

SFR기법을 이용한 영상 융합의 정확도 향상에 관한 연구

윤공현*

A Study on the Improvement of Image Fusion Accuracy Using Smoothing Filter-based Replacement Method

Kong-Hyun Yun*

요 약

영상융합은 저해상도 다중분광영상과 고해상도 전정영상을 통합시키는 기법으로서 현재 까지 널리 사용되고 있다. 하지만, 기존의 사용되어온 방법은 융합과정시 적지 않은 분광정보의 왜곡을 불러일으키거나 웨이블릿 기법과 같은 경우 주파수 분해 및 복원 과정이 필요하므로 처리시간이 길어지는 단점이 있다. 본 연구에서는 비교적 간단한 분광정보 보존 기법: 평활화 필터 기반 대체기법을 제안하였다. 이 기법은 단순화 시킨 태양 방사 및 지표면 반사 모델에 기반을 두고 있으며 저주파수 영역 필터링 영상과 전정영상의 해상도 비율을 이용하여 분광학적 특성의 왜곡을 최소화시키며 전정영상의 상세한 지형묘사를 그대로 유지 시킨다. 또한 이 방법은 RGB 의 컬러 합성 뿐만 아니라 단일밴드의 융합에도 적용 시킬 수 있다. 제안된 기법을 검증하기 위하여 IKONOS 전정영상과 다중분광영상을 이용하여 분광정보의 왜곡정도와 공간정보의 상세함에 대한 분석을 하였다. 시각적 검토 및 통계적 방법을 통해 기존의 융합기법과 비교한 결과 분광정보 보존의 측면에서 제안된 SFR 기반 융합기법이 더 나은 결과를 보여주었다.

주요어 : 영상융합, SFR, 분광정보

ABSTRACT : Image fusion techniques are widely used to integrate a lower spatial resolution multispectral image with a higher spatial resolution panchromatic image. However, the existing techniques either cannot avoid distorting the image spectral properties or involve complicated and time-consuming decomposition and reconstruction processing in the case of wavelet transform-based fusion. In this study a simple spectral preserve fusion technique: the

*연세대학교 건설공학연구소, 연구원(e-mail:ykh1207@yonsei.ac.kr)

Smoothing Filter-based Replacement(SFR) is proposed based on a simplified solar radiation and land surface reflection model. By using a ratio between a higher resolution image and its low pass filtered (with a smoothing filter) image, spatial details can be injected to a co-registered lower resolution multispectral image minimizing its spectral properties and contrast. The technique can be applied to improve spatial resolution for either colour composites or individual bands. The fidelity to spectral property and the spatial quality of SFM are convincingly demonstrated by an image fusion experiment using IKONOS panchromatic and multispectral images. The visual evaluation and statistical analysis compared with other image fusion techniques confirmed that SFR is a better fusion technique for preserving spectral information.

Keywords : image fusion, SFR, spectral information

1. 서 론

원격탐사 영상에 있어서 공간해상도와 분광해상도는 서로 상반되는 요소이다. 즉 주어진 신호대 잡음비에 대하여 공간 해상도를 높일 경우 파장대가 커지게 되며 분광력을 높이는 경우에는 그 반대로 파장대가 좁아지게 되기 때문이다. 바로 이러한 문제점을 극복하여 저해상도 고분광영상과 높은 공간 해상도의 영상을 통합하는 기법이 영상융합이다. 영상융합을 하므로써 높은 공간해상도 영상이 갖는 장점인 상세한 지표면 묘사와 고분광해상도 영상이 갖는 다중 파장대 영상을 동시에 얻게되므로써 지물의 식별뿐만 아니라 분류(classification)와 같은 적용분야에 큰 도움이 된다.

여러 영상융합 방법중 RGB 컬러합성영상을 통하여 융합하는 기법은 바로 IHS 방법이다. 이 기법은 저해상도 RGB 영상

의 명도성분(Intensity)을 고해상도 전정영상으로 대체하여 IHS의 역변환을 통하여 고해상도 고분광 영상을 생성하는 기법이다. 이 기법은 지형학적 및 텍스처 보존 측면에서 좋은 성과를 보여준 것으로 보고되고 있다 (Chavez and Bowell, 1988; Carper et al, 1990). 그리고 또 다른 비교적 효율적이라 평가받는 융합 방법인 PCA(Principle component analysis)변환 기법도 현재까지 많이 사용되고 있으며 이 기법은 R,G,B 영상을 PC 변환을 통하여 PC-1, PC-2, PC-3 영상을 생성하고 PC-1 영상을 전정영상으로 대체한 다음 역변환을 통하여 융합을 시도하는 기법이다.

