

RFM 으로 생성된 레이더 정사영상 자료의 정확도 분석

이선일*, 김윤희*, 이규성**

한진정보통신 GIS 기술연구소*, 인하대학교 지리정보공학과**

요약 : 사면관측 원리에 의해 획득되는 레이더 영상은 레이더파의 입사각도와 지표면의 경사도 및 방위각에 따라 기하학적 왜곡이 발생하게 된다. 전 국토의 70% 이상이 산악지형인 국내 여건을 감안한다면 레이더 영상의 정량적 활용을 위해서는 정밀한 기하보정이 반드시 필요하다.

본 연구에서는 RADSARSAT-1 SAR 영상에 대하여 세 가지 기하보정 방법을 적용하였다. 먼저 GCP 만을 이용한 단순기하보정을 수행하였고, 두번째로 위성의 자세와 위치정보 등을 이용하여 센서모델을 통한 보정을 하였다. 마지막으로 다양한 영상자료에 적용할 수 있는 RFM(Rational Function Model)을 이용하여 기하보정을 하였다. 이 세 가지 방법으로 기하보정된 레이더 영상의 위치정확도를 모의 레이더 영상과 비교 분석하였다. 또한 RFM 을 이용한 보정결과를 검증하기 위하여 SIR-C 영상을 추가로 분석하였다.

1. 배경

마이크로 웨이브파를 센서로부터 직접 발사한 후 목표물의 특성에 따라 다양하게 나타나는 반송파의 강약을 기록하여 영상을 획득하는 레이더 원격탐사는 밤, 낮의 조건이나 기상 상태에 영향을 받지 않는 이점을 갖고 있다. 최근 레이더 다중 파장 영상을 이용하여 산림지역의 임분 요소를 추정하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 다중 파장, 편광 레이더의 후방산란계수를 통하여 산림의 생체량을 추정하는 연구가 수행되었으며(Ranson et al,1999), 레이더 신호와 입목의 재적, 흉고단면적과의 관계에 대한 연구가 수행되었다(Hallikainen et al. 2000 : Chipman et al.2000).

이러한 레이더 자료의 특성은 국내 토지의 70%를 차지하는 산림에 대한 분석에 매우 유용하다. 하지만, 경사관측에

의하여 영상을 획득하는 레이더 영상의 원리에 따라 산악지역에서 발생하는 기하학적 왜곡은 레이더 영상의 활용에 있어 제한요소가 될 수 있다. 마이크로 웨이브파와 사면의 기하학적 관계에 의하여 산악 지형에서는 레이더 안테나를 향하고 있는 경사면이 지상 거리보다 단축되어 짧게 나타나는 Foreshortening, 경사면의 위아래 위치가 바뀌어 보이는 Layover, 안테나와 반대사면에서 나타나는 Shadow 현상 등이 발생하게 된다. 이와 같은 기하학적 왜곡을 보정하여 레이더 영상의 특성을 잘 활용하기 위해서는 우선 레이더 영상의 기하보정이 정확하게 이루어져야 한다. 이를 위해 단순기하보정, 센서모델 보정, RFM 방법으로 기하 보정을 수행하고, 각 결과물을 분석하여 레이더 영상에 적합한 기하보정 방법을 분석하였다.

2. 레이더 영상 기하보정 방법

2.1 레이더 센서모델

위성과 타겟사이의 기하학적 모형을 도플러 중심주파수로 정의하면 다음과 같다.

$$f_D = \frac{2}{\lambda R_{ij}} (V_s - V_t) \cdot (R_s - R_t) \quad (2-1)$$

여기서, f_D 는 도플러 중심주파수, λ 는 레이더 파장, R_{ij} 는 지상의 타겟과 위성과의 거리를 의미하며, V_s 는 센서의 속도벡터, V_t 는 타겟의 속도벡터, R_s 는 센서의 위치 벡터, R_t 는 타겟의 위치벡터이다(curlander, J.C, 1982; John, R.K, 1987).

