

SPOT 영상을 위한 번들조성에서 외부표정의 신뢰성

Reliability of Exterior Orientation in Bundle Adjustment for SPOT Imagery

朴 弘 棋

Park, Hong Gi

Abstract

Topographic mapping from economic SPOT stereo imagery than aerial photographs has become possible. Many of authors have studied the possibility of base map revisions and the accuracy of results. They have concluded that the SPOT image is suitable for 1/50,000 to 1/100,000 topographic map. For topographic map, orthophoto and DTM generation from SPOT imagery, accurate exterior orientation parameters are needed. But since the geometric characteristic of SPOT image is dynamic linear array imagery, the conventional bundle adjustment for photogrammetry can not be directly applied. Reliability is the ability to detect gross error, which is called the internal reliability, and the effect of non-detectable gross error on the results of exterior orientation, which is called the external reliability. This paper shows how the reliability of SPOT imagery depends on the different coordinate systems, presentations of coordinate for flight direction, orders of exterior orientation parameters and distribution of control points, and thus analyses the theoretical reliability of the exterior orientation, which can provide a basis for the planning of SPOT projects.

요 지

항공사진보다 경제적인 SPOT 위성의 입체영상으로부터 지형도를 제작하는 것이 가능하게 되었다. 많은 학자들이 국가기본도 수정에의 적용가능성과 결과의 정확도를 분석하여 SPOT 영상은 1/50,000에서 1/100,000까지의 지형도에 적합하다고 발표하였다. SPOT 영상으로부터 지형도, 정사사진 및 수치지형모델을 제작하기 위해서는 정확한 외부표정요소를 알아야 하지만, 동적인 선형주사 영상인 SPOT 영상의 특성 때문에 사진측량에서 이용되어온 종래의 번들조정은 직접 사용되지 못한다. 신뢰성은 내적신뢰성으로 불리는 과대오차의 검출능력과 외적신뢰성으로 불리는 검출되지 않은 과대오차가 외부표정 결과에 미치는 영향을 나타낸다. 본 연구에서는 좌표계, 궤도방향 좌표의 표현방법, 외부표정 요소의 차수 및 기준점 배치에 따라 SPOT 영상의 신뢰성이 어떻게 달라지는가를 밝히고, SPOT 영상을 이용한 작업에서의 기초자료로 제공될 수 있는 외부표정에서의 이론적인 신뢰성을 분석하였다.

1. 서 론

정확한 표고자료는 일반적으로 지형도의 등고선으로부터 수치화작업을 거쳐 얻기보다는 항공사진 측량으로부터 직접 얻게 된다. 지난 20여년 동안 항공사진측량으로부터의 표고획득이 일반지형측량보다 정확도가 균일하고 경제적인 방법으로 널리 이용되어 왔지만 한장의 항공사진에 촬영되는 지역은 위상영상에 비하면 매우 좁은 지역이다. 또한 위상영상은 접근불가능한 지역도 촬영할 수 있으며 항공사진에 비해 매우 경제적인 장점을 갖고 있다. 종래의 수치영상자료는 편위수정에 의한 소축척 영상 지도를 만들거나 영상처리기법에 의해 지형의 각종 정보를 획득하는데 이용되었다. 오늘날 SPOT 위성은 종래의 입체사진측량과 같이 입체영상을 얻을 수 있으며, 컴퓨터의 발달에 의해 소축척 정사 사진 또는 수치지형모델을 생성할 수 있게 되었다.

SPOT 입체영상으로부터 지형도 제작은 현재 기초적인 단계에서 개발 또는 실용화되고 있다. 세계 각국의 학자들에 의해 조정된 결과인 좌표값의 정확도를 분석하여 국가기본도 수정에의 적용가능성이 연구되고 있다. 그들은 SPOT 영상은 1/50,000에서 1/100,000까지의 지형도 제작에 적합하다고 발표하고 있다.⁽¹⁻⁴⁾

SPOT 위성영상의 기하학적 특성은 동적인 선주사방식의 영상이므로, 종래의 항공사진 측량에서 이용되었던 번들조정 프로그램은 외부표정요소와 미지점의 지상좌표를 계산하기 위해 직접 적용될 수가 없다. 따라서 SPOT 영상에서는 외부표정요소의 차수를 1차항 이상으로 변형시킨 번들조정이 이용되고 있다. 또한 영상좌표시스템도 궤도방향을 x축으로 한 연구와 y축으로 한 연구로 대별된다. 번들조정에서 결정되는 외부표정요소값은 3차원좌표 계산에는 물론이고 영상상관, 수치표고모델, 정사사진제작 등에 절대적으로 필요한 값이다. 그러나 SPOT 위성은 고도가 높고 주사폭이 작으므로 기준점 좌표의 오차 및 배치관계 그리고 외부표정요소의 초기값에 포함된 오차에 따라 번들조정된 결과의 정확도는 매우 낮아질 수 있다.