이러한 영상융합 방법들은 명도 성분 I의 R, G, B 밴드 파장대와 전정영상의 파장대와 일치 하지 않는 경우에 컬러합성 과정에서 분광왜곡이 발생한다 (Liu and Moore 1998; Zhang 2002). 이러한 문제는 특히 식생지역이나 농작물지역에서 심각하며 특히 융합영상의 촬영시기가 다른

경우 계절적 요인에 따른 식생상태가 달라지기에 더욱 큰 분광왜곡이 발생된다. 분광 시그니처(spectral signatures)에 기반을 둔 대부분의 원격탐사 응용분야에 있어서 원 분광정보의 보존은 매우 중요하기 때문에 융합결과 영상을 통한 영상판독 및 분류시 이 점에 대한 충분한 고려가 있어야 한다.

최근 가장 많이 연구되고 있는 융합기법은 웨이블릿 기반 융합이다. 이 방법은 주파수 공간에서 영상 신호의 분할(decomposition)과 복원(reconstruction)을 피라미드 구조로 처리된다 (Li et al, 1995; Garguet-Duport et al., 1996; Yocky 1996; Zhou et al., 1998; Ranchin and Wald, 2000). 이 방법은 최적화 컨트롤에 따라서 IHS 또는 PCA 방법보다 분광정보 보존 측면에서 더 나은 결과를 보여주고 있다. 하지만 훨씬 복잡하고 처리시간이 길어지는 단점이 있으며 영상등록(co-registration)의 정확도에 민감하다. 그러하므로 빠른 처리와 실시간 시각화(visualization)를 필요로 하는 원격탐사 응용분야에서는 효율적인 방법이라 보긴 어렵다. 이 외의 방법으로서는 1998년 Liu와 Moore는 PBIM(Pixel Block Intensity Modulation) 기법을 처음 제안하였다 이 방법을 이용하여 Landsat TM 30m 공간해상도를 갖는 영상과 TM6 120m 공간해상도인 열밴드(thermal band)를 특성의 변화없이 융합시켰다. PBIM기법은 저해상도의 픽셀 블록(pixel block)을 이용하여 고해상도의 전정영상을 삽입시키는 방법이다.

본 연구에서는 영상융합을 위한 기법으로 SFR(Smoothing Filter-based Replacement)

방법을 제시하였다. 이 방법은 PBIM을 개선시킨 방법으로서 이동 평균필터를 사용한다는 차이점이 있다. 제안된 기법은 IKONOS 영상을 대상으로 실험한 결과 다른 기존의 방법보다 분광정보 특성의 보존측면에서 상대적으로 우수함을 보여주었다.

2. SFR 기법의 원리

광학영상의 밴드 λ 의 지표면 반사에 따른 밝기값(Digital Number)은 주로 다음 두 가지 요소에 의하여 결정된다. 즉, 지표면에 부딪히는 태양의 방사도 $E(\lambda)$ 와 지표면 특성에 따른 분광반사도 $\rho(\lambda)$ 이다. 이러한 사실을 기반으로 1987년 Elachidms는 다음과 같은 식(1)을 제안하였다..

$$DN(\lambda) = \rho(\lambda)E(\lambda) \quad (1)$$

식(1)을 근거로 $DN(\lambda)_{low}$ 을 밴드 λ 의 저해상도 영상의 밝기값이고 $DN(\gamma)_{high}$ 을 고해상도 영상에서 상응하는 밝기값이라 하고 이 두개의 영상이 유사한 태양의 투광(illumination)을 갖으면(예를들어, 동종센서이거나 TM과 SPOT의 경우) 다음 식(2)와 (3)이 도출된다.

$$DN(\lambda)_{low} = \rho(\lambda)_{low}E(\lambda)_{low} \quad (2)$$

$$DN(\gamma)_{high} = \rho(\lambda)_{high}E(\gamma)_{high} \quad (3)$$

여기서 제안된 SFR은 다음 아래 식(4)와 같이 정의를 한다.

