大韓土木學會論文集
第11卷 第4號 · 1991年 12月
pp. 151~162

測 量 工 學

SPOT 衛星映像을 利用한 3次元 位置決定의 正確度 向上에 關한 硏究

A study on the Accuracy Improvement of Three Dimensional Positioning Using SPOT Imagery

柳福模* · 曺基成** · 李顯職***
Yeu, Bock Mo · Cho, Gi Sung · Lee, Hyun Jik

Abstract

This study aims to improve the positioning accuracy by analizing the accuracys of three dimensional positioning according to various data types and preprocessing levels of SPOT imagery and the acquisition method for ground control points, and to develop the three dimensional positioning algorithm and program.

In this study, the optimum polynomials of exterior orientation parameters according to each preprocessing levels (level 1B; 15 variables, level 1AP, 1A; 12 variables) are determined. As a results, the accuracy of level 1AP is the best in the results of analysis about the accuracy of positioning, but level 1A which is digital image data form also shows similar positioning accuracy.

Also, in level 1A image which have different acquisition method for ground control points, the accuracy of three dimensional positioning is highly improved. But, in case of low accuracy of ground control points, only introduction of additional parameters does not effect to the improvement of accuracy. Therefore simultaneous adjustment including blunder detection method should be adopted.

요 지

본 연구에서는 자료형태 및 전처리수준이 다른 위성영상자료를 이용하여 전처리수준에 따른 외부표정요소의 최적다항식형태와 위치결정정확도를 파악하고, 지상기준점의 획득방법 및 획득방법에 따른 3차원 위치결정정확도를 분석함으로서 SPOT 위성영상을 이용한 3차원 위치결정이론 및 프로그램을 개발하고 위치결정의 정확도를 향상시키는데 목적이 있다.

본 연구수행 결과 각 전처리수준에 대한 외부표정요소의 최적다항식형태(수준 1B; 15변수, 수준 1AP, 1A; 12변수)를 결정할 수 있었으며, 전처리수준에 따른 위치결정 정확도분석에서는 수준 1AP 위성사진의 정확도가 가장 좋았으나, 수치영상인 수준 1A도 유사한 정확도를 나타냄을 알 수 있었다. 또한, 지상기준점의 획득방법이 다른 수준 1A 수치영상의 3차원 위치결정 정확도를 분석한 결과, 지상기준점의

* 정회원 · 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수
** 정회원 · 연세대학교 산업기술연구소 객원연구원
*** 정회원 · 연세대학교 대학원 토목공학과 박사과정

정확도가 양호한 경우 부가매개변수의 도입만으로 정확도 향상률이 큰 반면 지상기준점의 정확도가 저하되는 경우 부가매개변수의 도입만으로 정확도가 크게 향상되지 않아 조정체계에 과대오차소거이론이 포함된 동시조정이론을 적용함이 바람직함을 알 수 있었다.

1. 序 論

최근 인공위성영상은 탑재기와 탐측기의 발달로 인해 자료 취득시간이 단축되고 공간해상력이 향상됨에 따라 주로 자원 및 환경분야의 감지와 운영 등 정성적인 판독목적으로 이용되었던 종래의 활용범주에서 탈피하여 지형도의 제작과 대규모 지역의 지형 및 공간정보체계(GSIS: geo-spatial information system)를 위한 수치표고모형 생성 등 정량적인 위치결정에도 활용분야가 확대되어 가고 있다.

특히, push-broom 주사방식의 탐측기법을 채택하고 있는 SPOT 위성은 안정된 궤도특성, 높은 공간해상력, 적합한 기선 고도비를 갖고 있으며, 서로 다른 궤도에서 경사관측(off-nadir viewing)에 의해 입체영상을 획득할 수 있음에 따라 농림, 수산, 해양, 환경, 지질분야 등에 종래에는 얻을 수 없었던 새로운 자료를 제공함은 물론 소축척이나 중축척지형도의 제작과 수정 및 접근 불가능한 지역의 3차원 위치결정에도 이용할 수 있다.

SPOT 위성영상을 이용한 3차원 위치결정의 정확도는 광속조정에서 요구되는 지상기준점의 3차원 좌표와 상좌표의 정확도 및 이와같은 입력자료로 조정을 수행하여 결정되는 외부표정요소(X_o, Y_o, Z_o, κ, φ, ω)의 정확도에 의해 좌우된다.

따라서, 본 연구에서는 주사선수의 함수로 나타내는 외부표정요소결정 알고리즘을 토대로 동일한 대상지역에 대해 전처리수준이 다른 위성사진자료(수준 1B, 수준 1AP)와 수치영상자료(수준 1A)를 이용하여 동적인 외부표정요소의 최적 다항식을 결정하고 3차원위치결정을 수행할 수 있는 단모델 SPOT 위성영상의 3차원 위치결정 알고리즘과 프로그램을 개발하며 위치결정체계에 영상의 기하학적 왜곡을 보정하기 위한 부가매개변수의 도입 및 입력자료의 과대오차를 탐색·소거하는 방법이 포함된 동시조정(simultaneous adjustment)이론의 타당성을 검토함으로써 입력자료의 문제점을 극복하여 SPOT 위성영상을 이용한 3차원 위치결정의 정확도를 향상시키는데 목적이 있다.

2. SPOT 위성영상의 동시조정 이론

SPOT 위성영상의 위치결정이론은 SPOT 위성의 기하학적 안정성에 의해 해석사진측량에서 적용되어온 광속조정이론을 HRV탐측기의 영상기하학과 위성궤도의 특성을 고려하여 수정함으로써 적용할 수 있다.

SPOT 위성영상을 이용한 위치결정에서는 주사시간이나 주사선 수의 항으로 표시되는 외부표정요소의 최적다항식결정이 중요하게 되며, 위치결정의 정확도를 향상시키기 위해서는 조정과정에 이용되는 상좌표와 기준점좌표의 관측 및 조정에 포함된 입력자료의 오차를 줄이고, 위치결정체계의 기하학적 신뢰도를 높이기 위해 잉여관측이 충분하여야 소요정확도를 얻을 수 있다.

이와 같은 정확도향상을 위한 합리적인 조정을 위해서 위성에서 채택하는 기준좌표체계와 우리나라에서 채택하고 있는 좌표기준계 사이의 불일치를 동일한 좌표체계로 통일하는 좌표계간의 상호변환과 조정과정에서 기존의 최소제곱조정이론을 통한 우연오차뿐만 아니라 영상획득기하에 의해 발생되는 지구곡률이나 대기곡률, 탐측기의 비선형성, 위성의 진동에 의한 영향 및 지구자전 등과 같은 정오차요소를 제거하기 위한 부가매개변수의 도입 및 관측자료에 포함된 과대오차를 소거하는 방법이 합리적으로 계획된 조정체계를 구축하여 위치결정을 수행하여야 한다.