신뢰성은 과대오차를 검출할 수 있는 능력 즉 관측점에 대한 조정력을 의미하는 내적신뢰성(internal reliability)과 검출되지 않은 과대오차가 결과값

에 미치는 영향을 나타내는 외적신뢰성(external reliability)로 대별된다.⁽⁵⁾

본 연구에서는 SPOT 수치영상의 외부표정요소 결정단계에서 좌표계, 궤도방향의 좌표 표현 방법, 외부표정요소식 및 기준점의 배치에 따른 내적신뢰성을 이론적인 값으로 분석하였다. 이 분석결과는 SPOT 영상을 이용한 각종 작업의 기초로 이용될 수 있다.

2. SPOT용 번들조정

SPOT 영상을 위한 번들조정의 수학적 모델은 동적인 선형주사 영상과 대응하는 지상좌표와의 관계인 공선조건식과 동적인 외부표정요소의 함수식으로 구성된다. SPOT 영상의 수학적 모델을 나타내면 (1)식과 같이 정의할 수 있다.⁽⁶⁾

$$\begin{aligned}
 & (P_i - 3000.5) \times 13 \mu\text{m} = \\
 & -f \frac{m_{11}(X - X_o(L)) + m_{12}(Y - Y_o(L)) + m_{13}(Z - Z_o(L))}{m_{31}(X - X_o(L)) + m_{32}(Y - Y_o(L)) + m_{33}(Z - Z_o(L))} \\
 0 = & -f \frac{m_{21}(X - X_o(L)) + m_{22}(Y - Y_o(L)) + m_{23}(Z - Z_o(L))}{m_{31}(X - X_o(L)) + m_{32}(Y - Y_o(L)) + m_{33}(Z - Z_o(L))}
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기에서 P_i 는 i 번째 라인의 픽셀(pixel)번호이다.

$$R_i = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 X_o(L) &= X_{o0} + X_{o1}L + X_{o2}L^2 \\
 Y_o(L) &= Y_{o0} + Y_{o1}L + Y_{o2}L^2 \\
 Z_o(L) &= Z_{o0} + Z_{o1}L + Z_{o2}L^2 \\
 \omega_o(L) &= \omega_{o0} + \omega_{o1}L + \omega_{o2}L^2 + \omega_{o3}L^3 \\
 \phi_o(L) &= \phi_{o0} + \phi_{o1}L + \phi_{o2}L^2 + \phi_{o3}L^3 \\
 \kappa_o(L) &= \kappa_{o0} + \kappa_{o1}L + \kappa_{o2}L^2 + \phi_{o3}L^3
 \end{aligned} \tag{2}$$

3. 신뢰성 이론

신뢰성은 측지망에서 조정된 결과값의 질(quality)을 평가하기 위해 W. Baarda에 의해 개발된 개념이다. Baarda에 따르면 질은 정밀도와 신뢰성을 포함하며 그림 1은 신뢰성 이론에서 부분들간의 관계를 나타내고 있다.⁽¹⁾

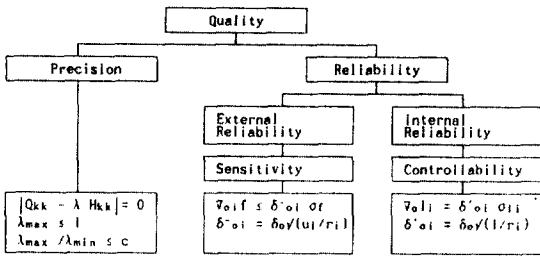


그림 1. Baarda에 의한 신뢰성 개념.

내적신뢰성은 주어진 확률하에서 검출할 수 있는 과대오차의 하한계를 나타내는 관측값의 조정력(controllability)을 의미한다. 제거되지 않은 과대오차가 결과값에 미치는 영향은 결과값의 표준오차에 대한 인자로 표시되며, 이는 극단적인 경우 결과값을 얼마나 나쁘게 할 수 있는가를 나타내어 준다. 이 인자를 외적신뢰성 또는 미지값의 예민성(sensitivity)이라 한다.

