

非測量用 寫眞에서의 過大誤差 檢出 및 外部標定要素 決定

Gross Error Detection and Determination of Exterior Orientation
Elements in Non-metric Photos

柳	福	模*
Yeu,	Bock	Mo
孫	德	在**
Sohn,	Duke	Jae
朴	弘	祺***
Park,	Hong	Gi

Abstract

The bundle adjustment used in photogrammetric data reduction is based on the collinearity condition. Photogrammetry has been used in many non-topographic applications.

Due to the necessities of having fiducial marks and knowing initial approximations for interior and exterior orientation elements in bundle adjustment, it cannot be applied when non-metric cameras are used.

Marzan and Karara developed the DLT(Direct Linear Transformation) program which directly transforms comparator coordinates into object space coordinates without approximate values.

In this paper, several modifications of original DLT program have been made for accuracy improvement in close-range photogrammetry using non-metric cameras. In modified program, gross error detection method and computation of exterior orientation elements are incorporated, and more iterations are introduced.

요 지

寫眞測量에서 이용되는 번들調整은 共線條件을 기초로 하며, 많은 非地形분야에서 이용되고 있다.

그러나 非測量用사진기의 경우 指標가 없고 內部 및 外部標定要素의 초기근사값을 모르기 때문에, 이를 필요로 하는 번들調整에는 적용할 수 없다.

像座標로부터 絕對座標가 근사값을 요구하지 않고 직접변환되는 DLT(direct linear transformation) 프로그램이 Marzan 과 Karara 에 의해 개발되었다.

* 正會員·延世大學校 工科大學 教授

** 正會員·延世大學校 大學院 博士課程

*** 正會員·延世大學校 大學院 博士課程

本論文에서는, 非測量用사진기에 의한 近距離寫眞測量의 正確度를 향상시키기 위해 DLT 프로그램을 수정하였다. 수정된 프로그램에는 過大誤差의 檢出 및 外部標定要素의 계산과정을 포함시켰으며, 반복계산수를 증가시켰다.

1. 서 론

非測量用사진기의 定義를 Karara는 “寫眞測量用으로 사용하기 위해 특별히 설계되지 않은 사진기”라고 하였으며, Faig는 “완전히 또는 부분적으로 미지수이며 불안정한 内部標定要素를 갖는 사진기” 또는 단순히 “指標가 없는 사진기”라고 정의하였다⁽¹⁾.

非測量用사진기의 長點은 사진기와 필름의 구입이 용이하고 값이 저렴하며, 초점거리의 변화가 자유롭고 원하는 촬영방향으로 신속한 연속사진을 얻을 수 있다는 데 있으나, 렌즈왜곡수차와 필름 변형이 크며 内部標定이 불안정하고 指標가 없으며 노출시의 外部標定要素를 관측할 수 없다는 단점이 있다^(2,3).

指標가 없는 비측량용사진기로는 현재 사진측량에서 일반적으로 이용되는 번들조정에 필요한 寫眞座標로의 환산이 불가능하므로, 일반사진기에 레조판(reseau plate)이 부착된 準測量用사진기가 시판되고 있으나, 이것 또한 일반사진기에 비해서는 값이 비싸다.

非測量用사진기를 이용하여 寫眞測量을 하기 위해, 사진의 4 변에서 직선부의 끝 2점씩을 임의로 설정하고 이 8점을 이용하여 최소제곱법으로 寫眞座標를 환산하는 便法이 사용되었으나,^(4,5) 현재에는 寫眞座標로의 변환과정을 거치지 않고 像座標로부터 직접 絕對座標가 계산되는 DLT 해법(direct linear transformation method)이 개발되어 이용되고 있다⁽⁶⁻¹⁰⁾.

그러나 현재 이용되고 있는 DLT 프로그램은 過大誤差를 제거하기 어렵고, 外部標定要素를 계산할 수 없으며, 반복계산이 오직 2회인 문제점이 있다.

따라서 本論文에서는 위의 문제점들을 해결하기 위해 원래의 DLT 프로그램을 수정하고, 수정된 프로그램결과의 효용성을 입증함으로써, 非測量用사진기를 이용한 寫眞測量의 活用을 增大

시키는 데 목적이 있다.

