

AM 기법을 이용한 TM 마스크의 형성 및 SAR 영상의 경계검출 알고리즘

(The Generation of a TM Mask Using the AM Technique
and the Edge Detection Algorithm for a SAR Image)

韓 洙 鎔*, 崔 聖 鎭**, 羅 克 煥***

(Soo Yong Han, Seong Jhin Choi, and Keuk Hwan Ra)

要 約

본 논문에서는 AM(associative mapping) 기법을 이용한 TM(template matching) 마스크를 형성하고, 이를 이용하여 SAR(synthetic aperture radar) 영상의 경계검출에 적절한 알고리즘을 제안하였다. 또한, 제안된 경계검출 알고리즘의 효능을 기존의 TM 연산자의 결과와 비교하였다. 제안된 경계검출 알고리즘은 기존의 경계검출 연산자보다 정확하고 선명한 경계영상을 형성 하였으며, 기존의 연산자를 적용할 때 발생하는 불분명한 경계값이 제거되므로 명도(intensity)가 낮은 국부영역에서도 경계검출 능력이 저하되지 않았다. 또한, 경계선의 방향 분해능을 조절함에 따라 수행시간을 감소시킬 수 있었고, 경계선을 추출하기 위한 임계값의 결정이 매우 직관적이었다.

Abstract

In this paper, a set of TM(template matching) mask using the AM(associative mapping) technique was generated and the edge detection algorithm for a SAR image was proposed. And also, the performance of the proposed edge detection algorithm was tested with the conventional edge detection techniques. The proposed edge detection algorithm created an edge image which was more accurate and clear than the conventional edge detection techniques and the performance of the proposed detection technique was not deteriorated for low intensity area in the image because the uncertainly thresholded value generated by the conventional detection methods was requested. Also, the number of masks and the detection time were reduced by adjusting resolution of edge detection and the consideration for the threshold value extracting the edge was very intuitive.

*正會員, 馬山 專門大學 電子計算器科

(Dept. Computer Eng., of Masan Junior College)

**正會員, 仁德 專門大學 電子科

(Dept. Elec. of Induk Junior College)

***正會員, 光云大學校 工科大學 電子工學科

(Dept. Elec. in Kwangwoon Univ.)

接受日字: 1991年 11月 5日

I. 서 론

SAR(synthetic aperture radar) 영상의 분석 및 컴퓨터 비전에서 edge는 영상내의 영역을 분리하는 것이다. 위성으로 부터 수신된 영상 및 일반 영상의 분석에서 문제점으로 대두되는 것은 명도(intensity)가 서로 다른 국부 영역에서도 edge가 검출될 수 있

도록 하는 임계값(threshold value)의 결정이다.^{[12][13]}

일정한 상수값으로 된 임계값(constant threshold)을 사용하게 되면 영상내의 다른 국부 영역에 비하여 영상의 명도(intensity)가 낮은 지역에 존재하는 edge가 무시될 확률이 높다. 또한, SAR 영상과 같이 원거리에서 수신된 영상에서의 edge 검출시의 미소한 변화가 실제의 지형에 커다란 변화를 가져오므로 정확한 경계선을 검출한다는 것은 매우 중요한 영상처리 작업의 하나이다.^{[14][15]}

Rosenfeld & Kak,^[6] Blicher^[1] 등이 영상으로 부터 경계를 검출하는 문제 및 영상의 해석 방법을 체계적으로 다루었으며, 최근에는 Haralick,^[4] Canny,^[2] Nawla & Binford^[7] 등이 영상으로 부터 정확한 경계선 검출방법을 제안하였으며, Bovick^[15]은 speckle 잡음이 존재하는 SAR 영상으로 부터 LoG(laplacian of gaussian) 및 RoA(ratio of average) 연산자를 이용하여 경계선을 검출하였다. 일반적으로 디지털 영상의 모든 화소에서 경계를 검출하는 방법은 국부 연산자(local operator)를 적용하는 것이며, 이러한 국부 연산자는 차등 연산에 의한 근사치 계산법(differential operator)과 각 화소(pixel)에 미리 결정된 경계 검출용 mask를 convolution하여 임계값을 취함으로써, 경계를 형성하는 TM(template matching) 방법이 있다.^{[16][17][18]} 영상의 분석시 적용되는 경계검출 연산자가 정확성을 가지지 못하면 위성으로부터 수신된 영상으로부터 영상내의 물체를 추출하거나, 위치를 결정하는 것과 같은 영상의 자동 해석이 불가능하며, 실제 사용되고 있는 SAR 등에서 영상 내의 물체(object)인식 및 위치파악을 어렵게 한다.^[19]

본 논문에서는 영상내의 명도 변화를 민감하게 감지할 수 있도록 기존의 경계검출 연산자 대신 AM(associative mapping)^[5]에 의하여 형성된 경계검출 연산자를 사용하여 SAR 영상내의 경계를 검출하였다. 영상내의 3×3 화소군에서 정의된 ISE(ideal step edge)와 9차원 벡터 공간(9 dimensional vector space)으로 간주된 화소군의 직교 기저(orthonormal basis)간에 optimal linear AM을 적용하여 형성된 TMM(template matching mask)는 기존의 TMM보다 정확하고 선명한 경계선을 형성하였다. 기존의 마스크(mask)를 적용할 때 발생하는 불분명한 값이 제거되어지므로 영상내에서 명도가 낮은 국부영역의 경계선도 명백하게 검출되었다. 마스크의 방향성을 고려하는 정도에 따라 마스크의 수를 줄임으로서 검출된 경계의 값에 손실을 주지 않고 짧은 시간에 수행되었다.

제 II 절에서는 기존의 TMM를 방향에 따라 분류하

고, 정의된 3×3 화소군의 중심을 지나는 ISE(ideal step edge)와 convolution을 할 때 경계가 아닌 부분에서 불분명한 값을 나타낸다는 것을 보이고, 형성된 불분명한 값은 임계값의 결정을 어렵게 한다는 것을 예를 통하여 보인다. 제 III 절에서는 optimal linear AM 기법을 이용하여 임계값 결정시 장애 요인으로 작용하는 불분명한 값이 제거되는 TMM를 제안한다. 제안된 마스크는 “0” 및 “1”의 값만 존재하는 2진영상(binary image) 및 휘도값(gray level)이 존재하는 영상에도 적용되어 진다는 것을 보이고, 표1에 정의되지 않은 ISE(중심을 통과하지 않는 ISE)에도 적용된다는 것을 보인다. 제 IV 절에서는 제안된 마스크를 이용하여 경계를 검출하는 알고리즘을 제시하고, 이때 적용되어 지는 임계값은 배경(background) 값에 비례하여 결정될 뿐만 아니라 입력 화소군의 응답벡터와 ISE의 응답벡터 간의 사잇각과 uniform pattern간의 사잇각으로 결정되므로 임계값의 결정이 매우 직관적이고 용이하다는 것을 보인다. 제 V 절에서는 실제의 SAR 영상에 AM으로 형성된 마스크와 경계검출 알고리즘을 적용하여 얻어진 경계영상(edge image) 및 2진 경계영상(edge map)을 제시한다. 비교를 위하여, 기존의 마스크를 사용하여 얻어진 경계영상을 제시한다.