$$\begin{aligned}
 DN(\lambda)_{gen} &= \frac{DN(\lambda)_{low}DN(\gamma)_{high}}{DN(\gamma)_{mean}} \\
 &= \frac{\rho(\lambda)_{low}E(\lambda)_{low}\rho(\gamma)_{high}E(\gamma)_{high}}{\rho(\gamma)_{low}E(\gamma)_{low}} \\
 &\approx \rho(\lambda)_{low}E(\lambda)_{high}
 \end{aligned} \tag{4}$$

단, $DN(\lambda)_{gen}$ 은 $DN(\lambda)_{low}$ 에 대응되어 최종 생성되는 영상의 밝기값이며 $DN(\gamma)_{mean}$ 은 $DN(\lambda)_{low}$ 의 해상도에 대응되는 고해상도 영상의 영상소에 대한 $DN(\gamma)_{high}$ 밝기값의 국소 평균 밝기값이다.

태양 방사에 대한 지표면에 반사는 지형에 의하여 달라진다. 만약 두개의 영상이 같은 밝기값 범위(range)로 양자화된다면 똑같은 지형조건이므로 같은 방식으로 반사가 되므로 해상도와 상관없이 $E(\lambda) \approx E(\gamma)$ 이 된다 (Liu et al. 1997). 그리고 $DN(\gamma)_{mean}$ 값을 계산할 때 주변 영상소에 큰 분광학적 변이가 발생하지 않는다고 가정한다면 $\rho(\lambda)_{low} \approx \rho(\gamma)_{high}$ 라 할 수 있다. 그러하므로 다음 아래 식에서

$$\frac{\rho(\lambda)_{low}E(\lambda)_{low}\rho(\gamma)_{high}E(\gamma)_{high}}{\rho(\gamma)_{low}E(\gamma)_{low}}$$

$E(\lambda)_{low}$ 와 $E(\gamma)_{low}$ 는 서로 상쇄되며 마찬가지로 $\rho(\gamma)_{low}$ 과 $\rho(\gamma)_{high}$ 은 상쇄된다. 그리고 $E(\gamma)_{high}$ 는 $E(\lambda)_{high}$ 으로 대체될 수 있다. 국소 평균값 $DN(\gamma)_{mean}$ 은 평활화 컨벌루션 필터(smoothing convolution filter)를 이용하여 전정영상의 모든 영상소에 대하여 계산이 된다. 이때 필터의 크기는 전정영상과 다중분광영상의 공간해상도 비율에 따라 결정이 된다. 예를 들어 IKONOS 전정영상(공간해상도 1m)와 IKONOS 다중분광

영상(공간해상도 4m)을 융합할 경우에는 필터 사이즈는 4x4로서 전정영상의 국소 평균값을 계산하기 위한 평활화 컨벌루션 필터는 다음 아래와 같이 정의 된다.

$$\frac{1}{16} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

SFR과 PBIM의 차이는 바로 이러한 국소필터의 사용여부이다. PBIM 기법에서는 다중분광영상의 지형적 범위에 해당되는 전정영상의 모든 영상소에 대하여 단 한번의 평균값 필터를 사용한다. 이러한 경우 인접한 영상소에 대해서는 큰 영향은 없을 수 있지만 서로 거리가 떨어진 위치에 영상소끼리는 분광특성이 달라질 수 있기 때문에 문제가 발생한다.

식(4)에서 $DN(\gamma)_{mean}$ 은 다중분광영상의 한 영상소에 대해 상응되는 전정영상의 영상소값들의 평균값이므로 근사화된 다중분광영상이라 할 수 있다. 또한 $DN(\gamma)_{mean}$ 의 영상은 실제 공간 해상력은 다중분광영상과 같으며 또한 동시에 전정영상의 영상의 크기가 일치하므로 지형학적 특성과 텍스처에서 일치한다고 볼 수 있다. 바로 이러한 근거로 식(4)에서 $E(\gamma)$ 값과 $E(\lambda)$ 는 근사하다라고 볼 수 있다. 결국 식(4)에서 최종 결과식 $DN(\lambda)_{gen}$ 은 전정영상으로부터 구해진 $E(\lambda)_{high}$ 값, 즉 지형과 텍스처의 요소와 다중분광영상에서 구해진 반사도, $\rho(\lambda)_{low}$ 의 곱이라고 할 수 있다. 이 식으로부터 명도 성분의 대체를 할 때 사용되는 전정영상의 분광특성과는 무관함을 알 수 있다. 이러한 점은 IHS나