(1)식과 같은 공선조건식을 선형화한 결과의 SPOT용 번들조정식을 (3)식과 같이 표시하자.

$$l + v = Ax = (BC)(\hat{x})^T; P_{11} \quad (3)$$

여기에서 l 은 관측값 벡터, v 는 잔차 벡터, A 는 설계행렬, x 는 미지변수의 추정량 벡터, P_{11} 은 경중률 행렬(경중률 계수행렬 Q_{11} 의 역행렬)이다. 잔차 v 의 경중률 계수행렬은 다음 (4)식으로 유도된다.

$$Q_{vv} = Q_{11} - A(A'P_{11}A)^{-1}A' \quad (4)$$

전체 잉여관측수에 대한 관측값 l_i 의 기여하는 양 r_i (본 논문 4절에서는 R_i 로 표기)를 Förstner는 redundancy number라고 하였다.⁽⁵⁾

$$r_i = (Q_{11}P_{11})_{ii} = (I - A(A'P_{11}A)^{-1}A'P_{11})_{ii} \quad (5)$$

redundancy number는 0에서 1 사이의 값으로 r_i 가 1인 관측값은 완전히 조정할 수 있으며, 0인 관측값은 전혀 검사할 수 없다. r_i 를 사용하면 관측값 l_i 에서 한개의 과대오차 ∇_{oi} 을 (6)식으로 계산할 수 있다.

$$\nabla_{oi} = -r_i \nabla_i \quad (6)$$

표준화 잔차(standardized residual) $w_i = v_i/\sigma_{vi}$ 를 사용하는 baarda의 "data snooping" 방법으로 과

대오차를 검출한다면, 일정한 유의수준($1-\alpha_o$)과 검정력(β_o)하에서 검출할 수 있는 과대오차의 하한계 ∇_{oi} 는 (7)식으로 나타낼 수 있다.

$$\nabla_{oi} = \delta_{oi}' \sigma_{ii}; \delta_{oi}' = \delta_o / \sqrt{r_i} \quad (7)$$

여기서 δ_{oi}' (본 논문 4절에서는 조정력인자 C_i 로 표기)는 관측값 l_i 에서 검출할 수 있는 과대오차의 최소크기 ∇_{oi} 를 나타내기 위한 σ_{ii} 의 인자이다. 하한계 ∇_{oi} 또는 인자 δ_{oi}' 는 Baarda에 따른 관측값의 조정력 또는 내적신뢰성을 의미한다.

외부표정요소 t 의 결정에 대한 관측값 l_i 의 기여값 u_{ti} (본 논문 4절에서는 U_i 로 표기)는 (8)식으로, 미지좌표값 k 의 결정에 대한 관측값 l_i 의 기여값 u_{ki} 는 (9)식으로 얻어진다.⁽⁶⁾

$$u_{ti} = (B(B'P_{11}B)^{-1}B'P_{11})_{ii} \quad (8)$$

$$u_{ki} = (\bar{C}(\bar{C}'P_{11}\bar{C})^{-1}\bar{C}'P_{11})_{ii}; \bar{C} = (I - B(B'P_{11}B)^{-1}B'P_{11})C \quad (9)$$

외부표정요소의 예민성 δ_{oi}^- (본 논문 4절에서는 예민성인자 S_i 로 표기)는 (10)식으로, 미지좌표의 예민성 δ_{oi}^* 는 (11)식으로 얻어지며, 이들 인자들은 Baarda가 제시한 외적신뢰성의 척도이다.

$$\delta_{oi}^- = \delta_{oi}' \sqrt{u_{ti}} = \delta_o \sqrt{(u_{ti}/r_i)} \quad (10)$$

$$\delta_{oi}^* = \delta_{oi}' \sqrt{u_{ki}} = \delta_o \sqrt{((1-r_i-u_{ti})/r_i)} \quad (11)$$

4. SPOT용 번들조정의 이론적 신뢰성

내적 및 외적신뢰성의 수치적 표현은 첫째 측량 계획의 평가를 위한 기초자료 제공과 둘째 측량결과의 평가를 위해 필요하다. 본 연구에서 신뢰성 분석을 위해 요구되는 인자 및 계산방법은 다음과 같다.

1) Redundancy numbers R_i

redundancy numbers는 (5)식의 역행렬 또는 (6)식에 의한 모의계산으로 얻을 수 있다. 모의계산인 경우 오차가 없는 관측값 각각에 한번에 한개의 과대오차만을 포함시키고 조정하여 얻어지는 잔차로부터 계산한다.

2) 조정력 인자 C_i

내적신뢰성을 나타내는 조정력 인자 δ_{oi}' 은 $\delta_{oi} (=$

4.13)을 사용하여 (7)식에 의해 계산된다. 이때의 δ_0 값은 99.9%의 유의수준(3.29의 임계값)과 80%의 검정력(관측정확도의 δ_{oi} '배보다 더 큰 과대오차를 발견할 수 있는 확률)에 상응한 값이다.

3) 예민성 인자 S_i

외부표정의 외적신뢰성을 나타내는 예민성 인자 δ_{oi} 는 (10)식에 의해 계산된다.

