{ij}, (X_0, Y_0, Z_0, \Omega, \Phi, k)_i, (X, Y, Z)_j]$$

여기서,

(x_{ij}, y_{ij}) : 사진 i의 점 j의 좌표

$(X_0, Y_0, Z_0, \Omega, \Phi, k)$: 사진 i의 외부표정 요소

(X, Y, Z) : 점 j의 絶對좌표이다.

(3-1)式을 未知의 外部標定要素 및 絶對座標값에 대 하여 Taylor展開를 이용하여 線形化하고, 2次項 이상을 무시하면 (3-2)式과 같다.

$$\begin{aligned} F_{x_{ij}}^0 + V_{x_{ij}} - \frac{\partial F_{x_{ij}}}{\partial X_0} \delta X_0 - \frac{\partial F_{x_{ij}}}{\partial Y_0} \delta Y_0 - \frac{\partial F_{x_{ij}}}{\partial Z_0} \delta Z_0 \\ - \frac{\partial F_{x_{ij}}}{\partial \Omega} \delta \Omega - \frac{\partial F_{x_{ij}}}{\partial \Phi} \delta \Phi - \frac{\partial F_{x_{ij}}}{\partial k} \delta k - \frac{\partial F_{x_{ij}}}{\partial X} \Delta X \\ - \frac{\partial F_{x_{ij}}}{\partial Y} \Delta Y - \frac{\partial F_{x_{ij}}}{\partial Z} \Delta Z = 0 \end{aligned} \quad (3-2)$$

$$\begin{aligned} G_{y_{ij}}^0 + V_{y_{ij}} - \frac{\partial G_{y_{ij}}}{\partial X_0} \delta X_0 - \frac{\partial G_{y_{ij}}}{\partial Y_0} \delta Y_0 - \frac{\partial G_{y_{ij}}}{\partial Z_0} \delta Z_0 \\ - \frac{\partial G_{y_{ij}}}{\partial \Omega} \delta \Omega - \frac{\partial G_{y_{ij}}}{\partial \Phi} \delta \Phi - \frac{\partial G_{y_{ij}}}{\partial k} \delta k - \frac{\partial G_{y_{ij}}}{\partial X} \Delta X \\ - \frac{\partial G_{y_{ij}}}{\partial Y} \Delta Y - \frac{\partial G_{y_{ij}}}{\partial Z} \Delta Z = 0 \end{aligned}$$

여기서,

V_x, V_y : 寫眞座標의 근사값 x_0, y_0 의 잔차.

$$F_{x_{ij}}^0 = F_{x_{ij}}(x_{ij}^0, X_{0i}^0, Y_{0i}^0, Z_{0i}^0, \Omega_i^0, \Phi_i^0, k_i^0, X_j^0, Y_j^0, Z_j^0)$$

$$G_{y_{ij}}^0 = G_{y_{ij}}(y_{ij}^0, X_{0i}^0, Y_{0i}^0, Z_{0i}^0, \Omega_i^0, \Phi_i^0, k_i^0, X_j^0, Y_j^0, Z_j^0)$$

(3-2)式을 行列形態로 간단히 나타내면,

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix}_{ij} - \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 \\ b_1 & b_2 & b_3 & b_4 & b_5 & b_6 \end{bmatrix}_{ij} \begin{bmatrix} \delta X_0 \\ \delta Y_0 \\ \delta Z_0 \\ \delta \Omega \\ \delta \Phi \\ \delta k \end{bmatrix}_i$$

$$+ \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \end{bmatrix}_{ij} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}_j = - \begin{bmatrix} F_{x_{ij}}^0 \\ G_{y_{ij}}^0 \end{bmatrix}_{ij} \quad (3-3)$$

이 된다.

(3-3)式을 간단히 표시하면, (3-4)式이 된다.¹⁷⁾

$$V_{ij} - \alpha_{ij} \delta_i + \beta_{ij} \Delta_j = F_{ij}^0 \quad (2 \times 1) \quad (2 \times 6)(6 \times 1) \quad (2 \times 3)(3 \times 1) \quad (2 \times 1) \quad (3-4)$$

(3-3)式 및 (3-4)式은 各 寫眞上의 點의 觀測값에 대 하여 線形化된 觀測方程式이다.

여기서,

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix}_{ij} \quad \alpha_{ij} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 \\ b_1 & b_2 & b_3 & b_4 & b_5 & b_6 \end{bmatrix}$$

$$\delta_i = \begin{bmatrix} \delta X_0 \\ \delta Y_0 \\ \delta Z_0 \\ \delta \Omega \\ \delta \Phi \\ \delta k \end{bmatrix}_i \quad \beta_{ij} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \end{bmatrix}$$

$$\Delta_j = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}_j \quad F_{ij}^0 = \begin{bmatrix} F_{x_{ij}}^0 \\ G_{y_{ij}}^0 \end{bmatrix}_{ij}$$

즉, (3-4)式에서 δ_i 와 Δ_j 를 구하여 對象物의 3次元空間座標와 空間後方交會法座標要素 $X_0, Y_0, Z_0, k, \Phi, \Omega$ 를 계산 할 수 있다.

3.2 직접선형변환법(D.L.T)에 의한 3차원 위치해석

直接線形變換(DLT)에 의한 寫眞測量의 解析技法은 寫眞指標가 필요하지 않으며, 未知數들에 대한 初期近似값이 요구되지 않고, 계산이 간단한 長點이 있다. 반면에 적어도 6點이상의 基準點들이 필요하고, 基準點들의 分布狀態에 따라 결과값이 민감하게 변함으로 基準點들을 고르게 분포시켜야한다.

이 方法은 像의 內部標定이 없이도 非反復的으로 直接後方交會를 할 수 있는 形狀函數로 構成된 條件方程式으로 나타낼 수 있다.

