

# SPOT 위성영상의 대안적 모형화(Alternative model)방법의 비교분석

## Comparison of Alternative Models of the SPOT Imagery

정 원 조\* · 김 의 명\*\* · 진경혁\*\*\* · 유복모\*\*\*\* · 유환희\*\*\*\*\*

Jung, Won Jo · Kim, Eui Myoung · Jin Kyeong Hydek · Yeu, Bock Mo · Yoo, Hwan Hee

### 요 지

최근들어 광범위한 지역의 삼차원 국토정보 취득을 위한 고해상도 위성영상의 센서모형화 기법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. IKONOS나 SPOT 5호와 같은 고해상도 위성영상의 모형화에 앞서 본 연구에서는 각종 응용분야에서 광범위하게 활용되고 있는 SPOT 3호 위성영상을 대상으로 지상기준점을 이용하여 경사촬영(off-nadir viewing)각을 추정하는 기법을 개발하였다. 추정된 경사촬영각은 영상좌표를 보정하는데 사용되었으며 2차원 부등각사상변환을 이용하여 기존의 모형화 방법 보다 간결하고 정확도가 향상된 모형화 기법을 제안하였다.

또한, 기존의 엄밀 센서모형화 방법을 대체하고 있는 위성영상의 센서모형화를 위한 다양한 방법들이 제안되고 있기 때문에, 2차원 부등각사상변환, 직접선형변환(DLT), 자체검정-DLT(SDLT) 등의 추상화된 모형화 방법을 SPOT 위성영상에 대해 기준점 수의 변화에 따라 검사점을 이용하여 수평성분, 수직성분으로 나누어 정확도를 비교분석하였다.

**핵심용어** : 삼차원 국토정보, 2차원 부등각사상변환, 직접선형변환, SPOT 위성영상, 경사촬영각

### 1. 서론

최근 들어 지형의 삼차원 정보 취득 및 시스템 구축과 관련된 많은 연구가 진행되어 왔다. 특히 광범위한 지역의 삼차원 국토정보 취득을 위한 고해상도 위성영상의 센서모형화 기법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

고해상도 위성영상의 기하 특성을 살펴보면 위성영상의 영상소는 항공사진처럼 중심투영(central projection)에 의해 생성된다고 보다는 거의 정사투영(orthogonal) 또는 평행투영(parallel projection)에 의해 생성된다. 그 이유는 고해상도 위성영상은 위성의 고도에 비해

촬영되는 지상의 대상영역은 아주 작으며, 영상을 촬영하는 시간은 수 초 내외로 아주 짧은 시간에 촬영을 하기 때문이며 이 때 위성은 거의 선형운동을 한다고 가정할 수 있다. 이러한 위성영상의 기하 특성으로 인해서 2차원 부등각사상변환(2D affine transformation)에 의한 위성의 모형화가 이루어지고 있다(Okamoto et al., 1996 and Okamoto et al., 1998). 최근의 연구에서는 대상물과 영상과의 관계를 2차원 부등각사상변환을 통해 설정하고 에피폴라 영상 및 수치고도모형을 생성하는 연구가 활발히 진행되고 있다(Ono, 1999).

---

\* 정희원 · (재)석곡관측과학기술연구원, 연구원 (E-mail:nonedge@hanafos.com)  
\*\* 정희원 · University of Calgary, Dept. of Geomatics, Post-doc(E-mail:emkim@ucalgary.ca)  
\*\*\* 정희원 · (재)석곡관측과학기술연구원, 연구원 (E-mail:tom51@sog.or.kr)  
\*\*\*\* 정희원 · (재)석곡관측과학기술연구원, 원장 (E-mail:yeubm@sog.or.kr)  
\*\*\*\*\* 정희원 · 경상대학교, 교수 (E-mail:hhyoo@nongae.gsnu.ac.kr)

이에 본 연구에서는 각종 응용분야에서 광범위하게 활용되고 있는 SPOT 위성영상을 대상으로 지상기준점을 이용하여 경사촬영(off-nadir viewing)각을 추정하는 기법을 개발하였다. 이러한 경사촬영각의 추정기법은 IKONOS 위성영상과 같은 고해상도 위성영상에도 적용이 가능하며 추정된 경사촬영각은 영상좌표를 보정하는데 사용되었으며 2차원 부등각사상변환을 이용하여 기존의 모형화 방법 보다 간결하고 정확도가 향상된 모형화 기법을 제안하였다. 정확도 검증을 위하여 두 쌍의 SPOT 위성영상을 이용하였으며 기존의 센서 모형화 방법들과의 비교를 수행하였다.

