

그레디언트 및 분산을 이용한 웨이블릿 기반의 광학 및 레이더 영상 융합

예철수[†]

극동대학교 유비쿼터스IT학부

Wavelet-based Fusion of Optical and Radar Image using Gradient and Variance

Chul-Soo Ye[†]

School of Ubiquitous IT, Far East University

Abstract : In this paper, we proposed a new wavelet-based image fusion algorithm, which has advantages in both frequency and spatial domains for signal analysis. The developed algorithm compares the ratio of SAR image signal to optical image signal and assigns the SAR image signal to the fused image if the ratio is larger than a predefined threshold value. If the ratio is smaller than the threshold value, the fused image signal is determined by a weighted sum of optical and SAR image signal. The fusion rules consider the ratio of SAR image signal to optical image signal, image gradient and local variance of each image signal. We evaluated the proposed algorithm using Ikonos and TerraSAR-X satellite images. The proposed method showed better performance than the conventional methods which take only relatively strong SAR image signals in the fused image, in terms of entropy, image clarity, spatial frequency and speckle index.

Key Words : multi-sensor fusion, wavelet-based image fusion, image-level fusion, optical-sar image fusion.

요약 : 본 연구에서는 주파수 및 공간 도메인 상에서 신호 분석에 장점이 있는 웨이블릿 기반의 영상 융합 알고리즘을 제안하였다. 개발된 알고리즘은 레이더 영상 신호와 광학 영상 신호의 상대적인 크기를 비교하여 상대적으로 신호 크기가 큰 경우에는 레이더 영상 신호를 융합 영상에 할당하고 크기가 작은 경우에는 레이더 영상 신호와 광학 영상 신호의 가중치 합으로 융합 영상 신호를 결정한다. 사용되는 융합 규칙은 두 영상 신호의 상대적인 신호 비(ratio), 영상 그레디언트, 로컬 영역의 분산 특성을 동시에 고려한다. Ikonos 위성 영상과 TerraSAR-X 위성 영상을 이용한 실험에서 상대적으로 신호 크기가 큰 레이더 신호만을 융합 영상에 할당하는 기존 방법에 비해 entropy, image clarity, spatial frequency, speckle index 측면에서 우수한 융합 결과를 얻었다.

접수일(2010년 10월 8일), 수정일(1차 : 2010년 10월 19일), 게재확정일(2010년 10월 21일).

[†] 교신저자: 예철수(csye@kdu.ac.kr)

1. 서론

영상 융합은 다수의 영상 자료를 이용하여 관측 대상에 대한 정보를 획득하는데 유용한 수단으로 원격탐사 분야를 비롯한 많은 분야에서 활발하게 연구되고 있는 주제이다. 지구 관측 분야의 경우 동일 지역에 대한 이종 센서 영상 자료의 활용 가능성이 높아지면서 위성 영상 융합 분야의 연구에 대한 필요성이 증가하고 있다. 특히, 광학 및 레이더 영상 등과 같이 이종 센서 영상을 이용한 융합의 경우 단일 센서만을 이용할 경우보다 각 센서 영상의 융합을 통해 융합 영상에 포함되는 정보의 양을 증가시킬 수 있기 때문에 지구 관측 및 분석에 매우 유용하다. 영상 융합의 다양한 방법 가운데 웨이블릿 변환(wavelet transform)을 이용한 방법은 다중해상도 분해(multi-resolution decomposition)과 공간 및 주파수 영역에서의 신호 분석 특성으로 인해 널리 활용되는 기술로 광학 및 레이더 위성영상의 융합에 웨이블릿 변환을 이용한 연구가 보고되었다(Fatone and Maponi, 2001; Garzelli, 2002; Jun-chul, *et al.*, 2005; Long and Guangfang, 2007; Ye, 2009).

광학 및 레이더 영상 융합에 관한 기존 연구에서는 영상 registration을 수행한 후에 동일한 영상화소 위치에 해당하는 레이더 영상 밝기값과 광학 영상 밝기값의 상대적인 비(ratio)가 임계 값 보다 큰 경우에만 레이더 영상 신호를 선택하고 그 이외의 경우에는 광학 영상을 선택하는 영상 융합 방법이 주로 사용되었다. 이 경우 융합 영상 내에서 레이더 영상 신호로부터 온 화소의 비율이 매우 적기 때문에 융합 영상에서 얻을 수 있는 정보의 실제 양은 광학 영상만을 사용할 경우에 비해 미미하게 증가하는 결과를 얻게 된다.

융합 영상으로부터 획득되는 정보의 양을 증가시키기 위해서는 레이더 및 광학 영상 신호 크기의 상대적인 비가 임계 값보다 작은 경우에도 두 영상 자료를 융합하는 기술이 필요하다. Ye(2009)의 연구에서는 두 영상 신호 크기의 상대적인 비가 임계 값보다 작은 경우에 두 영상 신호의 그레디언트를 이용하여 융합 가중치를 결정하였다. 본 논문에서는 영상 융합 규칙으로 그레디언트를 포함할 뿐만 아니라 이 방법을 확장하여 영상의 로컬 영역 분산 특성까지 포함하는 웨이블릿 기반의 영상 융합 기술을 제안한다.

2. 2D Discrete Wavelet Transformation

크기가 $M \times N$ 인 영상 $f(x, y)$ 의 2차원 Discrete Wavelet Transform (DWT)는 다음과 같이 주어진다 (Gonzalez and Woods, 2008).

$$W_{\phi}(j_0, m, n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \phi_{j_0, m, n}(x, y) \quad (1)$$

$$W_{\psi}^i(j, m, n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \psi_{j, m, n}^i(x, y), \quad (2)$$

$$i = \{H, V, D\}$$

$$\phi_{j_0, m, n}(x, y) = 2^{j/2} \phi(2^j x - m, 2^j y - n) \quad (3)$$

$$\psi_{j, m, n}^i(x, y) = 2^{j/2} \psi^i(2^j x - m, 2^j y - n), i = \{H, V, D\} \quad (4)$$

여기서 $W_{\phi}(j_0, m, n)$ 는 영상 $f(x, y)$ 의 approximation 성분을 나타내고 $W_{\psi}^i(j, m, n)$ 는 horizontal, vertical 그리고 diagonal 방향의 detail 성분을 나타낸다.

