

論文93-30B-1-4

비접근 지역의 SPOT 위성 모델링에 관한 연구

(A Study on Modeling of SPOT Satellite for Inaccessible Area)

金正基*, 李 夬 熙*

(Jeong Kee Kim and Kwae Hi Lee)

要 約

본 논문의 목적은 SPOT 위성영상을 이용하여 수치지형 표고모델을 제작하기 위해 SPOT 위성의 위치와 자세를 추정하는 것이다. DEM은 위성의 자세와 위치를 결정하는 모델링과 양쪽영상에서 동일점을 찾는 정합과 이를 이용한 3차원 위치정보 추출로 구성되어 있다. 측량불가능한 지역의 모델링을 위해 지도에서 추출한 GCP를 사용하여 모델링도중 오차가 많이 발생하는 GCP를 차례로 제거하는 확장된 모델링방법을 제안하였다. 공선조건식을 사용한 실험 결과 위성의 ω (pitch)와 Z_s 는 2차가 적당하였으며 κ (yaw), ϕ (roll), X_s 와 Y_s 는 1차가 적당하였다. 본 논문에 사용된 영상은 SPOT level 1A 흑백영상을 사용하였으며 충청도 지역을 촬영한 것이다. 30점의 GCP를 사용하여 검사점을 실험한 결과, 평면오차는 7.11m 고도오차는 7.10m 를 나타냈다.

Abstract

The purpose of this paper is to estimate the attitude and the position of SPOT satellite which are needed in producing DEM (Digital Elevation Model) using SPOT satellite image pairs. DEM extraction is consists of three parts. First part is the modeling of satellite position and attitude, second part is the matching of two images to find corresponding point of them and third part is to calculate the elevation of each point by using the result of the first and second part. For modeling inaccessible area, extended modeling algorithm which removes the GCP(Ground Control Point) most errorneous from the GCPs extracted from map iteratively is proposed According to the experiments using a collinearity equation, the second order polynomials are shown to be optimal for ω (pitch) and Z_s parameters while the first order ones for κ (yaw), ϕ (roll), X_s , and Y_s parameters.

The input images used in this paper are 6000×6000 level 1A panchromatic digital SPOT images of Chungchong-do, Korea. With 30 GCPs, experiments on SPOT images show that the planimetric and altimetric RMS errors are 7.11m and 7.10m, respectively, for test points.

1. 서론

*正會員, 西江大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Sogang Univ.)
接受日字: 1992年 9月 28日

인공위성에 의한 원격탐사활동으로는 지도제작을 위한 사진 촬영, 자원 탐사, 기상 관측등으로부터 군사적인 목적의 관측에 이르기까지 다양하다. 1950년

대 후반에 반자동식 방공시스템 (Semi-Automatic Ground Environment)을 구축하면서 컴퓨터로 처리할 수 있는 수치화된 지도가 제작된 후 인공위성영상과 컴퓨터를 이용하여 평균해수면으로부터 지표면까지의 높이 정보를 갖는 2차원 배열의 형태를 가진 수치지형표고 모델 (DEM: Digital Elevation Model)의 제작 연구가 진행되어 왔다.^[1] 제작된 DEM은 도시계획, 도로건설, 수해지역 예측등의 여러분야에서 활용되고 있다. 특히 군사적으로는 비행체의 항법장치나 조종사의 모의훈련장치등에 사용되고 있다. 두장의 인공위성영상을 이용한 DEM 제작을 위해서는 세단계의 과정이 있는데 첫번째 단계가 인공위성이 영상을 취득할 당시의 자세 (ω, φ, κ)와 위치 (X_s, Y_s, Z_s)를 나타내는 위성의 외부표정요소를 추정하는 위성의 모델링 단계이고 두번째 단계는 양쪽 영상에서 대응되는 점을 찾는 정합과정이다. 세번째 단계는 위성의 표정요소와 대응점을 찾는 정합과정에서 구한 시차(disparity) 정보를 이용한 표고의 계산과정이다. 이 과정은 두대의 카메라를 이용한 3차원 정보추출 과정과 동일하다.

미국의 LANDSAT (LAND SATellite)위성이 발사되어 인공위성영상이 사용되면서 영상처리 기법을 응용한 방법의 연구가 진행되어 왔으며 Sawada등은 1981년에 LANDSAT 위성영상의 외부표정요소를 추출하기 위하여 공선조각식을 선형화하는 연구를 수행하였으며^[2] Friedmann등은 1983년에 선형변화에 의한 위성의 위치결정방법을 제안하였다.^[3] 1987년에 Konecny등은 해석도화기를 이용한 SPOT (Satellite Probatoire d'Observation de la Terre) 위성영상의 해석이 가능함을 시사한 후^[4] Deren과 Jiayu는 1988년에 SPOT 위성영상의 외부표정요소에 1차 다항식을 적용한 모델링을 수행하였으며^[5] Wu와 Ehlers는 1991년에 SPOT 위성영상의 모델링시 CCT (Computer Compatible Tape)의 보조 데이터를 이용하여 정확도를 향상시켰다.^[6]

Gugan은 SPOT 위성영상의 외부표정요소를 추출한 후 DEM의 제작기법에 관한 연구를 수행하였다.^[7] 이런 기존의 방법들은 모두 지상기준점을 측량하여 정확한 외부표정요소를 추출하는데 촛점을 두고 있다. 본 연구에서도 DEM 제작에 있어 기본이 되는 위성의 자세와 위치를 추정하는 위성의 모델링에 관한 내용을 다루었으며 사용한 위성은 프랑스의 SPOT 위성자료를 사용하여 실험하였으며 실제 측량이 가능한 지역에 대한 기존의 모델링방법을 확장하여 비접근지역에 대해서도 사용이 가능한 모델링 방법을 제안하여 유용성을 확인하였다.

II. SPOT 위성 영상과 지상기준점

SPOT 위성은 고도 832Km의 극궤도에 가까운 태양동주기 (sun synchronous) 궤도상에서 작동하며 2개의 HRV (High Resolution Visible)센서를 탑재하고 있으며 HRV 센서는 6000개의 CCD (Charge Coupled Device)로 구성되어 있다. 반사경의 각도를 $-27^\circ \sim 27^\circ$ 까지 변화시킴으로써 다른 궤도에서 동일지역 관측이 가능하여 수직영상 (nadir viewing image) 뿐만 아니라 사각영상 (off nadir viewing image)도 취득할 수 있어 정밀한 DEM 제작이 가능하다. HRV 센서의 특징을 간단히 요약하면 표 1과 같다. 한장의 SPOT 위성영상은 6000 line으로 이루어져 있고, 한 line은 6000개의 화소로 구성되어 있다. 제공되는 영상자료는 전처리상태에 따라 level 1A, 1B, 1AP, 2A, 2B, S 등으로 구분되며 본 연구에서 사용한 영상은 level 1A 이다. Level 1A 영상은 CCD detector 간에 감도차의 보정과 복사량 보정을 수행한 것이다.^[8, 9] 실험에 사용된 영상은 1987년 11월 29일과 30일에 논산, 공주, 대전을 포함하는 충청도지역을 촬영한 것이다.

