

論文98-35S-11-14

위성 탑재 합성개구 레이더 영상에서의 도로 검출

(Road Detection in the Spaceborne Synthetic Aperture Radar Images)

全 聖 民 * , 洪 起 祥 *

(Sungmin Chun and Ki-Sang Hong)

요 약

본 논문은 위성 탑재 합성개구 레이더 영상에서 중요한 지리적 특징점인 도로를 검출하는 기법을 제시한다. 도로에 대한 모델로서 snake를 사용하였고, 이 snake의 외부 에너지를 도로의 특성에 맞도록 새롭게 정의 하였다. 레이더 영상만을 사용할 경우 도로를 검출하는 것이 매우 어려우므로 다른 정보가 필요하다. 우리는 디지털 지도를 이용하여 snake의 위치와 형태를 초기화하는데 사용하였다. 레이더 영상에 나타나는 도로의 지리적 위치는 지형부호화 (geocoding)를 통해서 대략적으로만 알 수 있고, 보통의 디지털 지도는 정확도가 낮아서 두 데이터 사이에는 큰 오차가 존재한다. 초기 매칭 (matching) 과정을 통하여 이 오차를 매우 줄이고 디지털 지도에서 추출한 도로를 이용하여 snake의 형태를 초기화한 후 에너지를 최소화함으로써 도로를 검출한다. 도로 검출시에 나타나는 대표적인 두 가지 문제점을 제시하고 이 문제점을 완화시키는 방법을 제안하였다.

Abstract

This paper presents a road detection technique for spaceborne synthetic aperture radar (SAR) images. Roads are important cartographic features. We incorporate an active contour model called snake as a model for the road and define a new external energy for snake which is appropriate for the road. Detecting roads in spaceborne SAR images is very difficult without other information. In this paper, digital maps are utilized to obtain the initial position and shape for snake. Only approximate geodetic location of roads appearing in SAR images can be known through geocoding process and usual digital maps also have location errors. Therefore, there exist large location offsets between the two data. By introducing initial matching procedure, the errors are reduced significantly. Then we initialize the snake's shape using the roads extracted from digital map and minimize the energies of all snake points to detect roads. We outline two problems in detection and propose a method that mitigates them.

I. 서 론

합성개구 레이더 (Synthetic aperture radar, SAR)는 고해상도의 2차원 레이더 영상을 얻을 수 있

* 正會員, 浦項工科大学校 電子電氣工學科
(EE Dept., Pohang University of Science and Technology (POSTECH))

接受日字: 1998年2月24日, 수정완료일: 1998年7月23日

는 장치로서, 신호 처리와 시스템에 관한 연구는 선진국에서는 이미 완성 단계에 와있다. 최근에는 시스템 보다는 영상의 응용에 대한 연구에 더 많은 비중이 두어져 있는데 특히, 영상 데이터의 연구는 멀티센서 데이터 퓨전 (multisensor data fusion)에 초점이 맞춰져 있다^[10]. 데이터 퓨전 (data fusion)이란, 여러 개의 센서로부터 같은 물체에 대하여 획득한 데이터 혹은 관련 데이터베이스로부터의 정보를 합하여 한 개의 센서를 사용하는 것 이상으로 정확도를 향상시키는 기

법이다. 센서 데이터들만을 퓨전하는 것도 이득이 있지만, 센서 데이터 이외의 것들도 이용하는 것에 대한 잠재 가치는 쉽게 알 수 있다. 데이터 퓨전 기술은 지도 (보통의 지도 혹은 특정 용도의 지도 등), 3차원 고도 지도, 관련 표, 그래프 등의 다양한 데이터들을 필요로 하기도 한다^[1].

본 논문에서는 위성 탑재 합성개구 레이더 영상에서 고속도로를 검출하는 기법을 제안한다. 위성 탑재 합성개구 레이더 영상의 해상도는 약 30 미터 정도로서 항공기 탑재 레이더 영상에 비해 매우 낮으므로 도로를 검출하는데 어려움이 있다. 게다가 도로의 폭이 30 미터 이하가 되는 경우에는 레이더 영상에서 거의 보이지 않는다. 수직으로 아래를 보면서 데이터를 얻는 광학 위성 영상과는 달리 합성개구 레이더는 측면을 바라보기 때문에 높은 산 등의 지형물에 가려져서 도로가 보이지 않는 경우도 생긴다. 이와 같은 여러 가지 문제점 때문에 광학 위성 영상이나 항공기 탑재 레이더 영상을 이용한 연구 결과는 많지만 위성 탑재 레이더 영상을 이용한 연구는 대부분 영상 분할 (segmentation)과 같은 큰 영역을 다루는 것에만 국한되어 있다. 근래에는 해안선의 검출에 관한 연구도 수행되었는데^{[7] [8] [9]}, 해안선은 물 영역이 상대적으로 매우 동질적인 (homogeneous) 특성을 갖기 때문에 도로 검출 문제처럼 심각하지는 않다.

위에서 설명한 여러 가지 어려움때문에 레이더 영상 하나만으로는 도로 검출이 거의 불가능하므로 다른 데이터도 이용하는 데이터 퓨전 방법을 도입함으로써 문제를 해결한다. 이미 제작되어 있는 지도와 3차원 고도 지도는 본 논문의 목적에 매우 유용한 정보가 된다. 2차원 디지털 지도를 통해서 대략적인 도로의 위치와 모양에 대한 정보를 얻어내고 3차원 고도 지도로부터 도로가 산에 가려지는지를 판단할 수 있다. 위성의 시간에 따른 위치는 부가 정보로 주어지기 때문에 데이터 획득 시 위성의 위치와 3차원 고도 지도로부터의 지형 구조 및 위치 관계를 이용하여 레이더 영상에 도로가 나타나는지를 판단할 수 있다. 현재 3차원 고도 지도를 이용하는 연구 단계까지는 도달하지 않아서, 레이더 영상에서 도로의 유무 판단은 수동으로 한다. 도로의 폭이 좁아서 레이더 영상에 나타나지 않는 문제는 검출하고자 하는 도로를 고속도로로 제한함으로써 해결한다. 고속도로 이외에도 넓은 도로는 검출이 가능하지만 디지털 지도에서는 일반도로와 고속도로가

따로 구분되기 때문에 고속도로만을 선택하면 왕복 4차선 이상의 넓은 도로를 보장한다.

