

비접근 지역에 대한 SPOT 위성영상의 Pseudo영상 구성 및 센서모델 분석

방기인* · 조우석**

한국전자통신연구원*, 인하대학교 토목공학과**

Pseudo Image Composition and Sensor Models Analysis of SPOT Satellite Imagery for Inaccessible Area

Ki-In Bang* and Woo-Sug Cho**

ETRI*, Dept. of Civil Engineering, Inha University**

Abstract : The paper presents several satellite sensor models and satellite image decomposition methods for inaccessible area where ground control points can hardly acquired in conventional ways. First, 10 different satellite sensor models, which were extended from collinearity condition equations, were developed and then the behavior of each sensor model was investigated. Secondly, satellite images were decomposed and also pseudo images were generated. The satellite sensor model extended from collinearity equations was represented by the six exterior orientation parameters in 1st, 2nd and 3rd order function of satellite image row. Among them, the rotational angle parameters such as ω (omega) and ϕ (phi) correlated highly with positional parameters could be assigned to constant values. For inaccessible area, satellite images were decomposed, which means that two consecutive images were combined as one image. The combined image consists of one satellite image with ground control points and the other without ground control points. In addition, a pseudo image which is an imaginary image, was prepared from one satellite image with ground control points and the other without ground control points. In other words, the pseudo image is an arbitrary image bridging two consecutive images. For the experiments, SPOT satellite images exposed to the similar area in different pass were used. Conclusively, it was found that 10 different satellite sensor models and 5 different decomposed methods delivered different levels of accuracy. Among them, the satellite camera model with 1st order function of image row for positional orientation parameters and rotational angle parameter of kappa, and constant rotational angle parameter omega and phi provided the best 60m maximum error at check point with pseudo images arrangement.

Key Words : satellite image, SPOT, pseudo image, sensor model, inaccessible area.

요약 : 본 논문은 지상기준점의 취득이 어려운 비접근 지역에 대한 위성영상에서 지형정보를 획득하기 위한 방법을 제시하였다. 먼저, 공선조건식을 기반으로 10개의 위성센서모델을 개발하고, 개발된 센서모델의 거동을 분석하기 위하여 Space Resection 및 Space Intersection을 통해 각각의 센서모델에 대한 적합성을 실험하였다. 이를 바탕으로 비접근 지역에 대한 지형정보를 취득하기 위하여 영

상을 재구성하거나 Pseudo영상을 제작하고, 이에 대한 센서모델의 거동 및 정확도를 분석·제시하였다. 공선조건식을 이용한 Pushbroom 위성영상의 센서모델은 투영중심의 위치와 회전요소에 대한 6개의 외부표정요소를 영상의 행에 대한 1차, 2차 함수 또는 3차 함수로 구성하였으며, 또한 외부표정요소의 위치요소와 상관도가 높은 회전요소(ω, ϕ)를 고정된 값으로 사용하는 센서모델을 개발하였다. 비접근 지역을 위한 영상의 재구성은 동일 패스의 지상기준점이 있는 영상과 비접근 지역의 영상을 연결시켜 하나의 영상으로 재구성하거나, 지상기준점이 있는 영상과 비접근 지역의 영상으로부터 Pseudo영상을 임의로 제작하여 패스내에서 중복영역을 갖도록 구성하였다. 본 연구에서 이용한 인공위성 데이터는 서로 다른 패스에서 동일한 지역을 촬영한 SPOT 영상이며, 각각의 패스에서 두 장의 연속된 영상을 이용하였다. 개발된 10개의 센서모델과 5가지의 영상 재구성 방법에 따라 비접근 지역에서의 정확도는 다르게 나타났으며, 그 중 투영중심의 위치 및 회전요소 k 를 1차 함수로 표현하고 회전요소 ω, ϕ 를 고정시킨 센서모델과 Pseudo영상을 이용한 방법이 비접근 지역 30km, 60km 지점의 점사점에서 각각 최대오차 30m, 60m의 결과를 보였다.

1. 서론

최근 지구관측 다목적 위성영상은 위치정보 획득을 위한 중요한 원시데이터의 하나로 서서히 자리잡아 가고 있다. 위성 사진측량학은 신속하고 경제적으로 지도를 작성할 수 있는 방법으로 주목 받고 있으며, 이에 대한 연구와 개발이 활발히 진행되고 있다(Yasser EI-Manadili, Kurt Novak, 1996; 조기성, 1991).

위성영상으로부터 위치정보를 획득하기 위해서는 센서와 촬영 대상의 기하학적인 관계를 규명하는 센서모델링이 선행 되어야 한다. 그러나 선형 CCD에 의해 얻어지는 Pushbroom 위성영상은 항공사진이나 프레임영상과 달리 영상을 획득하는 동안 투영중심의 위치와 자세가 시간에 따라 변하기 때문에 정확한 센서모델을 설정하는데 어려움이 있다(김태정 외, 2000; 한국과학기술원, 1998).

일반적으로 위성영상의 센서에 대한 모델은 촬영대상지역의 지상기준점을 이용하여 결정하며, 이와 같은 지상기준점은 기존 지형도를 이용하거나 또는 지상측량에 의하여 획득한다. 따라서 지상기준점이 획득되기 어려운 비접근 지역을 촬영한 위성영상에서는 필요한 위치정보의 획득이 매우 어렵다. 본 연구에서는 지상기준점이 없는 비접근 지역 위성영상에서 위치정보를 얻기 위한 방법으로 공선조건식을 이용한 센서모델과 동일 패

스에서 얻어진 접근 지역과 비접근 지역 영상을 이용하는 영상 재구성 방법을 제시하였다.

본 연구는 크게 두 가지 내용으로 구분될 수 있다. 첫째, 공선조건식 기반의 다양한 센서모델을 이용, 재구성된 영상에 적용하여 비접근 지역에 적합한 센서모델의 거동에 대한 비교·평가이다.

둘째, Pushbroom 위성영상의 재구성이다. 동일 패스에서 연속 촬영된 지상기준점이 있는 접근 지역 위성영상과 비접근 지역 위성영상을 결합하여 하나의 새로운 영상으로 재구성하거나, 지상기준점이 있는 영상과 비접근 지역의 영상으로부터 Pseudo영상을 패스내에서 중복영역을 갖도록 임의로 구성하여 비접근 지역의 위치정보를 획득하는 방법이다.