3.2.1 직접선형변환법의 기본이론

共線條件式 (3-1)式 및 (3-2)式에 定誤差를 고려하고,

焦點距離 C를 x方向 및 y方向으로 구분하여 적용하면 아래와 같이 표시할수 있다.¹⁸⁾

$$x - X_0 + \Delta x = -C_x \frac{m_{11}(X-X_0) + m_{12}(Y-Y_0) + m_{13}(Z-Z_0)}{m_{31}(X-X_0) + m_{32}(Y-Y_0) + m_{33}(Z-Z_0)} \quad (3-5)$$

$$y - y_0 + \Delta y = -C_y \frac{m_{21}(X-X_0) + m_{22}(Y-Y_0) + m_{23}(Z-Z_0)}{m_{31}(X-X_0) + m_{32}(Y-Y_0) + m_{33}(Z-Z_0)} \quad (3-6)$$

여기에서, Δ_x, Δ_y ; 定誤差
 C_x, C_y ; 焦點距離

(3-5)式 및 (3-6)式을 이용하여 地上點의 座標를 解析하기 위하여서는, 寫眞指標의 像座標와 外部標定要素들의 初期近似값을 알아야 하므로 非測量用寫眞에서는 적합하지 않다.

內部標定要素 및 外部標定要素들의 初期近似값을 사용하지 않고, 像座標로 부터 絕對座標로 直接變換되는 DLT 解法의 基本式은 (3-7)式과 같다.¹⁸⁾

$$x + \Delta x = \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \quad (3-7)$$

$$y + \Delta y = \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1}$$

(3-7)式은 定誤差 Model $\Delta x, \Delta y$ 를 포함하고 있으며, $L_1 \sim L_{11}$ 까지 DLT 係數를 나타내면 다음과 같다.

$$L_1 = (x_0 m_{31} - C m_{11}) / L$$

$$L_2 = (x_0 m_{32} - C m_{12}) / L$$

$$L_3 = (x_0 m_{33} - C m_{13}) / L$$

$$L_4 = x_0 + C_x (m_{11} X_0 + m_{12} Y_0 + m_{13} Z_0) / L$$

$$L_5 = (y_0 m_{31} - C y m_{21}) / L$$

$$L_6 = (y_0 m_{32} - C y m_{22}) / L$$

$$L_7 = (y_0 m_{33} - C y m_{23}) / L$$

$$L_8 = y_0 + C_y (m_{21} X_0 + m_{22} Y_0 + m_{23} Z_0) / L \quad L_9 = m_{32} / L$$

$$L_{10} = m_{32} / L$$

$$L_{11} = m_{32} / L$$

$$L = -(m_{32} X_0 + m_{32} Y_0 + m_{33} Z_0)$$

像座標는 定誤差 外에도 偶然誤差 V_x , 와 V_y 를 포함하므로 이 값을 고려하고, DLT 係數 $L_1 \sim L_{11}$ 을 사용하

여 (3-7)式을 다시 쓰면 (3-8)式과 같이 나타낼수 있다.

$$(x + V_x + \Delta x)(L_9 Z + L_{11} Y + 1) = (L_1 X + L_2 Z + L_3 Y + L_4)$$

$$(x + V_x + \Delta x)(L_9 Z + L_{11} Y + 1) = (L_5 X + L_6 Z + L_7 Y + L_8) \quad (3-8)$$

$L_9 X + L_{10} Z + L_{11} Y + 1 = A$ 라 놓고, $L_1 \sim L_{11}$ 까지의 係數가 條件方程式에 포함되도록 (3-8)式을 다시 整理하면 (3-9)式과 같다.

$$V_x = (L_1 X + L_2 Z + L_3 Y + L_4) / A$$

$$- x(L_9 X + L_{10} Z + L_{11} Y) / A - \Delta x - x / A$$

$$V_y = (L_5 X + L_6 Z + L_7 Y + L_8) / A$$

$$- y(L_9 X + L_{10} Z + L_{11} Y) / A - \Delta x - y / A \quad (3-9)$$

(3-9)式을 最小제곱법으로 풀어서 $L_1 \sim L_{11}$ 까지 係數를 구한다.

이 때 사용되는 定誤差모델은 (3-10)式과 같다. 여기서,

$$\Delta x = x'(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) + P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2 x' y'$$

$$\Delta y = y'(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) + 2P_1 x' y' + P_2(r^2 + 2y^2) \quad (3-10)$$

여기서, $x' = x - x_0$, $y' = y - y_0$, $r^2 = x'^2 + y'^2$

$$y' = y - y_0$$

$$r^2 = x'^2 + y'^2$$

K_i = 대칭 렌즈 왜곡수차 계수
 P_i = 비대칭 렌즈 왜곡수차 계수

Karara 와 Abdel-Aziz 실험에 의하면 K_i 항 만이 렌즈 왜곡 수차와 피림변형을 처리하는 데 고려 할 필요가 있고, 부가적인 항은 (K_2, K_3, P_1, P_2)은 正確度에 있어서 충분한 增加를 얻지 못하였다.⁹⁾

4. 실험 및 결과분석

4.1 실험

4.1.1 촬영모델의 설정

관측대상물의 3차원 위치해석을 실험하기 위하여 모델을 촬영하고, 관측하였다. 모델은 Fig. 2와 같이 1.2 m × 1.2 m 크기로 설치하고, Model이 기록이 있도록 제작하였으며, 기록의 고저차는 172.4 mm까지 변화를 주었다.

모델상에는 15 mm크기의 정사각형으로 표지를

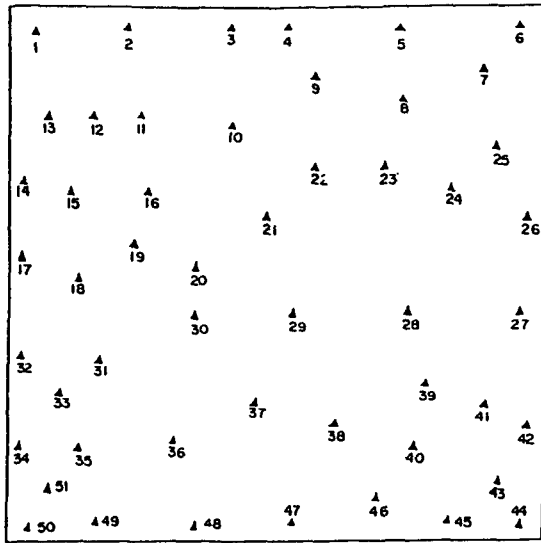


Fig. 2. Arrangement of target.

