

스펙클 영상에서의 다해상도 에지검출

(Multiresolution Edge Detection in Speckle Imagery)

南 權 文*, 朴 德 濬*, 朴 來 弘**

(Kwon Mun Nam, Deok Joon Park, and Rae-Hong Park)

要 約

본 논문에서는 스펙클 잡음 영상에서의 다해상도 에지검출 기법을 제안한다. 스펙클 잡음의 신호의존성으로 인해, 영상의 평균밝기에 따라 추출되는 에지의 수가 달라지게 된다. 따라서, 영상의 평균밝기에 의존하지 않으며, 원영상의 뚜렷한 에지를 잘 추출해 내는 알고리즘이 필요하다. 제안한 방법에서는 먼저, 스펙클 잡음의 통계적 특성중 CoV(coefficient of variation)값과 CDF(cumulative distribution function)의 이론적인 값과 실제값과의 차이를 이용하여 에지의 후보영역들을 선정한다. 다음으로 다해상도기법을 적용하여 실제 에지를 추출한다. 모의 실험결과, 비교적 균일한 영역의 잘못된 에지를 많이 감소시키며, 반면에 실제 에지를 자세히 잘 찾는 것을 볼 수 있다.

Abstract

In this paper, a multiresolution edge detection algorithm for speckle images is proposed. Due to the signal dependency of speckle images, the number of edge points detected depends on the local average intensity. Thus the edge detection method independent of the average intensity is required to detect properly real significant changes in an original signal. In the proposed method, candidate area is first selected based on the statistical properties of speckle images, *i. e.*, based on the busyness measure such as the CoV(coefficient of variation) and the difference between the real and theoretical CDF(cumulative density function). Then the real edges are extracted in a multiresolution environment. Computer simulation with test images shows that the proposed method reduces significantly false edges in relatively homogeneous areas while detects fine details properly.

I. 서 론

잡음 영상에서의 에지 검출에서는 균일한 영역에서의 거짓(false) 에지를 감수해야 하는 경우가 많다. 특히 승산형 잡음은 균일한 영역이라고 할지라도 영상의 평균

밝기에 따라 그레디언트(gradient)가 급격히 변하므로 기존의 그레디언트 에지 검출기(Sobel 연산자등)로는 많은 거짓 에지를 수반한다. 이러한 승산형 잡음의 한 예인 스펙클패턴(speckle pattern) 역시 신호 의존성(signal dependency)을 갖게 되므로 영상의 평균 밝기에 따라 잡음의 특성이 달라진다. 따라서 이러한 잡음영상에서는 잡음영상의 통계적 성질을 고려한 영상처리기법의 개발이 필수적이다. 스펙클잡음은 초음파, 레이저, 혹은 synthetic aperture radar(SAR) 영상에서와 같

*準會員, **正會員, 西江大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Sogang Univ.)

接受日字: 1992年 3月 26日

이 coherent한 광원을 사용하여 영상을 취득할 때 나타나는 알갱이 형태의 잡음 (granular noise)으로서, 빛의 산란과 간섭현상에 기인한다.^[1] 이 스펙클 잡음은 통계적 특성에 의해 승산형 잡음으로 잘 모델링 되어있고, 이러한 성질을 영상처리에 이용하면 좋은 결과를 얻을 수 있다. 본 논문에서는 스펙클의 통계적 특성을 이용하여 스펙클 잡음영상에서의 다해상도 예지추출 방법을 제안한다.

스펙클 잡음영상에서의 경계추출은 기존의 그레디언트 예지 검출기를 적용할 경우, 신호 의존성으로 인해 영상의 밝은 부분에서의 잡음 효과가 어두운 영역에서보다 크게 나타나고 이로 인해 밝은 영역에서 보다 많은 잘못된 경계를 찾게 되며, 어두운 영역에서는 많은 경계를 놓치는 경우가 나타난다. 따라서, 스펙클 영상에서의 경계추출을 위한 방법들이 제안되었는데, 대표적인 것으로, coefficient of variation (CoV)을 이용한 방법,^[2] Bovik의 ratio of averages (RoA) 방법,^[3] 그리고 Touzi 등의 방법^[2] 등이 있다. CoV를 이용한 방법은 스펙클 영상의 표준편차와 평균의 비는 영상의 평균 밝기에 의존하지 않는 상수라는 성질을 이용하여, 영상의 평균 밝기에 의존하지 않게 경계를 추출하는 방법이고, RoA방법은 중심화소 상하좌우의 평균값의 비를 이용하여 예지 후보점들을 구하고, 또한 LoG연산자를 적용하여 영교차점 (zero-crossing)들을 구한 다음 이 후보점들을 결합하여 예지를 얻는 방법이다. Touzi등의 방법은 RoA와 마찬가지로, 중심화소 둘레의 경계 방향에 대한 평균비를 구하고, 여기에 probability of false alarm ratio (Pfa)에 따른 문턱값 (threshold)을 결정하여 영상의 경계를 검출하는 방법이다. 이러한 기존의 스펙클 영상에서의 예지추출 방법들은 많은 거짓 예지를 포함하고 있거나, 실제 예지가 다수 손실되는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 거짓 예지를 줄이고, 실제 예지를 잘 찾아내는 예지 추출방법이 필요하다.

따라서, 본 논문에서는 스펙클 영상의 통계적 특성에 근거하여 CoV나 cumulative distribution function (CDF)로부터, 영상을 경계가 있는 부분과 균일한 영역으로 나누고, 각각의 영역에 서로 다른 크기의 창틀을 이용한 다해상도 예지 연산자를 적용하여, 거짓 예지를 보다 줄이고, 실제 예지를 잘 찾아내는 방법을 제안한다. II장에서는 스펙클의 일반적인 통계적 특성과 모델링에 관해서 살펴보고, III장에서는 기존의 스펙클 영상에서의 예지 검출기의 장단점을 알아본다. IV장에서는 불연속 척도로서 CoV와 CDF차에 대해 설명하며, V장에서는 불연속 척도에 의한 해상도 결정방법을, 그리고 VI장에서는 이에 따른 다해상도 예지 검출방법에 대해 살펴본다. VII장에서는 실험결과에 대해 논하고 VIII장에서는 결

론을 맺는다.

II. 스펙클 잡음의 통계적 특성과 모델링^[1]

스펙클 패턴이라고 불리는 불규칙하고 무질서한 신호는 간섭현상이 있는 빛 (coherent light)이 거친 표면으로부터 반사되어 불규칙하게 산란하거나, 불규칙한 굴절률 맥동이 있는 매체를 통과할 때 나타나며, intensity를 알갱이 형태가 되게 한다. 따라서 스펙클 패턴의 통계적 특성은 입사광의 간섭성과 불규칙한 표면의 성질에 의존한다고 할 수 있는데, 완전한 간섭 즉 물체의 표면이 입사광의 파장에 비해 훨씬 더 거칠다고 할 때의 간섭현상은 이 의존성을 무시할 수 있다. 이러한 패턴을 fully developed 스펙클이라고 하는데, 이때는 신호와 통계적으로 독립인 위상이 0에서 2π 사이에서 균일하게 분포하게 되고, 따라서 intensity만으로 스펙클을 모델화하여 처리가 가능하다. 이때 신호의 통계적 특성은 negative exponential 분포를 갖는 것으로 알려져 있으며, 스펙클 패턴은 물체표면의 구조에 대한 자세한 정보가 없으므로 이러한 통계적인 특성으로 스펙클을 설명할 수 있다. 또한, 대부분의 경우에 물체의 표면이 광파의 파장에 비해 훨씬 더 거칠다고 할 수 있으므로, 대개 fully developed 스펙클모델을 가정한다. 본 논문에서도 fully developed 스펙클만을 고려한다.