4.1 SPOT용 번들조정에서 좌표계에 따른 신뢰성

영상좌표계 및 시상기준점 좌표계에 따른 번들조정에서의 신뢰성을 분석하기 위해, 기준점의 분포는 항공사진측량에서 이론적 연구를 위해 기본적으로 이용되는 9 레조점과 같은 형태로 SPOT 영상에 단일점을 배치하였고 외부표정요소식의 차수는 동적인 움직임을 나타내도록 1차항(12변수)으로 조정하였다. 분석된 좌표계는 그림 2와 같다.

그림에서 사각형은 SPOT 영상을 의미하며 위가 첫번째 라인, 아래가 6000번째 라인을 의미한다. 영상좌표 x, y 는 사진측량용 정밀좌표관측기 또는 원격탐측용 영상처리시스템에서 관측된 기계좌표를 좌표변환시켜 번들조정에서 이용하는 상좌표를 의미한다. 그림 2의 각 좌표계를 이용한 (3)식을 적용하여 식 (5), (7), (8), (10)에 의해 조정된 결과는 표 1과 같다. 표에서 R_i 는 redundancy number를,

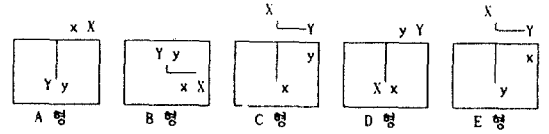


그림 2. 분석 좌표계의 형태.

C_i 는 조정력인자(내적신뢰성)를, U_i 는 외부표정요소의 결정에 대한 기여값, S_i 는 외부표정요소의 예민성인자(외적신뢰성)이다. 외곽점은 9 레조점 중 모서리에 위치한 점을, 내부점은 영상중심에 위치한 점을 의미한다.

표 1과 같이 A형, B형이 거의 같은 결과를 C형, D형, E형이 같은 결과를 나타냈으며, 또한 서로는 x 측과 y 측만이 바뀐 서로 같은 크기값을 나타내고 있다. 이들 값을 비교하여 좌표계의 우위를 판단할 수 없으므로 변수들간의 상관관계를 분석하였으며 상관계수가 0.7 이상인 것만을 나타내면 그 결과는 표 2와 같다.

표 2에서 A형, C형, D형, E형은 같은 결과를 보이며, B형은 κ_{00} 와 κ_{01} 의 상관계수는 0.00으로 다른 형태보다 외부표정요소들간의 상관관계가 더 좋았다. 따라서 일반적으로 사진측량에서 이용되는 B형이 SPOT용 번들조정에서도 다른 형태보다 약간 우수하다 하겠다.

표 1. SPOT용 번들조정에서 좌표계에 따른 신뢰성

(외부점/내부점)

	A type	B type	C type	D type	E type
R_i x	0.72/0.88	0.72/0.89	0.31/0.89	0.31/0.89	0.31/0.89
y	0.31/0.89	0.31/0.89	0.72/0.88	0.72/0.88	0.72/0.88
C_i x	4.85/4.39	4.86/4.37	7.46/4.37	7.46/4.37	7.46/4.37
y	7.46/4.37	7.46/4.37	4.85/4.39	4.85/4.39	4.85/4.39
U_i x	0.27/0.12	0.28/0.11	0.69/0.11	0.69/0.11	0.69/0.11
y	0.69/0.11	0.69/0.11	0.28/0.12	0.28/0.12	0.28/0.12
S_i x	2.56/1.50	2.57/1.46	6.22/1.46	6.22/1.46	6.22/1.46
y	6.22/1.46	6.22/1.46	2.56/1.50	2.56/1.50	2.56/1.50

표 2. 좌표계에 따른 외부표정요소들간의 상관계수

A type	B type	C type	D type	E type
$(\kappa_{00}, \kappa_{01}) = -0.77$	$(\omega_{01}, Y_{01}) = -0.95$	$(\kappa_{00}, \kappa_{01}) = -0.77$	$(\kappa_{00}, \kappa_{01}) = -0.77$	$(\kappa_{00}, \kappa_{01}) = -0.77$
$(\omega_{00}, Y_{01}) = -1.00$	$(\phi_{01}, X_{01}) = 0.95$	$(\omega_{01}, Y_{01}) = -1.00$	$(\omega_{01}, Y_{01}) = -1.00$	$(\omega_{01}, \kappa_{01}) = -1.00$
$(\phi_{00}, X_{01}) = 1.00$		$(\phi_{01}, X_{01}) = 1.00$	$(\phi_{01}, X_{01}) = 1.00$	$(\phi_{01}, X_{01}) = 1.00$