SPOT 위성영상의 위치결정에서 기하학적 왜곡의 영향을 소거하기 위한 부가매개변수의 도입은 SPOT 위성에서 채택된 지구타원체의 특성과 전처리 수준 및 조정에 이용되는 자료형태에 따라 서로 다른

오차특성을 포함하고 있으므로 위치결정의 정확도 향상뿐만 아니라 관측자료에 포함된 과대오차를 검색하고 소거하는데 중요한 역할을 한다. 그러나, 부주의한 부가매개변수의 도입은 오히려 조정체계의 불안정을 야기시켜 위치결정의 정확도를 저하시키는 결과를 초래할 수 있으므로 부가매개변수의 도입에는 도입된 부가매개변수의 결정력과 통계학적 신뢰도 및 발생가능한 정오차를 완전하게 표현할 수 있는 능력이 고려되어야 한다. 따라서, 조정체계에 포함된 모든 관측오차를 동시에 조정하는 동시조정(simultaneous ajustment) 방법이 가장 효율적이며, 동시조정을 적용할 경우 관측오차를 처리하는 방법과 조정체계내에서 불필요한 부가매개변수항을 배제하기 위한 부가매개변수의 결정력 검토 및 부가매개변수에 대한 유의성검정이 합리적으로 구성되어야 양호한 결과값을 얻을 수 있다.

본 연구에서는 이용자료의 형태와 관계없이 영상내 포함된 모든 기하학적 왜곡을 보정하기 위하여 일반적인 2차원 부등각사상 변환식을 확장한 3차다항식을 부가매개변수항으로 채택하였다. 본 연구에서 채택한 부가매개변수항을 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\Delta x &= a_1 + a_2x + a_3y + a_7x^2 + a_8xy + a_9y^2 + a_{13}x^3 \\ &\quad + a_{14}x^2y + a_{15}xy^2 \\ \Delta x &= a_4 + a_5x + a_6y + a_{10}x^2 + a_{11}xy + a_{12}y^2 \\ &\quad + a_{16}x^3 + a_{17}x^2y + a_{18}xy^2\end{aligned} \tag{1}$$

식 (1)은 SPOT 위성영상의 위치해석에 이용된 수학적모형에 첨가시켜 모든 미지변수에 대한 상관성 분석과 부가매개변수에 대한 유의성 검정이 포함된 동시조정을 수행하여 유의한 부가매개변수만을 채택하는 방법을 이용하였다.

또한, SPOT 위성영상의 외부표정요소는 각 영상선당 6개가 존재하여 표준영상에 대해 총 36,000개의 외부표정요소가 필요하나, 각 영상선의 표정요소가 안정된 선형등속운동으로 가정할 수 있는 SPOT 위성영상의 기하특성에 의해 높은 상관성을 나타냄에 따라 주사시간이나 주사선수의 함수로 단순화시킬 수 있다.

본 연구의 위성영상의 외부표정요소 추정에서는 위성의 실제변화를 나타내기 위해 영상보조자료로 제공되는 정보를 이용하여 위성위치($\bar{X}_{oi}$, $\bar{Y}_{oi}$, $\bar{Z}_{oi}$), 위성자세(ω_i, φ_i, κ_i)에 대해서 주사선수의 2차다항식까지를 적용하여 전처리 수준에 따른 최적다항식을 결정하는데 이용하였다. 본 연구에서 이용된 외부표정요소 다항식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\kappa_{oi} &= H_o + K_1y + K_7y^2 \\ \phi_{oi} &= \phi_o + K_2y + K_8y^2 \\ \omega_{oi} &= \omega_o + K_3y + K_9y^2 \\ \bar{X}_{oi} &= X_o + K_4y + K_{10}y^2 \\ \bar{Y}_{oi} &= Y_o + K_5y + K_{11}y^2 \\ \bar{Z}_{oi} &= Z_o + K_6y + K_{12}y^2\end{aligned} \tag{2}$$

2.1 부가매개변수의 결정력 검토 및 유의성 검정

동시조정에서 정규방정식에 대한 해석 여부는 조정에 포함되는 미지변수사이의 상관성에 영향을 받으므로 임의의 미지변수가 상관성이 크다면 이 변수는 동일한 기능을 수행하므로 두 변수중 한 변수를 제거하여도 조정과정에 많은 영향을 주지 않는다. 특히, SPOT 위성영상과 같이 미지변수의 확장으로 인해 정규방정식의 형태가 복잡한 경우에는 정규방정식이 특이행렬(singular matrix)이 되는 특성을 나타내므로 본 연구와 같이 동시조정이 이용될 경우 도입된 부가매개변수와 미지변수의 상관특성과 조정정확도에 영향을 미치지 않는 불필요한 부가매개변수를 소거하는 결정력(determinability)검토가 중요하게 된다.

일반적으로 SPOT 위성영상의 위치결정에서 부가매개변수의 결정력에 영향을 미치는 요소에는 조정에 포함된 영상점과 지상기준점의 수 및 분포, 대상물의 형상 및 영상수, 중복도, 기선고도비 등이 있다. 본 연구에서 이용될 부가매개변수의 결정력 검토는 그림 1과 같은 과정으로 진행된다.

부가매개변수의 유의성 검정은 조정과정에 불필요하며 조정체계의 불안정을 초래하는 부가매개변수를 제거하기 위해 필요하다. 부가매개변수의 유의성에 대한 통계학적 검정은 완전한 급수를 갖는 가설모형을 기초로 하며, 다차원검정을 위한 F검정과 일차원검정을 위한 t검정을 이용한다.

다차원 검정은 조정체계 전반에 걸쳐 부가매개변수의 중요한 계통적 영향을 알기위한 검정으로 다음과 같은 귀무가설을 설정한다.