지상기준점 (GCP : Ground Control Point)은 영상에서 식별이 가능하고 지상의 좌표를 결정할 수 있는 특징점 또는 지표로서 이상적인 GCP로는 도로의 교차점, 작은 섬, 댐, 활주로와 유도로의 교차점 등이 있으며 본 연구에서는 도로의 교차점을 GCP로 사용하였다.

기존의 GCP는 위성영상과 지상에서 뚜렷이 구분되는 지점을 지상의 위치는 위도, 경도, 고도로 표시하고 위성영상에서의 위치는 sample 및 line 번호로 표시하여 제공되지만 이는 사용자의 별도 요구시에만 제공되므로 대부분의 사용자는 수작업을 통해 GCP를 취득한다.^[10]

본 연구에서 GCP의 지상 좌표결정은 지상측량을 사용한 방법과 지도를 이용한 방법을 사용하였다. 지상측량에 의한 방법은 국가 기준점과 GCP를 연결하는 망을 형성한 후에 각관측기와 광파 거리 측량기를 사용하여 수평위치를 결정하고 삼각수준측량으로 표고를 측정하였다. 지도를 이용한 방법은 1/5,000 지도와 1/25,000 지도를 사용하여 표고는 GCP를 기준으로 가장 가까운 등고선들의 표고를 거리경중을 합수로 보간하여 결정하였다. GCP의 위성영상에서의 좌표결정은 8 방향의 에지연산자를 사용하여 한 화소의 쪽으로 선형특징을 추출한 후 이를 시작점과 끝점, 직선의 방정식으로 구성한 다음, 두직선의 교점을 구하여 sample 및 line 번호를 부영상소 (subpixel) 단위로 표시하였다.^[11]

III. 기존의 SPOT 위성의 모델링

SPOT 영상자료는 1 line 촬영시간이 0.0015초로써 6000 line을 모두 촬영하는데 대략 9초가 소요되며 위성의 위치 (위도, 경도, 고도)와 자세 (roll, pitch, yaw)를 외부표정요소라한다. 항공사진과 달리 SPOT위성의 위치 (Xs, Ys, Zs)와 자세 (ω , ϕ , κ)를 나타내는 외부표정요소는 각 line마다 존재하여 36,000개의 위성의 위치와 자세에 대한 정보를 모두 구하는 것은 쉽지 않으므로 인공위성의 운동이 안정되었다고 가정하여 위성의 위치와 자세를 시간의 함수로 근사화한다.

SPOT 위성의 외부표정요소는 영상을 취득하는 각각의 위치에서 모두 주어지지 않고 영상취득 전후에 1 분간격으로 9점에 대한 정보만이 주어진다. 위성의 위치와 자세를 추정하기 위해 사용하는 기본적인 식이 공선조건식이다. 위성의 중심에서 영상으로의 벡터가 위성의 중심에서 영상에 해당하는 지상점으로의 벡터가 일치한다는 공선조건식은 식(1)과 같이 표현되며 정규화하면 (2)식이다.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = SM^T \begin{bmatrix} X - X_s \\ Y - Y_s \\ Z - Z_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$F_x(t) = x + f \frac{a_{11}(X - X_s) + a_{12}(Y - Y_s) + a_{13}(Z - Z_s)}{a_{31}(X - X_s) + a_{32}(Y - Y_s) + a_{33}(Z - Z_s)} = 0$$

$$F_y(t) = y + f \frac{a_{21}(X - X_s) + a_{22}(Y - Y_s) + a_{23}(Z - Z_s)}{a_{31}(X - X_s) + a_{32}(Y - Y_s) + a_{33}(Z - Z_s)} = 0 \quad (2)$$

(2)식은 비선형 방정식이므로 위성의 자세, 위치등과 같은 외부표정요소를 시간의 다항식으로 표현하면 (3)식이 된다.

$$\begin{aligned} \omega &= \omega_0 + \omega_{pt} + \omega_{pts}t^2 + \omega_{ptt}t^3 + \dots \\ \phi &= \phi_0 + \phi_{pt} + \phi_{pts}t^2 + \phi_{ptt}t^3 + \dots \\ \kappa &= \kappa_0 + \kappa_{pt} + \kappa_{pts}t^2 + \kappa_{ptt}t^3 + \dots \\ X_s &= X_{s0} + X_{spt}t + X_{spts}t^2 + X_{sptt}t^3 + \dots \\ Y_s &= Y_{s0} + Y_{spt}t + Y_{spts}t^2 + Y_{sptt}t^3 + \dots \\ Z_s &= Z_{s0} + Z_{spt}t + Z_{spts}t^2 + Z_{sptt}t^3 + \dots \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 pt는 시간에 대한 1차변화율, pts는 시간에 대한 2차변화율, ptt는 시간에대한 3차변화율을 의미하며 (2)식을 Newton의 1차 근사식으로 선형화하여 2차이상을 무시하면 식(4), (5)가 된다.^{12, 13}

Vx, Vy는 영상좌표 관측시의 오차이고 $F^u x = Fx(\omega^u, \omega^p, \omega^r, \dots, X^u, X^p, X^r, Y^u, Y^p, Y^r, Z^u, Z^p, Z^r)$ 이고 $F^u y = Fy(\omega^u, \omega^p, \omega^r, \dots, X^u, X^p, X^r, Y^u, Y^p, Y^r, Z^u, Z^p, Z^r)$ 이며 이는 공선조건식에

각 근사값을 대입한 값이다. d 항들은 각각의 근사값에 대한 보정량이며 ω^u, \dots, Z^u 는 근사값이며 $d\omega, \dots, dZ$ 는 보정량을 나타낸다. 이로부터 (4), (5)식을 간단히 표현하면 (6), (7)식이 된다.