위성 탑재 합성개구 레이더는 보통 지형 탐사를 목적으로 하기 때문에 데이터를 획득한 후 신호 처리하여 얻은 2차원 레이더 영상을 위경도, UTM (Universal Transverse Mercator) 등의 좌표계로 변환해야 한다. 이 과정을 지형부호화 (geocoding)라고 하는데, 이를 위해서는 영상 화소 (pixel)의 좌표 값을 구해야만 한다. 좌표 값을 구하는 것은 위성에서 물체까지의 거리 식, 도플러 식, 지구 모델 식의 3원 2차 연립 방정식의 근으로 주어진다^[2]. 그러나 이 식의 매개 변수들의 측정 오차로 인하여 구해진 좌표 값은 에러가 생기게 된다. 이 결과로 지형부호화된 합성개구 레이더 영상 화소의 위치는 에러를 갖는다. Curlander^[3]는 약 100 미터의 오차로 SEASAT 영상을 지형부호화하였다.

본 논문에서 도로 검출에 이용되는 디지털 지도는 민수용이기 때문에 위치의 정확도가 낮다. 즉, 지형부호화된 합성개구 레이더 영상뿐만 아니라 디지털 지도에도 위치에 오차가 있어서 같은 지역이 다른 부분에 있게되고, 데이터 퓨전 방법을 적용할 수가 없다. 초기 매칭 (matching) 과정을 통하여 디지털 지도와 레이더 영상을 대략적으로 정합 (registration) 하면, 두 데이터에서 도로의 위치는 비슷하게 될 것이다. 그 다음에 디지털 지도에서 도로부분만을 뽑아내어 초기 contour로 선정함으로써 snake의 형태를 초기화한다. 이와 같이 snake의 위치와 형태를 초기화하여 에너지를 최소화 함으로써 레이더 영상에서 도로를 정확하게 찾는다.

도로 검출의 대표적인 응용 분야로서는 같은 지역의 다른 영상과 정합하는 것이 있다^[8]. 정합을 하기 위해서는 두 영상의 대응 점들을 알아야 하는데, 지도와 합성개구 레이더 영상에서 도로를 추출하여 무게 중심 값을 대응 점으로 선택할 수 있다. Li^[8]는 광학 위성 영상과 위성 탑재 합성개구 레이더 영상과 정합을 하기 위해서 물 영역의 폐곡선 (closed-boundary)을 추출하여 그 곡선의 중심 (centroid)을 대응 점으로 선택하였다. 그러나 물 영역은 수위가 계절, 날씨에 따라 쉽게 변하므로 두 영상이 비슷한 시간에 획득하지 않았다면 대응 점의 위치가 서로 다를 수 있다. 도로는 고정된 물체이므로 이와 같은 문제가 없는 장점이 있다. 이 외에도 지도에서 틀리게 나타나

는 도로 위치를 보정하는 데에도 적용할 수 있다.

본 논문의 도로 검출 알고리즘 흐름도를 그림 1에 나타내었다. 전처리 과정과 snake의 위치를 초기화 하기 위한 초기 매칭을 2장에서 설명한다. Snake를 이용하여 고속도로를 검출하는 과정은 3장에서 설명한다. 3장의 처음에 snake의 기본 이론을 소개하고, 레이더 영상에 나타나는 도로의 특성에 맞도록 에너지를 새롭게 정의하여 도로를 찾는 순차적인 과정을 설명한다. 도로의 검출 결과는 4장에서 보여주고, 5장에서는 제시한 도로 검출 방법에 대한 결론을 제시한다.

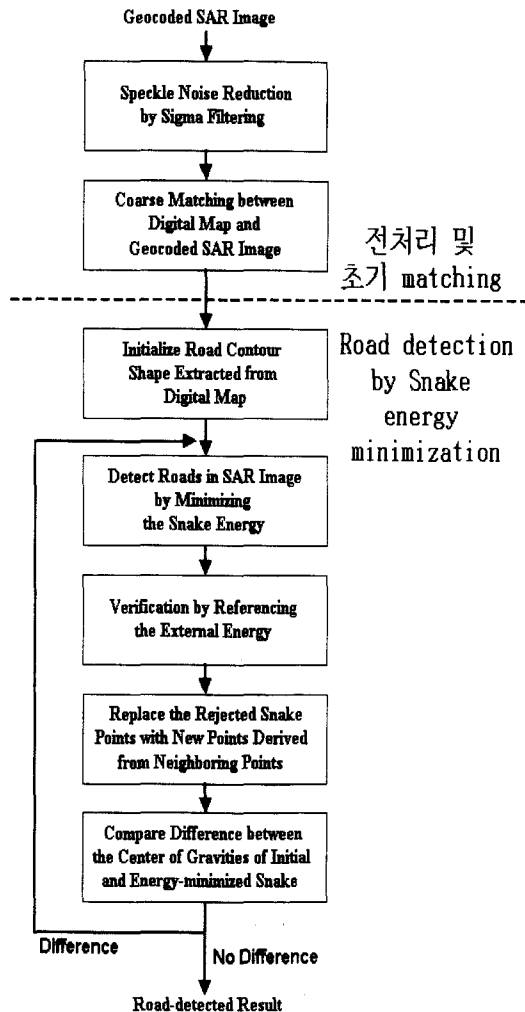


그림 1. 도로 검출 알고리즘
Fig. 1. Algorithm Flowchart for Road Detection.

II. 전처리 및 초기 매칭

본 논문에서 사용한 데이터는 유럽의 ERS-1 SAR

위성에서 1996년 1월에 찍은 한국의 충청도 지방의 영상이다. ERS-1 SAR 데이터는 가로 세로 각각 100 km 길이의 지역을 하나의 데이터로 하며 지상에서 약 788.4 km의 높이의 궤도를 돌고 있다. 레이더 신호의 주파수는 5.3 GHz이다.

