論文95-32A-8-2

거리 영상의 에지 추출 및 영역화에 관한 연구

(A Study on the Edge Extraction and Segmentation of Range Images)

李 吉 茂 *, 朴 來 弘 **, 崔 宗 秀 ***

(Kil Moo Lee, Rae-Hong Park, and Jong Soo Choi)

요 약

본 논문에서는 거리영상의 에지 추출 및 영역화에 관하여 고찰하였다. 먼저 기존의 영역기반 영역화와 주곡률을 이용한 에지기반 영역화의 문제점을 언급하고 새로운 에지기반 영역화 기법을 제안하였다. 제안한 방법은 가우시안 필터와 directional derivative를 이용하여 미분을 수행하고 에지를 추출하여 그 에지를 기반으로 거리 영상을 영역화하였다. 또한 기존의 문턱값 설정의 문제점을 제시하고 새로운 문턱값 설정 기법을 제안하였다. Step 에지 부근에서의 1차 및 2차 미분의 극점들에 대한 통합 문제를 해결하기 위해 roof 에지를 중심으로 거리 영상을 영역화한 후 step 에지영역을 메워 세선화를 수행하였다. 몇 개의 거리 영상에 대한 모의 실험을 통해 제안한 방법의 성능이 기존의 방법보다 우수함을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we investigate edge extraction and segmentation of range images. We first discuss problems that arise in the conventional region-based segmentation methods and edge-based ones using principal curvatures, then we propose an edge-based algorithm. In the proposed algorithm, we extract edge contours by using the Gaussian filter and directional derivatives, and segment a range image based on extracted edge contours. Also we present the problem that arises in the conventional thresholding, then we propose a new threshold selection method. To solve the problem that local maxima of the first- and second-order derivatives gather near step edges, we first find closed roof edge contours, fill the step edge region, and finally thin edge boundaries. Computer simulations with several range images show that the proposed method yields better performance than the conventional one.

*準會員, **正會員, 西江大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Sogang Univ.)
***正會員, 中央大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., ChungAng Univ.)

※ 본 연구는 제어계측 신기술연구센터 (ERC)의 연구비 지원에 의해 이루어졌음
接受日字:1995年1月5日, 수정완료일:1995年7月15日

I. 서 론

거리영상이란 3차원 물체의 표면에서 미리 정해진 기준면까지의 수직 거리로 화소값이 구성된 2차원 영상을 말한다. 거리영상은 명암영상과는 달리 광원의 위치나 밝기 및 물체의 반사 성질에 관계없이 3차원 물체의 기하학적인 성질을 직접적으로 제공하는 장점을 가지고 있다. 명암영상을 이용한 3차원 물체 인식에서

발생할 수 있는 문제점 또한 거리영상을 이용하여 해결할 수 있다.

거리영상내의 3차원 물체를 인식하기 위한 작업은 우선 거리영상을 의미있는 영역들로 분할하는 것이다. 의미있는 영역이란 한 영역내의 화소값들이 어떤 특징에 대하여 균일한 값을 갖는 것을 의미한다. 예로, 명암영상의 경우 한 영역내의 화소값들의 분산이 주어진 문턱값보다 작다는 것을 의미한다. 거리영상의 경우에는 화소값이 명암도가 아닌 거리값이므로 하나의 1차 평면 또는 2차 곡면으로 근사화가 가능한 지역을 의미있는 영역이라 할 수 있다.

거리영상의 분할 기법은 영역기반 영역화 기법과 에지기반 영역화 기법으로 나눌 수 있다. 영역기반 영역화는 영상내의 균일한 특성을 갖는 화소들을 묶어 나가는 기법으로 Besl[1]이 제안한 가우시안 곡률과 평균 곡률을 이용한 곡면 분류 및 영역화가 대표적인 방법이다. 이밖에도 가우시안 곡률과 평균 곡률의 히스토그램을 이용하여 곡면을 분류하는 기법,[2] 근사화 윈도우를 이동시켜 곡면을 선택적으로 근사화하는 기법,[3] 미분 기하학에서 전개되는 곡률 계산을 한 단계씩 가상적으로 계산함으로써 정확한 곡률 계산을 시도한 기법[4] 등이 있다. Besl의 방법에서 드러난 문제점으로는 미분 연산의 잡음 증폭과 그 증폭을 억제하기 위해 사용된 평활화에 의한 에지 blurring이 있다. 이에 반하여 에지 기반 영역화는 영상내의 불연속점들을 추출하여 그것을 각 영역의 경계선으로 사용하는 기법으로 Fan 등[5]이 제안한 주곡률을 이용한 경계선 검출 및 영역화가 대표적이고 Deriche[6]의 필터를 확장하여 에지를 추출한 기법[7] 등이 있다. 에지기반 영역화에서는 기존의 명암영상의 에지 추출에서처럼 추출된 에지의 신호대 잡음비와 위치라는 두개의 상충된 문제가 발생하며 에지를 보존하면서 미분 연산으로 인한 잡음 증폭을 막는 기법이 필요하다.

미분 연산의 잡음 증폭과 에지 blurring을 해결하기 위해 많은 연구가 진행되었는데, 이러한 연구에는 anisotropic diffusion을 이용한 불연속 보존 평활화 기법,[8-12] 정규화 (regularization)를 이용한 곡면 복원 (surface reconstruction),[13-17] robust 통계학을 이용한 곡면 근사화[18-20] 등이 있다. 이러한 연구들은 대부분 외형적으로는 에지를 고려한 곡면 근사화의 형태를 띠고 있지만 실제로 알고리즘상에 부가적인 에지 추출 단계가 있으며 전체 알고리즘은 복잡한 구조를 가지고 있기 때문에 기존의 에지 추출 알고리즘에 비해 에지 추출 성능이 떨어지면서 계산량이 증가하는 문제점을 가지고 있다. 따라서 에지 추출만을 목적으로 하는 기법보다 좋은 특성을 나타내지 못하고 있다.