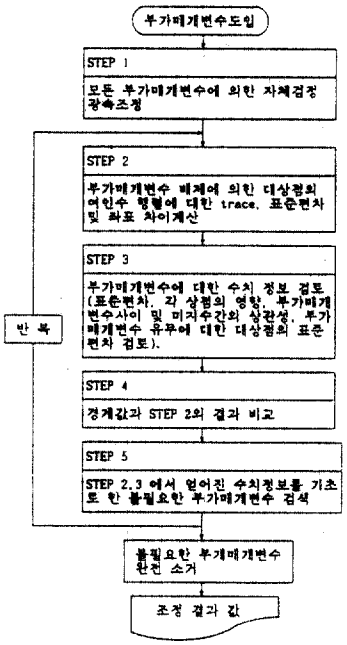


그림 1. 부가매개변수의 결정력 검토

$$H_o: \sum X_{ap} = X_{apo} \tag{3}$$

여기서, I는 $(n_{ap} x n_{ap})$ 크기의 단위행렬이며, 검정통계량 T는

$$T = \frac{1}{n_{ap}\sigma_o^2}(\hat{X}_{ap} - X_{apo})^T Q_{ap}^{-1}(\hat{X}_{ap} - X_{apo}) \tag{4}$$

이 된다. 여기서 $\hat{X}_{ap}$는 조정을 통해서 얻어진 부가매개변수의 값이며, Q_{ap}는 부가매개변수의 경중률 계수행렬로 정규방정식을 분할하므로서 결정할 수 있다. 비 중심모수 λ는 귀무가설에 따라 다음과 같이 된다.

$$\lambda = \frac{1}{2\sigma_o^2}(\hat{X}_{ap} - X_{apo})^T Q_{ap}^{-1}(\hat{X}_{ap} - X_{apo}) \tag{4}$$

또한, 검정력$(1-\beta)$는 비중심모수를 따라 증가하는 함수로 Tang의 E^2표로부터 얻을 수 있다.

다차원 검정에서 귀무가설이 기각되었을 때 각각의 부가매개변수에 대한 가설검정을 수행하여야 하며 이 경우 다차원검정은 일차원검정으로 축약된다.

1차원검정을 위한 귀무가설과 검정통계량은 다음과 같다.

$$H_o: X_{ap} = X_{apo};\ 1,\ 2, \cdots,\ n \tag{6}$$

$$Ti = \frac{(\hat{X}_{ap} - X_{apo})^2}{\sigma_o^2 q_{api}}$$

여기서, q_{api}는 부가매개변수의 여인수 행렬에 대한 i번째 대각요소이다.

2.2 과대오차의 탐색 및 소거

일반적으로 SPOT 위성영상의 해석에 있어서 정확한 결과값을 얻기 위해서는 조정체계에 포함된 정오차를 소거하는 부가매개변수가 도입되나, 조정시 이용되는 최소제곱법이 과대오차를 우연오차로 간주하여 다른 관측값에 균등하게 배분하는 성질을 나타내므로 관측값에 과대오차가 포함된 경우, 정확도가 떨어지고 신뢰할 수 없는 결과값을 나타낸다.

이와같은 과대오차는 자료획득시 기준점좌표의 오기, 상좌표의 읽기오차, 기준좌표계와 다른 좌표계의 혼합 등으로 발생한다. 과대오차의 검출을 위한 가장 일반적인 방법은 일반잔차와 사후분산인자를 비교하는 방법으로 3σ법칙이 이용되어 왔다. 이 방법은 모든 잔차들이 $|Vi| < 3\sigma_o$을 만족하는 것을 요구하며, 잔차의 크기가 3σ를 초과하는 관측값을 과대오차가 포함된 불량 관측값으로 간주한다. 그러나, 3σ법칙에서와 같이 모든 잔차에 대해 동일한 기각값을 적용하는 것은 적절하지 않으므로 본 연구에서는 표준화 잔차를 이용하는 순차적 과대오차 이론을 통해 조정체계에 포함된 과대오차를 소거하는 방법을 이용하였다. 본 연구에서 이용할 순차적 과대오차 검색 및 소거과정은 그림 2와 같다.

3. 관측값 해석 및 결과분석

3.1 위성자료의 특성 및 입력자료의 형성

본 연구에 이용되는 위성자료는 SPOT-1 위성에 의해 GRS(Grid Reference System)좌표 305-277에 해당되는 동일한 대상지역에 대해 서로 다른 궤도에서 영상을 획득하여 전처리를 수행한 수준 1B 및 수준 1AP 위성사진과 CCT 형태의 수준 1A 수치영상자료이며, 모든 위성자료는 위치결정에 적합한 전정색형(panchromatic mode: P형)자료로 수직관측영역에 해당되는 좌측영상(L5°37′)과 경사관측에

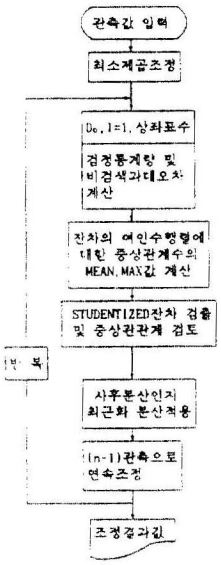


그림 2. 순차적 과대오차 조정 알고리즘

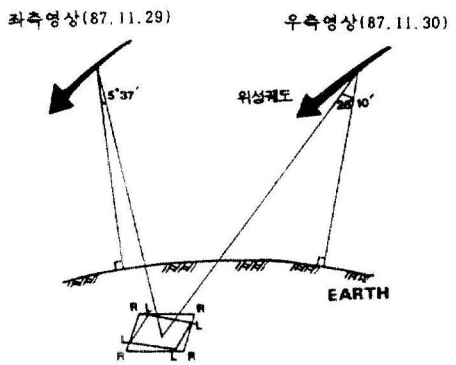


그림 3. 위성자료의 입체모델 형성

표 1. SPOT 위성사진 자료의 주요 제원

제원	level 1B		level 1AP	
	좌	우	좌	우
x(mm)	150.0	182.8	173.0	210.0
y(mm)	150.0	150.0	171.4	171.4
사진축척	1/400,000		1/350.000	
초점거리	2072.0(mm)		2370.5(mm)	
1영상소크기	0.0250(mm)		0.0285(mm)	

표 2. 수준 1A 수치영상자료의 주요특성

(WGS 84 측지좌표)

	좌측영상	우측영상
위성명	SPOT 1	SPOT 1
탑측기명	HRV 2	HRV 1
GRS 좌표	305/277	305/277
전처리수준	1A	1A
자료형	PAN	PAN
영상중심좌표(C_n)	N36°22′02″	N36°22′02″
	E127°25′41″	E127°25′08″
영상중심주사지	N36°32′25″	N35°53′04″
위성직하	E126°39′07″	E131°19′48″
위성고도	829875.9	829741.3
경사각(α)	L5°37′	R26°10′
영상표정각	11°23′29″	8°13′42″
영상획득일	1987. 11. 29	1987. 11. 30
기록형식	DPCM BIL	DPCM BIL
태양각(방위각)	AZ166°28′	AZ161°20′
(고도)	EL31°16′	EL30°00′

해당되는 우측영상(R26°10′)으로 그림 3과 같이 입체모델을 형성하였다. 본 연구에 이용된 입체영상은 기선고도비가 약 0.57이며, 좌측영상(87. 11. 29)과 우측영상(87. 11. 30)의 자료획득일이 1일 차이로 태양각의 변화가 유사한 양호한 관측조건으로 구성되었다.

