

地上寫眞에 의한 三次元變形測量的 信賴度 分析(其一)

Reliability Analysis of the Three-Dimensional Deformation Measurement by Terrestrial Photogrammetry

柳	福	模*
Yeu,	Bock	Mo
劉	煥	熙**
Yoo,	Hwan	Hee
金	仁	燮***
Kim,	In	Sub

Abstract

The 3-dimensional deformation measurement by the terrestrial photogrammetry is consist of 3-dimensional coordinates computation, displaced point detection and deformation estimation of object targets.

In this study, at the first step of deformation analysis, the variation of the variance-covariance matrix for the exterior orientation elements was analyzed by the increment of the ground control points and the photos in the Bundle adjustment. And then, to give the constraints for improving accuracy of ground control points, the concept of Free-Network adjustment was applied to Bundle adjustment.

As a result, we knew that it was desired in the accuracy and the economy, the observation time when the numbers of ground control point and photo were respectively 6 points and 3 photos. In addition, in the case of applying the concept of Free Network adjustment in Bundle adjutment, it was desirable that the space distance for the constraints is distributed outside.

要 旨

地上寫眞測量에 의한 3次元變形解析은 標定點에 대한 3次元座標를 계산하고 이들 좌표로부터 變位를 구하므로써 變形解析을 하게 된다. 地上寫眞測量에 의한 變形解析은 3次元座標 획득과 變位點檢出 및 變形量推定으로 크게 나눌 수 있다. 本 研究에서는 처음단계로 번들조정법에 의한 좌표계산에서 地上基準點數와 寫眞數의 증가에 따른 外部標定要素의 分散—共分散行列변화를 분석하였다. 그리고 地上基準點의 正確度를 향상시키기 위한 제약조건을 주기위해 번들조

* 正會員·延世大學校 工科學, 教授

** 正會員·延世大學校 大學院 博士課程

*** 正會員·檀國大學校 大學院 博士課程

정법에 自由網調整개념을 도입하였다.

이상의 결과분석으로부터 경제성과 시간절약의 측면을 고려할때 地上基準點數는 6點, 寫眞數는 3개가 적합한을 알수 있다. 또한 번들조정에 自由網調整개념을 적용한 경우 공간거리의 제약조건을 외곽에 분포시키는 것이 바람직함을 알수 있었다.

1. 序 論

地上寫眞測量에 의한 變形解析은 解析技法과 사진기의 발달에 힘입어 다방면에 걸쳐 적용되고 있다. 특히 文化財의 원형보존은 물론 변형되어가는 文化財의 變位觀測, 도심지역에 있어 지반침하 및 지하철과 지하시설물 설치당시 발생하는 진동에 의한 시설물 변형측정, 또한 붕괴지역에 있어 접근이 어려운 사면붕괴지역의 안정도검사 등에 地上寫眞測量技法활용이 점점 중대되어가고 있다. 지금까지 變形測量에 이용되어 온 strain gauge 등과 같은 장치와는 달리 地上寫眞測量에 의한 變形測量은 대상물에 표점만을 설치하므로써 전체 또는 국부적인 변형 특성이나 암석과 같이 균열이 존재하여 지역간의 변형이 불규칙한 것을 상세히 조사할 수 있고 관측당시 대상지역의 정확한 상황도를 제시할 수 있다. 또한 잘 보존된 필름은 조사당시 관측되지 않은 곳의 자료를, 조사후에도 계속 재공하므로써 자료보존에도 커다란 장점을 갖고 있다.

이와같은 地上寫眞測量의 효용성에 따라 Haltert, B., Moser, C., 와 Schriver, W. 가 구조물의 변형을 측정하였으며 Roehm, L.H., Moore, J.F.A., Brandenberger, A.J. 는 댐의 변형을, Scott, P.J. 는 box girder 교의 모형변형측정을 하였다^(1,2,3).

