

표면 검출과 볼륨 확장을 이용한 삼차원 물체의 선택 분할

배 소 영[†] · 최 수 미^{††} · 최 유 주^{†††} · 김 명 희^{††††}

요 약

삼차원 볼륨 영상으로부터 대상 물체를 분할하는 것은 가시화 또는 볼륨 측정을 위해서 매우 중요한 단계이다. 본 논문에서는 볼륨 가시화를 위해 널리 사용되는 르보이 필터링 방법을 개선하여 물체의 표면을 검출하는 방법을 제시한다. 그리고 형태학적 연산자를 이용하여 완전히 닫힌 표면을 생성하고 볼륨 확장 알고리즘에 의해 물체를 선택적으로 분할한다. 제시된 방법은 합성된 삼차원 구 영상과 심혈관 조영영상에 적용되었다. 이 방법을 합성된 구 영상을 사용하여 기존의 르보이 필터링과 정량적으로 비교한 결과 제시한 방법이 복셀 오차면에서 더 우수하였다. 또한 심혈관 영상을 사용하여 시각적으로 비교한 결과 역시 제시한 방법이 더 정확하였다. 본 논문에서 제시한 방법은 삼차원 영상처리에서 자주 함께 사용되는 분할, 가시화, 측정을 쉽게 연계할 수 있기 때문에 볼륨 영상의 분할을 위해 매우 효과적이다.

Selective Segmentation of 3-D Objects Using Surface Detection and Volume Growing

So-Young Bae[†] · Soo-Mi Choi^{††} · Yoo-Joo Choi^{†††} · Myoung-Hee Kim^{††††}

ABSTRACT

The segmentation of target objects from three dimensional volume images is an essential step for visualization and volume measurement. In this paper, we present a method to detect the surface of objects by improving the widely used levoy filtering for volume visualization. Using morphological operators we generate completely closed surfaces and selectively segment objects using the volume growing algorithm. The presented method was applied to 3-D artificial sphere images and angiocardiograms. We quantitatively compared this method with the conventional levoy filtering using artificial sphere images, and the results showed that our method is better in the aspect of voxel errors. The results of visual comparison using angiocardiograms also showed that our method is more accurate. The presented method in this paper is very effective for segmentation of volume data because segmentation, visualization and measurement are frequently used together for 3-D image processing and they can be easily related in our method.

키워드: 삼차원 분할(3-D Segmentation), 형태학적 연산(morphological operator), 볼륨 측정(volume measurement)

1. 서 론

다양한 삼차원 영상을 이용한 가시화, 기하학적 측정, 형태 분석 등의 결과가 정확하기 위해서는 무엇보다도 영상으로부터 대상 물체를 정확히 분할하는 과정이 선행되어야 한다. 삼차원 볼륨 영상의 분할은 각 단면 영상 슬라이스들에 대해 독립적으로 분할 방법을 적용하여 일련의 분할된 단면 영상들의 집합을 얻을 수도 있고, 볼륨 영상 전체를 하나의 입력으로 처리하여 분할 방법을 적용할 수도 있다[1, 2].

이러한 분할 방법은 크게 점기반(point-based), 에지기반

(edge-based), 영역기반(region-based) 범주로 분류된다. 점기반 분할은 복셀을 그 위치에 관계없이 명암도 값(gray value)에만 의존하여 분류하는 방법이다. 에지기반 분할은 영상에서 명암도 값의 변화가 심한 점들을 물체의 경계로 구분하는 방법이다. 일반적으로 에지는 영상 명암도 값에 대한 일차 미분의 최대값 또는 이차 미분의 변곡점(zero-crossing)을 계산하여 검출한다. 에지기반 방법에서는 영역 사이의 구분은 주로 명암도의 불연속성에 근거하여 결정하기 때문에 각 영역들의 명암도가 충분히 균일한 경우에 적용하는 것이 좋다. 영역기반 방법은 개개의 복셀이나 에지 대신에 명암도 값의 분포나 다른 영역들과의 공간적인 관계 등 전체 영역의 특성을 고려하여 분할하는 방법이다. 대표적인 영역기반 방법에는 유사한 성질의 이웃 복셀들을 합병함으로써 영역을 확장시켜 나가는 영역확장(region-growing) 기법과 임계값 기법으로 시작해서 인터랙티브하게 반자동으

※ 본 연구는 부분적으로 과학기술부 국가지정연구실 지원사업과 정보통신부 대학 정보통신 연구센터 지원사업에 의해 수행되었습니다.

† 정 회 원 : 이화여자대학교 대학원 컴퓨터학과

†† 정 회 원 : 이화여자대학교 컴퓨터 그래픽스/가상현실 연구센터 연구 교수(원 세종대학교 소프트웨어공학과 교수)

††† 준 회 원 : 이화여자대학교 대학원 컴퓨터학과

†††† 종신회원 : 이화여자대학교 컴퓨터학과 교수

논문접수 : 2001년 7월 5일, 심사완료 : 2002년 2월 8일

로 영역을 확장 또는 축소해 가는 형태학적 연산(morphological operator)을 이용한 방법 등이 있다.