센서와 타겟 사이의 거리는 아래의 식과 같다.

$$r = [(R_s - R_t) \cdot (R_s - R_t)]^{1/2} \quad (2-2)$$

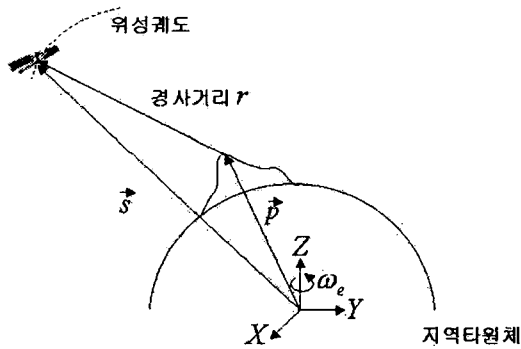


그림 2.1 레이더 관측의 기하학적 구성

지상의 위치에 센서의 위치를 구하기 위해서는 도플러방정식(2-1)과 경사거리(2-2)를 이용하여 해를 구하게 된다. 위성의 위치가 시간 t 에 따라 변하는 다항식 $(S_x(t), S_y(t), S_z(t))$ 일때, 위성의 속도는 t 에 대하여 편미분한 것이다. 위성과 타겟과의 기하학적 모형이 그림 2.1과 같을 때, 위

도플러 중심주파수, 타겟과 위성과의 거리는 다음과 같이 정리된다 (정수, 1997).

$$F_1(S_x, S_y, S_z) = r - |p - s| \quad (2-3)$$

$$F_2(S_x, S_y, S_z) = f_{DC} - \frac{2(p-s) \cdot (p'-s')}{\lambda |p-s|} \quad (2-4)$$

여기서, p 는 지구중심에서 타겟까지의 벡터이며, s 는 지구중심에서 센서까지의 벡터이다. p', s' 은 p, s 를 시간에 대하여 1차 미분한 속도가 된다. 이 함수는 비선형 함수이므로 Taylor 급수전개에 의해 선형화된 후, 지상기준점을 이용하여 최소제곱과정을 반복하여 수행하게 된다. 이러한 과정을 통하여 위성의 위치를 구하고, 수치표고모형과 레이더 Parameter를 이용하여 기하보정 영상을 생성하게 된다.

2.2 RFM 방식

RFM은 영상의 화소 위치에 대응하는 지상점의 관계가 아래의 식(2-5)와 같은 고차다항식의 형태로 표현된다.

$$r_n = \frac{P_1(X, Y, Z)}{P_2(X, Y, Z)} = \frac{\sum_{i=0}^{m1} \sum_{j=0}^{m2} \sum_{k=0}^{m3} a_{ijk} X^i Y^j Z^k}{\sum_{i=0}^{n1} \sum_{j=0}^{n2} \sum_{k=0}^{n3} b_{ijk} X^i Y^j Z^k}$$

$$c_n = \frac{P_3(X, Y, Z)}{P_4(X, Y, Z)} = \frac{\sum_{i=0}^{m1} \sum_{j=0}^{m2} \sum_{k=0}^{m3} c_{ijk} X^i Y^j Z^k}{\sum_{i=0}^{n1} \sum_{j=0}^{n2} \sum_{k=0}^{n3} d_{ijk} X^i Y^j Z^k} \quad (2-5)$$

여기서, $a_{ijk}, b_{ijk}, c_{ijk}, d_{ijk}$ 는 RPC(Rapid Positioning Coefficient) 또는 RFCs(Rational Function Coefficient) 이다. 식(2-5)에서 일차항 계수인 $a_0 - a_3$ 는 Optical projection의 왜곡, 2차항 계수인 $a_4 - a_9$ 는 지구곡률, 대기굴절, 렌즈 왜곡을 표현하며, 그 이외의 계수는 카메라 진동과 같은

오차를 보정한다.