2차원 DWT는 원영상에 1차원 DWT 필터를 적용하고, 반시계 방향으로 90° 회전한 후에 다시 한번 원영상에 1차원 DWT 필터를 적용시킨 후에 시계 방향으로 90° 회전하여 구현할 수 있다(Fig.1). Fig. 1에서 LL은 영상 $f(x, y)$ 의 approximation subband를 나타내고, LH, HL, HH은 detail 성분을 포함하는 high-frequency subband를 나타낸다. 각 subband의 위치 (m, n) 에서의 웨이블릿 변환 계수를 밝기값으로 하는 영상을 다음과 같이 정의한다.

$$I_{LL}(m, n) = W_{\phi}(m, n) \quad (5)$$

$$I_{HL}(m, n) = W_{\psi}^H(m, n) \quad (6)$$

$$I_{LH}(m, n) = W_{\psi}^V(m, n) \quad (7)$$

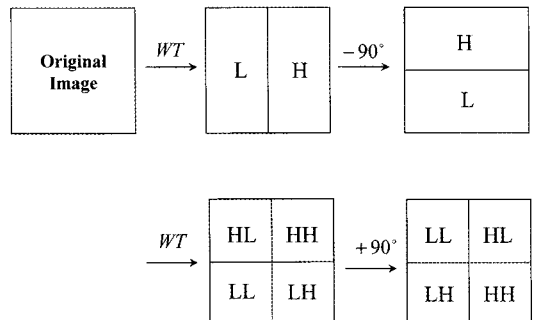


Fig. 1. Implementation of 2-discrete wavelet transform.

$$I_{HH}(m, n) = W_{\psi}^D(m, n) \quad (8)$$

1차원 DWT 필터를 구현할 수 있는 다양한 방법들이 존재한다. 본 논문에서는 가장 간단한 형태의 필터로 일반적으로 널리 사용되는 Daubechies 웨이블릿 필터(Daub4 필터)를 사용하였다. Daubechies 웨이블릿 필터는 다음과 같이 주어지는 4개의 계수로 구성된다.

$$c_0 = (1 + \sqrt{3})/4\sqrt{2} \quad (9)$$

$$c_1 = (3 + \sqrt{3})/4\sqrt{2} \quad (10)$$

$$c_3 = (3 - \sqrt{3})/4\sqrt{2} \quad (11)$$

$$c_4 = (1 - \sqrt{3})/4\sqrt{2} \quad (12)$$

원영상에 대한 2d-inverse DWT는 DWT 결과 영상을 먼저 반시계방향으로 90° 회전한 후에 1차원 inverse DWT 필터를 적용하고 그 결과 영상에 대해 시계 방향으로 90° 회전 한 후에 다시 1차원 inverse DWT 필터를 적용하여 구현할 수 있다. 본 논문에서는 광학 위성영상과 레이더 위성영상 대해 2차원 DWT를 각각 수행한 후에 제안하는 융합 규칙에 따라 융합된 2차원 DWT를 계산한 후에 inverse DWT를 적용하여 최종적으로 융합된 영상을 획득한다.

3. Wavelet기반의 광학 및 레이더 영상 융합

제안하는 웨이블릿 기반의 영상 융합 방법은 Garzelli가 제안한 융합 방법(Garzelli, 2002)과 같이 융합 영상의 high-frequency subband에는 광학 영상의 high-frequency subband를 할당하는 점은 동일하나 본 논문에서는 융합 영상 생성에 가장 중요한 approximation subband 할당 방법에서는 Garzelli가 제안한 방식과 다른 융합 방식을 제안한다. Garzelli가 제안한 approximation subband 융합의 경우 레이더 영상 신호가 광학 영상 신호보다 상대적으로 큰 경우에는 레이더 영상 신호를 융합 영상에 할당하고 그 이외의 경우에는 광학 영상을 융합 영상에 할당하나, 본 논문에서는 레이더 영상 신호가 광학 영상 신호 보다 상대적으로 작은 경우에도 레이더 영상과 광학 영상이 모두 융합 영상 생성에 사용되는 새로운 융합 방법을 제안한다.

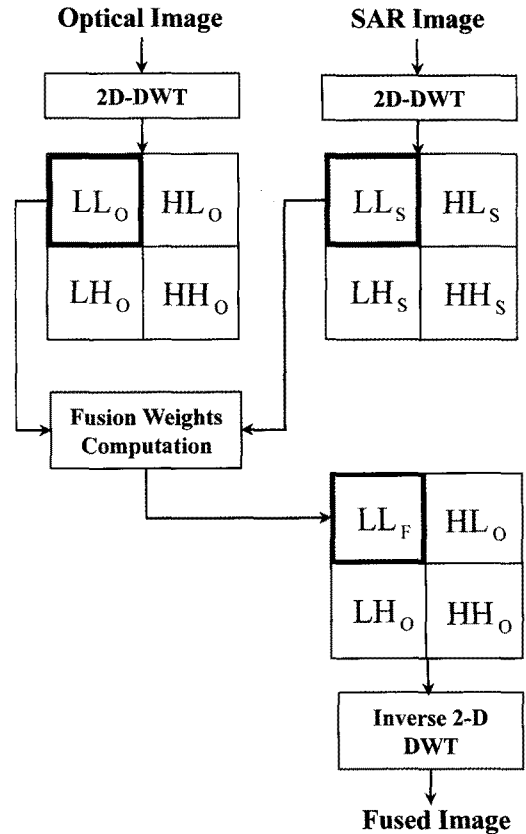


Fig. 2. Synopsis of the proposed image fusion method.

먼저 레이더 영상 신호와 광학 영상 신호에 대해 2차원 DWT를 각각 수행하여 approximation subband LL 과 high-frequency subband LH, HL, HH 로 분해한다. 융합 영상의 approximation subband LL_F 는 광학 및 레이더 영상의 approximation subband를 이용하여 융합 규칙에 따라 융합을 수행하고 융합 영상의 high-frequency subband는 광학 영상의 성분을 할당하여 융합된 웨이블릿 변환 영상을 생성한다. 융합된 웨이블릿 변환 영상에 대해 2-d inverse DWT를 수행하여 최종적으로 융합 영상을 생성한다(Fig. 2).

1) 광학 및 레이더 영상 융합 전략

광학 및 레이더 영상을 융합하기 위하여 먼저 co-registration된 광학 및 레이더 영상에 대해 2차원 DWT를 수행하여 approximation subband LL 과 high-frequency subband LH, HL, HH 로 분해한 후에 융합 영상의 high frequency subband LH_F, HL_F, HH_F

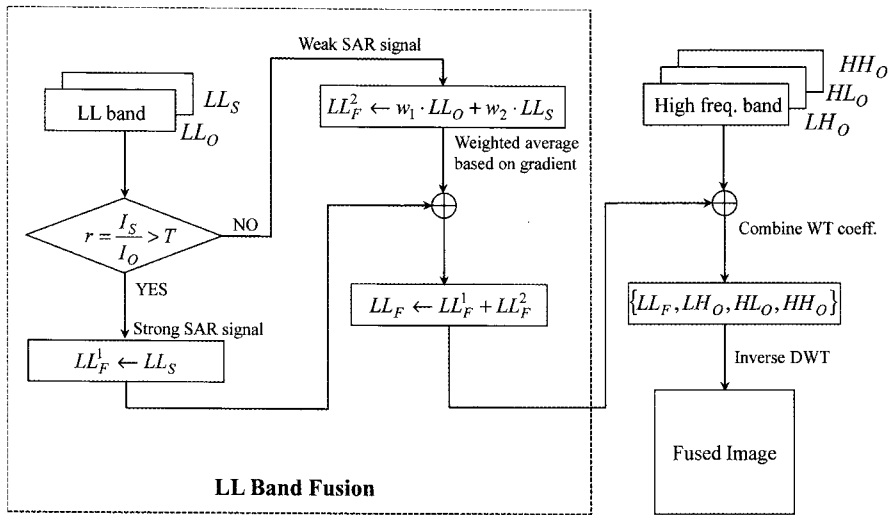


Fig. 3. Flowchart of the procedure for fusion of an optical satellite image with a SAR satellite image.