본 논문에서는 영역 기반 영역화의 문제점을 극복하고자 에지 기반 영역화를 제안하였다. 에지 기반 영역화는 영상내의 모든 점에 대해 정확한 곡면 특징의 추출이 필요하지 않을 뿐더러, 경계선의 형성이 영역 기반에 비해 정확하고 직접적이라는 장점이 있다. 또한 본 논문에서는 곡률보다 계산과정이 간단하고 잡음에 덜 민감한 미분값을 이용하였다. 즉 미분값 추출은 가우시안 필터와 directional derivatives를 이용하여 거리 영상 미분시 발생하는 잡음 증폭을 최소화하였다. 또한 본 논문에서는 기존의 문턱값 설정 방법의 문제점을 제시하고 새로운 문턱값 설정 방법을 제안하였으며, step 에지 부근에서의 1차 및 2차 미분의 극점들을 통합하기 위해 우선 roof 에지를 중심으로 거리 영상을 영역화한 후 step 에지가 존재한다고 판정되는 영역을 메워 세선화를 수행함으로써 최종적인 영역화를 수행하였다. 마지막으로 여러 거리 영상에 대한 모의실험을 통해 제안한 방법의 성능이 기존의 방법에 비해 우수함을 확인하였다.

본 논문의 Ⅱ장에서는 기존의 거리영상 영역화 알고리즘에 대해, Ⅲ장에서는 제안한 에지기반 거리영상 영역화 알고리즘에 대해 서술하고, Ⅳ장에서는 모의실험 결과를 보였으며 마지막으로 Ⅴ장에서 결론을 맺었다.

Ⅱ. 기존의 거리 영상 영역화 방법

본 장에서는 기존의 거리 영상 영역화 방법중 가우시안 곡률 (Gaussian curvature)과 평균 곡률 (mean curvature)을 이용한 Besl의 영역기반 영역화와 주곡률 (principal curvature)을 이용한 Fan 등의 에지기반 영역화에 대해 고찰하고 이들 방법의 문제점에 대해 논한다.

1. Besl의 영역기반 영역화 방법[1]

Besl이 제안한 영역기반 영역화 기법은 미분 기하학[21]을 기본 이론으로, 가우시안 곡률과 평균 곡률의 부호에 따라 곡면을 peak, flat, ridge, saddle, pit, valley, saddle valley, minimal surface 등 8가지

로 분류하고 있다.[22] 식 (1)은 Besl이 이용한 가우시안 곡률 K와 평균 곡률 H를 나타내고 있다.

$$K = \frac{f_{uu} f_{vv} - f_{uv}^2}{(1 + f_u^2 + f_v^2)^2}$$

$$H = \frac{1}{2} \frac{(1+f_v^2) f_{uu} + (1+f_u^2) f_{vv} - 2 f_u f_v f_{uv}}{(1 + f_u^2 + f_v^2)^{3/2}} \qquad (1)$$

여기서 f_u, f_v, f_{uu}, f_{vv}, f_{uv}는 3차원 공간상의 곡면 f의 변수 u, v에 대한 편미분값들이다.

각 화소점의 국부적인 곡면 근사화를 통해 미분값을 구하고 이로부터 가우시안 곡률과 평균 곡률을 계산한다. 계산된 곡률값으로 각 화소점의 곡면 특징을 할당한 후 같은 곡면 특징을 갖는 화소들을 모아 1차 영역화를 수행한다. 이후 분리된 영역들을 축소하여 씨앗 영역으로 설정하고 각 영역에 대해 variable order surface fitting[23]에 근거한 영역 성장법을 수행하여 에지 근처의 영역들을 제거하고 각 영역의 경계선 개선 및 영상 복원을 수행한다.

Besl의 알고리즘은 두드러진 경계가 존재하지 않는 매끄럽게 연결된 물체의 분할에 아주 좋은 성능을 나타낸다. 그러나 두드러진 경계가 존재하는 영상에 대해선 그렇지 못하다. 이 알고리즘은 영역 기반 영역화이지만 실제로는 에지 부근의 영역분리가 전체 영역화에 주된 역할을 하고 있다. 즉 에지 부근의 ridge, valley 특성이 영역화의 주된 경계선으로 사용되고 있다. 또한 하나의 영역으로 구성될 지역이 균일한 분류 특성을 갖지 못할 경우 여러 개의 영역으로 분리될 수 있으며 인접 영역에 잘못 연결되기도 한다. 결국 에지 기반 영역화에 비해 경계 부근이 지나치게 확장되는 문제점을 해결하기 위해 마스크의 크기를 작게 해야 하고, 반면 하나의 영역에 한 가지의 곡면 특성만이 할당되게 하기 위해서는 마스크의 크기를 크게 해야 하는 상충된 두 가지 문제가 있다. 또한 영역 성장에 있어서 영역을 한번 확대할 때마다 배경의 경우 전체 화소 수의 반 정도를 근사화해야 하므로 많은 계산량이 필요하다. Besl의 알고리즘은 복잡한 구조를 가지고 있기 때문에 계산 시간이 많이 걸리며 알고리즘상에서 설정해야 할 파라메타가 많고 파라메타 설정에 따른 결과 영상의 성능차가 큰 단점이 있다.

그림 1은 Besl의 알고리즘으로 실제 거리 영상을 영역화한 결과이다. 그림 1(a)는 실제 거리 영상이다. 그림 1(b)와 1(c)는 각각 가우시안 곡률과 평균 곡률의 부호로서 각 화소의 곡면 특징을 나타낸 결과이며 양수를 흰색, 음수를 검정색, 영을 회색으로 나타내었다. 이로부터 영역내의 잘못된 곡면 특징의 발생 및 에지 부근에서 평활화에 의한 에지영역 확대를 확인할 수 있다. 그림 1(d)는 그림 1(b)와 1(c)를 통합하여 1차 영역화를 이룬 결과이며 위에서 언급했듯이 평활화에 의한 영상 왜곡이 나타나고 있다. 특히 왼쪽 상단 다각형의 양쪽 두 면의 영역들 (화살표로 표시된 영역들)이 작아져 이후 후처리에서 무시될 우려가 있다. 그림 1(e)는 variable order surface fitting을 통한 영역 성장의 결과이며 영역간의 경계선 부근에 영역 할당이 되지 못한 점들이 있음을 확인할 수 있다. 그림 1(f)는 근사화 오차의 문턱값을 증가시켜 영역 할당이 이루어지지 못한 화소점들을 가까운 영역으로 할당한 최종 결과로 올바른 영역할당이 이루어졌음을 확인할 수 있다. 그러나 위에서도 언급했듯이 최종 결과를 얻기 위해 여러 단계를 거쳐야 하고 계산량이 많으며 파라메타 설정에 어려움이 있다.