위의 방정식은 고차함수로 계산되어, 계수들의 값이 매우 커지게 되므로 값을 안정화하는 것이 필요하다. 이를 위해 영상좌표(r_n, c_n)와 지상좌표(X, Y, Z)를 -1.0과 1.0 사이의 범위를 갖게 아래의 식(2-6)을 이용하여 정규화 하였다.

$$r_n = \frac{r - r_0}{r_s}, c_n = \frac{c - c_0}{c_s} \quad (2-6)$$

$$X_n = \frac{X - X_0}{X_s}, Y_n = \frac{Y - Y_0}{Y_s}, Z_n = \frac{Z - Z_0}{Z_s}$$

여기서, r_n, c_n 은 정규화된 영상좌표, r, c 는 2차원 영상좌표, r_0, c_0 은 정규화를 위한 offset, r_s, c_s 는 scale이다. X_n, Y_n, Z_n 은 정규화된 3차원 지상좌표, X, Y, Z 는 3차원 지상좌표, X_0, Y_0, Z_0 는 지상좌표의 offset 이며, X_s, Y_s, Z_s 는 3차원 지상좌표의 scale 이다. RPC는 최소 제곱법을 반복하여 결정하게 되는데, RFM식을 선형화 하면 다음과 같은 관측 방정식이 생성된다.

$$V_r = \left[\frac{1}{B} \frac{Z}{B} \Lambda \frac{X^3}{B} - \frac{rZ}{B} \Lambda - \frac{rX^3}{B} \right] \cdot J - \frac{r}{B}$$

$$V_c = \left[\frac{1}{D} \frac{Z}{D} \Lambda \frac{X^3}{D} - \frac{cZ}{D} \Lambda - \frac{cX^3}{D} \right] \cdot K - \frac{c}{D} \quad (2-7)$$

$$B = (1ZY \Lambda X^3 Y^3) \cdot (1b_1 \Lambda b_{19})^T$$

$$D = (1ZY \Lambda X^3 Y^3) \cdot (1d_1 \Lambda d_{19})^T$$

$$J = (a_0, a_1 \Lambda a_{19}, b_0, b_1 \Lambda b_{19})^T$$

$$K = (c_0, c_1 \Lambda c_{19}, d_0, d_1 \Lambda d_{19})^T \text{ 이다.}$$

식(2-7)에서 미지수는 총 78개 이므로 이 식을 풀기 위해서는 최소 39개의 지상기준점이 필요하다. 식(2-7)을 행렬로

정리하면 아래의 식(2-8)와 같다.

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J \\ K \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ C \end{bmatrix}$$

$$V = A \cdot X - L$$

$$A^T W^2 A X - A^T W^2 L = 0 \quad (2-8)$$

식(2-8)의 정규방정식에 의하여 RPC를 구할 수 있으며, RPC를 이용하여 관측 방정식을 재구성하고, 최소제곱법의 반복 수행을 통하여 RPC를 결정한다. 하지만, 계수행렬 ($A^T W A$)이 RFC간의 종속성(dependency)으로 인하여 반복 계산시 진동, 발산하는 불량조건 행렬이 된다.

진동하거나 발산하는 행렬을 수렴하도록 하기 위해, 행렬의 condition number를 향상시킨다. 본 실험에서는 계수 행렬의 condition number를 줄이기 위해 Tikhonov Regularization을 적용하였다.

$$(A^T W^2 A + h^2 E) X - A^T W^2 L = 0 \quad (2-9)$$

식 (2-9)에서 E 는 단위행렬이며 h 는 Regularization에 사용되는 매개변수이다. Tikhonov Regularization과 최소제곱법을 반복적으로 적용하여 RPC를 계산하는 것은 아래의 식 (2-10)과 같다.

$$X_{(0)} = 0, W_{(0)} = W(X_{(0)}) = E \quad (2-10)$$

$$X_{(s)} = X_{(s-1)} + (A^T W_{(s)}^2 A + h^2 E)^{-1} \cdot (A^T W_{(s)} V_{(s-1)})$$

여기서, $V_{(0)} = L, V_{(s)} = L - AX_{(s)}$ 이며, s 는 1, 2 ... n 이다. h 의 범위는 0.0002에서 0.0004 사이로 하였으며, 이 범위에서 적은 횟수의 반복계산으로 높은 정확도를 보였다(Tao., 2001).