는 광학 영상의 high frequency subband LH_O, HL_O, HH_O 를 할당한다. 레이더 영상 LL_S 와 광학 영상 LL_O 의 상대적인 크기 비(ratio) $r = I_S/I_O$ 가 임계 값 T 보다 큰 화소의 경우에는 레이더 영상 화소 LL_S 값을 융합 영상의 approximation subband LL_F 에 할당하고 r 이 임계 값보다 작은 경우에는 레이더 영상 LL_S 과 광학 영상 LL_O 의 가중치 합을 할당한다(Fig. 3).

제안하는 융합 방법에서 레이더 영상 화소 밝기값과 광학 영상 화소 밝기값의 비가 상대적으로 큰 경우에 레이더 영상 화소 밝기값을 융합 영상화소에 할당하는 방법은 기존의 융합 방법과 같으나 밝기값 비가 상대적으로 작은 경우에도 두 영상 신호를 융합한다는 점에서 차이가 있다. 또한, 제안하는 융합 방법은 두 영상의 신호 비가 작은 경우에도 융합을 수행하기 때문에 기존 융합 방법에 비해 융합 영상에 포함되는 정보의 양이 증가되는 장점이 있다.

본 논문에서는 다음의 세가지 융합 규칙을 고려한다. 첫 번째 융합 규칙은 레이더 및 광학 영상의 상대적인 크기에 관한 융합 규칙으로 레이더 영상 LL_S 과 광학 영상 LL_O 의 상대적인 크기 비(ratio) $r = I_S/I_O$ 가 임계 값 T 보다 큰 화소의 경우에는 레이더 영상 화소 LL_S 값을 융합 영상의 approximation subband LL_F 에 할당한다. 이 융합 규칙은 기존의 융합 방식과 같은 규칙으로 레이더 영상에서 강하게 검출되는 신호를 융합 영상에 할당하기 위한 융합 규칙이다.

두 번째 융합 규칙은 레이더 영상 LL_S 와 광학 영상 LL_O 의 상대적인 크기 비(ratio) $r = I_S/I_O$ 가 임계 값 T 보다 작은 경우에 적용되는 규칙으로, 융합 영상의 각 화소 위치마다 두 영상의 그레디언트 크기를 계산하여 그 그레디언트의 크기에 비례하여 융합 영상에 기여하는 가중치를 결정하는 융합 규칙이다. 이 규칙을 통해서 두 영상 가운데 에지나 직선 등과 같은 특징 성분들이 융합 영상에 보다 잘 반영되도록 한다.

세 번째 융합 규칙은 두 영상의 상대적인 크기 비(ratio) $r = I_S/I_O$ 가 임계 값 T 보다 작은 경우에 적용되는 규칙으로, 영상 화소 주변의 밝기 값 분산(variance)을 계산하여 분산에 반비례하여 융합 영상에 기여하는 가중치를 결정하는 융합 규칙이다. 이 규칙은 광학 영상과 레이더 영상에 포함된 잡음의 크기를 고려하여 잡음의 크기가 작은 경우에 가중치가 높아지도록 하여 밝기값이 균일한 영역의 화소들이 융합 영상에 보다 반영되도록 한다. 본 논문에서는 두 영상의 상대적인 크기 비(ratio) $r = I_S/I_O$ 가 임계 값 T 보다 작은 경우에 두 번째 융합 규칙과 세 번째 융합 규칙을 동시에 적용한 융합식을 제안한다.

(1) 융합 규칙 1: 레이더 및 광학 영상 신호의 상대적인 신호 비 규칙

융합 규칙 1은 레이더 영상 신호와 광학 영상 신호의 상대적인 크기를 비교하여 레이더 영상 신호의 광학 영상 신호에 대한 상대적인 크기가 임계 값 이상인 경우에

레이더 영상 신호를 융합 영상 신호에 할당하는 융합 규칙이다. 두 영상의 상대적인 크기 비(ratio) $r(i, j) = I_S(i, j)/I_O(i, j)$ 이라 할 때, 3×3 크기의 로컬 윈도우 영역에 대해 $r(i, j)$ 의 평균값을 구하고 이 평균값을 이용하여 영상 전체에 대한 평균값 T_r 을 구한다. 평균값 T_r 보다 일정 크기 이상인 값을 임계 값으로 결정하기 위해서 가중치 k_1 을 아래 식과 같이 도입한다.

$$I_F(i, j) = \begin{cases} I_S(i, j); & \text{if } r(i, j) \geq k_1 \cdot T_r, \\ T_r = \frac{1}{N \cdot N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{1}{9} \\ \left(\sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 r(i+m, j+n) \right) & (13) \\ I_O(i, j); & \text{if } r(i, j) < k_1 \cdot T_r, \end{cases}$$

k_1 값이 커질수록 임계 값 $k_1 \cdot T_r$ 이 커지게 되고 레이더 영상 신호 가운데 상대적인 크기가 보다 큰 신호만 융합 영상에 할당되고 전체 융합 영상에서 레이더 영상 신호가 차지하는 비율은 감소하게 된다. 기존 연구(Junchul, et al., 2005)에서는 $k_1 = 2.0$ 으로 설정하였다.

Fig. 4는 $k_1 = 1.5$ 일 때, Ikonos 광학 위성 영상 I_O , TerraSAR-X 레이더 위성 영상 I_S 에서 101번째 라인에 속한 두 영상의 비 $I_S(101, j)/I_O(101, j)$ 를 $100 \leq j < 400$ 범위에 속한 화소들에 대해 계산한 결과이다. 레이더 영상 신호와 광학 영상 신호 비의 영상 전체 평균값 $T_r = 0.5856$ 이고 레이더 영상 신호를 융합 영상에 할당하는 임계 값 $k_1 \cdot T_r = 0.8784$ 이다. 이 임계 값보다 큰 화소들은 레이더 영상 신호가 융합 화소에 할당이 되고 이 값보다 작은 경우에는 융합 규칙에 따라 광학 영상 신호와 레이더 영상 신호가 가중치 합으로 계산되어 융합 영상에 할당된다.