2. Fan 등의 에지기반 영역화 방법[5]

Fan 등은 주곡률을 이용한 거리 영상의 에지 검출

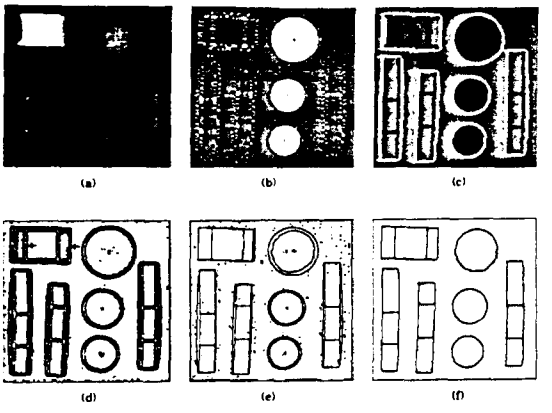

그림 1. Besl 방법의 실험 결과
(a) 입력 거리영상 (b) Gaussian 곡률
(c) mean 곡률 (d) 1차 영역화 결과
(e) 2차 영역화 결과 (f) 최종 영역화 결과

Fig. 1. Simulation results of Besl's method.
(a) input range image,
(b) Gaussian curvature,
(c) mean curvature,
(d) 1st segmentation result,
(e) 2nd segmentation result,
(f) final segmentation result.

을 제안하였다. 가우시안 필터링후 finite difference를 이용하여 0도, 45도, 90도, 135도에 대한 법선 곡률 (normal curvature)을 구한다. 구해진 4방향의 법선 곡률을 이용하여 주곡률을 구하고 그 주곡률의 분포를 조사하여 에지를 추출한다. 에지 추출 이후에는 heuristic한 후처리 단계를 거쳐 최종적으로 거리 영상을 영역화한다. 식 (2)는 Fan 등이 4개의 법선 곡률로 최대 주곡률을 계산하는데 이용한 Euler 법칙이다.

$$k_\theta = k_1 \cos^2\theta + k_2 \sin^2\theta \qquad (2)$$

여기서 k_1, k_2는 각각 구하고자 하는 최대 주곡률과 최소 주곡률이고, k_θ는 θ방향 (0도, 45도, 90도, 135도)으로의 법선 곡률을 나타낸다.

Fan 등에 의한 에지 분류는 step 에지 부근에서 주곡률이 영교차를 이루고 양쪽 주변에 부호가 서로 다른 극점들이 존재하며, roof 에지 부근에선 극점이 존재한다는 사실을 이용하고 있다. Step 에지 검출을 위한 주변 화소에서의 극점 검출은 검출 마스크의 중심 화소에 대한 극점의 검출과는 달리 검출 마스크상의 극점의 위치를 미리 알지 못하므로 부수적인 변수 및 제한조건을 요구한다. 주곡률은 가우시안 곡률과 평균 곡률처럼 카메라 위치에 불변인 특성을 가지고 있다. 따라서 단순한 미분 연산에 의한 에지 추출보다 신호대 잡음비 특성이 향상된다. 그러나 주곡률 계산시 포함되는 1차 미분항이 2차 미분 필터보다 대역폭이 큰 1차 미분 필터로 추출되므로 2차 미분만으로의 에지 추출에 비해 에지 위치 면에서 성능이 떨어지게 된다. Step 에지에 의한 곡률의 영교차 발생 지역은 최대 곡률의 방향이 명확하지 않은 평면 부분이므로 영교차 발생 방향의 추출이 어렵고 따라서 step 에지 추출이 어렵다. 또한 step 에지와 roof 에지를 개별적으로 추출하여 통합하기 때문에 step 에지와 roof 에지의 위치가 정확하게 일치하지 않을 경우 잘못된 영역화가 이루어질 우려가 있다.

그림 2는 그림 1(a)를 입력으로 사용하여 Fan 등의 방법으로 에지를 추출한 결과이다. 그림 2(a)는 최대 주곡률에 절대값을 취한 영상으로 흰 부분이 큰 값을, 검은 부분이 작은 값을 나타낸다. 그림 2(b)는 주곡률 영상에서 영교차점을, 그림 2(c)는 극점을 추출한 결과이다. 그림 2(b)에서 관찰할 수 있듯이 영교차가 정확한 step 에지의 위치를 나타내지 못하고 있다.

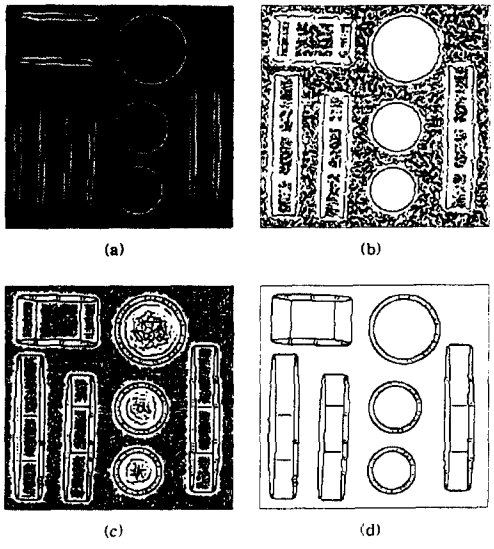

그림 2. Fan 등의 방법의 실험 결과
(a) 최대 주곡률 영상 (b) 영교차 영상
(c) 극점 영상 (d) 문턱값 설정된 극점 영상

Fig. 2. Simulation results of Fan et al.'s method.
(a) maximum principal curvature image,
(b) zero-crossing image,
(c) extrema image,
(d) thresholded extrema image.

그림 2(d)는 그림 2(c)를 문턱값 설정한 결과로서 하나의 문턱값만으로도 기울기가 급격한 면에서 높은 신호대 잡음비를 나타내지만, step 에지부근에서 roof 에지의 간격이 벌어지는 단점이 있다.