2. DLT 해법

2-1. DLT 기본식

해석사진측량에서 이용되는 一般共線條件式은 다음식으로 표시된다.

$$x - x_0 + \Delta x = -C_x \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}$$

$$y - y_0 + \Delta y = -C_y \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (1)$$

여기에서 x, y 는 상좌표, x_0, y_0 는 주점좌표 $\Delta x, \Delta y$ 는 정오차, C_x, C_y 는 초점거리, X, Y, Z 는 절대좌표, X_0, Y_0, Z_0 는 노출점의 절대좌표이며, $m_{11} \sim m_{33}$ 는 회전행렬요소이다⁽¹¹⁾.

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\phi\cos\kappa \\ -\cos\phi\sin\kappa \\ -\sin\phi \\ \sin\omega\sin\phi\cos\kappa + \cos\omega\sin\kappa & -\cos\omega\sin\phi\cos\kappa + \sin\omega\sin\kappa \\ -\sin\omega\sin\phi\sin\kappa + \cos\omega\cos\kappa & \cos\omega\sin\phi\sin\kappa + \sin\omega\cos\kappa \\ -\sin\omega\cos\phi & \cos\omega\cos\phi \end{bmatrix} \quad (2)$$

(1)식의 일반공선식을 이용하기 위해서는 指標들의 像座標와 外部標定要素들의 초기근사값을 알아야 하므로 非測量用사진기에는 적합하지 않다.

Abdel-Aziz와 Karara는 内部標定要素 및 外部標定要素들의 초기근사값을 요구하지 않고, 像座標로부터 絕對座標가 직접변환되는 DLT 해법의 기본식을 (3)식과 같이 유도하였으며, Marzan에 의해 프로그램이 개발되었다.^(12,13)

$$x + \Delta x = \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1}$$

$$y + \Delta y = \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
L_1 &= (x_0 m_{31} - C_x m_{31}) / L \\
L_2 &= (x_0 m_{32} - C_x m_{32}) / L \\
L_3 &= (x_0 m_{33} - C_x m_{33}) / L \\
L_4 &= x_0 + C_x (m_{11} X_0 + m_{12} Y_0 + m_{13} Z_0) / L \\
L_5 &= (y_0 m_{31} - C_y m_{21}) / L \\
L_6 &= (y_0 m_{32} - C_y m_{22}) / L \\
L_7 &= (y_0 m_{33} - C_y m_{23}) / L \\
L_8 &= y_0 + C_y (m_{21} X_0 + m_{22} Y_0 + m_{23} Z_0) / L \\
L_9 &= m_{31} / L \\
L_{10} &= m_{32} / L \\
L_{11} &= m_{33} / L \\
L &= -(m_{31} X_0 + m_{32} Y_0 + m_{33} Z_0)
\end{aligned}$$

(3)식에 偶然誤差를 포함시키고, $L_4 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1 = A$ 라 표시할 때, L_1 에서 L_{11} 까지의 DLT 계수가 방정식에 포함되도록 다시 표현하면

$$\begin{aligned}
V_x &= (L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4) / A - x(L_9 X \\
&\quad + L_{10} Y + L_{11} Z) / A - \Delta x - x / A \\
V_y &= (L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8) / A - y(L_9 X \\
&\quad + L_{10} Y + L_{11} Z) / A - \Delta y - y / A \quad (4)
\end{aligned}$$

이 된다. (4)식을 최소제곱법으로 풀어 DLT 계수를 구하며, 이때 사용되는 정오차모델은 다음 (5)식과 같다.

$$\begin{aligned}
\Delta x &= x'(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + P_1(r^2 + 2x'^2) \\
&\quad + 2P_2 x' y' \\
\Delta y &= y'(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2P_1 x' y' + P_2(r^2 \\
&\quad + 2y'^2) \quad (5)
\end{aligned}$$

여기에서 $x' = x - x_0$, $y' = y - y_0$, $r^2 = x'^2 + y'^2$ 이다.

