

태양방위각 보상에 의한 지질학적 선구조 분석

Analysis of Geological Lineaments with Compensation
of the Sun's Azimuth Angle

李 鎮 杰*, 李 揆 棒**, 黃 相 諶***

(Jingeol Lee*, Gyoubong Lee**, and SangGi Hwang***)

요 약

위성사진에서 선구조의 형태로 인식 및 해석되는 단층 및 단열대 구조와 같은 지질구조는 광산지역의 사전탐사나 지질학적 특성에 관한 중요한 정보를 제공한다. 선구조의 방향이 태양의 방위각과 평행하거나 지형의 고지에 의한 그림자가 드리워지는 등의 이유로 해서 명암의 대비가 낮은 지역의 선구조를 효과적으로 추출하기 위한 태양방위각을 고려한 필터링 방법 및 Generalized Hough transform을 이용하여 필터링에 의해 추출된 경계영상으로부터 단층 및 단열대에 대응하는 선구조를 추출하는 방법이 제안되었다.

Abstract

Geological structures such as fault and fracture patterns provide important information about preliminary exploration of mineralized areas and geological characterization. They may be recognized and interpreted from satellite images as line-like features usually referred to as lineaments. A proposed filtering method taking the sun's azimuth angle into account is utilized, by which linear edges from low contrast areas where features extend parallel to the sun direction and in mountain shadow can be effectively extracted. Then, generalized Hough transform is applied to extract lineaments which correspond to fault and fracture patterns.

Keywords : Fault, Lineament, Edge Detection, Hough Transform, Remote Sensing

I. 서 론

선구조는 위성사진 상에 선명히 분별되는 구조지질의 특징들 중의 하나이다. 여러 단층 및 단열대들이 위성 사진상 선구조로 나타나므로 지역 단층형상 (Regional fault pattern)은 구조지질에 대한 기초적 정

보를 제공한다.

선구조의 중요성으로 인해 여러 가지 컴퓨터를 이용한 선구조 추출 방법이 제안되었다. 대부분의 방법이 Laplacian, Sobel, 등과 같은 디지털 필터를 이용하여 영상에서 명암이 급격히 변화하는 경계(Edge)를 추출하고 Hough transform에 의해 이진영상에서 선분

* 培材大學校 컴퓨터工學科

(Dept. of Computer Eng. Paichai Univ.)

** 培材大學校 應用數學科

(Dept. of Applied Mathematics Paichai Univ.)

接受日: 1999年6月25日, 修正完了日: 1999年11月4日

*** 培材大學校 土木環境工學科

(Dept. of Geotechnical & Environmental Eng. Paichai Univ.)

※ 이 논문은 (1997)년 한국학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었음.

을 추출하는 방법에 근거하고 있다.^[1-3] 그러나 필터링 방법은 선구조의 방향이 태양의 방위각과 평행하거나 지형의 고저에 의한 그림자가 드리워지는 등의 이유로 해서 명암의 대비가 낮은 지역의 선구조를 효과적으로 추출하지 못하는 문제가 있다. 또한, Hough transform은 선구조의 영상 기준점으로 부터 거리, 방향만 제공하므로 선구조의 시작점과 끝점의 위치를 정하기 위해 이진영상과 비교에 의한 추가처리가 필요하다.^[1] Koike는 영상에서 경계를 추출하는 방법으로 종래의 필터링 방법과 달리 원도 내의 중심화소의 경계 여부 및 방향을 16 개의 등방향에 대해 이차 미분 및 태양의 방위각을 고려하여 결정하는 Segment Tracing Algorithm (STA)을 제안하였다.^[2] Raghavan은 STA에 의해 구해진 이진영상에 Generalized Hough transform을 적용하여 선구조의 시작점 및 끝점의 위치를 구하는 방법을 제안하였다.^[3, 4] Sato는 12개의 등방향에 대한 필터출력을 태양의 방위각을 고려하여 보정한 후 출력의 각 화소값을 12개의 필터출력 중 최대값을 취하는 방법을 제안하였다.^[5] 그러나 이 방법 들은 주어진 등방향에 대한 선구조만을 추출하므로 이 방향들과 일치하지 않는 선구조에 대해서는 추출에 문제가 있다.