3. 실험 및 결과

3.1 Radarsat 기하보정

실험에 사용된 레이더 영상자료는 서울을 포함하여 동서 방향으로 35km, 남북 방향으로 30km에 해당한다(그림 3-1). 북한산, 천마산, 문길산, 관악산 등이 있으며, 표고가 최대 775m에 이르는 구릉지에서 경사가 급한 산들이 분포하고 있다.

실험에 사용된 레이더 영상자료는 1999년 7월 25일에 획득되었고, 비행은 북에서 남(방위 9.44°)으로 우측을 바라보면서 이루어졌다. 798km의 고도에서 44.1°의 입사각으로 영상이 획득되었다. 우측을 바라보며, 비행이 이루어졌기 때문에 동쪽 사면이 실제 지상거리보다 단축되고, 서쪽 사면이 늘어난 것을 그림 3.1에서 확인 할 수 있다.



그림 3.1 RADARSAT SAR 실험 대상지역
표 3.1 실험에 사용된 Radarsat-1의 특성

촬영일	1997년 7월 25일
촬영모드	Descending/Right
입사각	44.1°
비행방향	9.44°
고도	798km

원 영상에서 실험에 사용될 지역을 잘라내고, 레이더영상에서 흔히 나타나는 스펙클 잡음(speckle noise) 현상을 지감시켜 판독을 용이하게 하기 위해 Frost (1982) 필터를 적용하였다. 이 필터는 목표물에서 반사된 순수한 신호값은 주변의 화소들과 독립적인 관계가 아닌 공간적으로 연속성의 관계를 가진다는 자기상관 (autocorrelation) 개념을 이용한다.

필터링이 된 영상을 이용하여 세 가지 방법으로 기하보정이 수행되었다. 우선, 연구 지역이 비교적 넓지 않기 때문에 지상기준점(GCP)만으로 1 차 다항식을 도출하여 단순기하보정을 하였다. 지상기준점은 1:5,000 수치지도에서 도로의 교차점을 이용하였고, 영상내에 넓고 고르게 분포 하도록 선정하였다.

다음으로 레이더 센서 모델을 이용한 보정을 수행하였다. 센서 모델을 적용하기 위해 위성의 위치정보(ephemeris data), 자세정보, 파장, 촬영시간 등과 같은 레이더 Parameter 가 헤더 파일에서 획득되었고, 수치표고모형(DEM)은 1:5,000 수치지도로부터 10m 격자크기로 만들어졌다. 센서모델로 기하보정을 하기 위해 상용 소프트웨어인 Imagine 8.4 가 사용되었다. 지상 기준점은 1:5,000 수치지도에서 획득되었고, RMSE 는 1 화소(12.5m) 이하였다.

마지막으로 보정을 위해 RFM 방식이 사용되었으며, 그림 3.2 는 RFM 방식의 기하보정 흐름을 보여주고 있다. RFM 방식으로 기하보정을 하기 위해서는 많은 수의 지상기준점이 요구된다. 평지에서는 수치지도를 이용하여 지상기준점을 획득할 수 있으나, 산악지역에서는 수치지도, 정사 보정된 광학영상 등을 이용하여 지상기준

점을 획득하는데 어려움이 따른다. 산악 지역에서 지상기준점을 선정하기 위해 모의 레이더 영상을 이용하였다. 수치표고모형과 촬영당시의 위성의 높이, 비행방향, 입사각 등을 통해 생성된 모의 레이더 영상은 그림 3.4 와 같으며, 등고선과 중첩한 영상에서 알 수 있듯이 산악 지역에서 위치적인 오차는 발생하지 않는다. 모의 레이더 영상과 수치지도를 이용하여 80 개의 지상기준점을 고도에 따라 고르게, 넓게 분포하도록 선정하였다. 오차가 큰 지상기준점을 제거한 후, 70 개의 지상기준점(그림 3.3)으로 RPC 를 생성하였고, RPC 와 수치표고모형을 이용하여 기하보정을 하였다.