2-2. 내부표점요소의 계산

內部標定要素 x_0 , y_0 , C 는 DLT 계수들이 구해지면 다음식에 의해 계산된다.

$$\begin{aligned}
x_0 &= (L_1 L_9 + L_2 L_{10} + L_3 L_{11}) L^2 \\
y_0 &= (L_5 L_9 + L_6 L_{10} + L_7 L_{11}) L^2 \\
C_x^2 &= -x_0^2 + (L_1^2 + L_2^2 + L_3^2) L^2 \\
C_y^2 &= -y_0^2 + (L_5^2 + L_6^2 + L_7^2) L^2 \\
C &= (C_x + C_y) / 2 \quad (6)
\end{aligned}$$

여기에서 $L^2 = 1 / (L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2)$ 이다.

2-3. 절대좌표계산

(3)식에서 $x + \Delta x$, $y + \Delta y$ 를 보정된 상좌표 \bar{x} , \bar{y} 로 표시하면, 보정된 상좌표와 절대좌표의 관계는 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
(\bar{x} L_9 - L_1) X + (\bar{x} L_{10} - L_2) Y + (\bar{x} L_{11} - L_3) Z \\
+ (\bar{x} - L_4) = 0 \\
(\bar{y} L_9 - L_5) X + (\bar{y} L_{10} - L_6) Y + (\bar{y} L_{11} - L_7) Z \\
+ (\bar{y} - L_8) = 0 \quad (7)
\end{aligned}$$

위식을 최소제곱법으로 풀면 절대좌표 X , Y , Z 를 얻을 수 있다.

2-4. DLT 해법의 장단점

DLT 해법은 非測量用사진기를 이용한 近距離寫眞測量을 위해 개발되었으므로, 첫째 指標가 필요하지 않으며, 둘째 미지수들에 대한 초기근사값이 요구되지 않고, 셋째 계산이 간단하다는 長點이 있다. 一般번들調整의 경우 미지수(外部標定要素 및 標定點의 絕對座標)의 초기근사값이 불확하거나 모르는 경우 수렴이 안되어 해를 얻지 못하는 경우가 발생하지만 DLT 해법으로는 絕對座標를 얻을 수 있다.

그러나 DLT 해법으로 해를 얻기 위해서는 적어도 6점이상의 基準點들이 필요하며, 基準點들의 분포에 따라 결과값이 민감하게 변화하므로 동일평면내에 모든 기준점들이 있도록 해서는 안되며 고르게 분포되어야만 한다.⁽²⁾

Marzan의 DLT 프로그램에서의 문제점은 반복계산회수가 오직 2회이며, 基準點의 다른 標定點들의 絕對座標를 얻기 위한 알고리즘이 빠져 있으며, 內部標定要素만을 계산할 수 있다는 점이다.

內部標定要素외에 外部標定要素까지 얻을 수 있도록 알고리즘이 개발되면, 일반번들조정에 필요한 미지수의 초기근사값을 DLT의 결과값으로 대체할 수 있다.

3. DLT 프로그램의 수정

DLT 해법의 정확도향상과 이용극대화를 위해 첫째 過大誤差제거를 위해 data snooping 法을 첨가하였고, 둘째 外部標定要素계산을 위한 알고리즘을 개발하여 적용시켰으며, 셋째 반복계산회수를 조정할 수 있도록 하였고, 넷째 標定點들의 絕對座標 및 RMSE가 계산되도록 Marzan의 프로그램을 수정하였다(그림 1 참조).