PCA 및 다른 기법에서 명도성분의 대체 시 전정영상 밴드와 다중분광영상의 밴드 간의 영역이 불일치 될 때 나타나는 문제 점을 어느 정도 극복 할 수 있다. 식(4)에서 분모의 다중분광영상과 매치시키기 위하여 전정영상을 오버샘플링(또는 degrading) 하는 과정은 웨이블릿 변환의 분할과정(decomposition)과 개념적으로 유사하지만 SFR 방법은 유사한 투광조건과 영상기하(image geometry)를 갖는 영상에서는 상당히 간단한 모형으로 융합을 시도 할 수 있다. 단, landsat TM 영상과 ERS-1 SAR 영상에서처럼 서로 상이한 조건을 갖는 경우에는 적용이 불가능하다.

전정영상과 다중분광영상 사이의 분광학적 차이가 실제 제안된 기법을 적용 시키는데 중요한 요소가 아니기 때문에 식(4)는 SFR 적용을 위하여 다음 아래와 같이 간단하게 모형화될 수 있다.

$$IMAGE_{SFR} = \frac{IMAGE_{low}IMAGE_{high}}{IMAGE_{mean}} \quad (5)$$

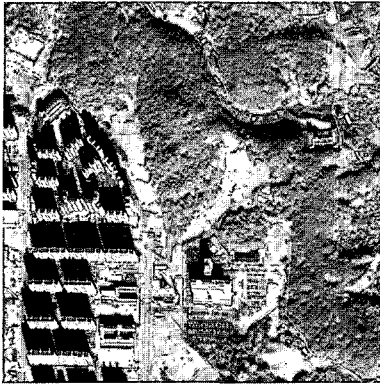
단, $IMAGE_{low}$ 과 $IMAGE_{high}$ 의 영상소의 수는 같아야 하며 $IMAGE_{mean}$ 은 평균값 필터를 전정영상에 적용시켜 얻은 국소 평균값이다.

또한 본 기법을 적용 시킬 때 $IMAGE_{low}$ 과 $IMAGE_{high}$ 의 공간해상도의 비율이 X, Y 방향이 동일하지 않고 각각 m, n 일 경우가 생길 수 있다. 그러한 경우에 $IMAGE_{mean}$ 값을 처리 할 경우 평균값 필터의 사이즈는 $m*n$ 이 된다. 만약 m과 n의 정수가 아닐 경우에 문제가 필터 구성이 어려움이

발생되는데 이러한 경우에는 경중률을 부여한 가중 평균값 필터를 사용하므로써 해결할 수 있다. 예를 들어 SPOT XS의 공간해상도 20m인 영상과 landsat TM 공간해상도 30m인 영상을 융합 경우에는 비율이 정수가 아닌 1.5가 된다. TM영상을 커버할 수 있는 SPOT XS의 가장 적합한 사이즈는 $2*2(40m*40m)$ 가 된다. 만약 SPOT XS 영상을 10m영상으로 오버샘플링하면 가로 및 세로 방향의 $3*3$ 필터(9개 영상소)는 TM 영상의 한개의 영상소와 정확하게 일치하게 된다. 이 9개의 영상소값의 평균값은 가중평균값 필터, $\frac{1}{9} \begin{pmatrix} 4 & 2 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}$ 를 이용하여 4개의 SPOT XS 영상소에 필터를 적용 시킨 값과 일치하게 된다.

3. 대상 지역 및 자료

본 연구에서 제안된 방법을 실험하여 입증하기 위하여 대전지역의 IKONOS 영상을 선택하여 실험하였다. 총 2 지역(Test-A, Test-B 지역)의 영상을 선택하였는데 지역에 대한 전정영상과 다중분광영상은 다음 [그림 2]와 같으며 지리적인 크기는 각각 $1Km*1Km$ 이며 다중분광영상은 원래 $250*250$ 영상소이지만 보간을 하여 전영상의 크기와 일치시켰다. Test-A 지역은 산림지역이 많이 분포 되어 있으며 기타 건물, 경작지, 아스팔트 도로 등으로 구성되어 있고 Test-B 지역은 산림지역을 제외한 농경지와 수계지역, 건물, 물 기타의 지물이 포함된 지역이다.