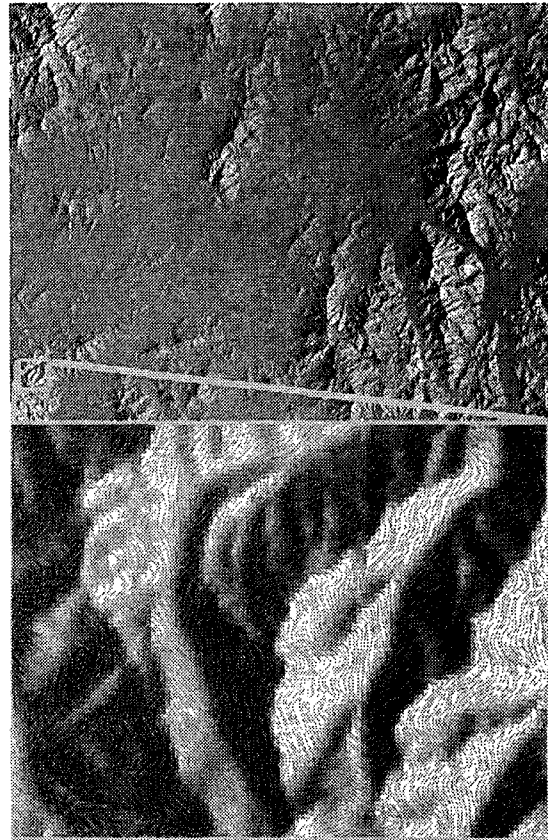


그림 3.4 모의 레이더 영상(상)과 1:5,000 수치지도의 등고선을 중첩한 영상(하)

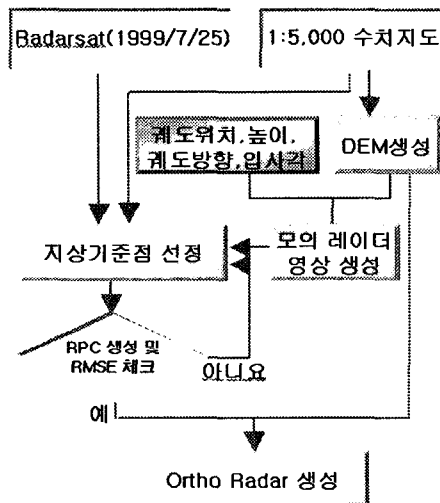


그림 3.2 RFM 을 이용한 정사레이더 생성과정

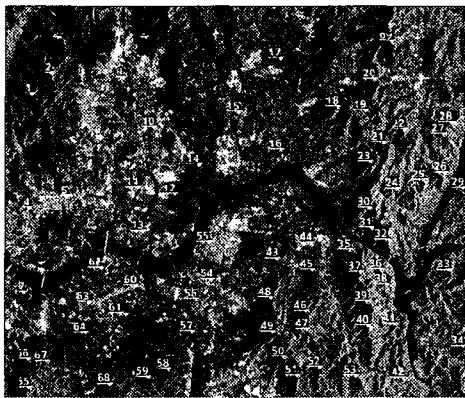


그림 3.3 RFM 보정에 사용된 지상기준점

3.2 RADARSAT-1 기하보정 정확도 분석

세가지 방법으로 기하보정된 영상자료와 모의 레이더 영상을 육안 판독하였다. 아래 그림 3.5는 검단산 주변의 영상으로 우측 상단에 있는 영상이 모의레이더 영상, 좌측 상단이 단순기하보정, 좌측 하단이 센서 모델로 보정된 영상, 우측하단이 RFM 방식으로 보정된 영상이다. 능선과 능선이 만나는 지점에서 센서모델, RFM으로 보정된 영상은 모의 레이더 영상과 거의 동일한 위치를 가지나, 단순 기하보정된 영상은 기하보정 후에도 여전히 foreshortening 현상이 남아있어, 능선이 교차하는 곳이 실제 위치보다 우측에 놓여 있음을 알 수 있다.