2. 센서모델

공간상의 임의의 점(또는 대상점)과 그에 대응하는 영상의 대응점 및 센서의 투영중심이 동일한 직선 상에 존재한다는 조건을 공선조건(共線條件, Collinearity Condition)이라 하고, 공선조건에 의해 수립되는 영상 좌표와 대상점 좌표, 투영중심 좌표 사이의 관계식을 공선조건식(Collinearity Condition Equations)이라 한다(Fig. 1). (유복모, Anton F. Schenk, 1999).

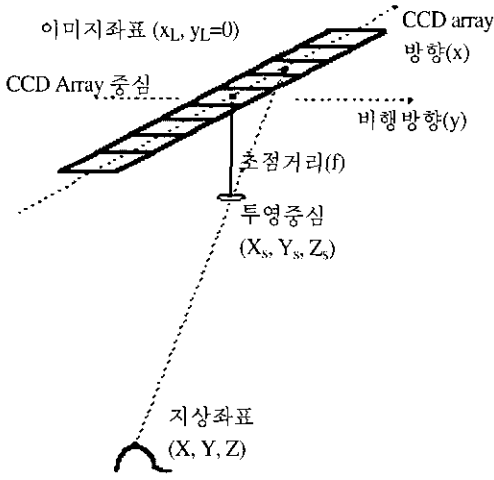


Fig. 1. Pushbroom satellite imagery collinearity condition equations.

Pushbroom 위성영상에서 투영중심은 영상이 촬영되는 동안 이동하며, 센서의 자세 또한 계속 변하기 때문에 동일 영상의 scan line마다 서로 다른 6개의 외부표정요소를 갖게 된다. 따라서 Pushbroom 위성영상에 공선조건식을 적용하기 위해서는 6개의 외부표정요소를 scan line 또는 시간에 대한 함수로 구성해야 한다.

투영중심의 이동과 자세의 변화를 scan line에 대한 2차 함수로 모델링한 일반적인 센서모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 X_s &= X_o + a_1L + b_1L^2 \\
 Y_s &= Y_o + a_2L + b_2L^2 \\
 Z_s &= Z_o + a_3L + b_3L^2 \\
 \omega_s &= \omega_o + a_4L + b_4L^2 \\
 \phi_s &= \phi_o + a_5L + b_5L^2 \\
 \kappa_s &= \kappa_o + a_6L + b_6L^2
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기에서 $X_s, Y_s, Z_s, \omega_s, \phi_s, \kappa_s$ 는 임의의 scan line(L)에서 투영중심의 위치와 회전요소이고, $X_o, Y_o, Z_o, \omega_o, \phi_o, \kappa_o$ 는 기준이 되는 scan line에서 외부표정요소이다. 또한 $a_1 \sim a_6, b_1 \sim b_6$ 는 scan line에 대한 계수이다.

Pushbroom 위성영상에 대한 공선조건식은 아래

식 (2)와 같이 나타낼 수 있으며, r_{ij} 는 영상의 행 L에서 센서의 자세가 $\omega_s, \phi_s, \kappa_s$ 인 회전행렬 R_s 의 i행, j열 값이다.

$$\begin{aligned}
 x_L &= -f \frac{r_{11}(X-X_s)+r_{12}(Y-Y_s)+r_{13}(Z-Z_s)}{r_{31}(X-X_s)+r_{32}(Y-Y_s)+r_{33}(Z-Z_s)} \\
 y_L &= 0 = -f \frac{r_{21}(X-X_s)+r_{22}(Y-Y_s)+r_{23}(Z-Z_s)}{r_{31}(X-X_s)+r_{32}(Y-Y_s)+r_{33}(Z-Z_s)}
 \end{aligned} \tag{2}$$

위에서 설명된 위성영상에 대한 공선조건식을 다음과 같이 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 F &= x+v_x = -f \frac{r}{q} \\
 G &= y+v_y = -f \frac{s}{q}
 \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 v_x, v_y 는 영상 좌표관측에 대한 잔차를 나타내며, q, r, s 는 식 (4)와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
 q &= r_{31}(X-X_s)+r_{32}(Y-Y_s)+r_{33}(Z-Z_s) \\
 r &= r_{11}(X-X_s)+r_{12}(Y-Y_s)+r_{13}(Z-Z_s) \\
 s &= r_{21}(X-X_s)+r_{22}(Y-Y_s)+r_{23}(Z-Z_s)
 \end{aligned} \tag{4}$$

본 연구에서 제안한 센서모델은 투영중심의 이동을 scan line에 대한 1차, 2차 또는 3차 함수로 표현했으며, 회전요소는 scan line에 대한 1차, 2차 함수 또는 scan line에 대하여 변하지 않는 것으로 표현하였다. 또한 6개의 외부표정요소 중 상관도가 높은 표정요소를 고정된 상수값으로 사용하는 센서모델을 포함하여 모두 10개의 센서모델을 실험하였다. 실험에서 사용된 10개의 센서모델을 설명하면 다음과 같다.

(1) 투영중심 이동은 1차 함수, 회전요소는 scan line에 대하여 변화하지 않는 센서모델(First-Zero)

$$\begin{aligned}
 X_s &= X_o + a_1L \\
 Y_s &= Y_o + a_2L \\
 Z_s &= Z_o + a_3L \\
 \omega_s &= \omega_o \\
 \phi_s &= \phi_o \\
 \kappa_s &= \kappa_o
 \end{aligned} \tag{5}$$

이 센서모델은 투영중심의 위치가 3차원 공간에서 각각의 축 방향에 대해 등속직선운동을 한다

고 가정 했으며 위성의 자세가 한 영상을 촬영하는 동안 변화가 없는 것으로 가정한 것이다.