3-1. 과대오차제거

DLT 계수 및 절대좌표 계산시에 像座標에 포함된 過大誤差를 제거하기 위해 Baarda가 제시

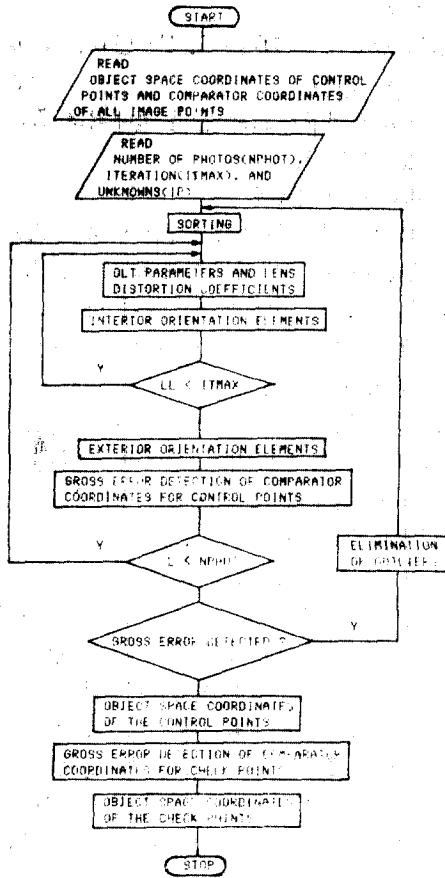


그림 1. 본연구에서 수정된 DLT 프로그램의 흐름도
한 data snooping 法을 적용하였다⁽¹⁴⁾.

data snooping 法은 過大誤差가 없다는 歸無假說下에서 검정통계량 $|v_i/\sigma_{vi}|$ 이 기각값 3.29 보다 크면 관측값에 過大誤差가 포함된 것으로 고려한다. data snooping 法은 오직 한개의 過大誤差만이 존재한다고 가정하는 방법이므로, 가장 큰 검정통계량을 기각값과 비교하는 반복과정이 요구된다.

3-2. 외부표정요소의 계산

外部標定要素는 회전인자 κ, φ, ω 와 노출점의 절대좌표 X_0, Y_0, Z_0 이다.

κ, φ, ω 는 (2)식의 회전행렬요소로부터

$$\begin{aligned} \kappa &= \tan^{-1}(-m_{21}/m_{11}) \\ \varphi &= \sin^{-1}(m_{31}) \\ \omega &= \tan^{-1}(-m_{32}/m_{33}) \end{aligned} \quad (8)$$

이며, (8)식에 포함된 회전행렬요소는 (3)식의 DLT 계수로 부터 유도하면

$$\begin{aligned} m_{31} &= L_9 L \\ m_{32} &= L_{10} L \\ m_{33} &= L_{11} L \\ m_{21} &= (y_0 m_{31} - L_5 L) / C_y \\ m_{11} &= (x_0 m_{31} - L_1 L) / C_x \end{aligned} \quad (9)$$

이 된다. 따라서 회전인자 κ, φ, ω 는 DLT 계수와 内部標定要素가 계산되면 다음식으로 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \kappa &= \tan^{-1} \left(\frac{-C_x (y_0 L_9 - L_5)}{C_y (x_0 L_9 - L_1)} \right) \\ \varphi &= \sin^{-1}(L_9 L) \\ \omega &= \tan^{-1} \left(\frac{-L_{10}}{L_{11}} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

노출점의 좌표 X_0, Y_0, Z_0 는 (3)식의 L_i 에서 L_{11} 까지의 관계식으로 부터

$$\begin{aligned} \text{i) } \frac{m_{31} X_0 + m_{32} Y_0 + m_{33} Z_0}{L} &= L_9 X_0 + L_{10} Y_0 \\ &\quad + L_{11} Z_0 = -1 \\ \text{ii) } L_4 - x_0 &= \frac{C_x (m_{11} X_0 + m_{12} Y_0 + m_{13} Z_0)}{L} \\ &= \left(\frac{x_0 m_{31}}{L} - \frac{x_0 m_{31} - C_x m_{11}}{L} \right) X_0 \\ &\quad + \left(\frac{x_0 m_{32}}{L} - \frac{x_0 m_{32} - C_x m_{12}}{L} \right) Y_0 \\ &\quad + \left(\frac{x_0 m_{33}}{L} - \frac{x_0 m_{33} - C_x m_{13}}{L} \right) Z_0 \\ &= (x_0 L_9 - L_1) X_0 + (x_0 L_{10} - L_2) Y_0 \\ &\quad + (x_0 L_{11} - L_3) Z_0 \\ \text{iii) } L_8 - y_0 &= \frac{C_y (m_{21} X_0 + m_{22} Y_0 + m_{23} Z_0)}{L} \\ &= \left(\frac{y_0 m_{31}}{L} - \frac{y_0 m_{31} - C_y m_{21}}{L} \right) X_0 \\ &\quad + \left(\frac{y_0 m_{32}}{L} - \frac{y_0 m_{32} - C_y m_{22}}{L} \right) Y_0 \\ &\quad + \left(\frac{y_0 m_{33}}{L} - \frac{y_0 m_{33} - C_y m_{23}}{L} \right) Z_0 \\ &= (y_0 L_9 - L_5) X_0 + (y_0 L_{10} - L_6) Y_0 \\ &\quad + (y_0 L_{11} - L_7) Z_0 \end{aligned}$$