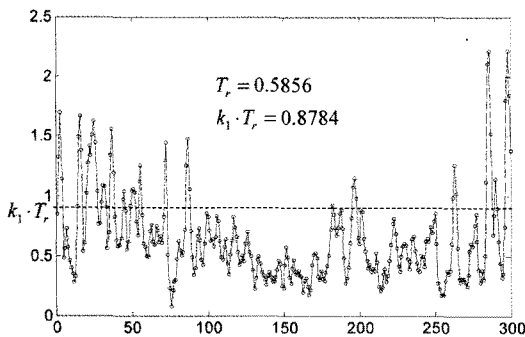


Fig. 4. Threshold $k_1 \cdot T_r$ and variation of $r(i, j)$.

(2) 융합 규칙 2 : 광학 및 레이더 영상 신호의 그레디언트 크기 규칙

융합 규칙 1에서 $r(i, j)$ 가 임계 값 $k_1 \cdot T_r$ 보다 작은 경우에 광학 영상 신호를 융합 영상에 할당하였으나 융합 규칙 2를 함께 적용하여 임계 값보다 작은 경우에는 화소 위치 (i, j) 에서의 광학 영상과 레이더 영상의 그레디언트를 각각 $G_O(i, j)$, $G_S(i, j)$ 이라 할 때, 두 신호의 그레디언트 크기에 비례하는 가중치를 설정한다. 식 (14)는 융합 규칙 1과 융합 규칙 2를 모두 적용한 식이다.

$$I_F(i, j) = \begin{cases} I_S(i, j); & \text{if } r(i, j) \geq k_1 \cdot T_r, \\ \frac{G_O(i, j) \cdot I_O(i, j) + G_S(i, j) \cdot I_S(i, j)}{G_O(i, j) + G_S(i, j)}; & \text{if } r(i, j) < k_1 \cdot T_r \end{cases} \quad (14)$$

$$G_O(i, j) = \sqrt{(I_O(i+1, j) - I_O(i, j))^2 + (I_O(i, j+1) - I_O(i, j))^2}$$

$$G_S(i, j) = \sqrt{(I_S(i+1, j) - I_S(i, j))^2 + (I_S(i, j+1) - I_S(i, j))^2}$$

융합 규칙2는 광학 및 레이더 영상 신호 가운데 그레디언트 값이 큰 영상 신호가 융합 영상에 보다 크게 기여하도록 한다. 따라서 에지 등과 같은 특징 요소가 한 영상에서 강하게 나타날 경우에 해당 영상 신호를 그레디언트의 상대적인 크기에 비례하여 융합 영상에 반영하는 결과를 얻게 된다.

(3) 융합 규칙 3 : 광학 및 레이더 영상 신호의 분산 크기 규칙

융합 규칙 3은 광학 및 레이더 영상 화소의 로컬 영역 내부의 밝기값의 분산을 계산하여 분산에 반비례하여 융합 영상에 기여하는 가중치를 결정하는 융합 규칙이다. 다음 식(15)와 같이 두 영상에서 로컬 영역에서의 분산을 계산하여 분산에 반비례하는 가중치를 설정하여 분산이 클수록 가중치가 작아지도록 한다.

$$I_F(i, j) = \frac{k_2 \cdot \frac{1}{\sigma_O^2(i, j)} G_O(i, j) \cdot I_O(i, j) + (1 - k_2) \cdot \frac{1}{\sigma_S^2(i, j)} G_S(i, j) \cdot I_S(i, j)}{\frac{1}{\sigma_O^2(i, j)} + \frac{1}{\sigma_S^2(i, j)}} \quad (15)$$

이 규칙은 두 영상의 그레디언트 크기가 동일할 경우에 밝기값 변화가 많은 화소의 경우에 융합 가중치가 낮아지도록 한다. 식 (16)은 앞의 세가지 융합 규칙을 모두 적용한 최종 융합 식으로 식 (14)에 식 (15)를 대입하여 로컬 화소의 그레디언트 크기와 밝기값분산을 이용하여

가중치를 결정하는 최종 융합 식이다.

$$I_F(i, j) = \begin{cases} I_S(i, j); & \text{if } r(i, j) \geq k_1 \cdot T_r \\ w_O(i, j) \cdot I_O(i, j) + w_S(i, j) \cdot I_S(i, j); & \text{if } r(i, j) < k_1 \cdot T_r \end{cases} \quad (16)$$

$$w_O(i, j) = k^2 \cdot \frac{\sigma_S^2(i, j)}{\sigma_O^2(i, j) + \sigma_S^2(i, j)} \cdot G_O(i, j)$$

$$w_S(i, j) = (1 - k_2) \cdot \frac{\sigma_O^2(i, j)}{\sigma_O^2(i, j) + \sigma_S^2(i, j)} \cdot G_S(i, j)$$

위 식에서 $k_2(0 \leq k_2 \leq 1)$ 는 융합 목적에 따라 광학 영상 혹은 레이더 영상의 가중치를 사용자가 결정할 수 있는 값으로 k_2 값이 커지면 광학 영상에 대한 가중치가 증가하고, k_2 값이 작아지면 레이더 영상의 가중치가 증가한다. k_2 값이 0.5인 경우에는 로컬 화소의 그레디언트와 밝기값 분산 값만으로 융합 가중치가 결정된다. 사용자가 k_2 값을 조정하여 두 영상의 상대적인 가중치를 결정할 수 있으나 이미 그레디언트 크기와 밝기값 분산 특성을 반영한 후에 상대적인 가중치를 결정하기 때문에 제안하는 융합 알고리즘은 그레디언트 크기와 밝기값 분산 특성을 고려하지 않고 단순히 두 영상의 상대적인 가중치만을 고려하여 융합하는 방식보다 영상의 로컬 특성을 보다 잘 반영한다.

Fig. 5는 Fig.4의 조건($k_1 = 1.5$)에서 Ikonos 광학 위성 영상, TerraSAR-X 레이더 위성 영상, fusion rule 1+2+3의 융합 영상에서 101번째 라인에 위치한 300개 화소들의 밝기값 변화를 비교한 결과이다. Column값이 120에서 180사이에서는 $I_S(101, j)/I_O(101, j)$ 값이 임계 값 보다 작고 광학 영상 신호의 경우 일정한 밝기 값을 유지하는 구간으로 융합 영상 신호는 광학 영상의 신호 패턴을 반영하고 있다. 레이더 영상 신호의 크기가 광학 영상 신호에 비해 매우 커서 $I_S(101, j)/I_O(101, j)$ 값이 큰

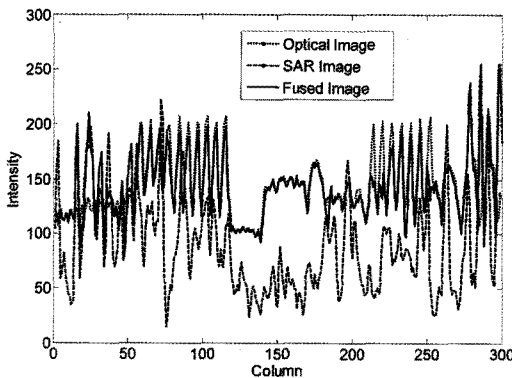


Fig. 5. Intensity variation comparison (row=101th line).