이러한 통계특성으로 표현되는 스펙클 패턴은 잡음이 negative exponential 분포를 가지므로, 잡음이 섞이지 않은 영상에서의 균일한 영역에서는 원신호와 잡음을 독립이라고 하면 negative exponential 분포를 갖게 된다. 즉 확률밀도함수 (pdf : probability density function) $p_I(I)$ 는 잡음영상에서 빛의 밝기를 I , 그 평균값을 μ 라고 하면 다음 식으로 주어진다.

$$P_I(I) = \frac{1}{\mu} e^{-I/\mu} U(I) \quad (1)$$

여기서 $U(\cdot)$ 는 unit step 함수이다.

실험적인 측정에서는 intensity가 항상 이상적인 point-intensity의 평활화되거나 누적된 값이 되고, 따라서 측정된 스펙클의 통계특성도 이상적인 것과는 약간의 차이가 생기며 여기에 맞는 평활화된 intensity의 일차 통계특성인 pdf의 근사화가 요구된다. 이러한 pdf는 다음과 같은 gamma 분포함수가 되는 것이 알려져 있다.^[1]

$$P(I) = \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(L)} \left[\frac{L}{\mu} \right]^L I^{L-1} e^{-I/\mu}, & \text{if } I \geq 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

여기서 I 는 intensity, μ 은 평균 intensity이며 L 은 looks 수로서 평활화 정도를 나타내며 $\Gamma(\cdot)$ 는 gamma 함수이다. 따라서, 스펙클 패턴의 평균과 분산값은 다음과 같은 값으로 표현된다.^[1]

$$\begin{aligned} \text{평균값 } E(I) &= \mu \\ \text{분산 } \sigma^2_I &= \mu^2/L \end{aligned} \quad (3)$$

이 분포는 $L \rightarrow 1$ 이면, (1)식과 같은 negative exponential 분포를 갖게 되고, $L \rightarrow \infty$ 이면, 가우시안 분포에 다가감을 알 수 있으며 영상처리에서는 이러한 특성을 잡음을 감소시키는 평활화의 기법으로 사용한다. 예를 들면, 대개 SAR같은 응용에서는 서로 다른 band에서 취득된 L 개의 영상을 단순 평균을 내서 스펙클을 감소시키게 되는데, 이 경우 L 이 증가하면 아래와 같이 SNR이 증가하게 되므로 스펙클을 감소시키는 효과를 가져온다. 즉, looks 수가 L 인 경우 신호대잡음비 (SNR)는 $SNR = \mu / \sigma$ 로 정의할 때 $SNR = L^{1/2}$ 가 되며,^[1] $L=1$ 인 영상의 $SNR=1$ 이고, $L=4$ 인 영상의 $SNR=2$ 가 되므로 잡음 평활화의 효과를 가져온다. 이것은 앞에서 말한 바와 같이 영상의 looks수 L 을 증가시키에 따라 스펙클의 잡음효과를 감소시켜 SNR을 1에서 $L^{1/2}$ 로 증가시킬 수 있음을 말한다.

일반적으로 이러한 스펙클 패턴 $g(x, y)$ 는 (4)식과 같이 원신호 $f(x, y)$ 와 잡음신호 $n(x, y)$ 의 승산형태로 모델링되며, 따라서 원신호 $f(x, y)$ 의 평균밝기가 큰 부분에서는 잡음도 커지고, 원신호가 작은 영역에서는 잡음도 상대적으로 감소하는 신호 의존성을 갖는다.

$$g(x, y) = f(x, y) \times n(x, y) \quad (4)$$

여기서 잡음의 평균값은 $E(n) = 1$ 이고, 정상분산 (stationary variance) 값 σ_n^2 을 갖는다. 따라서 스펙클 패턴 $g(x, y)$ 의 평균값은

$$E(g(x, y)) = E(f(x, y) \times n(x, y)) \quad (5)$$

로 표시되며 신호와 잡음이 독립이라고 한다면

$$E(g(x, y)) = E(f(x, y)) \times E(n(x, y)) = E(f(x, y)) \quad (6)$$

이다. 또한, 위의 식으로 모델링된 잡음영상의 분산은

$$\begin{aligned} \text{var}(g(x, y)) &= \text{var}(f(x, y) \times n(x, y)) \\ &= E[(g(x, y) - E(g(x, y)))^2] \\ &= \sigma_f^2 + \sigma_n^2 \cdot (E(f(x, y)))^2 + \sigma_f^2 \end{aligned} \quad (7)$$

이 된다. 일반적으로 영상이 ergodic하다고 가정하면, 적당히 큰 창틀을 사용하여 영상내에서의 창틀 내의 평균과 분산값으로 위의 값들을 대체해서 사용한다. 이러한 통계 특성으로 스펙클은 잘 표현되며 이 통계특성을 영상처리에 적용하여 에지를 찾는 기존의 방법을 다음 장에서 설명한다.

III. 기존의 스펙클 영상에서의 에지 검출기

1. CoV 에지 검출기^[2]

이 방법은 radar영상에서 잘 알려진 방법으로, (8)식으로 표현되는 CoV가 균일한 영역에서는 평균 파워에 의존하지 않는다는 특성을 이용한 방법이다.

$$CoV = \sigma_x / \mu_x \quad (8)$$

여기서 σ_x 는 화소의 빛의 밝기 x 의 표준편차, μ_x 는 평균값을 나타내며 실제로는 영상이 ergodic이라고 가정할 때, 크기가 N 인 창을 이용하여 x_i 를 화소의 그레이값이라 할 때 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$CoV = S/M \quad (9)$$

$$\text{단, } M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - M)^2$$

일반적으로 이 값은 영상의 looks 수와 관련되어 $1/\sqrt{L}$ 둘레에 분포하게 되나, 그 통계특성이 분명하지 않아 이론적으로 고정된 문턱값을 결정하지 못한다. 따라서, $S/M \leq 1/\sqrt{L} + \epsilon$ (ϵ 는 적당히 작은 값) 이면 균일한 영역으로 결정하고, 그렇지 않으면 경계를 포함한 영역으로 분류한다. 결과적으로, Sobel 연산자를 사용한 경우와 달리 영상의 평균 밝기에 따라서 추출되는 에지수가 변하지 않는 장점이 있으나, 많은 실제 에지를 놓치는 단점이 있다.

2. RoA (ratio of averages) 검출기^[3]

이 방법에서는 먼저, 잡음 영상에 LoG 연산자를 적용하여 영교차점들을 찾아낸다. 이 LoG연산자는 잡음이 승산형일 경우에는 균일한 영역에서도 매우 많은 영교차점들을 찾게 되므로 LoG연산자만으로 승산형 잡음에서 단일한 에지 검출기로 사용하기가 어렵다. 따라서, 균일한 영역에서는 거짓 에지를 줄여주면서 실제 에지를 찾아 줄 수 있는 에지 검출기가 필요하게 된다. 따라서 다음과 같은 그레디언트를 기초로 한 연산자를 사용한다.

일반적으로 영상의 그레디언트는 두 직교방향을 따라

이웃 평균값의 차이의 root mean square (rms)값을 계산하여 근사화된다. 그러나, 잡음이 승산형일 경우에는 영상의 평균 밝기에 따라 이러한 기술의 성능이 크게 좌우된다. 따라서, logarithmic 특성 $|\log R(x, y) - \log L(x, y)| = \max \{ \log (R(x, y) / L(x, y)), \log (L(x, y) / R(x, y)) \}$ 이나, 등가적으로, $RoA H(x, y) = \max \{ R(x, y) / L(x, y), L(x, y) / R(x, y) \}$ 값을 에지크기의 수평성분값으로 추정하여 쓴다. 이때, $L(x, y)$, $R(x, y)$ 는 (x, y) 화소의 좌우 주변화소의 평균값이다. 이 경우, 에지 크기의 특성은 영상의 평균 밝기에 의존하지 않게 된다. 전체적인 에지 크기의 추정은 rms값 $RoA(x, y) = [H2(x, y) + V2(x, y)]^{1/2}$ 에 의해 주어지고, $H(x, y)$ 와 $V(x, y)$ 는 앞서 정의한대로 수평, 수직방향으로의 에지크기의 추정값이다. 이때 미리 결정된 문턱값 T 값보다 $RoA(x, y)$ 값이 클 경우, 이 위치를 에지 후보점으로 선정한다.

