한국측량학회지, 제 21권 제 3호, pp. 255~260(2003년 9월 30일)

SPOT-5(HRG) 입체위성영상의 3차원 모델링 기법 연구
Modeling Methods for SPOT-5 HRG Stereo Pair Images

최선용[1] · 신대식[2] · 이용웅[3]
Choi, Sun Yong · Shin, Dae Sik · Lee, Yong Woong

Abstract

In this paper, we generate the 3D geometric sensor model of SPOT-5 HRG stereo images which are processed in Supermode and have 2.5m ground spatial resolution, and calculate the RPC(Rational Polynomial Coefficients) for acquisition of topographic information using the exterior orientation parameters which are determined in the 3D geometric sensor modelling process. It is shown that SPOT-5 images can be modelled with rmse 3.3m accuracy by the bundle adjustment method used to model the existing SPOT series. Considering the accuracy of RPC's results with rmse 0.03m accuracy, the RPC model can replace the sensor model, if we emphasize the simplification and the cost.

요 지

본 논문에서는 2.5m 해상도를 갖는 SPOT-5 위성의 HRG(High Resolution Geometric) Supermode 입체영상에 대해 3차원 센서모델을 제작하였으며, 센서모델로부터 계산된 외부표정요소를 이용하여 근실시간적으로 지형정보 획득이 가능한 RPC(Rational Polynomial Coefficients) 모델을 제작하였다. 2개의 HRG 센서로부터 촬영된 5m 해상도 영상을 이용하여 2.5m 해상도 영상을 제작하는 Supermode 처리 영상의 센서모델링을 위해 이전 SPOT 계열의 선형 CCD array 영상에 적용한 공선조건에 의한 번들조정 방법을 적용할 수 있음을 확인하였으며 정확도는 rmse 3.3m 이내였다. 또한 센서모델로부터 계산된 RPC 모델이 센서 모델을 대체할 수 있을 정도의 rmse 0.03m 정확도를 가질 수 있음을 실험을 통해 확인하였다.

핵심용어(Keywords) : SPOT-5, HRG, RPC, Stereo Modeling

1. 서 론

1986년 발사된 SPOT 1호를 비롯하여 4호까지 4기의 위성을 개발하였던 프랑스의 CNES(French Centre National d'Etudes Spatials)는 그동안 비약적인 발전을 이룬 전자광학 및 우주기술을 기초로 2002년 5월 고해상 센서와 새로운 궤도 방향의 입체 촬영방식을 도입한 SPOT 5호를 개발하여 현재 원격탐사 영상 제공 서비스를 하고 있다. SPOT 5호는 이전의 다른 SPOT 위성들과 동일한 궤도특성 및 촬영 정책을 가지고 운용하고 있으므로, 이전의 SPOT 계열 영상과의 비교분석이 용이하며, 또한 탐측기의 전정색 영상 해상도가 10m에서 2.5m로 향상되어 보다 더 세밀한 지형 영상정보를 취득할 수 있게 되었다.

SPOT-5 위성만의 독특한 Supermode 처리 작업은 SPOT-5 HRG 전정색 영상의 해상도를 5m에서 2.5m로 변환하는 작업이다. Supermode 작업을 위해 탑재체에서는 12,000 개의 CCD로 구성된 2개의 동일한 Linear Array가 동일한 초점평면에서 1/2 화소(약 2.5m)만큼 이동된 영상을 취득한다. HRG 센서의 Supermode 작업은 Interpolation, Deconvolution, Noise Removal 이라는 3단계 작업을 통해 수행되며, 5m 해상도의 12,000×12,000 화소를 갖는 2개의 영상이 2.5m 해상도를 갖는 24,000×24,000 화소의 1개 영상을 생성한다. 따라서 이러한 Supermode 영상은 하나의 센서에서 촬영한 영상이 아니고 2개의 센서에서 촬영된 영상을 조합하여 제작하기 때문에 물리적 센서모델을 직접 적용할 수 있는지에 대한 연구가 필요하게 되었다(SPOT-5 위성특성, 2002).