경우(column 값이 20~40, 280~300인 구간)에는 융합 영상 신호가 레이더 영상 신호 패턴을 반영하고 있다.

2) 성능 평가 지표

영상 융합 결과에 대한 정량적인 평가 지표로 entropy (E), image clarity(IC), spatial frequency(SF), speckle index(SI)를 고려한다(Li *et al.*, 2003). Entropy는 융합된 영상에 포함된 총정보량(overall information)을 측정하는 지표로 일반적으로 이 값이 클수록 융합 영상에 포함된 정보량이 많다고 판정한다.

$$H = - \sum_{i=0}^{255} p(i) \log p(i); \quad (17)$$

$p(i)$ is normalized histogram of the fused image

Image clarity은 융합된 영상의 clarity를 나타내는 지표이며 전체 영상에 대한 그레디언트 평균값으로 정의된다. 이 값이 클수록 밝기 변화가 큰 화소들이 전체 영상에 평균적으로 많이 분포한다고 판단한다.

$$IC = \frac{1}{N \cdot N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sqrt{\left(\frac{\partial I(i, j)}{\partial i}\right)^2 + \left(\frac{\partial I(i, j)}{\partial j}\right)^2} \quad (18)$$

Spatial frequency는 융합 영상의 총활성 레벨(overall activity level)를 나타낸다. 이 값은 식(19)-(21)에 보인 바와 같이 영상 화소 밝기 값의 행 방향 1차 미분 제곱의 영상 전체 평균의 제곱근 RF와 열 방향 1차 미분 제곱의 영상 전체 평균의 제곱근 CF를 구한 후에 이 두 값의 제곱합의 제곱근 SF로 정의된다. 이 경우 행 방향 및 열 방향으로 밝기 변화가 많은 경우에 SF값은 커지게 된다.

$$SF = RF^2 + CF^2 \quad (19)$$

$$RF = \sqrt{\frac{1}{(N-1) \cdot (N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{N-1} (I(i, j+1) - I(i, j))^2} \quad (20)$$

$$CF = \sqrt{\frac{1}{(N-1) \cdot (N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{N-1} (I(i+1, j) - I(i, j))^2} \quad (21)$$

Speckle index는 다음 식과 같이 융합 영상의 중심 화소 주변의 3×3 크기의 window 내부 화소들의 표준 편차와 평균의 비의 영상 전체 평균 값으로 정의된다(Kutay *et al.*, 1993).

$$SI = \frac{1}{(N-2) \cdot (N-2)} \sum_{i=2}^{N-1} \sum_{j=2}^{N-1} \frac{\sigma_f(i, j)}{m_f(i, j)} \quad (22)$$

$\sigma_f(i, j)$: std. deviation of 3×3 window in the fused image

$m_f(i, j)$: mean of 3×3 window in the fused image

Speckle index는 필터링에 의해 감소된 speckle 잡음의 감소 정도를 나타내는 지표로 보통 사용되나 본 연구에서는 융합 조건에 따라 각각 다르게 획득된 융합 영상에 포함된 speckle 영상 신호의 상대적인 크기를 측정하기 위해 사용한다.

4. 실험 결과

본 연구에서는 Ikonos 광학 위성 영상과 TerraSAR-X 레이더 위성영상을 실험 영상으로 사용하였다(Fig. 6). 두 영상 모두 1m 공간 해상도를 가지나 영상의 선명도는 Ikonos 위성 영상이 우수함을 볼 수 있다.

Fig. 7은 $k_1 = 1.5$ 일 때, k_2 값의 변화에 따른 융합 영상을 보여준다. k_2 값이 작을수록 융합 영상은 레이더 영상 신호 특성을 반영하게 되고 k_2 값이 클수록 광학 영상 신호 특성을 반영함을 볼 수 있다. k_2 값은 사용자가 융합 목적에 따라 조절할 수 있는 값으로 광학 영상 신호 특성을 융합 영상에서 원할 경우 k_2 값을 1에 가깝게 설정하고 반면에 레이더 영상 신호 특성을 보다 원할 경우에는 k_2 값을 0에 가깝게 설정하면 된다.

Fig. 8은 $k_1 = 2.0, k_2 = 0.5$ 일 때의 fusion rule 1+2, fusion rule 1+3, fusion rule 1+2+3의 융합 결과를 보여준다. Fusion rule 1+2는 융합 규칙 1과 융합 규칙 2만을 적용한 융합 방법으로 I_s/I_o 값이 임계 값보다 작은 두 영상의 융합 가중치를 그레디언트 크기에 비례하도록 할당한다. Ikonos 광학 위성 영상에 비해 TerraSAR-X 레이더 위성 영상의 밝기값 변화가 심하기 때문에 그레디언트만을 이용하여 가중치를 결정할 경우 레이더 위성 영상에 보다 높은 가중치가 설정되고 융합 결과 영상