또한 wong, K.W. 와 Vonderohe, A.P. 는 사절토에 있는 터널의 變位를 측정하였고 Richard, A.P. 와 Veress, A. 는 전송탑의 변위를 측정하였다.⁽⁴⁾ Hatzopoulos, J.N. 과 Stoliker, P.C., Gruendig, L. 은 제방과 암석지역의 붕괴에 대한 Monitoring 을 연구하였고 Fraser C.S. 는 원형안테나와 고압압축기의 열변화를 분석하여 寫眞測量方法이 대형구조물에서 소형정밀기계의 변형에 이르기까지 광범위하게 적용될 수 있음을

밝혔다^(5,6).

寫眞測量에 의한 變形解析은 정확한 3차원과 표획득과 변위점검출 및 변형량추정으로 크게 나눌수 있는데 본 연구는 變形解析의 중간보고서로서 3차원과표획득과정에서 번들조정법의 특성을 논하고자 한다.

번들조정법은 共線條件에 의해 3차원공간좌표를 얻는 방법으로 최근 이방법에 대한 연구가 활발히 이뤄지고 있다⁽⁷⁻⁹⁾.

번들조정법의 정확도를 향상시키기 위해 地上基準點에 대한 제약조건을 주는 연구가 주류를 이루고 있는데 Elphinstone, G.M. 은 SAPGO 프로그램을 이용하여 블럭조정에서 측지관측값을 제약조건으로 이용했다⁽¹⁰⁾.

그후 El-Hakim, S.F. 와 Faig, W. 는 SAPGO 프로그램을 발전시켜 사진측량과 측지측량의 조합 및 거리, 높이, 수평각 등을 제약조건으로 이용하였으며⁽¹¹⁻¹³⁾, Papo, H.B. 와 Perelmutter, A. 는 地上基準點들을 自由網으로 연결하여 조정하는 것을 제약조건으로 이용하였다^(14,15).

본 연구에서는 번들조정법을 이용한 3차원좌표계산과정에서 地上基準點數와 寫眞數에 따른 外部標定要素와 Check point 에서의 分散-共分散行列의 변화를 분석하고 번들조정법에 自由網調整條件을 제약조건으로 하여 공간거리를 배치하였을 경우 적합한 배치형태를 제시하고자 한다.

2. 基本理論

2.1 번들조정(Bundle Adjustment) 이론

번들조정법은 各 寫眞의 外部標定要素($\kappa, \phi, \omega, X_c, Y_c, Z_c$)와 地上基準點座標(X, Y, Z)의 9개 未知數로 형성된 함수를 최소제곱법에 의해 최확값을 계산하는 방법이다. 9개의 未知數에 대한 수학모델식은 (1)식으로 표현되는 共線條件式(collinearity equation)을 이용하며 (1)식은 非

線形方程式이므로 Taylor 전개에 의해 (2)식을 유도한다.

$$\begin{aligned}
 x - x_0 &= -f \\
 \frac{m_{11}(X - X_c) + m_{12}(Y - Y_c) + m_{13}(Z - Z_c)}{m_{31}(X - X_c) + m_{32}(Y - Y_c) + m_{33}(Z - Z_c)} \\
 y - y_0 &= -f \\
 \frac{m_{21}(X - X_c) + m_{22}(Y - Y_c) + m_{23}(Z - Z_c)}{m_{31}(X - X_c) + m_{32}(Y - Y_c) + m_{33}(Z - Z_c)}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서, x, y 는 상좌표이며, X, Y, Z 는 지상 기준점좌표, f 는 사진기의 초점거리, $m_{ij}(i, j = 1, \dots, 3)$ 는 회전행렬요소이다.

(1)식을 Taylor 전개하여 행렬로 표시하면 (2)식과 같다.⁽¹⁶⁾

$$V_{ij} + \dot{B}_{ij}\delta_i + \ddot{B}_{ij}\delta_j = e_{ij} \tag{2}$$

여기서,

$V_{ij} = [V_x \ V_y]^T$; 상좌표의 잔차벡터

$\dot{B}_{ij} = \frac{\partial F}{\partial O} \Big|_{O^0_{ij}, X^0_{ij}}$; 외부표정요소와 상좌표 사이의 관계를 나타내는 계수행렬