II. 기존의 TM 연산자 및 ISE

3×3 화소군(3×3 neighborhood)의 중심화소를 지나는 8개의 ISE를 정의하면 표1과 같이 수평성분의 경계선을 포함한 s_i 이 45° 간격으로 회전한 모양이 된다. 3×3 TM방법에 의한 경계선 검출에서 모든 경계선은 표1의 각 ISE중 하나에 속한다고 가정한다.

표 1. 정의된 8개의 ISE(ideal step edge)
Table 1. The defined eight ISE(ideal step edge)

$s_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$s_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$s_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$s_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$
$s_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$s_6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$s_7 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$s_8 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

영상의 분석 및 경계검출에 사용되고 있는 기존의 TM연산자 중 가장 널리 활용되고 있는 연산자는 표 2에 열거된 3-level(Prewitt I), 5-level(Sobel), compass(Prewitt II) 및 Kirsch 연산자이다. 각 연산자

를 8방향(0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315°) 으
로 분류하면 표2와 같다.

표 2. 8방향으로 분류된 기존의 TM 연산자
Table 2. The conventional TM operators with
eight gradient direction.

	3-level (Prewitt I)	5-level (Sobel)	compass (Prewitt II)	Kirsch
0°	$\frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{5} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{15} \begin{bmatrix} 5 & 5 & 5 \\ -3 & 0 & -3 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix}$
45°	$\frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{4} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -2 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{5} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{15} \begin{bmatrix} 5 & 5 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix}$
90°	$\frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{5} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{15} \begin{bmatrix} 5 & -3 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ 5 & -3 & -3 \end{bmatrix}$
135°	$\frac{1}{3} \begin{bmatrix} 0 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{4} \begin{bmatrix} 0 & -1 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{5} \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{15} \begin{bmatrix} -3 & -3 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ 5 & 5 & -3 \end{bmatrix}$
180°	$\frac{1}{3} \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{4} \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{5} \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{15} \begin{bmatrix} -3 & -3 & -3 \\ -3 & 0 & -3 \\ 5 & 5 & 5 \end{bmatrix}$
225°	$\frac{1}{3} \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{4} \begin{bmatrix} -2 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{5} \begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{15} \begin{bmatrix} -3 & -3 & -3 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & 5 & 5 \end{bmatrix}$
270°	$\frac{1}{3} \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{4} \begin{bmatrix} -1 & -0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{5} \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{15} \begin{bmatrix} -3 & - & 5 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & -3 & 5 \end{bmatrix}$
315°	$\frac{1}{3} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{4} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \\ -2 & -0 & 0 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{5} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{15} \begin{bmatrix} -3 & 5 & 5 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix}$

표2의 경우에 TM 연산자를 표1의 ISE와 convolution한 결과는 표3과 같다. 표3의 (c) 및 (d)의 경우에는 방향성을 (a) 및 (b)의 경우와 일치시키기 위하여 연산자에 곱해지는 계수 1/5((c)의 경우) 및 1/15((d)의 경우)을 각각 1/3 및 1/5이 되도록 조정하였다.

표3의 결과에서 살펴본 바와 같이 각 방향의 TMM와 각 방향의 ISE간의 convolution은 서로의 지시하는 방향이 정확하게 일치하는 경우에 가장 큰 값("1")을 출력하지만, TMM와 ISE간에 서로 방향이 일치하지 않는 경우에는 "0"이 아닌 모호한 값을 출력한다. 특히, Kirsch 연산자의 경우는 원하는 최대값("1")의 양쪽방향에도 최대값이 존재하므로 정확한 경계선의 추출을 어렵게 한다. 이러한 불분명한 값은 2진의 ISE에서는 문제가 되지 않지만 회도값이 존재하는 경우에는 경계선 추출의 커다란 장애요인이 된다.

예를 들어 그림1과 같은 국부영역이 동일영상내에 존재한다고 가정한다면, 각 방향의 3-level(Prewitt I) TMM와의 convolution 결과는 표4와 같다.

200	200	200	180	180	180	160	160	160
200	200	200	180	180	180	160	160	160
100	100	100	120	120	120	140	140	140

그림 1. 동일한 방향의 경계선을 포함한 3×3 화소군
(수평 방향의 step edge 포함)

Fig. 1. 3×3 neighborhood containing the same step edge direction, (containing horizontal step edge).

영상내의 경계선을 검출하기 위하여 기존의 TMM를 사용하고, 특정 임계값을 적용한다면 표4의 관찰에서 알 수 있듯이 임계값의 결정에 따라 여러가지의 잘못된 결과가 발생한다. 즉, 그림1의 화소군에서 3-level(Prewitt I) 연산자를 사용하여 경계를 검출하는 임계값을 '50' 정도로 결정한다면 그림1(c)의 경우는 분명한 경계선이 존재함에도 불구하고 경계가 검출되지 않으면, (a)의 경우에는 0° 방향 뿐 아니라 45° 방향에서도 경계가 검출되므로 불분명한 방향의 경계선이 존재하게 된다. 반대로 불분명한 값의 존재를 제거하기 위하여 임계값을 '70' 정도로 결정한다면, (a)의 경우에는 0° 방향의 분명한 경계선의 검출되지만 (b), (c)의 경우에는 경계가 존재함에도 경계가 검출되지 않는다. 그림1에 3-level(Prewitt I) 연산자를 적용한 결과를 종합하면 특정한 값으로 임계값을 결정하면 정합(matching)의 정도가 강하면서 반응의 정도가 적은 경계선과, 정합의 정도는 약하지만 반응강도(response value 또는 convolution result)가 큰 불확실한 마스크가 존재한다. 극단적인 경우에는 잘 정합된 경계선보다 정합되지 않은 3×3 화소군이 경계선을 포함하고 있는 것이 된다.

기존의 TMM에 존재하는 이러한 불합리성을 제거하기 위하여 적응 임계값(adaptive threshold)이 적용되어야 한다. 그러나, 이러한 방법은 매우 많은 계산량이 필요하게 된다. 본 논문에서 제안된 방법은 다음의 두가지 사항을 적용하여 기존의 방법에서 나타나는 단점을 극복할 수 있는 TM 경계 연산자를 형성하고, 임계값을 3×3 화소군의 배경값에 따라 결정할 수 있을 뿐 아니라 임계값 결정이 용이한 경계 검출 알고리즘을 제시한다.

① TMM의 형성은 신경회로망의 연상기억장치(associative memory) 형성에 적용되는 optimal linear AM 기법을 이용하였으며, 형성된 각 방향의 마스크

- 표 3. 기존의 TM 연산자와 ISE간의 convolution 결과
 (a) 3-level(Prewitt I) 연산자와 ISE간의 convolution 결과
 (b) 5-level(Sobel) 연산자와 ISE간의 convolution 결과
 (c) compass(Prewitt II) 연산자와 ISE간의 convolution 결과
 (d) kirsch 연산자와 ISE간의 convolution 결과

Table 3. The result of convolution between the conventional TM operator and the ISE.
 (a) the convolution result between the 3-level (Prewitt I) operator and the ISE,
 (b) the convolution result between the 5-level (Sobel) operator and the ISE,
 (c) the convolution result between the compass (Prewitt II) operator and the ISE,
 (d) the convolution result between the Kirsch operator and the ISE.