1. 지형부호화

지형부호화 (geocoding)는 지형 좌표계 (위경도 혹은 UTM 등)로 레이더 영상을 변환하는 것으로서 다음 세 방정식으로부터 레이더 영상 화소의 위치, $R_t = (x_t, y_t, z_t)$ 를 계산한다^{[2] [3]}.

$$R = \|R_s - R_t\| \quad (1)$$

$$f_{D_s} = -\frac{2}{\lambda R} (V_s - V_t) \cdot (R_s - R_t) \quad (2)$$

$$\frac{x_t^2 + y_t^2}{(R_e + h)^2} + \frac{z_t^2}{R_p^2} = 1 \quad (3)$$

여기서 R 은 레이더와 물체의 거리, f_{D_s} 는 도플러 주파수, λ 는 레이더 신호의 파장, R 과 V 는 각각 위치와 속도를 나타내는 벡터로서 아래첨자 s 와 t 는 각각 레이더 (sensor) 및 물체 (target)을 나타낸다. 또한 R_e 와 R_p 는 각각 타원으로 근사한 지구의 적도와 극에서의 반지름을 얘기한다. h 는 물체가 위치한 곳에서 지구 타원과 틀리는만큼을 나타내는 지역 높이 (local height)이다. 위치, $R = (x, y, z)$ 은 지구의 중심을 원점으로 하는 좌표계 (geocentric coordinate)로서 이 좌표값으로부터 지형 좌표값을 구한다.



그림 2. 지형부호화된 합성개구 레이더 영상(흰색 선은 디지털 지도에서 추출한 도로와 호수를 나타낸다.)

Fig. 2. Geocoded SAR Image.(White lines represent the road and lake boundary extracted from digital map)

본 논문의 실험에는 ERS-1 SAR 데이터를 지형부호화 알고리즘^[3]을 사용하여 디지털 지도와 좌표계, 가로 세로의 크기 및 화소 간격을 맞춘 결과를 이용한다. 사용한 디지털 지도는 UTM 좌표계로 되어 있고 가로 세로 각각 16 미터의 화소 간격을 갖는다.

그림 2에 지형부호화된 합성개구 레이더 영상에 디지털 지도에서 추출한 고속도로와 물영역의 경계선을 겹쳐 놓았다. 지형부호화 시에 위치 오차가 있을 뿐만 아니라 디지털 지도도 역시 제작 시에 오차가 있으므로 겹쳐 놓았을 때, 도로의 위치가 약 30 화소 정도의 차이가 나타난다.

2. 스펙클 필터링

합성개구 레이더 영상을 특징짓는 스펙클은 산란 현상 때문에 나타나는 것으로 영상 이해 및 인식 등의 성능을 현저히 저하시키는 잡음의 일종이다. 이 스펙클을 제거하기 위하여 시그마 필터^[6]을 사용하였다. 시그마 필터는 매우 간단하면서도 좋은 성능을 나타내는 장점이 있다.

시그마 필터는 화소 단위로 처리하는데, i, j 번째 화소의 주변 $(2n+1) \times (2m+1)$ 의 화소들과 비교하여 처리한다. 즉, z 는 스펙클이 포함된 영상 화소값, x 는 스펙클 잡음이 없는 영상 화소값, v 는 평균이 1, 분산이 σ_v^2 인 스펙클 잡음을 나타낼 때,

$$\delta_{k,l} = \begin{cases} 1, & \text{if } (1-2\sigma_v)z_{i,j} \leq z_{k,l} \leq (1+2\sigma_v)z_{i,j} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

라고 두면, 추정 $\hat{x}_{i,j}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{x}_{i,j} = \frac{\sum_{k=i-n}^{i+n} \sum_{l=j-m}^{j+m} \delta_{k,l} z_{k,l}}{\sum_{k=i-n}^{i+n} \sum_{l=j-m}^{j+m} \delta_{k,l}} \quad (5)$$

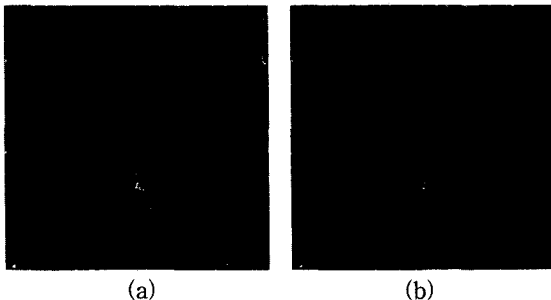


그림 3. 스펙클 감소 필터 처리 (a) 평균 필터 처리 영상 (b) 시그마 필터 처리 영상
Fig. 3. Speckle Smoothing. (a) Average-filtered image (b) sigma-filtered image

그림 3에 5×5 마스크 (mask)로 평균 필터 처리한 영상과 시그마 필터 처리한 영상을 비교하였다. 그림 2와 비교해 볼 때 스펙클이 매우 감소한 것을 확인할 수 있으며, 단순 평균 필터 처리한 경우는 그림 3의 (a)에서 보듯이 도로의 좁게 나타난 부분이 거의 사라지게 된다.

3. 초기 매칭

앞에서 설명한대로 지형부호화 시에 합성개구 레이더 영상은 식 (1), (2), (3)의 매개 변수 측정 오차로 인하여 실제의 위치로 변환되지 않는다. 디지털 지도도 제작 시의 오차가 존재한다. 두 데이터 사이의 위치 오차는 전체 영상에 걸쳐서 이동 오차 (translation error)와 회전 오차 (rotation error)만 있다고 근사할 수 있다. 실제로 회전 오차에 비하여 이동 오차의 값이 위치 오차의 대부분을 차지하므로 본 논문에서는 이동 오차만 있는 것을 가정한다.

초기 매칭은 레이더 영상과 디지털 지도 사이의 이동 오차를 구하여, 각각의 데이터에서 나타나는 도로의 위치가 비슷하게 되도록 한다. 본 논문에서 사용된 두 데이터의 위치 오차는 그림 2에서 보여주듯이 대략 30 화소 정도이다. 초기 매칭의 단계에서는 레이더 영상과 디지털 지도를 10 화소 이내로 정렬시키는 것이 목적이다. 10 화소는 16 미터의 화소 간격을 갖는 영상에서 160 미터에 해당한다.