$$\begin{aligned} V_x + \left[\frac{\partial F_x}{\partial \omega_0} \right]^u d\omega_0 + \left[\frac{\partial F_x}{\partial \omega_{pt}} \right]^u d\omega_{pt} + \dots + \left[\frac{\partial F_x}{\partial \phi_0} \right]^u d\phi_0 + \left[\frac{\partial F_x}{\partial \phi_{pt}} \right]^u d\phi_{pt} + \\ \dots + \left[\frac{\partial F_x}{\partial \kappa_0} \right]^u d\kappa_0 + \left[\frac{\partial F_x}{\partial \kappa_{pt}} \right]^u d\kappa_{pt} + \dots + \left[\frac{\partial F_x}{\partial X_{s0}} \right]^u dX_{s0} + \left[\frac{\partial F_x}{\partial X_{spt}} \right]^u dX_{spt} + \\ \dots + \left[\frac{\partial F_x}{\partial Y_{s0}} \right]^u dY_{s0} + \left[\frac{\partial F_x}{\partial Y_{spt}} \right]^u dY_{spt} + \dots + \left[\frac{\partial F_x}{\partial Z_{s0}} \right]^u dZ_{s0} + \dots + \left[\frac{\partial F_x}{\partial X} \right]^u dX \\ + \left[\frac{\partial F_x}{\partial Y} \right]^u dY + \left[\frac{\partial F_x}{\partial Z} \right]^u dZ + F_x^u = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} V_y + \left[\frac{\partial F_y}{\partial \omega_0} \right]^u d\omega_0 + \left[\frac{\partial F_y}{\partial \omega_{pt}} \right]^u d\omega_{pt} + \dots + \left[\frac{\partial F_y}{\partial \phi_0} \right]^u d\phi_0 + \left[\frac{\partial F_y}{\partial \phi_{pt}} \right]^u d\phi_{pt} + \\ \dots + \left[\frac{\partial F_y}{\partial \kappa_0} \right]^u d\kappa_0 + \left[\frac{\partial F_y}{\partial \kappa_{pt}} \right]^u d\kappa_{pt} + \dots + \left[\frac{\partial F_y}{\partial X_{s0}} \right]^u dX_{s0} + \left[\frac{\partial F_y}{\partial X_{spt}} \right]^u dX_{spt} + \\ \dots + \left[\frac{\partial F_y}{\partial Y_{s0}} \right]^u dY_{s0} + \left[\frac{\partial F_y}{\partial Y_{spt}} \right]^u dY_{spt} + \dots + \left[\frac{\partial F_y}{\partial Z_{s0}} \right]^u dZ_{s0} + \dots + \left[\frac{\partial F_y}{\partial X} \right]^u dX \\ \dots + \left[\frac{\partial F_y}{\partial Y} \right]^u dY + \left[\frac{\partial F_y}{\partial Z} \right]^u dZ + F_y^u = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} V_x + b_{11}d\omega_0 + b_{12}d\phi_0 + b_{13}d\kappa_0 + b_{14}dX_{s0} + b_{15}dY_{s0} + b_{16}dZ_{s0} \\ + b_{17}d\omega_{pt} + b_{18}d\phi_{pt} + b_{19}d\kappa_{pt} + b_{20}dX_{spt} + b_{21}dY_{spt} + b_{22}dZ_{spt} \\ + b_{23}d\omega_{pts} + b_{24}d\phi_{pts} + b_{25}d\kappa_{pts} + b_{26}dX_{spts} + b_{27}dY_{spts} + b_{28}dZ_{spts} \\ + b_{29}d\omega_{ptt} + b_{30}d\phi_{ptt} + b_{31}d\kappa_{ptt} + b_{32}dX_{sptt} + b_{33}dY_{sptt} + b_{34}dZ_{sptt} + F_x^u = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} V_y + b_{35}d\omega_0 + b_{36}d\phi_0 + b_{37}d\kappa_0 + b_{38}dX_{s0} + b_{39}dY_{s0} + b_{40}dZ_{s0} \\ + b_{41}d\omega_{pt} + b_{42}d\phi_{pt} + b_{43}d\kappa_{pt} + b_{44}dX_{spt} + b_{45}dY_{spt} + b_{46}dZ_{spt} \\ + b_{47}d\omega_{pts} + b_{48}d\phi_{pts} + b_{49}d\kappa_{pts} + b_{50}dX_{spts} + b_{51}dY_{spts} + b_{52}dZ_{spts} \\ + b_{53}d\omega_{ptt} + b_{54}d\phi_{ptt} + b_{55}d\kappa_{ptt} + b_{56}dX_{sptt} + b_{57}dY_{sptt} + b_{58}dZ_{sptt} + F_y^u = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $b_{11} \sim b_{26}$ 는 공선조건식을 각각의 외부표정요소 및 지상기준점 좌표로 편미분하여 근사값들을 대입한 값이다.

$$U = a_{11}(X - X_s) + a_{12}(Y - Y_s) + a_{13}(Z - Z_s)$$

$$V = a_{21}(X - X_s) + a_{22}(Y - Y_s) + a_{23}(Z - Z_s)$$

$W = a_{31}(X - X_s) + a_{32}(Y - Y_s) + a_{33}(Z - Z_s)$ 로 하면 공선조건식은 $F_x = x + f \frac{U}{W}$, $F_y = y + f \frac{V}{W}$ 로 간단히 표현된다.

또한 $A = \frac{f}{W}$, $B = \frac{U}{W}$, $f = \frac{V}{W}$ 로 놓으면,

$$b_{11} = A[a_{12}(Z - Z_s) - a_{13}(Y - Y_s) - B(a_{32}(Z - Z_s) - a_{33}(Y - Y_s))]$$

$$b_{12} = A[-W \cos \kappa_s - B(U \cos \kappa_s - V \sin \kappa_s)], \quad b_{13} = AV, \quad b_{14} = A[-a_{11} + Ba_{31}]$$

$$b_{15} = A[-a_{12} + Ba_{32}], \quad b_{16} = A[-a_{13} + Ba_{33}]$$

$$b_{21} = A[a_{22}(Z - Z_s) - a_{23}(Y - Y_s) - B(a_{32}(Z - Z_s) - a_{33}(Y - Y_s))]$$

$$b_{22} = A[-W \sin \kappa_s - C(U \cos \kappa_s - V \sin \kappa_s)], \quad b_{23} = -AU, \quad b_{24} = A[-a_{21} + Ba_{31}]$$

$b_{25} = A[-a_{21} + Ba_{32}]$, $b_{26} = A[-a_{21} + Ba_{33}]$ 가 된다. 또한 (6), (7)식을 행렬의 식으로 나타내면 (8)식이 된다.