본 연구의 목적은 SPOT-5 위성의 2.5m 해상도 HRG Supermode 입체 위성영상에 대해 3차원 센서 모델링 기술

1) 정회원 · 국방과학연구소 선임연구원(E-mail:sychoi@add.re.kr)
2) 정회원 · 국방과학연구소 선임연구원(E-mail:dsshin@add.re.kr)
3) 정회원 · 국방과학연구소 책임연구원(E-mail:lpllyw@add.re.kr)

을 개발하여 지형정보를 추출할 수 있는 센서의 외부표정요소를 산출하는 것이며, 더불어 근실시간 지형정보 획득이 가능한 RPC 모델의 분수 다항식계수를 계산하는 것이다.

이를 위해서 본 연구에서는 HRG Supermode 센서 모델링을 위해 Pushbroom 방식 영상센서의 공선조건 원리를 이용한 번들 조정기법을 적용하였으며, 대용량 영상의 실시간 처리를 지원하는 RPC 모델은 센서 모델링 결과로부터 계산된 외부표정요소를 이용하여 일정간격으로 구성한 다량의 격자점 영상좌표와 이러한 격자점에 대해 다양한 고도로부터 생성한 지상좌표의 관계를 이용하여 최소제곱 방법으로 구현하였다. 또한 외부표정요소 초기치를 추정하기 위해서는 영상과 함께 제공되는 XML(Extensible Markup Language) 형태의 DIMAP(Digital Image MAP)에 포함된 위성의 궤도 및 자세 정보를 이용하였다.

본 연구에 포함된 주요 내용은 다음과 같다.

- DIMAP 구조 분석 및 외부표정요소 초기치 계산을 위한 정보 추출
- 3차원 센서 모델의 초기치 추정
- 입체영상 3차원 센서 모델링 및 정확도 평가
- RPC 모델링 및 정확도 평가

2. 센서 모델링

2.1 DIMAP 정보 추출

SPOT-5 HRG 입체영상의 DIMAP에 포함된 위성이나 지상의 위치정보는 meter 단위, 센서 자세정보는 도(degree) 또는 라디안(Radian) 단위로 제공된다. DIMAP으로부터 외부표정요소 초기치 계산을 위한 자료를 표 1에 보이는 keyword를 통해 추출할 수 있다.

표 1. DIMAP의 구조

```
<Dimap_Document>
  ⋮
<Point>
   <Location>
      <X>~</X> <Y>~</Y> <Z>~</Z>
   </Location>
   <Velocity>
      <X>~</X> <Y>~</Y> <Z>~</Z>
   </Velocity>
   <TIME>~</TIME>
</Point>
  ⋮
<Angles>
    <TIME>~</TIME>
    <YAW>~</YAW>
    <PITCH>~</PITCH>
    <ROLL>~</ROLL>
</Angles>
  ⋮
<Look_Angles>
   <DETECTOR_ID>~</DETECTOR_ID>
   <PSI_X>~</PSI_X>
   <PSI_Y>~</PSI_Y>
</Look_Angles>
  ⋮
</Dimap_Document>
```

2.2 센서 모델링 수행 방법

본 연구에서 수행한 모델링 방법에 대한 개략적인 흐름은 그림 1과 같다.