51개소 부착하였으며, 되도록 전체 면적에 균등하게 분포되도록 배치하였다.

4.1.2 기준점측량

기준점측량은 일반적으로 삼각수준측량(Trigonometric leveling)방법이 이용되고 있으며 두지점에서 각을 측정하는 교회법으로 좌표를 계산하는 방법으로써, 기준점의 좌표 X_i, Y_i, Z_i 는 각 관측($\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$)과 인바테이프에 의한 길이관측(B, V)으로부터 계산된다.

본 연구를 위한 관측에서는 기선길이 2.0 m를 정하여 WILD T2 1초독 Theodolite를 사용하여 관측하였다. A측점 및 B측점에서 각각 수평각 (α_1, α_2) 및 수직각 (β_1, β_2)를 관측하여 기준점의 좌표를 계산하였으며, 관측자료 및 계산결과는 Table 1와 같다.

4.1.3 관측기기

본 실험을 위하여 관측에 사용된 주요기기는 P31 Terrestrial camera, ASAHI PENTAX(6×7)Camera, MK-2 mono Comparator, Theodolite, Level, Steel tape 등이며, Camera와 Comparator의 주요제원은 다음과 같다.

1) Terrestrial Camera (Metric Camera)

Camera type : WILD P31
 Lens type : F 8/10 cm
 Lens NO. : NO.57336

Principal distance for focussing distance :

25 m : 99.67 mm

Principal Point of autocollimation (P.P.A) :

-0.002 (mm)(X), +0.003 mm(y)

Principal Point of symmetry (P.P.S) :

-0.012 (mm)(X), -0.000 mm(Y)

이 사진기의 지표와 Lens의 방사 방향수차는 Fig.3과 같다.

2) ASAHI PENTAX (Non -Metric Camera)

Camera type : ASAHI PENTAX (6X7)