본 연구에서는 영상에서의 명암의 경계를 추출하기 위하여 필터링 방법의 일종인 수평 및 수직방향의 미분치로 부터 원도 내의 중심화소의 경계의 크기 및 방향을 구한 후 태양의 방위각을 고려하여 크기성분을 보정함으로써 필터링 방법의 문제인 명암의 대비가 낮은 지역에서의 선구조 추출의 문제 및 STA, Sato 방법의 문제인 선구조 방향과 탐색 방향의 불일치에 따른 문제를 개선하였으며 선구조 추출은 Generalized Hough Transform을 사용하였다.

본 논문은 II장에서 수평 및 수직방향의 미분치에 의한 경계추출에 관해 요약하였으며 III장에서는 경계추출에 의해 생성된 이진영상에 Generalized Hough Transform을 적용한 선구조추출에 관해 요약하였다. IV장에서는 시험경계영상을 이용하여 경계각도 추출 시험 및 점촌 상주지역의 영상에 적용한 결과에 관해 서술하였으며 V장에서 결론 및 앞으로의 연구방향에 대해 서술하였다.

II. 경계추출

영상에서의 명암의 대비가 급격히 변화하는 경계는 국부영역의 미분치에 의해 구해질 수 있다.^[6] 임의의 위치 (x, y) 에서 영상 $f(x, y)$ 의 미분은 기울기 벡터(Gradient)로 정의된다.

$$\nabla f(x, y) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (1)$$

이 기울기 벡터는 위치 (x, y) 에서 영상 f 의 변화율이 최대인 방향을 향한다. 경계 추출은 이 벡터의 크기성분, $\|\nabla f(x, y)\|$ 을 이용한다.

$$\|\nabla f(x, y)\| = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

이 양은 기울기 벡터 방향의 단위거리 당 $f(x, y)$ 의 최대변화율이다. 위치 (x, y) 에서 경계 방향, $\alpha(x, y)$ 는 벡터해석에 의해 다음 식으로 표시된다.

$$\alpha(x, y) = \tan^{-1} \left(\left(\frac{\partial f}{\partial y} \right) / \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right) \right) \quad (3)$$

영상의 잡음성분 제거 및 미분을 취하는 국부영역의 화소값의 완만한 변화에 의한 신뢰성이 높은 미분값을 구하기 위하여 전처리로 저역통과필터인 가우시안(Gaussian) 함수를 도입하면 영상 $f(x, y)$ 의 가우시안 함수에 의한 필터링출력에 대한 미분은 다음식과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} \nabla [g(x, y) * f(x, y)] &= \nabla g(x, y) * f(x, y) \quad (4) \\ \nabla g(x, y) &= \begin{bmatrix} -2x/2\pi\sigma^2 e^{-(x^2+y^2)/2\pi\sigma^2} \\ -2y/2\pi\sigma^2 e^{-(x^2+y^2)/2\pi\sigma^2} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

위 식은 미분과 필터링은 선형이라는 성질을 이용하여 유도되었으며 가우시안 함수에 의해 영상을

저역통과한 후 미분을 취하는 것은 가우시안 함수를 미분하여 필터링하는 것과 동일함을 알 수 있다.

III. Generalized Hough Transform에 의한 선구조 추출

Generalized Hough Transform은 이진영상으로부터 선구조를 추출하는 방법으로 Hough Transform과 달리 선구조의 시작 및 끝점의 위치를 구할 수 있다.^{13, 4, 7} 그림 1과 같이 이진영상을 영상의 중심에 대해 임의의 각도로 회전시켜 어큐레이터(Accumulator)에 표시한다. 어큐레이터 상에서 수평 및 수직방향 선분들의 시작 및 끝점의 위치를 구하고 이 위치를 회전 각도와 같은 각도로 역회전시켜 원래 이진 영상에서의 선구조의 시작 및 끝점의 위치를 구한다. 그림 1에서 수평축과 α 각 기울어진 선분 ab는 이 영상을 α 각 만큼 회전하여 어큐레이터 상에 표시하면 수평 선분 a'b'에 해당하므로 회전각 및 변환비를 고려하면 이 선분의 이진 영상에서의 시작 및 끝점의 위치를 구할 수 있다. 어큐레이터 상에서 수평 및 수직방향으로 선분이 동시에 탐색되므로 회전방향은 하한 0도에서 상한 90도로 모든 방향의 선분이 추출된다.