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\omega_1 \\ \vdots \\ dk_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{14} & \dots & b_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{24} & \dots & b_{26} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x^0 \\ F_y^0 \\ F_z^0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

(8)식을 간략하게 표현하면 (9)식으로 표현이 가능하며 이를 관측 방정식이라 한다.

$$V_1 + B_1 d_1 + B_2 d_2 = C_1 \quad (9)$$

여기서 m 은 GCP 갯수, p 는 외부표정요소 갯수, $V_1(2m \times 1)$ 은 영상좌표 관측시의 오차벡터, $B_1(2m \times p)$ 는 외부표정요소에 대한 편미분 계수행렬, $B_2(2m \times 3m)$ 는 지상좌표에 대한 편미분 계수행렬, $d_1(p \times 1)$ 은 외부표정요소의 근사값에 대한 보정량 벡터, $d_2(3m \times 1)$ 은 지상좌표의 근사값에 대한 보정량 벡터, $C_1(2m \times 1)$ 은 영상좌표의 계산값과 관측값과 계산값 차이 벡터이다.

IV. 제한한 SPOT 위성의 모델링

기존의 연구에서는 사용된 GCP가 정확하다는 가정은 전제로 SPOT 위성과 지상물체의 수학적인 관계를 나타내었지만 본 연구에서는 오차가 포함된 GCP를 사용할 수 있는 SPOT위성의 모델링에 대한 연구를 수행하였다.

우리나라의 측지 및 지도좌표계는 Bessel 타원체를 준거타원체로한 좌표계계를 사용하고 있으며 SPOT 위성은 GRS 80 (Geodetic Reference System 80) 좌표계를 사용하고 있으므로 본 연구에서는 두좌표계를 대상영역에 접한 local space rectangular 좌표계로 변환하였다. Local space rectangular 좌표계에 사용된 z 축은 대상영역의 원점을 지나고, 타원체에 수직으로 밖으로 향하는 축이며 x 축은 z 축과 90도를 이루면서 경도가 감소하는 방향의 축, y 축은 x , z 축에 수직이고 위도가 감소하는 방향의 축으로 정의된다.^{[13][15]}

측량을 실시한 GCP의 지상좌표는 정확도가 좋은 반면 GCP를 취득하기위해 많은 비용과 시간이 소모되는 단점은 있으나 정확하고 적은 수의 GCP를 사용하기 위해서 기존의 모델링 방법은 대부분 측량한 GCP를 사용하고 있다.^[15] 그러나 모든 지역에서 항상 측량을 통해 GCP를 획득할 수 있는 것은 아니며 특히 비접근지역에서는 측량이 불가능한 실정이다. 지도에서 추출한 GCP의 지상좌표는 오차가 포함되는 단점이 있는 반면 취득에 소요되는 시간과 비용이

적은 장점이 있다. 기존의 방법을 사용하고 지도에서 추출한 GCP를 사용하여 모델링한 결과를 측량을 수행한 검사점 30개를 검사한 결과 40.17m의 평면오차와 20.06 m의 표고오차가 발생하였다.^[12]

본 연구에서는 비접근 지역이나 측량 불가능 지역의 모델링을 위해 지도에서 추출한 GCP를 모델링 도중에 검사하여 임계치이상의 오차가 포함된 GCP를 제거하고 남은 GCP를 사용하여 모델링을 재수행한 다음 다시 GCP의 오차를 검사하여 임계치 이상의 GCP는 제거하는 반복법을 사용하여 최소의 오차를 갖는 GCP만을 사용하여 최종의 모델링을 수행하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법의 유용성 확인을 위해 측량한 GCP를 사용한 위성의 외부표정요소와 지도에서 추출한 GCP를 사용한 위성의 외부표정요소들을 검사점을 사용하여 두결과를 비교하였다.

외부표정요소의 관측방정식은 (10)식과 같다.

$$V_2 - d_1 = C_2 \quad (10)$$

여기서 $V_2(p \times 1)$ 은 외부표정요소의 오차벡터, $d_1(p \times 1)$ 은 외부표정요소에 대한 보정량 벡터, $C_2(p \times 1)$ 은 외부표정요소의 근사값과 관측값 차이벡터이다. 지상좌표의 관측방정식은 (11)식과 같다.

$$V_3 - d_2 = C_3 \quad (11)$$

여기서 $V_3(3m \times 1)$ 은 지상좌표의 오차벡터, $d_2(3m \times 1)$ 은 지상좌표에 대한 보정량 벡터, $C_3(3m \times 1)$ 은 지상좌표의 근사값과 관측값 차이벡터이다.

식 (9), (10), (11)의 관측방정식을 동시에 고려하면 식 (12)가 된다.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 & B_2 \\ -I & 0 \\ 0 & -I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

(12)식을 간단히 나타내면 식 (13)이 된다.

$$V + Bd = C \quad (13)$$

(13)식에 최소자승법을 적용하면 least square principle에 의해

$$Q = \sum_{i=1}^m \left(\frac{V_i}{\sigma_i} \right)^2 = V^T W V$$

가 되며,

$$W = \begin{bmatrix} \omega_1 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_2 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_3 \end{bmatrix}$$

가 된다. 여기서 각각의 관측값들은 uncorrelated되어 있고 weight matrix의 offdiagonal 값은 0이 된다. 그러므로 $V=C-Bd$ 가 되며 Q 를 구하면 (14)식이 된다

$$Q=(C-Bd)^T W(C-Bd)=d^T B^T W B d-d^T B^T W C -C^T W B d+C^T W C \quad (14)$$

Q 를 최소화하는 d 를 찾는 문제가 되며 이를 위해 $\frac{\partial Q}{\partial d}=0$ 을 풀면 (15)식이 된다.

$$\frac{\partial Q}{\partial d} = 2B^T W B d - 2B^T W C \quad (15)$$

$\therefore (B^T W B)d=B^T W C$ 가 된다. 여기서 $N=B^T W B$, $K=B^T W C$ 로 하면 $Nd=K$ 가 되어 (16)식이 된다.

$$d=N^{-1}K \quad (16)$$

여기에서

$N = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 \\ N_2^T & N_3 \end{bmatrix}$, $d = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix}$, $K = \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix}$ 가 된다. N_1 은 $(pn \times pn)$ 으로 $B_1^T W_1 B_1 + W_2$ 가 되며 N_2 는 $(pn \times 3m)$ 으로 $B_1^T W_1 B_2$ 가 되며 N_3 는 $(3m \times 3m)$ 으로 $B_2^T W_1 B_2 + W_3$ 가 된다. K_1 은 $(pn \times 1)$ 으로 $B_1^T W_1 C_1 - W_2 C_2$ 가 되며 K_2 는 $(3m \times 1)$ 으로 $B_2^T W_1 C_1 - W_3 C_3$ 가 된다. 또한 W_1 은 $(2m \times 2m)$ 으로 영상좌표에 대한 경중률행렬, W_2 는 $(pn \times pn)$ 으로 외부표정요소에 대한 경중률행렬, W_3 는 $(3m \times m)$ 으로 지상좌표에 대한 경중률행렬이다.