합성개구 레이더 영상에서는 보통 물 영역이 매우 낮은 화소 값을 가질 뿐만 아니라 상대적으로 동질적인 (homogeneous) 특성을 갖는다. 또한 컬러 부호화된 디지털 지도에서는 컬러를 이용하여 물 영역을 쉽게 추출할 수 있다. 합성개구 레이더 영상과 디지털 지도에서 추출한 물 영역의 중심 (centroid)를 각각 계산하여 비교함으로써 초기 매칭을 시행한다. 이진화하여 물 영역을 추출한 결과 중 가장 큰 면적의 영역을 사용하여 중심을 계산한다. 이 방법을 통하여 초기 매칭한 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림 4 (a)는 지형부호화된 레이더 영상과 디지털 지도를 각각 이진화하여 겹쳐놓은 그림이다. 흰색과 밝은 회색은 각각 레이더 영상과 디지털 지도에서 물영역에 대하여 이진화한 결과를 나타내며, 어두운 회색은 겹치는 부분을 나타내었다. 그림 4 (b)는 중심 (centroid)의 차이만큼 영상 전체를 이동시켰을 때를 보여준다.

이진화한 결과 중 영역의 면적 크기가 일정 크기

이상이 되는 것이 없을 경우 물 영역이 없다고 판단하고 다른 지역에서 계산한 매칭 결과들의 평균치를 사용하여 레이더 영상과 디지털 지도의 위치 오차를 얻어낸다.

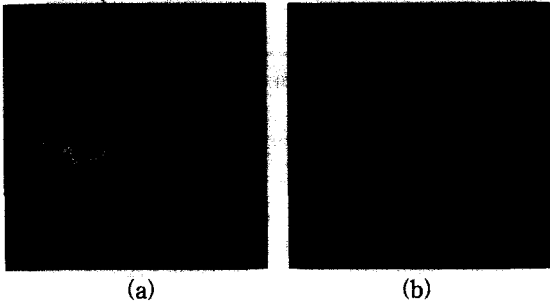


그림 4. 초기 Matching 전과 후의 결과
Fig. 4. Results Before and After Initial Matching

III. Snakes를 이용한 도로 검출

전처리와 초기 매칭 (matching) 단계가 끝나면 레이더 영상과 디지털 지도는 정합 (registration)이 된다. 따라서 디지털 지도에서 고속도로를 뽑아내면 레이더 영상에서의 고속도로와 비슷한 위치와 형태를 갖게 된다. 본 3장에서는 디지털 지도에서 얻은 고속도로를 초기 contour로 하여 레이더 영상에서 도로를 정확하게 찾는 알고리즘을 설명한다. 먼저 snake의 개념에 대하여 설명하고, 2절에서는 contour의 초기화 방법, 3절에서는 초기 매칭이 10 회소 이내로 정합이 안되었을 경우까지 고려하여 도로를 검출하는 방법을 기술한다. 4절에서는 snake를 이용하여 도로 검출을 할 때 생기는 문제점을 제시하고 완화시키는 방법을 제안한다.

1. 능동 contour 모델: Snake

Snake는 연속성 (continuity)을 제어할 수 있는 스플라인 (spline)이다^[4]. 이 연속성을 snake의 내부 에너지로 정의하고, 영상의 특징점들을 외부 에너지로 정의한다. Snake의 총 에너지는 내부 에너지와 외부 에너지의 합으로 정의한다. 즉,

$$E_{snake} = \int_0^1 E_{int}(\mathbf{v}(s)) + E_{ext}(\mathbf{v}(s)) ds \quad (6)$$

여기서 총 에너지 E_{snake} 는 snake의 contour를 따라 내부 에너지와 외부 에너지를 적분하여 구하게 된다. Snake를 디지털 컴퓨터에서 사용하기 위해서는

contour를 표본화하여 이산 근사화를 하여야 하는데 이산 근사 식은 다음과 같다.

$$E_{snake} = \sum_{i=1}^n \{E_{int}(\mathbf{v}_i) + E_{ext}(\mathbf{v}_i)\} \quad (7)$$

여기서 \mathbf{v}_i 는 snake의 i 번째 점을 나타낸다. Contour의 모델은 Lai^[5]의 모델을 사용한다.

1) 기호 정의

Contour는 순서가 정해진 점들의 집합, $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n]$ 로 이루어진 벡터로 정의한다. 여기서 \mathbf{v}_i 는 2차원 벡터 $(x_i, y_i) \in \mathcal{E}$ 를 나타내며, $\mathbf{V} \in \mathcal{E}^n$ 이다.

임의의 기준점 \mathbf{g} 에서 \mathbf{v}_i 까지의 변위 (displacement)를 $\mathbf{U} \in \mathcal{E}^n$ 의 원소 $\mathbf{u}_i = \mathbf{v}_i - \mathbf{g}$ 로 표시한다. 여기서는 \mathbf{g} 는 contour의 무게 중심으로 정한다.

2) Contour 모델

Snake의 i 번째 점, \mathbf{u}_i 는 주위 두 점의 선형 결합 (linear combination)으로 나타낸다.

$$\mathbf{u}_i = \alpha_i \mathbf{u}_{i-1} + \beta_i \mathbf{u}_{i+1},$$

$$i_\alpha = \begin{cases} i-1, & i > 1 \\ 3, & i = 1 \end{cases}, i_\beta = \begin{cases} i+1, & i < n \\ n-2, & i = n \end{cases} \quad (8)$$

여기서 α_i 와 β_i 는 contour의 국부적인 모양을 나타내는 형태 계수이다. 모든 i 에 대하여 $|x_{i_\alpha} y_{i_\beta} - x_{i_\beta} y_{i_\alpha}| > 0$ 인 조건을 만족하면, 형태 계수 α_i 와 β_i 는 다음의 식으로부터 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{i_\alpha} & x_{i_\beta} \\ y_{i_\alpha} & y_{i_\beta} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} \quad (9)$$

따라서 다음 절의 (5) 식에서 내부 에너지를 구할 때, α_i 와 β_i 는 x_i 와 y_i 로부터 얻어낼 수 있다.