최근에는 점, 에지, 영역 등의 한가지 특성에만 의존하여 영상을 분할하지 않고, 에지기반 방법과 영역기반 방법, 또는 점기반 방법과 영역기반 방법 등을 결합한 분할 방법들이 시도되고 있다[1, 3]. 또한 영상의 하위 레벨 정보뿐만 아니라, 대상 객체의 기하학적 형태 정보를 이용하여 윤곽선을 추적해 나가는 변형모델을 이용한 분할에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[3-5]. 그러나 변형모델을 이용한 분할 방법은 점, 에지, 영역기반 기법에 비해 복잡하고, 계산 속도가 느릴 뿐만 아니라 일반적으로 조절해야 하는 파라미터 수가 많아 사용자의 잦은 개입을 필요로 한다.

본 논문에서는 볼륨 데이터 처리에서 자주 함께 사용되는 분할, 가시화, 측정을 쉽게 연계할 수 있고, 삼차원 표면을 보다 연결성이 유지된 형태로 검출하는 방법을 제시한다. 이를 위해 볼륨 가시화를 위해 널리 사용되는 르보이 필터링 방법을 개선하여 물체의 표면을 검출하는 방법을 제시한다. 그리고 형태학적 연산자를 이용하여 완전히 닫힌 표면을 생성하고 볼륨 확장 알고리즘에 의해 물체를 선택적으로 분할함과 동시에 볼륨을 추정하도록 한다.

제시된 방법은 크게 표면 검출 단계와 선택 분할 단계로 이루어져 있다. 먼저 표면 검출 단계에서는 복셀의 지역적인 명암도 변화량과 복셀의 불투명도를 영상의 잡음에 대해 보다 견고하게 계산할 수 있도록 기존의 볼륨 가시화에서 널리 사용되는 르보이[5] 공식에 삼차원 소벨 연산자를 결합한 개선된 필터링 방법을 제안한다. 그리고 필터링 결과로 생성된 표면으로부터 완전히 닫힌 정교한 표면(이하 완전한 표면)을 생성하기 위해 삼차원 형태학적 연산을 적용한다. 선택 분할 단계에서는 볼륨 확장 방법을 통해 원하는 대상 물체만을 분리하는 동시에 물체의 볼륨을 추정할 수 있도록 한다.

이어지는 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 먼저 르보이 필터링에 대해 설명하고, 검출되는 표면의 연결성을 개선하기 위한 방법으로 삼차원 소벨 연산자를 결합한 표면 검출 방법에 대해 기술한다. 3장에서는 형태학적 연산에 의한 완전한 표면을 검출 방법을 기술한다. 4장에서는 볼륨 확장에 의한 선택 분할 방법을 기술하고, 5장에서는 구현 및 결과를 6장에서는 결론을 제시한다.

2. 르보이 필터링과 삼차원 소벨 연산자에 의한 표면 검출

2.1 르보이 필터링에 의한 표면 검출

르보이(Levoy)[5]에 의해 소개된 필터링 방법은 복셀의 명암도 값과 그 값의 변화(gradient)를 결합시킨 표면 검출 함수로, 볼륨 영상에서 각 복셀에 대한 불투명도를 이용하여

표면을 검출한다. 복셀의 불투명도 $a(x)$ 는 임계값 f_v , 복셀의 명암도 값 $f(x)$, 명암도 값의 변화를 나타내는 $|\nabla f(x)|$ 에 의해 식 (1)과 같이 표현된다. 즉, 복셀의 불투명도는 주어진 명암도 값에 가까울수록 커지게 되며, 명암도 값의 변화량이 커질수록 완전 불투명도에 가깝도록 정의된다. 가중치 r 이 클수록 보다 완전한 표면을 검출할 수 있으나 너무 두꺼운 표면을 검출하게 되므로 정확한 표면을 검출하기 위해서는 적절한 r 값을 선택하는 것이 중요하다.

$$a_v \quad , \quad |\nabla f(x_i)|=0 \text{ 이고 } f(x_i)=f_v \text{ 일때}$$

$$a(x_i) = \begin{cases} a_v(1 - \frac{1}{r} |\frac{f_v - f(x_i)}{|\nabla f(x_i)|}|) & , \quad |\nabla f(x_i)| > 0 \text{ 이고} \\ & f(x_i) - r|\nabla f(x_i)| \leq f_v \leq f(x_i) \\ & + r|\nabla f(x_i)| \text{ 일 때} \\ 0 & , \quad \text{그렇지 않을 때} \end{cases} \quad (1)$$

where $f(x)$: 복셀의 명암도 값
 $|\nabla f(x)|$: 명암도 값의 변화량
 r : 가중치
 a_v : 완전 불투명도

명암도 값의 변화량은 (식 2)와 같은 근사치를 사용한다.

$$\nabla f(x_i) = \nabla f(x_i, y_j, z_k) = \begin{bmatrix} \frac{dx}{dy} \\ \frac{dy}{dz} \\ \frac{dz}{dx} \end{bmatrix}$$

$$\approx \begin{bmatrix} \frac{1}{2}[f(x_{i+1}, y_j, z_k) - f(x_{i-1}, y_j, z_k)] \\ \frac{1}{2}[f(x_i, y_{j+1}, z_k) - f(x_i, y_{j-1}, z_k)] \\ \frac{1}{2}[f(x_i, y_j, z_{k+1}) - f(x_i, y_j, z_{k-1})] \end{bmatrix} \quad (2)$$

르보이 필터링은 삼차원 인접 관계를 사용하므로 이차원 분할에 비해 삼차원 구조를 보다 정확히 파악할 수 있고, 불투명도 계산에 의해 표면을 검출하므로 렌더링에 직접 적용할 수 있어 수행 시간이 단축되는 장점이 있는 반면 다음과 같은 문제점이 있다. 첫째, 6개의 인접 복셀만을 사용함으로써 여전히 영상의 잡음에 민감하고 둘째, 표면에 구멍(hole)이 생겨 완전한 표면을 검출하지 못하며 셋째, 원하는 대상 물체만을 분할하는 데 어려움이 있다.