위성영상의 센서모형화를 위한 다양한 방법들이 제안되고 있음에도 불구하고, 다항식비례모형(RFM : Rational Function Model)은 상당부분 연구가 되었으나 그 외 제안된 모형식들간의 비교를 통한 각 모형식들의 장단점을 분석한 경우는 드물다.

따라서 기존의 엄밀 센서모형화 방법을 대체하고 있는 2차원 부등각사상변환, 직접선형변환(Direct Linear Transformation : DLT), 자체검정-DLT(Self-calibration DLT : SDLT) 등의 추상화된 모형화 방법을 기준점 수의 변화에 따라 검사점을 이용하여 영상좌표의 정확도를 비교하였다.

## 2. 제안된 이론

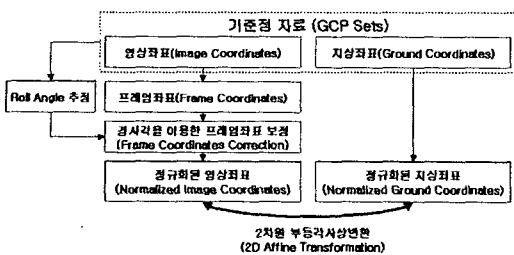


그림 1. 제안된 모형화 방법

본 연구에서 제안한 모형화 방법의 흐름은 그림 1과 같이 영상좌표를 영상의 중심을 원점으로 하는 프레임(frame)좌표로 변환하고 변환

된 프레임좌표와 지상기준점좌표를 이용하여 경사촬영각(roll angle)을 추정한다. 영상좌표와 지상좌표간의 관계는 2차원 부등각사상변환을 이용하였다.

### 2.1 경사촬영에 따른 영상좌표의 축척 보정

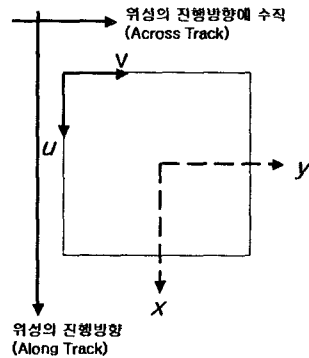


그림 2. 프레임좌표계 설정

영상의 좌측상단을 원점으로 한 영상소좌표  $(u, v)$ 와 영상의 중심을 원점으로 프레임좌표  $(x', y')$ 의 관계는 식 1과 그림 2에 나타내었다. 식 (1)에서  $u$ 는 행(row)  $v$ 는 열(column),  $d$ 는 영상소의 크기이며 본 연구에서 사용한 SPOT영상의 영상소의 크기는  $13\mu m$  이다.

$$\begin{aligned} x &= \left( u - \frac{\text{영상의 열의 수}}{2} \right) \times d \\ y &= \left( v - \frac{\text{영상의 행의 수}}{2} \right) \times d \quad (1) \end{aligned}$$

SPOT 위성의 경우 입체영역(stereo coverage)을 취득하기 위해서 위성의 진행방향과 교차되는 경사촬영각(roll angle)을 이용한다. 이때 투영변환(perspective)에서 2차원 부등각사상변환과 같은 평행투영으로 변환하는 과정에서 스캔라인(scan line)에 발생하는 축척변화(scale modification)을 고려하여야 한다. 그림 3은 경사촬영에 의한 축척의 변화를 나타낸 것이다.

동일한 자료를 적용시켜 보았다. 경사촬영각의 보정을 수행하는 모형식은 헤더정보에서 얻은 Incidence Angle을 사용하는 경우와 지상기준점을 이용하여 추정한 Roll-Angle을 사용하는 두가지 경우로 나누어 실험하였다. 식의 종류가 여러 가지 이므로 혼돈을 피하기 위하여 표 2와 같이 모형식에 번호를 로마자로 부여하였다.

표 2. 비교분석에 사용된 모형식

센서모형식	영상좌표 보정여부	보정에 사용한 Roll-Angle	모형식 번호
2차원 부등각 사상변환	○	추정값	I
DLT 1 (El-Masadili and Novak, 1996)	○	헤더정보	II
DLT 2 (Gupta and Hartley, 1997)	×	×	III
SDLT (Wang, 1999)	×	×	IV

### 4.3 실험 결과 및 분석

표 3은 26개 지상기준점을 각 모형식에 필요한 최소기준점에 따라 5, 6, 7, 9, 10, 15, 26개로 변화시켜가며 자료 A에 대해 각 방법별 모형식을 설정하고 검사점에 각 모형식을 적용한 후 평균제곱근 오차를 이용하여 정확도를 분석한 결과이다.