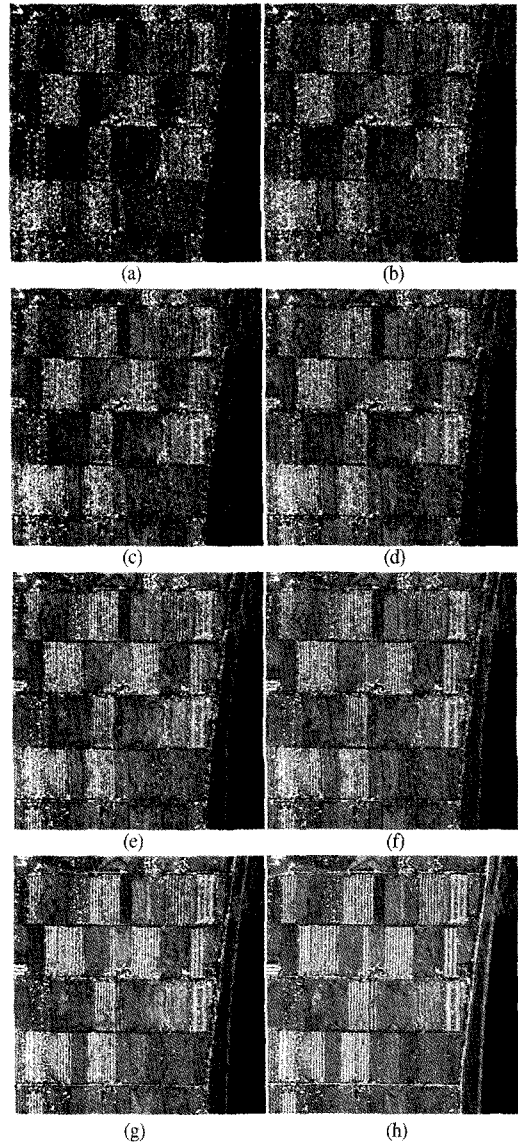


Fig. 7. Comparison of fusion results ($k_1 = 1.5$) (a) $k_2 = 0.1$ (b) $k_2 = 0.2$ (c) $k_2 = 0.3$ (d) $k_2 = 0.4$ (e) $k_2 = 0.5$ (f) $k_2 = 0.6$ (g) $k_2 = 0.4$ (h) $k_2 = 0.9$.

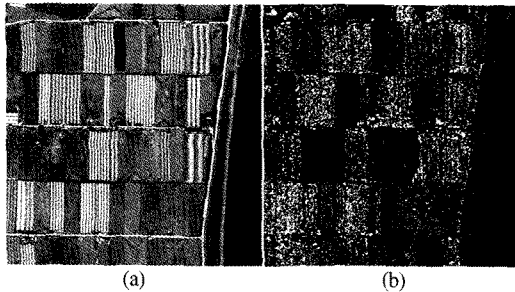


Fig. 6. Experimental satellite images (a) Ikonos image (b) TerraSAR-X image.

도 레이더 영상 신호의 특성을 보다 많이 반영하는 결과를 보인다(Fig. 8(a)).

Fusion rule 1+3은 I_s/I_o 값이 임계 값보다 작은 두 영상의 융합 가중치를 영상의 로컬 영역내의 밝기값 분산에 반비례하도록 할당한다. 따라서 균일한 밝기값 영역이 많은 광학 영상 신호에 가중치가 높게 설정되고 융합 결과 영상에서 광학 영상의 특성을 보다 많이 반영하는 결과를 보인다(Fig. 8(b)). 그러나 Fig. 8(b)에서 영상

우측의 두 개의 수직 방향의 긴 경계선을 포함하여 전반적으로 광학 영상의 경계선 정보가 융합 영상에 잘 반영되지 않는 것을 볼 수 있다.

Fusion rule 1+2+3은 I_s/I_o 값이 임계 값보다 작은 두 영상의 융합 가중치를 두 영상 로컬 영역내의 그레디언트와 분산을 모두 고려하여 그레디언트 크기에 비례하고, 동시에 분산에는 반비례하도록 가중치를 할당한다. 이 경우 Fig. 8(c)에서 보는 바와 같이 영상의 우측 영역에 존재하는 두 개의 수직 방향의 긴 경계선 부분은 분산만을 이용한 방법보다 경계선 정보가 보다 잘 반영됨을 볼 수 있다. Fusion rule 1+3과 fusion rule 1+2+3 방법의 융합 결과를 자세히 비교하기 위해서 k_1

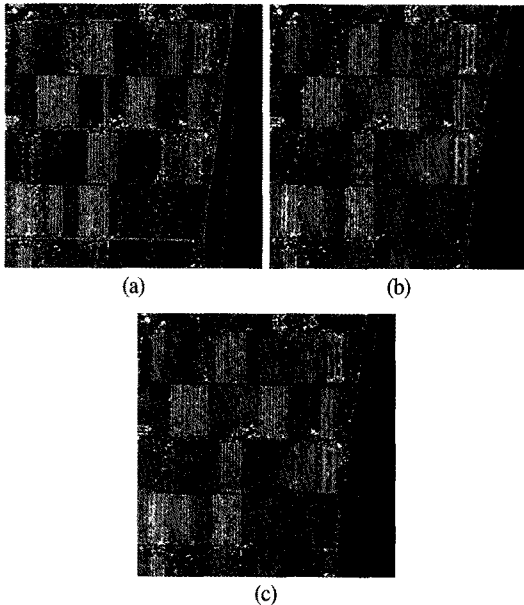


Fig. 8. Comparison of fusion results (a) fusion rule 1+2 ($k_1 = 2.0, k_2 = 0.5$) (b) fusion rule 1+3 ($k_1 = 2.0, k_2 = 0.5$) (c) fusion rule 1+2+3 ($k_1 = 2.0, k_2 = 0.5$).

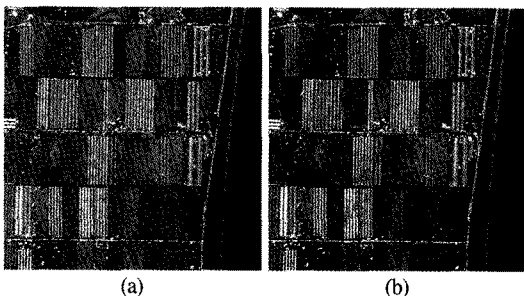


Fig. 9. Comparison of fusion results ($k_1 = 2.0, k_2 = 0.9$) (a) fusion rule 1+3 (b) fusion rule 1+2+3.

$= 2.0, k_2 = 0.9$ 일 때의 결과를 Fig. 9에서 비교하였다. 우측 영역에 존재하는 두 개의 수직 방향의 긴 경계선에 대해 fusion rule 1+2+3 융합 결과가 광학 영상의 특성을 보다 자연스럽게 반영함을 볼 수 있다.

Fig. 10(b)는 기존의 웨이블릿 기반의 융합 방식과 같이 레이더 영상과 광학 영상의 상대적인 비가 임계 값보다 큰 경우에 레이더 영상 신호를 융합 영상에 할당하고 high-frequency subband는 광학 영상의 subband를 할당하는 방식(fusion rule 1)의 결과이다. 기존 연구 (Jun-chul, *et al.*, 2005)에서 $k_1 = 2.0$ 으로 설정된 점을 고려하여 본 논문에서도 k_2 값의 변화에 따른 융합 영상 실험에서는 $k_1 = 1.5$ 로 설정하고 그 외의 경우에는 $k_1 = 2.0$ 으로 설정하였다. 이때, 임계 값 $k_1 \cdot T_r$ 은 레이더 영상 신호와 광학 영상 신호 비(ratio)의 영상 전체 평균 T_r 의 2배로 설정된다. 따라서 레이더 영상 신호 가운데 광학 영상 신호보다 영상 전체 평균 T_r 보다 2배 이상일 때는 레이더 영상 신호가 융합 영상에 할당된다. Fig. 10(a)와 비교해서 볼 때, Fig. 10(b)에서 밝기 값이 주변보다 밝은 화소들이 레이더 영상에서 온 신호들을 나타낸다. 융합 영상 전체에서 레이더 영상에서 온 화소들이 차지하는 비율은 매우 적음을 알 수 있다.