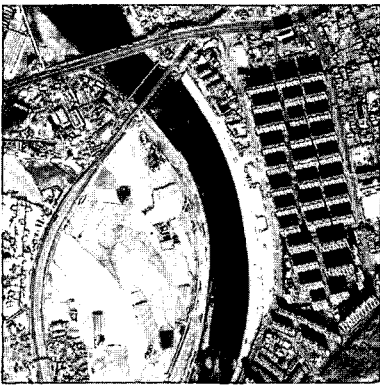


(a) 전정영상

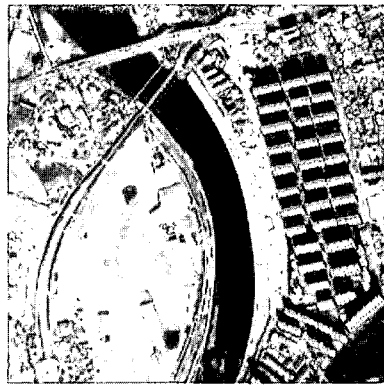


(b) 다중분광영상

[그림 1] Test-A지역 원영상



(a) 전정영상



(b) 다중분광영상

[그림 2] Test-B지역 원영상

4. 실험 및 결과

영상융합은 SFR 방법 이외에 웨이블릿 방법, IHS 방법 및 PCA 방법을 적용시켜 비교해보았으며 그 결과는 [그림 3]에 나타나 있다. 먼저 시각적 검토를 해보면 Test-A지역에서 분광보존의 측면에서 SFR 기법이 원영상의 다중분광영상과 가장 근

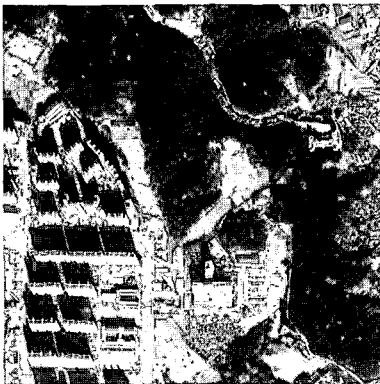
사 한 것으로 나타났다. 기타 웨이블릿, PCA 방법 및 IHS 기법 영상에서는 산악 지역에서 원 다중분광영상과는 달리 다소 왜곡이 있는 것으로 나타났다. 본 연구에 사용된 IKONOS의 영상의 촬영시기가 2001년 11월 19일인 겨울시점을 감안한다면 실제 식생지수는 다른 방법에서 나타난 것처럼 그리 높지 않을 것으로 사료된다. 실제 원 다중분광영상에서 보는 바와 같이 산림지역이 검붉은 지역으로 많이

표현되어 있음을 알 수 있다. 기타 건물이나 도로에 관한 식별력은 그다지 차이가 크지 않은 것으로 보이며 다만, 웨이블릿 기법의 영상에서는 전체적으로 다소 밝게 나타나 있었다. 두 번째로 통계적 분석을 통해 결과를 비교해보았다. 비교 방법으로서 최근 발표된 UIQI(universal image quality index)기법을 사용하였다 (Wang and Bovik, 2002; Bontab et al., 2003). UIQI기법은 두 영상간의 유사도를 관측할 수 있는 방법으로서 상관성, 방사

왜곡, 대조 왜곡(contrast distortion)의 3가지 항목으로 구성되어 있으며 그 식은 다음 아래 (6)과 같다.

$$Q = \frac{\sigma_{AB}}{\sigma_A \sigma_B} \frac{2\mu_A \mu_B}{\mu_A^2 + \mu_B^2} \frac{2\sigma_A \sigma_B}{\sigma_A^2 + \sigma_B^2} \quad (6)$$

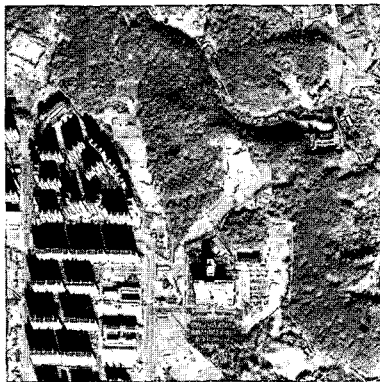
식(6)에서 첫번째 구성요소는 영상 A, B 간의 상관계수를 나타내며 두번째 구성요소는 두 영상의 평균값이 얼마나 근접한가는 나타내는 요소이며 세번째 구