의 관계식이 유도되므로

$$\begin{bmatrix} L_9 & L_{10} & L_{11} \\ x_0 L_9 - L_1 & x_0 L_{10} - L_2 & x_0 L_{11} - L_3 \\ -y_0 L_9 - L_5 & y_0 L_{10} - L_6 & y_0 L_{11} - L_7 \end{bmatrix}$$

표 1. 과대오차의 검출결과

기 준 점 수	반복계산수	점 번호	사진번호	잔 차		검 정 통 계 량		과대오차의 검출 유무
				x	y	x	y	
20 점 모두	2	11	1	-0.6	-0.0	5.2	0.1	유
			2	0.3	0.0	5.1	0.0	유
11번 점 제외	2	1	1	-0.0	0.0	2.7	0.3	무
			2	-0.0	-0.0	0.1	0.3	무
	5	1	1	-0.0	0.0	4.8	0.6	유
			2	-0.0	-0.0	0.1	0.3	무

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ L_4 - x_0 \\ L_5 - y_0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

로부터 계산된다.

4. 결과분석

본 논문에서 수정된 DLT 프로그램을 이용한 過大誤差 除去 및 正確度 分析을 위해, Marzan의 논문에서의 사진측량자료⁽¹⁵⁾를 이용하였다.

Marzan의 자료 20點 모두를 基準點으로 선택하여 본프로그램으로 실행한 결과 검출된 過大誤差는 표 1과 같았다.

표 1은 정오차보정을 Abdel-Aziz⁽¹⁶⁾가 제시한 바와 같이 (5)식의 k_1 항까지 보정한 결과이며, 사진번호 1, 2는 좌우사진을 나타낸다.

20點 모두를 基準點으로 사용한 결과는 표 1에서와 같이 11번점에서 좌우사진상의 像座標 모두에 過大誤差가 존재하는 것으로 나타났다. 이 결과는 像座標觀測時 좌우사진에서의 11번 점을 모두 잘못 관측하였거나, 11번점에 대한 基準點성고가 불량한 경우 발생할 수 있다.

11번점을 基準點에서 제외하고 나머지 19點을 사용한 경우, 원래의 프로그램과 같이 반복계산수가 2회인 경우에는 過大誤差를 檢出하지 못하였으나, 5회 반복계산한 결과 1번점에서 左寫眞상의 像座標에 過大誤差가 포함되어 있음을 알 수 있었다.

本프로그램에서의 過大誤差檢出의 효용성은 과대오차의 제거에 따른 正確度향상을 분석함으로써 입증할 수 있다. 표 2는 過大誤差가 포함된 點들을 제거한 후 얻어진 基準點들의 평균제곱근

표 2. 과대오차제거에 따른 기준점들의 평균제곱근오차(단위: mm)

기 준 점 수	반복계산수	평균 제곱근 오차			
		X	Y	Z	POS
20 점 모두	2	4.5	7.8	203.9	204.1
	5	4.5	7.8	203.9	204.1
11번 점 제외	2	2.1	2.0	9.4	9.9
	5	2.1	1.9	9.4	9.9
11,1번 점 제외	2	0.5	0.6	3.6	3.7
	5	0.5	0.4	3.5	3.5

오차이며, POS는 위치오차로서 $\sqrt{X^2+Y^2+Z^2}$ 이다.

표 2에 나타낸 바와 같이 표 1에서 檢出된 過大誤差를 제거함으로써 正確度가 크게 향상된 결과로부터 본프로그램에서의 過大誤差檢出이 정확하게 수행되었음을 알 수 있었다.