$\ddot{B}_{ij} = \frac{\partial^2 F}{\partial X^2} \Big|_{O^0_{ij}, X^0_{ij}}$; 상좌표와 지상기준점 좌표사이의 관계를 표시하는 계수행렬

$e_{ij} = \begin{bmatrix} x'_{ij} - F_x(O^0, X^0)_{ij} \\ y'_{ij} - F_y(O^0, X^0)_{ij} \end{bmatrix}$; 교차벡터

$\delta_i^T = [dX_i^e, dY_i^e, dZ_i^e, d\omega, d\phi, d\kappa]$; 外部 標定要素의 보정항

$\delta_j^T = [dX_j, dY_j, dZ_j]$; 地上基準點과 對象點의 좌표보정항

2.2 自由網調整(Free Network Adjustment) 이론

自由網調整은 Bjerhammar, A., Meissl, Mitt-ermayer, E. 등에 의해 개발된 一般逆行列(generalized inverse matrix) 方法과 Koch, K.R., Wolf, H., perelmuter, A. 등에 의해 개발된 classical adjustment 가 있으나 본 연구에서는 classical adjustment 를 이용하였다^(14,15). 3 차원공간에서 선형관측방정식은,

$$V = AX - L \tag{3}$$

이며 A 의 Rank, 즉 $R(A)$ 는 $R(A) = m - d = r$ 이다.

m 은 미지값수이며 d 는 Rank defect, r 은 조건식수이다. (3)식에서 A 와 X 행렬을 Rank

defect 에 대해 분할하면,

$$V = [A_1, A_2] \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} - L \tag{4}$$

이며, A 행렬이 full rank($d=0$)일때만 不偏推定量이 얻어지므로 $d \neq 0$ 인 경우는 r 개의 미지 매개변수에 대해서만 不偏推定量이 얻어진다. 따라서 X_2 는 X_1 의 선형변환에 의해 얻어진다.

$$X_2 = G_1^T X_1$$

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ G_1^T \end{bmatrix} X_1 \tag{5}$$

(5)식을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$V = [A_1 \ A_2] \begin{bmatrix} I \\ G_1^T \end{bmatrix} X_1 - L \tag{6}$$

$$V = A^* X_1 - L \tag{7}$$

여기서, $A^* = A_1 + A_2 G_1^T$ 이며 $R(A^*)$ 는 full rank 이다. $X^T X = \min$ 조건을 만족하기 위한 G_1^T 를 perelmuter, A 는 다음과 같이 정의했다.

$$G_1^T = (A_2^T A_1) (A_1^T A_1)^{-1} \tag{8}$$

(8)식으로부터

$$A_2 = A_1 G_1 \tag{9}$$

이며 (9)식을 (7)식에 代入하면

$$V = \bar{A} X_1 - L \tag{10}$$

$$\bar{A} = A_1 (I + G_1 G_1^T) = A_1 S \tag{11}$$

이다. X_1, X_2 의 不偏推定量과 경중률계수행렬은 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned}
 X_1 &= (\bar{A}^T W \bar{A})^{-1} (\bar{A}^T W L) \\
 Q_{11} &= (\bar{A}^T W \bar{A})^{-1} = S^{-1} (A_1^T W A_2)^{-1} S^{-1} \\
 X_2 &= G_1^T X_1 \\
 Q_{22} &= G_1^T Q_{11} G_1
 \end{aligned} \right\} \tag{12}$$

2.3 번들조정법에 自由網調整法의 적용

일반적인 번들조정법에서 지상기준점좌표로 이용되는 점은 오차가 전혀 포함되어 있지 않은 것으로 가정하여 外部標定要素를 계산하므로 과대오차가 아닌 확률오차범위에서도 비교적 큰 확률오차를 갖는 점이 지상기준점으로 이용되면 오차가 크게 전파되고 있다. 따라서 본 연구에서는 地上基準點의 정확도를 높이기 위해 점들간의 공간거리를 관측하여 이값을 제약조건으로 추가함으로써 정확도 향상을 꾀하였다.

제약조건은 일반적인 번들조정식인 (2)식에서

地上基準點에 대한 관측방정식에 自由網調整개념을 추가하여 정규방정식을 구성했다⁽¹⁶⁾.