Lens type : F 6/10 cm

Lens NO. : NO.296023

3) Comparator

Comparator type : MK-2 mono Comparator

Resolution : 0.001 mm

Precision : 0.002 mm

X,Y format : 23 cm × 23 cm

Magnification : 16 X

Biased error : Dx = -0.3 m

Dy = -0.4 m

Standard deviation : X = 0.7 m

Y = 0.8 m

Calibration : $X_c = a_1 + a_2x_c + a_3y_c$

$Y_c = b_1 + b_2x_c + b_3y_c$

$a_1 = 1.63448$

$a_2 = 1.00005$

$a_3 = -7.36504E-05$

$b_1 = 2.18432$

$b_2 = 1.00002$

$b_3 = 3.060204E-05$

4) 기타관측기기

Theodolite (WILD T2 1초독) : 2대

Exposure meter (Made in Germany Measuring angle 30°) : 1개

Lighter (500W × 1) : 1대

Lighter (200W × 2) : 1대

Staff (Aluminium) : 1대

Steel Tape : 1개

Table 1. Results of control point surveying

Station	Horizontal angle		vertical angle		XL (Cm)	YL(Cm)	ZL(Cm)
	STATION "A"	STATION"B"	STATION "A"	STATION "B"			
1	275-49-00	73-45-59	81-57-40	85-58-48.7	51.8379	72.2402	91.1373
2	278-22-54	76-11-07.5	81-54-10	82-39-55	74.9376	73.1410	93.3962
3	280-50-00	78.32-58.4	82-14-53	82-53-16.1	97.1597	70.3699	92.2760
4	281-47-36	79.29.53	82-51-34.5	82-57-11	105.9404	69.5342	92.5965
5	284-18-56	82-02-51	82-34-12	83-02-32.4	129.2468	68.1668	93.5190
6	286-48-26	84-45-08.5	82-33-31	82-53-48	153.3661	69.2765	92.2577
7	286-03-35	83-55-23.2	83-36-11	84-01-13	146.0047	59.1715	92.8167
8	284-29-21	82-08-50.8	83-46-25	84-16-10.7	129.8545	57.2602	91.3950
9	282-29-22	80-04-54	83-05-21.5	83-39-34.8	111.2981	62.9462	92.7198
10	280-41-27	78-26-04.9	83-42-28	84-21-13.0	95.9704	57.0432	91.6448
11	279-01-55	76-37-31	83-20-48	84-04-21.2	80.1343	59.5437	95.8705
12	278-16-30	75-59-15	83-26-23	84-11-29.2	74.6400	58.8415	93.6686
13	277-23-17	74-57-11	82-58-46.5	83-47-12.0	65.0778	62.3235	93.1088
14	276-04-20	73-51-09.9	83-45-05	84-34-53	53.7392	55.6247	94.8317
15	277-20-44	75-04-04	84-18-34	85-04-52	65.1735	50.7953	94.4293
16	279-30-16.5	77.13-41	84-12-27	84-54-04	84.9646	52.1975	92.5196
17	275-56-22	73.47-53.1	85-06-42	85-55-45.8	52.7298	43.5818	93.1570
18	276-46-44	74.41-41.3	86-05-04	86-49-12.3	60.5648	35.1192	90.4923
19	278-08-05	76.02-53.1	85-23-16	86-06-05.5	73.0445	46.6441	88.9829
20	278-50-59.5	76.39-35.2	85-52-16	86-33-41.2	79.2703	37.1955	90.8746
21	280-26.46.5	78-09-06	85-32-56.5	86-12-07	93.5502	40.1627	90.5923
22	281-49-11	79-28-47	85-01-16	85-37-56.1	105.9663	45.0684	93.6699
23	282-50-36	80-35-07	84-43-45	85-18-08.1	115.7888	48.0551	92.1313
24	284-29-35	82-21-13.6	85-14-18	85-45-46.9	131.6338	41.8137	90.7541
25	285-54-11	83-49-40	84-41-07	85-08-30	144.9729	41.2183	91.1704
26	286-47-54	84-46-07.6	85-30-43	85-58-26	153.4587	41.6785	91.6675
27	286-38-19	84-28-22.2	87-42-46	88-16-25	151.0798	21.0742	94.4574
28	283-54-06.5	81-40-49	87-26-35	88-02-09	125.7202	23.2677	92.0566
29	281-07-53	78-52-32.1	87-21-47	88-00-00	100.0320	23.6835	91.6062
30	279-36-42	77-27-53	87-30-19	88-09-38.5	86.4702	22.5634	89.3888
31	277-55-27	75-35-36.9	88-03-21	88-43-06	70.2867	17.3064	95.0351
32	275-58-46	73-59-19	87-44-01	88-26-03.5	53.4800	20.3181	89.4072
33	277-08-50	75-00-18	88-31-10	89-11-15.1	63.7730	13.2479	91.4167
34	276-01-55	73-50-22	90-51-20	91-27-04.7	53.4421	-7.5946	92.2453
35	277-27-08.5	74-59-17.1	90-47-11	91-24-02.8	65.5707	-6.9392	93.7205
36	279-34-29	77-15-38.8	90-58-39	91-36-01.9	85.4606	-8.7665	93.3658
37	281-22-12	78-52-18	90-12-30	90-51-00	101.1022	-1.8648	97.2301
38	282-18-31	79-39-18	90-38-03	91-17-14	108.7332	-5.6457	101.6650
39	284-10-41	81-46-14	88-47-33	89-24-49.7	127.1875	10.9451	96.5497
40	284-03-26.5	81-12-32.4	91-08-37.5	91-46-26	123.6383	-10.1626	106.2207
41	285-20-30	82-50-25	90-03-10	90-42-31.5	137.1871	-0.4776	99.9583
42	286-42-08	84-31-58	90-30-45	91-10-55.9	151.6324	-4.7194	94.6537
43	285-50-27	83-31-32.7	92-02-56	92-46-15.9	142.8629	-18.7238	96.5027
44	286-44-20	84-36-36.4	93-35-23.5	94-22-30	152.2406	-33.1623	93.8047
45	283-54-17	81-28-47.3	93-21-13	94-03-43.2	124.7746	-30.3191	97.8655
46	282-33-51	79-50-20.5	92-15-54	92-56-02	110.8543	-20.1558	102.6057
47	281-25-50	78-53-57	93-20-33.5	93-09-07	101.4455	-29.9296	97.7027
48	279-29-54.5	77-12-13.8	93-19-03.5	93-54-36.9	84.8369	-29.8015	92.9510
49	277-53-30	75-36-05	93-27-56	94-00-44.5	7.1229	-30.9291	94.1115
50	276-02-42	73-50-49	93-28-15	93-58-25	53.5467	-30.8394	94.3586
51	276-46-47.5	74-25-08	91-45-28.5	92-20-30	59.7813	15.5416	97.1532

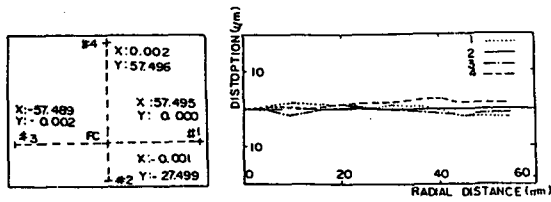


Fig. 3. Image plane of p31 and radial lens distortion for half-side preferred to PPS.

4.1.4 사진촬영

본 연구를 위하여 촬영에 사용된 사진기는 WILD P 31 및 ASAHI PENTAX이다. 측량용 사진촬영은 WILD P31로써 촬영거리에 따라 보조링을 사용하여 초점거리를 조정하여 촬영하였다.

비측량용 사진은 ASAHI PENTAX(6×7)로써 초점거리 100 mm 렌즈를 사용하였다. 촬영방법은 양 사진기의 촬영축이 촬영기선에 직각인 직각수평촬영, 양 사진기의 촬영축이 촬영기선에 대하여 일정한 각도만큼 좌 또는 우측방향으로 수평편각을 주어 촬영한 편각수평촬영, 그리고 양사진기의 촬영축을 촬영기선방향에 대하여 어느 각도만큼 안쪽으로 회전하여 촬영한 수렴수평촬영방법이 있으나, 본 연구에서는 결과분석의 다양성을 도출하기 위하여 Fig. 4와 같이 촬영거리 4.0 m에서 촬영점의 위치를 변화시켜 측량용 사진기로 수평 사진 9매, 같은 위치에서 수렴사진 8매를 촬영하였다.

역시 촬영거리 4.0 m에서 촬영점의 위치를 변화시켜 비측량용 사진기로 수평사진 9매, 같은 위치에서 수렴사진 8매를 촬영하였다. 실험에서 얻어진 사진을 측량용 사진 17매, 비측량용 사진 17매, 합계 34매로, 사진축척은 1/40이며, 사진 모두가 결과분석에 사용되었으며, 촬영점의 위치에 따른 사진번호는 Table 2와 같다.

측량용 사진에 사용된 필름은 Kodak plus-X pan professional film (4×5 : ASA100)이며, 비측량용 사진에 사용된 필름은 Kodak Verichromepan film VP 120 (62 mm Roll : ASA 100)이다.