	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
s ₁	1.0	0.67	0.0	-0.67	-1.0	-0.67	0.0	0.67
s ₂	0.67	1.0	0.67	0.0	-0.67	-1.0	-0.67	0.0
s ₃	0.0	0.67	1.0	0.67	0.0	-0.67	-1.0	-0.67
s ₄	-0.67	0.0	0.67	1.0	0.67	0.0	-0.67	-1.0
s ₅	-1.0	-0.67	0.0	0.67	1.0	0.67	0.0	-0.67
s ₆	-0.67	-1.0	-0.67	0.0	0.67	1.0	0.67	0.0
s ₇	0.0	-0.67	-1.0	-0.67	0.0	0.67	1.0	0.67
s ₈	0.67	0.0	-0.67	-1.0	-0.67	0.0	0.67	1.0

(a)

	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
s ₁	1.0	0.75	0.0	-0.75	-1.0	-0.75	0.0	0.75
s ₂	0.75	1.0	0.75	0.0	-0.75	-1.0	-0.75	0.0
s ₃	0.0	0.75	1.0	0.75	0.0	-0.75	-1.0	-0.75
s ₄	-0.75	-0.0	0.75	1.0	0.75	0.0	-0.75	-1.0
s ₅	-1.0	-0.75	0.0	0.75	1.0	0.75	0.0	-0.75
s ₆	-0.75	-1.0	-0.75	0.0	0.75	1.0	0.75	0.0
s ₇	0.0	-0.75	-1.0	-0.75	0.0	0.75	1.0	0.75
s ₈	0.75	0.0	-0.75	-1.0	-0.75	0.0	0.75	1.0

(b)

	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
s ₁	1.0	0.33	-0.33	-1.0	-1.0	-1.0	-0.33	-0.33
s ₂	0.33	1.0	0.33	-0.33	-1.0	-1.0	-1.0	-0.33
s ₃	-0.33	0.33	1.0	0.33	-0.33	-1.0	-1.0	-1.0
s ₄	-1.0	-0.33	0.33	1.0	0.33	-0.33	-1.0	-1.0
s ₅	-1.0	-1.0	-0.33	0.33	1.0	0.33	-0.33	-1.0
s ₆	-1.0	-1.0	-1.0	-0.33	0.33	1.0	0.33	-0.33
s ₇	-0.33	-1.0	-1.0	-1.0	-0.33	0.33	1.0	0.33
s ₈	0.33	-0.33	-1.0	-1.0	-1.0	-0.33	0.33	1.0

(c)

	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
s ₁	1.0	1.0	0.0	-0.78	-1.67	-0.78	-0.78	1.0
s ₂	1.0	1.0	1.0	0.0	-0.78	-1.67	-0.78	-0.78
s ₃	-0.78	1.0	1.0	1.0	0.0	-0.78	-1.67	-0.78
s ₄	-0.78	-0.78	1.0	1.0	1.0	0.0	-0.78	-1.67
s ₅	-1.67	-0.78	-0.78	1.0	1.0	1.0	0.0	-0.78
s ₆	-0.78	-1.67	-0.78	-0.78	1.0	1.0	1.0	0.0
s ₇	0.0	-0.78	-1.67	-0.78	-0.78	1.0	1.0	1.0
s ₈	1.0	0.0	-0.78	-1.67	-0.78	-0.78	1.0	1.0

(d)

표 4. 그림1에 주어진 3×3 화소군과 3-level (Prewitt I) TMM와의 convolution 결과
 Table 4. The convolution result between the 3-level(Prewitt I) TMM and the 3×3

	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
(a)	100	67	0	-67	-100	-67	0	67
(b)	60	40	0	-40	-60	-40	0	40
(c)	20	13.3	0	-13.3	-20	-13.3	0	13.3

크기 방향이 일치하는 ISE에만 반응하도록 하였다.
 ② 영상내 임의의 화소에 대한 경계선 여부의 결정은 ISE에 정합되는 정도인 응답벡터와 ISE 간의 사잇각 및 응답벡터와 uniform pattern간의 사잇각으로 결정한다.

III. AM 기법에 의한 TMM의 형성^[17]

실제의 영상에 나타나는 임의의 3×3 화소군을 9

차원 선형벡터 공간으로 간주하면, 임의의 3×3 화소군을 나타내는 식(1a)의 행렬 a_j는 식(1b)와 같이 9개의 요소를 가진 9차원 열벡터(column vector) a, 로 변환할 수 있다.

$$a_j = \begin{bmatrix} a_j(1) & a_j(2) & a_j(3) \\ a_j(4) & a_j(5) & a_j(6) \\ a_j(7) & a_j(8) & a_j(9) \end{bmatrix} \tag{1a}$$

$$a_j = [a_j(1) \ a_j(2) \ a_j(3) \ a_j(4) \ a_j(5) \ a_j(6) \ a_j(7) \ a_j(8) \ a_j(9)]^T \tag{1b}$$

식(1b)에서는 T는 transpose를 의미하고, a_j(i) (i=1, 2, ...,9)는 화소군을 나타내는 3×3행렬 및 9차원 벡터의 각 요소로서 화소군내의 화소값에 대응한다. 또한 식(1a)에서 식(1b)로의 변환을 matrix→vector변환(이하 MV변환이라 한다). 식(1b)에서 식(1a)로의 변환을 vector→matrix 변환이라 정의한다(이하 VM변환이라 한다). N차원인 벡터의 내적(inner product) 및 벡터의 크기(norm)는 각각 식(2) 및

(3)으로 정의된다.

$$\langle \mathbf{a}_j, \mathbf{a}_k \rangle_N = \sum_{i=1}^N a_j(i) \cdot a_k(i) \quad (2)$$

$$\| \mathbf{a}_j \|_N = \sqrt{\sum_{i=1}^N [a_j(i)]^2} \quad (3)$$

식(2) 및 식(3)의 N은 각 벡터의 차원을 나타낸다. 표1에 정의된 3×3 화소군을 \mathbf{s}_j 라 하고, \mathbf{s}_j 와 convolution되는 마스크를 \mathbf{m}_i 라할 때 $r_j(i)$ 는 마스크 \mathbf{m}_i 에 의한 \mathbf{s}_j 의 응답이고 열벡터 \mathbf{s}_j 의 응답벡터 \mathbf{r}_j 의 i 번째 요소이다. AM의 의하여 형성된 TMM의 응답은 표3에서 나타낸 것과 같은 불분명한 값이 존재하지 않고 마스크와 ISE의 방향이 일치하는 경우에만 응답이 존재하고, 방향이 일치하지 않는 경우에는 응답이 존재하지 않도록 하는 것이다. 즉, 제안된 TMM와 ISE간의 convolution 결과가 식(4)와 같이 $i=j$ 일 때만 $r_j(i)=1$ 이고 $i \neq j$ 일 때는 $r_j(i)=0$ 이 되도록 응답을 형성하는 TMM을 AM 기법을 이용하여 형성한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_1 &= [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ \mathbf{r}_2 &= [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ \mathbf{r}_3 &= [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ \mathbf{r}_4 &= [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ \mathbf{r}_5 &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ \mathbf{r}_6 &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ \mathbf{r}_7 &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]^T \\ \mathbf{r}_8 &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]^T \\ \mathbf{r}_9 &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \end{aligned} \quad (4)$$

식(4)의 각 응답벡터는 단위벡터(unit vector)로서 9차원 벡터공간의 직교기저(orthonormal basis)를 형성한다. 응답벡터 \mathbf{r}_j 는 표1에 주어진 ISE에 대한 마스크의 응답벡터가 아니라 식(5)와 같은 uniform한 3×3 화소군 \mathbf{s}_9 를 MV변환하여 얻어진 열벡터 \mathbf{s}_9 에 대한 마스크의 응답이다.