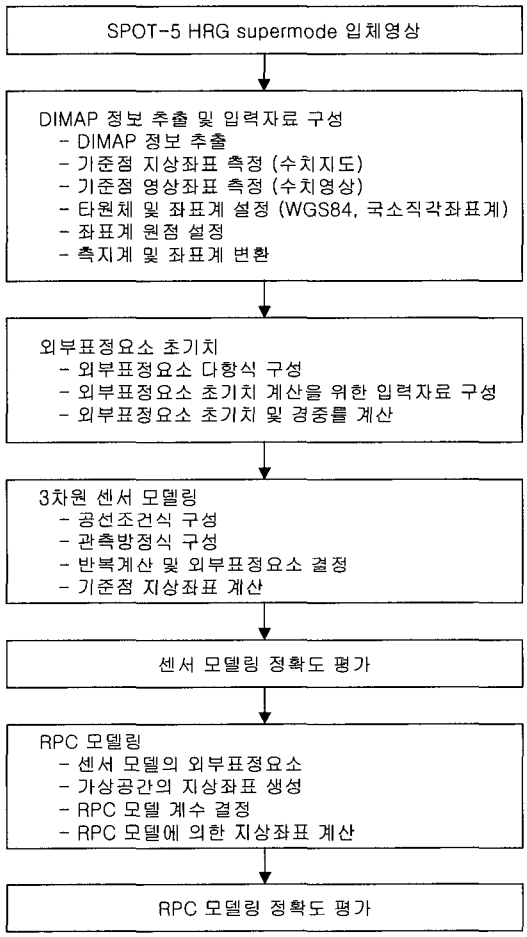

그림 1. 연구 흐름도

2.3 입력자료 구성

HRG Supermode 영상의 초점거리 1.082m, CCD의 가상크기 3.25㎛, 영상의 스캔라인간 가상의 촬영시간 간격은 376㎲으로 설정하였으며, 지상좌표계는 국소직각좌표계로서 X축은 원점에서의 진북방향, Y축은 X축과 직교하는 서쪽방향, Z축은 천정방향으로 정의되는 오른손 좌표계로 설정하였다(신대식 등, 2003). 국소직각좌표의 원점은 동경

표 2. 영상 특성

	좌측영상		우측영상	
HRG Sensor	A	B	A	B
ID	53082790302060235261A	53082790302060235261B	53072790302120220041A	53072790302120220041B
중심촬영시각	03/02/06 02:35:30	03/02/06 02:35:30	03/02/12 02:20:07	03/02/12 02:20:07
GRS	308279	308279	307279	307279
입사각	20.364339	20.364588	-6.866250	-6.866250
경사각	-17.901878	-17.901878	6.017418	6.017418
태양방위각	160.249817	160.249861	154.844110	154.844269
태양고도	36.746384	36.746385	37.222009	37.221863
밴드	Pan	Pan	Pan	Pan
Map Name	SCENE 5 308-279 03/02/06 02:35:26 1 T		SCENE 5 307-279 03/02/12 02:20:04 1 T	
화면중심위치	128.282780 35.175802		128.130285 35.174630	
위치(경위도)	UL: 128.019568 35.518357 UR: 128.734373 35.353175 LR: 128.553715 34.830215 LL: 127.843275 34.994559		UL: 127.879625 35.500378 UR: 128.529596 35.375510 LR: 128.375654 34.848775 LL: 127.729845 34.973299	

127° 30 ′ 0 ″, 북위 38° 30 ′ 0 ″, 높이 0m로 설정하였다.

한 라인의 픽셀간 가상의 물리적 거리는 3.25㎛이므로 사진측량좌표상에서 임의의 픽셀 p에 대하여 $d=(p-12,000)\times3.25\times10^{-6}$이며, 원점으로부터 임의의 라인 1 까지의 시간 t 값은 각 라인간 촬영시간 간격 0.376 millisec를 적용하여 $t=(l)\times3.76\times10^{-4}$이다.

본 연구에서 사용한 영상은 진주지역으로 약 $45\times50km^2$의 대부분 산지이며 시가지와 약간의 평지가 포함된 전형적인 우리나라 지형 특성을 갖는다. 본 연구에 사용한 영상 제원은 표 2와 같다.

그림 2. 기준점 배치도

모델링에 사용한 기준점의 배치는 그림 2와 같고, 지상좌표는 국립지리원 제작 1/5,000 수치지도로부터 취득했다. 모든 지상좌표체계는 WGS 84 타원체의 타원체고도를 기준으로 국소직각좌표체계로 변환하여 사용하였다.