이렇게 선정된 에지후보점과 LoG연산자를 통해 얻어진 영교차점들을 비교하면, RoA연산자를 사용한 결과는 균일한 영역에서는 거짓 에지를 줄였으나, 경계가 너무 두꺼운 단점이 있다. 반면에 LoG연산자의 결과 나타난 영교차점 contour는 균일한 영역에서도 많은 거짓 에지를 갖고 있지만, 실제 에지의 위치에서 영교차점이 없는 dead zone이 나타난다. 따라서, 이 두 연산자의 결과를 논리 AND시키면 거짓 에지를 없앤 한 화소 두께의 에지를 얻을 수 있다.

3. Touzi등의 에지 검출기^[2]

한 방향으로 스캔하면서, 스캔하는 앞뒤의 평균 파워를 각각 $P1$ 과 $P2$ 라고 할 때, 이 파워의 비를 R ($R \in [0, +\infty]$) 이라고 하면, 다음과 같은 조건부 pdf를 유도할 수 있다.

$$p(R|P1, P2) = \frac{n\Gamma(2NL)}{\Gamma^2(NL)} \frac{(P1/P2)^{NL}}{(R^n + P1/P2)^{2NL}} R^{nNL-1} \tag{10}$$

이때, 균일한 영역에서는 $P1=P2$ 이므로, 이 비의 분포는 더 이상 평균 파워에 의존하지 않게 되며, 반면에 경계를 포함한 영역에서는, 경계의 반대쪽에 있는 두 영역의 평균파워의 비에 의존하게 된다. 만일, 평균파워의 비를 1 보다 작은 값으로 제한한다면 제한된 비 ($r=R$ if $R \leq 1$, $r = 1/R$ if $R > 1$)의 조건부 pdf는

$$p(r|P1, P2) = \frac{n\Gamma(2NL)}{\Gamma^2(NL)} \frac{(P1/P2)^{NL}}{(r^n + P1/P2)^{2NL}} + \frac{(P2/P1)^{NL}}{(r^n + P2/P1)^{2NL}} r^{nNL-1} \tag{11}$$

이 된다. 또한, 두 균일한 영역의 contrast ratio (Cr)를 다음과 같이 정의하면, pdf는 Cr의 함수가 된다.

$$Cr = \max(P1/P2, P2/P1) \tag{12}$$

따라서, 문턱값이 T 로 주어질 때, 평균파워의 비가 Cr인 두 균일한 영역 사이의 경계를 추출할 확률 (Pd)은

$$Pd(T, Cr) = Prob(r < T|Cr) = \int_0^T p(r|Cr) dr$$

이 되고, 따라서,

$$Pfa(T) = Pd(T, 1) \tag{14}$$

가 된다. 이와 같이 구해지는 Pfa로부터, 적당한 에러확률에 해당하는 문턱값 T 를 구하여, 제한된 비 r 의 영상을 thresholding함으로써 에지를 검출한다. 이때, 큰 창틀을 이용하면 세밀한 에지를 놓치게 되므로, 창틀을 확장시켜 가면서, 세밀한 에지까지 보존해 주도록 하며, 여기에서 얻어진 결과를 세선화하여 최종결과를 얻는다.

이 방법의 단점이라면, 실제 스펙클이 들어가는 영상은 항공영상이나, 인공위성에서 취득한 영상으로 세밀한 에지를 보존해주기 위한 다해상도방법은 거짓 에지의 수만 증가시킬뿐 영상의 실제 에지를 검출하는 장점이 없다. 따라서 다해상도의 장점을 살리지 못한 방법이라고 할 수 있다.

IV. 스펙클 영상에서의 다해상도 에지 검출을 위한 불균일 척도

1. CoV를 이용한 스펙클 영상의 불균일 측정

스펙클 영상의 균일한 영역과 불균일 영역을 구분해내는 기준으로 분산과 평균제곱의 비를 사용한다. 앞의 II장에서 언급한 분산값과 평균값을 이용하면 이 분산과 평균제곱비는 looks수 L 의 역수가 되므로 L 이 알려지면 이 비는 상수가 된다.^[4] 즉,

$$\gamma_s = \frac{\sigma_s^2}{\mu^2} = \frac{\mu^2/L}{\mu^2} = \frac{1}{L} \tag{15}$$

윗 식은 ensemble 특성이므로, 스펙클이 ergodic이라고 가정한다면, 이러한 ensemble 특성은 공간적 특성과 같아진다고 할 수 있으며 실제적인 값은 공간적 평균값을 이용하여 구한다. 이러한 조건을 만족할만한 크기의 창틀을 이용하여 각 창틀 내에서의 분산값과 평균값을 이용하

면 각 창틀의 분산대 평균 제곱비 (γ_s)를 얻을 수 있는데, 이 분산대 평균 제곱비는 창틀 내의 화소값에 따라 $1/L$ 에 접근하는 값이므로 이 분산대 평균 제곱비가 균일한 영역과 불균일한 영역을 구분하는 척도가 된다. 즉, 균일한 영역에서는 이 분산대 평균 제곱비가 $1/L$ 보다 작거나 같고, 불균일한 영역에서는 이 비가 $1/L$ 보다 큰 값이 된다고 추정할 수 있다.

가산형 잡음일 경우 분산값이 작은 영역이 균일한 영역이라는 판단기준이 있어서 분산값의 모드를 기준으로 균일한 영역과 불균일한 영역을 분리할 수 있으나,^[4] 스펙클과 같은 승산형 잡음의 경우 영상의 평균밝기에 따라서 분산값이 변하므로 균일한 영역이라고 할지라도 평균 화소가 밝을 경우에는 분산값이 커지고, 불연속의 영역을 포함하고 있더라도 평균 화소 밝기가 어두운 영역에서는 분산값이 상대적으로 낮아지게 되므로, 분산만 가지고 균일, 불균일의 영역을 구분하는 척도로 사용할 수가 없다. 따라서, 평균값에 따라서 변하는 분산값을 평균의 제곱으로 나누어 줌으로써, 이 제곱비가 평균값에 무관하게 각 창틀 내의 균일, 불균일 여부를 측정하는 파라미터로 사용할 수 있게 했다. 이렇게 함으로써, 가산형 잡음의 분산처럼, 분산대 평균 제곱비가 특정값보다 작을 때를 클 때와 비교하여 상대적으로 균일한 영역으로 구분해 낼 수 있다. 그림 1은 균일한 영역과 경계를 포함한 영역에서의 분산대 평균 제곱비의 분포를 보여주고 있는데 ($L=4$), (a)는 균일한 영역의 밝기의 평균비가 1대 5인 신호의 스펙클 영상에 대한 결과이고, (b)는 1대 3인 스펙클 영상의 결과이다. $1/L$ 근처에서 피크를 이루고 있는 분포가 균일한 영역에서의 분산대 평균 제곱비이며, 비교적 넓게 분포되어 있는 것이 경계를 포함한 영역에서의 제곱비의 분포이다. 각각에서 보듯이 경계 양쪽의 평균값의

비에 따라 균일한 영역에서는 앞에서 서술한 바와 같이 $1/L$ 에 밀집하는 분포를 갖고, 경계를 포함한 영역에서는 $1/L$ 보다 큰 값들을 많이 갖는 것을 볼 수 있다. 이로써 균일한 영역과 불균일한 영역을 구분하여 경계를 검출할 수 있다.