(2) 투영중심 이동과 회전요소의 변화가 1차 함수로 표현되는 센서모델(First-First)

$$\begin{aligned} X_s &= X_o + a_1L \\ Y_s &= Y_o + a_2L \\ Z_s &= Z_o + a_3L \\ \omega_s &= \omega_o + a_4L \\ \phi_s &= \phi_o + a_5L \\ \kappa_s &= \kappa_o + a_6L \end{aligned} \quad (6)$$

이 센서모델은 투영중심이 scan line에 대한 등속운동으로 이동하고 회전요소는 scan line에 대한 등각속도로 변화한다고 가정한 것이다.

(3) 투영중심 이동은 2차 함수, 회전요소는 scan line에 대하여 변화하지 않는 센서모델(Second-Zero)

$$\begin{aligned} X_s &= X_o + a_1L + b_1L^2 \\ Y_s &= Y_o + a_2L + b_2L^2 \\ Z_s &= Z_o + a_3L + b_3L^2 \\ \omega_s &= \omega_o \\ \phi_s &= \phi_o \\ \kappa_s &= \kappa_o \end{aligned} \quad (7)$$

이 센서모델은 투영중심이 각각의 축 방향에 대해 가속운동으로 이동하고 회전요소는 변화하지 않는다고 가정하였다. 즉, 3차원 공간상에서 투영중심이 곡선의 궤적을 그리며 이동한다고 가정한 것은 위성의 궤도운동을 고려한 것이다.

(4) 투영중심 이동은 2차 함수, 회전요소의 변화는 1차 함수로 표현되는 센서모델(Second-First)

$$\begin{aligned} X_s &= X_o + a_1L + b_1L^2 \\ Y_s &= Y_o + a_2L + b_2L^2 \\ Z_s &= Z_o + a_3L + b_3L^2 \\ \omega_s &= \omega_o + a_4L \\ \phi_s &= \phi_o + a_5L \\ \kappa_s &= \kappa_o + a_6L \end{aligned} \quad (8)$$

이 센서모델은 투영중심의 이동을 scan line에 대한 가속운동으로 가정하고, 자세는 scan line에 대한 등각속도로 변화한 것으로 가정한 것이다.

(5) 투영중심 이동은 2차 함수, 회전요소 ϕ 와 κ 의 변화는 1차 함수, 회전요소 ω 는 scan line에 대하여 변화하지 않는 센서모델(Second-First-Omega)

$$\begin{aligned} X_s &= X_o + a_1L + b_1L^2 \\ Y_s &= Y_o + a_2L + b_2L^2 \\ Z_s &= Z_o + a_3L + b_3L^2 \\ \omega_s &= \omega_o + a_4L \\ \phi_s &= \phi_o + a_5L \\ \kappa_s &= \kappa_o + a_6L \end{aligned} \quad (9)$$

Pushbroom 위성영상 센서모델로 공선조건식을 적용할 때 중요한 사항중의 하나가 외부표정요소의 투영중심과 회전요소 사이에 상관도가 높다는 것이다. 특히 ω 는 다른 외부표정요소와 높은 상관도를 보인다(Ahmet Bahadir Orun, Krishnaier Natarajan, 1994). 따라서, 이 센서모델은 가장 상관도가 높은 회전요소 ω 를 scan line에 대해 변화하지 않는 것으로 가정하고 나머지 두 개의 회전요소 ϕ, κ 는 등각속도로 변화하는 것으로 가정한 것이다.

(6) 투영중심 이동과 회전요소의 변화를 2차 함수로 표현한 센서모델(Second-Second)

$$\begin{aligned} X_s &= X_o + a_1L + b_1L^2 \\ Y_s &= Y_o + a_2L + b_2L^2 \\ Z_s &= Z_o + a_3L + b_3L^2 \\ \omega_s &= \omega_o + a_4L + b_4L^2 \\ \phi_s &= \phi_o + a_5L + b_5L^2 \\ \kappa_s &= \kappa_o + a_6L + b_6L^2 \end{aligned} \quad (10)$$

이 센서모델은 투영중심의 이동과 회전요소의 변화를 모두 2차 함수로 표현하였다. 위성의 이동 및 자세의 변화를 scan line에 대한 가속도운동과 각가속도를 갖는 운동으로 가정한 센서모델이다.

(7) 투영중심 이동은 3차 함수, 회전요소는 scan line에 대해 변화하지 않는 센서모델(Third-Zero)

$$\begin{aligned}
 X_s &= X_o + a_1L + b_1L^2 + c_1L^3 \\
 Y_s &= Y_o + a_2L + b_2L^2 + c_2L^3 \\
 Z_s &= Z_o + a_3L + b_3L^2 + c_3L^3 \\
 \omega_s &= \omega_o \\
 \phi_s &= \phi_o \\
 \kappa_s &= \kappa_o
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

이 센서모델은 회전요소가 한 영상을 촬영하는 동안 변화하지 않는 것으로 가정하였고, 투영중심의 이동은 고차 함수인 3차 함수로 가정하여 투영중심의 위치를 좀더 자유롭게 모델링 하였다.

(8) 투영중심 이동은 3차 함수, 회전요소 ϕ , κ 의 변화는 1차 함수, 회전요소 ω 는 scan line에 대해 변화하지 않는 센서모델(Third-First-Omega)

$$\begin{aligned}
 X_s &= X_o + a_1L + b_1L^2 + c_1L^3 \\
 Y_s &= Y_o + a_2L + b_2L^2 + c_2L^3 \\
 Z_s &= Z_o + a_3L + b_3L^2 + c_3L^3 \\
 \omega_s &= \omega_o \\
 \phi_s &= \phi_o + a_5L \\
 \kappa_s &= \kappa_o + a_6L
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

이 센서모델은 투영중심의 이동을 3차 함수로 표현하였고, 높은 상관도를 가지는 회전요소 ω 는 변화하지 않는 것으로 가정하고, 회전요소 ϕ , κ 의 변화는 등각속도로 변화한다고 가정하였다.