Ⅲ. 제안한 에지 기반 거리 영상 영역화 방법

일반적으로 거리 영상내에는 두가지 형태의 불연속이 존재한다. 하나는 신호 자체의 불연속이고 다른 하나는 인접한 두 면이 형성하는 방향간의 불연속이다. 본 논문에서는 첫번째 불연속을 step 에지, 두번째 불연속을 roof 에지라고 구분하였다. 본 장에서는 본 논문에서 제안한 에지기반 거리영상 영역화 즉 가우시안 필터와 directional derivative를 이용한 에지 추출, 새로운 문턱값 설정 및 step 에지와 roof 에지의 통합 문제 등을 논한다.

1. 가우시안 필터링

Step 에지와 roof 에지는 미분을 취함으로써 검출 가능한데 1차 미분에서 step 에지는 극점을, roof 에지는 불연속을 형성하게 되고, 2차 미분의 경우 step 에지는 주변에 부호가 서로 다른 두 극점을 가지는 영교차를, roof 에지의 경우 극점을 형성하게 된다. 미분연산은 원신호에 첨가된 잡음을 증폭시킨다. 즉 고주파 성분을 갖는 잡음의 경우 미분연산 후의 신호대 잡음비가 연산전보다 나빠진다. 따라서 연산 이전에 원신호에 첨가된 고주파 성분의 제거가 필수적이다. 이것은 원신호의 주파수 대역을 제한하는 것과 같은 의미로 보통 저대역 필터링을 수행하게 된다.

Canny[24]는 신호의 불연속을 검출하기 위해 신호대 잡음비, location, no multiple response라는 3가지 판단기준을 설정하고 그것을 만족하는 최적의 필터를 수학적 최적화를 통해 유도하였다. 그가 유도한 필터는 근사적으로 가우시안을 1차 미분한 형태이다. Torre와 Poggio[25]는 미분연산이 불량설정되어 있음을 제시하면서, 정규화를 이용하여 최적화 필터를 제안하였다. 그들이 제안한 필터 또한 Canny의 경우와 마찬가지로 가우시안을 1차 미분한 형태이다. Marr과 Hildreth[26]는 가우시안이 시간축과 주파수축의 대역폭을 작게 하는 최적함수임을 강조하였다. 따라서 본 논문에서는 미분연산의 잡음증폭 특성 또는 불량설정성을 극복하고자 식 (3)과 같은 가우시안 함수를 필터링에 사용하였다.

$$G(x,y) = \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right) \tag{3}$$

여기서 σ는 가우시안 함수의 표준편차를 나타내며 영상의 잡음 분포에 따라 그 값을 실험적으로 결정한다. 즉 잡음이 많은 영상일수록 σ를 크게 한다. 가우시안 필터링후 미분 연산을 수행하는데 거리 영상은 명암영상과 마찬가지로 이산신호이므로 유한차 (finite difference)를 이용하여 미분연산을 수행한다.

2. Directional derivatives

1차원 신호에서의 에지와는 달리 2차원 영상의 경우, 에지는 크기와 더불어 방향을 가지고 있다. 미리 에지의 방향을 안다면, 그 방향에 수직인 방향으로 필터링하는 것이 올바른 결과를 가져올 것이다. 그러나 일반적으로 에지의 방향은 측정해야 할 대상이지 미리 알려진 지식이 아니다. 필터링 이전에 에지 방향에 대한 측정이 수행되어야 한다. 에지 방향 측정에는 여러 방향의 필터를 구성하여 필터링을 수행하고 크기가 최대가 되는 방향을 선택하는 방법이 있다. 그러나 이 방법은 계산량이 많고 필터의 갯수에 따라 방향의 정밀도가 결정되는 문제점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 에지의 크기 및 방향 측정을 directional derivative을 통해 측정하고자 한다. Directional derivative는 두개의 기본축에 대한 필터링만으로 모든 연속적인 방향에 대한 미분값을 구할 수 있는 방법으로서 1차 미분의 경우 2개의 필터로, 2차 미분의 경우 3개의 필터만으로 모든 방향으로의 미분값을 측정할 수 있다.[27]

Directional derivative는 2차원 곡면상에서의 각 점에서 미분이 최대가 되는 방향을 알아내고 그 방향으로의 미분값을 추출하는데 사용된다. 영상을 매끄러운 2차 곡면이라고 가정하자. 영상을 이루는 두 좌표축을 열방향과 행방향으로 설정할 때, 열방향의 축과 θ_1만큼 각을 이루는 방향으로의 1차 미분과, θ_2만큼 각을 이루는 방향으로의 2차 미분은 식 (4)와 (5)로 나타낼 수 있다.

$$f_{\theta_1}' = f_c\cos\theta_1 + f_r\sin\theta_1 \tag{4}$$

$$f_{\theta_2}'' = f_{cc}\cos^2\theta_2 + 2f_{rc}\sin\theta_2\cos\theta_2 + f_{rr}\sin^2\theta_2 \tag{5}$$

여기서 f_r, f_c, f_{rr}, f_{cc}, f_{rc}는 각각 행과 열방향으로의 편미분이다.

모든 θ_1, θ_2중에서 미분값의 크기가 최대가 되는 방향을 찾기 위해, 식 (4)와 (5)를 θ_1, θ_2로 각각 편미분하여 0으로 놓으면 식 (6)와 식 (7)을 얻는다.

$$\frac{df_{\theta_1}'}{d\theta_1} = -f_c\sin\theta_1 + f_r\cos\theta_1 = 0 \tag{6}$$

$$\frac{df_{\theta_2}''}{d\theta_2} = (f_{rr}-f_{cc})\sin 2\theta_2 + 2f_{rc}\cos 2\theta_2 = 0 \tag{7}$$

위의 식을 정리하면 각 θ_1, θ_2에 대한 해를 식 (8)과 식 (9)으로 구할 수 있다. 이들을 이용하여 에지의 방향을 측정한 후 다시 식 (4)과 식 (5)를 이용하여 에지의 크기를 구한다.