(16)식에서 외부표정요소의 보정량벡터 d_1 에 대해 정리하면 식 (17)이 되며 GCP에 대한 보정량벡터 d_2 에 대하여 정리하면 식 (18)이 된다.

$$d_1 = (N_1 - N_2 N_3^{-1} N_2^T)^{-1} (C_1 - N_2 N_3^{-1} C_2) \quad (17)$$

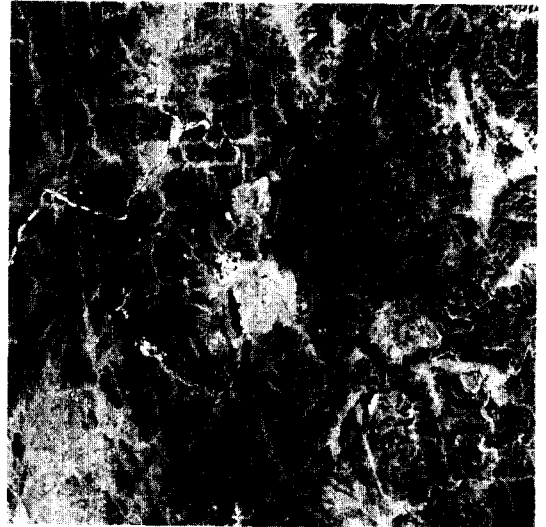
$$d_2 = (N_2 + W_3)^{-1} (K_2 - W_3 C_3 - N_3^T d_1) \quad (18)$$

d_1 과 d_2 는 공선조건식을 선형화하여 실제값에 접근하기 위한 보정량으로 외부표정요소와 GCP의 참값에 접근하기 위한 보정량이므로 일련의 계산이 끝나면 계산된 근사값에 보정량을 더하여 반복계산을 수행하며 보정량이 무시할 수 있는 작은 값일 때 반복계산을 중단 하였다. 모델링의 수렴상태 검사를 위해 오차의 평균제곱오차를 이용하였다. 이 방법은 오차의 제곱의 합을 검사점의 수로 나누어 정규화하여 모델링의 수렴을 평가하는 방법으로 계산방법은 (19)식과 같으며 값이 임계값보다 작으면 수렴한 것으로 하는 방법이다.

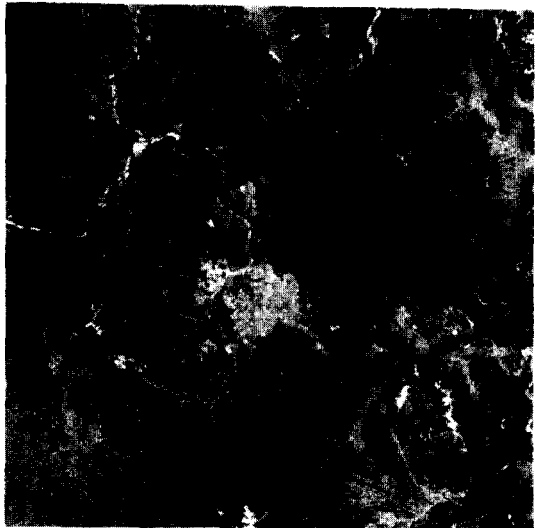
$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^{nc} R_i^2}{nc} \quad (19)$$

여기서 nc 는 검사점의 수이며 R_i 는 i 번째 검사점에서의 오차 (residual)이다.

V. 실험 결과 및 토의



(a)



(b)

그림 1. SPOT 위성 영상

(a) 좌측영상 (b) 우측영상

Fig. 1. SPOT satellite images.

(a) Left image. (b) Right image.

실험에 사용한 좌우측 SPOT 위성영상이 그림 1이며 모델링의 검사를 위해 30점을 지상좌표는 측량을 수행하고 영상좌표는 선형특징을 이용한 방법을 사용한 것의 일부가 표 2이다. 모델링의 수행을 위해 지상좌표는 지도로부터 추출하고 영상좌표는 GCP와 동일한 방법을 사용한 150점의 일부가 표 3이다.

표 1. 센서의 특징

Table 1. Sensor characteristics.

| 구분 | Multispectral mode | Panchromatic mode |
|-----------|---|-------------------|
| 파장대 | green (0.50 - 0.59 μm) red (0.61 - 0.68 μm) nearinfrared (0.79 - 0.89 μm) | 0.51 - 0.73 μm |
| 해상도 | 20m × 20m | 10m × 10m |
| 시야각 | 4.13° | 4.13° |
| line당 화소수 | 3,000 | 6,000 |

표 2. 지상 기준점 I

Table 2. Ground control points I.

| 구분 | 위도 | 경도 | 고도 (m) | 좌측 영상 | | 우측 영상 | |
|-----|-----------------|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | | | line | pixel | line | pixel |
| 001 | 36° 15' 16" 274 | 127° 18' 06" 537 | 80.96 | 4394.0 | 2197.0 | 4334.0 | 2352.0 |
| 002 | 36° 04' 38" 302 | 127° 40' 26" 479 | 149.91 | 5658.2 | 5913.2 | 5805.4 | 5408.0 |
| 003 | 36° 28' 23" 621 | 127° 40' 26" 968 | 212.04 | 1344.0 | 4811.0 | 1429.9 | 4647.2 |
| 004 | 36° 11' 10" 494 | 127° 02' 30" 295 | 5.36 | 5591.0 | 115.0 | 5417.2 | 629.0 |
| 005 | 36° 39' 00" 588 | 127° 11' 05" 555 | 80.79 | 299.5 | 89.3 | 121.6 | 815.8 |

표 3. 지상 기준점 II

Table 3. Ground control points II.

| 구분 | 위도 | 경도 | 고도 (m) | 좌측 영상 | | 우측 영상 | |
|-----|-----------------|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | | | line | pixel | line | pixel |
| 001 | 36° 35' 02" 252 | 127° 41' 18" 020 | 43.00 | 3165.4 | 2862.6 | 3141.1 | 2950.3 |
| 002 | 36° 06' 58" 619 | 127° 66' 08" 370 | 185.00 | 5811.3 | 5807.2 | 5952.5 | 5309.3 |
| 003 | 36° 17' 23" 600 | 127° 06' 19" 167 | 7.00 | 5712.8 | 303.4 | 5549.3 | 773.7 |
| 004 | 36° 59' 53" 912 | 127° 22' 75" 891 | 60.00 | 825.5 | 586.0 | 675.7 | 1193.3 |
| 005 | 36° 57' 12" 714 | 127° 76' 95" 434 | 270.00 | 128.6 | 5338.5 | 244.5 | 5144.1 |

기존의 연구와 제안한 방법을 비교해보면 기존의 연구 [6, 6, 17]에 사용되는 GCP는 모두 측량을 수행하여 획득한 것이며 본 연구에 사용되는 GCP는 지도에서 취득한 것이다. 또한 기존의 방법은 측량한 GCP를 모두 사용하는 방법이며 제안한 방법은 오차가 큰 GCP는 제거하여 사용하는 방법이다.