2. CDF를 이용한 스펙클 영상의 불균일 측정

II장에서 살펴 본 바와 같이 스펙클은 균일한 영역에서는 식 (2)와 같은 pdf를 갖는다. 따라서 균일한 영역에서는 다음과 같은 CDF를 갖는 것을 알 수 있다.^[1]

$$CDF_L(I) = \int p(I) dI = \int \frac{1}{\Gamma(L)} \left[\frac{L}{\mu} \right]^L I^{L-1} e^{-L I/\mu} dI \tag{16}$$

이 CDF는 looks수 L 과 평균값 μ 의 함수가 되며, looks수 L 을 알고 있다면, 평균값 μ 만의 함수가 된다. 즉, looks수에 따라 차수와 항수가 증가하는 평균값의 함수가 된다. 예로 looks수가 2와 4일 때 다음과 같은 CDF_L 을 얻을 수 있다. (단 $C=1/\mu$)

$$CDF_2(I) = \begin{cases} 1 - e^{-CI} - CIe^{-CI}, & I \geq 0. \\ 0, & otherwise \end{cases} \tag{17}$$

$$CDF_4(I) = \begin{cases} 1 - e^{-CI} - CIe^{-CI} - \frac{1}{2} C^2 I^2 e^{-CI} - \frac{1}{6} C^3 I^3 e^{-CI}, & I \geq 0 \\ 0, & otherwise \end{cases} \tag{18}$$

이 때, 영상이 ergodic이라고 가정하면, 적당한 크기의 창틀에서도 위의 통계특성을 만족한다고 할 수 있고, 따라서 평균값 μ 는 사용하는 창틀내에서의 평균값 μ_0 로 대체될 수 있고, 이에 따라 looks수 L 과 평균값 μ_0 를 갖는 중심화소 주위의 이론적인 CDF가 결정될 수 있다. 이렇게 구해진 평균값 μ_0 에 따른 CDF는 실제 영상의 화소의 분포와 차이를 갖게 되는데 만일 중심화소 주변의 창틀내부가 균일한 영역이라고 한다면, 이러한 차이는 최소가 될 것이다. 반면에 창틀내부에 불연속인 지점이 포함된다면 창틀내의 평균값 μ_0 는 불연속 경계 양쪽의 평균 밝기의 산술평균값에 가까울 것이다. 따라서 불연속 경계를 포함한 영역에서의 평균값 μ_0 에 따른 이론적인 CDF와 실제 화소값에 따른 분포와는 큰 차이를 갖는 것을 알 수 있다. 그림 2(a), (b)는 이러한 성질을 균일한 영역과 경계를 포함한 영역에서 실제 화소에 의한 분포와 이론적으로 구한 CDF 분포 그리고 그들의 차이를 보여주고 있다. 사용한 창은 5×5 의 크기로 25개의 화소를 사용한 결

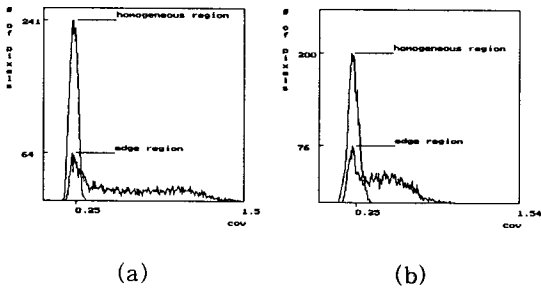


그림 1. CoV 분포 ($L=4$)

- (a) 평균비=5인 스펙클 영상
- (b) 평균비=3인 스펙클 영상

Fig. 1. Distribution of CoV ($L=4$).

- (a) speckle image with mean ratio=5,
- (b) speckle image with mean ratio=3.

과이다. 실제 화소값의 CDF와 이론적으로 구해진 CDF와의 차이를 d 라고 하고, 이때의 최대값을 d_{max} 라고 할 때, 균일한 영역에서는 이 d_{max} 값이 0에 가깝고, 불균일한 영역에서는 d_{max} 값이 커지는 특성 ($d_{max} \leq 1$)을 볼 수 있다.

스펙클 잡음영상의 이러한 통계 특성을 이용하여 균일한 영역과 불균일한 영역을 구분해 낼 수 있는데, 그림 2(c), (d)에서 보듯이 영상 전체의 d_{max} 의 분포는 균일한 영역에서는 0에 가까운 값에 몰리고, 경계를 포함한 영역은 CoV를 사용한 경우와 마찬가지로 상대적으로 큰 값들을 많이 갖는 것을 알 수 있다. 따라서 이러한 균일, 불균일 영역을 구분하는 기준을 다음 장에서 설명할 다해상도 결정기법에서 각 해상도에서 영상을 균일한 영역과 불균일한 영역으로 분리시키고, 이 과정은 저해상도에서 고해상도로 천이하면서 적용함으로써 다해상도를 이용한 제안한 에지 검출기법에서는 균일한 영역에서 거짓 에지를 없애고, 고해상도에서 보다 세밀한 에지를 검출해 낼 수 있다.

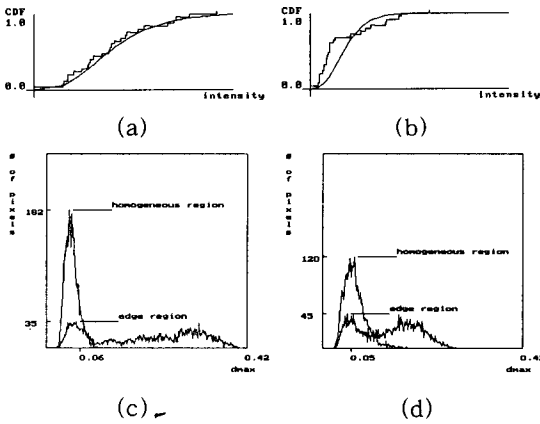


그림 2. CDF와 d_{max} 분포

- (a) 균일한 영역에서의 CDF 분포
- (b) 에지 부근에서의 CDF 분포
- (c) 평균비가 5인 에지 부근에서의 d_{max} 분포
- (d) 평균비가 3인 에지 부근에서의 d_{max} 분포

Fig. 2. CDF and the distribution of d_{max} .

- (a) CDF for homogeneous region,
- (b) CDF for edge region,
- (c) distribution of d_{max} (mean ratio=5),
- (d) distribution of d_{max} (mean ratio=3).

V. 해상도 결정기법

앞장에서는 불균일 척도로서 CoV와 CDF상에서의 거리 d_{max} 를 설명하였다. 이들 두 척도의 분포는 그림 1과 2

에서 보듯이 균일한 지역에서는 작은 값을 가지고 있으며, 이 값들이 클수록 에지부근에 가까움을 알 수 있다. 앞서 언급했듯이 스펙클의 신호 의존성, 즉 균일한 영역에서 영상의 평균밝기가 증가함에 따라 스펙클 그레디언트 크기가 증가하므로 기존의 그레디언트 에지 검출기로는 정확한 에지의 검출이 불가능하다. 따라서 균일한 영역과 에지부근에 대한 대체적인 구분을 할 수 있다면, 즉 각 부분마다 적합한 해상도를 결정할 수 있다면 스펙클의 신호 의존성에 무관하게 각 해상도에 맞는 그레디언트 연산자를 적용할 수 있다.

본 다해상도 방법에서 언급되는 화소는 $(2p+1) \times (2p+1)$, $p=p_{min}, \dots, p_{max}$, 다해상도 창들의 중심화소를 의미한다.^[5] 파라메타 p 에 따라 이웃화소의 크기가 결정되며, 앞으로 영상을 해석함에 있어서 크기가 다른 이들 이웃화소들을 서로 다른 해상도로 부른다. 앞장에서 설명된 γ_s 와 CDF의 거리, d_{max} 는 $(2p+1) \times (2p+1)$ 의 다해상도 창들에서 구하며, 이들 분포의 피크점인 모드(mode)를 기준으로 해당 해상도에서 대체적으로 균일한 지 그렇지 않은 영역인지를 구분함으로써 중심화소의 해상도를 결정하게 된다.