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{f_r}{f_c}\right) \tag{8}$$

$$\theta_2 = \frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{-2f_{rc}}{f_{rr}-f_{cc}}\right) \tag{9}$$

3. 극점 검출 및 문턱값 설정

이론상 기울기가 심하지 않은 곡면상에 존재하는 에지는 작은 주변값과 현저히 구별되는 극점을 형성한다. 그러나 실제로는 저대역 필터링으로 미분값이 급격히 변하지 않아 극점 부근에 크기가 극점과 비슷한 값들이 많이 존재하므로 단순한 문턱값 설정은 두꺼운 에지 라인을 형성한다. 따라서 필터링한 후 국부 극점의 검출을 수행한다. 국부 극점의 검출은 위에서 구한 에지 방향에 수직 방향으로 중심화소를 인접한 두 화소와 비교함으로써 이루어지는데 실제로는 이산영상임을 고려하여 0도, 45도, 90도, 135도에 대한 조사만을 수행한다.

국부 극점은 에지의 크기와 무관하게 형성되어 있으므로 국부 극점의 검출만으로는 잡음에 의해 형성된 에지의 제거가 어렵다. 따라서 잡음에 의해 형성된 에지의 크기는 문턱값보다 작다는 가정하에 에지 크기에 대한 제한조건으로 문턱값을 설정한다. 기울기가 큰 지역은 2차 미분후 잡음에 의한 국부 극점들이 문턱값보다 큰 크기를 가지므로 본 연구에서는 이러한 잡음에 의해 잘못 검출되는 에지의 제거를 위해 일반적인 식 (10)[7] 이외에 식 (11)을 첨가하여 사용하였다.

$$|f''| > \alpha \tag{10}$$

$$\frac{|f'|}{|f''|} < \beta \tag{11}$$

식 (10)은 에지 크기 자체를 제한하여 기울기가 작은 배경 부분의 잘못된 에지를 제거하는 역할을 하며, 식 (11)은 곡면의 기울기에 비례하게 문턱값을 증가시켜 기울기가 큰 지역의 잘못된 에지를 제거하는 역할을 한다. 문턱값 설정의 영향을 살펴보면, α값이 커질수록 크기가 큰 잘못된 에지와 함께 크기가 작은 의미있는 에지가 손실되는 반면, 그 값이 작아질수록 크기가 작은 의미있는 에지와 크기가 큰 잘못된 에지가 추출된다. 또한 β값이 작아짐에 따라 기울기가 큰 부분의 잘못된 에지들이 우선적으로 제거되며, 아주 작아지면 기울기가 작은 부분의 에지만 남게 된다. 문턱값 설정은 2차 미분에만 적용하며 1차 미분은 문턱값 설정없이 이후 step 에지영역 추출 과정에 이용된다.

4. 에지 연결과 영역화

문턱값에 의해 선택된 에지들은 4 방향으로 연결되어 있으므로 연결성 조사를 위하여 8-연결성 세선화를 수행한다. 연결성은 주변의 인접 화소 8개를 시계 반대 방향으로 지나면서 흑백 화소가 바뀌는 횟수를 세어 결정한다. 각 화소는 조사된 횟수가 0인 화소를 고립점, 2인 화소를 끝점, 4인 화소를 연결점, 6인 화소를 분기점, 8인 화소를 교차점으로 분류한다. 연결성을 조사한 이후에는 잡음에 의해 잘못 형성된 끝점들의 제거를 위해 각 끝점에 대해 분기점까지 또는 다른 끝점까지의 거리를 조사하여 미리 정해진 길이보다 짧은 선분들은 잡음에 의해 형성된 선분들이라 판단하고 제거하고 나머지 끝점들에 대하여 에지 성장을 수행한다. 에지 성장은 Davignon[28]이 사용한 에지 성장 마스크를 수정하여 사용하였다. 에지의 성장 방향과 인접 화소의 미분값의 크기를 이용하여 이전 에지의 위치에 반대쪽 화소 3개를 후보점 중 미분값이 가장 큰 화소를 선택하여 다른 에지를 만날 때까지 성장을 반복한다. 이때 사용되는 미분값은 에지 성장방향에 따라 새롭게 계산된 미분값을 이용한다. 즉 3개의 후보점에 대해 각각 에지성장 방향에 수직인 방향으로 미분값을 다시 계산하여 그 중 가장 큰 값을 갖는 후보점을 다음 에지점으로 선택한다. 미분값을 다시 계산하여 에지 성장을 수행하는 이유는 directional derivative의 사용으로 미분값이 최대가 되는 방향으로만 미분이 계산되어 step 에지와 수직으로 만나는 roof 에지의 미분값이 step 에지가 양쪽에 형성하는 극점의 방향으로 잘못 계산되기 때문이다.

일단 모든 에지가 폐곡선을 이루었다는 가정하에 영역화를 수행한다. 번호할당 (labeling)은 Haralick[29]이 제안한 반복적 번호할당 알고리즘을 사용하였다. 이 알고리즘은 초기화, 상단에서 하단으로의 영역번호 전파와 하단에서 상단으로의 영역번호 전파의 세가지 단계로 이루어지며, 초기화 단계에서 할당된 인접 화소의 번호중 가장 작은 번호를 중심화소에 할당함으로써 영역번호 전파를 수행한다. 또한 같은 번호를 계속 찾아가는 것이 아니라 두번째, 세번째 단계를 반복하여 각 화소에 영역번호를 할당한다.

Step 에지는 1차, 2차 미분에서 모두 극점들을 형성하게 된다. 따라서 국부 극점을 이용한 에지 검출을 수행할 경우 step 에지에 대한 1차, 2차 미분의 극점 통합 문제가 발생하게 된다. 본 논문에서는 step 에지에서의 극점들의 통합을 위해 우선 2차 미분 연산으로 형성된 roof 에지라인을 영역화한 후 step 에지가 존재한다고 판정되는 영역을 제거하는 기법을 사용하였

다. 각 영역의 면적에 대한 1차 미분의 극점이 차지하는 면적의 비, 즉 1차 미분의 극점의 영역점유비율을 계산하여 문턱값보다 크면 step 에지 영역으로 생각한다. 만일 영역내의 각 화소의 1차 미분의 평균값을 이용한다면 기울기가 작은 step 에지 영역들을 추출하기 위해 기울기가 큰 의미있는 영역들의 추출을 포기해야 한다. 영역내의 1차 미분의 극점들의 영역점유비율을 이용함으로써, 대부분의 step 에지 영역은 좁은 폭을 이루는 긴 영역이며 그 영역내에 1차 미분의 극점들이 발생함을 이용할 수 있다. 또한 영역의 크기가 미리 정해진 크기보다 작을 경우 잡음에 의해 잘못 형성된 영역으로 간주하여 제거한다. 영역제거는 제거할 영역을 모두 메운 후 전체 영상을 세선화하여 완료한다. 세선화는 제거되야 할 영역에 대한 인접 영역으로의 병합 문제를 해결할 수 있으며, step 영역의 경우 두개의 2차 미분의 극점들 사이로 1차 미분의 극점들이 중심축을 이루며 구성된다는 사실과 일치하는 결과를 나타낸다.