표 1과 2에서 반복계산수의 증가는 基準點들의 평균제곱근오차에는 큰 영향을 미치지 못하지만, 過大誤差의 檢出에는 효과적임을 알 수 있다. 따라서 과대오차의 제거를 위해서는 반복계산수를 5회까지 하여야 할 것이다.

本프로그램에서 檢出될 수 있는 過大誤差의 크기를 조사하기 위해, 1번點과 11번點을 제외한 18點을 基準點으로 사용하고 이중 10번點의 x, y 像座標에 $5\sigma \sim 10\sigma$ 까지의 過大誤差를 포함시켜 실행한 결과는 표 3과 같았다. 표 3은 반복계산수를 5회로, 정오차의 보정을 표 1과 같이 k_1 항까지 한 결과이다.

표 3은 像座標觀測에서의 표준편차 σ 값을 3

표 3. 과대오차의 크기에 따른 검출결과(단위 : mm)

상좌표	과대오차의 크기	좌 차		검 정 통 계 량		과대오차의 유/무	평균 제곱근 오차			
		x	y	x	y		X	Y	Z	POS
x ₁₀	5σ	-0.0095	-0.0001	1.9004	0.0114	무	0.7	0.5	4.2	4.3
	10σ	-0.0162	-0.0003	0.8628	0.0140	무	0.9	0.6	5.4	5.5
	20σ	-0.0292	-0.0001	3.5253	0.0113	유	1.6	0.8	8.3	8.5
	50σ	-0.0691	-0.0002	32.2104	0.0774	유	3.6	1.9	18.2	18.6
	100σ	-0.1362	-0.0007	4.3202	0.0225	유	7.0	2.9	35.0	3.58
y ₁₀	5σ	-0.0028	-0.0068	0.1703	0.4100	무	0.5	0.6	3.4	3.5
	10σ	-0.0026	-0.0133	0.1562	0.7930	무	0.5	0.7	3.4	3.6
	20σ	-0.0026	-0.0267	0.1633	1.6700	무	0.5	2.1	3.9	4.4
	50σ	-0.0034	-0.0674	0.1345	2.6921	무	0.7	1.7	4.2	4.6
	100σ	-0.0037	-0.1346	0.1441	5.2013	유	1.0	5.3	8.2	9.8

μm(1 번, 11 번點들이 제외된 18點에 대한 실제 σ 값은 2.6μm이었다)로 한 검출결과와 과대誤差가 포함된 像座標로부터 계산된 基準點座標들의 평균제곱근오차이다. 이 결과로부터 과대誤差의 크기가 20σ 이상인 경우 검출가능하였으나 오직 x 좌표에 포함된 과대誤差만을 檢出할 수 있었다. x, y座標 각각에 포함된 과대誤差를 모두 檢出할 수 있는 과대誤差의 크기는 100σ 이상이였다. x, y座標 각각에 포함된 과대誤差가 基準點의 絶對座標의 평균제곱근오차에 미치는 영향은 y座標에 포함된 과대誤差가 x座標에 포함된 과대誤差보다 작았다. 18點을 사용하고 과대오차를 포함시키지 않은 경우의 위치오차 3.5mm(표 2 참조)와 비교할 때, y座標에 5σ의 과대誤差를 포함시켜도 동일한 위치오차를 나타냈으며, 50σ의 크기일 때 위치오차가 1.1mm 변화하여 x 좌표에 동일크기의 과대오차가 포함되었을 때의 1.51mm 변화에 비해 매우 작음을 알 수 있었다. 따라서 x座標觀測時에 과대誤差가 포함되지 않도록 주의하여야 할 것이다.