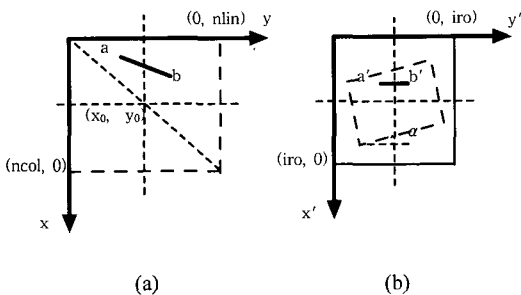


그림 1. (a) 이진영상, (b) 어큐레이터
Fig. 1. (a) Binary Image, (b) Accumulator.

알고리즘의 세부 동작은 다음과 같이 요약된다.

1) 이진영상에서 화소값이 1인 화소(선구조)의 위치를 영상의 중심에 대해 미소증분 α 각도만큼 회전시키고 이진영상의 대각선 방향의 길이와 어큐레이터의 크기, iro의 비로 영상을 재구성 한다.

$$\begin{aligned} x' &= ((x - x_0)\cos\alpha - (y - y_0)\sin\alpha + roho)/droh \\ y' &= ((x - x_0)\sin\alpha + (y - y_0)\cos\alpha + roho)/droh \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} rohm &= \sqrt{ncol^2 + nlin^2} \\ roho &= rohm/2 \\ droh &= rohm/iro \end{aligned}$$

2) 어큐레이터의 모든 셀(cell)의 값을 0으로 초기화시킨 후 식 (5)에 의해 이진영상 화소값이 1인 화소의 위치에 해당하는 어큐레이터의 셀 값을 1 증가시킨다.

3) 어큐레이터에서 문턱치(cno) 이상인 셀 값이 수평 및 수직방향으로 연속적으로 일정 길이(문턱치, iml/droh) 이상으로 존재하는 경우 선분으로 판정하여 시작 및 끝점의 좌표를 구한다. 이와 동시에 한 쌍의 선분이 동일 직선 상 일정 간격 (문턱치, gap0/droh) 이하로 분리된 경우 두 선분을 이어서 하나의 선분으로 간주한다.

4) 어큐레이터에서 추출된 선분에 대해 시작 및 끝점의 좌표를 절차 1)에서의 회전방향의 역방향으로 같은 각도로 회전시켜 이진영상에서의 선분의 시작 및 끝점의 좌표를 구한다.

$$\begin{aligned} x &= (x' droh - roho)\cos\alpha \\ &\quad + (y' droh - roho)\sin\alpha + x_0 \\ y &= -(x' droh - roho)\sin\alpha \\ &\quad + (y' droh - roho)\cos\alpha + y_0 \end{aligned} \quad (6)$$

회전각도를 미소증분 α 각도 증가하여 90도까지 절차 1)에서 절차 4)를 반복한다.

5) 이웃하는 한 쌍의 선분에 대해 중심간의 거리, d 와 각 선분의 각도, θ 를 이용하여 짧은 선분이 제거된다.

if $\delta\theta < \alpha n1$ and $d < |z_i - z_j| + gap1$,
then the shorter is deleted

$$\begin{aligned} d &= \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \\ \delta\theta &= |\theta_i - \theta_j| \end{aligned} \quad (7)$$

θ_i, θ_j 는 선분의 방향, $(x_i, y_i), (x_j, y_j)$ 는 각 선분의 중심 좌표, z_i, z_j 는 각 선분길이의 1/2이다.

상기 식에 따라 비교하는 두 선분이 일정 거리 이내에 비슷한 방향인 경우 짧은 선분이 제거되며 선분 길이의 차가 큰 경우 비교의 범위가 넓어짐에 따라 긴 선분 위주로 추출됨을 알 수 있다.

6) 이웃하는 한 쌍의 선분에 대해 중심간의 거리, d 와 각 선분의 각도, θ 및 한 선분의 끝점에서 다른 선분간의 수직거리, d_i, d_j 를 이용하여 완만히 변화하는 선구조(Curvilinear)의 연결성 여부를 검사한다.

if $\delta\theta < \alpha n^2$ and
 $d_i < gap/2$ or $d_j < gap/2$,
 then both lines are marked as linked.