3) 에너지 정의

Snake의 내부 에너지는 다음과 같이 정의한다^[5].

$$E_{int}(\mathbf{u}_i) = \frac{\|\mathbf{u}_i - \alpha_i \mathbf{u}_{i_\alpha} - \beta_i \mathbf{u}_{i_\beta}\|^2}{K(\mathbf{U})},$$

$$K(\mathbf{U}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|\mathbf{u}_{i+1} - \mathbf{u}_i\|^2 \quad (10)$$

여기서 $K(\mathbf{U})$ 는 점 사이의 간격들의 평균 길이이다. $E_{int}(\mathbf{u}_i)$ 를 $K(\mathbf{U})$ 로 정규화함으로써 스케일 (scale) 변화와 회전에 불변 (invariant)하도록 한다.

외부 에너지는 영상의 특성에 맞도록 정의하는데

보통의 영상은 경계선 (edge)를 사용한다. 합성개구 레이더 영상은 스펙클 (speckle) 잡음이 있어서 경계선 검출에 많은 어려움이 있다^{[7] [8] [9] [11]}. Li^[8]는 해안선을 검출할 때 snake를 사용하였는데, 물영역이 매우 동질적인 (homogeneous) 특성을 갖고 있으므로, 경계선 검출을 통하여 해안선 후보를 추출하였고 이 경계선을 snake의 외부 에너지로 하여 해안선을 검출하였다. 반면에 도로는 양쪽이 모두 비동질적 (nonhomogenous) 이므로 경계선 검출을 통하여 도로를 추출하는 것은 거의 불가능하다. 도로는 편평한 특성을 갖고 있어서 레이더 신호를 대부분 입사한 방향의 반대쪽으로 반사시킨다. 따라서 레이더 영상에 나타나는 도로는 대체로 주위보다 어두운 특성을 갖고 있다. 이러한 특성은 잔잔한 수면도 마찬가지이다.

본 논문에서는 어둡게 나타나는 도로의 특성을 이용한 새로운 외부 에너지를 다음과 같이 정의한다.

$$E_{ext}(\mathbf{u}_i, \mathbf{g}) = E_{ext}(\mathbf{u}_i + \mathbf{g}) = E_{ext}(\mathbf{v}_i) \quad (11)$$

$$= \frac{1}{(2K+1)I_{const}} \sum_{k=-K}^K I(\mathbf{w}_{i,k})$$

$$\mathbf{w}_{i,k} = \mathbf{v}_i + k \mathbf{t}_i, \quad k = -K, \dots, K \quad (12)$$

$$\mathbf{t}_i = \frac{\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_{i-1}}{\|\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_{i-1}\|_\infty} \quad (13)$$

$$\|\mathbf{v}\|_\infty = \max\{v_x, v_y\} \quad (14)$$

여기서 $I(\mathbf{v})$ 는 점 \mathbf{v} 에서의 영상 화소 값이고, \mathbf{t}_i 는 \mathbf{v}_i 에서의 점선을 근사화한 것이라고 볼 수 있다.

$\mathbf{w}_{i,k}$ 는 \mathbf{v}_i 에서 \mathbf{t}_i 방향으로 K 의 길이 이내에 들어오는 점들을 나타낸다. 그림 5에서 $K=2$ 일때의 경우를 보여주는데, $\mathbf{w}_{i,k}$ 는 5 ($=2K+1$)의 윈도우가 된다. 따라서 \mathbf{v}_i 에서의 외부 에너지는 \mathbf{v}_i 를 중심으로한 길이 $(2K+1)$ 의 화소 값들의 평균이다. \mathbf{t}_i 에서 $\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_{i-1}$ 를 무한대 놈 (infinity norm)으로 정규화함으로써 \mathbf{t}_i 의 길이를 윈도우의 한 칸 길이가 되도록 한다. I_{const} 는 레이더 영상의 화소값이 0에서 1 사이에 들어오도록 정규화하는 역할을 한다. 그러나 반드시 0에서 1 사이에 들어오도록 할 필요는 없고 내부 에너지와 외부 에너지의 가중치 매개 변수의 역할을 하는 것으로 볼 수 있다. 즉, I_{const} 가 클수록 외부 에너지의 값이 작아지기 때문에 외부 에너지의 가중치가 작아진다.

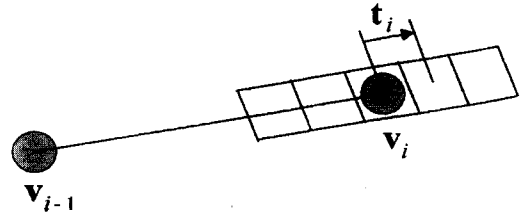


그림 5. 외부 에너지를 구하기 위한 윈도우, $K=2$ 인 경우

Fig. 5. Windows for Calculating the External Energy, example of $K=2$

4) 에너지 최소화 알고리즘^[5]

최소화 알고리즘의 기본 원리는 최소화 과정을 n 개의 독립적인 단계로 나뉘어서 각 단계마다 최소화 과정을 수행한다. 각 단계는 이웃하는 3개의 점들만 고려한다. 이 알고리즘은 에너지가 단조 감소할수록 지역 최소점 (local minimum)에 수렴한다는 것을 보장한다.

최소화 알고리즘이 전역 최소점 (global minimum)에 수렴하기 위해서는 탐색 영역이 충분히 커야 한다. 탐색 영역의 증가는 알고리즘의 복잡도를 증가시키기 때문에, Lai^[5]는 선 탐색 (line search) 방법을 확장한 계층화된 선 탐색 (stratified line search) 방법으로 전역 최소점을 찾았다. 계층화된 선 탐색 방법은 최소화의 초기 단계에서 보통 수행되어 전역 최소점을 포함하는 영역을 빨리 찾고 원래의 선 탐색 방법으로 보다 작은 전역 최소점 영역을 찾는다.