표 3 자료 A에 대한 모형식의 적용결과

구분 (A)	정확도	방법	기준점수							
			5	6	7	9	10	15	26	
좌측 영상	xy (pixel)	I	5750	1187	0.988	1.127	0.995	0.916	0.688	
		II	-	5863	3729	2.023	2.101	1.620	1.613	
		III	-	-	1.888	1.110	1.098	0.996	0.673	
		IV	-	-	2.477	1.259	1.183	1.239	0.688	
우측 영상	xy (pixel)	I	4239	1708	1.366	1.617	1.471	1.283	1.410	
		II	-	2746	5.017	1.828	1.765	1.986	1.278	
		III	-	-	1.388	1.625	1.576	1.344	1.241	
		IV	-	-	1.319	1.822	1.664	1.457	1.374	

표 3에서 모형식 I에 대해서는 기준점을 이용하여 추정한 경사촬영각을 이용하여 모형화를 수행하였으며, 기준점이 5, 6점 일 경우에는 검사점에 대한 오차가 많이 발생하였으나 7점 이상의 기준점이 영상전체에 골고루 분포되어 있을 경우에는 부영상소(sub-pixel)의 정확도를 나타내었다.

모형식 II의 경우는 헤더정보에서 제공하는 경사촬영각을 이용하여 영상좌표를 보정하고 있으며 비교된 4가지 모형식 중에서 모형화에 따른 오차가 가장 많이 발생하였다. 모형식 III과 IV는 기준점이 9개 이상일 경우(본 연구에서는 영상의 좌측, 중간, 우측에 각각 3점씩 선점하였음) 안정적인 결과를 나타내었다.

표 3에서 알 수 있듯이 기준점 수가 10개 이상일 경우에는 모형식 II는 기준점의 변화에 따라 수직방향 오차의 변화가 가장 크게 나타났으며, 그 외의 모형식 I, III, IV는 기준점 수가 10점 이상일 경우에 수평방향과 수직방향 성분의 오차에 큰 변화가 나타나지 않았다.

### 5. 결론

1. 2차원 부등각사상변환식으로부터 지상기준점을 이용하여 위성영상, 특히 SPOT 위성의 경사촬영각(roll angle)을 추정할 수 있는 기법을 개발하였으며, SPOT 위성의 헤더정보에서 제공하고 있는 경사촬영각과 매우 근접한 값을 얻을 수 있었다.
2. 공선조건식을 이용하는 엄밀 센서모형의 대안으로 사용되고 있는 각 모형식을 비교하였으며, 추정된 경사촬영각을 이용하여 영상좌표를 보정한 2차원 부등각사상변환식을 이용할 경우, 비교된 다른 모형식에 비해 가장 적은 수의 기준점을 이용하였을 경우에도 모형식의 결과가 안정적이었다.
3. 본 연구에서 제안한 위성의 촬영기하에 따른 영상좌표의 보정방법은 SPOT 위성 영상 뿐만 아니라 IKONOS 등의 고해상

도 위성영상에 대해서도 적용 가능할 것으로 사료된다.

### 참고문헌

1. El-Manadili, Y. and Novak, K. (1996) Precision Rectification of SPOT Imagery Using the Direct Linear Transformation Model, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 62, No. 1, pp. 67-72.
2. Gupta, R. and Hartley, R. I. (1997) Linear Pushbroom Cameras, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 189, No. 9, pp.963-975.
3. Habib, A., and Michel, Morgan, (2002) Epipolar Image Resampling from Push-Broom Imagery: Investigation and Preliminary Implementation. Interim project report submitted to the Korean Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI).
4. Hattori, S., Ono, T., Fraser, C., and Hiroyuki Hasegawa, (2000) Orientation of High-Resolution Satellites Images Based on Affine Projection, *International Archives of ISPRS 2000 Congress*, Vol, 33, B3, 359-366.
5. Ono, T., (1999) Epipolar Resampling of High Resolution Satellite Imagery, *IAPRS International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing(Sensors and Mapping from Space)*
6. Okamoto, A., Fraser, C., Hattori, S., Hasegawa, H., and Tetsu, Ono, (1998) An Alternative Approach to the Triangulation of SPOT Imagery, *IAPRS International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 32, B4, 457-462.
7. Okamoto, A., Hattori, S., Hasegawa, H., and Tetsu, Ono, (1996) Orientation and Free Network Theory of Satellite CCD Line-Scanner Imagery, *IAPRS International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol, 31, B3, 604-610.
8. SPOT Image Corporation, (1987), *SPOT User's Handbook - Reference Manual*, Vol. 1, Center Spatial de Toulouse.
9. Wang, Y., (1999) Automated Triangulation of Linear Scanner Imagery. Joint Workshop of ISPRS WG I/1, I/3 and IV/4, *Sensors and Mapping from Space*, Hanover, September 27-30.
10. Zhao, L., and Wei, Wang, (2003) A Solution to the Instability Problem in Rational Function Model Generation, 7th South East Asian Survey Congress, Category 5 - Photogrammetric Surveying and Remote Sensing.