반면에 Fig. 10(c)와 (d)는 레이더 영상 및 광학 영상

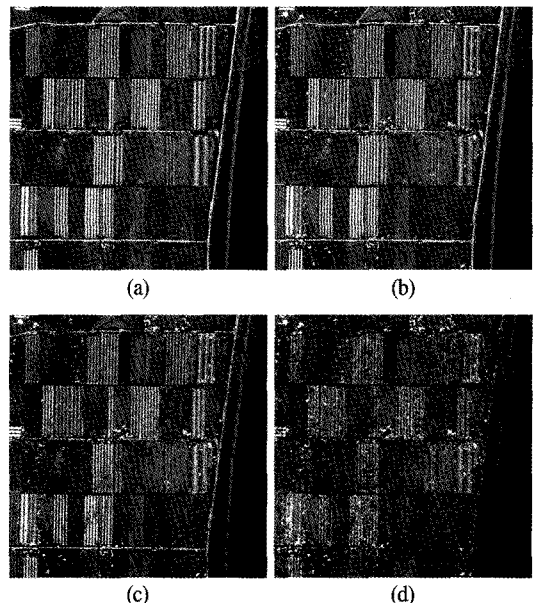


Fig. 10. Fusion results (a) Ikonos original image (b) fusion rule 1 ($k_1 = 2.0$) (c) fusion rule 1+2+3 ($k_1 = 2.0, k_2 = 0.9$) (d) fusion rule 1+2+3 ($k_1 = 2.0, k_2 = 0.5$).

신호의 상대적인 신호 크기 비 규칙(fusion rule 1), 광학 및 레이더 영상 신호의 그레디언트 크기 규칙(fusion rule 2), 광학 및 레이더 영상 신호의 분산 크기 규칙(fusion rule 3)을 모두 적용한 경우의 융합 결과이다. Fig. 10(c)는 $k_2 = 0.9$ 일 때의 결과로, 앞의 세가지 융합 규칙을 모두 적용하여 두 영상의 가중치를 각각 결정하고 최종적으로 광학 영상에 대해 90%의 가중치를, 레이더 영상에 대해서는 10%의 가중치를 추가적으로 반영한 결과를 보여준다. Fig. 10(d)는 $k_2 = 0.5$ 일 때의 융합 결과로, 이 경우에는 외부에서 두 영상의 가중치를 인위적으로 조정하지 않고 세가지 융합 규칙만을 이용하여 가중치를 결정하고 융합한 결과를 나타낸다. Fig. 10(c)에 비해서 레이더 영상 신호가 융합 영상에 보다 많이 포함된 것을 볼 수 있다. 융합 영상에 포함된 레이더 영상 신호의 비율이 높아지면서 융합 영상의 화질은 저하되는 것을 볼 수 있다. 그러나 광학 영상을 기준으로 보면 융합 영상의 화질이 저하되는 것으로 보이나 레이더 원 영상을 기준으로 보면 융합 영상을 통해 레이더 영상의 화질이 향상되는 것으로 판단 할 수 있다. 융합을 통해 획득할 수 있는 정보 융합의 효과를 비교하기 위해 평가 지표에 대한 정량적인 결과를 다음에 소개한다

Table 1은 Fig. 10의 각 융합 결과 영상에 대한 평가 지표를 나타낸다. Fusion rule 1만을 적용한 경우(Fig. 10(b))에 비해 세가지 융합 규칙을 모두 적용한 Fig. 10(c), Fig. 10(d)의 융합 결과에서 entropy(H)가 다소 증가되었다. $k_2 = 0.9$ 일 때에 비해 $k_2 = 0.5$ 일 때의 entropy가 보다 증가되는 이유는 k_2 값이 감소하면서 융합 영상에 포함되는 레이더 영상 신호의 비율이 증가하면서 융합 영상에 포함되는 정보량이 함께 증가하기 때문이다. $k_2 = 0.5$ 일 때 Fusion rule 1+2+3의 융합 영상에서 image clarity(IC), spatial frequency(SF), speckle index(SI) 값이 fusion rule 1만을 적용한 융합 결과에 비해 모두 높은 값을 보였다. 일반적으로 entropy, image clarity, spatial frequency의 값이

높을수록 정보 융합의 효과가 높다고 본다. Speckle index의 경우 레이더 영상 신호가 융합 영상에 포함되는 비율이 증가함에 따라 Fusion rule 1+2+3의 융합 결과 영상에서 그 값이 증가함을 볼 수 있다. $k_2 = 0.9$ 일 때 IC, SF 값이 fusion rule 1만을 사용할 때보다 작은 이유는 레이더 영상 신호의 일부가 융합 영상으로 들어 오면서 융합 영상에서 보여지는 광학 영상 성분의 밝기 값 강도가 작아지기 때문인 것으로 판단된다. 실험에 사용된 Ikonos 영상의 전체 평균 밝기값은 133.96이며, TerraSAR-X 영상의 전체 평균 밝기값은 78.94이다. 상대적으로 밝은 Ikonos 영상의 일부 화소 밝기값이 레이더 영상과의 융합으로 그 강도가 작아짐에 따라 융합 영상 화소의 그레디언트 값도 함께 작아지면서 이와 관련된 IC, SF 값도 작아지고, k_2 값이 0.9보다 더욱 작아지게 되면 융합 영상에서 레이더 영상 신호의 영향력이 본격적으로 커지면서 융합 영상 화소의 그레디언트도 이전 보다 커지게 되고 IC, SF 값은 증가하는 것으로 판단된다.

Fig. 11~Fig. 14는 k_2 값의 변화에 따른 평가 지표의 변화를 나타낸다. k_2 값이 증가하면 융합 결과에서 광학 영상 신호가 차지하는 비율이 증가하게 된다. 따라서

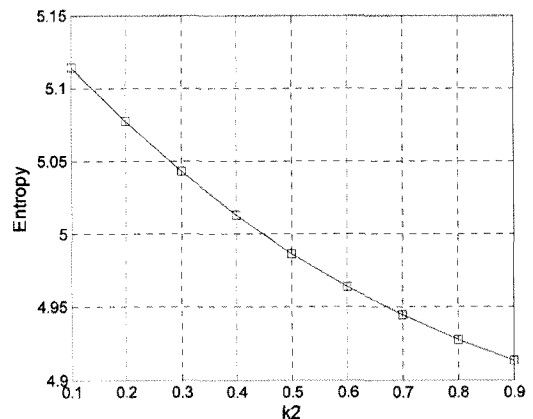


Fig. 11. Change of entropy ($k_1 = 1.5$).