2. Snake의 초기화

초기 매칭 후에 합성개구 레이더 영상과 디지털 지도는 10 화소 이내로 정합 되어 있다고 가정한다. Snake의 초기화는 contour의 각 점들의 위치를 초기화하는 것으로서, 무게 중심의 위치 \mathbf{g} 와 형태 α_i, β_i 값을 초기화하는 것으로 볼 수도 있다.

디지털 지도에서 고속도로만을 뽑아내어 일정한 간격으로 표본화한 점들을 snake 점으로 하는 것으로 초기화를 한다. 여기서 표본화 간격이 중요한데, 너무 크면 실제의 도로를 잘 근사화 하지 못하게 되고, 너무 작으면 전체 contour의 중간 중간에 볼록 튀어나오는 부분이 생기게 된다. 본 실험에서는 표본화 간격을 10으로 선정하였다.

그림 6에 초기 contour를 나타내었다. 디지털 지도

는 보통 래스터(raster) 형태이므로 도로 번호, UTM 좌표 표시선 등이 겹쳐 그려진다. 이로 인해 컬러만을 이용하여 추출할 경우 띄엄띄엄 나타나는 현상 때문에 모든 contour가 10의 간격을 갖는 것은 아니다.

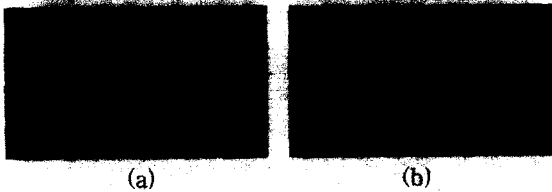


그림 6. 초기화된 Contour
(a) 디지털 지도에서 추출한 도로 (b) (a)를 10의 간격으로 표본화한 초기 contour

Fig. 6. Initialized Snake Contour.
(a) Extracted road from digital map (b) Initial contour sampled from (a) at the every 10 point

3. Snake를 이용한 도로 검출

초기화된 snake의 contour에서 총 에너지 E_{snake} 를 최소화하여 도로를 검출한다. 초기화된 snake는 레이다 영상에서의 도로의 위치와 10 화소 이내에 있다고 가정했기 때문에, snake의 점 v_i 에서 10 거리 내에 있는 화소들의 영역에 대해서 검색한다. 그러나 초기 매칭의 결과가 안 좋을 경우 snake를 이용하는 방법은 실패할 가능성이 매우 높다. 즉, 초기 매칭 결과가 안 좋으면, 한번만 최소화 과정을 수행할 경우 도로의 일부는 검출이 되고 일부는 엉뚱한 곳으로 찾아가게 된다. 이 문제를 해결하기 위하여 E_{snake} 를 최소화한 후, 초기 contour의 무게 중심과 최소화된 후의 contour의 무게 중심을 비교하여 그 차이만큼 초기 contour 전체를 이동시킨 후 에너지 최소화 과정을 되풀이 한다. 초기 contour와 결과 contour의 무게 중심 차이만큼 초기 contour를 이동시켜서 다시 최소화를 시키면 도로가 검출되는 부분이 더욱 많아질 가능성이 커질 것이다. 무게 중심의 차이가 없을 때까지 이 과정을 계속 반복 수행한다. 이 되풀이 과정에서는 검색 범위를 10 화소로 하지 않고 2 화소 범위로 하여 잘못 찾아가게 되는 현상을 줄인다.

4. 도로 검출 시의 문제점

도로 검출 시에 문제가 되는 대표적인 것으로는 첫째, 도로 주위에 도로보다 더 어두운 산란체가 있을 경우와 둘째, 도로 위에 매우 밝은 산란체가 있을 경

우이다. 그림 7에서 이들 경우를 보여주고 있다. 이들 경우에 도로를 정확하게 찾지 못하고 주변의 물체를 찾게 된다. 이런 문제를 완화하기 위하여 snake 점의 외부 에너지 값을 참조하여 일정 문턱값 (threshold) 보다 클 경우 그 점은 도로가 아니라고 판단하고 앞뒤의 도로로 판단된 점들로부터 결정한다. 본 실험에서는 0.5의 문턱값을 설정하여 외부 에너지가 0.5를 넘어서는 경우 2단계 앞뒤의 점을 살펴서 그 점들로부터 내삽하게 된다.

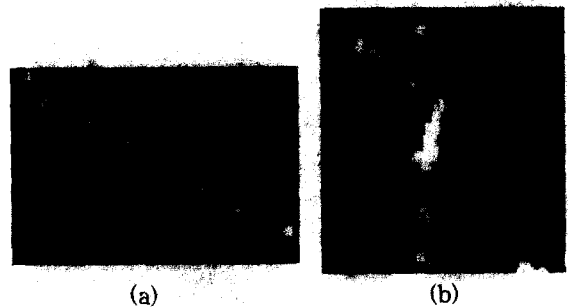


그림 7. 도로 검출 시의 문제점 (+ : 초기 contour, ■ : 최소화 후의 contour)

(a) 어두운 산란체 (b) 밝은 산란체

Fig. 7. Problems in Road Detection. (+ : initial contour, ■ : energy-minimized contour)
(a) Dark scatterers (b) Bright scatterers

IV. 실험 결과

그림 8은 도로 검출 결과를 보여 주고 있다. 모든 영상은 768x768 크기로 지형부호화된 결과에서 도로 부분만을 따로 떼어내어 나타내었다. (a), (c), (e), (g)는 도로 부분의 영상이고 (b), (d), (f), (h)는 결과를 표시한 영상이다. 십자형의 점은 초기 contour를 나타내며 사각형의 점은 검출 결과를 나타낸다. 또한 가운데가 빈 사각형의 점은 외부 에너지가 문턱값을 넘어선 snake 점을 나타낸다.