(9) 투영중심의 이동과 회전요소 κ 의 변화는 2차 함수, 회전요소 ω , ϕ 는 고정된 상수값을 사용하는 센서모델(Second-Kappa)

$$\begin{aligned}
 X_s &= X_o + a_1L + b_1L^2 \\
 Y_s &= Y_o + a_2L + b_2L^2 \\
 Z_s &= Z_o + a_3L + b_3L^2 \\
 \omega_s &= const \\
 \phi_s &= const \\
 \kappa_s &= \kappa_o + a_6L + b_6L^2
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

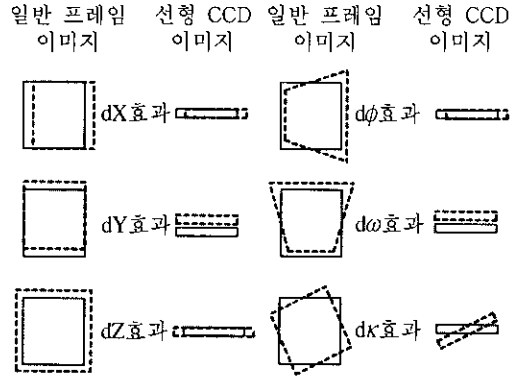


Fig. 2. Effects of exterior orientation parameters in the frame and linear CCD images (Ahmet Bahadir Orun and Krishnaier Natarajan, 1994).

Fig. 2는 프레임 영상과 선형 CCD 영상에서 각 외부표정요소 간의 관계를 나타낸 그림이다. Fig. 2에서 투영중심의 X축 방향의 이동과 회전요소 ϕ 의 변화, 그리고 투영중심의 Y축 방향의 이동과 회전요소 ω 의 변화가 비슷한 효과를 나타냄을 알 수 있다. 따라서 선형 CCD 영상은 일반적으로 항공사진이나 프레임 영상과는 달리 투영중심의 이동과 회전요소의 변화가 서로 종속적인 특성이 있다(Ahmet Bahadir Orun, Krishnaier Natarajan, 1994). 본 연구에서도 Space Resection을 통해 외부표정요소의 상관계수를 점검해본 결과 회전요소 ω 와 투영중심 좌표 Y, 회전요소 ϕ 와 투영중심 좌표 X 사이의 상관계수가 1.0에 가까운 값을 보였다. 따라서 이러한 이유로 Second-Kappa 센서모델은 상관도가 높은 외부표정요소들을 제거한 Orun과 Natarajan의 센서모델을 바탕으로 투영중심의 위치와 회전요소 κ 를 scan line에 대한 2차 함수로 표현하였고, 회전요소 ω 와 ϕ 를 고정된 상수값으로 사용하였다. 이 센서모델은 투영중심의 위치와 회전요소 사이의 높은 상관도가 제거되어 수렴하는 속도가 빠르고, 진동하거나 발산하는 경우도 발생하지 않는다(Ahmet Bahadir Orun, Krishnaier Natarajan, 1994).

(10) 투영중심 이동과 회전요소 κ 의 변화는 1차 함수, 회전요소 ω , ϕ 는 고정된 상수값을 사용하는 센서모델(First-Kappa)

$$\begin{aligned} X_s &= X_o + a_1L \\ Y_s &= Y_o + a_2L \\ Z_s &= Z_o + a_3L \\ \omega_s &= const \\ \phi_s &= const \\ \kappa_s &= \kappa_o + a_6L \end{aligned} \tag{14}$$

이 센서모델은 Second-Kappa 센서모델을 변형한 것으로서, ω 와 ϕ 는 고정된 상수값을 사용하고 투영중심의 이동과 κ 의 변화를 scan line에 대한 1차 함수로 모델링한 것이다. 또한 이 센서모델은 투영중심의 이동과 회전요소 κ 의 변화를 scan line에 대한 2차 함수로 표현한 Second-Kappa 모델과 비교하여 위성영상 삼각측량 수행시 더욱 우수한 성능을 보인다.

3. 센서모델 검증

센서모델에 대한 타당성을 검증하기 위해 지상 기준점이 있는 접근지역으로 가정한 영상을 이용하여 각 센서모델의 Space Resection과 Space Intersection 결과를 분석하였다. 각 센서모델별 결과는 다음과 같다.

Table 1. Space Resection Result

센서모델	검사점 평균오차(Pixel)	
	Left	Right
First-Zero	0.77	0.84
First-First	0.62	0.72
First-Kappa	0.57	0.48
Second-Zero	0.79	0.87
Second-First	0.68	0.62
Second-First-Omega	0.69	0.65
Second-Kappa	0.58	0.58
Second-Second	0.67	0.58
Third-Zero	0.72	0.81
Third-First-Omega	0.44	0.44

Table 1를 볼 수 있듯이 Space Resection을 통해 센서모델의 정확도를 살펴보면 접근지역 좌·우 두 영상에서 각 센서모델은 1pixel이하의 검사점 평균 오차를 보였다. 가장 정확도 높은 결과를 보인 센서모델은 First-Kappa 센서모델이다. 이 센서모델은 Second-Kappa 센서모델과 마찬가지로 수렴속도가 다른 센서모델에 비해 우수한 특성을 함께 가지고 있다. 가장 나쁜 결과를 보인 센서모델은 Second-Zero 센서모델로서 좌·우 두 영상에서 0.8pixel 안팎의 검사점 평균오차를 보였다 (Table 1).

Space Resection에서 얻은 표정요소를 이용하여 검사점에 대한 Space Intersection을 시험하였다. Space Intersection을 통해 검사점에 대한 3차원 Ground Coordinates을 결정하고 그 오차를 분석하였다.

Table 2에서 보듯이 검사점의 평균오차는 모든 센서모델이 10m를 약간 상회하는 정확도를 보였다. 가장 좋은 결과를 보인 센서모델은 Third-First-Omega 센서모델로 검사점에서 평균 오차가 11.11m 였다. 가장 나쁜 결과를 보인 센서모델은 Third-Zero 센서모델로 15.74m의 평균오차를 보였다 (Table 2).

위의 결과에서 알 수 있듯이 10m의 해상도를 갖는 영상이므로 제안된 센서모델들은 지상기준점이 있는 접근지역의 영상에서는 적절한 결과를 도출하는 센서모델임을 알 수 있다. 따라서 이러한 센서모델을 비접근지역에 적용하는 방법에 큰

Table 2. Space Intersection Result

센서모델	검사점 평균오차(m)
First-Zero	14.03
First-First	11.52
First-Kappa	12.38
Second-Zero	14.71
Second-First	12.26
Second-First-Omega	12.27
Second-Kappa	13.57
Second-Second	14.10
Third-Zero	15.74
Third-First-Omega	11.11

무리가 없음이 검증된다.