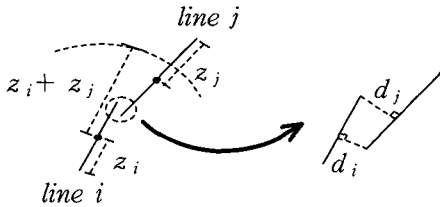


그림 2. 연결성 검사관련 변수
 Fig. 2. Parameters associated with link.

7) 상기 절차에 의해 연결되어 있는 선분이거나 단일선분의 길이가 일정길이 (문턱치, iml_lst)보다 긴 경우 최종적인 선구조로 추출된다.

절차 1)에서 절차 4)는 Generalized Hough Transform에 해당되며 절차 5)에서 절차 7)은 Generalized Hough Transform에 의해 추출된 선분 들 중 국부영역내의 짧은 선분제거 및 연결성 여부를 검사하여 최종적인 선구조의 표현에 관련된 절차이다.

IV. 시험 결과

영상에서 경계추출은 시험경계영상에 Sato 필터 및 가우시안 미분필터를 적용하여 경계각도 검출 능력을 비교한 후 보은군 지역의 영상에 Sato, 가우시안 미분, STA 방법의 경계검출 결과를 비교하였다. 수평 및 수직 방향 미분치를 구하기 위한 필터의 크기는 STA 방법과 비교를 위하여 STA 방법에 사용된 원도 크기와 동일한 11×11 으로 하였으며 Sato 및 가우시

안 수평방향 미분필터는 그림 3에 표시하였다. 그림 3의 가우시안 미분필터는 식(4)에 따라 2차 평면에 대한 연속함수를 구한 후 필터계수의 각 좌표점에서 샘플링하여 구하였다. 즉, Impulse Invariance 방법의 이거 디지털 필터를 구현하였다. 또한, 표준편차, σ 는 0.9로 다양한 표준편차값으로 다음에 서술할 시험경계 영상에 대한 경계각도 검출시험 결과 가장 우수한 성능을 보임을 확인하였다.

Sato 와 가우시안 미분필터의 경계 방향 검출 능력을 비교하기 위하여 그림 4와 같은 경사형 경계를 그림 5에서와 같이 0 - 180 도 구간내에서 11.25 도 간격으로 회전시켜 구한 영상 들에 대해 식(3)을 적용하여 측정한 경계 방향을 표 1에 나타내었다. 회전된 영상은 Bilinear Interpolation에 의해 구하였다.

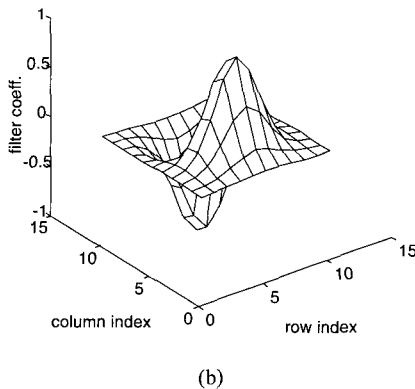
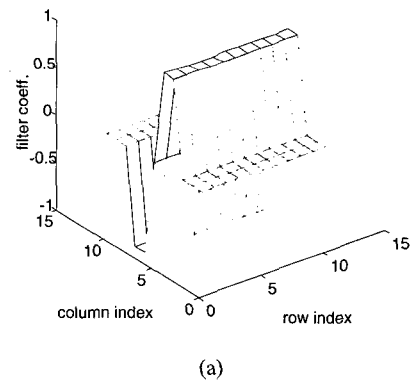


그림 3. (a) Sato 필터, (b) 가우시안 미분필터
 Fig. 3. (a) Sato filter, (b) Differentiated Gaussian filter.

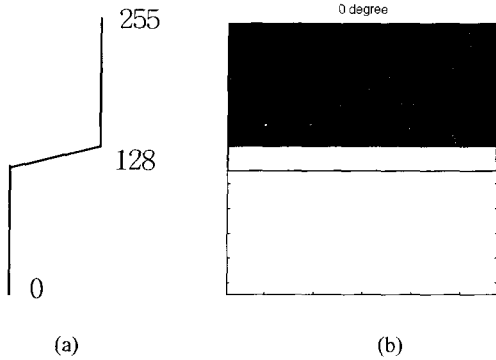


그림 4. (a) 경계 화소값 변이, (b) 경사형 경계 영상
Fig. 4. (a) Edge profile, (b) Ramp edge image.