4.1.5. 외부표정요소 해석

촬영된 측량용 사진 및 비측량용 사진에서 좌표 관측기로 관측된 상점의 기계좌표를 상점의 사진좌표로 변환하고, 이 사진좌표를 이용하여 지형의 3차원좌표값을 계산한다. 좌표계산에 사용되는 각사진의 외부표정요소의 근사값은 촬영거리 및 각 촬영점의 위치를 줄자

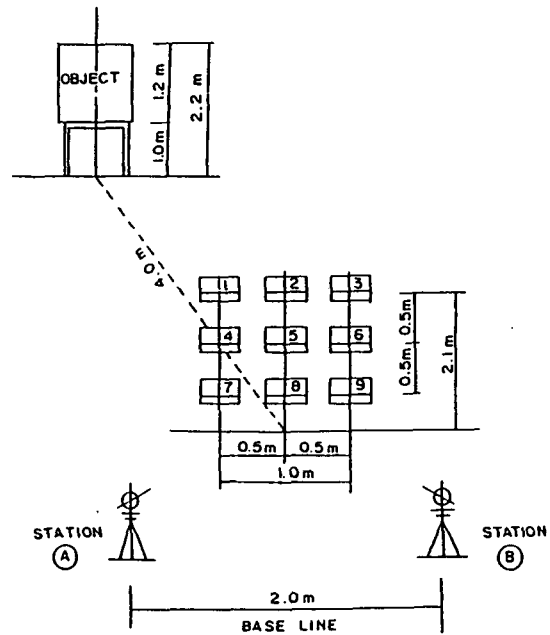


Fig. 4. Condition of photographing and observation.

Table 2. Number of photo according to exposure station

Exposure station	Metric photo		Non-metric photo	
	Horizontal	Convergent	Horizontal	Convergent
1	3111	3112	67-1	6710
2	3113	3114	6702	6711
3	3115	3116	6703	6712
4	3117	3118	6704	6713
5	3119	-	6705	-
6	3120	3121	6706	6714
7	3122	3123	6707	6715
8	3124	3125	6708	6716
9	3126	3127	6709	6717

및 staff로 관측하고 계산하였다. 측량용 사진의 근사값은 Table 3과 같으며, K_0 에 3.14156 Radian값이 있는 것은 사진기에서 180° 반전하여 촬영하였기 때문이다. ω_0 및 ϕ_0 는 촬영거리 및 중앙점에서 상하 또는 좌우 이동량에 따라 계산된 값이다.

측량용 사진의 근사값은 Table 3과 같고, 비측량용 사진의 근사값은 Table 4와 같으며, ω_0 및 ϕ_0 는 촬영거리 및 중앙점에서 상하 또는 좌우 이동량에 따라 계산된 값이다.

Table 3. Value of exterior orientation elements (metric photo)

No. of photo	X_0 (cm)	Y_0 (cm)	Z_0 (cm)	ω_0 (Radian)	ϕ_0 (Radian)	κ_0 (Radian)
3111	52.54	67.40	491.04	0	0	+3.1416
3112	52.54	67.40	491.04	-0.1100	-1244	+3.1416
3113	102.54	67.40	491.04	0	0	+3.1416
3114	102.54	67.40	491.04	-0.1100	0	+3.1416
3115	152.24	67.40	491.04	0	0	+3.1416
3116	152.54	67.40	491.04	-0.1100	+0.1244	+3.1416
3117	52.54	67.40	491.04	0	0	0
3118	52.54	17.40	491.04	0	+0.1244	0
3119	102.54	17.40	491.04	0	0	0
3120	152.54	17.40	491.04	0	0	0
3121	152.54	17.40	491.04	0	+0.1244	0
3122	52.54	17.40	491.04	0	0	0
3123	52.54	-32.60	491.04	+0.1414	-0.1244	0
3124	102.54	-32.60	491.04	0	0	0
3125	102.54	-32.60	491.04	+0.1414	0	0
3126	152.54	-32.60	491.04	0	0	0
3127	152.54	-32.60	491.04	+0.1414	+0.1244	0

Table 4. Values of exterior exterior orientation elements (non-metric photo)

No. of photo	X_0 (cm)	Y_0 (cm)	Z_0 (cm)	ω_0 (Radian)	δ_0 (radian)	κ_0 (Radian)
6701	52.54	67.40	491.04	0	0	0
6702	102.54	67.40	491.04	0	0	0
6703	152.54	67.40	491.04	0	0	0
6704	52.54	17.40	491.04	0	0	0
6705	102.54	17.40	491.04	0	0	0
6706	152.54	17.40	491.04	0	0	0
6707	52.54	-32.60	491.04	0	0	0
6708	102.54	-32.60	491.04	0	0	0
6709	152.54	-32.60	491.04	0	0	0
6710	52.54	67.40	491.04	-0.1244	-0.1244	0
6711	012.54	67.40	491.04	-0.1244	+0.1244	0
6712	152.54	67.40	491.04	-0.1244	+0.1244	0
6713	52.54	17.40	491.04	0	-0.1244	0
6714	152.54	17.40	491.04	0	+0.1244	0
6715	52.54	-32.60	491.04	+0.1244	-0.1244	0
6716	102.54	-32.60	491.04	+0.1244	0	0
6717	152.54	-32.60	491.04	+0.1244	+0.1244	0

4.2 결과분석

4.2.1 측량용 사진과 비측량용 사진해석결과 오차분석

측량용 사진과 비측량용사진을 비교하기 위하여 위치해석결과에 따른 오차특성을 분석하였다. 일반적으로 측량용 사진해석에 있어서는 번들조정법을 사용하고, 비측량용 사진해석에 있어서는 지표값의 정밀도를 비교하기 위하여서는 동일한 해석방법을 적용함이 타당하다. 그러므로 측량용사진과 비측량용사진 모두 번들조정법과 직접선형변환법으로 해석하였다.

번들조정법과 직접선형변환법에 의한 해석결과값의 신뢰도를 높이기 위하여 촬영조건을 바꾸어 가면서 측량용사진중에서 2매의 사진으로 10가지 형태의 경우, 3매의 다중사진으로 16가지 형태의 경우, 4매의 다중사진으로 14가지 형태의 경우, 합계 40가지 형태의 경우를 해석하였다. 같은 조건으로 촬영된 비측량용사진에 대하여서도 측량용사진과 똑같은 40가지 경우를 해석하였다.