2.4 외부표정요소 추정

외부표정요소 추정을 위한 기본자료의 구성을 위해 위성의 위치(X_L, Y_L, Z_L)와 자세(K_L, Φ_L, Ω_L)에 대해 시간의 2차 함수로 구성된 다음과 같은 외부표정요소 다항식을 적용하였다. 2차 다항식은 상수 또는 1차 다항식에 비해 대부분의 입체모델에서 비교적 안정적으로 수렴된다. (신대식 등, 2000).

$$\begin{aligned} K_L &= K_0 + K_1 t + K_2 t^2 \\ \Phi_L &= \Phi_0 + \Phi_1 t + \Phi_2 t^2 \\ \Omega_L &= \Omega_0 + \Omega_1 t + \Omega_2 t^2 \\ X_L &= X_0 + X_1 t + X_2 t^2 \\ Y_L &= Y_0 + Y_1 t + Y_2 t^2 \\ Z_L &= Z_0 + Z_1 t + Z_2 t^2 \end{aligned} \quad (1)$$

외부표정요소의 추정을 위해서는 국소직각좌표 원점, 화면중심의 촬영시각, 위성궤도 위치자료(임의 시각과 위성위치), 화면표정각(Scene Orientation Angle), 센서의 좌우 경사각(Roll Angle), 영상 라인간 촬영시간 간격, 국소직각좌표 원점, 위성궤도 위치자료, 위성센서 자세자료, 화면표정각, 센서의 좌우 경사각, 영상 라인간 촬영시간 간격등에 대한 자료가 필요하다.

2.5 센서모델링 결과

다음 식은 본 연구에서 적용한 각 스캔라인에 대한 공선조건식이다.

$$F = 0 + f\frac{r_{11}(X-X_L)+r_{12}(Y-Y_L)+r_{13}(Z-Z_L)}{r_{31}(X-X_L)+r_{32}(Y-Y_L)+r_{33}(Z-Z_L)}$$
$$G = y + f\frac{r_{21}(X-X_L)+r_{22}(Y-Y_L)+r_{23}(Z-Z_L)}{r_{31}(X-X_L)+r_{32}(Y-Y_L)+r_{33}(Z-Z_L)} \quad (2)$$

위식에서 ($x=0$, y)는 공선조건에 의해 변환된 지상좌표(X, Y, Z)에 대응하는 영상좌표이며, y는 스캔라인으로 위성의 진행방향에 대해 직각이다. f는 센서의 초점거리, r는 자세각, X_L, Y_L, Z_L는 센서의 위치를 나타낸다.

본 연구에서는 수치지도로부터 측정한 30개의 지상좌표 중 18점을 기준점으로 12점을 검사점으로 이용하여 3차원 센서 모델링을 수행하고 외부표정요소를 계산하였다. 수치자료에서 취득한 지상좌표를 참값으로 가정하여 모델로부터 계산된 지상좌표와 비교하여 다음과 같이 모델링 RMSE를 계산하였다. 모델링 관련 프로그램은 Visual C++을 이용하여 직접 개발하여 사용하였다.

표 3. 3차원 모델링 정확도 **(단위 : m)**

	RMSE(X)	RMSE(Y)	RMSE(Z)
기준점(18점)	2.5	2.9	2.7
검사점(12점)	3.7	3.8	4.1
전 체(30점)	3.1	3.3	3.3

3. RPC 모델링

3.1 RPC 모델링 과정 및 결과

RPC 모델 제작을 위해 센서 모델로부터 계산한 외부표정요소를 사용하였으며, 100(10×10)개의 영상좌표를 하나의 영상내에서 균등하게 배치하고 각각의 영상점에 대해 대상지역의 최대 최소 고도를 10개 레벨로 나누고 각각의 레벨에서 지상좌표를 생성하였다. 10개의 레벨을 이용할 경우 센서모델과 거의 유사한 결과를 보여주고 있다.(김혜진 등, 2002 ; OGC, 1999)

그림 3과 같이 구성한 1000개의 지상좌표와 영상좌표의 관계를 이용하여 RPC 모델의 계수를 계산하였다. RPC 모델 방정식은 다음과 같이 구성하였다(OGC, 1999).