이러한 르보이 필터링의 문제점을 해결하기 위하여 개선된 방법들이 많이 제안되고 있다. Buck[7] 등은 6개의 인접 복셀만을 사용함으로써 발생하는 영상 잡음에 대한 민감성과 표면 검출의 불완전성을 보완하기 위해 26개의 인접 복셀을 사용하여 명암도 값의 변화량을 계산하고, 삼차원적 구조를 사용하여 물체의 분할을 시도하였다. 그러나 삼차원적 구조를 적용하기 위한 별도의 데이터베이스가 필요하다는 단점이 있다.

Ahmed[8] 등은 이차 도함수의 제로 교차점을 계산함으로써 경계선을 추출하는 이차원 LOG(Laplacian of Gaussian) 연산자를 삼차원으로 확장하여 영상을 필터링 하였고, 필터링 이후 생성된 구멍들을 메우기 위해 K-means 방법의 변

형인 ISODATA(Iterative Self-Organizing Data Analysis) 방법과 Hopfield Network, Kohonen Network 방법을 적용하고 삼차원 connected component 방법을 사용하여 분할된 영상의 연결성을 보장하고자 하였다.

Bomans[9] 등은 또 다른 경계선 추출 방법인 이차원 Marr-Hildreth 연산자를 확장한 삼차원 Marr-Hildreth 연산자와 형태학적 연산 중 dilation과 erosion을 사용하였다. 그러나 이 방법은 삼차원 영상의 명암도 값의 변화량만을 고려하므로 분할을 위한 새로운 파라미터들이 요구되어 기존 필터링이 갖는 한계점을 벗어나지 못하고 있다.

Hoehne[10] 등은 임계값 기법과 dilation, erosion, region fill, connected component와 같은 형태학적 연산을 이용한 삼차원 분할을 제안하였는데, 원하는 물체 영역을 추출하기 위해서는 각 단계마다 사용자가 관심 있는 영역을 선택하고 단계별로 결과를 판단해야 하므로 사용자의 개입이 크다는 문제점이 있다.

2.2 삼차원 소벨 연산자를 결합한 표면 검출

본 절에서는 삼차원으로 확장된 소벨 연산자(sobel operator)[11]를 르보이 필터링 공식에 적용한 새로운 형태의 삼차원 필터링 방법에 대해 설명한다.

이차원 소벨 연산자에 의해 필터링된 영상은 잡음에 덜 민감하고 다른 연산자에 비해 최적의 윤곽선을 찾아낼 수 있다는 이점이 있으므로, 영상에서의 윤곽선 검출에 가장 널리 사용된다. Zucker[11] 등은 삼차원 영상에서의 효과적인 표면 검출을 위해 이차원 영상에서의 윤곽선 검출에 가장 널리 사용되는 소벨 연산자를 삼차원으로 확장하였다. 삼차원 소벨 연산자는 이차원 소벨 연산자와 마찬가지로 다른 연산자에 비해 영상 잡음에 덜 민감하며 부드러운 표면을 생성해 내는 것으로 알려져 있다[7]. 삼차원 소벨 연산자는 (그림 1)과 같은 3×3×3 결합 커널(convolution kernel)로 이루어져 있다. x방향, y방향, z방향의 미분값 S_x, S_y, S_z 을 구하기 위해서는 아래의 결합 커널을 x축, y축, z축 방향으로 각각 90도씩 회전한 후 계산한다.

$-\frac{\sqrt{3}}{3}$	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	$-\frac{\sqrt{3}}{3}$	0	0	0	$\frac{\sqrt{3}}{3}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{3}$
$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	-1	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	0	0	0	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	1	$\frac{\sqrt{2}}{2}$
$-\frac{\sqrt{3}}{3}$	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	$-\frac{\sqrt{3}}{3}$	0	0	0	$\frac{\sqrt{3}}{3}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{3}$

(그림 1) 삼차원 소벨 연산자

본 연구에서 제안한 필터링 공식은 삼차원 영상에서의 명암도 값과 명암도 값의 변화량으로 정의된 함수에 의해 불투명도를 계산한다는 점에서 르보이 필터링과 동일한 개념을 가지고 있다. 그러나 명암도 값의 변화량을 계산할 때

삼차원 소벨 연산자를 적용하여 삼차원 영상 정보를 충분히 활용함으로써 기존의 르보이 필터링에 비해 영상의 잡음을 효과적으로 제거하고 보다 정확하게 표면을 검출한다. 본 연구에서 제안한 르보이 필터링과 삼차원 소벨 연산자를 결합한 공식에서는 식 (1)에서의 $\nabla f(x_i)$ 를 식 (3)으로 대체하고, 상수 r 은 1로 완전 불투명도인 a_v 는 255로 지정한다.