$$\mathbf{s}_9 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

MV변환에 의하여 표1의 ISE \mathbf{s}_j ($j=1, 2, \dots, 8$) 및 식(5)의 uniform pattern \mathbf{s}_9 는 열벡터 \mathbf{s}_j ($j=1, 2, \dots, 9$)로 변환되고, 이것은 식(6)의 9×9 의 행렬 \mathbf{S} 로 표시된다. 행렬 \mathbf{S} 를 AM의 입력벡터(input vector)라 한다.

$$\mathbf{S} = [\mathbf{s}_1 \ \mathbf{s}_2 \ \mathbf{s}_3 \ \mathbf{s}_4 \ \mathbf{s}_5 \ \mathbf{s}_6 \ \mathbf{s}_7 \ \mathbf{s}_8 \ \mathbf{s}_9] \quad (6)$$

또한 AM의 결과인 식(4)의 각 단위벡터도 식(7)의 9×9 행렬 \mathbf{R} 로 표시된다. 행렬 \mathbf{R} 을 AM의 출력벡터(output vector)라 한다.

$$\mathbf{R} = [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{r}_3 \ \mathbf{r}_4 \ \mathbf{r}_5 \ \mathbf{r}_6 \ \mathbf{r}_7 \ \mathbf{r}_8 \ \mathbf{r}_9] \quad (7)$$

식(6)의 입력벡터 \mathbf{S} 와 식(7)의 출력벡터 \mathbf{R} 간의 AM은 식(8)의 마스크벡터(mask vector)라 한다.

$$\mathbf{R} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{S} \quad (8)$$

마스크벡터 \mathbf{M} 은 \mathbf{S} 의 역행렬 \mathbf{S}^{-1} 을 이용하여 식(9)로 구하여 진다.

$$\mathbf{M} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{S}^{-1} \quad (9)$$

식(9)에서 \mathbf{R} 은 식(7)의 경우에 단위벡터(unit vector) \mathbf{I} 이나 경제공간의 차원을 고려하는 경우에는 단위벡터가 아니므로 \mathbf{R} 로 표기한다.

식(6) 및 식(7)의 결과를 식(9)에 적용하면 식(10)과 같다.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{m}_1 \\ \mathbf{m}_2 \\ \mathbf{m}_3 \\ \mathbf{m}_4 \\ \mathbf{m}_5 \\ \mathbf{m}_6 \\ \mathbf{m}_7 \\ \mathbf{m}_8 \\ \mathbf{m}_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 2 & -1 & -1 & -1 & -1 & 2 & -1 \\ -1 & 2 & -1 & 2 & -1 & -1 & -1 & -1 & 2 \\ 2 & -1 & -1 & -1 & -1 & 2 & 2 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 2 & 2 & -1 & -1 & -1 & 2 & -1 \\ -1 & 2 & -1 & -1 & -1 & -1 & 2 & -1 & 2 \\ 2 & -1 & -1 & -1 & -1 & 2 & -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 & 2 & -1 & -1 & -1 & -1 & 2 \\ -1 & 2 & -1 & -1 & -1 & 2 & 2 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

식(10)의 행벡터(row-vector) \mathbf{m}_j 는 \mathbf{s}_j 와 \mathbf{r}_j 간의 AM을 형성하고, 행벡터인 \mathbf{m}_j 는 열벡터를 행렬로 변환하는 식(1)의 VM변환과 유사한 방법으로 표5의 3×3 행렬로 표현된다.

표5의 마스크는 표3 및 표4에서 고찰된 것과 같은 불분명한 값이 존재하지 않는 응답을 형성한다. 즉, 식(4)에 주어진 응답과 같이 표1의 각 ISE에 대응하여 9차원 벡터공간의 유일한 값으로 반응한다.

표1의 ISE에 대한 표5의 제안된 마스크응답은 유일하게 나타나지만 실제의 SAR 영상 및 일반 디지털 영상에서는 항상 표1과 같이 2진수로 구성된 이상적인 3×3 화소군만 존재하는 것이 아니므로 휘도 값이 존재하는 실제의 영상에도 표5의 마스크가 적용되어 진다는 것을 증명한다. 실제의 영상으로 부터 얻은 임의의 3×3 화소군을 \mathbf{g}_j 라 하면 \mathbf{g}_j 는 식(11)과 같이 ISE \mathbf{s}_j 에 대응하는 값으로 표현된다.

표 5. AM기법에 의하여 형성된 TM 마스크 (제안된 마스크)

Table 5. The TM mask generated by the AM technique. (the proposed mask).

$m_1 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & 2 \\ -1 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \end{bmatrix}$	$m_2 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -1 & 2 & -1 \\ 2 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$	$m_3 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \\ 2 & -1 & -1 \end{bmatrix}$
$m_4 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -1 & -1 & 2 \\ 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \end{bmatrix}$	$m_5 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \\ 2 & -1 & 2 \end{bmatrix}$	$m_6 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \\ 2 & 2 & -1 \end{bmatrix}$
$m_7 = -\frac{1}{3} \begin{bmatrix} -1 & -1 & 2 \\ 2 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$	$m_8 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \\ 2 & -1 & -1 \end{bmatrix}$	$m_9 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

$$g_j = h s_j + b s_9 \quad (11)$$

식(11)에서 h는 3×3 화소군 내에 존재하는 경계의 높이를 나타내고 b는 3×3 화소군의 배경값을 나타내는 상수이다. 식(11)의 벡터 g_j 를 식(8)의 선형방정식에 대입하여 계산하면 식(12)와 같은 응답벡터 r_j 가 얻어진다.

$$r_j = M \cdot g_j = h r_j + b r_9 \quad (12)$$

식(12)에서 r_j 의 성분 $r_j(i)$ 은 $i=9$ 인 경우에는 “b+h”이고 $i \neq 9$ 인 경우에는 “0”이다. 또한 $r_j(j)$ ($j=1, 2, \dots, 8$)의 성분 $r_j(i)$ 는 $i=j$ 인 경우에 “h”이고 $i=9$ 인 경우에는 “b”이며 그 외의 경우에는 “0”이다. 즉, 식(13)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} r_1 &= [h \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ b]^T \\ r_2 &= [0 \ h \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ b]^T \\ r_3 &= [0 \ 0 \ h \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ b]^T \\ r_4 &= [0 \ 0 \ 0 \ h \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ b]^T \\ r_5 &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ h \ 0 \ 0 \ 0 \ b]^T \\ r_6 &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ h \ 0 \ 0 \ b]^T \\ r_7 &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ h \ 0 \ b]^T \\ r_8 &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ h \ b]^T \\ r_9 &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ h+b]^T \end{aligned} \quad (13)$$

식(13)에서 각 응답벡터의 9번째 성분 $r_j(9)$ ($j=1, 2, \dots, 8$)와 벡터 r_9 를 제거시킨 벡터공간을 8차원 경계공간(8-dimensional edge space)이라한다. 식(13)에서 알 수 있듯이 ISE s_j 에 대응하는 임의의 3×3 화소군 g_j 는 8차원 경계공간의 유일한 값($j=i$ 인 경우에만 응답벡터의 $r_j(i)$ 성분이 “h”이다.)으로 응답벡터 r_j 를 형성하므로 제안된 마스크는 2진 영상 뿐 아니라 휘도값이 존재하는 영상내의 화소군에도 잘 적용되어 진다.