$$l = \frac{Num_L(U,V,W)}{Den_L(U,V,W)}$$
$$s = \frac{Num_S(U,V,W)}{Den_S(U,V,W)} \quad (3)$$

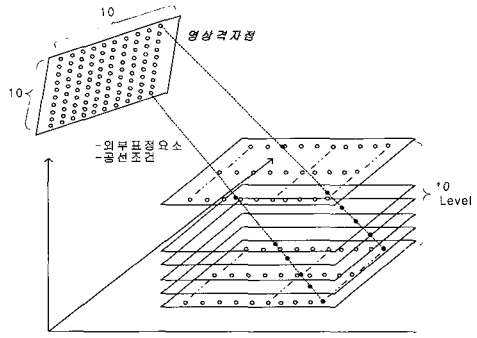

그림 3. 가상 3차원 좌표 생성

$$Num_{L(U,V,W)} = a_0 + a_1V + a_2U + a_3W + a_4UV + a_5VW + a_6UW + a_7V^2 + a_8U^2 + a_9W^2 + a_{10}UVW + a_{11}V^3 + a_{12}U^2V + a_{13}VW^2 + a_{14}UV^2 + a_{15}U^3 + a_{16}UW^2 + a_{17}V^2W + a_{18}U^2W + a_{19}W^3$$

$$Den_{L(U,V,W)} = 1 + b_1V + b_2U + b_3W + b_4UV + b_5VW + b_6UW + b_7V^2 + b_8U^2 + b_9W^2 + b_{10}UVW + b_{11}V^3 + b_{12}U^2V + b_{13}VW^2 + b_{14}UV^2 + b_{15}U^3 + b_{16}UW^2 + b_{17}V^2W + b_{18}U^2W + b_{19}W^3$$

$$Num_{S(U,V,W)} = c_0 + c_1V + c_2U + c_3W + c_4UV + c_5VW + c_6UW + c_7V^2 + c_8U^2 + c_9W^2 + c_{10}UVW + c_{11}V^3 + c_{12}U^2V + c_{13}VW^2 + c_{14}UV^2 + c_{15}U^3 + c_{16}UW^2 + c_{17}V^2W + c_{18}U^2W + c_{19}W^3$$

$$Den_{S(U,V,W)} = 1 + d_1V + d_2U + d_3W + d_4UV + d_5VW + d_6UW + d_7V^2 + d_8U^2 + d_9W^2 + d_{10}UVW + d_{11}V^3 + d_{12}U^2V + d_{13}VW^2 + d_{14}UV^2 + d_{15}U^3 + d_{16}UW^2 + d_{17}V^2W + d_{18}U^2W + d_{19}W^3$$

$$[1\ V\cdots\ WU^2\ W^3][a_o\ a_1\cdots a_{19}]^T - l\times[1\ V\cdots\ WU^2\ W^3][1\ b_1\cdots b_{19}]^T = 0$$

$$[1\ V\cdots\ WU^2\ W^3][c_o\ c_1\cdots c_{19}]^T - s\times[1\ V\cdots\ WU^2\ W^3][1\ d_1\cdots d_{19}]^T = 0$$

$$\begin{bmatrix}\nu_l\\ \nu_s\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}1\cdots W^3 & -lV\cdots & -lW^3 & 0\cdots & 0 & 0\cdots & 0\\ 0\cdots 0 & 0\cdots & 0 & 1\cdots W^3 & -sV\cdots & -sW^3 & \end{bmatrix}\begin{bmatrix}a_o\\ \vdots\\ a_{19}\\ b_1\\ \vdots\\ b_{19}\\ c_o\\ \vdots\\ c_{19}\\ d_1\\ \vdots\\ d_{19}\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}L_l\\ L_s\end{bmatrix} \quad (4)$$

위의 식에서 다항식 계수를 구하기 위해 경중률 및 라그랑지 계수 등의 고려 없이 다음과 같은 단순 최소제곱조정 방법을 사용하였다. 단순 최소 제곱 방법으로도 매우 정확한 결과를 보여줌을 확인할 수 있다.

$$\nu = AX - L \tag{5}$$

$$X = (A'A)^{-1}A'L \tag{6}$$

위의 식과 같이 구성한 RPC 모델과 센서모델의 차이를 식별하기 위해 입체영상 RPC 계수를 이용하여 지상좌표를 계산하였으며 센서모델에서 계산된 지상좌표와 비교한 (최선용 등, 2003) 결과는 표 4와 같다.