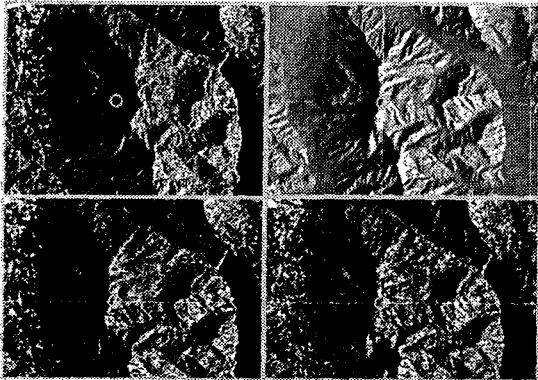


그림 3.5 단순기하보정(좌상), 모의레이더(우상), 센서모델로 보정된 영상(좌하)과 RFM으로 보정된 영상(우하) - 검단산일대

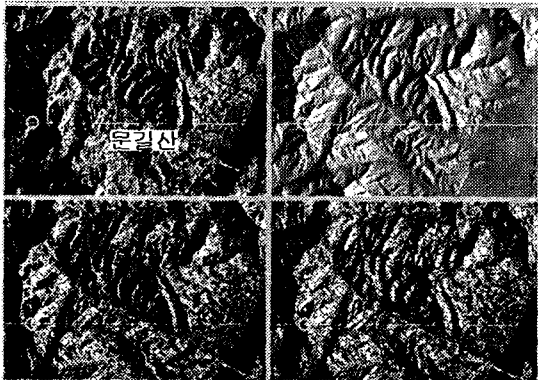


그림 3.6 단순기하보정(좌상), 모의레이더(우상), 센서모델로 보정된 영상(좌하)과 RFM으로 보정된 영상(우하) - 문길산일대

그림 3.6은 문길산 주변의 영상으로 단순기하보정된 영상은 여전히 기하학적 왜곡을 포함하고 있다. 센서모델과 RFM으로 보정된 영상을 모의레이더와 비교할 때, 기하학적 왜곡이 현저히 줄어들었으나, 문길산 정상 주변의 작은 능선의 형태를 보면, 센서모델로 보정된 영상은 모의레이더 영상과 비교했을 때, 동쪽 사면에 발생한 foreshortening 현상이 여전히 남아 있다. 반면, RFM으로 보정된 영상의 경우는 모의레이더 영상과 매우 흡사한 지형적 형태로 복원된 것을 알 수 있다.

표 3.2 세가지 방법으로 보정된 영상의 잔차와 RMSE(단위, m)

점	단순기하보정		센서모델보정		RFM보정	
	Vx	Vy	Vx	Vy	Vx	Vy
1	411.1	-57.6	-28.4	-12.4	-31.0	-34.3
2	393.1	-61.7	-29.3	49.3	-0.1	11.7
3	303.6	-54.8	-45.4	3.9	-11.8	-31.2
4	270.5	-11.9	-38.8	32.4	-8.0	37.3
5	254.0	-60.6	-61.2	16.2	-35.4	-20.6
6	376.9	-50.7	-51.1	40.9	3.3	4.0
7	245.6	-34.6	-6.7	32.7	9.6	-11.0
8	276.9	-54.2	-33.8	4.0	-2.6	-11.6
9	387.9	-30.7	-33.6	24.3	19.9	66.8
10	393.2	-45.8	-15.1	54.8	12.9	37.9
11	150.9	-12.5	-38.2	6.5	3.7	-7.8
12	319.7	-60.9	-14.5	3.8	-11.9	18.2
13	287.0	-44.9	-39.9	-22.1	-26.4	-41.6
14	343.0	-33.3	-47.3	24.9	4.9	25.8
15	344.2	-46.5	-49.9	15.0	-56.4	-20.1
RMSE	318.7		45.6		31.9	