표1에 정의된 8개의 ISE는 경계선이 항상 3×3 화소군의 중심을 통과하는 것으로 간주되었다. 그러나 경계선이 3×3 화소군의 중심을 통과하지 않는 ISE에 대한 마스크의 응답도 중요한 의미를 지닌다.

예를 들어 식(14a)와 같은 3×3 화소군은 분명한 수평성분의 경계선을 포함하고 있으나 표1의 ISE에 포함되지 않으며, 제안된 마스크의 응답벡터도 식(4)와 같지 않다.

식(14a)와 같이 표1에 주어지지 않는 ISE를 ‘3×3 화소군의 중심을 통과하지 않는 ISE’라 하고 식(14b)와 같이 정의하면 제안된 마스크와의 응답은 식(14c)와 같이 주어진다.

$$s_{91} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (14a)$$

$$s_{91} = s_9 - s_1 \quad (14b)$$

$$r_{91} = r_9 - r_1 = [-1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1] \quad (14c)$$

동일한 방법으로 $s_{92}, s_{93}, s_{94}, s_{95}, s_{96}, s_{97}, s_{98}$ 에 대한 응답벡터 $r_{92}, r_{93}, r_{94}, r_{95}, r_{96}, r_{97}, r_{98}$ 는 식(15)와 같다.

$$\begin{aligned} r_{91} &= [-1 \ -0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \\ r_{92} &= [0 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \\ r_{93} &= [0 \ 0 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \\ r_{94} &= [0 \ 0 \ 0 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \\ r_{95} &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \\ r_{96} &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -1 \ 0 \ 0 \ 1]^T \\ r_{97} &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -1 \ 0 \ 1]^T \\ r_{98} &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -1 \ 1]^T \\ r_{99} &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \end{aligned} \quad (15)$$

식(15)는 경계선이 3×3 화소군의 중심을 통과하지 않는 ISE에 대한 응답을 나타내는 것으로 “-1”을 “-h”로 “1”을 “b”로 대치하면 식(13)과 같이 휘도값이 존재하는 영상에서의 제안된 마스크 응답벡터가 된다. 이때 “b”는 식(13)에서와 같이 3×3 화소군이 배경값이 되고 “-h”는 ISE s_j ($j=1, 2, \dots, 8$)가 uniform pattern s_9 를 기준으로 반전되었을 때 얻어진 ISE s_{91} (즉, 중심을 통과하지 않는 ISE)에 대응하는 임의의 3×3 화소군내 경계 높이 이다. 8차원 경계공간만을 고려하면 식(13) 및 식(15)로부터 제안된 마스크는 휘도값이 존재하는 임의의 3×3 화소군에 대하여 유일한 응답벡터를 형성하고, 이때 화소군이 표1의 ISE 및 중심을 통과하지 않는 ISE에 대응한다면 유일하게 형성된 응답벡터의 성분은 $j \neq i$ 인 경우 “0”이고 $j=i$ 인 경우에만 유일한 값(“h” 또는 “-h”)

이 된다. 또한, 임의의 화소군이 ISE에 유일하게 대응하지 않는 경우에는 응답벡터가 어떠한 ISE의 응답벡터와 가장 유사한가를 결정하여 경계선 여부를 판별한다. (임의의 3×3 화소군이 특정 ISE와 얼마나 잘 정합되는 가를 나타내는 유사성 정도를 나타내는 식은 IV절에서 정의된다.) 8차원 경계공간은 하나의 응답벡터 \mathbf{r}_i 에 하나이상의 ISE \mathbf{s}_j 를 AM 시킴으로서 경계공간의 차원이 감소된다. AM의 출력벡터 \mathbf{R} 를 식(16)과 같이 두어 두개의 ISE \mathbf{s}_j 를 하나의 응답벡터 \mathbf{r}_j 에 대응시켜 식(9)에 적용하면 식(17)과 같이 4차원 경계공간에서의 마스크를 얻는다.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{m}_{41} = \sum_{i=1}^{s/d} \mathbf{m}_{(i-1)d+i} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -2 & -2 & -2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{m}_{42} = \sum_{i=1}^{s/d} \mathbf{m}_{(i-1)d+i} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \\ -2 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{m}_{43} = \sum_{i=1}^{s/d} \mathbf{m}_{(i-1)d+i} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{m}_{44} = \sum_{i=1}^{s/d} \mathbf{m}_{(i-1)d+i} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\mathbf{m}_{49} = \mathbf{m}_9$$

$$\mathbf{m}_{21} = \sum_{i=1}^{s/d} \mathbf{m}_{(i-1)d+i} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & 2 \\ -1 & -4 & -1 \\ 2 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{m}_{22} = \sum_{i=1}^{s/d} \mathbf{m}_{(i-1)d+i} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -1 & 2 & -1 \\ 2 & -4 & 2 \\ -1 & 2 & -1 \end{bmatrix} \mathbf{m}_{23} = \mathbf{m}_9 \quad (18)$$

$$\mathbf{m}_{11} = \sum_{i=1}^{s/d} \mathbf{m}_{(i-1)d+i} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{m}_{10} = \mathbf{m}_9 \quad (19)$$

식(17), (18) 및 식(19)의 \mathbf{m}_{dl} ($d=1,2,4, l=1,2,3,4,9$) 은

d차원 경계공간의 1번째 마스크를 나타내는 것으로 8차원 경계공간의 마스크 $\mathbf{m}_{(i-1)d+i}$ 들이 합쳐져서 형성된 마스크이다. 단, ($i=1,2,\dots,8/d$).

또한 \mathbf{m}_{dl} 은 d차원의 경계공간에서 8/d개의 입력벡터가 (i-1)d+1번째의 응답벡터에 대응되었을때 식(9)로부터 얻어진 마스크이다.

식(19)의 마스크는 Laplacian operator의 형태와 비례한다.^{[1],[11]} 경계공간에 대하여 제안된 마스크는 Laplacian-type 연산자임을 알 수 있고, 마스크의 수가 증가할수록 정확한 방향성을 가진 연산자가 된다. 수행시간 및 방향성의 중요성을 고려하여 적절하게 마스크의 집합을 선택할 수 있다.