(b)에서 사각형은 밝은 산란체가 도로 위에 있는 경우이다. 그림 7의 (b)와 비교하면, 외부 에너지가 문턱값을 넘어선 주위의 점들로부터 도로의 위치를 내삽했을 때, 도로 검출 에러를 줄인다는 것을 알 수 있다. (b)의 중간 부분에 검출이 잘못된 부분이 보이는데, 그 부분에서는 육안으로 간신히 도로가 식별될 정도이다. (d)와 (f) 영상은 전체적으로 도로가 뚜렷하여 검출이 매우 잘 되었다. (d) 영상의 사각형은 도로 주변에 도로보다 어두운 산란체가 있는 경우로서 그림 7의

(a) 영상과 같은 부분이다. (h)의 화살표 표시 부분은 도로 검출이 잘못 되었는데, snake와 레이더 영상에서의 도로가 10 화소 이상 떨어져 있어서 검출하지 못하는 경우이다. 이런 부분 외에는 매우 정확하게 도로가 찾아졌음을 볼 수 있다.

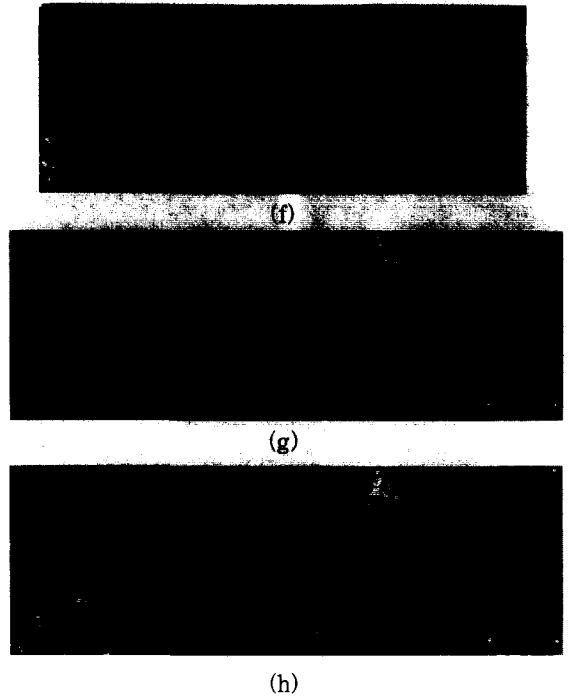
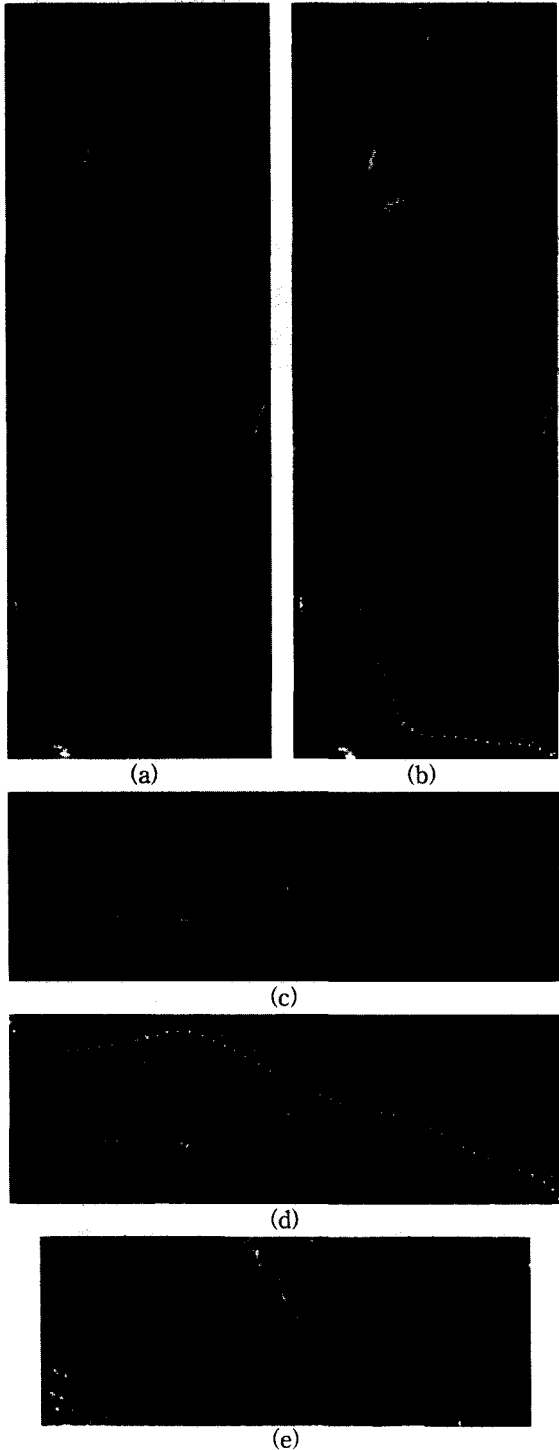


그림 8. 도로 검출 결과 (+ : 초기 contour, ■ : 최소화 후의 contour (Eext<0.5), □ : 최소화 후의 contour (Eext>0.5))
 (a) 천안시 동쪽 (b) (a)의 결과(사각형 : 밝은 산란체) (c) 천안시 남동쪽 ((a)의 연속된 도로) (d) (c)의 결과 (사각형 : 어두운 산란체) (e) 대청호 및 대전 (f) (e)의 결과 (g) 논산 부근 (h) (g)의 결과 (화살표 : 도로가 10 화소 범위에 들어오지 않을 때)

Fig. 8. Results of Road Detection.(+ : initial contour, ■ : energy-minimized contour (Eext<0.5), □ : energy-minimized contour (Eext>0.5))
 (a) East of Chonan (b) Result of (a) (quadrangle: bright scatterers) (c) Southeast of Chonan (road continued from (a)) (d) Result of (c) (quadrangle : dark scatterers) (e) Taechungho and Taejeon (f) Result of (e) (g) The region around Nonsan (h) Result of (g) (Arrow : when the road is not in the 10 pixel range)

표 1에 도로 검출에 대한 에러를 나타내었다. 에러는 검출 결과와 눈으로 길을 찾은 결과를 비교하였다. 외부 에너지의 문턱값을 0.5로 설정하여 이 문턱값을 넘지 않을 때 도로를 올바르게 검출했다고 판단한다. 본 실험에서는 정확하게 도로를 검출하는 경우가 80% 이상이고 에러가 있는 경우라도 대부분 2~3 화소 이내

이다. 단지 앞에서 설명한 두 가지 문제점 때문에 몇 개의 점이 5 화소 이상의 에러가 있어서 평균값이 커진다. 외부 에너지가 문턱값 0.5를 넘어서 도로 검출이 불확실하다고 판단하는 경우에도 에러가 있을 경우 4~5 화소 정도이다. 전체 평균 에러는 모든 영상에 대하여 1 화소 이내에 들어오기 때문에 다른 영상과 정합을 하고자 할 때에도 1 화소 이내의 정확도를 갖고 할 수 있다.