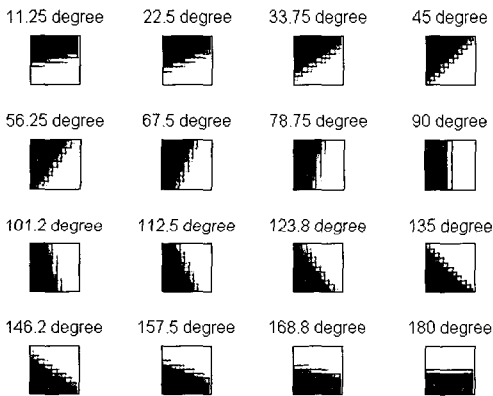


그림 5. 회전된 경사형 경계 영상
Fig. 5. Rotated ramp edge image.

표 1에서 회전각은 STA 방법과 동일한 16개의 등방향으로 하였으며 시험결과로부터 시험경계영상에 대한 경계각도 검출능력면에서 가우시안 미분형의 필터가 Sato 필터보다 우수함을 알 수 있다. 가우시안 미분필터에 의한 경계각도 측정치는 회전영상을 구하기 위해 사용된 보간법에 의한 근사 화소값을 고려하면 상당히 높은 정확도를 보여준다.

그림 6은 보은군 지역의 영상으로 수치표고모형(Digital Elevation Model)으로부터 태양의 방위각을 북동방향 45도로 하여 구한 음영기복도(Shaded-Relief Image, 크기: 500×500)이다. 이 입력영상에 그림 3에

표 1. 경계방향 측정치

Table 1. Measured orientations of edges.

회전 각도	측정치	
	Sato	가우시안
0.00	0.00	0.00
11.25	3.65	11.07
22.50	10.09	22.35
33.75	24.05	33.69
45.00	45.00	45.00
56.25	65.95	56.31
67.50	79.91	67.65
78.75	86.35	78.93
90.00	90.00	90.00
101.25	93.65	101.07
112.50	100.09	112.35
123.75	114.05	123.69
135.00	135.00	135.00
146.25	155.95	146.31
157.50	169.91	157.65
168.75	176.35	168.93
180.00	180.00	180.00

표시된 Sato 및 가우시안 미분 필터를 적용하여 식 (2) 와 (3)에 의해 경계의 크기 및 방향성분을 추출한 후 크기 성분에 태양과 경계의 상대방향에 따른 보정값, $1/(1 + \sin|\theta|)$ 을 곱하였다.²⁾ 여기서 θ 는 태양의 방위각과 경계의 각도의 차이이다. 즉, 경계의 방향이 태양의 방위각과 평행한 경우 경계의 크기성분은 변화가 없으며 수직에 이르기까지 감소하여 수직인 경우 반으로 감소된다. 이러한 보상을 통하여 경계의 크기성분의 분산이 작아짐을 확인하였다. 보상된 크기성분의 최대값을 기준으로 30% 이하는 화소값을 0, 이상은 255 으로 한 이진영상을 그림 7 과 8에 나타내었다. 가우시안 미분필터의 출력이 Sato 필터의 출력에 비해 추출된 경계가 더 완만하게 표현되며 입력영상과의 대응이 더 우수함을 알 수 있다. 이는 Sato 필터는 미분을 인접한 화소값 들의 차에 의해 근사화한 반면 가우시안 미분 필터는 전처리 단계에서 가우시안 합

수에 의해 저역통과됨에 따라 미분을 구하는 최소근처의 최소값들이 완만히 변화하고 미분이 해석적인 식에 근거함에 기인된다. 그림 9는 STA 방법에 의해 추출된 경계영상으로 알고리즘에 의해 능선에 해당하는 경계만 추출된다는 점을 감안하더라도 입력영상과의 대응이 되지 않는 부분이 많이 존재하며 일련의 시험을 통해 본 논문에서 제안된 필터링 방법보다 경계추출 능력이 열등함을 확인하였다.