IV. 경계검출 알고리즘 (Edge detection algorithm)

III절에서 제안된 마스크를 이용하여 SAR 영상으로부터 경계선을 검출할 때 2개의 계산값이 필요하다. 식(20)은 3×3 화소군의 응답벡터 \mathbf{r}_i 가 특정 ISE \mathbf{s}_j 에 대응하는 응답벡터 \mathbf{r}_j 와 얼마나 유사한가를 나타내는 식으로 1과 -1사이의 값이 된다.

$$P_j = \frac{\langle \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j \rangle_{\mathbf{s}_j}}{\|\mathbf{r}_i\|_{\mathbf{s}_j} \cdot \|\mathbf{r}_j\|_{\mathbf{s}_j}} = \frac{r(j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^s [r(i)]^2}} \quad (j=1, 2, \dots, 8) \quad (20)$$

식(20)에서 \mathbf{r} 는 식(12)에서와 같이 임의의 화소군 \mathbf{g} 에 대한 마스크의 응답벡터이고 ($\mathbf{r} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{g}$), \mathbf{r}_j 는 ISE \mathbf{s}_j 에 대응하는 응답벡터 ($\mathbf{r}_j = \mathbf{M} \cdot \mathbf{s}_j$)이며, $\langle \mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j \rangle_{\mathbf{s}_j}$, $\|\mathbf{r}_i\|_{\mathbf{s}_j}$ 및 $\|\mathbf{r}_j\|_{\mathbf{s}_j}$ 은 식(2) 및 식(3)에서 정의한 바와같이 8차원 경계공간에서의 벡터 내적 및 벡터 크기를 나타낸다. 만약 $P_j=1$ 이라면 임의의 3×3 화소군에 대한 입력벡터 \mathbf{g} 가 ISE \mathbf{s}_j 와 일치하는 것이고, $P_j=-1$ 이면 화소군의 입력벡터 \mathbf{g} 가 \mathbf{s}_j 로 부터 반전된 ISE \mathbf{s}_j 와 일치한다는 것을 의미한다. 또한, $P_j=0$ 인 경우는 입력화소군 \mathbf{g} 가 ISE \mathbf{s}_j 와 전혀 일치하지 않는다는 것을 의미하고, P_j 가 그외 -1과 1사이의 값인 경우는 입력된 화소군이 표1에서 정의된 8개의 ISE 및 \mathbf{s}_9 로 부터 반전된 ISE도 아닌 것으로 \mathbf{g} 는 thin line 또는 isolated point등을 포함하는 화소군이다. 이러한 경우에는 P_j 에 대한 임계값 T ($0 \leq T \leq 1$)를 결정하여 $|P_j| \geq T$ 인 경우는 화소군이 edge (ISE \mathbf{s}_j 와 가장 유사한 edge)를 포함하고 있는 것으로 간주하고, 그렇지 못한 경우에는 입력된 화소군이 weak edge를 포함하고 있는 것으로 간주한다. weak edge를 포함하고 있는 화소군은 식(21)의 Q값을 이용하여 다시 edge와 non-edge로 분류된다.

식(21)은 입력된 임의의 3×3 화소군이 uniform pattern과 얼마만큼 기울어져 있는가를 나타내는 값으로 제거되어야 할 weak edge를 결정하는 중요한 계산값이 된다.

$$Q = \frac{\langle \mathbf{r}, \mathbf{r}_s \rangle_s}{\|\mathbf{r}\|_s \cdot \|\mathbf{r}_s\|_s} = \frac{r(9)}{\sqrt{\sum_{i=1}^8 [r(i)]^2}} \quad (21)$$

식(21)에서 \mathbf{r} 는 임의의 3×3 화소군에 대한 마스크의 응답벡터이고, \mathbf{r}_s 는 uniform pattern \mathbf{s}_s 에 대응하는 응답벡터이며, $\langle \mathbf{r}, \mathbf{r}_s \rangle_s$, $\|\mathbf{r}\|_s$, 및 $\|\mathbf{r}_s\|_s$ 는 식(2) 및 식(3)에서 정의한 바와 같이 9차원 벡터 내적 및 벡터 크기를 나타낸다. Q의 값이 1이면 입력된 화소군 \mathbf{g} 는 uniform pattern \mathbf{s}_s 와 같은 평면으로 입력된 화소군 \mathbf{g} 는 edge를 전혀 포함하지 않는다. 따라서 식(20)으로 부터 어떤 화소군이 weak edge를 포함하고 있다면 Q값을 계산하여 $Q \geq T_s$ 이면 입력된 화소군은 edge를 포함하고 있지 않은 것으로 분류되고 (non-edge), $Q < T_s$ 이면 edge를 포함하고 있는 것으로 분류된다. (edge). 이때 T_s ($0 \leq T_s \leq 1$)는 Q에 대한 임계값이다.

식(20) 및 식(21)을 이용하여 SAR 영상에서 경계를 검출하는 알고리즘을 단계별로 서술하면 다음과 같다.
 Step 1: 경계공간의 차원N을 결정한다. ($N=8, 4, 2, 1$)
 Step 2: 9×9 마스크벡터 \mathbf{M} 을 형성한다.
 Step 3: 처리될 화소 주변의 3×3 화소군을 MV 변환하여 9차원 열벡터 \mathbf{g} 를 형성한다.
 Step 4: \mathbf{g} 에 대한 마스크벡터 \mathbf{r} 를 구한다. ($\mathbf{r} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{g}$)
 Step 5: \mathbf{g} 가 어떤 ISE와 가장 유사한지를 결정한다.

$$k = \underset{i}{\arg} (\max (|r(i)|)) \quad (22)$$

Step 6: \mathbf{g} 와 가장 유사하다고 결정된 k방향의 ISE \mathbf{s}_k 의 응답벡터 \mathbf{r}_k 와 \mathbf{r} 간의 유사성 정도(P_k)를 계산한다.
 Step 7: 임계값 T를 결정하고, $|P_k| \geq T$ 이면 처리중의 화소를 edge로 판정하고 Step 10으로 간다. $|P_k| < T$ 이면 입력 화소군은 weak edge를 포함한다고 판정하고 Step 8로 간다.
 Step 8: \mathbf{g} 의 응답벡터 \mathbf{r} 과 uniform pattern \mathbf{s}_s 의 응답벡터 \mathbf{r}_s 간의 유사성 정도(Q)를 계산한다.
 Step 9: Q에 대한 임계값 T_s 를 결정하고, $Q < T_s$ 이면 처리중의 화소는 edge가 되고, $Q \geq T_s$ 이면 처리중의 화소는 non-edge가 된다.
 Step 10: edge화소 및 non-edge화소의 화소값 결정
 Step 11: 영상내에 처리할 화소가 존재하면 Step 3으로 가서 계속하고 더이상 처리할 화소가 없으면 끝낸다.

경계검출 알고리즘의 Step 5에서 식(22)는 입력화소군의 응답벡터 \mathbf{r} 의 각 방향 성분 $r(i)$ ($i=1, 2, \dots, N$) 중 가장 큰값의 인수(argument)를 구하여 k라 둔 것이다. 이때, k는 입력된 3×3 화소군 \mathbf{g} 가 k방향의 ISE \mathbf{s}_k ($k=1, 2, \dots, 8$)와 가장 유사하다는 것을 나타내는 인수이다. Step 10의 화소값 결정은 2진 경계영상(edge map) 형성시에 경계(edge)의 화소값을 1, 비경계(non-edge)의 화소값을 0으로 하고, 경계영상(edge image) 형성시에는 비경계의 화소값을 0으로 하고, 경계의 화소값을 경계의 크기인 식(23)으로 한다. 영상의 탐색은 좌상귀(top-left coner)에서 오른쪽아래로 탐색하여 우하귀(right-bottom coner)에서 끝나도록 한다.

$$\|\mathbf{r}\|_s = \sqrt{\sum_{i=1}^8 [r(i)]^2} \quad (23)$$

또한 Step 9로부터 $Q < T_s$ 이면 Step 7로 부터 결정된 weak edge가 edge로 판정되고, $Q < T_s$ 는 식(21)과 식(23)을 이용하여 식(24)로 표현되어 진다.

$$Q = \frac{r(9)}{\sqrt{[\|\mathbf{r}\|_s]^2 + [r(9)]^2}} < T_s \quad (24)$$

식(24)에서 $\|\mathbf{r}\|_s$ 는 8차원 경계공간에서 \mathbf{g} 의 응답벡터 \mathbf{r} 의 크기이다. 또한 식(24)로부터 식(25)가 얻어 진다.