가산형 잡음의 경우와 마찬가지로 우선 $p=p_c$ 의 창들에서 구한 γ_s 혹은 d_{max} 의 분포에서 최대 피크점인 모드(Γp_c)보다 큰 지역을 에지 후보점 ($c_e(i, j)=1$)으로 초기화한다. 이 에지 후보점에 대해서만 p_{max} 에서 γ_s 혹은 d_{max} 분포를 구하고 이 분포의 최대 피크점인 모드(Γp_{max})보다 작은 지역을 해상도 p_{max} 에서의 선택지점($c p_{max}(i, j)=1$)으로 지정한다. 즉 이 지역은 해상도 p_{max} 에서 대체적으로 밝기 변화가 유사하다고 판단되는 지역이 된다. 다음 p_{max} 에서 선택된 지역을 제외한 $c_e(i, j)=1$ 지역에 대해서만 위의 과정을 $(2p_{min}+1) \times (2p_{min}+1)$ 의 창들이 될 때까지 반복하여 각 해상도의 선택지역 ($c_p(i, j)=1$)을 얻으며, 해상도 p_{min} 에서 선택되고 남은 지역은 γ_s 혹은 d_{max} 의 값이 제일 큰 지역, 즉 에지에 가까운 지역을 나타내게 된다. 그림 3(a), (b)는 원영상이며 (c), (d)는 식 (4)를 이용하여 gamma 분포의 잡음을 첨가한 스펙클 영상들이다. 그림 4와 5는 looks수가 4인 그림 3(c), (d)의 실험영상에 각각 γ_s 와 d_{max} 를 불연속 척도로 사용하여 각 해상도에서 선택된 지역을 보여주고 있다. 그림 4(f), 5(f)의 하얀 지점이 에지 후보점으로 초기화된 지역이며 (e)에서 (a)로 갈수록 에지부근에 가까운 지역을 나타내고 있다. 에지 후보점을 선정하는 해상도 p_c 는 스펙클의 평균 알갱이 (artifacts) 크기보다 커야 하며, p_{max} 와 해상도 선택지역의 수는 영상의 잡음의 정도에 따라 달라지나 $(2p_{max}+1) \times (2p_{max}+1)$ 로 평활화시 뭉롱화가 너무 심하게 일어나지 않는 정도에서 p_{max} 를 결정해야 하고 단수는 해상도 지역

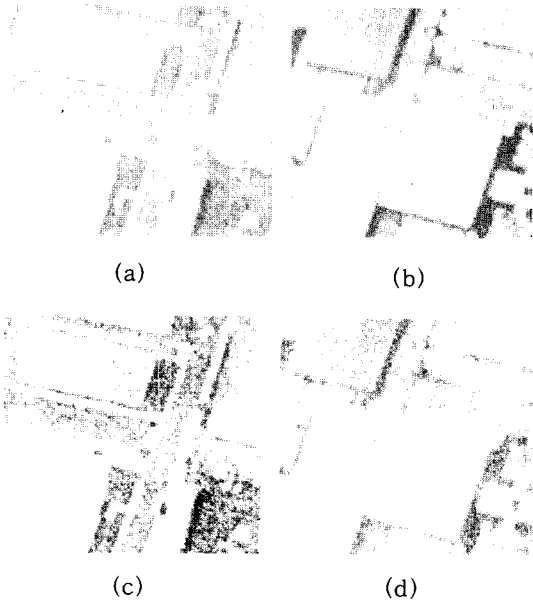


그림 3. 실험 영상

- (a) 항공영상 1 (원영상)
- (b) 항공영상 2 (원영상)
- (c) 스펙클 항공영상 1 (number of looks=4)
- (d) 스펙클 항공영상 2 (number of looks=4)

Fig. 3. Test images (number of looks=4).

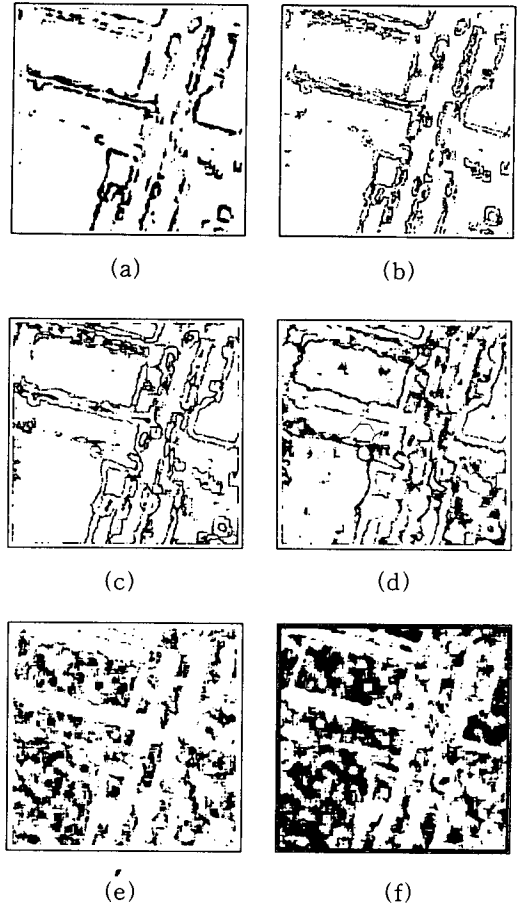
- (a) aerial image 1 (original),
- (b) aerial image 2 (original),
- (c) speckled aerial image 1 (number of looks=4),
- (d) speckled aerial image 2 (number of looks=4).

이 너무 세분화되지 않는 선에서 정해져야 한다. 위의 해상도 선택과정을 정리하면 다음의 알고리즘과 같다. (coarse-to-fine)

```

initialize  $c_e(i, j)=1$ :
for ( $p=p_{max} : p \geq p_{min} : p--$ ) {
  initialize  $c_p(i, j)$ :
  while (one frame)
    if ( $c_e(i, j) == 1$ ) calculate  $\gamma_s$  (or  $d_{max}$ ):
    calculate mode ( $\Gamma_p$  for pixels with  $c_e(i, j) = 1$ ):
    while (one frame)
      if ( $\Gamma_p > \gamma_s$  (or  $d_{max}$ ) and  $c_e(i, j) == 1$ ) {
         $c_p(i, j) = 1$ :
         $c_e(i, j) = 0$ :
      }
}
}

```

그림 4. γ_s 의 분포로부터 나누어진 영상

($p_{max}=6, p_{min}=3, p_c=4$)

- (a) $c_e(i, j)=1$ 지역
- (b) $c_3(i, j)=1$ 지역
- (c) $c_4(i, j)=1$ 지역
- (d) $c_5(i, j)=1$ 지역
- (e) $c_6(i, j)=1$ 지역
- (f) $c_0(i, j)=1$ 지역

Fig. 4. Divided regions by the distribution of γ_s ($p_{max}=6, p_{min}=3, p_c=4$).

- (a) region with $c_e(i, j)=1$,
- (b) region with $c_3(i, j)=1$,
- (c) region with $c_4(i, j)=1$,
- (d) region with $c_5(i, j)=1$,
- (e) region with $c_6(i, j)=1$,
- (f) region with $c_0(i, j)=1$.

위의 과정에서 $c_p(i, j)=1$ 은 해상도 선택지역을 지정한 것이며, $c_e(i, j)=0$ 는 다음 해상도 선택과정에서 이 화소들을 제외시키는 과정이다. 위와 같이 선택된 각 해상도 지역은 서로 다른 창들을 가진 에지 검출기를 적용하게 된다.