본 연구에서 이용된 위성사진자료의 형태는 경사각과 전처리수준에 따라 다르게 되며, 각 처리수준의 사진축척에 따라 초점거리 및 1 영상소의 크기가 달라진다. 본 연구에서 이용된 위성사진자료의 주요제원은 표 1과 같다.

또한, CCT 형태인 수준 1A 수치영상은 DPCM 코드의 BIL 형태로 기록되었으며, 복사보정만이 수행된 관계로 경사각에 관계없이 좌우영상의 형태가 일정하다. 본 연구에서 이용된 수준 1A 수치영상의 주요 특성은 표 2와 같다.

SPOT 위성자료를 이용하여 위치결정을 수행하기 위해서는 대상지역에 일정한 수 이상으로 균등 외곽분포되어 있는 지상기준점의 상좌표와 3차원 절대좌표가 필요하게 되며, 광속조정을 통해 위치결정을 수행할 경우, 지상기준점의 3차원절대좌표와 동일한 좌표계로 정의한 대상지역을 주사할 당시의 개략적

인 위성위치(X_o, Y_o, Z_o)좌표와 탐측기의 자세(κ_o, ϕ_o, ω_o)를 알아야 한다.

본 연구에서 선정된 지상기준점의 수는 총 30점이며, 이중에서 각 자료획득방법에서 동일한 난이도로 결정할 수 없거나 지형의 변화로 지형도상에서 위치선정이 곤란한 7점을 제외하고 23점이 선정되어 결과분석에 이용되었다. 본 연구의 결과분석에 이용된 지상기준점의 선정 과정 및 분포는 그림 4 및 그림 5와 같다. 선정된 지상기준점은 좌우 영상의 중복부분에 균등하게 분포되어 있으며, 23점의 지상기준점중 13점은 기준점으로 10점은 검사점으로 이용하였다.

본 연구에서 이용된 지상기준점의 3차원좌표 획득방법은 지상측량에 의한 방법과 기존 국가기본도를 통해 수평위치는 digitizing하여 결정하고 높이는 지성선을 통해 보간하여 지상기준점의 3차원좌표를 결정하는 지형도에 의한 방법을 이용하였다. 지상기준점에 대한 좌·우 영상의 상좌표결정은 위성사진좌표인 수준 1B, 수준 1AP에 대해서 해상력 1 μm를 가진 정밀도화기인 Zeiss P2 Planicomp를 이용하였으며, 수치영상자료인 수준 1A 자료에 대해서는 영상처리시스템인 SUN WORKSTATION ERDAS 시스템의 GCP 모듈을 이용하여 부영상소단위로 지상기준점의 주사선수/영상소수를 획득하는 방법을 이용하였다. 각 방법으로 획득된 상좌표는 본 연구에서 채택한 영상중심을 기준으로 한 영상좌표계로 변환하여 자료분석에 이용되었다.

또한, 위성위치의 초기값은 선행화일의 header자료에서 WGS84지심좌표체계로 제공되는 60초 간격의 9개 위성위치추산자료중 영상중심의 주사시간과 근접하는 3개의 위성위치를 다항식의 형태에 따라 보간하여 위성의 움직임에 따른 외부표정요소 및 다항식계수를 추정하였으며, 위성고도는 지구곡률을 고려하여 보정하였다. 또한, 위성자세에 대한 초기값은 영상표정(Y)을 κ_c로 탐측기의 경사각은 ϕ_o로 이용하였으며, ω_o는 0°로 설정하여 radian값으로

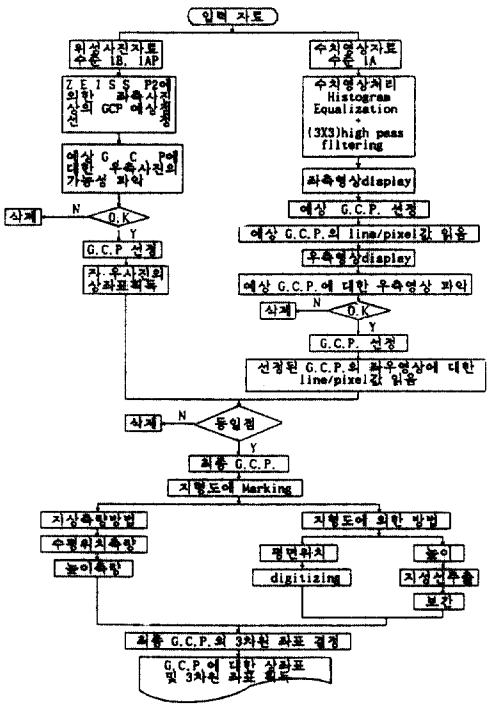
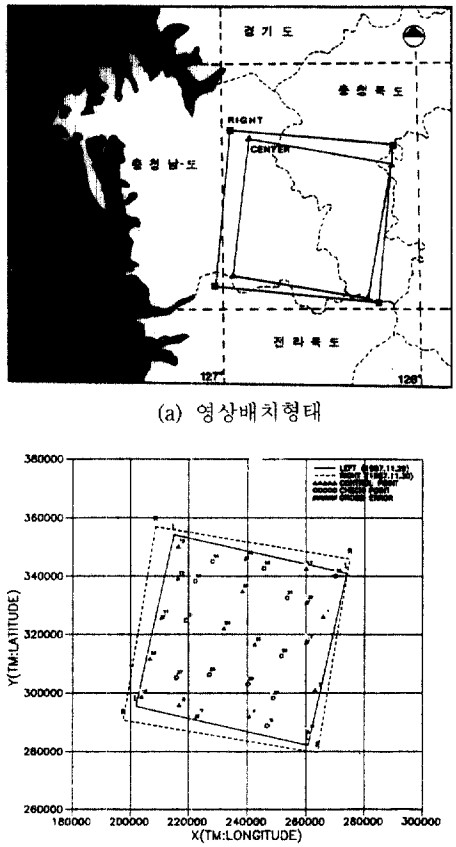


그림 4. 지상기준점 선정 및 획득 과정



(a) 영상배치형태

(b) 지상기준점의 분포

그림 5. 지상기준점의 배치형태 및 분포

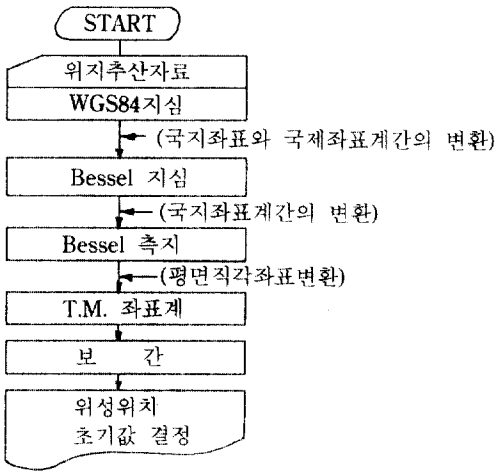


그림 6. 위성위치 결정을 위한 좌표변환

표 3. 외부표정요소의 초기값

외부표정요소	좌측영상	우측영상
X_o	168,987 m	590,452 m
Y_o	337,715 m	273,729 m
Z_o	827,732 m	813,746 m
κ_o	−0.1988 rad	−0.1436 rad
ϕ_o	−0.0980 rad	0.4567 rad
ω_o	0.0 rad	0.0 rad
K_4	2.41 m	1.93 m
K_5	9.73 m	9.86 m
K_6	0.02 m	0.02 m

변환하여 결정하였다. 본 연구의 위성위치의 초기값 결정과정과 결정된 외부표정요소는 그림 6 및 표 3과 같다.