$$\nabla f(x_i) = \nabla f(x_i, y_j, z_k) \approx \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} d_x = & \frac{3}{\sqrt{3}}(f(x_{i+1}, y_{j-1}, z_{k-1}) + f(x_{i+1}, y_{j+1}, z_{k-1}) \\ & + f(x_{i+1}, y_{j-1}, z_{k+1}) + f(x_{i+1}, y_{j+1}, z_{k+1}) \\ & - f(x_{i-1}, y_{j-1}, z_{k-1}) - f(x_{i-1}, y_{j+1}, z_{k-1}) \\ & - f(x_{i-1}, y_{j-1}, z_{k+1}) - f(x_{i-1}, y_{j+1}, z_{k+1})) \\ & + \frac{2}{\sqrt{2}}(f(x_{i+1}, y_{j-1}, z_k) + f(x_{i+1}, y_{j+1}, z_k) \\ & + f(x_{i+1}, y_j, z_{k-1}) + f(x_{i+1}, y_j, z_{k+1}) \\ & - f(x_{i-1}, y_{j-1}, z_k) - f(x_{i-1}, y_{j+1}, z_k) \\ & - f(x_{i-1}, y_j, z_{k-1}) - f(x_{i-1}, y_j, z_{k+1})) \\ & + f(x_{i-1}, y_j, z_k) - f(x_{i+1}, y_j, z_k) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d_y = & \frac{3}{\sqrt{3}}(f(x_{i-1}, y_{j+1}, z_{k-1}) + f(x_{i+1}, y_{j+1}, z_{k-1}) \\ & + f(x_{i-1}, y_{j+1}, z_{k+1}) + f(x_{i+1}, y_{j+1}, z_{k+1}) \\ & - f(x_{i-1}, y_{j-1}, z_{k-1}) - f(x_{i+1}, y_{j-1}, z_{k-1}) \\ & - f(x_{i-1}, y_{j-1}, z_{k+1}) - f(x_{i+1}, y_{j-1}, z_{k+1})) \\ & + \frac{2}{\sqrt{2}}(f(x_{i-1}, y_{j+1}, z_k) + f(x_{i+1}, y_{j+1}, z_k) \\ & + f(x_i, y_{j+1}, z_{k-1}) + f(x_i, y_{j+1}, z_{k+1}) \\ & - f(x_{i-1}, y_{j-1}, z_k) - f(x_{i+1}, y_{j-1}, z_k) \\ & - f(x_i, y_{j-1}, z_{k-1}) - f(x_i, y_{j-1}, z_{k+1})) \\ & + f(x_i, y_{j+1}, z_k) - f(x_i, y_{j-1}, z_k) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d_z = & \frac{3}{\sqrt{3}}(f(x_{i-1}, y_{j-1}, z_{k+1}) + f(x_{i+1}, y_{j-1}, z_{k+1}) \\ & + f(x_{i-1}, y_{j+1}, z_{k+1}) + f(x_{i+1}, y_{j+1}, z_{k+1}) \\ & - f(x_{i-1}, y_{j-1}, z_{k-1}) - f(x_{i+1}, y_{j-1}, z_{k-1}) \\ & - f(x_{i-1}, y_{j+1}, z_{k-1}) - f(x_{i+1}, y_{j+1}, z_{k-1})) \\ & + \frac{2}{\sqrt{2}}(f(x_{i-1}, y_j, z_{k-1}) + f(x_{i+1}, y_j, z_{k-1}) \\ & + f(x_i, y_{j-1}, z_{k-1}) + f(x_i, y_{j+1}, z_{k-1}) \\ & - f(x_{i-1}, y_j, z_{k-1}) - f(x_{i+1}, y_j, z_{k-1}) \\ & - f(x_i, y_{j-1}, z_{k-1}) - f(x_i, y_{j+1}, z_{k-1})) \\ & + f(x_i, y_j, z_{k+1}) - f(x_i, y_j, z_{k-1}) \end{aligned}$$

3. 형태학적 연산에 의한 완전한 표면 검출

앞에서 설명한 필터링을 수행하여 생성된 표면은 종종 서로 다른 물체들이 하나로 연결되어 있거나 하나의 물체

안에 hole을 포함하고 있어서 하나의 물체가 두 개로 분리 될 수 있다. 이러한 경우 형태학적 연산을 수행함으로써 오류를 수정할 수 있을 뿐만 아니라 대상 물체들을 보다 정확하게 분할해 낼 수 있다. 본 절에서는 르보이 필터링과 삼차원 소벨 연산자에 의해 생성된 표면에서 잡음과 hole을 제거하기 위해 사용된 삼차원 closing 연산과, 두껍게 생성된 표면으로부터 골격화(skeletonized)된 완전한 표면을 생성하기 위한 thinning 연산에 대해 설명한다.