4. 비접근 지역 위성영상 재구성

본 연구에서는 비접근지역 위성영상을 위한 영상재구성 방법을 제안하였다. 첫째로 비접근지역 위성영상은 지상기준점이 없으므로 위성영상 삼각측량을 위해 지상기준점이 있는 접근지역 영상과 결합하여 사용하는 3가지 영상결합 방법과 둘째로 Path 방향으로 중복된 영상을 갖지 않는 Pushbroom 위성영상을 Path 방향으로 가상의 중첩영역을 갖도록 하는 2가지 Pseudo영상 구성방법이다.

본 연구에서 사용된 영상은 모두 4장의 SPOT 영상이다. 1997년 8월 24일에 촬영한 2장의 연속된 영상과 1997년 3월 1일에 촬영한 연속된 2장의 영상이다. 1997년 8월 24일에 촬영된 영상의 패스는 1997년 3월 1일에 촬영된 영상의 패스보다 서쪽에 위치하며 이 두 패스는 서로 중복된 촬영지역을 갖는 입체영상을 이룬다.

Fig. 3은 연구에 사용된 접근 지역 영상과 비접근 지역 영상의 배치를 보여준다. 접근 지역 영상이란 지상기준점이 있는 접근 지역으로 가정한 영

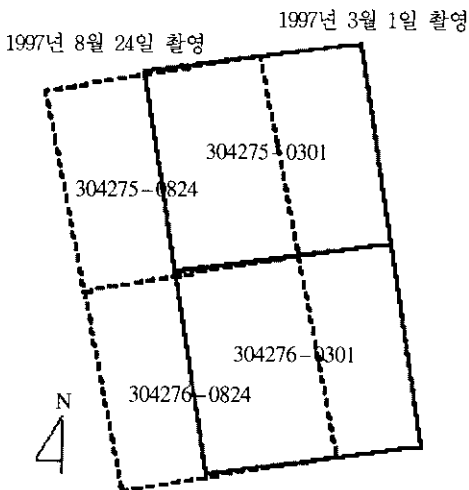


Fig. 3. Arrangement of used SPOT images.

상으로 304275-0824 영상과 304275-0301 영상을 가리키며(Fig. 12, 13), 비접근 지역 영상은 연구에서 지상기준점이 없는 비접근 지역으로 가정한 영상으로 304276-0824 영상과 304276-0301 영상을 가리킨다(Fig. 14, 15). 접근 지역과 비접근 지역의 두 영상은 동일한 패스에서 연속된 영상으로 영상 재구성을 위한 필수 조건이다. 위성영상 삼각측량을 적용하기 위해 3가지의 영상결합 방법과 2가지의 Pseudo 영상구성 등 모두 5가지의 방법으로 영상을 재구성하였다. Case 1에서 Case 3까지는 결합 영상에 대한 실험이며, Case 4, 5는 동일패스에서 입의로 중복영역을 갖도록 제작된 Pseudo영상에 대한 실험이다. 또한 Case 6은 위 5가지 방법에 대한 결과를 비교하기 위해 실시한 실험이다. 본 연구에서 수행한 영상 재구성방법을 각 Case별로 살펴보면 다음과 같다.

(1) Case 1: 접근 지역 영상 전체와 비접근 지역 영상 전체를 단일 영상으로 결합(Fig. 4).

접근지역과 비접근지역 두 영상을 결합하여 12,000line의 단일 영상을 구성하여 위성영상 삼각측량을 수행하였다.

(2) Case 2: 접근 지역 영상 50%와 비접근 지역 영상 전체를 단일 영상으로 결합(Fig. 5).

비접근지역 영상을 접근지역 영상 3,000line과 결합하여 9,000 line의 단일영상으로 위성영상 삼각측량을 수행하였다.

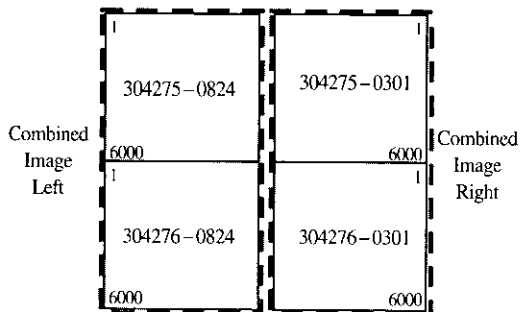


Fig. 4. Case 1 reconstructed image (combined image).

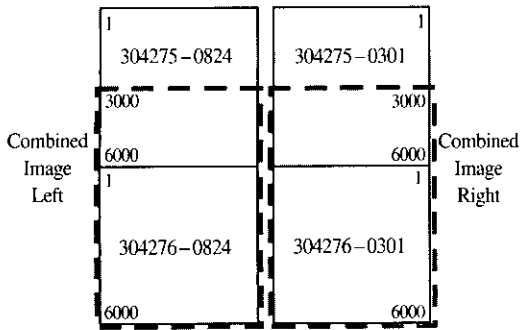


Fig. 5. Case 2 reconstructed image (combined image).

(3) Case 3: 접근 지역 영상 50%와 비접근 지역 영상 50%(비접근 지역 30km)를 하나의 단일 영상으로 결합(Fig. 6).

접근지역 영상과 비접근지역 영상의 50%지역을 6000 line의 단일영상으로 재구성하여 위성영상 삼각측량을 수행하였다.

(4) Case 4: 접근 지역 영상과 비접근 지역 영상 그리고 동일패스 내에 중복영역을 갖도록 Case 3의 영상을 Pseudo영상으로 이용, 모두 6장의 영상이 Block을 형성하도록 영상을 재구성(Fig. 7).