측량용사진과 비측량용사진에서 번들조정법과 직접선형변환법에 대한 위치해석 결과는 Table 5와 같으며, 이것을 그림으로 나타내면 Fig. 5와 6과 같이 된다. 그리고 측량용 사진에 의한 위치해석결과와 비측량용 사진

에 의한 위치해석결과와 표준오차 평균은 Table 6과 같다.

Table 6에서 알 수 있는 바와 같이 위치오차의 평균은 측량용 사진의 경우 Bundle조정법에 의한 해석결과는 1.639 mm, 직접선형변환법에 의한 해석결과는 2.110 mm로써 Bundle 조정법에 의한 해석결과가 양호하였다.

비측량용 사진에 있어서도 위치오차의 평균은 Bundle 조정법에 의한 해석결과는 1.829 mm, 직접선형변환법에 의한 해석결과는 2.30 mm로써 번들조정법에 의한 해석결과가 양호하였다. 그러므로 측량용 사진 및 비측량용 사진 모두 Bundle조정법에 의한 해석결과가 양호한 해석값이 산출되었다.

그러므로 Bundle 조정법으로 해석하여 표준오차를 분석하였다. 비측량용 사진의 효용성을 분석하기 위하여 측량용사진과의 위치오차 크기를 비교하였다.

측량용 사진의 2가지 해석방법에 대한 위치평균은 1.875 mm, 비측량용 사진의 2가지 해석방법에 대한 위치오차평균은 2.065 mm로써, 비측량용사진이 측량용사진에 비하여 0.19 mm 큰 오차가 발생되었다. 그리고 측량용사진에서 수평방향표준오차는 0.281~0.298

Table 5. Comparison of results by Bundle adjustment with DLT (unit : mm)

Condition of photographing	Adjustment of method		standard error			
			S _x	S _y	S _z	S _p
Metric photo	Bundle	2	0.317	0.322	1.764	1.822
		3	0.257	0.267	1.609	1.651
		4	0.237	0.236	1.403	1.443
	DLT	2	0.388	0.367	2.842	2.894
		3	0.318	0.255	1.872	1.918
		4	0.268	0.239	1.472	1.517
Non-metric photo	Bundle	2	0.343	0.353	2.108	2.164
		3	0.260	0.265	1.786	1.823
		4	0.220	0.220	1.467	1.500
	DLT	2	0.324	0.345	3.126	3.226
		3	0.321	0.267	2.095	2.143
		4	0.283	0.230	1.486	1.533

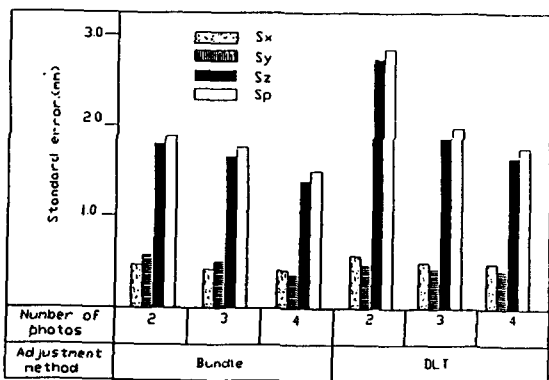


Fig. 5. Comparison of results by Bundle adjustment with DLT (metric photo)

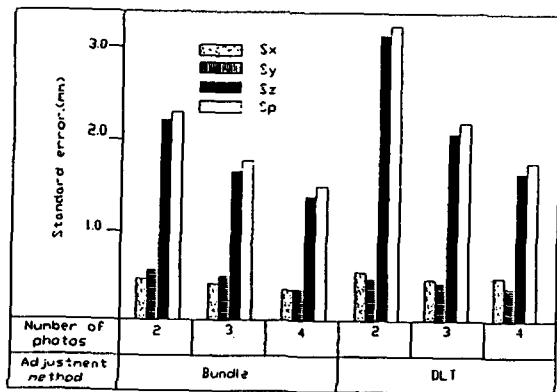


Fig. 6. Comparison of results by Bundle adjustment with DLT (non-metric photo).

Table 6. Average standard error of metric with non-metric photo

Condition of photographing	Adjustment of method	Standard error				Remarks
		S _x	S _y	S _z	S _p	
Metric photo	Bundle	0.270	0.275	1.592	1.638	
	DLT	0.325	0.287	2.062	2.110	
	Average	0.298	0.281	1.827	1.875	
Non-Metric photo	Bundle	0.274	0.279	1.787	1.829	
	DLT	0.336	0.281	2.266	2.301	
	Average	0.305	0.280	2.027	2.065	
Average		0.302	0.281	1.927	1.970	

mm이고, Z축 방향(광축방향)표준오차크기는 1.827 mm로써, Z축 방향표준오차크기는 수평축방향표준오차 크기의 6.1배~6.5배 크기로 나타났다.

비측량용사진에서 수평방향표준오차는 0.280~0.305 mm이고, Z축 방향(광축방향)표준오차 크기는 2.027 mm로써, Z축 방향 표준오차 크기는 수평축방향 표준오차 크기의 6.6배~7.2배 크기로 나타났다.

4.2.2 비측량용사진의 실용성 분석

비측량용사진을 이용한 근거리사진측량은 측량용사진을 이용한 경우보다 훨씬 경제적이고 촬영이 간편하므로 비측량용사진의 실용성을 분석하였다.