SPOT 위성의 자세와 위치의 parameter 추정 알고리즘의 평가를 위해 6000×6000 전체영상에서 고루 분포한 55점의 GCP를 사용하여 위성의 위치와 자세의 연관성을 고려하여 ω, φ, κ, Xs, Ys, Zs의 차수를 2, 1, 1, 1, 1, 2 차로 한 결과와 부영상

으로 나누어서 실험한 결과를 부록 1에 실었다.

표 4. 결과 비교

Table 4. Comparison results.

| 구분 | 범위 오차 (m) | | 고도 오차 (m) | GCP 제거개수 | GCP 최종개수 |
|-------|-----------|-------|-----------|----------|----------|
| | 수평 방향 | 수직 방향 | | | |
| 부영상 1 | 10.07 | 10.69 | 10.25 | 30 | 14 |
| 부영상 2 | 12.49 | 12.07 | 12.16 | 30 | 13 |
| 부영상 3 | 12.55 | 13.05 | 12.29 | 30 | 12 |
| 부영상 4 | 11.11 | 11.52 | 10.38 | 30 | 11 |
| 부영상 5 | 10.02 | 10.13 | 9.65 | 30 | 15 |
| 평균 | 11.25 | 11.50 | 10.99 | 30 | 13 |

본 연구에서 사용된 알고리즘의 성능평가를 위하여 제안한 알고리즘을 각기 다른 지역을 촬영한 여러장의 위성영상에 적용하여 평가를 수행하는 것이 바람직하지만 여러장의 SPOT 위성영상의 구입이 어려운 한장의 전체영상을 1200×6000, 5장의 부영상으로 서로 겹치는 부분이 없도록 나누어 제안한 알고리즘을 평가하였다. 즉 1 line부터 1200 line까지를 부영상 1, 1201 line부터 2400 line까지를 부영상 2, 2401 line부터 3600 line까지를 부영상 3, 3601 line부터 4800 line까지를 부영상 4, 4801 line부터 6000 line까지를 부영상 5로 나누었다. 여기에서 사용된 GCP가 그림 2이며 각각의 영상에 30점씩 사용하였다.

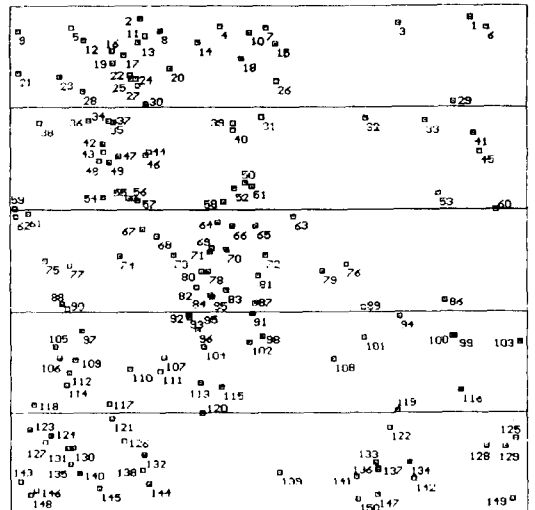


그림 2. 부 영상들

Fig. 2. Subimages.

제안한 알고리즘을 수행하는 동안 오차가 많은 점

은 제거되고 최종적으로 사용된 점을 분석해보면 부영상 1에서는 16점이 제거되고 14점이 사용되었으며, 부영상 2에서는 18점이 제거되고 12점이 사용되었으며, 부영상 3에서는 18점이 제거되고 12점이 사용되었으며, 부영상 4에서는 17점이 제거되고 13점이 사용되었으며, 부영상 5에서는 16점이 제거되고 14점이 사용되어 평균적으로 13점이 사용되었다. 최종적으로 사용된 점들의 분포를 그림 3에 나타냈다.

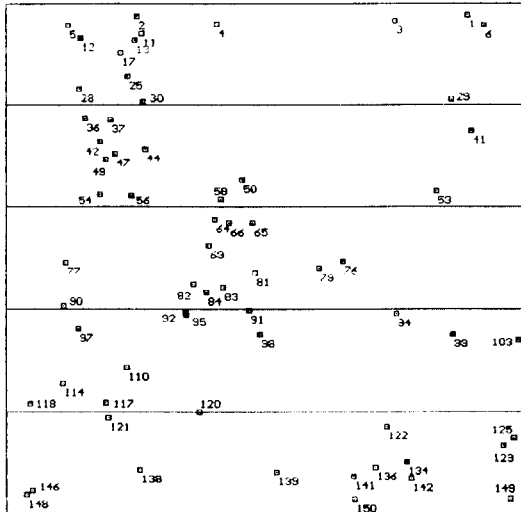


그림 3. 사용된 GCP
Fig. 3. Used GCPs.

알고리즘의 평가를 위해 측량한 30개의 점을 각각 6점씩 나누어 해당되는 지역을 평가하는데 사용하였으며 이의 분포를 그림 4에 표현하였다. 각각의 검사점을 사용하여 평가 결과를 표 4에 요약하였으며 이를 분석하면 수평방향의 평균오차는 11.25m, 수직방향의 평균오차는 11.50m, 고도오차의 평균은 10.99m가 되었다. 오차 분석을 위하여 각각의 부영상에서 사용된 GCP 중에서 오차가 많은 점을 차례로 제거하고 최종으로 사용된 점들을 각각의 부영상 중심 화소에서 떨어진 거리를 조사하여 보았다. 부영상 1은 1795.4 화소, 부영상 2는 1653.4 화소, 부영상 3은 927.0 화소, 부영상 4는 1657.0 화소였으며 부영상 5는 1824.2 화소 이었다. 최종 사용된 GCP들이 중심점에서의 평균거리가 클수록 즉 GCP가 전체의 영상에 골고루 퍼져 있으면 오차가 작으며 최종 사용된 GCP의 평균거리가 작을수록 오차가 크게 발생하였다. 수평방향과 수직방향의 오차는 어느 한쪽방향으로 치우치는 경향을 띠지 않았으나 평면오차도 고도의 오차와 같이 사용된 GCP들이 중앙에서 떨어진

거리에 영향을 받는 경향을 보였다. 오차가 많은 GCP를 제거하고 최종적으로 사용된 GCP의 갯수는 부영상 5가 가장 많은 15개였으며 부영상 4가 가장 적은 11개였다. 그러나 고도오차를 비교해보면 12개를 최종으로 사용한 부영상 3에서 가장 컸다. 그러므로 최종으로 사용된 GCP의 갯수는 GCP의 평균거리에 비해 모델링 오차에 미치는 영향이 작았다.