3.1 삼차원 closing 연산

삼차원 closing 연산은 dilation과 erosion 연산을 결합한 연산이다. Dilation은 두 집합의 원소를 벡터 덧셈(vector addition)을 사용하고 결합하여 영상 영역을 확장하는 기능을 갖는 형태학적 연산으로서 집합 이론의 OR 연산에 해당하며 수학적 정의는 식 (4)와 같다. 삼차원 dilation 연산은 영역 A의 각 복셀에 대해 structuring element B (3×3×3)의 대응 복셀을 찾은 후, 대응 복셀의 인접 복셀들을 모두 영역 A로 간주함으로써 영역을 확장해 나간다.

$$A \oplus B = \{x | (\widehat{B})_x \cap A \neq \emptyset\} = \{x | [(\widehat{B})_x \cap A] \subseteq A\} \quad (4)$$

Erosion은 두 집합의 원소를 벡터 뺄셈(vector subtraction)으로 결합함으로써 영상 영역을 축소하기 위한 형태학적 연산이고 집합 이론의 AND 연산에 해당한다. Erosion 연산의 수학적 정의는 식 (5)와 같이 표현된다. 삼차원 erosion 연산은 영역 A의 각 복셀에 대해 structuring element B (3×3×3)의 대응 복셀을 찾은 후, 대응 복셀의 인접 복셀들의 값을 모두 조사하여 인접 복셀들 모두가 영역 A의 내부에 존재하는 경우에만 영역 A의 복셀을 표면 내부에 있는 것으로 간주한다. 이렇게 함으로써 영역의 바깥 부분을 제거하여 영역을 축소하게 된다.

$$A \ominus B = \{x | (B)_x \subseteq A\} \quad (5)$$

Closing 연산은 dilation 연산과 erosion 연산의 연속적인 결합으로 수행되는 형태학적 연산으로써[10], 수학적 정의는 식 (6)과 같다.

$$A \cdot B = (A \oplus B) \ominus B \quad (6)$$

본 논문에서는 삼차원 dilation과 erosion 연산의 연속적 결합으로 삼차원 closing을 구현하고, 이를 필터링 결과 영상에서 잡음과 hole을 제거하고 닫힌 표면을 생성하는 데 적용하였다.

3.2 삼차원 thinning 연산

골격화는 원 영상의 연결성을 유지하면서 물체의 형태를 이상적인 얇은 선으로 묘사하는데 적절한 물체 표현방법으로서 필터링에 의해 두껍게 검출된 윤곽선으로부터 윤곽선 바깥 부분의 윤곽점을 하나씩 제거해 나감으로써 표면을 보다

정확하게 나타낼 수 있다. 본 논문에서는 삼차원 thinning 연산을 적용하여 closing 연산 결과 두꺼워질 수 있는 표면으로부터 중앙 골격 복셀만으로 이루어진 정확한 표면을 검출하고자 한다. 일반적으로 thinning 연산은 윤곽선의 골격을 생성하기 위해서 끝점(end point)을 제거하지 않고, 연결성(connectivity)을 절단하지 않으며, 윤곽선의 지나친 축소를 수행하지 않은 범위 내에서 반복적으로 가장자리 점들을 제거하여 물체의 골격을 나타내는 선으로 수렴하여야 한다[12].

본 논문에서는 두꺼운 표면에서 중앙으로 수렴된 완전한 표면을 검출하기 위해 삼차원 thinning 연산을 적용한다. 삼차원 thinning 연산에 대한 이해를 돕기 위해 이차원 상에서의 thinning 연산에서의 조건들을 살펴본다. 즉, 윤곽선의 골격에 해당하지 않는 픽셀을 제거하기 위해서는 식 (7) (a)부터 (e)의 조건을 만족하여야 한다. 조건 (a)는 중앙 픽셀이 thinning 대상인 패턴의 한 픽셀임을 의미한다. (b)는 중앙 픽셀의 4개의 이웃 픽셀 중 적어도 한 개가 윤곽선 밖에 있음을 의미하며 x_i 는 thinning 대상 패턴의 주변점이고, \bar{x}_i 는 x_i 의 이전 보수이다. 조건 (c)는 중앙 픽셀의 8개의 이웃 픽셀 중 2개 이상이 1임을 의미한다. 이것은 끝점(ending point)을 보존하여 골격선의 길이가 수축되지 않게 하기 위한 조건이다. 조건 (d)는 이전 단계의 처리에서 변경된 픽셀 값 \hat{x}_i 에 대해 8개의 이웃 픽셀 중 적어도 하나 이상이 1임을 의미하며 끝 고립점을 보존하는 조건이다. (e)는 연결성의 보존을 위해 필요한 조건이다. 조건 (a)~(c)는 병렬적 처리 개념으로 골격선이 윤곽의 중심 위치에 생성되도록 하며 조건 (d)와 (e)는 순차적 처리 개념이다.

- (a) $C_1(x_0) = (x_0 = 1)$
- (b) $C_2(x_0) = (\sum_{i=1}^4 \bar{x}_{2i-1} \geq 1)$
- (c) $C_3(x_0) = (\sum_{i=1}^8 x_i \geq 2)$ (7)
- (d) $C_4(x_0) = (\sum_{i=1}^8 \hat{x}_i \geq 1)$
- (e) $C_5(x_0) = (\sum_{i=1}^4 \hat{x}_{2i-1} (\hat{x}_{2i} \vee \hat{x}_{2i+1}) = 1)$

중앙 픽셀 S에 대해, A 또는 B로 표시된 픽셀 그룹 중 적어도 하나는 0이 아니며, 네 방향에 해당하는 골격을 찾아내기 위해서 (그림 2)의 (a), (b)패턴과 (a)패턴의 90도 회전 패턴, (b)패턴의 90, 180, 270도 회전 패턴이 사용된다.

A	A	A	A	A	A	x_4	x_3	x_2
0	S	0	A	S	0	x_5	x_0	x_1
B	B	B	A	0	2	x_6	x_7	x_8

(a) (b) (c)

(그림 2) Thinning 패턴

삼차원 thinning 연산에서는 이차원에서의 8개 인접 픽셀을 삼차원 26개의 인접 복셀로 확장하고, (그림 2)에 제시된 패턴의 x, y, z축 방향 회전 패턴을 thinning 패턴으로 사용하였다.