4.2 궤도방향 영상좌표의 표현방법에 따른 신뢰성

앞 절에서 선택된 좌표계를 사용할 때 x축은 scan 방향이므로 CCD array의 한 소자 크기인 0.013 mm를 곱하면 되지만 y축은 위성궤도 방향이므로 투영중심이 서로 달라지게 된다. 따라서 궤도방향 영상좌표를 시간의 함수 $F(t)$, 라인번호의 함수 $F(l)$ 및 항공사진측량에서와 같이 영상크기 $F(p)$ 로 각각 표현하여 이들에 대한 신뢰성을 분석하였다. 시간의 함수는 라인번호에 1.504 ms를 곱하여 사용하였고, 영상크기의 함수는 라인번호에 0.013 mm를 곱하여 사용하였다. 이용된 기준점은 앞 절과 같이 단일점의 9 레조분포이며, 외부표정요소는 12변수(외부표정요소 (2)식에서 1차항까지 선택)와 18변수(2차항까지 선택)를 각각 적용하였다.

표 1과 같은 계산과정으로 얻어진 표 3을 분석하면 시간의 함수로 표현한 경우와 영상 크기로 표현한 경우가 같은 신뢰성을 나타내고 있으며 라인번호로서 표현한 결과보다 더 좋은 결과를 보였다. 따라서 이들 중 더 좋은 표현방법을 선택하기 위해 앞 절에서와 같이 상관관계를 분석하였다. 상관계수가 0.7 이상인 것만을 나타내면 표 4와 같았다.

외부표정요소들간의 상관관계를 분석한 표 4에서 12변수인 경우 시간함수와 영상크기로 표현한 방법이 같은 상관계수값을 나타내었으나, 18변수인 경우 시간의 함수로 표현한 결과가 더 좋았다.

따라서 궤도방향의 영상좌표 표현방법에 따른 신뢰성은 시간의 함수로 표현하는 것과 일반사진측량에서와 같이 영상의 크기로 표현하는 것이 서로 같은 결과를 보였으나, 상관관계를 비교하면 시간의 함수로 선택하는 것이 더 효과적임을 알 수 있다.

4.3 외부표정요소식의 함수선택에 따른 신뢰성

SPOT 위성의 외부표정요소는 동적함수로 표현해야하므로 함수선택에 따라 번들조정식에서의 정확도는 달라지게 되며, 또한 외부표정요소의 초기값을 결정하기 위해 영상화일에 들어있는 수치값들로부터 근사값을 계산하여야 한다. 외부표정요소의 함수를 1차항 또는 2차항으로 선택할 때 신뢰할 수 있는 초기값을 얻기 위해 필요한 자료점의 위치선택을 위해, 6000라인을 갖는 SPOT 영상에서 라인선택에 따른 1차 선형식과 2차 다항식에서의 신뢰성을 분석하였다.

표 3. SPOT 번들조정에서 궤도방향 영상좌표의 표현방법에 따른 신뢰성

			시간함수				라인번호				영상크기			
			Ri	Ci	Ui	Si	Ri	Ci	Ui	Si	Ri	Ci	Ui	Si
12 변수	외부 점	x	0.67	5.05	0.33	2.92	0.67	5.05	0.33	2.92	0.67	5.05	0.33	2.92
		y	0.56	5.53	0.45	3.69	0.50	5.82	0.50	4.11	0.56	5.53	0.45	3.69
	내부 점	x	0.67	5.05	0.33	2.92	0.67	5.05	0.33	2.92	0.67	5.05	0.33	2.92
		y	0.89	4.37	0.11	1.46	0.68	5.02	0.32	2.86	0.89	4.38	0.11	1.46
18 변수	외부 점	x	0.67	5.05	0.33	2.92	0.33	7.20	0.67	5.90	0.67	5.05	0.33	2.92
		y	0.17	10.10	0.83	9.22	0.17	10.10	0.83	9.22	0.17	10.10	0.83	9.22
	내부 점	x	0.67	5.05	0.33	2.92	0.67	5.05	0.33	2.92	0.67	5.05	0.33	2.92
		y	0.67	5.05	0.33	2.92	0.67	5.05	0.33	2.92	0.67	5.05	0.33	2.92

표 4. 궤도방향 영상좌표의 표현방법에 따른 외부표정요소들간의 상관계수

변수	시간함수	라인번호	영상크기
12	$(\phi_{00}, \kappa_{01}) = 0.81$	$(\phi_{00}, \kappa_{01}) = 0.81$	$(\omega_{00}, Z_{01}) = 0.81$
	$(\kappa_{00}, \phi_{01}) = 1.00$	$(\kappa_{00}, \phi_{01}) = 0.97$	$(\omega_{01}, Y_{01}) = -1.00$
18	$(\phi_{00}, \kappa_{02}) = -0.82$	$(\kappa_{00}, \kappa_{02}) = -0.82$	$(\kappa_{00}, \kappa_{02}) = -0.82$
	$(\kappa_{01}, \phi_{02}) = 1.00$		$(\omega_{00}, Z_{02}) = 0.98$
			$(\omega_{02}, Y_{02}) = -1.00$
		$(\phi_{02}, X_{02}) = 1.00$	$(\omega_{01}, Z_{02}) = 0.80$ $(\omega_{02}, Y_{02}) = -1.00$