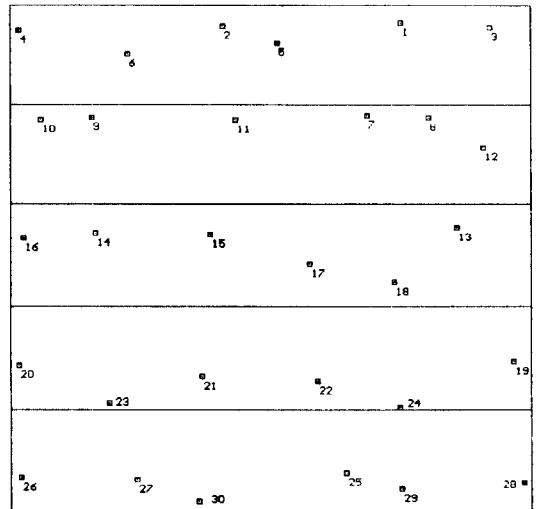


그림 4. 검사점
Fig. 4. Test points.

사용된 영상의 크기에따라 알고리즘의 효과를 측정하기위하여 부영상1, 부영상2, 부영상3을 부영상A로 가정하고 부영상3, 부영상4, 부영상5를 부영상B로 가정하여 위에서 행한 실험을 동일하게 수행한 결과 부영상A 에서는 부영상1, 2, 3에서 제거되었던 GCP를 포함하여 오차가 포함된 GCP가 제거되었으며 최종으로 36개가 사용되어 영상중심에서 평균적으로 1384.6 화소가 떨어져 있었으며 18개의 측량을 수행한 검사점을 사용하여 평가한 결과 수평방향의 오차는 11.36m 이며 수직방향의 오차는 12.25m, 고도오차는 12.28m를 나타냈다. 부영상B의 실험결과는 최종사용된 GCP의 거리는 1834.6 화소, 최종 사용된 GCP는 32개, 해당되는 영역의 검사점을 사용한 결과 수평방향의 오차 13.4m, 수직방향의 오차 14.2m, 고도오차 12.7m로 부영상A와 비슷한 결과를 나타냈다. 이는 1200화소를 단위로한 부영상들의 결과와 비슷한 수준의 결과이다. 또한 실험에 사용된 GCP중에서 알고리즘의 수행동안에 제거되는 GCP들의 경향을 조사하여 본 결과 부영상 1, 2, 4에서는

주로 산악에서 추출한 고도가 높은 GCP가 많이 제거되었으며 부영상 3, 5에서는 도심지에서 추출한 고도가 낮은 GCP가 많이 제거되어 전체의 알고리즘을 수행하동안에 제거되는 GCP들이 특별히 고도의 높낮이에 의존하지 않는다는 것을 알 수 있었다.

본 연구의 오차는 기존의 측량된 GCP를 사용한 기존의 연구결과^{5, 6, 16}와 비슷한 정확도를 나타냈다. 측량을 수행하지 않고 지도에서 추출한 GCP를 사용하는 제한한 방법이 측량한 GCP 전체를 사용하는 기존의 연구결과와 비슷한 수준을 이루었으므로 측량이 불가능하거나 비접근지역에 대한 SPOT 위성의 외부 표정요소를 측량이 가능한 지역과 비슷한 수준으로 구할 수 있게 되었다.

VI. 결론

본 연구는 두장의 SPOT 위성자료를 사용하여 DEM 제작을 위한 첫번째 단계인 인공위성이 영상을 취득할 당시의 자세와 위치를 추정하는 위성의 모델링에 관한 연구이다. 지도와 선형특징을 이용한 GCP를 사용하여 위성의 위치와 자세를 시간의 함수로 유도하였다.

본 연구에서 유도한 모델링 방법은 과대오차를 포함한 GCP를 차례로 제거하는 반복법을 사용한 결과 측량 불가능한 지역이나 비접근 지역에 대한 SPOT 위성의 모델링으로 사용이 가능한 것으로 평가되었으며 이 결과를 사용하면 비접근 지역의 DEM 제작이 가능하다. 또한 최종결과의 오차는 사용된 GCP의 퍼짐 정도에 영향을 받는 것으로 나타났다.

앞으로 SPOT 위성의 외부 표정요소를 이용하여 실제의 DEM을 제작하는 연구가 추후에 진행되어야 할 과제이다.

參 考 文 獻

- [1] T. W. Gossard, "Applications of DTM in the forest service." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 44, no. 12, pp. 1577-1586, Dec. 1978.
- [2] N. Sawada, M. Kidode, H. Shinoda, H. Asada, M. Iwanaga, S. Watanabe, and K.-I. Mori, "An analytic correction method for satellite MSS geometric distortions." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 47, no. 8, pp. 1195-1203, Aug. 1981.
- [3] D. E. Friedmann, J. P. Friedel, K. L. Magnussen, R. Kwok, and S. Richardson, "Multiple scene precision rectification of spaceborne imagery with very few ground control points." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 49, no. 12, pp. 1657-1667, Dec. 1983.
- [4] G. Konecny, P. Lohmann, H. Engel, and E. Kruck, "Evaluation of SPOT imagery on analytical photogrammetric instruments." *ZEISS Report*, Sept. 1987.
- [5] L. Deren and C. Jiayu, "Bundle adjustment for SPOT imagery." *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 27, part B3, pp. 1-11, 1988.
- [6] C. H. Wu, and M. Ehlers, "The use of SPOT on board data in bundle adjustment", 1991 American Congress on Surveying and Mapping-American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Annual Convention, vol. 3, pp. 407-411, 1991.
- [7] D. J. Gagan, "Practical aspects of topographic mapping from SPOT imagery." *Photogrammetric Record*, vol. 12, no. 69, pp. 349-355, 1987.
- [8] CNES, SPOT Reference Manual, *SPOT Image Corporation*, 1987.
- [9] CNES, SPOT User's Handbook, *SPOT Image Corporation*, 1987.
- [10] T. M. Lillesand and R. W. Kiefer, *Remote Sensing and Image Interpretation*, Seconded., *John Wiley & Sons Inc.*, New York, 1987.
- [11] 김 정기, 강 치우, 이 쾌희, 박 래홍, "위성 영상의 선형특징 추출에 관한 연구," 1989년도 화 상처리및 영상통신 학술대회 논문지, pp. 113-118, 1989.
- [12] T.-Y. Kim, C.-W. Kang, and K.-H. Lee, "A Study on the geometric modeling and correction of satellite imagery." *KITE Journal of Electronics Eng.*, vol. 1, no. 2, pp. 72-78, Dec. 1990.
- [13] S. K. Ghosh, *Analytical Photogram-*

metry, Pergamon Press, 1979.