비측량용사진의 경우에는 촬영거리 4.0 m, 카메라의 초점거리 10 cm, 사진축척 $f/Z=1/40$ 인 조건이며, 측량용사진의 경우와 같은 조건이다. 이와 같은 측량조건에 있어서 Table 7에서 나타난 바와 같이, 측량용사진에서 수평방향의 표준오차가 0.281~0.298 mm, Z축방향(광축방향) 표준오차크기는 1.827 mm이다. 그리고 비측량용 사진에서 수평방향의 표준오차가 0.280 mm~0.302 mm, Z축 방향(광축방향)표준오차크기는 1.927 mm로써, 비측량용 사진의 해석결과가 측량용사진에 비해서 수평방향에서는 0.004 mm 정도, Z축 방향(광축방향)에서는 0.100 mm 정도 큰 오차가 발생하였다. 그러므로 촬영거리가 4.0 m 정도이고, 사진축척이 1/40 정도의 시설물의 변형해석등에 있어서는 비측량용 사진을 사용하여도 수평방향의 표준오차가 0.4 mm이며, Z축 방향(광축방향)표준오차 2.0 mm이내로 해석할 수 있으므로 충분히 실용성이 있다고 생각된다.

Table 7. Standard error distributions of different of arrangement of control points (non-metric photo)

Arrangement of control point	Stand- ard error	① ② ③ ④ ⑤ ⑥						Av.
		①	②	③	④	⑤	⑥	
Case 1	Sx	0.537	0.311	0.419	1.053	0.724	2.013	0.843
	Sy	0.548	0.236	0.416	1.334	0.794	2.034	0.859
	Sz	3.300	2.101	0.338	8.012	4.602	12.187	5.590
	Sp	3.398	2.150	3.392	8.151	4.727	12.526	5.724
Case 2	Sx	0.322	0.276	0.946	0.792	0.257	2.519	0.852
	Sy	1.309	0.291	0.962	0.712	0.270	2.638	0.864
	Sz	1.968	1.757	7.592	5.512	1.580	14.266	5.446
	Sp	2.019	1.803	7.716	5.617	1.624	14.730	5.585
Case 3	Sx	0.206	0.373	0.213	0.252	0.278	0.521	0.307
	Sy	0.213	0.360	0.227	0.245	0.295	0.522	0.315
	Sz	1.368	2.415	1.736	2.009	1.716	2.962	2.034
	Sp	1.400	2.471	1.746	2.041	1.763	3.058	2.083
Case 4	Sx	5.628	0.243	0.436	0.256	0.291	0.902	1.293
	Sy	4.600	0.246	0.406	0.233	0.317	0.908	1.118
	Sz	32.574	1.596	2.928	1.847	1.747	4.912	7.701
	Sp	33.383	1.634	2.989	1.881	1.800	5.078	7.794

Position of Camera	①	②	③	④	⑤	⑥
Condition of photographing	Left - right horizontal	Left - right convergent	Upper - lower horizontal	Upper - lower convergent	Diagonal horizontal	Diagonal convergent

Fig. 7. Conditions of photographing (metric and non-metric camera).

4.2.3 수평사진과 수렴사진의 해석결과 오차분석

근거리 사진측량에서 촬영방법은 일반적으로 Fig. 7의 ①, ② 와 같은 촬영조건으로 측정되어 왔으나, 촬영상태에 의한 영향을 분석하기 위하여, Fig. 7의 ③, ④, ⑤, ⑥과 같이 조건을 변경시켜 촬영하였으며, 각각의 경우에 대한 표준오차를 분석하였다.

Fig. 7에서 촬영상태 ①의 좌우수평사진의 경우에는 Fig. 4의 중앙촬영점 (h=1.6 m)을 중심으로 좌우사진거리 1 m에서 수평사진으로 촬영한 경우이며, 좌우수렴사진의 경우에는 같은 위치에서 수렴촬영한 사진이다.

촬영상태 ③의 상하수평사진의 경우에는 Fig. 4의 중앙촬영점(h=1.6 m)을 중심으로 상하사진거리 1.0 m에

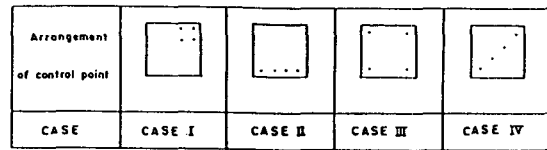


Fig. 8. Arrangement of control points.

서 수평으로 촬영한 경우이며, 상하수렴사진의 경우에는 같은 위치에서 수렴촬영한 사진이다.

촬영상태 ⑤의 대각수평사진의 경우에는 Fig. 4의 중앙촬영점(h=1.6 m)을 중심으로 상우측촬영점과 하좌측촬영점에서 각각 수평사진으로 촬영한 경우이며, 대각수렴사진의 경우에는 각각 같은 위치에서 수렴촬영한 사진이다.

비측량용사진에서 기준점분포형태를 변화시키면서 사진촬영 형태도 변화시켜서 위치해석을 수행하였다. 기준점 배치형태는 Fig. 8과 같이 4가지 형태로 변화시키고 사진촬영형태는 Fig. 7과 같이 6가지 형태로 변화시켜 각각의 경우를 조합하여 24가지 경우에 대하여 위치해석을 하였으며, 그 결과는 Table 7과 같다.

Fig. 8의 기준점 배치형태에 있어서 CASE I, CASE II, CASE III는 표준오차가 크게 나타났으며 CASE III의 경우가 정확한 좌표계산을 할수있는 배치형태로 나타났다.

기준점배치형태가 양호한 case III의 경우 가장 불량한 Fig. 7의 ⑥번 촬영상태의 경우 위치표준오차는 3.058 mm, 기준점배치 형태가 불량한 CASE III의 경우 가장 불량한 ①번 촬영상태의 경우 위치표준오차는 33.383 mm로써 기준점배치가 불량한 경우에는 약 10.9배 크기의 표준오차가 발생되고 있음을 알수 있었다. CASE III의 경우가 가장 이상적인 기준점 배치 형태이므로, CASE III에 대하여 각촬영상태에 대한 표준오차를 분석한 결과를 양호한 순서대로 나타내면 Table 8과 같다.