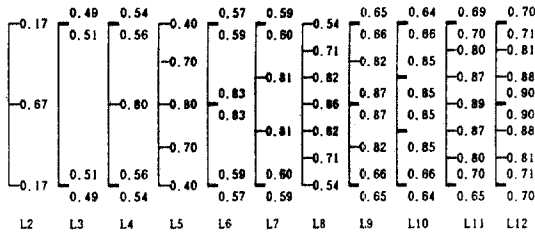


그림 3. 1차선형식에서의 Redundancy numbers.

그림 3에서 위는 1라인을 아래는 6000번째 라인을 의미한다. 가장 큰 신뢰성을 나타내는 점은 중심이었으며 r_i 는 0.67에서 0.90까지의 범위이었다. 가장 작은 신뢰성을 나타내는 점은 L2 경우에서의 양쪽 끝점들로서 r_i 는 0.17이었다. L2와 L4를 비교하면 양쪽 끝점에 2점 그룹으로 분포시키면 신뢰도가 매우 향상됨을 알 수 있었다. 이 결과는 동일한 잉여관측수를 갖는 L4와 L5의 비교에서도 나타났다. 그러나 L4와 L6의 비교와 같은 중앙점에서의 2점 그룹배치는 크게 향상되지 못하였다. 이와같이 가장 작은 신뢰성을 나타내는 관측점은 단일점으로서 양쪽 끝에 위치한 경우이었으며 그룹으로 배치한 경우에는 신뢰성이 향상되었다.

표 5와 그림 4에서의 reference $C_o (=4.13/\sqrt{\text{자유도/관측수}})$ 는 redundancy가 전체 관측값에 균등하게 분포한다고 가정했을 때의 값이다.⁽⁹⁾ (7)식에 의한 조정력인자 C_i 의 최대값이 크면 신뢰성이 낮다는 것을 의미한다. 따라서 1차선형식을 위한 기준점은 신뢰성과 정확성을 높이기 위해 양쪽 끝점에 위치시키고 그룹형태로 분포시키는 것이 중요하며, 경제성과 신뢰성을 동시에 고려한다면 1차선형방정

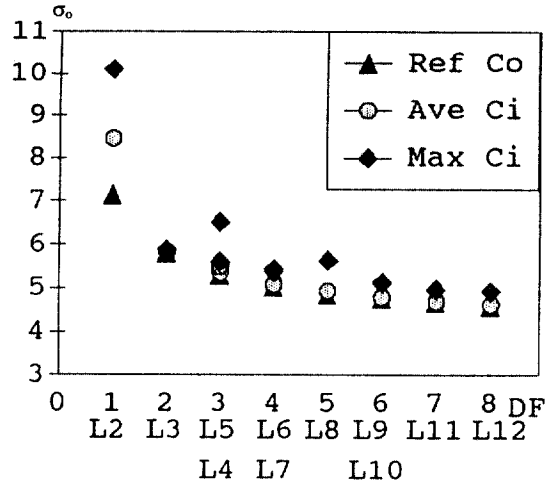


그림 4. 1차선형식에서의 내적신뢰성.

식을 위한 기준점 배치는 L4가 적합하다.

그림 5는 그림 3을 얻은 관측점 조건과 같으며 단지 외부표정요소의 차수를 1차항 대신 2차항까지 사용한 경우이다. 그림 3과 그림 5를 비교하여 보면 1차항까지 고려하였을 때 양호한 조건이었던 C4의 경우가 2차항까지 고려하였을 때는 중심에 위치한 관측점의 신뢰성이 너무 나빴다. 2차항까지 고려하는 경우 C6과 같이 중심부근에 기준점을 그룹으로 배치하든가 또는 C7과 같이 기준점을 부근에 한개 더 배치시켜야만 신뢰성이 향상되었다.

표 6과 그림 6으로부터 2차 다항식을 위한 기준점 배치는 경제성과 신뢰성을 고려하면 C6 또는 C7이 적합하다.