3.2 관측값 해석

본 연구의 관측값 해석은 각 전처리수준의 외부표정요소 최적다항식을 결정하며, 결정된 최적다항식을 이용하여 각 전처리수준의 3차원좌표 정확도를 분석하여 전처리수준에 따른 위성영상의 기하학적 특성을 파악하고 위치결정의 정확도 향상을 위해 부가매개변수를 도입하고 순차적 과대오차소거방법이 포함된 동시조정 이론을 적용함으로써 3차원 위치결정의 정확도 변화를 분석하였다.

(1) 전처리수준에 따른 외부표정요소의 최적다항식 결정 및 정확도 분석

SPOT 위성영상을 통한 위치결정에서 동적인 외부표정요소의 추정은 조정체계의 신뢰성과 정확도를 좌우하는 중요한 요소이며, 위성영상을 이용한 수치표고모형의 구축이나 정사사진지도제작에 필수적인 과정이다.

본 연구의 외부표정요소 다항식 형태는 식 (2)와 같이 선형비가속운동을 하는 위성궤도 및 탑측가자세의 안정성에 의해 위성위치 및 위성자세에 대해 주사선 수의 2차 다항식까지 적용하였으며, 위성위치 및 위성자세에 대한 외부표정요소 다항식의 형태를 변화시킨 4가지 case를 통해 전처리수준에 따른 외부표정요소의 최적다항식을 결정하였다. 외부표정요소의 최적다항식 결정을 위한 분석 case는 표 4와 같다.

분석에 이용된 입력자료는 지상기준점의 3차원좌표로 지상측량방법으로 획득된 성과를 이용하였으며, 상좌표는 자료형태에 따라 해석도화기에 의해 획득된 상좌표(수준 1B, 수준 1AP)와 ERDAS 프로그램의 GCP 모듈에 의해 부영상소 단위로 획득된 상좌표(수준 1A)를 이용하였고, 외부표정요소의 초기값은 영상보조자료를 보간하여 획득된 성과를 이용하였다. 전처리수준에 따른 각 분석 case의 조정결과는 표 5 및 그림 7과 같다.

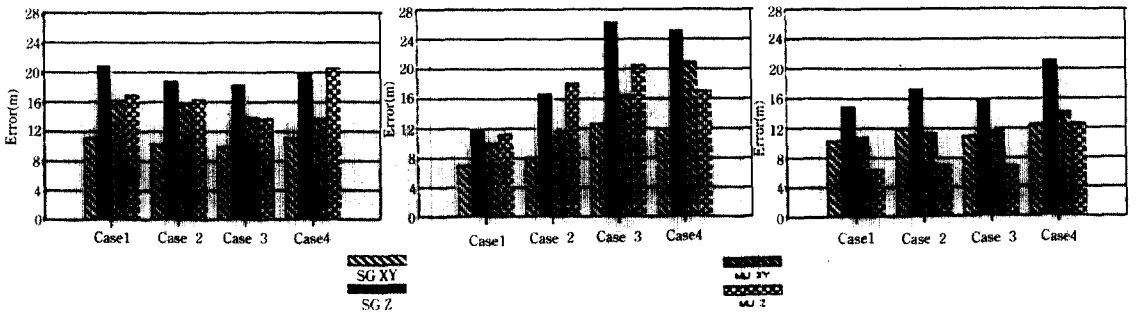
전처리수준에 따른 4가지 case의 외부표정요소를 통해 광속조정을 수행한 결과, 기하학적 보정에 의해 평행사변형 형태를 나타내는 수준 1B에서는 4 case

표 4. 전처리수준에 따른 외부표정요소의 최적다항식 결정을 위한 분석 case

분석 case	변수수	변 수	비 고
case 1	12	X_o, Y_o, Z_o, κ_o, ϕ_o, ω_o, k_1y, k_2y, k_3y, k_4y, K_4y	위치 1차, 자세 1차
case 2	15	case 1+k_7y^2, $k_{11}y^2$, $k_{12}y^2$	위치 2차, 자세 1차
case 3	15	case1+$k_{10}y^2$, $k_{11}y^2$, $k_{12}y^2$	위치 1차, 자세 2차
case 4	18	case1+k_7y^2, k_8y^2, k_9y^2, $k_{10}y^2$, $k_{11}y^2$, $k_{12}y^2$	위치 2차, 자세 2차

표 5. 전처리수준에 따른 분석 case의 조정결과 (단위 : m)

case		case 1(위치1, 자세1)			case2(위치2, 자세1)			case3(위치1, 자세2)			case4(위치2, 자세2)		
전처리		1B	1AP	1A	1B	1AP	1A	1B	1AP	1A	1B	1AP	1A
정밀도	σ_x	10.50	7.18	10.49	9.59	8.25	12.19	9.39	13.02	11.19	10.93	12.33	12.88
	σ_y	11.71	6.97	10.17	10.90	8.01	11.92	10.57	12.34	10.94	11.50	11.55	12.34
	σ_{xy}	11.21	7.08	10.33	10.27	8.13	12.06	10.00	12.68	11.07	11.17	11.95	12.61
	σ_z	20.90	12.02	15.00	18.59	16.73	17.43	18.42	26.42	16.00	19.89	25.26	21.23
정확도	μ_x	18.00	11.18	13.31	17.17	12.24	13.85	17.71	20.70	13.88	16.98	15.05	16.96
	μ_y	14.26	8.91	7.44	14.36	11.17	8.29	9.12	10.77	9.00	9.89	25.57	10.94
	μ_{xy}	16.24	10.11	10.79	15.83	11.72	11.41	14.02	16.50	11.70	13.90	20.98	14.25
	μ_z	17.00	11.30	6.42	16.36	18.11	7.01	13.77	20.51	7.00	20.51	17.07	12.67
영상좌표잔차 (mm)	V_x	0.0281	0.0217	0.0153	0.0270	0.0261	0.0177	0.0262	0.0224	0.0177	0.0224	0.0270	0.0156
	V_y	0.0260	0.0181	0.0163	0.0245	0.0206	0.0168	0.0238	0.0174	0.0461	0.0370	0.0370	0.0149