基準點數의 증가와 正誤差의 補正項의 증가에 따른 基準點 및 檢査點에서의 평균제곱근오차의 변화는 그림 3, 4와 같았다. 반복계산수는 5회이며, 基準點들의 分布는 그림 2와 같으며, 檢査點으로 3點(3, 15, 19 번點)을 이용하였다. 그림 3, 4에서 IP11은 正誤差를 보정하지 않은 것을, IP12는 (5)식에서 k₁ 항을, IP14는 k₃ 항

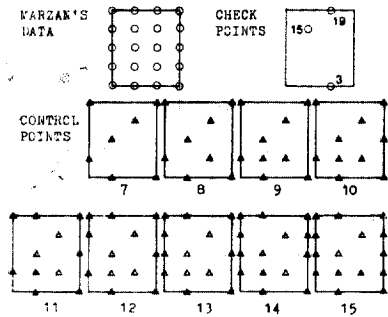


그림 2. 기준점 및 검사점분포

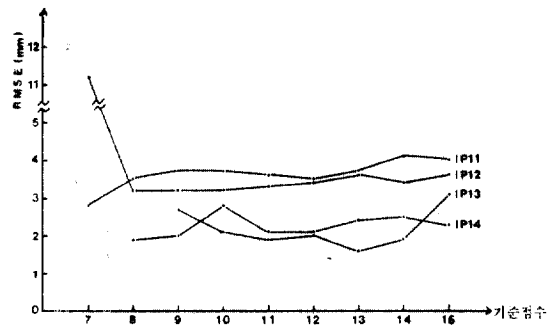


그림 3. 기준점좌표의 평균제곱근오차

지, IP16은 (5)식 전체를 보정한 것을 의미한다. 그림 3, 4의 결과를 비교하면 基準點의 평균제곱근오차와 檢査點의 평균제곱근오차와의 변화양상이 일치하지 않음을 알 수 있다. 이 이유는 基準點의 分布에 따른 영향과 檢出되지 않고 남은 작은 크기의 과대誤差가 관측값들에 포

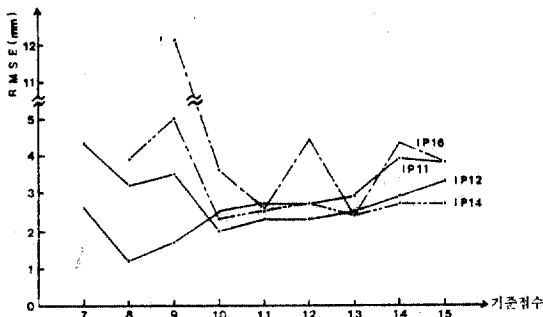


그림 4. 점사점좌표의 평균제곱근오차

함되어 있기 때문에 고려된다. 따라서 프로그램의 계산결과인 基準點들의 평균제곱근오차보다 다른 標定點들의 絕對座標의 正確度를 평가하기에는 다소 문제점이 있다고 할 수 있다. 基準點數의 증가에 따른 檢査點의 평균제곱근오차의 변화는 그림 4와 같이 補正項에 따라 불규칙한 결과를 나타내었다. 자유도가 낮은 10點미만의 基準點을 이용한 경우 DLT 변수(11개)만으로 계산하는 것이 효과적이었으며, Abdel-Aziz⁽¹⁶⁾가 제시한 12개변수(k_1 항만 보정)를 사용하면 10~12點을 기준점으로 이용한 경우 가장 높은 正確度를 나타냈으나 그 이상의 기준점들을 이용하면 점점 正確度가 낮아지는 결과를 보여주었다. 따라서 基準點數가 10點이상일 경우에는 그림 4에서와 같이 基準點數의 변화에 민감하게 반응하지 않고 정확한 결과를 제공하는 14개변수(방사렌즈왜곡수차 k_1, k_2, k_3 를 보정)를 사용하는 것이 효과적이라고 할 수 있다.

Marzan의 자료(18點이용)에 의한 외부표정 요소의 계산결과는 左寫眞의 회전각 κ, φ, ω 가 $0^\circ, -2^\circ 0' 59.1'', 2^\circ 0' 23.8''$ 노출점의 좌표 X, Y, Z 가 9.304m, 15.001m, 31.914m 이었으며, 右寫眞의 회전각 κ, φ, ω 는 $0^\circ, -1^\circ 59' 29.4'', -1^\circ 57' 3.4''$, 노출점의 좌표 X, Y, Z 는 15.198m, 14.997m, 31.919m로 계산되었다. 또한 계산된 초점 거리는 左寫眞에서 100.5554mm, 右寫眞에서 100.5569mm이었다. 이와 같이 본 프로그램에서 얻어진 초점거리와 외부표정요소들은 번들調整에서의 초기근사값으로 이용될 수 있다.