세 가지 방법으로 보정된 영상에 대하여 검수점을 이용하여 수치적인 정확도를 구해 보았다. 검수점은 지상기준점으로 사용되지 않은 점들이 사용되었다. 평지의 경우 도로의 교차 지점 등에서 7점을 추출하였는데, 세 가지 방법으로 보정된 영상에서 모두 RMSE가 1화소 이내로 들어왔다. 레이더 영상에서 왜곡이 심하게 발생하는 산악 지역의 오차를 구하기 위해 15개의 검수점이 선정되었으며, 기준으로는 모의레이더 영상이 이용되었다. 표 3.2는 세가지 방법으로 보정된 영상의 잔차와 RMSE를 보여주고 있다. GCP 만을 이용한 단순기하보정 방법으로 보정된 영상은 산악

지역의 왜곡으로 RMSE가 318.7 m였다.

센서모델을 이용하여 보정된 영상은 RMSE가 45.6m이고, 이는 약 3.5개의 화소 만큼 오차가 발생한다는 것이다. RFM으로 보정된 영상의 RMSE는 31.9m로 2.5개의 화소에 해당한다. RFM으로 보정된 영상이 센서모델로 보정된 영상보다 1화소 만큼 위치 정확도가 높게 나타났다.

3.3 SIR/C 기하보정과 정확도 분석

RFM 방식을 이용한 보정이 Radarsat-1과 다른 고도와 비행방향을 갖는 레이더 영상에서도 유사한 정확도를 갖는지를 분석하기 위해 1994년 4월 12일 서울 주변을 촬영한 SIR/C 영상을 이용하였다.

표 3.3 실험에 사용된 SIR/C 영상의 특성

촬영일	1994년 4월 12일
촬영모드	Descending/Right
입사각	40.1°
비행방향	137.841°
고도	226.218km



그림 3.7 SIR/C 실험 대상지역

표 3.3과 그림 3.7은 실험에 사용된 SIR/C 영상의 특성과 대상지역을 보여주고 있다. 서쪽에서 동쪽으로 비행을 하였기

때문에 북쪽 사면에 foreshortening 현상이 발생함을 알 수 있다. RFM 방식을 적용하기 위해서 SIR/C 영상의 촬영 정보와 DEM으로부터 모의 레이더 영상을 제작 하였다. Radarsat-1에 RFM을 적용한 것과 동일한 과정이 SIR/C의 기하보정을 위해 사용되었고, 75개의 지상기준점이 사용되었다.

그림 3.8과 3.9는 북한산, 문길산 주변의 모의레이더 영상, 단순기하보정 영상과 RFM으로 보정된 영상을 보여준다. 단순기하보정된 영상은 레이더 안테나와 사면의 기하학적 관계에 의하여 북쪽 사면에 발생한 foreshortening 현상이 남아있지만, RFM 방법으로 보정된 영상은 모의레이더 영상과 매우 유사한 기하학적 형태를 가지고 있다. 산악지역에서 10개의 검수점을 이용하여 RMSE를 구하였는데, 단순기하보정된 영상의 RMSE는 230.2 m 이고, RFM으로 보정된 영상은 23.75(1.9 화소)m로 나타났다.