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ O \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{B} & \dot{B}_1 & \dot{B}_2 & \dot{B}_3 \\ O & O & A_1 & A_2 \\ O & O & G_1^T & -I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\delta} \\ \ddot{\delta}_1 \\ \ddot{\delta}_2 \\ \ddot{\delta}_3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} L_1 \\ L_2 \\ O \end{pmatrix} \quad (13)$$

여기서,

$\ddot{\delta}$: 사진 p 개에 대한 외부표정요소의 보정항
(6 p)

$\ddot{\delta}_1$: 지상기준점좌표의 보정항[3($n-k$)]

$\ddot{\delta}_2, \ddot{\delta}_3$: $X^T X = \min$ 조건이 적용된 지상기준점에 대한 보정항(3 k)

$\ddot{\delta}_3$: Rank defect(d)에 대한 지상기준점의 보정항(d)

(13)식을 不偏推定量계산이 될수 있도록 방정식을 변환하면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{B} & \dot{B}_1 & \dot{B}_2 \\ O & O & \bar{A}_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\delta} \\ \ddot{\delta}_1 \\ \ddot{\delta}_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} L_1 \\ L_2 \end{pmatrix} \quad (14)$$

여기서, $\bar{B}_2 = \dot{B}_2 + \dot{B}_3 G_1^T$
 $\bar{A}_1 = A_1 + A_2 G_1^T$

관측방정식 (14)식을 정규방정식으로 정리하면 (15), (16)식과 같이되며 정규방정식의 구성형태를 그림으로 표시하면 그림 1 과 같다.

$$\begin{pmatrix} \dot{B}^T W \dot{B} & \dot{B}^T W \dot{B}_1 & \dot{B}^T W \dot{B}_2 \\ \dot{B}_1^T W \dot{B} & \dot{B}_1^T W \dot{B}_1 & O \\ \dot{B}_2^T W \dot{B} & O & \dot{B}_2^T W \dot{B}_2 + \bar{A}_1^T W \bar{A}_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\delta} \\ \ddot{\delta}_1 \\ \ddot{\delta}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{B}^T W L_1 \\ \dot{B}_1^T W L_1 \\ \dot{B}_2^T W L_1 + \bar{A}_1^T W L_2 \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{pmatrix} N_{11} & N_{12} \\ N_{21} & N_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{A} \\ \dot{A} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{E} \\ \dot{E} \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \dot{A} &= (N_{22} - N_{21} N_{11}^{-1} N_{12})^{-1} (\dot{E} - N_{21} N_{11}^{-1} \dot{E}) \\ \dot{A} &= N_{11}^{-1} (\dot{E} - N_{12} \dot{A}) \end{aligned} \quad (17)$$

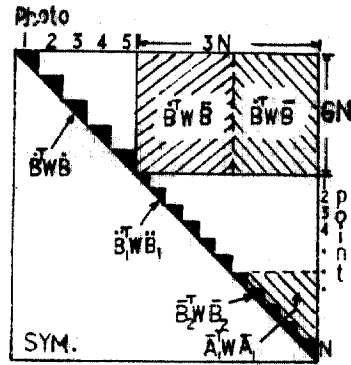


그림 1. 정규방정식의 형태

3. 結果分析

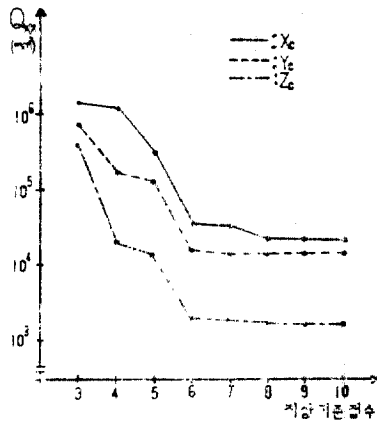
3次元變形을 觀測하기 위해 제작한 변형모델을 5개의 촬영점에서 사진촬영 하였으며 촬영거리는 1.8m 이었다.