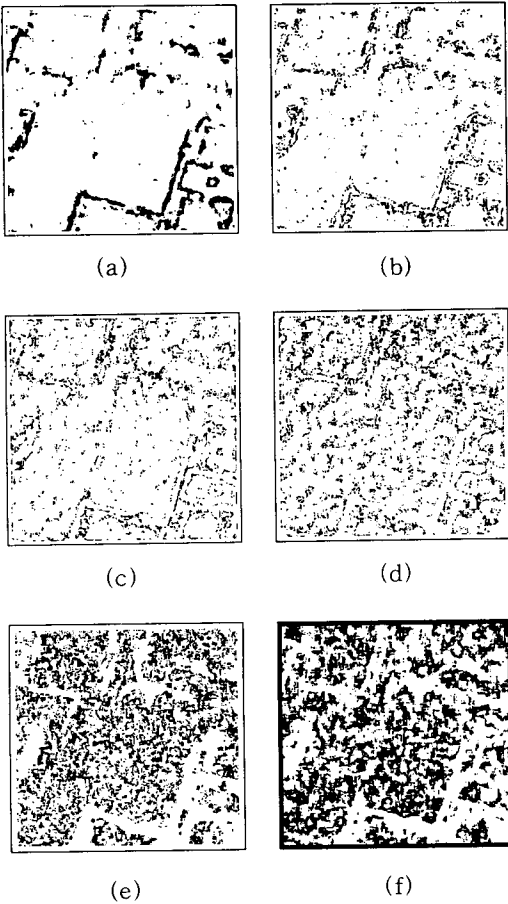


그림 5. d_{max} 분포로부터 나누어진 영상 ($p_{max}=6, p_{min}=3, p_c=4$)
 (a) $c_e(i, j)=1$ 지역
 (b) $c_3(i, j)=1$ 지역
 (c) $c_4(i, j)=1$ 지역
 (d) $c_5(i, j)=1$ 지역
 (e) $c_6(i, j)=1$ 지역
 (f) $c_0(i, j)=1$ 지역

Fig. 5. Divided regions by the distribution of d_{max} ($p_{max}=6, p_{min}=3, p_c=4$).
 (a) region with $c_e(i, j)=1$,
 (b) region with $c_3(i, j)=1$,
 (c) region with $c_4(i, j)=1$,
 (d) region with $c_5(i, j)=1$,
 (e) region with $c_6(i, j)=1$,
 (f) region with $c_0(i, j)=1$.

기서 스케일은 가우시안 함수의 표준편차 (σ)를 의미한다. 각 해상도 지역에 부여되는 스케일은 $c_p(i, j)=1$ 지역에 초기 스케일 (σ_0)을 부여하며 $c_p(i, j)=1, p=p_{min}, \dots, p_{max}$, 지역은 해상도 p 가 증가함에 따라 스케일도 증가시킨다 ($\sigma_p = \sigma_0 + \Delta\sigma \times s, s = p - p_{min} + 1$). 각 해상도 선택지역은 위의 스케일을 가진 가우시안 1차 미분함수, $\nabla G(x, y)$ 로 에지검출을 하게 된다. 이는 불연속 척도의 분포에서 변화가 많은 지역, 즉 에지에 가까운 지역일수록 작은 스케일로 뚜렷한 에지를 검출하고 균일한 지역은 큰 스케일로 몽롱화 정도를 크게 하여 잡음을 억제하기 위함이다. 여기서 초기 스케일값 (σ_0)과 스케일 증가분 ($\Delta\sigma$)의 선택^[5, 6]은 $p=p_{max}$ 지역에서의 몽롱화 정도가 충분해야 하고 에지 부근에서는 윤곽선을 보존할 정도의 스케일이어야 한다. 에지검출은 $\nabla G(x, y)$ 와 입력영상과의 convolution으로부터 얻은 크기와 방향정보를 가지고 thresholding과정과 세션화 과정을 거쳐 한화소 두께의 에지 지도 (map)을 얻는다. 통계적인 특성을 이용한 기존의 방법들에서는 thresholding 과정에서 얻은 에지의 두께가 큰 반면 이를 세션화시킬 수 있는 정보의 부족으로 어려움이 되따르나 본방법에서는 기존의 그레디언트 방법에서 얻은 정보, 즉 그레디언트의 크기와 방향정보를 이용하여 세션화 과정이 보다 수월함을 볼 수 있다. 그림 6은 제안한 다해상도 에지 검출기법의 전체적인 흐름도를 나타낸다. 다음 장에서는 기존의 방법과의 비교를 통해 성능을 분석하였다.

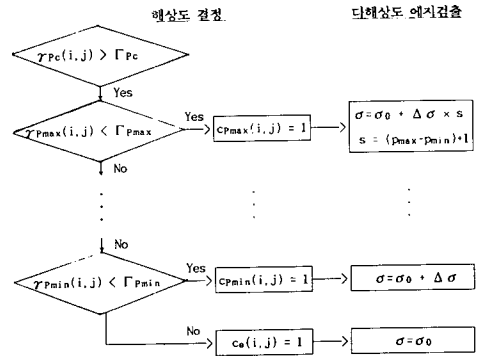


그림 6. 다해상도 에지 검출기법의 흐름도
 Fig. 6. Multiresolution edge detection scheme.

VI. 제안한 스펙클 영상의 다해상도 에지 검출기법

위의 기법으로 얻어진 각 해상도 선택지역은 이에 대응되는 스케일의 그레디언트 에지 검출기를 적용한다. 어

VII. 실험 결과 및 검토

실험에 사용한 영상은 일반영상에 대해서 스펙클 잡음이 첨가된 영상들이다. 기존의 방법으로 비교할 방법들은

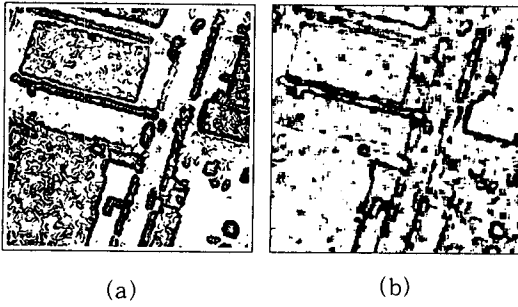


그림 7. Canny 방법과 CoV방법의 결과
(스펙클 항공영상 1)
(a) Canny 방법 ($\sigma=1.5$)
(b) CoV 방법 (7×7)

Fig. 7. Results of the Canny's method and CoV method (speckled aerial image 1).
(a) Canny's method ($\sigma=1.5$),
(b) CoV method (7×7).

III장에서 언급한 CoV 에지 검출기, Bovik의 RoA방법과 Touzi등의 방법들이 있다. 본 실험에서는 거의 비슷한 에지갯수를 기준으로 각 방법의 성능을 비교하였다.

그림 7(a)는 $\sigma=1.5$ 일때 Canny^[7]의 그레디언트 방법의 결과로 스펙클의 신호 의존성에 의해 평균값이 큰 지역에서 거트 에지의 검출이 많음을 볼 수 있다. CoV를 척도로 한 (b)의 결과 (7×7 창틀)는 신호 의존성의 영향을 줄이기는 했으나 균일한 영역에서의 잡음 효과를 제대로 억제하지 못했으며 문턱값 T에 따라 에지 지도의 영향을 많이 받는다.