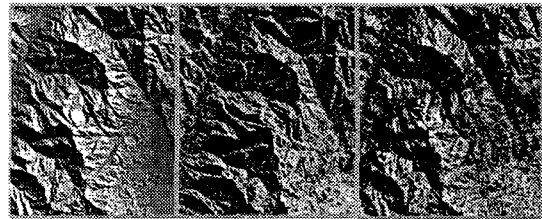


그림 3.8 모의레이더 영상(좌), 단순기하보정(중)과 RFM으로 보정된 영상(우) - 북한산

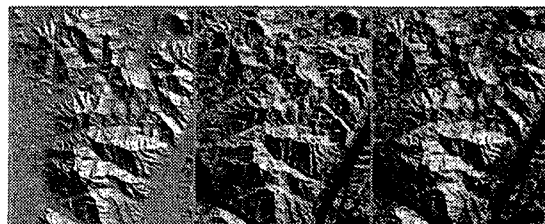


그림 3.9 모의레이더 영상(좌), 단순기하보정(중)과 RFM으로 보정된 영상(우) - 문길산

4. 결론

세 가지 기하보정 방법으로 Radarsat-1 영상을 보정하였을 때, 단순기하보정의 결과물은 원 영상이 산악지형에서 갖는 왜곡을 그대로 가지고 있지만, 센서모델과 RFM으로 보정된 영상은 기하학적 왜곡이 현저히 감소한 것을 알 수 있다. 검수점을 이용한 정확도 분석에서 RFM으로 보정된 결과물이 센서모델을 이용한 결과물에 비하여 1화소 정도 높은 정확도를 보였다. 그러나, 레이더 영상에서 능선과 능선이 만나는 점을 기준으로 선정함으로 발생하는 위치오차를 고려하면, 수치적으로 RFM 방식이 센서모델보다 좋은 결과를 도출한다고 설명하기 어렵다. 하지만, 문길산 주변의 능선에서 알 수 있듯이 RFM을 이용한 보정이 산줄기들의 형태적인 모습을 더 잘 복원하였다. RFM 보정 방법이 위성레이더와 다른 고도와 비행방향을 갖는 SIR/C 영상에서 검증되었으며, RMSE가 2화소 이내로 들어와 높은 위치 정확도를 보였다.

레이더 영상을 획득하는 동안 센서의 위치와 자세 등 정확한 궤도 정보를 획득하지 못하였을 때, 영상의 정밀한 기하보정에는 어려움이 따른다. 이러한 경우 레이더 영상의 정밀 기하보정을 위해 RFM 방식을 적용하는 것이 매우 유용하다. 하지만, 레이더 영상에서 산악지역의 지상기준점을 선정하는 것에 어려움이 수반되며, 많은 수의 지상기준점을 요구한다는 단점을 갖는다.

참고문헌

정 수, 1997, Radarsat 위성의 위치결정과 SAR 자료의 정확도 향상에 관한 논문, 연세대학교 박사학위논문

- Frost, V.S., J.A. Stiles, K.S. Shamugan, and J.C. Holtzman, 1982. A Model for Radar Images and its Application to Adaptive Digital Filtering of Multiplicative Noise, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 4(2) : 157-166.
- Chipman, J.W., T.M. Lillesand, J.D. Gage, and S. Radcliffe, 2000. Spaceborne Imaging Radar in Support of Forest Resource Mangement, *PE & RS*, 66(11) : 1357-1366
- Hallikainen, M., J. Pulliainen and L. Kurvonen, 2000, *Microwave Remote Sensing of Boreal Forest*, EMEA 2000 in Kanazawa, pp. 1-17
- Ranson, K.J., G. Sun, V.I. Kharuk and K. Kovacs, "Characterizaion of Forests in Western Sayani Mountains, Siberia from SAR data", *Proc. IGARSS*, 1999
- OpenGIS consortium, 1999, *The OpenGIS Abstract Specification Model Topic 7 : The Earthe Imagery Case*, URL: <http://www.opengis.org/public/abstract/99-107.pdf>
- Tao.C.V. and Y. Hu, 2001, *A Comprehensive Study of the Rational Function Model for Photogrammetric Processing*, *PE & RS*, 67(12) : 1347-1357
- Kwok, R., J.C. Curlander, and S.S. Pang, 1987, *Rectification of Terrain Induced Distortion in Radar Imagery*, *PE & RS*, 53(5) : 507-513
- Curlander, J.C., 1982, *Location of Spaceborne SAR Imagery*, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 20(3) : 359-364