세선화는 패턴의 연결성을 깨지 않고 심한 평활화를 이루지 않으면서도 계산이 빠른 SPTA (safe-point thinning algorithm)[30]를 이용한다. 이 알고리즘은 미리 준비된 4개의 마스크에 하나라도 부합되는 점은 제거하지 않고, 그렇지 않은 점만을 에지점으로 판단하여 제거한다. 이 알고리즘의 실제 구현은 에지점에 대한 조건을 부울 (Boolean) 대수화하고 결정트리 (decision tree)를 구성하여 세선화를 수행하므로 기존의 세선화 알고리즘에 비해 계산과정이 간단하다.

Ⅳ. 실험 결과 및 토의

본 논문에서는 합성 거리 영상과 실제 거리 영상에 대한 모의실험을 수행하였다. 합성 거리 영상은 컴퓨터 그래픽스에서 사용되는 ray tracing[31]을 이용하여 제작하였으며, 영상크기는 256×256, 화소값은 실수값을 사용하였다. 실제 거리 영상은 NRCC (National Research Council of Canada)[32]에서 제작한 영상으로 256×256의 해상도에 화소 간격이 0.5 mm이고 거리값의 정밀도는 10 μm이다. 본 영상은 거리값의 취득 위치가 열방향으로 균등하지 못하며 그림자 효과 (shadow effect)에 의해 거리값이 없는 부분이 있으므로 본 모의실험에서는 열방향으로 선형보간 (linear interpolation)하였다.

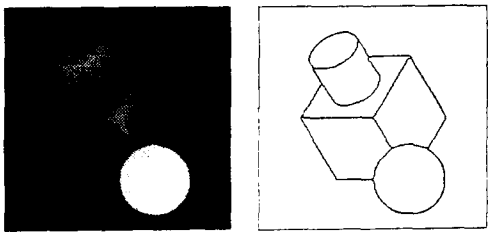

그림 3. 제안한 방법의 합성 거리영상 실험 결과
(a) 합성 거리 영상
(b) 영역화 결과

Fig. 3. Simulation results by the proposed method for a synthetic range image.
(a) synthetic range image.
(b) segmentation result.

그림 3은 인공적으로 합성한 영상에 대한 실험결과이다. 그림 3(a)는 입력 영상으로 구가 육면체를 부분적으로 가리고 있다. 영역화 결과는 그림 3(b)이고 모든 경계선이 정확하게 추출되었으나 세선화의 결과로 분기점을 형성하는 부근에서 경계선이 약간 휘어짐을 알 수 있다.

그림 4는 실제 거리 영상에 대한 실험 결과를 순차적으로 나타내고 있다. 그림 4(a)과 4(b)는 directional derivative를 이용해 각각 1차 및 2차 미분을 수행한 후 절대값을 취해 0.0과 5.0 사이로 스케일링한 결과이며 흰 부분이 큰 값을, 검은 부분이 작은 값을 나타낸다. 가우시안 필터의 표준편차는 1.5로 설정하였으며 이후 제시될 영상에도 같은 표준편차를 설정하고 실험하였다. 그림 4(a)에서는 step 에지가 강조되는 반면 그림 4(b)에서는 roof 에지가 강조되고 있다. 그림 4(c)과 4(d)는 최대 미분이 발생하는 방향을 각 화소마다 0도, 45도, 90도, 135도로 양자화한 후, 구분하기 쉽게 밝기값 0, 60, 120, 240을 할당하여 나타낸 것이다. 2차 미분에 비해 1차 미분의 방향이 더 정확한 결과를 나타내고 있으므로, 고차 미분일수록 잡음 증폭성이 더 증가한다는 사실을 확인할 수 있다. 그림 4(e), 4(f)는 위의 미분화된 영상의 극점을 추출한 step 및 roof 에지 영상이다. 그림 4(e)의 step 에지 라인이 그림 4(f)에서는 2개의 평행한 roof 에지 라인으로 나타남을 알 수 있다. 그림 4(e)의 step 에지나 그림 4(f)의 roof 에지 모두 왼쪽 상단의 기울기가 심한 부근에서 잘못 추출된 에지 라인이 형

성됨을 알 수 있고 이러한 에지 라인은 단순한 문턱값 설정으로 제거가 불가능하다.

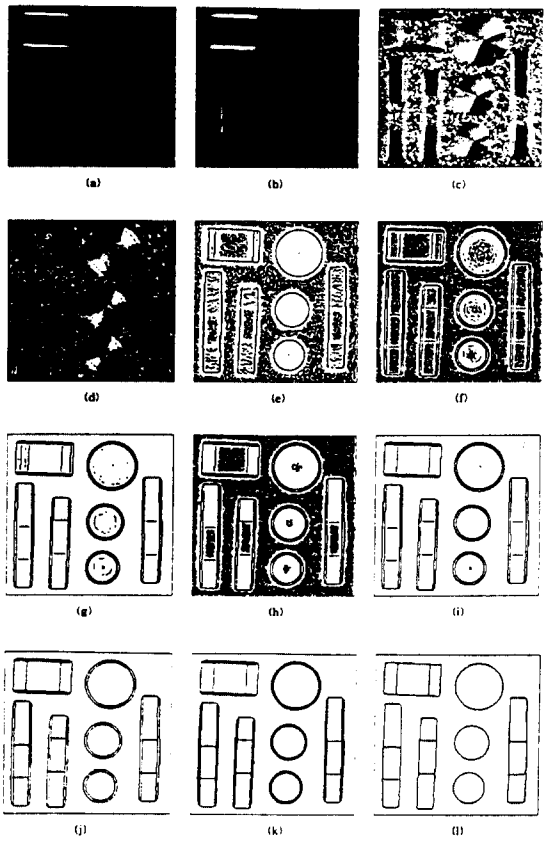

그림 4. 제안한 방법의 실제 거리영상 실험 결과
(a) 1차 미분값 (b) 2차 미분값 (c) 1차 미분 방향 (d) 2차 미분 방향 (e) 1차 미분 국부 극점 추출 (f) 2차 미분 국부 극점 추출 (g) 문턱값 설정 (식 (10)) (h) 문턱값 설정 (식 (11)) (i) 문턱값 설정 (식 (10)과 식 (11)) (j) 에지 라인 연결 (k) step 영역 추출 (l) 세선화 결과