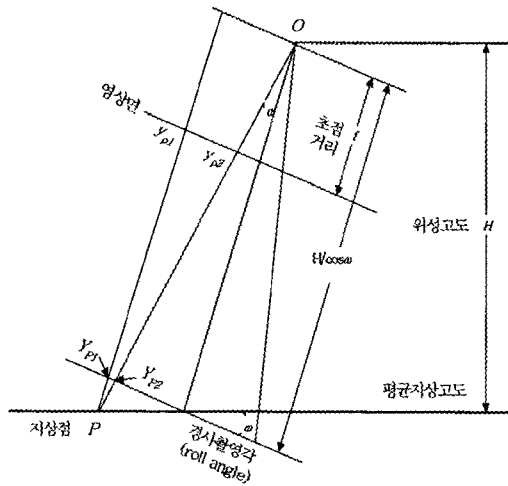


그림 3. 경사촬영에 의한 축척변화

그림 3에 표현된 기호는 다음과 같다.

$$s = \frac{f}{H/\cos\omega} : \text{추적}$$

$Y_{P1}$  : 평행투영에 의한 대상공간 점 P의 Y좌표

$Y_{P2}$  : 투영변환에 의한 대상공간 점 P의 Y좌표

$y_{p1}$  : 영상면에 역투영한 점 P의 y좌표

$y_{p2}$  : 영상면상의 점 P의 y좌표

경사보정각에 의해 발생하는 축척변화를 고려할 수 있으며 보정식은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다(Hattori et al., 2000, Habib et al., 2002, and Zhao et al., 2003).

$$y_{p1} = y_{p2} \frac{1}{1 - \frac{y_{p2} \cdot \tan\omega}{f}} \quad (2)$$

## 2. 비교분석을 위한 센서 모형식

본 연구에서 제안된 모형식의 효용성을 검증하기 위하여 기존에 연구되어 발표되었던 추상적 센서모형들과 비교하였다. 본 연구에서 제안한 모형식의 특성상 위성의 헤더정보를 이용하는 물리적 센서모형 보다는 지상기준점을 통한 일반적인 모형과의 비교를 수행하였다. 비교를 위해 사용된 모형식은 다음과 같다.

## 1) DLT 1

이 모형(El-Manadili and Novak, 1996)의 특징은 위성의 경사촬영과 지구자전에 의한 영상왜곡에 관한 보정을 수행한 후에 DLT(direct linear transformation)을 적용한 것이다. 영상좌표를 프레임좌표계로 변환하면서 생기는 오차에 대한 보정, 위성의 공칭위치(nominal position)의 변화에 따른 영향과 위성 속도벡터의 섭동(perturbations), 센서의 자세(attitude)에 대한 보정, 지구자전, 경사촬영(off-nadir viewing)에 의하여 발생하는 systematic distortions에 대한 보정은 영상의 행과 열에 적용되었으며 이는 스캔라인의 변위(shift), 또는 기복변위에 의한 영향을 줄이기 위함이다. 이와 같은 보정된 사진좌표  $(x, y)$ 와 지상좌표  $(X, Y, Z)$ 의 관계는 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} x &= \frac{L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \\ y &= \frac{L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \end{aligned} \quad (3)$$

## 2) DLT 2

이 모형식(Gupta & Hartley, 1997)은 아래의 두가지 가정사항으로부터 출발하였다.

- 센서는 지상에 대하여 등속도로 직선운동을 한다.

- 영상을 취득하는 동안의 표정요소는 불변한다. 따라서 관측면의 자세는 고정되어 있다.