그림 8은 그림 3(c)의 영상에 적용하여 threshold 지도에서 에지 후보점의 갯수가 15000개 내외일 때의 결과이다. 그림 8(a)의 Touzi등의 방법은 Pfa가 0.005% 일때의 결과로서 잘못 검출된 에지가 거의 없다는 이론적인 설명이 가능하다. 결과에서 보듯이 균일한 영역의 거트 에지의 검출을 줄이며 영상에 존재하는 경계부분의 검출이 잘 되었음을 볼 수 있다. 뚜렷한 경계주위나 균일한 지역에서 검출이 있으나 이는 세밀한 에지의 검출을 위해서 창크기를 증가시키는 가운데 생기는 것으로 전체적인 에지 지도에는 큰 영향을 못 미치고 있다. 그림 8(b)는 RoA 방법 (5×5)으로 문턱값 $T=1.85$ 일 때의 결과이다. 위의 Touzi등의 결과보다 균일한 영역에서의 검출이 많음을 볼 수 있으며 창크기가 증가함에 따라 이들을 억제할 수는 있으나 경계부근에서의 손실이 생긴다. 즉 창크기가 커짐에 따라 균일한 영역에서의 잡음을 억제하지만 몽롱화가 심해지므로 경계의 손실을 가져오게 된다. 제안한 방법을 적용한 결과는 그림 8(c), (d)로 불연속 척도로 각각 γ_s 와 d_{max} 를 적용하여 얻은 결과이다. ($p_c=4$,

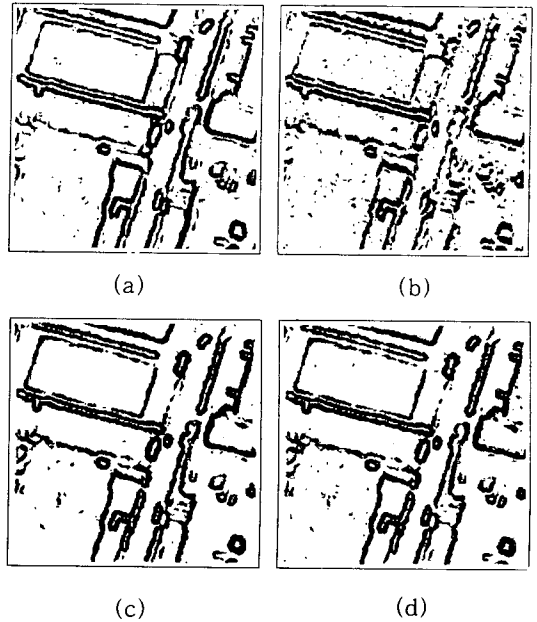


그림 8. Threshold 지도 (스펙클 항공영상 1)
(a) Touzi등의 방법 (Pfa=0.005%)
(b) RoA 방법 (5×5 , $T=1.85$)
(c) γ_s 를 이용한 제안한 다해상도 방법
(d) d_{max} 를 이용한 제안한 다해상도 방법

Fig. 8. Threshold map (speckled aerial image 1).
(a) Touzi *et al.*'s method (Pfa=0.005%),
(b) RoA method (5×5 , $T=1.85$),
(c) proposed multiresolution method based on γ_s ,
(d) proposed multiresolution method based on d_{max} .

$p_{max}=6, p_{min}=3$) 각 해상도 지역은 에지 후보점에서 제외된 $c_o(i, j)=1$ 지역을 제외한 $c_e(i, j)=1, c_p(i, j)=1, p=3, \dots, 6$ 의 다섯지역으로 각각 $\sigma_o=1.5, \Delta\sigma=0.35$ 의 스케일을 적용하였다. 결과에서 보듯이 균일한 지역은 큰 스케일로 잡음이 잘 억제되었으며, 작은 스케일이 적용된 경계부분은 검출이 잘 되었다. RoA 방법에 비하면 균일한 영역의 거트 에지가 거의 없으며 보다 뚜렷한 윤곽선을 찾고 있고, Touzi등의 방법보다 그레디언트가 작은 부분에서 에지성분이 끊기는 부분이 있으나 뚜렷한 윤곽선을 제외한 부분의 불필요한 성분은 보다 잘 억제함을 볼 수 있다. 그림 9는 그림 3(d)의 실험 영상에 적용한 것으로 에지 후보점의 갯수가 10000개 내외의 결과이다. 그림 3(c)의 영상에 비해 전체적으로 어두워서 오른쪽 아래부분을 제외하고는 뚜렷한 경계가 없으나 각 방법의 비교에서는 그림 8에서와 동일한 양상을 보이고 있다.

위와 같이 찾아진 threshold 지도는 경계에 해당하는

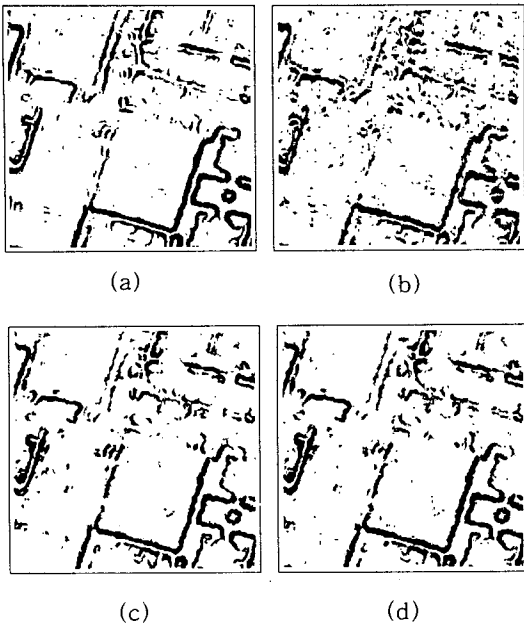


그림 9. Threshold 지도 (스펙클 항공영상 2)
 (a) Touzi 등의 방법 (Pfa=0.01%)
 (b) RoA 방법 (5×5, T=1.83)
 (c) γ_s 를 이용한 제안한 다해상도 방법
 (d) d_{max} 를 이용한 제안한 다해상도 방법
 Fig. 9. Threshold map (speckled aerial image 2).
 (a) Touzi *et al.*'s method (Pfa=0.01%),
 (b) RoA method (5×5, T=1.83),
 (c) proposed multiresolution method based on γ_s ,
 (d) proposed multiresolution method based on d_{max} .

부분이 두껍게 나타나고 있어서 이의 세선화가 요구된다. Touzi 등의 방법은 morphology에 기초를 둔 세선화 방법을 사용한다. 이는 단지 에지의 형태적 (geometrical) 인 요소만을 고려하므로 정확한 경계의 모양을 보존하기가 힘들며 또 한화소 정도로 세선화하기가 어려운 단점이 있다. 반면 RoA 방법에서는 LoG 연산자^[6]를 이용하여 RoA의 threshold 지도와 LoG 연산자의 영교차점을 논리 AND하여 세선화하고 있다. LoG 연산자의 영교차점이 한화소 두께로 나타나므로 결과적으로 한화소 두께로 세선화되지만 영교차점 후보점이라고 할 수 있는 RoA threshold 지도와 영교차점과의 localization에 따라 세선화 결과가 많은 영향을 받고 있다. 위의 두 방법은 모두 각각 에지 정도의 척도로 사용한 정보 대신에 다른 방법과의 결합을 한 형태로 세선화 방법을 취하고 있다. 반면 제안한 방법에서는 가우시안 그래디언트 연산자를 사용하므로 여기서 얻은 그래디언트 크기정보와 방향정보를

그대로 이용하여 세선화를 할 수 있다. 8방향으로 양자화한 방향정보를 이용하여 먼저 중심화소 방향값의 수직방향으로 양쪽의 두 화소씩 비교하여 중심화소가 5화소중 국부 최대가 되는 지점을 찾는다. 다음에는 크기 정보만을 이용하여 에지 contour에 있는 국부 최대값들을 연결하여 세선화된 에지 결과를 얻는다.