[14] C. C. Slama, Ed., Manual of Photogrammetry, American Society of Photogrammetry, Forth ed., Fall Church, 1980.

[15] P. R. Wolf, Elements of Photogrammetry, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., 1974.

[16] 김 정기, 엄 기문, 이 쾌희, 박 래홍, "GCP 측량 불가능 지역의 SPOT 위성 모델링에 관한 연구," 1992년도 제 5 회 신호처리 합동학술대

회 논문지, vol. 5, no. 1, pp. 226-231, 1992년 9월.

[17] I. J. Dowman, D. J. Gagan, J. P. Muller, and G. Peacegood, The Use of SPOT Data for Mapping and DEM Production, Dept. of Mapping and Surveying, University College London, London, UK, 1988.

[18] 국방과학 연구소, 지역측지계와 세계측지계의 변환, MSRD-408-90280, 국방과학 연구소 연구 보고서, 1990.

부록 1. 외부표정요소 실험결과

1. 위성의 자세 parameter : 2차, 1차, 상수항의 순서임

위성의 위치 parameter : 2차, 1차, 상수항의 순서임

| 좌측 영상 | 우측 영상 |
|---|--|
| (전체영상) | |
| ω : -4.36321×10^{-6} -0.01746 1.91646 | -5.02010×10^{-6} -0.14435 -3.15718 |
| φ : | 0.01821 5.36621 0.00105 -25.97830 |
| κ : | -0.00061 -11.42898 -0.00428 -9.14224 |
| (부영상 1) | |
| ω : | -3.84510×10^{-6} 0.09885 2.02638 -4.31236×10^{-6} -0.16214 -3.20952 |
| φ : | 0.02570 5.56131 0.01701 -25.71471 |
| κ : | -0.00104 -11.64807 0.00133 -9.34666 |
| (부영상 2) | |
| ω : | 2.10084×10^{-6} -0.0067 8 1.96644 -3.23711×10^{-6} -0.04761 -3.22796 |
| φ : | 0.02656 5.59543 0.04800 -25.73268 |
| κ : | -0.00351 -11.58395 -0.00029 -9.30638 |
| (부영상 3) | |
| ω : | -3.54924×10^{-6} -0.05401 1.86925 -5.03348×10^{-6} -0.15304 -3.16779 |
| φ : | 0.05342 5.20906 0.03592 -26.14381 |
| κ : | -0.00537 -11.27094 -0.00852 -8.97540 |
| (부영상 4) | |
| ω : | -4.13810×10^{-6} 0.00134 1.94313 -6.48510×10^{-6} -0.08397 -3.22789 |
| φ : | 0.04561 5.48280 0.02864 -25.85906 |
| κ : | 0.00552 11.47674 -0.00995 -9.18287 |
| (부영상 5) | |
| ω : | -2.53138×10^{-6} -0.03747 1.87838 -4.7338×10^{-6} -0.03422 -3.13454 |
| φ : | 0.03017 5.14118 0.0103 -26.19059 |
| κ : | -0.00223 -11.22417 -0.0039 -8.93744 |

| 좌측 영상 | 우측 영상 |
|----------------|---|
| (전체영상) | |
| Xs | 1931.91463 76428.57749 1455.72666 -399226.09722 |
| Ys | 8975.21563 -27427.81326 8543.87382 45130.45953 |
| Zs | -9.64228 51.73518 827566.68410 -6.33825 -323.16270 816858.30901 |
| (부영상 1) | |
| Xs | 2056.80397 103661.37116 1659.36031 -369440.24291 |
| Ys | 7878.81402 -33998.04749 8822.50298 42143.63132 |
| Zs | -5.88481 -6.67373 827106.81737 -6.46942 -136.87386 818727.95540 |
| (부영상 2) | |
| Xs | 2058.39978 108772.88741 1945.00922 -367451.77564 |
| Ys | 6554.33893 34032.92327 7202.14681 42099.95931 |
| Zs | -5.80408 -127.71158 826866.67631 -4.45961 -191.35526 817905.06862 |
| (부영상 3) | |
| Xs | 2411.69993 52064.20198 1830.36852 -424223.81642 |
| Ys | 7247.49879 -22365.10978 8699.94324 48428.24447 |
| Zs | -4.47893 -143.94147 827687.77506 -6.58394 -131.98492 815918.15913 |
| (부영상 4) | |
| Xs | 2320.77583 86634.75900 1739.54075 -389442.94804 |
| Ys | 6441.82862 -29529.50287 7710.06781 45015.72818 |
| Zs | -5.00462 -150.56531 827203.94853 -4.40548 -149.41556 817692.39079 |
| (부영상 5) | |
| Xs | 2208.9331 48053.54106 1471.3581 428954.56515 |
| Ys | 7003.9603 -21917.22796 6992.0140 48496.82462 |
| Zs | -4.2744 81.03929 827752.25835 -4.2746 -125.39853 815473.37565 |

著 者 紹 介



金正基(正會員)

1958年 2月 12日生, 1981年 공군사관학교 졸업 1990年 서강대학교 대학원 전자공학과 석사학위 취득, 1990年~ 현재 서강대학교 대학원 전자공학과 박사과정, 주관심분야는 영상신호처리,

Remote Sensing, 정보융합 등임.



李 夫 熙(正會員)

1948年 8月 22日生, 1971年서울대 전기과 졸업, 1975~1977年울산공대 전기공학과 전임강사, 1977~1978年 동국대 전기공학과 전임강사 1983年 미국 Univ. of Southern California 전기공학과 졸업(공학 박사), 1983年~ 현재 서강대학교 이

공대학 전자공학과 교수.