(a) 수준 1B (b) 수준 1AP (c) 수준 1A

그림 7. 전처리수준에 따른 분석 case의 조정결과

모두 유사한 기하학적 정밀도를 나타내었으나, case 3에서 높이좌표의 정밀도가 σ_z=18.42 m로 다른 case에 비해 가장 양호하였으며, 검사점의 정확도는 15변수까지 적용한 case 1, 2, 3에서 유사한 경향을 나타낸 반면, 18변수의 case 4에서는 높이좌표의 정확도가 현저하게 저하되었고, case 3에서 가장 양호한 정확도인 μ_{xy}=14.02 m, μ_z=13.77 m를 나타내었다. 또한, 수준 1B의 영상자료잔차는 모든 case에서 x좌표의 잔차가 기하학적 보정의 영향으로 y좌표의 잔차보다 크게 나타났다. 특히 18변수가 이용된 case 4에서는 y좌표의 잔차가 현저하게 저하되었다.

또한, 해석도화기의 지도제작자료로 활용하기 위해 위성자세 변수만을 보정한 수준 1AP에서는 위성자세의 보정영향에 따라 위성자세에 대해 2차항을 적용한 case 3, 4에서 높이좌표의 정밀도가 저하됨에 따라 기하학적 정밀도가 case 1, 2에 비해 좋지 않았으며, 위성위치 및 위성자세에 대해 주사선 수의 1차 다항식을 적용한 12변수의 case 1에서 σ_{xy}=7.08 m, σ_z=12.02 m로 기하학적 정밀도가 가장 좋았다. 수준 1AP의 검사점의 정확도는 기하학적 정밀도의 경향과 유사하였으며, case 1에서 μ_{xy}=10.11 m, θ_z=11.30 m로 가장 양호하였고, 영상좌표잔차에서는 전 case에서 y좌표잔차가 x좌표의 잔차보다 양호하였으며, case 1, 2, 3에서 1영상소인 28.5 μm이내의 잔차를 나타낸 반면 case 4의 y좌표잔차는 37 μm로 1영상소의 범위를 초과하였다.

복사보정만을 수행하여 원영상의 기하학적 특성과

표 6. 전처리수준에 따른 3차원 위치결정 정확도

표정변수	전처리수준	기하학적 정밀도(m)		검사점의 정확도(m)		상좌표 잔차(mm)	
		σ_{xy}	σ_z	μ_{xy}	μ_z	V_x	V_y
15	1B	10.00	18.42	14.02	13.77	0.0262	0.0238
12	1AP	7.08	12.02	10.11	11.30	0.0217	0.0181
12	1A	10.33	15.00	10.79	6.42	0.0153	0.0168

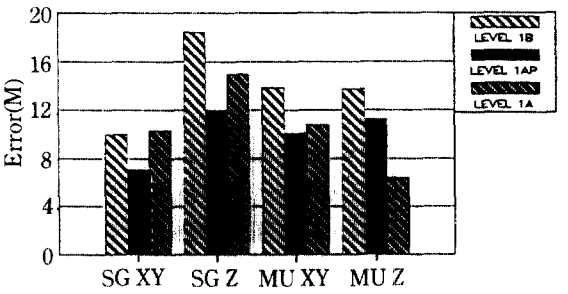


그림 8. 전처리수준에 따른 3차원 위치결정 정확도

동일한 수준 1A 수치영상에서는 기하학적 정밀도에서 수평위치의 정밀도는 모든 case가 유사한 반면, 높이정밀도에서는 18변수의 case 4에서 현저하게 저하되었으며, case 1에서 $\sigma_{xy}=10.33$ m, $\sigma_z=15.00$ m로 가장 양호한 기하학적 정밀도를 나타내었다. 또한, 수준 1A의 검사점 정확도에서도 case 1이 가장 좋았으며, 특히 18변수의 case 4에서는 과대변수화로 인해 높이오차가 크게 나타났다.

이상과 같이 4가지 분석 case를 통해 전처리수준에 따른 외부표정요소의 최적다항식 형태를 분석한 결과, 수준 1B 위성사진에서는 위성위치에 대하여 1차, 위성자세에 2차 주사선 함수를 적용한 15변수의 외부표정요소가 최적다항식임을 알 수 있었으며, 수준 1AP 위성사진과 수준 1A 수치영상에서는 위성위치 및 자세에 대하여 1차항의 주사선함수만을 고려한 12변수의 외부표정요소가 최적임을 알 수 있었다.

또한, 각 전처리수준에 따른 위성영상자료의 기하학적 특성을 파악하고 3차원 위치결정의 정확도를 분석하기 위해 각 전처리수준에서 외부표정요소 최적다항식을 통해 광속조정된 결과값을 분석하였다. 전처리수준에 따른 광속조정결과는 표 6 및 그림 8와 같다.

표 6 및 그림 8에 나타난 바와 같이 3차원 위치결정의 기하학적 정밀도 및 검사점의 정확도는 수준 1AP-수준 1A-수준 1B순으로 나타났으며, 가장 기하학적 정밀도가 양호한 수준 1AP는 수준 1B에 비해 수평위치에서 29.2%, 높이좌표에서 34.74% 정도 기하학적 정밀도가 양호하였고, 수준 1A에서도 수준 1B에 비해 높이좌표의 정밀도가 양호함에 따라 높은 기하학적 정밀도를 나타내었다. 또한, 검사점의 정확도에서는 수평위치에서 수준 1B가 가장 큰 오차를 나타낸 반면, 높이좌표에서는 수준 1A의 정확도가 가장 좋았으며, 영상좌표의 잔차에서는 상좌표관측의 난이도에 따라 해석도화기를 이용한 수준 1B, 1AP에서는 1영상소인 25.0 μm, 28.5 μm보다 작은 값을 나타낸 반면, 수준 1A에서는 수치영상처리방법에 의해 처리된 영상의 조건에 따라 상좌표의 획득 난이도가 좌우되므로 x, y잔차에서 1영상소인 13 μm 이상의 값을 나타내었다.