그림 10은 그림 8의 RoA방법과 제안한 방법의 threshold 지도에서 세선화시킨 결과이다(Touzi 방법은 한화소 정도의 두께로 세선화가 되지 않으므로 비교에서 제외시켰음) 에지 갯수는 그림 10(b)의 RoA방법이 2484개이고, 그림 10(c), (d)의 제안한 방법은 각각 3217, 3177개이다. RoA방법의 에지 갯수가 적은 이유는 RoA threshold 지도와 LoG 영교차점과의 localization의 불일치에 근거하며 그림 10(b)의 결과에서 보듯이 세로방향의 에지가 많이 끊기고 있다. 반면 제안한 방법에

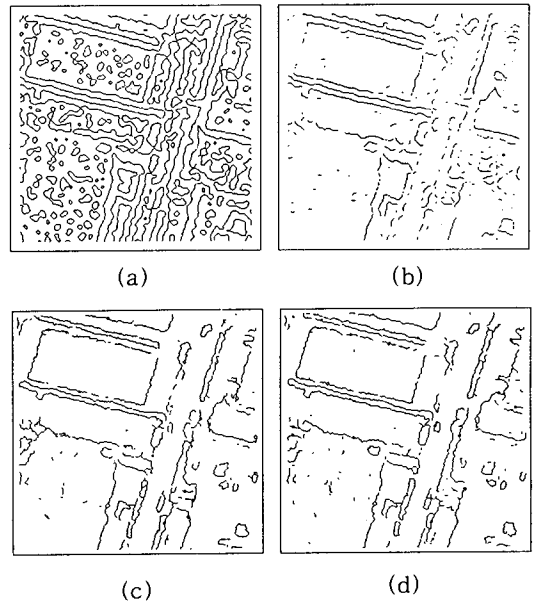


그림 10. 세선화 결과 (스펙클 항공영상 1)
 (a) Log 연산자의 영교차점 ($\sigma=3.0$)
 (b) RoA 방법
 (c) γ_s 를 이용한 제안한 다해상도 방법
 (d) d_{max} 를 이용한 제안한 다해상도 방법
 Fig. 10. Thinned result (speckled aerial image 1).
 (a) zero crossing point of the LoG operator ($\sigma=3.0$),
 (b) RoA method,
 (c) proposed multiresolution method based on γ_s ,
 (d) proposed multiresolution method based on d_{max} .

서는 threshold 지도의 윤곽선이 그대로 보존되어 있고 RoA 방법보다 뚜렷한 에지 형태를 보여주고 있다. 세션화된 에지 지도에서 끊기는 곳들이 있으나 threshold 지도에 있는 정보를 잃어버릴 정도는 아니다. 그림 11은 그림 9의 threshold 지도에 대해 세션화된 결과로 역시 RoA 방법보다 좋은 결과를 보이고 있고 에지 갯수는 RoA가 1589개, 제안한 방법이 각각 2569, 2595 개이다. 위의 그림 10과 11의 결과는 비슷한 갯수의 threshold 지도에서 세션화한 결과이며 threshold 지도의 결과와 세션화 방법에 의해 성능의 차이를 보이고 있다.

불연속 척도로 γ_s 와 d_{max} 를 사용한 제안한 두 방법을 비교하면, 그레디언트의 크기가 작은 곳의 검출은 d_{max} 를 이용한 방법이 보다 좋아 보이며, 계산시간면에서는 γ_s 를 이용한 방법이 보다 효율적이었다. 하지만 두 방법 모두 스펙클의 통계적인 성질을 이용한 해상도 결정 척도로서 만족할 만한 결과를 얻었다.

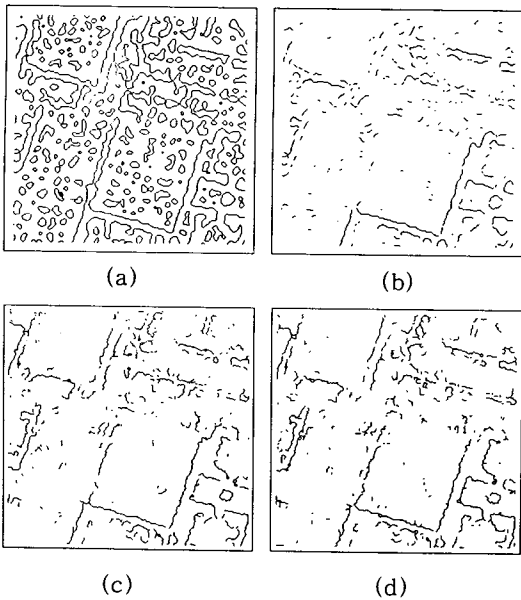


그림 11. 세션화 결과 (스펙클 항공영상 2)

(a) Log 연산자의 영교차점 ($\sigma=3.0$)

(b) RoA 방법

(c) γ_s 를 이용한 제안한 다해상도 방법

(d) d_{max} 를 이용한 제안한 다해상도 방법

Fig. 11. Thinned result (speckled aerial image 2).

(a) zero crossing point of the Log operator ($\sigma=3.0$),

(b) RoA method,

(c) proposed multiresolution method based on γ_s ,

(d) proposed multiresolution method based on d_{max} .

VIII. 결 론

논문은 스펙클 영상에서의 에지 검출에 관한 연구이다. 스펙클의 신호의존성에 의해 기존의 그레디언트 연산자를 사용하여 경계를 검출할 경우 많은 어려움이 뒤따른다. 기존의 스펙클에서의 경계추출방법들은 신호 의존성을 줄이며 경계를 찾고 있지만 균일한 영역에서의 많은 거짓 에지의 검출을 수반하고 있다.

신호 의존성을 줄이고 영상의 균일한 지역과 경계지역의 불연속 척도로서 CoV와 CDF의 거리 d_{max} 를 이용하였다. 이들 불균일 척도들은 에지 지역일수록 큰 값을 가지며, 균일한 지역에서는 unimodal한 분포를 보이므로 여러 해상도를 갖는 창틀에서 구한 이들의 분포로부터 영상을 각 해상도에 맞게 나누어 줌으로써 각각의 영역에서도 다른 창틀을 이용한 에지 검출이 가능하였다. 기존의 방법과의 비교를 통해 볼 때 균일한 지역에서의 거짓 에지의 검출이 감소하였으며 세션화에 그레디언트의 크기와 방향정보를 이용하여 좋은 결과를 보였다. 앞으로 승산형과 가산형 잡음에 모두 적용될 수 있는 다해상도 에지 연산자에 대해 연구하려고 한다.

參 考 文 獻

- [1] J. W. Goodman, "Statistical properties of laser speckle patterns," in *Laser Speckle and Related Phenomena*, J. C. Dainty, ed. pp. 9-75, Berlin, Germany : Springer-Verlag, 1975.
- [2] R. Touzi, A. Lopes, and P. Bousquet, "A statistical and geometrical edge detector for SAR images," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. GRS-26, pp. 764-773, Nov. 1988.
- [3] A. C. Bovik, "On detecting edges in speckle imagery," *IEEE Trans. Acoustics, Speech, Signal Processing*, vol. ASSP-36, pp. 1618-1627, Oct. 1988.
- [4] 김태균, 남권문, 박래홍, "스펙클 영상의 다단계 적응평화 기법," 전자공학회 논문지-B, 제29권 B편 제1호, pp. 85-93, 1992년 1월.
- [5] 박덕준, 박래홍, "다해상도 에지 검출기법," 전자공학회 논문지-B, 제28권 B편 제12호, pp. 51-58, 1991년 12월.
- [6] F. Bergholm, "Edge Focusing," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. PAMI-9, pp. 726-741, Nov. 1987.
- [7] J. Canny, "A computational approach to edge

detection," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. PAMI-8, pp. 679-698, Nov. 1986.

tection," *Proc. Royal Soc. London*, vol. 207, pp. 187-217, 1980.

[8] D. Marr and E. Hildreth, "Theory of edge de-

著 者 紹 介

南 權 文 (準會員) 第29卷 B編 第1號 參照
현재 서강대학교 석사과정
재학중

朴 來 弘 (正會員) 第23卷 第6號 參照
현재 서강대학교 전자공학과
부교수



朴 德 濬 (準會員) 第28卷 B編 第12號 參照
현재 서강대학교 석사과정
재학중