표 5. 1차선형식에서의 조정력 인자

	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12
REference Co	7.14	5.83	5.32	5.32	5.05	5.05	4.88	4.77	4.77	4.68	4.61
Average Ci	8.46	5.83	5.37	5.50	5.11	5.09	4.94	4.79	4.79	4.69	4.63
Maximum Ci	10.10	5.88	5.60	6.52	5.44	5.37	5.63	5.13	5.14	4.97	4.93

표 6. 2차 다항식에서의 조정력 인자

	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
REference Co	8.25	6.52	6.52	5.83	5.83	5.45	5.22	5.22	5.05	4.93
Average Ci	8.25	16.94	8.11	5.84	5.84	5.93	5.26	5.27	5.09	4.97
Maximum Ci	8.43	61.31	12.20	5.99	5.99	8.45	5.79	5.84	5.58	5.56

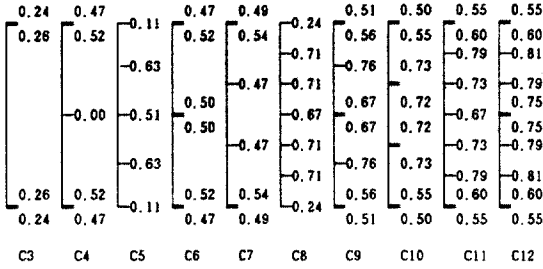


그림 5. 2차 다항식에서의 Redundancy numbers.

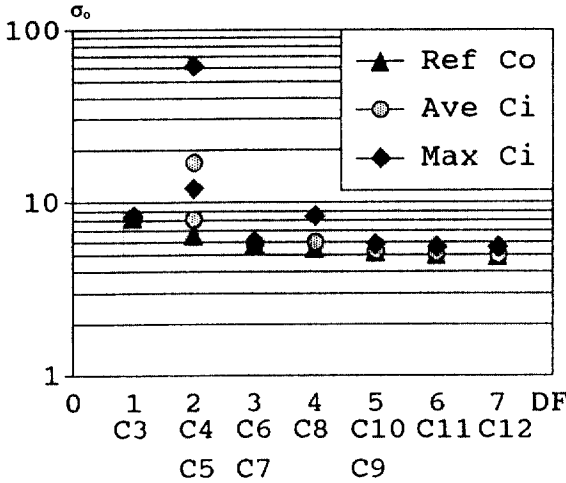


그림 6. 2차 다항식에서의 내적신뢰성.

4.4. 기준점 배치에 따른 외부표정의 신뢰성

그림 7과 같은 기준점 배치로서 외부표정요소 결정단계에서 기준점 배치에 따른 신뢰성을 분석하였다. 사용된 좌표계와 궤도방향의 좌표표현방법은 앞 절들에서 선택된 시스템을 이용하였고 외부표정요소식은 12변수와 18변수를 각각 사용하였다.

12개 변수를 적용한 경우 사진측량에서 일반적으로 이용되는 9 레조배치보다 기준점이 1개 더 작은

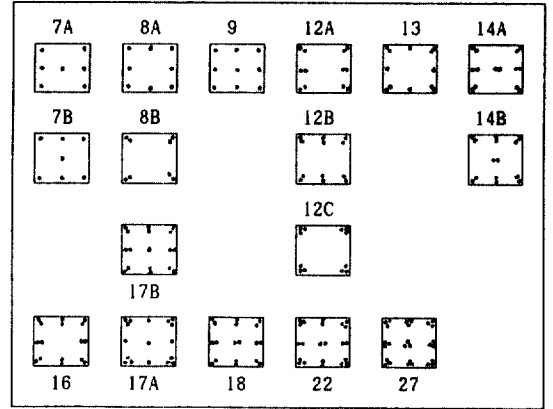


그림 7. 기준점의 배치.

8B형이 더 신뢰성이 좋았다. 이 결과로부터 기준점의 수가 동일할 때 단일점의 배치보다 그룹형태로 배치하는 것이 신뢰성을 높여 줄을 알 수 있었다. 12C와 13형의 경우 조정력 인자의 평균값은 13형의 경우가 작은 값을 나타내어 전체적인 신뢰성이 더 좋았으나 조정력 인자의 최대값은 13형의 경우가 더 큰 값을 나타내고 있다. 17A형의 조정력 인자의 최대값도 18형의 경우보다 더 낮은 값을 나타내고 있다. 따라서 4개의 모서리에서의 그룹 배치가 신뢰성을 높여 줄을 알 수 있었다. 4개 모서리에서의 그룹형태의 기준점 배치는 번들조정 과정에서 과대오차를 검출하기 위해서 뿐만 아니라 최적의 신뢰성을 얻기 위해서도 필요하다. 과대오차가 그룹중의 한점에서 검출된다고 하여도 나머지 점이 남아있기 때문에 관측값의 기하조건이 나빠지지는 않는다. 18개 변수를 적용한 경우 조정력 인자의 최대값은 12A, 12B, 12C형이 모두 13형보다 작은 값을 나타내고 있으며, 12개 점의 배치 중 가장 작은 값을 나타내는