$$\frac{\|\mathbf{r}\|_s}{r(9)} > \frac{1}{T_s} \sqrt{1 - T_s^2} \quad (25)$$

식(23), 식(24) 및 식(25)에서 $\|\mathbf{r}\|_s$ 는 입력된 임의의 3×3 화소군을 MV 변환하여 형성된 열-벡터 \mathbf{g} 에 대한 마스크 벡터 \mathbf{M} 의 응답벡터 \mathbf{r} 의 크기를 8차원 경계공간에서 구한 것으로 화소군내의 edge크기이고, $r(9)$ 는 화소군의 배경값이며 T_s 는 Q에 대한 임계값이다. Weak edge를 포함하고 있는 화소군으로 부터 edge를 결정하는 조건은 입력된 3×3 화소군의 배경값에 대한 경계크기의 비($r(9)/\|\mathbf{r}\|_s$)가 임계값 T_s 로 결정되는 상수 ($T_s^{-1} \sqrt{1 - T_s^2}$)보다 크다는 것을 식(25)로부터 알 수 있다. 이것은 화소군에 대한 임계값이 배경값에 따라 자동으로 결정된다는 것을 의미한다. 두개의 경계결정 조건은 서로 연관성이 없으나 T가 증가함에 따라 경계선의 성분은 ISE에 가까워지고, T_s 가 증가함에 따라 입력된 3×3 화소군은 uniform pattern에 가까워지므로 경계선 화소가 될 수 없다.

식(20) 및 식(21)은 임의의 입력화소군에 대한 응답벡터 \mathbf{r} 가 9차원 좌표축에 투영(projection)된 크기를 나타낸 것으로 P_j값은 j방향의 단위벡터와 입력된 화

소군의 응답벡터인 r 의 단위벡터 간의 내적이므로 $\cos(\theta_1)$ 값이고, Q값은 9번째 좌표축의 단위벡터와 응답벡터 r 의 단위벡터 간의 내적이므로 $\cos(\theta_2)$ 값이다. (θ_1 및 θ_2 는 두 단위벡터간의 사잇각이다.) 즉, P, 및 Q값은 위에서와 같이 두 단위벡터 간의 cosine 값이므로 P, 및 Q에 대한 임계값 T 및 T_2 는 입력화소군의 응답벡터 r 과 입력 화소군에 가장 근접한 ISE s_i 의 응답벡터 r_i 간의 사잇각 θ_i 및 uniform pattern의 응답벡터인 r_0 와의 사잇각인 θ_0 만으로 결정되어 진다. 즉, $T = \cos(\theta_1)$ 이고 $T_2 = \cos(\theta_2)$ 이다.

V. 실험 결과(Experimental results)

512×512의 SAR 영상을 그림2에 나타내었으며, 그림3은 II절에서 제시한 기존의 연산자인 compass (Prewitt II) 및 Kirsch 연산자를 적용한 결과이며, 이때 적용한 임계값은 35이다. (연산자를 적용한 후의 화소값 범위는 0부터 255까지이다.)

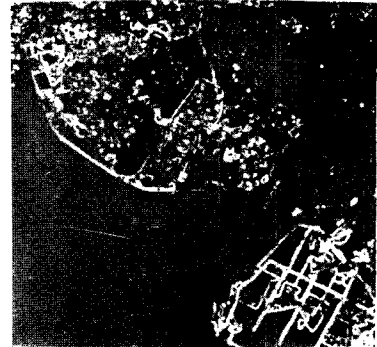
그림4는 8차원 경계공간의 마스크를 이용하여 제안된 알고리즘을 적용한 것으로 각각 $T=0(\theta=90^\circ)$, $0.383(\theta=67.5^\circ)$, $0.707(\theta=45^\circ)$, $0.924(\theta=22.5^\circ)$ 인 경우이다. $T=0$ 인 경우에는 기존의 연산자를 적용한 경우와 비교할 때 개선된 점이 나타나지 않았고, 오히려 경계선을 포함한 영상이 저하되었다. 그러한 이유는 제안된 알고리즘이 사용한 경계의 결정 조건이 경계선의 크기와 무관하기 때문이다. 경계의 결정값이 증가할수록 경계영상이 포함하는 화소의 수는 감소하지만 isolated point 및 thin line은 점차 감소하였다. 임계값을 높게 선택한 그림4(c)에서는 출력된 경계영상내의 거의 모든 경계선 성분이 ISE로 경계선의 방향이 정확하게 결정되었으나 경계선의 단절현상이 심화되었다. 방향성을 고려하는 정도에 따른 출력영상을 그림5($T=0.707; \theta=45^\circ$)에 나타내었다. 고려하는 마스크의 수를 감소함에 따라 경계영상 내의 경계선 화소의 수가 더욱 증가하였으며, 출력영상을 얻는데 걸리는 시간은 감소하였다. Weak edge를 제거하는 임계값 T_2 를 적용한 과정을 나타낸 것이 그림6이다. 그림6(a)는 4차원 경계공간에서 형성된 마스크를 적용할 때 임계값 $T=0.707(\theta=45^\circ)$ 인 경우이며 weak edge를 강조하기 위하여 2진 경계영상(edge map)으로 표현하였다. 그림 6(b)는 그림6(a)의 weak edge중 non-edge를 제거한 것으로 non-edge를 제거하기 위한 임계값 $T_2=0.985(\theta_2=10^\circ)$ 이다. 즉, 화소군의 배경값에 대한 경계의 크기가 18%이하인 weak edge는 non-edge로 판정되어



그림 2. 512×512 SAR 영상
Fig. 2. 512×512 SAR image.



(a)



(b)

그림 3. 기존의 template edge operator에 의한 경계영상
(a) compass (Prewitt II) 연산자를 적용한 결과
(b) Kirsch 연산자를 적용한 결과
Fig. 3. Edge image obtained from the conventional template edge operator.
(a) The compass (Prewitt II) result,
(b) The kirsch result.

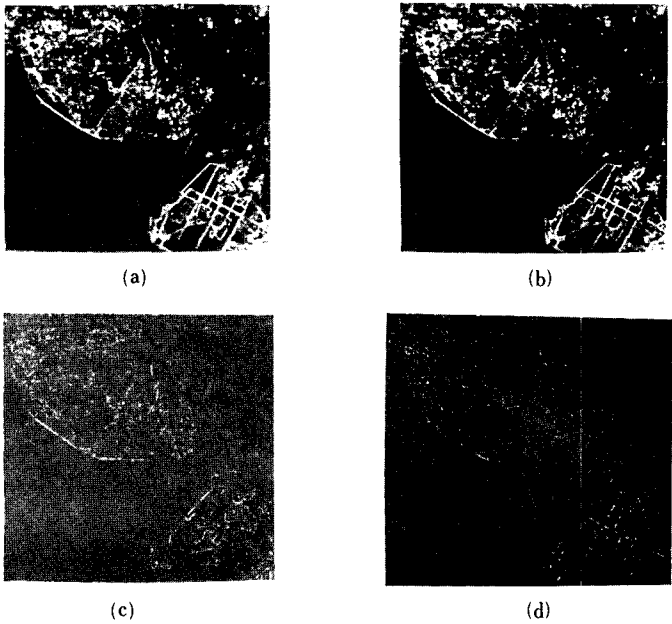


그림 4. 임계값의 변화에 따른 SAR 영상의 경계영상

(a) $T=0.0 (\theta=90^\circ)$ (b) $T=0.383 (\theta=67.5^\circ)$ (c) $T=0.707 (\theta=45^\circ)$ (d) $T=0.924 (\theta=22.5^\circ)$

Fig. 4. The influence of threshold on the edge image of SAR image.