(5) Case 5: 접근 지역 영상 전체와 비접근 지역 영상의 50%로 구성된 Pseudo영상 그리고 접근 지역 영상 50%와 비접근 지역 영상 전체로 구성된 Pseudo영상을 제작하여, 모두 4장의 영상이 동일한 패스 내에서 중복영역을 갖는

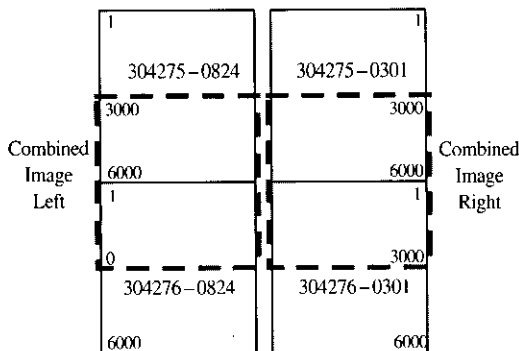


Fig. 6. Case 3 reconstructed image (combined image).

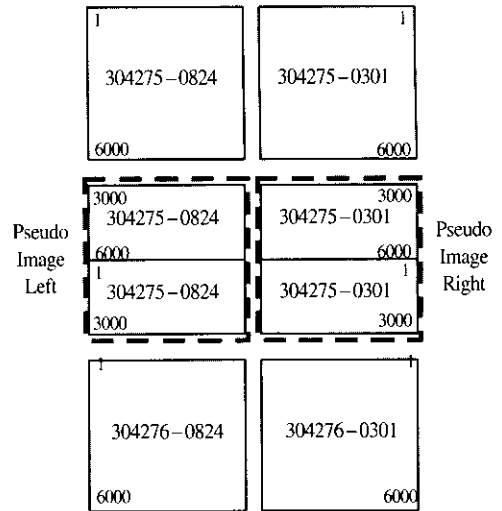


Fig. 7. Case 4 reconstructed image (pseudo image).

Block을 형성하도록 영상을 재구성(Fig. 8).

(6) Case 6: 접근 지역 영상의 Space Resection을 통해서 외부표정요소를 결정하고, 이 외부표정요소를 비접근 지역 영상에 적용하여, Space Intersection을 통해 검사점에 대한 위치 정보를 획득.

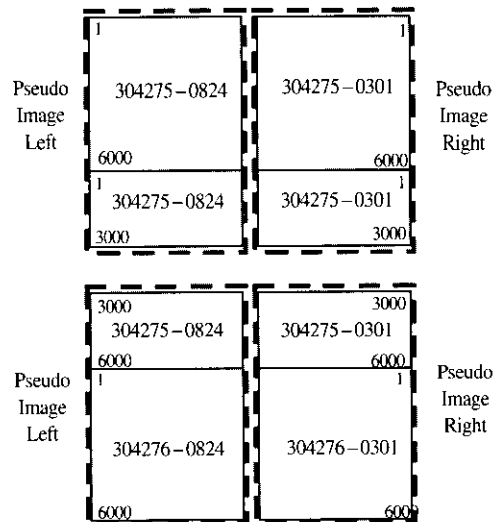


Fig. 8. Case 5 reconstructed image (pseudo image).

5. 비접근 지역 위성영상 삼각측량

Fig. 9는 위성영상 삼각측량의 개념도를 나타내고 있다. 지상의 촬영대상점 (X_A, Y_A, Z_A) 가 영상에 나타난 위치가 각각 $(x, y, -f)$, $(x', y', -f)$ 일 때, 두 영상점이 촬영될 당시의 투영중심은 각각 (X_{LS}, Y_{LS}, Z_{LS}) , (X_{RS}, Y_{RS}, Z_{RS}) 이 된다. 이러한 관계를 위성영상 공선조건식으로 표현하고, 위성영상 공선조건식과 최소제곱법을 이용하여 위성영상 삼각측량을 수행한다.

본 연구에서 제시한 방법으로 영상을 재구성

하여 Pushbroom 위성영상의 삼각측량을 수행하고, 비접근 지역 영상의 검사점을 이용하여 위성영상 삼각측량의 정확도를 검증하였다.

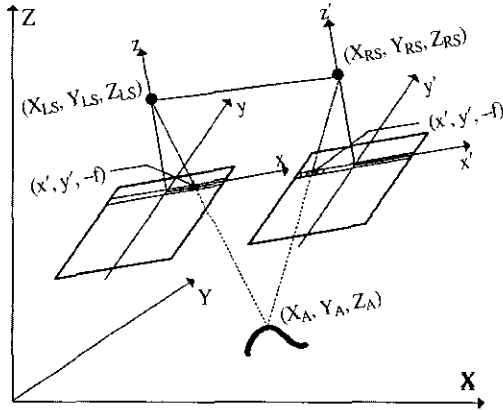


Fig. 9. Triangulation of linear CCD images.

● GCP ■ Tie Point ▲ Check Point

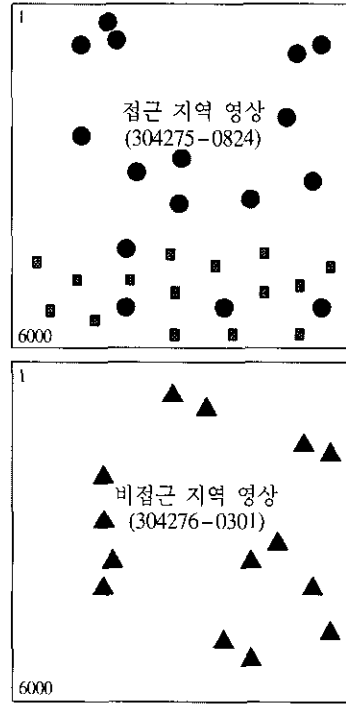


Fig. 10. Distribution of GCP, tie and check points.

Table 3. Error analysis of superior sensor models.