표 4. RPC 모델과 센서모델의 비교(30점) **(단위 : m)**

	X	Y	Z
평균	-0.005	-0.022	-0.011
표준편차	0.011	0.022	0.017
RMSE	0.012	0.031	0.021

3.2 RPC 모델 검증

표 4에서 알 수 있듯이, RPC 모델링 결과는 센서 모델링 결과와 거의 일치하고 있으므로 3차원 센서 모델을 대체할 수 있는 실시간 모델로 활용할 수 있을 것으로 판단한다.

그러나 위의 실험에 사용한 기준점은 수치지도에서 추출이 용이하도록 대부분 평탄한 지역에 위치한 식별이 명확한 도로의 교차점이므로 고도 및 지형기복 변화에 대한 분석은 곤란하다. 물리적인 의미를 포함하고 있지 않은 RPC 모델의 특성상 국지적으로 지형 기복의 변화 또는 그 밖의 다양한 원인으로 인해 정확도 저하가 나타날 수 있다. 따라서 본 연구에서는 RPC 모델의 지형고도에 따른 비교를 위해 센서모델에서 사용한 기준점과는 별도로 모델내에서 골고루 분포한 고도가 높은 지점을 검사점으로 선정하여 센서 모델링 결과와 비교하였다. 그림 4는 별도로 추출한 높은 고도를 갖는 검사점의 배치를 나타낸다.

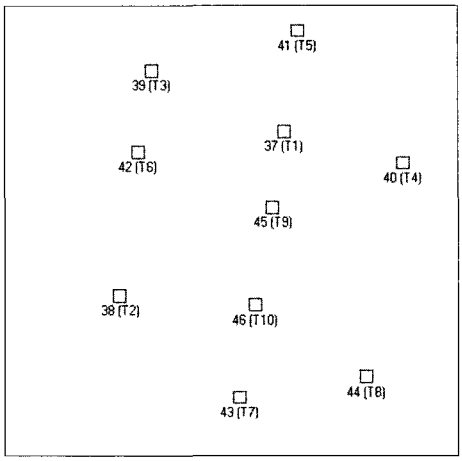

그림 4. RPC 검사점 배치(고고도)

표 5. RPC 모델링 검사점 오차(고고도) **(단위 : m)**

번호	센서모델결과①			RPC 모델결과②			차이(②-①)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	dX	dY	dZ
T1	430579.2	3903836	197.491	430579.2	3903836	197.483	0.011	-0.019	-0.008
T2	403967.7	3888123	193.567	403967.7	3888123	193.542	0.013	0.000	-0.025
T3	415250.2	3915857	148.613	415250.2	3915857	148.593	-0.009	-0.039	-0.020
T4	444999.0	3896090	478.351	444999.0	3896090	478.316	0.030	0.013	-0.035
T5	435508.3	3916355	235.362	435508.3	3916355	235.366	-0.006	-0.056	0.004
T6	410920.4	3905899	221.382	410920.4	3905899	221.350	0.008	-0.011	-0.032
T7	416357.2	3871165	286.410	416357.2	3871165	286.426	-0.003	-0.052	0.016
T8	433439.4	3869785	236.016	433439.4	3869785	236.004	0.008	-0.045	-0.012
T9	426676.4	3894507	485.828	426676.5	3894507	485.815	0.027	0.021	-0.013
T10	421338.0	3882558	107.647	421338.0	3882558	107.649	0.008	-0.024	0.002
						평균	0.009	-0.021	-0.012
						RMSE	0.015	0.033	0.020

표 5는 센서 모델로부터 계산한 좌표와 RPC 모델의 좌표 차이를 보여준다.