경계 추출 비교시험을 통하여 우수한 성능이 입증된 그림 8의 가우시안 미분필터 출력에 Generalized Hough Transform 및 짧은 선분제거 및 연결성 검사를 적용하여 선구조를 추출한 결과는 그림 10에 나타내었다. 0도에서 89도까지 1도 간격으로 회전하여 구한 이 결과와 관련된 변수들의 값은 실험적으로 정하였으며 그 값은 다음과 같다. iro=350, cno=0, iml=20, gap0=20, an1=20도, gap1=5, an2=40도, gap2=3 그림 6, 8, 10의 입력영상, 이진영상 및 선구조 추출결과를 비교하면 입력영상에서 명암이 급격히 변화하는 경계부분이 이진영상에서 밝은 부분에 대응되어 있으며 선구조는 이러한 경계부분을 연결된 직선으로 나타냈음을 알 수 있다. Generalized Hough Transform 적용시 탐색 대상의 선분은 변수(iml)로 설정된 최소 선분길이 이상인 선분만 추출하고 짧은 선분제거 과정에서 긴 선구조 부근에 존재하는 비슷한 방향의 짧은 선구조는 제거되므로 그림 10에서 짧은 경계부분은 선구조로 추출되지 않았다. 추출된 선구조는 입력영상과 일치하지 않는 부분도 다소 있지만 최소한 입력영상

에서 육안으로 지각되는 주된 선구조와는 잘 일치됨을 보여준다.

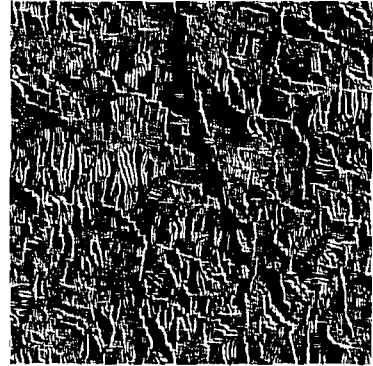


그림 7. 경계추출 영상(Sato)
Fig. 7. Edge image (Sato).

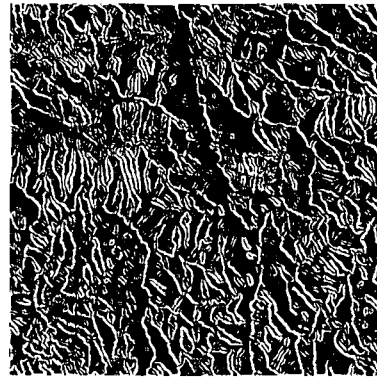


그림 8. 경계추출영상(가우시안 미분)
Fig. 8. Edge image (Differentiated Gaussian).

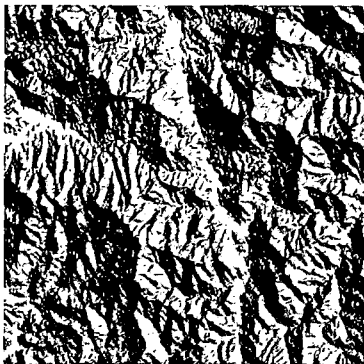


그림 6. 입력영상
Fig. 6. Input image.

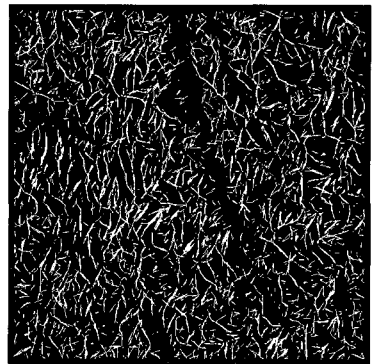


그림 9. 경계추출 영상(STA)
Fig. 9. Edge image (STA).

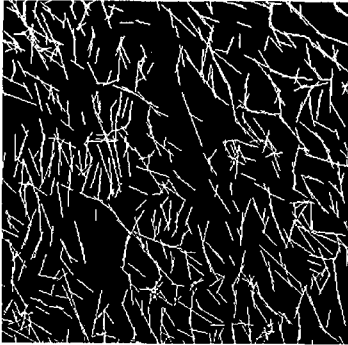


그림 10. 선구조

Fig. 10. Lineaments.