지상기준점은 변형모델 외곽에 10점을 분포시켰으며 간점삼각측량에 의해 3차원좌표를 얻고 地上基準點간의 공간거리는 invar tape에 의해 반복관측하여 정확함을 구했다. 번들조정에서 공간후방교회법에 의한 촬영점의 外標定要素계산은 지상기준점수와 정확도에 크게 영향을 받는다.

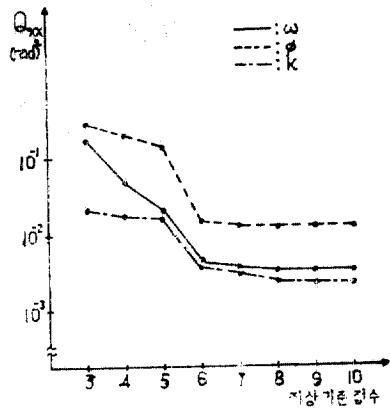
본 연구에서는 外部標定要素를 구하기 위한 최소 地上基準點數 3개를 기준으로하여 10개까지 증가시키며 外部標定要素에 대한 分散-共分散行列(Q_{xx} , variance covariance matrix)의 변화를 분석하였다.

그림 2와 표 1에 나타난 것과 같이 外部標定要素의 Q_{xx} 값은 지상기준점수가 3개에서 10개까지 증가함에 따라 감소되고 있어 기하학적 신뢰성이 높아지고 있음을 알 수 있다. 지상기준점수가 3개에서 6개까지 변화할 때 Q_{xx} 값의 감소율은 X_c, Y_c, Z_c 가 각각 96%, 98%, 95%이며 ω, ϕ, κ 가 각각 98%, 96%, 83%로써 크게 감소하고 있다.

또한 지상기준점수가 6개에서 10개로 변화할 때 外部標定要素의 Q_{xx} 변화율은 $X_c, Y_c, Z_c, \omega, \phi, \kappa$ 가 각각 40%, 15%, 24%, 16%, 42%, 36%로 나타났다. 이와같은 분석을 미뤄볼 때 지상기준점 관측을 위한 시간소요와 경제성 및 지상기준점수가 증가됨에 따라 과대오차를 갖고



(a) X_c, Y_c, Z_c 의 변화



(b) ω, ϕ, κ 의 변화

그림 2. 外部標定要素의 변화

표 1. 지상기준점수에 따른 外部標定要素의 Q_{xx} 변화

지상기준점수(3 개)

Q_{xx}	Omega	phi	Kappa	X_c	Y_c	Z_c
	.26032D+00					SYMMETRIC
	.18694D+00	.46892D+00				
	-.23299D-01	-.26988D-01	.34516D-02			
	.32618D+03	.82463D+03	-.47175D+02	.14504D+07		
	-.47447D+03	-.34560D+03	.42797D+02	-.60311D+06	.86499D+06	
	-.10780D+03	-.14149D+03	.11613D+02	-.24779D+06	.19722D+06	.60176D+05

지상기준점수(6 개)

Q_{xx}	Omega	phi	Kappa	X_c	Y_c	Z_c
	.61631D-02					SYMMETRIC
	.23537D-02	.17314D-01				
	-.74738D-03	-.14989D-02	.58369D-03			
	.38776D+01	.30180D+02	-.25542D+01	.52680D+05		
	-.11197D+02	-.44280D+01	.14370D+01	-.73101D+04	.20406D+05	
	-.26405D+01	-.38925D+01	.53877D+00	-.65766D+04	.47620D+04	.29216D+04

지상기준점수(10 개)

Q_{xx}	Omega	phi	Kappa	X_c	Y_c	Z_c
	.51634D-02					SYMMETRIC
	.14360D-02	.10079D-01				
	-.60303D-03	-.75420D-03	.38194D-03			
	.23187D+01	.17770D+02	-.12645D+01	.31384D+05		
	-.94498D+01	-.27049D+01	.11588D+01	-.43794D+04	.17339D+05	
	-.22678D+01	-.24765D+01	.38007D+00	-.41899D+04	.40898D+04	.22313D+04

있는 점이 地上基準點으로 사용될 가능성을 고려할 때 가능한 작은수의 지상기준점을 사용하는 것이 좋으므로 地上基準點數를 6 개로 하는 것이 적합하다.