5. 결 론

本論文은 非測量用 寫眞에서의 過大誤差의 제거 및 外部標定要素의 계산을 위해 DLT 프로그램을 修正하고, 그 결과를 分析한 것으로, 다음과 같은 結論을 얻을 수 있었다.

첫째, x 좌표에서의 過大誤差가 絕對座標의 正確度에 크게 영향을 미쳤으며, 본프로그램으로 20 σ 이상의 過大誤差를 檢出할 수 있었다.

둘째, 반복계산수의 증가는 基準點들의 평균 제곱근오차에는 영향이 작았으나 過大誤差의 檢出에는 효과적이었다.

셋째, 基準點數가 10點미만인 경우 11개변수의 사용이, 10點이상인 경우에는 14개의 변수를 사용하는 것이 바람직하였다.

넷째, 본프로그램으로 얻어지는 內部 및 外部 標定要素를 초기근사값으로 이용하면, 標定要素의 觀測이 불량하거나 미지인 경우에도 번들調整이 가능하다.

참 고 문 헌

1. Torlegard, A.K.I., "State-of-the-art of closerange photogrammetry", *P.E. & R. S.*, Vol. 42, No. 1, 1976, pp. 71~79.
2. Karara, H.M., and Faig, W., "An exposure on photogrammetric data aquisition systems in close-range photogrammetry", *Comm. V, 14th congress of ISP*, 1980, pp. 402~418.
3. Karara, H.M., "Aortic heart valve geometry", *P.E.*, Vol. 40, No. 12, 1974, pp. 1393~1402.
4. Murai, S., Nakamura, H., and Suzuki, Y., "Analytical orientation for non-metric camera in the application of terrestrial photogrammetry", *Comm. V, 14th congress of ISP*, 1980, pp. 515~525.
5. Salmenpera, H., "A procedure for close range camera calibration", *Comm. V, 14th congress of ISP*, 1980, pp. 650~661.
6. Abdel-Aziz, Y.I., "Photogrammetric Potentials of Non-metric Cameras," Ph.D. Dissertation, Univ. of Illinois, Urbana, 1974.
7. Brandow, V.D., and Karara, H.M., "A non-met-

- ric close-range photogrammetric system for mapping geologic structures in mines", *P.E. & R.S.*, Vol. 42, No. 5, 1976, pp. 637~648.
8. Wong, K.W., "Mathematical formulation and digital analysis in close range photogrammetry", *P.E. & R.S.*, Vol. 41, No. 11, 1975, pp. 1355~1373.
 9. Takamoto, T., and Schwartz, B., "Photogrammetric measurement of the optic disc cup in glaucoma", *Comm. V, 14th congress of ISP*, 1980, pp. 732~741.
 10. Zolfaghari, M., "A direct method for measurement of coordinates of a three dimensional test field", *Comm. V., 14th congress of ISP*, 190, pp. 847~853.
 11. 柳福模, 測量工學・改訂版, 博英社, 1986, pp. 538~5418.
 12. Abdel-Aziz, Y.I., and Karara, H.M., "*Direct linear transformation from comparator coordinates into object-space coordinates*", Close-range Photogrammetry, ASP, 1971, pp. 1~18.
 13. Marzan, G.T., and Karara, H.M., "*A computer program for the direct linear transformation solution of the collinearity condition, and some applications of it*", Close-range photogrammetric systems, ASP, 1975, pp. 420~476.
 14. Hottier, P., "Theorie de Baarda: Detection des fautes et fiabilite des estimations et ses applications en photogrammetrie", *SEPT, Bulletin* No. 84, 1981~4, pp. 5~20.
 15. Marzan, G.T., "*Rational Design for Close-Range Photogrammetry*", Ph. D. Dissertation, Univ. of Illinois, Urbana, 1976.
 16. Karara, H.M., and Abdel-Aziz, Y.I., "Accuracy aspects of non-metric imageries", *P.E.*, Vol. 40, No. 9, 1974, pp. 1107~1117.

(接受: 1987. 9. 12)