위의 표 5에서 보는 바와 같이 별도로 실험한 고도가 높은 검사점에 대한 좌표 비교가 표 4의 평탄한 지역의 값과 거의 유사하게 나타남을 확인할 수 있다. 따라서 RPC 모델이 평탄한 지역뿐만 아니라 고도가 높은 지역에서도 센서 모델과 거의 일치하고 있어 센서모델의 대체가 가능하다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 SPOT-5 위성의 HRG 센서로부터 Supermode 처리된 입체영상을 대상으로 공선조건식에 의한 3차원 센서 모델링과 RPC 모델링 연구를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

SPOT-5 표준영상에서 제공되는 DIMAP 형태의 자료로부터 SPOT-5 위성의 위치정보와 2.5m 해상도의 HRG 센서 자세 정보의 초기치를 추출하고 1/5,000 축척의 수치지도에서 취득한 지상기준점을 이용하여 Supermode 입체영상의 센서 모델링이 가능함을 확인하였으며, 센서 모델링 결과를 이용하여 RPC 모델 다항식 계수를 산출할 수 있었다.

1. SPOT-5 HRG PAN 입체영상의 3차원 센서 모델링

SPOT-5 HRG PAN 입체영상을 대상으로 번들 조정이론과 영상센서의 물리적 성질(Push-Broom 방식의 선형 CCD Array)을 적용하고 위성영상과 함께 제공되는 DIMAP 정보를 이용하여 3차원 기하학적 모델링을 수행한 결과 X, Y, Z 방향에서 각각 rmse 3m 정도의 모델링 정확도를 확인함으로써, 대상지역의 정밀한 지상기준점 자료가 주어질 경우에 임의의 지점에 대한 절대위치좌표, 수치표고자료, 정사영상 등의 3차원 지형정보를 획득할 수 있게 되었다.

2. SPOT-5 HRG PAN 입체영상의 RPC 모델링

3차원 모델링을 통해 계산된 영상의 외부표정요소와 규칙격자 영상좌표에 대한 다양한 고도에서의 지상좌표를 이용하여 RPC 다항식의 계수를 계산하였다. 입체영상에 대한 RPC 모델을 이용하여 계산한 지상좌표와 3차원 모델링을 통해 계산된 지상좌표의 차를 비교한 RPC 모델링 결과는 센서 모델링 결과와 거의 일치함을 확인하였다. 실험결과를 통해 볼 수 있듯이 실시간 처리가 가능한 RPC 모델은 3차원 센서 모델과 약간의 차이가 있으나 센서 모델을 대체하여 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

신대식, 최선용 (2000), SPOT 스트립 위성영상 기하학적 모델링, 국방과학연구소, KTRC-409-000411.

신대식, 최선용 (2003), 한국 지역별 측지계 변환계수 결정, 국방과학연구소, TEDC-409-030225.

안기원, 임환철, 서두천 (2002), 고해상도 인공위성 영상데이터의 기하보정을 위한 RFM의 적용, 한국측량학회지, 제20권, 제2호, pp. 51-60.

최선용, 신대식 (2003), 고해상 위성영상을 이용한 기준점 제작기술, 국방과학연구소, TEDC-409-030226.

Kim Hye-jin, Kim Dae-sung, Lee, Hyo-sung, Kim Yong-il (2002), A study on the generation of the KOMPSAT-1 RPC model, *ISPRS- Commission III Symposium*, Graz, Austria.

Open GIS Consortium (1999), Topic 7: The Earth Imagery Case, pp. 99-107.

SPOT-5 위성 및 센서 특성 (2002), http://www.spotimage.fr/spot5/ensavoirplus/eng/plus_frame.html

(접수일 2003. 8. 12, 심사일 2003. 9. 5, 심사완료일 2003. 9. 8)