표 7. SPOT용 번들조정에서 외부표정요소 결정을 위한 조정력 인자

	7A	7B	8A	8B	9	12A	12B	12C	13	14A	14B	16	17A	17B	18	22	27
12 변수																	
Ave Ci	6.17	6.19	5.52	5.30	5.33	4.82	4.81	4.78	4.75	4.71	4.70	4.60	4.56	4.57	4.55	4.45	4.38
Max Ci	9.45	9.45	7.63	5.93	7.46	5.47	5.47	5.09	5.39	5.42	5.42	5.19	4.91	5.17	5.16	4.81	4.73
18 변수																	
Ave Ci	-	-	-	-	-	5.30	5.42	5.39	5.39	5.09	5.15	4.93	5.03	4.87	4.81	4.65	4.53
Max Ci	-	-	-	-	-	6.04	6.84	6.48	10.00	6.04	6.21	5.87	10.00	5.60	5.54	5.44	4.92

12A형은 14개 점의 배치 중 가장 좋은 14A형과도 같은 값이다.

기준점이 12, 14개인 경우 12개 변수를 적용한 경우 A형과 B형이 같은 결과이었으나, 18개 변수를 적용한 경우에는 A형이 훨씬 좋은 결과를 나타냈다. 그 이유는 위성궤도 방향의 중간라인에 기준점이 분포되어 있기 때문이다. 또한 12개 변수를 적용한 경우에는 모서리들에만 분포되어 있는 12C형이 12A형보다 좋았으나, 18개 변수를 적용한 경우에는 그와 반대가 되었다. 따라서 위성궤도방향(영상에서의 라인방향)으로 기준점을 그룹형태로 3군데 이상 배치하여야만 한다.

SPOT 번들조정을 위한 기준점배치는 일반적인 경우 18형과 같이 항공사진측량에서 익숙한 9개 레조점에 그룹형태로 배치하는 것이 무난하지만, 경제성을 고려한다면 12A형과 같이 배치하는 것이 효과적이다.

5. 결 론

본 연구에서 SPOT 영상을 이용한 외부표정에서의 신뢰성을 좌표계, 궤도방향 좌표의 표현방법, 외부표정요소의 차수 및 기준점 배치에 대해 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, SPOT용 번들조정에서는 종래의 항공사진측량에서 이용되고 있는 좌표계를 사용하고 궤도진행 방향의 좌표를 시간함수로 표현하는 것이 변수들 사이의 상관관계를 낮출 수 있다.

둘째, SPOT 영상의 동적인 특성을 표현하기 위해 외부표정요소를 1차식 또는 2차식으로 나타낸 경우 정확한 계수값을 얻기 위해서는 양쪽 끝점과 중앙점에서 그룹으로 관측값을 얻어야 한다.

셋째, 기준점 배치는 4개의 모서리에 그룹으로 배치하고 위성궤도방향으로도 3군데 이상 그룹형태

의 배치가 되도록하여야 한다.

네째, 그룹형태로의 기준점 배치는 높은 신뢰성으로 과대오차를 검출할 수 있으며, 과대오차가 그룹중의 한점에서 검출되어도 나머지 점이 남아있기 때문에 번들조정의 기하조건이 나빠지지 않는다는 장점이 있다.

참 고 문 헌

1. Gagan, D.J., "Practical Aspects of Topographic Mapping from SPOT Imagery", *Photogrammetric Record*, 12(69), 1987, pp. 349-355.
2. Konecny, G., P. Lohmann and E. Krück, "Evaluation of SPOT Imagery on Analytical Photogrammetric Instruments", *P.E. & R.S.*, Vol. 53, No. 9, 1987, pp. 1223-1230.
3. Chen, L.-C., L.-H. Lee and S.-C. Lee, "DTM Generation Using SPOT Digital Data", *ISPRS*, Comm. III, 1988, pp. 100-109.
4. IGN, "Cartographic Production from SPOT Data at 1/50,000 Scale", IGN, 1988.
5. Förstner, W., "On Internal and External Reliability of Photogrammetric Coordinates", *ASP Annual Meeting*, Vol. I, 1979, pp. 294-310.
6. Kim, E.-H. and H.-G. Park, "Study on Generation of DTM using SPOT Stereo Data", *ACRS*, 1989, pp. E-4-1/5.
7. Förstner, W., "The Reliability of Block Triangulation", *P.E. & R.S.*, Vol. 51, No. 6, 1985, pp. 1137-1149.
8. Förstner, W., "The Theoretical Reliability of Photogrammetric Coordinates", *ISPRS*, Comm. III, 1980, pp. 223-235.
9. Amer, F.A.A.F., "Theoretical Reliability of Elementary Photogrammetric Procedures: Part 1", *ITC Journal* 1981-3, 1981, pp. 278-307.

(接受: 1991. 11. 19)