5. 결 론

근거리사진측량에 있어서 경제성이 높고, 손쉽게 촬영할 수 있는 비측량용사진측정의 정확도를 분석하기 위하여 사진측량의 이론고찰, 모델설정을 통한 실험및 결과분석을 통하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) 측량용사진해석결과 Z축방향(광축방향)의 표준오

Table. 8. Order of excellent Condition for photographing.

Order	1	2	3	4	5	6	
Condition of photographing	Left-right horizontal	Diagonal horizontal	Upper-lower Convergent	Upper-lower convergent	Left-right Convergent	Diagonal Convergent	
Standard error	Sx	0.266 mm	0.278 mm	0.213 mm	0.252 mm	0.373 mm	0.521 mm
	Sy	0.213 mm	0.295 mm	0.227 mm	0.245 mm	0.360 mm	0.552 mm
	Sz	1.368 mm	1.716 mm	1.736 mm	2.009 mm	2.145 mm	2.962 mm
	Sp	1.400 mm	1.763 mm	1.764 mm	2.401 mm	2.417 mm	3.058 mm

차($Z_p = 1.827$ mm)는 수평방향 표준오차 ($S_x = 0.298$ mm, $S_y = 0.281$ mm)보다 6.1배~6.5배의 크기를 나타냈으며, 비측량용 사진 해석 결과도 Z축 방향(광축방향) 표준오차($Z_p = 2.027$ mm)는 수평방향 표준오차 ($S_x = 0.305$ mm, $S_y = 0.280$ mm) 보다 6.6배~7.2배 크기로 나타났으므로, 변형해석등의 정밀을 요하는 해석에 있어서는 광축방향의 오차발생에 주의를 요한다.

2) 촬영거리가 4.0 m 정도이고, 사진축척이 1/40 정도의 사진축척으로 시설물의 변형해석등을 수행하는 경우, 비측량용 사진을 사용하여도 수평방향 표준오차 0.4 mm 이내, Z축(광축방향) 표준오차 2.1 mm 이내로 해석할 수 있으므로, 시설물의 위치해석에 있어서 수평방향으로는 충분히 실용성이 있는 것으로 나타났다.

3) 기준점배치형태에 따른 표준오차 변화특성을 분석한 결과 기준점배치가 불량한 상태(CASE IV)의 위치 표준오차 크기($S_p = 33.383$ mm)가, 기준점배치가 양호한 상태(CASE III)의 위치 표준오차 크기 ($S_p = 1.400$)의 23.8배 크기로 나타나서, 기준점배치의 영향이 비측량용 사진의 정확도에 대단히 크게 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

4) 기준점배치가 동일한 경우 각 촬영상태에 따른 표준오차 크기를 분석한 결과 아래와 같은 순서로 양호한 상태가 나타났다.

양호한 순	1	2	3	4	5	6
촬영상태	좌-우 수평촬영	대각 수평촬영	상-하 수평촬영	상-하 수렴촬영	좌-우 수렴촬영	대각 수렴촬영

参考文献

1. J.N. Hatzopoulos, "An Analytical System for Close-Range Photogrammetry", Photogrammetric Engineering

and Remote Sensing, Vol. 51, NO. 10, 1985, pp. 1583-1588.

2. R.A. Matos, "Mutiple -Station Analytical Triangulation", Photogrammetric Engineering, Vol. 37, NO. 2, 1971, pp. 173-176.

3. K.W. Wong, "Aerotriangulation by SAPGO", Photogrammetric Engineering, Vol. 38, NO. 8, 1972, pp. 779-790.

4. H.M. Karara and Y.I. Abdel - Aziz, "Accuracy Aspects of Non-Metric Imageries", Photogrammetric Engineering, Vol. 40, NO. 9, 1974, pp. 1107-1117.

5. J.P. Erandson and S.A. Veress, "Contemporary Problems in Terrestrial Photogrammetry", Photogrammetric Engineering, Vol. 40, No. 9, 1974, pp. 1079-1085.

6. Y.I. Abdel-Aziz, "Expected Accuracy of Convergent Photos", Photogrammetric Engineering, Vol. 40, No. 11, 1974, pp. 1341-1346.

7. P. Hottier, "Accuracy of Close-Range Analytical Restitutions: Practical Experiments and Prediction", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 42, NO. 3, 1976, pp. 345-375.

8. C.S. Fraser, "Periodic Inspection of Industrial Tooling by Photo grammetry", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 54, NO. 2, 1988, pp. 211-216.

9. T.Kawame, S. Matsumoto, Y. Watanabe, and S. Murai, "Deformation Measurement of the Bandai Bridge by Close-Range Photogrammetry", Comm. 5, ISPRS, 1988, pp. 310-318.

10. R.J. Hintz, C. Karakadas, and J.M. Kang, "Analysis of pavement Cracking and Rutting using Close-Range Photograph", Photo grammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 55, NO. 2, 1989, pp. 217-221.

11. 양인태, "경사사진에 의한 해석적 위치결정에 관한 연구", 박사학위논문, 연세대학교 대학원, 1984.

12. 강준목, "다중근거리 사진측정에 의한 피사체의 3차원 정밀해석에 관한연구", 박사 학위논문, 연세대학교 대학원, 1985.

13. 이재기, "비측정용 사진에 의한 좌표해석", 박사학위논문

- 문, 연세대학교 대학원, 1986.
14. 유복모, 유환희, "지상 사진측량에 의한 3차원 변형측량의 신뢰도 분석", 대학토목 학회논문집, 제 7권, 제 4호, 1987, pp. 139-146.
 15. 유환희, "근거리사진측량에 의한 변형해석의 연구", 박사학위논문, 연세대학교 대학원, 1988.
 16. 이종출, "근거리 사진측량에 의한 지형의 3차원 위치해석에 관한 연구", 박사학위논문, 동아대학교 대학원, 1989.
 17. S.K. Gohsh, "Analytical Photogrammetry", Pergman Press, 1979, pp. 39-42.