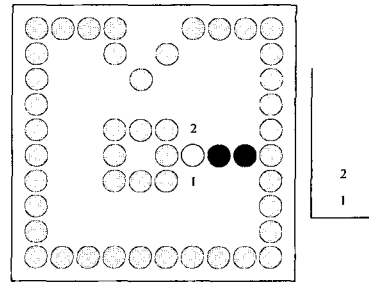
4. 볼륨 확장에 의한 선택 분할

본 논문에서는 삼차원 볼륨영상에서 원하는 대상 물체만을 분할하기 위해 볼륨 확장에 의한 선택 분할 방법을 앞에서 제안한 필터링 방법과 형태학적 연산 방법에 결합하고자 한다. 앞에서 설명한 필터링 방법과 형태학적 연산만으로 표면을 검출하여 분할에 적용하는 경우, 삼차원 영상에서 분할하고자 하는 대상 물체뿐만 아니라 다른 물체가 동시에 분할되는 경우가 종종 발생한다. 그러므로 검출된 표면에 볼륨 확장 알고리즘을 추가하여 여러 가지 대상 물체를 선택적으로 분할할 수 있도록 한다.

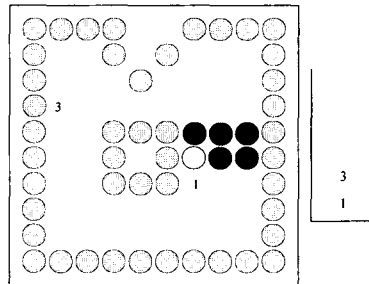
본 논문에서는 이차원 floodfill 알고리즘을 삼차원으로 확장한 삼차원 floodfill 알고리즘을 선택 분할을 위한 볼륨 확장 알고리즘으로 사용한다. 이차원 floodfill 알고리즘은 영역 내부의 초기 씨드 픽셀의 위치로부터 4개의 모든 인접 픽셀을 고려하는 기존의 영역 확장 방법에 비해 각 픽셀 스펬의 초기 시작점에서 영역을 확장하는 기법으로 주위의 모든 점들을 스택에 저장하여 영역을 확장하는 기존의 영역 확장 알고리즘에 비해 메모리를 절약할 수 있다는 이점이 있다. (그림 3)은 도식적인 설명을 위해 이차원 flood fill 알고리즘의 수행과정을 보여준 것이다. (a)는 초기 씨드 픽셀(흰색 원)의 스펬으로 영역이 확장되면서, 위아래에 있는 스펬 시작점인 1과 2가 스택에 저장되는 과정이고, (b)는 시작점 2의 스펬으로 영역이 확장되고 위쪽 스펬 시작점 3이 스택에 저장된 상태이다. (c)는 시작점 3의 스펬으로 영역이 확장되면서 위아래에 있는 스펬 시작점 4, 5, 6이 스택에 추가로 저장된 상태이다. 마지막으로 (d)는 오른쪽 윗 부분 전체로 영역이 확장된 상태를 보여준다.

삼차원 floodfill 알고리즘은 이차원 floodfill 알고리즘과 같은 동작원리로 이루어지며, 이차원 알고리즘에서 고려의 대상이 되는 이차원 영상의 4개 인접 픽셀을 상하 방향으로 확대하여 대상 물체 내부의 초기 씨드 복셀의 위치로부터 지정된 볼륨명도에 도달할 때까지 볼륨을 확장함으로써 원하는 물체를 선택적으로 분할한다. 씨드 복셀의 위치는 표면 검출을 위해 사용자가 지정하는 내부의 한 점을 동일하게 사용한다.

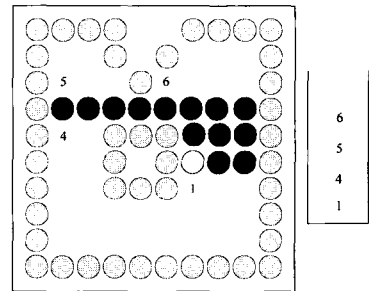
2장과 3장의 방법들을 통하여 검출된 표면에 볼륨 확장 알고리즘을 추가 적용하여 얻을 수 있는 장점은 다음의 두 가지를 들 수 있다. 첫째, 앞에서 지적한 바와 같이 표면 검출 알고리즘은 복셀의 명암도 값과 명암도 변화량 정보만을 이용하므로 영상이 다수의 물체를 포함하고 있는 경우, 분할하고자 하는 물체와 비슷한 명암도 변화량과 명암



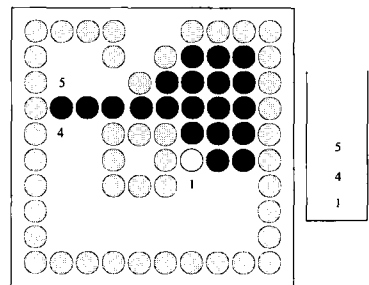
(a) 초기 씨드점의 상하 픽셀을 스택에 저장하고 표면의 우측 경계까지 확장