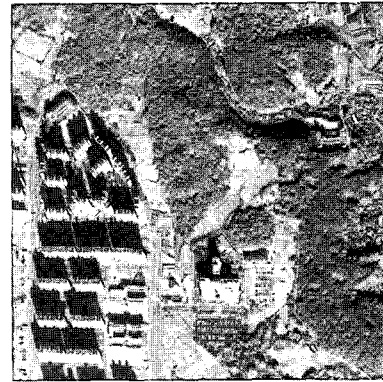
(a) SFR 기법



(b) 웨이블릿 기법



(c) IHS 기법



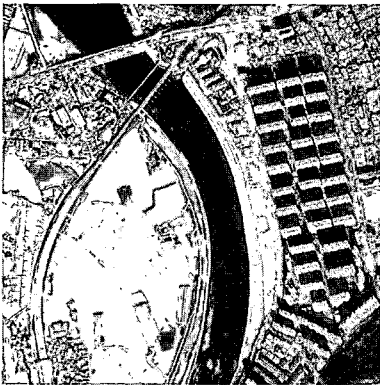
(d) PCA 기법

[그림 3] Test-A지역 영상융합 결과 영상

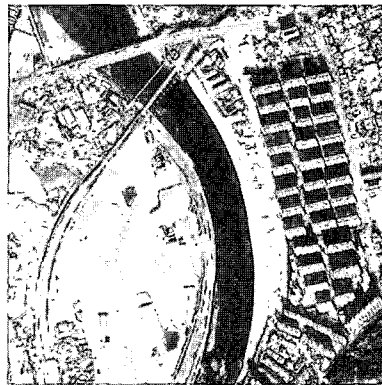
성요소는 두 영상의 대조를 나타내는 요소이다. Q 값의 범위는 $[-1 \sim 1]$ 이며 1에 가까울수록 두 영상이 유사하며 0이면 유사성이 없고 -1 이면 역관계에 있다. <표 1>은 R, G, B 밴드에 대한 각각의 Q 값이 나타나 있다. 시각적 검토와 유사한 결과를 보이고 있는데 SFR 기법이 가장 높은 유사성을 보여주고 있으며 PCA 기법이 가장 낮은 결과를 나타내고 있다.

Test-B 영상에 대한 결과는 다음 그림 (4)에 나타나 있다. 이 지역은 산림 지역

을 가급적 배제하고 수계, 농경지, 건물, 도로 및 기타의 요소가 고루 분포되어 있는 지역이다. 먼저 시각적 검토를 했을 때 전체적으로 모든 방법에 있어서 눈에 두드러지는 상이한 점은 발견되지 않았다. 다만 Test-A 지역에서의 경우와 마찬가지로 두드러지지 않지만 웨이블릿 방법에서 다소 밝게 나타났음을 감지할 수 있었다. 두 번째 통계적 분석에서는 Test-A 지역에서의와 마찬가지로 SFR 기법이 좋은 성과를 나타냈으며 <표 2>에 나타나 있다.



(a) SFR 기법



(b) 웨이블릿 기법



(c) IHS 기법



(d) PCA 기법

[그림 4] Test-B지역 영상융합 결과 영상

<표 1> Test-A지역의 원영상과 융합영상의 유사도 비교결과

처리 기법 \ 밴드	Blue	Green	Red
SFR	0.925	0.929	0.931
Wavelet	0.899	0.887	0.902
PCA	0.749	0.738	0.754
IHS	0.859	0.849	0.851

<표 2> Test-B지역의 원영상과 융합영상의 유사도 비교결과

처리 기법 \ 밴드	Blue	Green	Red
SFR	0.938	0.923	0.918
Wavelet	0.935	0.921	0.921
PCA	0.843	0.835	0.844
IHS	0.827	0.837	0.865

단 A 지역과 달리 여러 기법에 있어서 유사도 관측 결과 그 차이가 상대적으로 적은 것으로 나타났으며 Red 밴드에서는 웨이블릿 방법이 높은 것으로 나타났고 웨이블릿 기법은 SFR 방법과 거의 근사한 유사도 결과를 나타내었다.