이상의 가정사항으로부터 그림 4, 그림 5와 같은 촬영기하로부터 식 (4)과 같은 모형식을 생성하였다.

$$\begin{aligned} y &= k(m_{11}X + m_{12}Y + m_{13}Z + m_{14}) \\ x &= \frac{kuv}{kw} = \frac{m_{21}X + m_{22}Y + m_{23}Z + m_{24}}{m_{31}X + m_{32}Y + m_{33}Z + m_{34}} \end{aligned} \quad (4)$$

## 3) SDLT

푸시브룸(pushbroom) 센서의 하나의 스캔라

인에 공선조건식을 적용하고 외부표정요소를 시간에 관한 다항식으로 가정하고 위성 진행방향축의 회전을 0으로 가정함으로써 식 (5)와 같은 모형을 생성하였다(Wang, 1999).

$$\begin{aligned} x_p &= \frac{L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \\ y_p - L_{12}xy &= \frac{L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \end{aligned} \quad (5)$$

## 4. 적용실험

### 4.1 실험자료

제안된 이론의 적용을 위하여 본 연구에서는 그림 4와 표 1에 나타낸 SPOT 위성영상 한쌍을 사용하였다.

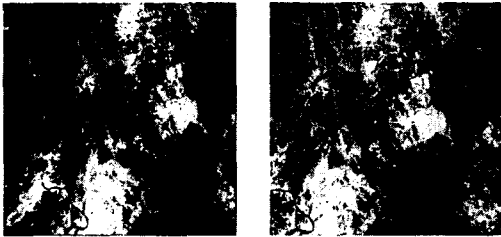


그림 4. 실험에 사용한 SPOT 위성영상

표 1. 사용된 영상자료의 세부사항

구분		자료 A (305277)		
		좌측영상	우측영상	
위성의 종류		SPOT-3	SPOT-3	
영상중앙 촬영시각		1995-04-04 02:39:41	1995-04-05 02:20:24	
영상중심	위도	N036°22'03"	N036°22'03"	
	경도	E127°11'51"	E127°17'45"	
분광모드		전정(Panchromatic)		
영상 모서리 좌표	좌상단	위도	N036°41'51"	N036°40'43"
		경도	E126°55'06"	E127°02'05"
	우상단	위도	N036°33'18"	N036°34'59"
		경도	E127°40'30"	E127°42'24"
	좌하단	위도	N036°10'32"	N036°09'05"
		경도	E126°44'05"	E126°53'00"
	우하단	위도	N036°02'04"	N036°03'23"
		경도	E127°29'12"	E127°33'02"
경사촬영각(Deg)		L22.7°	R08.6°	

본 위성영상의 지형보정(geo-referencing)을 위하여 26개의 지상기준점(GCP : Ground Control Points)과 10개의 검사점(CP : Check Points)을 취득하였다. 기준점 취득 방법으로는 항공사진의 항공삼각측량의 결과를 기준으로 취득하였다. 영상을 기준으로한 GCP와 CP의 분포는 그림 5과 같으며 기준점과 검사점은 영상 전반에 걸쳐 고르게 분포시켰다.

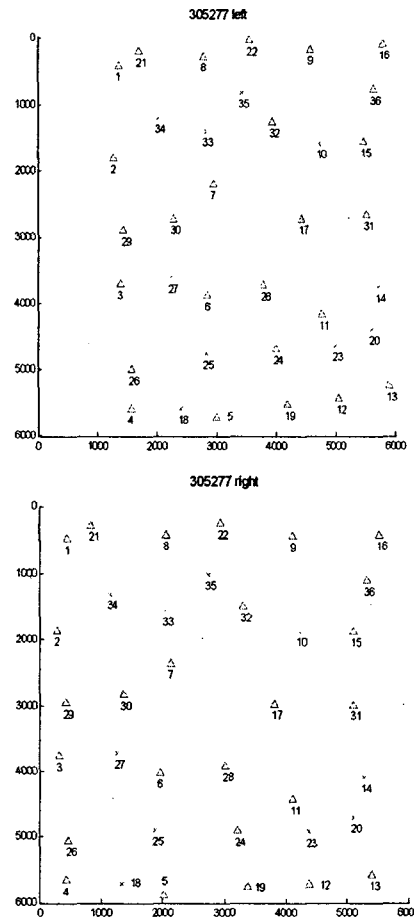


그림 5. 기준점 분포(Δ : 기준점, × : 검사점)

### 4.2 실험방법

제안된 센서모형의 정확도를 평가하기 위하여 가장 일반적인 방법인 RMSE(Root Mean Square Error)를 이용하였다. 제안된 방법의 정확도 뿐만 아니라 기타 여러 가지 모형식과의 비교분석을 위하여 표 2에 제시한 모형식에