검사점ID	Row	Case 별 우수 센서모델 검사점 오차[m]					
		Case1	Case6	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
		First-Zero			First-Kappa		
13	2269.3	13.3	12.4	15.7	16.7	15.6	13.6
14	2081.5	21.6	21.8	26.4	28.8	27.0	24.4
20	1772.1	15.8	16.7	19.5	19.7	18.4	20.5
19	1624.5	18.0	19.1	19.0	19.5	18.2	20.0
7	707.5	33.2	28.9	30.1	34.5	38.0	23.6
8	396.5	28.0	28.0	21.6	21.3	24.8	23.4
15	-171.1	29.6	29.9	29.7		27.0	31.6
10	-411.9	35.6	34.7	32.8		37.6	32.7
16	-417.2	33.7	33.9	34.6		32.6	34.5
21	-456.3	36.3	36.7	36.0		32.8	35.0
22	-985.5	47.1	45.4	47.7		43.2	44.3
17	-2098.6	57.6	58.1	58.6		56.8	59.1
18	-2166.9	56.8	56.1	56.9		51.8	59.1

위성영상 삼각측량 결과 First-Zero 센서모델은 비교적 모든 case에서 좋은 결과를 보였고, First-First센서모델은 Case 1, 2, 6에서 좋은 결과를 보였다. 수행속도가 빠른 First-Kappa 센서모델은 Case 6을 제외한 나머지 Case에서 좋은 결과를 보였으며, Second-Kappa 센서모델은 Case 1, 5에서 비교적 좋은 결과를 보였다.

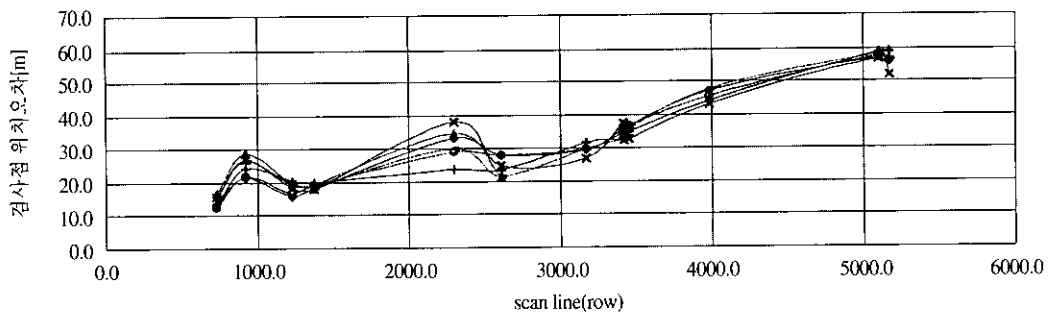
Table 3은 우수한 센서모델로 나타난 First Zero 와 First-Kappa의 Case별 오차를 나타내고 있다. 각 검사점이 영상에서 가지는 y(Row)좌표는 3,000에서 3,000 사이의 값이고, 이는 실제 지상거리로 영상의 한 행이 약 10m이므로 60km의 범위에 해당하며 검사점의 위치는 y값이 작아질수록 지상 기준점이 있는 접근지역 영상에서 멀어진다. 아래

Table 4은 위성영상 삼각측량의 결과를 나타낸 것으로 비접근 지역의 14개 검사점에 대한 위치오차 중에서 가장 큰 오차를 나타낸 것이다. Case 1, 2, 4, 5, 6은 비접근 지역 60km까지가 실험대상 지역이고, Case 3은 비접근 지역 30km까지가 실험대상 지역이다. 각 Case에서 가장 좋은 결과를 제공하는 센서모델을 대상으로 Table 3의 결과를 자세히 정리하면 Fig. 11과 같다. Fig. 11은 비접근 지역에 위치한 검사점의 위치오차를 접근 지역에서부터 거리를 간접적으로 나타내는 비접근 지역 위성영상의 line number에 따라 표시한 것이다.

Table 4의 위성영상 삼각측량 결과를 살펴보면, 가장 좋은 영상 재구성 방법과 센서모델의 경우 비접근 지역 30km 지점까지 약 30m의 최대 오차,

Table 4. Satellite Imagery Triangulation Surveying Check Point Maximum Error

센서모델	Case별 검사점 최대오차[m]					
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
First-Zero	57.56	58.92	38.28	83.71	72.59	58.12
First-First	85.98	89.84	63.61	238.98	101.33	84.01
First-Kappa	58.50	58.63	34.53	56.84	59.11	138.20
Second-Zero	131.40	137.58	135.78	295.76	127.09	87.20
Second-First	146.01	1130.41	74.18	342.97	770.06	803.70
Second-First-Omega	99.64	140.43	48.37	744.85	333.68	146.67
Second-Kappa	86.00	107.75	63.52	158.12	81.81	300.90
Second-Second	1617.73	777.56	108.66	9749.52	3454.91	4370.59
Third-Zero	814.19	1061.23	222.96	492.02	611.57	1049.17
Third-First-Omega	2224.66	5551.20	194.32	10625.02	1433.00	1720.02



◆ Case 1 (First-Zero) ◆ Case 2 (First-Kappa) ◆ Case 3 (First-Kappa)
 ✕ Case 4 (First-Kappa) ◆ Case 4 (First-Kappa) ◆ Case 6 (First-Zero)