참 고 문 헌

표 1. 도로 검출 에러 분석
Table 1. Error Analysis for Road Detection.

영 상	(a)		(c)		(e)		(g)	
문턱값 = 0.5	$E_{er}<0.5$	$E_{er}>0.5$	$E_{er}<0.5$	$E_{er}>0.5$	$E_{er}<0.5$	$E_{er}>0.5$	$E_{er}<0.5$	$E_{er}>0.5$
점 개수	60	10	48	0	50	7	37	16
도로를 정확히 찾은 점 개수	53	4	41	0	41	4	37	10
에러가 있는 점 개수	7	6	7	0	9	3	0	6
검출율 (%)	88.3	40	85.4	-	82.0	57.1	100.0	62.5
에러가 있는 점의 평균 에러 (pixel)	4.286	5.333	2.714	-	2.667	2.333	-	8.333
전체 평균 에러 (pixel)	0.886		0.396		0.544		0.943	

V. 결 론

본 논문에서는 위성 탑재 합성개구 레이더에서 능동 contour 모델인 snake를 이용하여 도로를 검출하는 기법을 제시하였다. 레이더 영상에서 도로는 어렵게 나타나는 특징과 contour형태로 나타나는 특징을 이용하여 외부 에너지를 정의하고, 초기 contour의 위치와 형태는 이미 제작되어 있는 디지털 지도를 이용하여 초기화하였다. 위치의 초기화는 초기 매칭 단계에서 수행하고, 형태는 디지털 지도의 도로 부분만을 추출하여 표본화함으로써 초기화 하였다. 지형물에 가려져서 보이지 않는 도로 부분은 수동 작업을 통하여 해결하고 보이는 부분에서만 snake를 적용하여 도로를 검출하였다. 전체 평균 에러를 1 화소 이내의 정확도로 검출하였고 특히 도로가 뚜렷한 부분은 매우 정확하게 도로를 검출한다.

[1] R. T. Antony, "Database Support to Data Fusion Automation," *Proc. IEEE*, Vol. 85, No.1, pp. 39-53, Jan. 1997.

[2] J. C. Curlander, "Location of Spaceborne SAR Imagery," *IEEE Trans. Geosci. and Rem. Sens.*, Vol. 20, No. 3, pp. 359-364, Jul. 1982.

[3] J. C. Curlander, "A Post-processing System for Automated Rectification and Registration of Spaceborne SAR Imagery," *Int. J. Rem. Sens.*, Vol. 8, No. 4, pp. 612-638, Aug. 1986.

[4] M. Kass, A. Witkin, and D. Terzopoulos, "Snakes: Active Contour Models," *Int. J. Computer Vision*, Vol.1, pp. 321-331, 1988.

[5] K. F. Lai, "Deformable Contours: Modeling, Extraction, Detection and Classification," Ph. D Dissertation, Univ. of Wisconsin-Madison, 1994.

[6] J. Lee, "A Simple Speckle Smoothing Algorithm for Synthetic Aperture Radar Images," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, Vol 13, No. 1, pp 85-89, Jan./Feb. 1983.

[7] J. Lee, and I. Jurkevich, "Coastline Detection and Tracing in SAR Images," *IEEE Trans. Geosci. and Rem. Sens.*, Vol. 28, No. 4, pp. 662-668, July 1990.

[8] H. Li, B. S. Manjunath, and S. K. Mitra, "A Contour-Based Approach to Multisensor Image Registration," *IEEE Trans. Image Proc.*, Vol. 4, No. 3, pp. 320-334, Mar. 1995.

[9] D. C. Mason, and I. J. Davenport, "Accurate and Efficient Determination of the Shoreline in ERS-1 SAR Images," *IEEE Trans. Geosci. and Rem. Sens.*, Vol. 34, No. 5, pp. 1243-1253, Sept. 1996.

[10] *Special Issue on Data Fusion, Proc. IEEE*, Vol. 85, No.1, pp. 1-208, Jan. 1997.

[11] R. Touzi, A. Lopes, and P. Bousquet, "A Statistical and Geometrical Edge Detector for SAR Images," *IEEE Trans. Geosci. and Rem. Sens.*, Vol. 26, No. 6, pp. 764-772, Nov. 1988.

저 자 소 개



全 聖 民(正會員)

1974년 2월 3일생으로 1996년 포항공과대학교 전자전기공학사, 1998년 포항공과대학교 전자전기공학 석사학위를 받았다. 현재 고등 기술연구원(IAE)에 근무하고 있고, 주된 관심 분야는 합성개구 레이더 신호 처리, 영상 처리 및 컴퓨터 시각, 통계 신호 처리 분야, 그리고 GPS 및 ITS(Intelligent Transportation System) 응용 등이다.



洪 起 祥(正會員)

1977년 서울 대학교 전자공학사, 1979년 한국 과학 기술원 전기 및 전자공학 석사 학위를 받았으며 1984년 한국 과학 기술원 전기 및 전자 공학 박사학위를 받았다. 1984년에서 1986년까지 한국 에너지 연구소 선임연구원으로 근무하였고, 1986년에 포항공과대학교 교수로 부임하여 현재 부교수로 재직중이다. 1988년에서 1989까지는 Carnegie Mellon 대학교 방문교수로 있었다. 주된 연구 분야는 합성개구 레이더 영상처리, 영상 처리 및 컴퓨터 시각, 가상 현실, 패턴 인식 등이다.