V. 결 론

경계의 크기성분을 태양과 경계의 상대방향에 따라 보상함으로써 경계의 방향이 태양의 방위각과 평행하거나 지형의 고저에 의한 그림자가 드리워지는 등의 이유로 해서 명암의 대비가 낮은 지역의 경계를 효과적으로 추출하는 방법을 제안하였으며 이를 보은군 지역의 음영기복도를 이용하여 기존의 STA 방법이나 Sato 필터보다 우수함을 보였다. 이는 STA 방법이나 Sato 필터는 주어진 등방향에 대한 경계만을 추출하는 반면 제안된 방법은 전방향의 경계를 추출할 수 있기 때문이다. 또한, 시험경계영상을 이용한 경계각도추출 시험을 통하여 최소한 STA와 같이 16개의 등방향에 대한 경계각도 추출능력을 입증하였다. 선구조는 제안된 방법에 의해 추출된 경계영상에 Generalized Hough Transform 및 짧은 선분제거 및 연결성 검사를 통해 추출되었다. 추출된 선구조와 입력 영상에서 육안으로 지각되는 주된 선구조와의 일치성에 의해 제안된 방법의 적용성이 입증되었다.

앞으로 연구대상 전지역에 대해 수치표고모형으로부터 구한 음영기복도를 포함하여 Landsat 및 JERS-1 위성 영상 등 다양한 영상자료를 이용하여 제안된 방법을 통하여 선구조를 추출할 예정이며 야외 조사를 통해 제안된 방법의 신뢰성을 검증할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] Jinfei Wang and Philip J. Howarth, "Use of the Hough Transform in Automated Lineament Detection," *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 28, No. 4, 1990
- [2] Katsuki Koike, Shuichi Nagano, and Michito Ohmi, "Lineament Analysis of Satellite Images using a Segment Tracing Algorithm (STA)," *Computers & Geosciences*, Vol. 21, No. 9, pp. 1091-1104, 1995
- [3] Venkatesh Raghavan, Shinji Masumoto, Katsuki Koike, and Shuichi Nagano, "Automatic Lineament Extraction from Digital Images using a Segment Tracing and Rotation Transform Approach," *Computers & Geosciences*, Vol. 21, No. 4 pp. 555-591, 1995
- [4] 김상완, 자동화된 선구조 추출 알고리즘 개발과 이의 경북 의성지역에의 적용 연구, 연세대학교 석사 학위논문, 1998
- [5] Sato, I., and Urai, M., "A Correction Method of the Sun Illumination effect for the Line Element Extraction," *Proc. 8th Japanese Conf. Remote Sensing*(Tokyo, Japan), Remote Sensing Soc. Japan,
- [6] Rafael C. Gonzalez, Paul Wintz, *Digital Image Processing*, Addison-Wesley Publishing Company
- [7] Kang, C. W., Park, R. H., and Lee, K. H., "Extraction of Straight Line Segments using Rotation Transformation: Generalized Hough Transformation," *Pattern Recognition*, Vol. 24, No. 7, pp. 633-641, 1991

— 저 자 소 개 —



李 鎮 杰 (正會員)

1981년 2월 고려대학교 전자공학과 졸업 (공학사), 1985년 8월 고려대학교 대학원 전자공학과 졸업 (공학석사), 1994년 12월 미국 University of Florida 전기공학과 졸업 (공학박사), 1982년 9월~

1990년 12월 국방과학연구소 연구원, 1995년 6월~1997년 2월 삼성전자주식회사 수석연구원, 1997년 3월~현재 배재대학교 컴퓨터공학과 조교수

주관심분야 : 영상처리에 의한 원격탐사, Voice CODEC, Audio Coding.



黃 相 諶 (正會員)

1980년 고려대학교 지질학과 졸업 (이학사), 1985년 캐나다 Acadia Univ. 졸업 (이학석사), 1990년 캐나다 New Brunswick Univ. 졸업 (이학박사), 1990년~1996년 한국 자원연구소, 1996년~현재 배재대

학교 토목환경공학과, 조교수.



李 揆 樞 (正會員)

1979년 2월 서강대학교 수학과 졸업 (이학사), 1982년 8월 서강대학교 대학원 수학과 졸업 (이학석사), 1991년 6월 미국 Virginia Tech. 수학과 졸업 (이학박사), 1995년 3월~현재 배재대학교 응

용수학과, 부교수.