Fig. 4. Simulation results of a real range image by the proposed method.
(a) 1st derivative, (b) 2nd derivative, (c) direction of the 1st derivative, (d) direction of the 2nd derivative, (e) local extrema of the 1st derivative, (f) local extrema of the 2nd derivative, (g) thresholding (eq. (10)), (h) thresholding (eq. (11)), (i) thresholding (eqs. (10) and (11)), (j) edge contour linking, (k) step region extraction, (l) thinned result.

본 논문에서는 새로운 문턱값 설정을 제안하였고 그 과정이 그림 4(g), 4(h), 4(i)에 나타나 있다. 그림 4(g)는 식 (10)을 만족하는 에지만을 추출한 결과이며, 그림 4(h)는 식 (11)을, 그림 4(i)는 식 (10)와 식 (11) 모두를 만족하는 에지를 추출한 결과이다. 사용된 문턱값들은 실험에 의해 독립적으로 결정하였으며, α가 0.03이고 β가 6.0이다. 그림 4(i)에서 대부분의 에지 손실이 step 에지와 수직으로 만나는 roof 에지에서 발생하고 있으며, Fan 등의 방법에 의한 실험결과 그림 2(d)와 비교시 평활화에 의한 step 에지 부근에서의 roof 에지 간격의 확장이 적음을 확인할 수 있다. 그림 4(j)는 추출된 roof 에지라인에서 길이가 10이하인 선분들을 잘못 추출된 끝점으로 판정하여 제거하고 선정된 끝점들만으로 에지 라인을 연결한 결과이다. 그림 4(k)는 step 에지가 존재하리라 판정되는 영역을 메운 영상이고, 그림 4(l)은 세선화를 수행한 최종결과이며 입력 거리 영상에 대한 올바른 영역화가 이루어졌음을 확인할 수 있다.

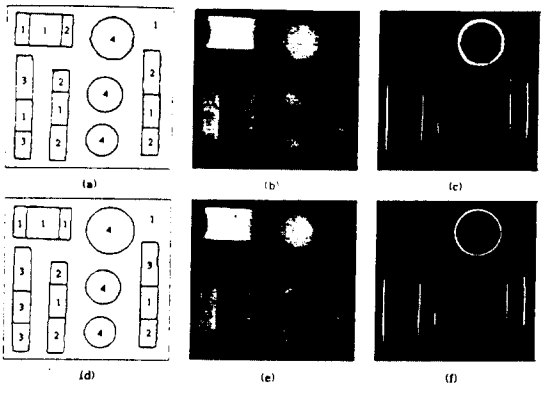

그림 5. 복원 및 오차 영상의 비교
(a) Besl 방법의 근사화 함수의 차수 (b) Besl 방법의 복원 영상 (c) Besl 방법의 오차 영상 (d) 제안한 방법의 근사화 함수의 차수 (e) 제안한 방법의 복원 영상 (c) 제안한 방법의 오차 영상

Fig. 5. Comparison of reconstruction and error images.
(a) order of the approximation function by Besl's method, (b) reconstructed image by Besl's method, (c) error image of Besl's method, (d) order of the approximation function by the proposed method, (e) reconstructed image by the proposed method, (f) error image of the proposed method.

그림 5는 Besl의 방법과 제안한 방법에 의해 영역화된 결과를 각 영역의 근사화 함수의 차수, 근사화에 의한 복원 영상, 원영상과의 오차 영상등을 통해 비교한 것이다. 영상 복원은 Besl의 variable order surface fitting 알고리즘을 이용하여 수행하였으며, 1차에서 최대 4차까지 가장 근사화 오차가 적은 함수로 근사화하였다. 그림 5(a)와 5(d)는 각 영역별로 근사화시 사용된 함수의 차수를 나타내고 있다. 제안한 방법에 대한 결과를 복원시에는 주어진 에지 영상을 최종 영역화가 이루어진 영상으로 간주하고 영역성장 없이 근사화만 수행하였다. 두 알고리즘 모두 에지 근처에서 근사화 오차가 발생하고 있으나 제안한 알고리즘의 근사화 오차가 더 적음을 알 수 있으며, 최종 영역화된 영상의 평균 근사화 오차는 Besl의 방법이 0.96, 제안한 방법이 0.15이며 프로그램 수행 시간은 MIPS R4000에서 Besl의 방법이 약 1시간이고 제안한 방법이 약 10분 정도이다.

V. 결 론

본 논문에서는 기존의 영역기반 영역화 방법과 주곡률을 이용한 에지 추출 방법의 문제점을 제시하고 새로운 에지 기반 거리 영상 영역화 기법을 제안하였다. 가우시안 필터링과 directional derivative를 이용하여 거리 영상을 미분하여 에지를 추출한 후 추출된 에지를 이용하여 영역화하였다. 본 논문의 알고리즘은 기존의 곡률을 이용한 방법들에 비해 잡음에 덜 민감하므로 평활화에 의한 영상 왜곡을 줄이는 효과를 보이며, 새로운 문턱값의 설정으로 기존의 방법들이 해결하지 못한 기울기가 큰 곡면에서의 잘못된 에지를 제거할 수 있었고, roof 에지로 형성된 step 영역의 세선화를 통해 step 에지와 roof 에지의 독립적 처리에서 발생하는 문제를 해결하였다.