(b) 표면의 좌측 경계까지 위치를 이동



(c) 표면의 좌측 경계에 해당하는 점을 스택에 저장



(d) 스택에 저장된 점의 위치에서 표면의 우측 경계까지 볼륨을 확장

(그림 3) 이차원 Floodfill 알고리즘의 수행과정

도 값을 가지는 다수의 물체를 동시에 분할하여 잘못된 분할 결과를 얻을 수 있으므로, 검출된 표면에 대상 물체 내부로부터 볼륨 확장 알고리즘을 사용하여 대상 물체만을 선택적으로 분할할 수 있다. 둘째, 선택 분할된 영상으로부터 대상 물체에 대한 볼륨 측정이 가능해진다. 이런 볼륨 측정은 의료영상 부문처럼 볼륨 측정이 중요한 응용 분야

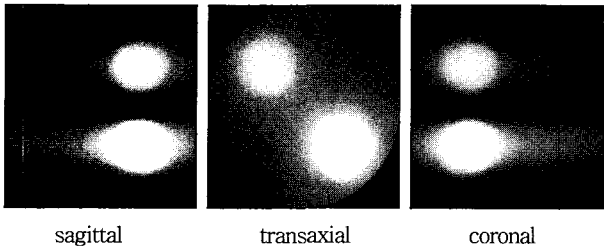
에서 효과적으로 사용될 수 있다.

5. 구현 및 결과

본 논문에서 제시한 물체 분할 방법은 SUN SPARC 20 워크스테이션에서 C언어로 구현되었다. 먼저, 5.1절에서는 분할 방법을 적용하기 위한 대상 영상들에 대해 설명한다. 대상 영상 중 합성 영상에 대한 분할 결과는 5.2절에서 제시하고, 삼차원 심혈관 조영영상에 대한 분할 결과는 5.3절에서 제시한다.

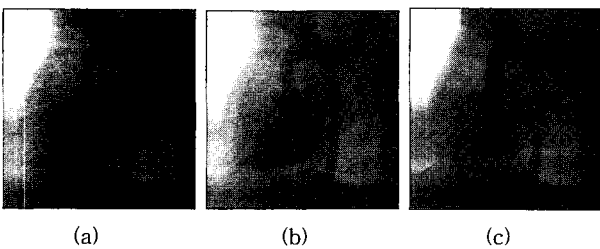
5.1 대상 영상

대상 영상으로는 합성된 삼차원 구 영상과 삼차원 심혈관 조영영상을 사용한다. 삼차원 구 영상은 이미지 에디터로 삼차원 구들을 생성한 후 각 방향의 단면을 획득하여 역투영(backprojection) 방법으로 다시 삼차원으로 재구성한 영상이다. 이는 삼차원 심혈관 조영영상의 재구성 방법과 동일한 방법으로 생성되었고 방법의 정확성을 수치적으로 평가하기 위해 인위적으로 생성한 합성 영상이다. (그림 4)는 합성된 삼차원 구 영상의 sagittal, transaxial, coronal 세 방향의 절단 영상을 보여준다.



(그림 4) 합성된 삼차원 구 영상 (160×160×160)

본 논문에서 사용한 삼차원 심혈관 조영영상은 두 직교 평면을 갖는 회전 조영촬영술(bi-plane rotational angiography)에 의해 촬영한 후, 같은 심전도 신호를 갖는 다른 각도에서 투영된 8장의 조영영상을 중앙으로 역투영시켜 생성한 볼륨 영상이다. 즉, 이차원 투영 영상인 심혈관 조영영상으로부터 가상 광선을 따라 X선 쏘는 곳을 역추적함으로써 삼차원 볼륨 영상의 X선 흡수 정도인 밝기를 계산해

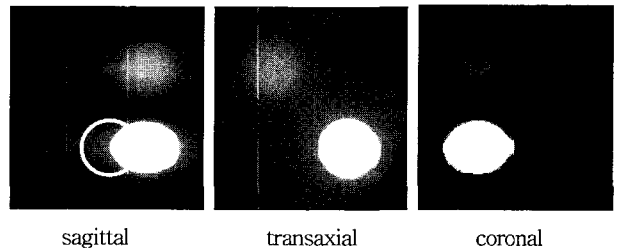


(그림 5) 삼차원 심혈관 조영영상의 예(155×155×155)

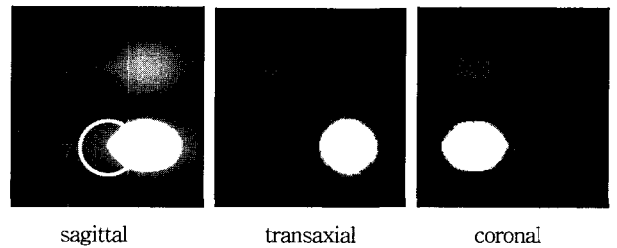
낼 수 있다. 사용된 삼차원 심혈관 조영영상은 타 연구 결과[13]로써 본 실험을 위한 입력 영상으로 제공받은 것이다. (그림 5)는 심박동 한 주기 동안의 10개의 삼차원 심장 볼륨영상 중에서 대표적인 볼륨 영상에 대한 sagittal 방향의 중앙 절단면을 보여준다.