5. 결 론

SFR 기법은 같은 물리학적 원리를 가진 PBIM 기법을 개선시킨 방법이다. 본 연구 결과 SFR 기법은 시각적 검토 및 통계적 방법에 의한 비교를 통하여 IHS나 PCA 융합 기법에 비하여 확실히 분광 특성의 보전이 뛰어난 방법임이 나타났다.

또한 현재 활발하게 연구되고 있는 웨이블릿 방법보다 다소 나은 결과를 보여주었으며 특히 산악지역에 대한 영상융합시 타 방법보다 더욱 나은 결과를 보여주었다. SFR 기법은 비교적 간단한 모형화를 이용하였으며 빠른 속도의 실시간처리를 요하는 3-D 시각화 분야에서 그 효용성이 클 것으로 기대될 뿐 아니라 분광정보 보존의 특성상 분류와 같은 원격탐사 응용 분야에서도 그 효과가 기대된다. 또한 IHS나 PCA 방법과 달리 전정영상과 단일 다중분광영상과의 융합도 가능한 장점도 지니고 있다. 단 제안된 기법은 광학영상과 레이더 영상과 같이 서로 상이한 투광 조건을 가진 영상들과의 적용에는 한계를 가지고 있다.

참 고 문 헌

- Bentabet, L., S. Jodouin, D. Ziou, and J. Vaillancourt, 2003, "Road vectors update using SAR imagery: A snake-based method", *IEEE Transation on Geoscience and Remote Sensing*, 41(8), pp.1785-1803.
- Carper, W. J., Lillesand, T. M., and Kiefer, R. W., 1990, "The use of Intensity-Hue-Saturation Transform for merging SPOT Panchromatic and multi-spectral image data", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56, pp.459-467.
- Chavez, P. S., and Bowell, J. A., 1988, "Comparison of the spectral information content of Landsat Thematic Mapper and SPOT for three different sites in the Phoenix", *Arizona region. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54, pp.1699-1708.
- Elachi, C., 1987, *Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing* (New York:Wiley), pp.114-141.
- Garguet-Duport, B., Girel, J., Chassery, J., and Pautou, G., 1996, "The use of multiresolution analysis and wavelets transform for merging SPOT Panchromatic and multispectral image data", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62, pp.1057-1066.
- Gillespie, A. R., Kahle, A. B., and Walker, R. E., 1987, "Color enhancement of highly correlated images-II. Channel ratio and 'chromaticity' transformation techniques", *Remote Sensing of Environment*, 22, pp.343-365.
- Haydan, R., Dalke, G. W., Henkel, J., and Bare, J. E., 1982, "Applications of the IHS colour transform to the processing of multisensor data and image enhancement", In *Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing of Arid and Semi-arid Lands*, Cairo, Egypt, 1982, pp.599-616.
- Liu Jian Guo, 1991, "Balance contrast enhancement technique and its application in image colour composition", *International Journal of Remote Sensing*, 12, pp.2133-2151.
- Liu Jian Guo, and Moore, J. McM., 1998, "Pixel block intensity modulation: adding spatial detail to TM band 6 thermal imagery", *International Journal of Remote Sensing*, 19, pp.2477-2491.
- Liu Jian Guo, Moore, J. McM., and Haigh, J. D., 1997, "Simulated reflectance technique for ATM image enhancement", *International Journal of Remote Sensing*, 18, pp.243-254.
- Li, H., Manjunath, B. S., and Mitra, S. K., 1995, "Multisensor image fusion using the wavelet transform", *Graphical Models and Image Processing*, 57, pp.234-245.
- Ranchin, T., L. Wald, "Fusion of high spatial and spectral resolution images: the ARSIS concept and its implementation", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66, pp.49-61.
- Wang, Z. and A. C. Bovik, 2002, "A universal image quality index", *IEEE Signal Process. Letter*, 9(3), pp.81-84.
- Yocky, D. A., 1996, "Multiresolution wavelet decomposition image merger of Landsat Thematic Mapper and SPOT Panchromatic data", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62, pp.1067-1074.
- Zhang, Y., 2002, "Problems in the fusion of commercial high-resolution satellite images as well as Landsat 7 images and initial solutions", in *Geospatial Theory, Processing and Applications: Proc. ISPRS Commission IV Symp.*, Ottawa, ON, Canada.
- Zhou, J., Civco, D. L., and Silander, J. A., 1998, "A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data", *International Journal of Remote Sensing*, 19, pp.743-757.