그러나 세선화에 의한 경계선의 왜곡이 일어나고 있으며 알고리즘상에 설정되어 있는 파라메타들이 영상의 조건에 관계없이 고정되어 있으므로 경계선의 위치 보정을 위한 연구와 영상의 조건에 따라 파라메타를 자동적으로 설정하는 연구 및 나아가 영역화된 영상을 입력으로 3차원 물체를 인식하는 연구가 진행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] P. J. Besl, *Surface in Range Image Understanding*, New York: Springer-Verlag, 1988.

[2] H. S. Yang and A. C. Kak, "Detemination of the identity, position and orientation of the topmost object in a pile," *Comput. Vision, Graphics, Image Processing*, vol. 36, pp. 229-255, Dec. 1986.

[3] N. Yokoya and M. D. Levine, "Range image segmentation based on differential geometry: A hybrid approach," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-11, pp. 643-649, June 1989.

[4] T. Kasvand, "Surface curvatures in 3D range images," in *Proc. 8th Int. Conf. Pattern Recognition*, Paris, France, pp. 842-845, Oct. 1986.

[5] T. J. Fan, G. Medioni, and R. Nevatia, "Surface segmentation and description from curvature features," in *Proc. DARPA Image Understanding Workshop*, Los Angles, CA, pp. 351-359, Feb. 1987.

[6] R. Deriche, "Using Canny's criteria to derive a recursively implemented optimal edge detector," *Int. J. Comput. Vision*, vol. 1, pp. 167-187, May 1987.

[7] A. P. Davignon, "Detecting orientation discontinuities in range images by use of directional derivatives," in *Proc. 11th Int. Conf. Pattern Recognition*, Hague, Netherlands, pp. 455-458, Aug.-Sep. 1992.

[8] P. Perona and J. Malik, "Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion," IEEE Trans. *Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-12, pp. 629-639, July 1990.

[9] P. Saint-Marc, J. S. Chen, and G. Medioni, "Adaptive smoothing: A general tool for early vision," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-13, pp. 514-529 June 1991.

[10] J. Shah, "Segmentation by non-linear diffusion," in Proc. *IEEE Conf. Comput. Vision Pattern Recognition*, Lahaina, Maui, Hawai, pp. 202-207, June 1991.

[11] M. Proesmans, E. J. Pauwels, L. J. Van Gool, T. Moons, and A. Oosterlinck, "Image enhancement using non-linear diffusion," in *Proc. IEEE Conf. Comput. Vision Pattern Recognition*, New York City, NY, pp. 680-681, June 1993.

[12] R. T. Whitakers and S. M. Pizer, "A multi-scale approach to nonuniform diffusion," *CVGIP: Image Understanding*, vol. 57, pp. 99-110, Jan. 1993.

[13] W. E. L. Grimson, "Discontinuity detection for visual surface reconstruction," *Comput. Vision, Graphics, Image Processing*, vol. 30, pp. 316-330, June 1985.

[14] T. E. Boult and J. R. Kender, "Visual surface reconstruction using sparse depth data," in *Proc. IEEE Conf. Comput. Vision Pattern Recognition*, Miami Beach, FL, pp. 68-76, June 1986.

[15] D. Terzopoulus, "The computation of visual-surface representations," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-10, pp. 417-438, July 1988.

[16] A. Blake and A. Zisserman, *Visual Reconstruction*, Cambridge, MA: MIT Press, 1987.

[17] R. M. Bolle and B. C. Vemuri, "On three-dimensional surface reconstruction methods," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-13, pp. 1-13, Jan. 1991.

[18] P. J. Besl, J. B. Birch, and L. T. Watson, "Robust window operator," in *Proc. 2nd Int. Conf. Computer Vision*, Tampa, FL, pp. 591-600, Dec. 1988.

[19] P. Meer, D. Mintz, and A. Rosenfeld, "Robust regression methods for computer vision: A review," *Int. J. Comput. Vision*, vol. 6, pp. 59-70, Apr. 1991.

[20] C. V. Stewart, "A new robust operator for computer vision: Theoretical analysis," in *Proc. IEEE Conf. Comput. Vision Pattern Recognition*, Seattle, WA, pp. 1-8, June 1994.

[21] M. P. do Carmo, *Differential Geometry of Curves and Sufaces*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1976.

[22] P. J. Besl and R. C. Jain, "Invariant surface characteristics for three dimensional object recognition in range images," *Comput. Vision, Graphics, Image Processing*, vol. 33, pp. 33-80, Jan. 1986.

[23] P. J. Besl and R. C. Jain, "Segmentation through variable-order surface fitting," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-10, pp. 167-192, Mar. 1988.

[24] J. Canny, "A computational approach to edge detection," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-8, pp. 679-698, Nov. 1986.

[25] V. Torre and T. A. Poggio, "On edge detection," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-8, pp. 147-163, Mar. 1986.

[26] D. Marr and E. Hildreth, "Theory of edge detection," in *Proc. Roy. Soc. London* B, vol. 207, pp. 187-217, 1980.

[27] W. T. Freeman and E. H. Adelson, "The design and use of steerable filters," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-13, pp. 891-906, Sep. 1991.

[28] A. P. Davignon, "Contribution of edges and regions to range image segmentation," in *Proc. SPIE Applications of Artificial Intelligence-Machine Vision and Robotics*, vol. 1708, pp. 228-239, Orlando, FL, Apr. 1992.

[29] R. M. Haralick and L. G. Shapiro, *Computer and Robot Vision*, vol. 1, pp 32-33, Addison-Wesley Pub. Co., 1992.

[30] N. J. Naccache and R. Shinghal, "SPTA: A proposed algorithm for thinning binary patterns," *IEEE Trans.*

Syst., Man, Cybern., vol. SMC-19, pp. 409-418, May/June 1984.

[31] J. D. Foley, A. van Dam, S. K. Feiner, and J. F. Hughes, *Computer Graphics*, Addison-Wesley Pub. Co., 1992.

[32] M. Rioux and L. Cournoyer, *The NRCC Three-Dimensional Image Data Files*, National Research Council of Canada, June 1988.

저 자 소 개

李 吉 茂(準會員) 제 32권 B편 제 7호 참조
현재 삼성전자 근무

朴 來 弘(正會員) 제 23권 B편 제 6호 참조
현재 서강대학교 전자공학과 교수

崔 宗 秀(正會員) 제 28권 B편 제 5호 참조
현재 중앙대학교 전자공학과 교수