Table 1. Comparison of fusion results

Fusion Method	H	IC	SF	SI
Fusion Rule 1 ($k_1 = 2.0$)	4.863681	15.063167	22.083317	0.075327
Fusion Rule 1+2+3 ($k_1 = 2.0, k_2 = 0.9$)	4.865696	14.712056	21.128689	0.077036
Fusion Rule 1+2+3 ($k_1 = 2.0, k_2 = 0.5$)	4.945865	17.213543	22.630045	0.107977

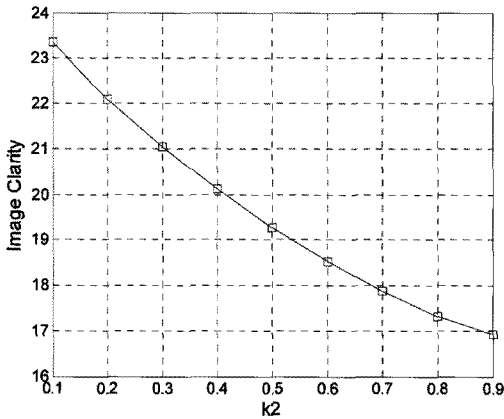


Fig. 12. Change of image clarity ($k_1 = 1.5$).

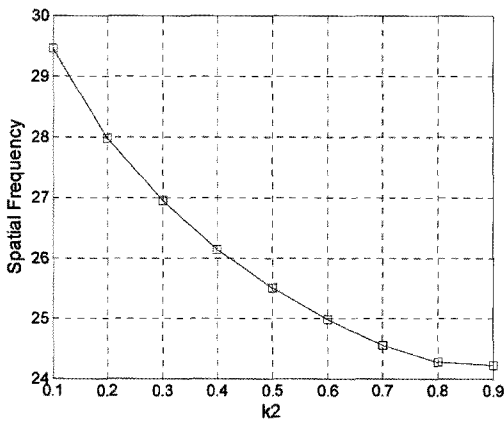


Fig. 13. Change of spatial frequency ($k_1 = 1.5$).

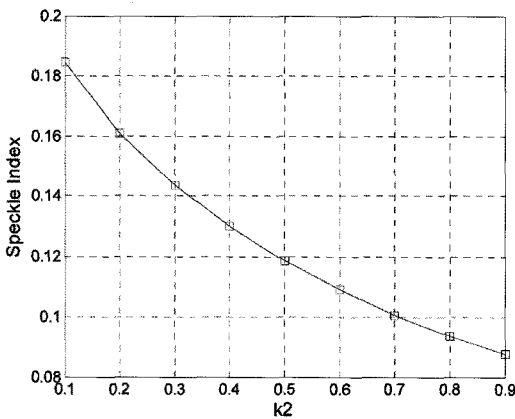


Fig. 14. Change of speckle index ($k_1 = 1.5$).

Fig. 11에 보인 바와 같이 entropy의 경우 k_2 값이 증가함에 따라 융합 영상에서 레이더 영상이 차지하는 비율이 감소하게 되어 융합 영상에 포함된 총 정보량을 나타

내는 entropy는 지속적으로 감소하게 된다. k_2 값이 증가함에 따라 융합 영상에 포함되는 광학 영상 특성은 증가하고 레이더 영상 신호 특성은 감소하게 되어 image clarity, spatial frequency, speckle index 값들도 지속적으로 감소함을 볼 수 있다.

5. 결론

본 논문에는 레이더 위성 영상 신호와 광학 위성 영상 신호의 상대적인 크기를 비교하여 상대적인 크기가 큰 레이더 신호를 융합 영상에 할당하고 상대적인 크기가 작은 경우에는 레이더 영상 신호와 광학 영상 신호의 가중치 합으로 융합 영상 신호를 결정하는 웨이블릿 기반의 영상 융합 방법을 제안하였다. 제안한 영상 융합 방식에 사용된 융합 규칙은 레이더 위성 영상과 광학 위성 영상 신호의 상대적인 신호 비(ratio), 영상 그레디언트, 로컬 영역의 영상 밝기값 분산을 동시에 고려하는 방식으로 영상의 에지 등과 같은 특징 정보가 융합 영상에 보다 잘 반영하도록 하면서 동시에 광학 위성 영상의 균일한 밝기값 영역 정보가 융합 영상에 반영되는 특징이 있다. Ikonos 위성영상과 TerraSAR-X 위성영상을 이용한 실험에서 광학 위성 영상에 비해 상대적인 신호 크기가 큰 레이더 위성 영상 신호만을 융합 영상에 할당하는 기존 방법보다 융합 영상에 포함되는 정보량이 증가하는 결과를 entropy, image clarity, spatial frequency, speckle index의 평가 지표를 통해 확인하였다.

본 연구 결과의 유용성을 확인하기 위해서 향후 광학 및 레이더 위성 영상으로부터 생성된 융합 영상을 이용한 영상 분류, 인공 지물 검출, 변화 탐지 등의 연구가 필요하리라 사료된다.

사사

본 연구는 한국항공우주연구원의 다목적실용위성3호 시스템종합 개발사업(V)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- Fatone, L., P. Maponi, and F. Zirilli, 2001. Fusion of SAR/optical images to detect urban areas, *Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas, IEEE/ISPRS Joint Workshop2001*, pp. 217-221.
- Garzelli, A., 2002. Wavelet-based fusion of optical and SAR image data over urban area, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(3): 59-62.
- Gonzalez, R. C. and R. E. Woods., 2008. *Digital Image Processing*, Prentice Hall, New Jersey, pp. 501-502.
- Kim, J, Y. Lee, and S. Kwak, 2005. The fusion of SAR images and optical images based on the use of wavelet transform: to improve classification accuracy, *SPIE Proc. of 2005SAR Image Analysis, Modeling, and Techniques VII*, vol. 5980:59800K1-K8.
- Kutay, M. A., M. Karaman, M., and G. Bozdagi, 1993. Enhancement of images corrupted with signal dependent noise: application to ultrasonic imaging, *SPIE Visual Communication and Image Processing*, 2094, pp.316-323.
- Li, Z., Z. Jing, G. Liu, S. Sun, and H. Leung, 2003. A region-based image fusion algorithm using multiresolution segmentation, *IEEE Proc. of 2003 Intelligent Transportation Systems*, pp.96-101.
- Long, Z. and W. Guangfang, 2007. Study on adaptation of SAR/CCD image fusion algorithm, *International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2007: Image Processing*, Proc. of SPIE vol. 6623: 66230.
- Ye, C. S., 2009. Fusing optical and SAR images using wavelet transform and mutiscale images, *Proc. of International Symposium on Remote Sensing 2009*, Busan, Korea, Oct. 28-30., pp. 520-523.