변형모델에 부착된 표정점의 정확도를 향상시키기 위해 사진수를 증가시키는 방법과 지상기준점간의 공간거리를 관측하여 제약조건(constraints)을 부과하는 방법을 분석하였다.

먼저, 사진수를 증가시키는 방법은 3 차원좌표를 얻기위한 최소사진수 2 장에서 5 장까지 증가시켰으며 이때 check points의 分散—共分散行列(Q_{xx})의 변화는 그림 3 과 표 2 와 같다. 사진수증가에 따른 check points의 Q_{xx} 변화는 최소사진수 2 개에서 3 개로 변화할 때 Q_x , Q_y , Q_z 가 각각 60%, 86%, 96%로 크게 감소하였으며, 3 개에서 5 개로 변화할 때는 감소율이 미소하였다. 사진수 증가에 따라 Z 좌표의 기하학적 정확도가 가장 크게 향상되었으며 그 다음으로 Y 좌표, X 좌표순으로 나타났다.

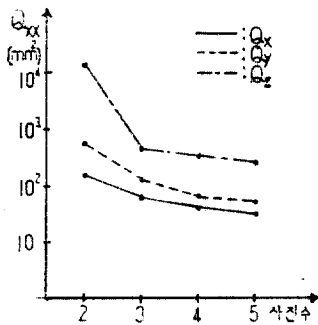


그림 3. 사진수에 따른 check points의 Q_{xx} 변화

표 2. 사진수에 따른 check points의 Q_{xx} 변화

사진수	Q_x	Q_y	Q_z
2	0.19667 D+3	0.78706 D+3	0.12580 D+5
3	0.79165 D+2	0.11108 D+3	0.64747 D+3
4	0.60057 D+2	0.81679 D+2	0.55970 D+3
5	0.48844 D+2	0.67972 D+2	0.45649 D+3

사진수 증가에 따른 Q_{xx} 의 변화를 볼 때 사진수가 3개일 때 크게 향상된 다음 4개, 5개에서 수렴하여 촬영시간과 경제성을 고려할 때 사진수

관측하여 제약조건으로 이용하는 방법에서 관측된 공간거리의 분포형태에 따른 check points에서의 평균제곱근오차를 분석하였는데 그 결과는 표 3 과 같다.

표 3. 공간거리를 제약조건으로 한 경우 check points의 RMSE

case	check points에서의 RMSE(mm)		
	X	Y	Z
case 1	0.10	0.11	0.13
case 2	0.07	0.09	0.08
case 3	0.05	0.06	0.07
case 4	0.08	0.09	0.09
case 5	0.05	0.05	0.06

본 연구에서는 여러가지 형태의 제약조건을 주기 위해 地上基準點 10 개를 모두 사용하였다. case 1 은 제약조건을 전혀주지 않은 경우이며, case 2 는 대각선방향으로 평행하게 공간거리를 관측하여 제약조건을 준 경우이고 case 4 는 대각선 방향을 방사형으로 하여 제약조건을 준 것이다. case 3 은 공간거리를 외곽에 배치시킨 것으로 case 2 나 case 4 보다 평균제곱근오차가 작게 나타나고 있다.

이것은 대각선방향으로 분포시키는 것 보다 제약조건을 주는 것이 바람직하다는 것을 보여주고 있다. case 5 는 모든 가능한 거리를 관측한 것으로 가장 좋은 결과를 나타내고 있으나 관측시간이 많아 비경제적인 것을 감안하면 case 5 의 정확도에 거의 근접하는 case 3 과 같은 제약조건이 현실적으로 적합한 형태임을 알 수 있다.

4. 結 論

地上寫眞測量에 의한 3次元座標解析을 위해 地上基準點數와 寫眞數를 변화시키고 번들조정법에 자유망조정개념을 도입하여 제약조건을 준결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 地上基準點數를 3점에서 6점으로 증가시킨 경우 外部標定要素의 分散一共分散行列값이 83~98%로 크게 감소했으며 6점에서 10점까지는 미소한 감소를 보였다. 따라서 地上基準點 觀測에 따른 시간소요와 과대오차가 포함된 점이 地上基準點으로 사용될 가능성을 고려할 때 6점이 적합한 기준점수임을 알 수 있었다.