(a) $T=0.0 (\theta=90^\circ)$, (b) $T=0.383 (\theta=67.5^\circ)$, (c) $T=0.707 (\theta=45^\circ)$, (d) $T=0.924 (\theta=22.5^\circ)$.

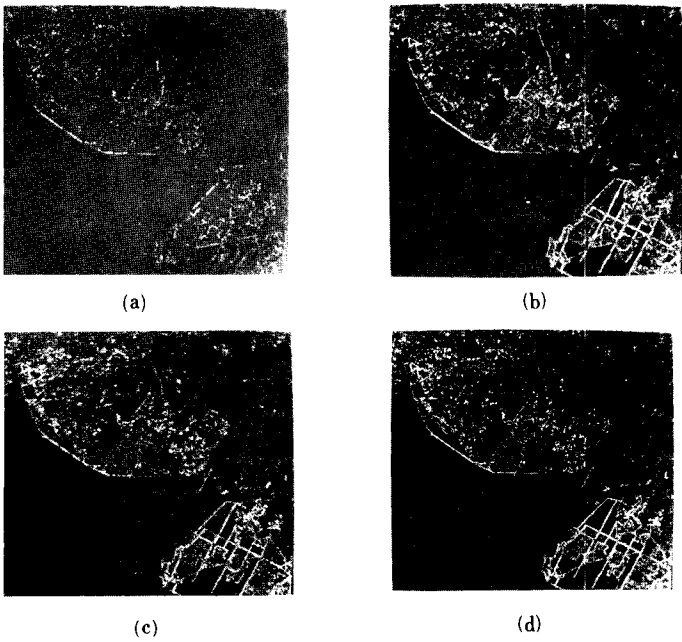


그림 5. 경계공간의 차원 변화에 따른 SAR 영상의 경계영상

(a) 8 mask (b) 4 mask (c) 2 mask (d) 1 mask

Fig. 5. The influence of the edge subspace dimension on the edge image of SAR image.

(a) 8 mask, (b) 4 mask, (c) 2 mask, (d) 1 mask.



(a)



(b)

그림 6. T_0 가 적용된 SAR 영상의 2진 경계영상
 (a) weak edge가 제거되지 않은 2진 경계영상
 ($T=0.707(\theta=45^\circ)$, 4차원 mask 적용)
 (b) weak edge가 제거된 2진 경계영상
 ($T=0.707(\theta=45^\circ)$, $T_0=9.985(\theta_0=10^\circ)$,
 4차원 mask 적용)

Fig. 6. The influence of T_0 on the edge map of SAR image.
 (a) edge map not rejected weak edge,
 ($T=0.707(\theta=45^\circ)$ and 4 dimensional mask)
 (b) edge map rejected weak edge.
 ($T=0.707(\theta=45^\circ)$, $T_0=0.985(\theta_0=10^\circ)$ and 4 dimensional mask)

제거된다는 것을 식(25)로 부터 알 수 있다. 그림 6의 결과에서 알 수 있듯이 임계값 T_0 는 weak edge를 제거하는 중요한 역할을 한다.

VI. 결 론

신경회로망에서 사용되는 AM기법과 벡터공간 개념을 적용한 경계 검출 기법을 제안하였으며 제안된 알고리즘은 위성으로 부터 수신된 SAR 영상의 분석시에 임계값의 결정을 쉽게하고 경계선의 방향성

이 명확하므로 SAR 영상의 인식 및 분석이 용이할 것이라 생각된다.

알고리즘의 적용결과 얻어진 경계영상은 기존의 경계 영상에서 발생하는 경계선의 선명성 부족현상을 개선할 수 있었으며, 기존의 경계선 검출 연산자를 이용한 경우 임계값의 결정이 매우 어려웠으나, 제안된 알고리즘은 휘도값의 차로 임계값을 결정하는 것이 아니라 입력 화소군의 응답 벡터와 ISE의 응답벡터간의 사잇각으로 임계값을 결정하므로 임계값의 결정이 매우 직관적이고 용이하였다.

參 考 文 獻

- [1] A.P. Blicher, "Edge detection and geometric methods in computer vision," Report STAN-CS-1041/AIM-312, Stanford University, 1985.
- [2] J. Canny, "A computational approach to edge detection," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. PAMI-8, pp. 679-698, 1977.
- [3] W. Frei and C. Chen, "Fast boundary detection: A generalization and a new algorithm," *IEEE Trans. on Computers*, vol. C-26, pp. 988-998, 1977.
- [4] R.M. Haralick, "Digital step edges from zero crossing of second directional derivatives," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. PAMI-6, pp. 58-68, 1984.
- [5] T. Kohonen, *Self-Organization and Associative Memory*. Berlin: Springer, 1984.
- [6] M.K.Kundu and S.K. Pal, "Thresholding for edge detection using human psychovisual phenomena," *Pattern Rec. Letters*, vol. 4, pp. 433-441, 1986.
- [7] V.S. Nalwa and T.O. Binford, "On detecting edge," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. PAMI-8, pp. 699-714, 1986.
- [8] A. Papulis, *Probability, random Variables, and Stochastic Processes*. New York: McGraw-Hill, 1972.
- [9] T. Poggio, "Early vision: From computational structure to algorithms and parallel hardware," *Computer Vision Graphics Image Processing*, vol. 31, pp. 139-155, 1985.
- [10] A. Resenfeld and a.C. Kak, *Digital Picture Processing*. Second edition., academic Press, 1982.
- [11] W.K. Pratt, *Digital Image Processing*. New York: Wiley-Interscience, 1978.
- [12] W.M. Brown, "Synthetic aperture radar,"

IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, vol. AES-3, pp.217-229, March, 1967.

[13] J.H. Mims, and J.L. Farrell, "Synthetic aperture imaging with maneuvers," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-8, pp. 410-418, July 1972.

[14] J.S. Weszka, "A survey of threshold selection techniques," *Computer Graphics Image Processing*, vol. CGIP-7, pp. 259-265, 1978.

[15] Alan C. Bovik, "On Detecting Edges in Speckle Imagery", *IEEE Trans. on ASASP*, vol. 36, pp. 1618-1627, 1988.

[16] S. Lavialdi, "Edge Extraction Techniques," in *Fundamentals in computer vision*, ed. by O.D. Faugeras, Cambridge University Press, pp. 117-144, 1983.

[17] Peter Meer, Shijie Wang, and Harry Wechsler, "Edge detection by associative mapping," Report CAR-RT-281/CS-TR-1822, University of Maryland, 1987.

著 者 紹 介

韓 洙 鎔 (正會員) 第28卷 B編 第7號 參照
 현재 마산전문대학 전자계산
 기과 부교수

羅 克 煥 (正會員) 第28卷 A編 第6號 參照
 현재 광운대학교 전자공학과
 교수



崔 聖 鎭 (正會員) 第28卷 B編 第7號 參照
 현재 인덕공업전문대학 전자
 과 부교수