따라서, 각 전처리수준에 대해 최적외부표정요소 다항식을 적용하여 3차원 위치결정의 정확도를 분석한 결과, 상좌표 획득의 난이도에 따라 위성사진 형태의 수준 1AP에서 수준 1A와 수준 1B보다 양호한 정확도를 나타내어 3차원 위치결정에 가장 적합한 전처리수준임을 알 수 있었으나, 위성사진 자료인 수준 1AP의 위치결정에서는 고가의 해석도화기가 필요하므로, 수치영상형태인 수준 1A 영상으로 상좌표획득방법과 과대오차소거 등에 대한 충분한 연구를 수행하여 기하학적 정밀도를 향상시킬 경우 SPOT위성영상을 이용한 중축척 및 소축척 지도제작이나 database 구축 등 3차원 위치결정을 요하는 경우에 더욱 경제적인 자료형태임을 알 수 있었다.

(2) 동시조정에 의한 3차원 위치결정의 정확도 분석

대상지역의 특성에 따라 접근하기 불가능하거나 어려운 지역에서는 지상기준점의 정보를 얻기위한 자료와 방법이 극히 제한됨에 따라 정확도가 저하되는 기존지형도를 통해 지상기준점의 3차원좌표를 획득하여야 한다. 일반적으로 지형도를 이용할 경우, 가장 확보하기 쉬운 방법은 전세계적으로 공통축척인 1 : 50,000 지형도이며, 이를 이용하면 위치결정의 정확도 저하를 감수하여야 한다.

따라서, 정확도가 양호하지 않은 지상기준점 자료를 통해 SPOT 위성영상의 위치결정을 수행하기 위해서는 위성영상에서 발생되는 정오차요인을 보정하기 위한 부가매개변수의 도입과 일정범위에서 벗어나는 입력자료의 과대오차를 탐색하여 소거하기 위한 과대오차소거 이론이조정체계에 포함된 동시조정이론을 적용하여야 한다.

본 연구에서는 2차원 부등각사상변환식을 확장한 18변수의 부가매개변수를 도입하고 순차적 과대오차소거 이론이 포함된 동시조정에 의해 상좌표의 획득이나 자료의 이용면에서 더욱 바람직한 자료형태로 결정된 수준 1A 수치영상을 통해 지상기준점의 3차원좌표 획득방법이 다른 두 case에 대해 부가매개변수 도입과 과대오차소거에 따른 3차원좌표의 정확도 변화를 분석함으로써 동시조정이론의 타당성을 검토하였다. 동시조정이론의 타당성 검토에 이용된 분석 case는 표 7과 같다.

표 7. 부가매개변수에 따른 정확도 분석 case

case	전처리수준	지상기준점 획득방법		자료형태
		3차원좌표	상좌표	
1	1A	지상측량방법	수치영상처리기에 의한 방법	수치영상
2	1A	1 : 50,000	〃	〃

표 7과 같은 지상기준점의 획득방법이 다른 두 case에 대해 식 (1)과 같은 18변수의 부가매개변수에 대해 유의성 검정을 수행하여 유의한 부가매개변수항을 결정하였으며, 3차원좌표의 정확도 분석을 수행하였다. 부가매개변수 고려에 따른 정확도 변화는 표 8 및 그림 9와 같다.

표 8 및 그림 9에서 나타난 바와 같이 부가매개변수가 고려된 자체검정광속조정에 의해 수준 1A 수치영상의 3차원좌표 정확도를 분석한 결과, 지상측량 성과를 이용한 case 1에서는 수평위치에 있어서 기하학적 정밀도와 검사점의 정확도가 각각 4.2%와 19.0% 향상되었으며, 높이좌표에서는 기하학적 정밀도가 13.4% 검사점의 정확도가 29.0% 향상되어 부가매개변수를 고려함에 따라 3차원위치결정의 정확도가 향상되었다. 그러나, 1 : 50,000 지형도를 이용한 case 2에서는 지상기준점의 3차원좌표 정확도가 좋지않음에 따라 수평위치의 정확도 향상율은 5% 미만으로 미소한 반면, 높이좌표에 있어서는 기하학적 정밀도가 12.9%, 검사점의 정확도가 20.9% 향상되어 부가매개변수만을 고려할 경우 높이좌표의 정확도는 향상되나 수평위치의 정확도는 크게 향상되지 않음을 알 수 있었다.

또한 case 2의 결과에서 과대오차가 되는 점인 22번점과 27번점을 소거하여 3차원 좌표의 정확도를 분석한 결과, 표 9를 얻을 수 있었다.

표 9에서 나타난 바와같이 과대오차가 되는 점을 소거한 결과 부가매개변수만을 고려한 경우보다 기하학적 정밀도와 검사점의 정확도 향상율이 더욱 커졌으며, 특히 높이좌표의 기하학적 정밀도와 수평위치의 검사점 정확도가 향상되어 지상기준점의

표 8. 부가매개변수에 따른 정확도 분석

case	부가매개변수를 고려하지 않은 경우				부가매개변수를 고려한 경우			
	σ_{xy}	σ_z	μ_{xy}	μ_z	σ_{xy}	σ_z	μ_{xy}	σ_z
case 1	10.33	15.00	10.79	6.42	9.89	12.74	8.74	4.52
정확도 향상률(%)					4.2	13.4	19.0	29.0
case 2	16.63	36.14	38.29	26.09	16.59	31.48	38.05	20.62
정확도 향상률(%)					0.2	12.9	3.2	20.9

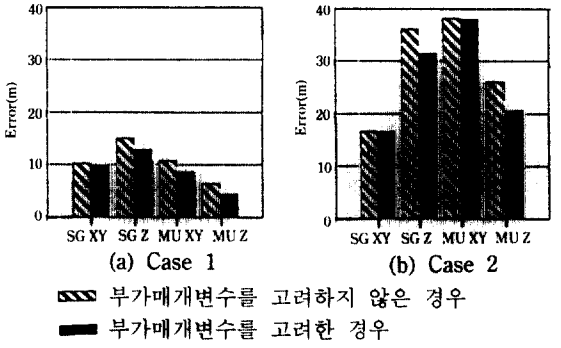


그림 9. 부가매개변수 고려에 따른 3차원좌표의 정확도 분석

정확도가 저하된 자료를 이용하여 위치결정을 수행할 경우, 지상기준점에 포함된 과대오차를 소거하는 과정이 수행되어야만이 3차원좌표의 정확도를 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다. 이와 같이, 지상기준점의 정확도가 다른 수준 1A 영상에 대해 3차원좌표의 정확도를 분석한 결과 지상기준점의 정확도가 양호한 경우에는 부가매개변수의 도입만으로도 조정된 3차원좌표의 정확도를 향상시킬 수 있으나, 지상기준점의 정확도가 불량한 경우에는 부가매개변수의 도입으로 지상기준점의 수평오차가 반영됨에 따라서 검사점의 수평위치정확도가 크게 향상되지 않아 지상기준점의 정확도가 불량한 경우에는 부가매개변수의 도입뿐만 아니라 과대오차소거이론이 포함된 동시조정을 통해 3차원 위치결정을 수행하여야 함을 알 수 있었다.