둘째, 寫眞數를 2개에서 5개까지 증가시킨 경우 check points에서의 기하학적 정밀도는 3개일 때 60~95%까지 향상되었으며, 4개, 5개에서는 미소하게 향상되며 수렴되었다. 또한 사진수증가에 따른 X, Y, Z 좌표의 기하학적 정밀도 변화크기가 Z, Y, X 좌표순으로 나타나 Z 좌표가 사진수증가에 따라 가장 크게 향상됨을 알 수 있었다.

세째, 번들조정에서 地上基準點의 正確度향상을 위한 제약조건으로 自由網調整개념을 도입하여 적용한 결과 제약조건으로 이용된 공간거리의 분포형태는 대각선형태보다는 외곽배치형태가 좋은 결과를 나타냈다.

辭 謝

本 論文은 文教部學術研究助成事業에 의한 1987年度 研究費支援에 의해 研究된 中間報告書로써 文教部の 後援에 感謝를 드린다.

參 考 文 獻

1. A. Chrzanowski, "A comparison of Different Approaches into the analysis of Deformation Measurements", *Fig. XVI*, 1981, 602.3
2. C.S. Fraser and D.C. Brown, "Industrial Photogrammetry: New Developments and Recent Applications", *Photogrammetric Record*; vol.12, No.68, 1986, pp.197~217.
3. A.J. Brandenberger, S.K. Ghosh, M. Bougouss,

"Deformation Measurements of Power Dams with Aerial Photogrammetry", *PE & RS*, vol.49, No.11, 1983, pp.1561~1567.

4. S.A. Veress, "Measurement of Structural Deformation of Electric Transmitting Towers", *FIG. XVI Congress*, 1981, 6.4.1.
5. C.S. Fraser, "Photogrammetric Measurement of Thermal Deformation of Large Scale Compressor", *PE & RS*, 1986, pp.1569~1575.
6. C.S. Fraser, L. Gruendig, "The Analysis of Photogrammetric Deformation Measurements on Turtle Mt.", *PE & RS*, vol.52, No.2, 1984, pp.207~216.
7. C.S. Fraser, "Limiting Error Propagation in Network Design", *PE & RS*, vol.53, No.5, 1987, pp.487~493.
8. S.A. Veress, H. Youcai, "A Method for Improving the efficiency of the sequential estimation procedure in Photogrammetry", *PE & RS*, vol.53, No.6, 1987, pp.613~616.
9. C.S. Fraser, "Optimization of precision in Close-Range Photogrammetry" *PE & RS*, vol.48, No.4, 1982, pp.561~570.
10. G.M. Elphinstone, "Large Block SAPGO Program", *PE & RS*, vol.41, No.1, 1975, pp.101~111.
11. S.F. El-Hakim and W. Faig, "A Combined Adjustment of Geodetic and Photogrammetric Observations", *PE & RS*, vol.47, No.1, 1987, pp.93~99.
12. S.F. El-Hakim and W. Faig, "The General Bundle Adjustment Triangulation(GEBAT) system Theory and Application", presented Paper, *XIV Congress of ISP*, Commission III, 1980, pp.296~307.
13. S.F. El-Hakim, "Results from a Precise Photogrammetric Densification of Urban Control Network" *The Canadian Surveyor*, vol.36, No.2, 1982, pp.165~172.
14. H. Papo and A. Perelmuter, "Free Net Analysis of Storage Tank Calibration", Presented Paper, *XIV Congress of ISP*, comm. v.1980, pp.593~602.
15. H. Papo and A. Perelmuter, "Free Net Analysis in Close-Range Photogrammetry", *PE & RS*,

vol. 48, No. 4, 1982, pp. 571~576.

16. C.S. Fraser, "*Simultaneous Multiple Camera and Multiple Focal Setting Self-Calibration in*

Photogrammetry", University of Washington, Ph. D. Dissertation, 1979.

(接受: 1987. 10. 5)