Fig. 11. Error analysis graph of superior sensor models



Fig. 12. Accessible area(left) 304275-0824

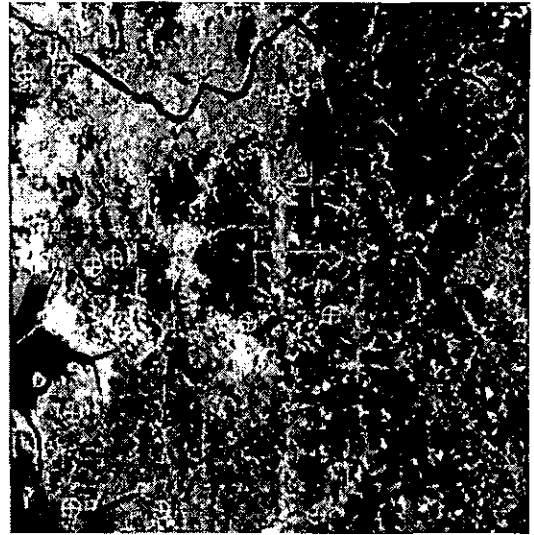


Fig. 13. Accessible area(right) 304275-0301

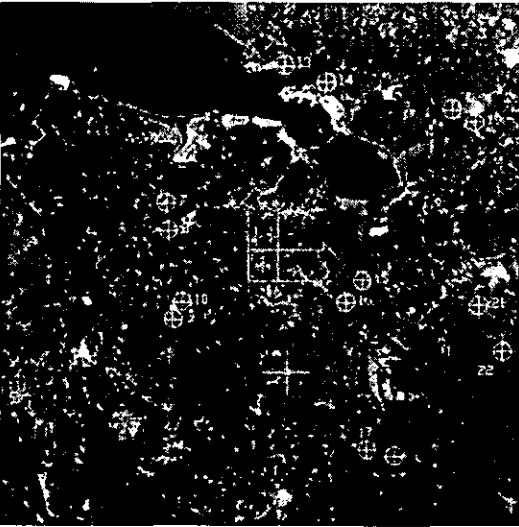


Fig. 14. Inaccessible area(left) 304276-0824

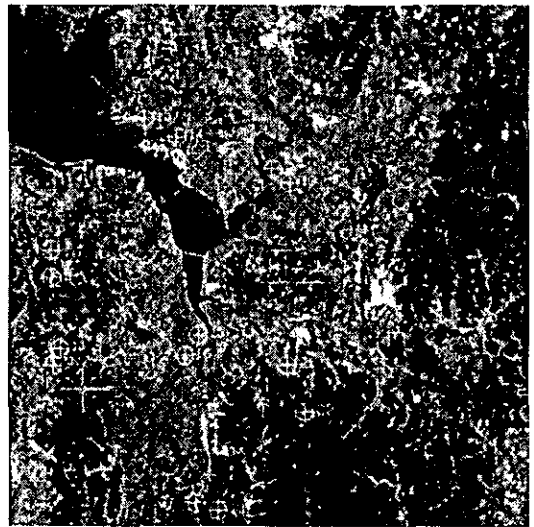


Fig. 15. Inaccessible area(right) 304276-0301

60km 지점까지 약 60m의 최대오차를 보였다. 특히 case 6인 경우, First-Zero 센서모델은 비접근 지역 60km 지점까지 약 60m의 위치오차를 보였다.

6. 결론

First-Zero 또는 First-Kappa 센서모델처럼 투영 중심의 이동을 scan line에 대한 1차 함수로 표현

하고, 회전요소를 scan line에 대한 낮은 차수의 함수로 표현한 센서모델일수록 좋은 결과를 보였다. 이와 같은 결과는 센서모델의 위치요소와 회전요소 사이의 높은 상관관계에서 기인된 것으로 판단된다.

First-Zero 센서모델은 Case 1, 2, 6의 경우, First-Kappa 센서모델은 Case 1, 2, 4, 5의 경우 지상기준점이 없는 지역의 30km 지점까지 약 30m의 최대 오차, 60km 지점까지 약 60m의 최대 오

차를 보였다.

프로그램의 수행성능 측면에서 분석해 보면 Block을 구성하는 경우 센서모델의 미지수 증가로 프로그램이 data를 처리하는 데 있어 약 20회 이상의 반복횟수(Iteration)을 통해 처리시간이 길어지는 단점이 있다. 따라서 data를 처리하는 데 있어 5회 미만의 반복횟수로 비교적 빠른 수행속도를 가진 First-Kappa 센서모델을 사용하는 것이 합리적이다.

결론적으로 센서모델의 위치요소와 회전요소 사이의 높은 상관관계로 인하여 First-Kappa 또는 First-Zero 센서모델이 Pushbroom 위성영상에 비교적 안정적이다. 또한 Pseudo영상을 사용한 Case 4 또는 Case 5의 영상 재구성 방법에서 비교적 좋은 결과를 제공함으로, 수행성능 및 정확도를 고려할 경우 First-Kappa 센서모델과 Pseudo영상을 이용한 영상 재구성 방법이 비접근 지역 삼각측량에 합리적이라 할 수 있다.

사 사

본 연구의 수행에 필요한 다양한 자료를 제공해준 한국과학기술원 인공위성연구센터에 진심으로 감사를 드립니다.

참고문헌

김태정, 김승범, 신동석, 2000. 대표적 위성영상 센서모델링 알고리즘들의 비교연구, *Journal of the Korean Society of Remote Sensing*, 16(1): 73-86.

신동석, 이영란, 1997. 선형 CCD센서 영상의 기하학적 모델 수립 및 좌표 변환, *Journal of the Korean Society of Remote Sensing*, 13(2): 85-98.

유복모, Anton F. Schenk, 1999. 현대수치사진측량학, 문운당, 139-214.

장휘정, 2000. SPOT 위성영상을 이용한 지형도 제작, 인하대학교, 석사학위논문, 5-37.

조기성, 1991. SPOT 위성영상의 외부표정요소 결정에 관한 연구, 연세대학교, 박사학위논문, 7-48.

한국과학기술원 인공위성연구센터, 1998. EOC 영상 자료 처리 및 활용 기술 개발, 18-36.

Ahmet Bahadir Orun, Krishnaier Natarajan, 1994. A Modified Bundle Adjustment Software for SPOT Imagery and Photography, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 60(12): 1431-1437.

Changno Lee, Henry J, Theiss, James S. Bethel, and Edward M. Mikhail, 2000. Rigorous Mathematical Modeling of Airborne Pushbroom Imaging System, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66(4): 385-392.

C. Vincent TAO, Yong HU, Image Rectification Using A Generic Sensor Model-Rational Function Model, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000. Vol. XXXIII, Part B3. Amsterdam, 874-881.

Ian Dowman, John T. Dolloff, An Evaluation of Rational Function for Photogrammetric Restitution, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000. Vol. XXXIII, Part B3. Amsterdam, 254-266.

Minhe ji, John R. Jensen, 2000. Continuous Piecewise Geometric Rectification for Airborne Multispectral Scanner Imagery, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66(2): 163-171.

Rajiv Gupta, Richard I. Hartley, 1997 Linear Pushbroom Cameras, *IEEE Transactions on Pattern Analysis And Machine Intelligence*, 19(9): 963-975.

Yasser EI-Manadili, Kurt Novak, 1996. Precision Rectification of SPOT Imagery Using the Direct Linear Transformation Model, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62(1): 62-72.