또한, 본 연구에서는 다차원검정인 F검정을 통해 조정체계 전반에 걸친 부가매개변수의 계통적 영향을 검정한 후, 다차원 검정에서 기각된 부가매개변수항에 대해 t검정을 통한 일차원 검정을 수행하여 유의한 부가매개변수항을 결정하였다. 본 연구에서 결정된 수준 1A에 유의한 부가매개변수의 t 검정결과는 표 10과 같다.

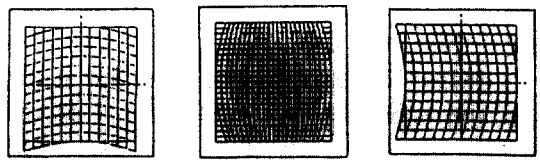


그림 10. 수준 1A에 유의한 부가매개변수항의 영향

표 10의 유의성 검정결과는 t검정에 의해 유의수준 5% 일때의 자유도에 따른 검정기각값이 $t_{0.05,35}$= 1.6905보다 크게 나타나 귀무가설이 기각되는 항만을 설정한 것으로 검정결과에 따르면 x축의 성좌표에 영향을 미치는 a_7x^2, $a_{15}xy^2$항과 y축의 상좌표에 영향을 미치는 $a_{16}x^3$항이 유의한 항으로 선택되었다. 유의한 부가매개변수항으로 선정된 a_7, a_{15}항은 이용된 자료가 복사보정만을 수행한 수준 1A 수치영상이므로 위성의 진동에 의해 발생되는 ω와 φ의 변화에 의한 x축의 정오차요인을 보정하는 항이며, y축 상좌표영향을 미치는 $a_{16}x^3$항은 지구곡률에 따른 영향을 보정하는 항으로 수준 1A 수치영상에 유의한 부가매개변수의 영향은 그림 10과 같다.

표 10. 수준 1A의 유의성 검정결과

부가매개변수항	최소제곱 추정량	표준오차	$\lvert\hat{T}\rvert$
a_7x^2	−0.153 E-04	0.132 E-04	1.936
$a_{15}xy^2$	−0.291 E-05	0.525 E-05	1.801
$a_{16}x^3$	−0.174 E-05	0.708 E-05	1.907

4. 결 론

SPOT 위성영상을 이용한 3차원 위치결정의 정확도를 향상시키기 위해 자료형태와 전처리수준이 다른 수준 1B, 수준 1AP 위성사진과 수준 1A 수치영상을 이용하여 전처리수준에 따른 최적 외부표정요소 형태와 3차원 위치결정의 정확도를 분석하고

표 9. 과대오차소거에 따른 3차원좌표 정확도

항 목	기하학적 정확도		검사점의 정확도		소거된 점
	σ_{xy}	σ_z	μ_{xy}	μ_z	
과대오차 소거	14.28	26.97	28.33	15.30	22.27
정확도 향상률(%)	14.10	25.37	27.89	41.36	

동시조정 이론을 적용하여 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 동일한 위성자료를 이용하여 전처리된 수준 1B, 1AP 위성사진과 수준 1A 수치영상의 최적 외부표정요소를 결정한 결과, 기하학적 보정이 수행된 수준 1B 위성사진은 위성위치에 대해 1차 주사선함수와 위성자세에 대해 2차 주사선함수를 적용한 15변수의 외부표정요소가 최적이었으며, 수준 1AP 위성사진과 수준 1A 수치영상에서는 위성위치나 자세 모두 1차 주사선함수가 적용된 12변수의 외부표적요소가 최적임을 알 수 있었다.

2) 각 전처리수준에 따른 3차원 위치결정의 정확도분석에서는 수준 1AP 위성사진자료의 정확도가 가장 좋았으나, 수준 1A 수치영상도 유사한 정확도를 나타냄에 따라 수치영상자료의 지상기준점 획득방법 및 정확도 향상방법에 대해 보다 심층적인 연구가 수행된다면 입력자료의 획득 및 영상자료의 활용면에서 장점이 있는 수준 1A 수치영상이 더욱 경제적인 자료형태임을 알 수 있었다.

3) 동시조정 이론을 적용하여 수준 1A 위성영상에 대해 지상기준점 획득방법을 변화시켜 3차원 위치결정 정확도를 분석한 결과, 지상기준점의 정확도가 불량한 경우에는 부가매개변수의 도입만으로 3차원 위치결정의 정확도를 높일 수 없고 조정체계에 과대오차 소거이론이 포함된 동시조정이론의 적용이 바람직함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 1991년도 국방과학연구소 위탁연구(UD 9000130ED)로 이루어진 것의 일부임.

참 고 문 헌

1. Dowman, I.J. and Gugan, D.J., "Application Potential of SPOT Imagery for Topographical Mapping", *Advanced Space Research*, 5(5), 73-7-8, 1988.
2. Kratky, V., "Rigorous Photogrammetric Processing of SPOT Images at CCM Canada", ISPRS *Joural of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 44, 63-71, 1989.
3. Rodriguez, V., P. Gigord, A.C. de Gaujac and P. Munier, "Evaluation of the Stereoscopic Accuracy of the SPOT Satellite", *P.E. & R.S.*, Vol. 54, No. 2, 217-221, 1988.
4. ZEISS, *SPOT-Bundle Adjustment Program for Engineering Objects and Restitution of SPOT Images*, ZEISS Oberkochen, 1987.
5. 內田 修, "SPOT畵象標定自動計測", 寫眞測量, Vol. 28, No. 3, 1989.
6. Konecny, G., P. Lohmann and E. Krück," Evaluation of SPOT Imagery on Analytical Photogrammetric Instruments", *P.E. & R.S.*, Vol. 53, No. 9, 1233-1230, 1987.
7. Gugan, D.J. and Dowman, I.J., "Accuracy Completeness of Topographic Mapping from SPOT Imagery", *Photogrammetric Record*, 12(72), 787-796, 1988.
8. Kratky, V., "Universal Photogrammetric Approach to Geometric Processing of SPOT Images", *ISPRS, Commision IV*, Vol. 27, 180-189, 1988.
9. Kratky, V., "On Line Aspects of Stereophotogrammetric Processing of SPOT Images", *P.E. & R.S.*, Vol. 55, No. 3, 311-316, 1989.
10. 유복모, 이현직, "전처리 수준에 따른 SPOT 위성영상의 정확도 분석에 관한 연구", 한국측지학회, 제9권 제1호, 83-96, 1991.

(接受 : 1991. 10. 29)