5.2 합성영상에 대한 분할

(그림 6)은 본 논문에서 제안한 분할 방법에 의한 물체 분할 결과와 기존의 르보이 필터링에 형태학적 연산과 볼륨 확장 기법을 사용한 물체 분할 결과를 비교한 영상이다. (a)는 제안 방법에 의한 물체 분할의 결과로서 sagittal, transaxial, coronal 방향의 절단면을 보여주고, (b)는 르보이 필터링의 결과에 형태학적 연산 및 볼륨 확장 기법을 적용한 물체 분할의 결과 영상이다. (그림 6)에서 나타난 것처럼 제안 방법에 의한 결과 영상이 잡음에 덜 민감하며 보다 구에 가까운 분할 결과를 보여주고 있다.



(a) 소벨-르보이 공식에 의한 필터링과 형태학적 연산 및 볼륨 확장 알고리즘 적용 결과



(b) 르보이 공식에 의한 필터링과 형태학적 연산 및 볼륨 확장 알고리즘 적용 결과

(그림 6) 합성된 삼차원 구 영상에 대한 물체 분할 결과 비교 : 구 I

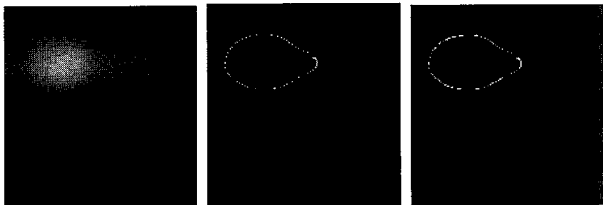
분할 결과를 정량적으로 평가하기 위해서는 분할 결과의 복셀 오차율을 비교하였다. 복셀 오차율은 원래의 볼륨 영상에서 물체에 해당하는 복셀수에서 재구성된 삼차원 볼륨 영상으로부터 분할된 물체의 복셀수를 뺀 값을 전체 복셀수에 대한 백분율로 표현한 값이다. 제안 방법을 비교 방법에 의한 분할 결과를 복셀 오차율로 비교하면 <표 1>과 같다. <표 1>에서와 같이 구 I, 구 II, 구 III에 대해 제안 방법은 각각 0.08%, 0.12%, 0.16%의 복셀 오차율을, 비교 방법에 의한 복셀 오차율은 각각 0.15%, 0.17%,

0.21%가 나와 제안 방법이 보다 정확하게 분할함을 알 수 있다.

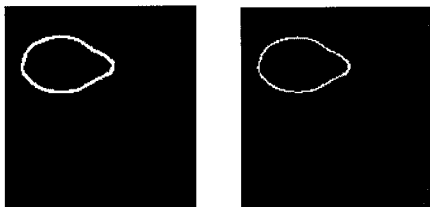
〈표 1〉 분할 결과의 복셀 오차율 비교

구의 종류	제안 방법의 복셀 오차율	비교 방법의 복셀 오차율
구 I	0.08 %	0.15 %
구 II	0.12 %	0.17 %
구 III	0.16 %	0.21 %

(그림 7)은 제안한 필터링 방법과 르보이 필터링에 의한 결과를 비교한 것이다. (a)는 원영상이고, (b)와 (c)는 원영상을 르보이 필터링에 의해 표면을 검출한 결과이다. (b)는 불투명도 임계값이 0.8일 때의 결과이고, (c)는 불투명도 임계값이 0.9일 때의 결과이다. (d)와 (e)는 제안 필터링의 결과로써 (d)는 불투명도 임계값이 0.8, (e)는 불투명도 임계값이 0.9인 결과이다. (그림 7)에서 나타나듯이 불투명도 임계값이 낮을수록 표면이 더 두껍게 검출되어진다. 같은 불투명도 임계값이 주어질 때 르보이 필터링과 제안 필터링을 비교한 결과 제안 필터링에 의해 검출된 표면의 연결성이 더 잘 유지된 것을 알 수 있다. 처리속도는 르보이 필터링의 경우 전체 볼륨을 처리하는데 0.7초가 걸렸고, 제안 필터링은 1.3초가 걸렸다. 다소 처리 시간이 증가하였으나 표면의 연결성 면에서 더 우수한 것으로 나타났다.



(a) 원영상 (b) 르보이 필터링 (불투명도 임계값 : 0.8) (c) 르보이 필터링 (불투명도 임계값 : 0.9)



(d) 제안 필터 (불투명도 임계값 : 0.8) (e) 제안 필터 (불투명도 임계값 : 0.9)

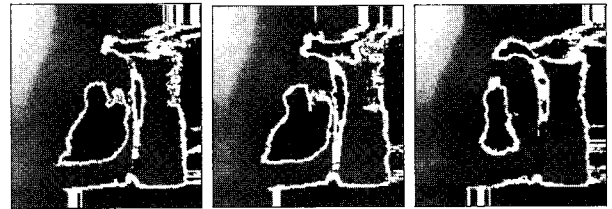
(그림 7) 합성된 삼차원 구 영상에 대한 표면 검출 결과 비교 : 구 II

5.3 삼차원 심혈관 조영영상에 대한 분할

삼차원 심혈관 조영영상으로부터 표면의 복셀값을 자동

으로 추정하기 위해서 먼저 물체 내부의 한 점과 외부의 한 점을 지정하여 농담치가 급격히 변하는 부분인 표면의 명암도 변화량을 계산하였다. 그리고 심혈관 조영영상의 예처럼 대상 영상이 여러 개일 경우에는 모든 볼륨 영상에 대해 동일한 표면 복셀값을 지정함으로써 분할을 위한 사용자의 개입을 최소화하도록 하였다.

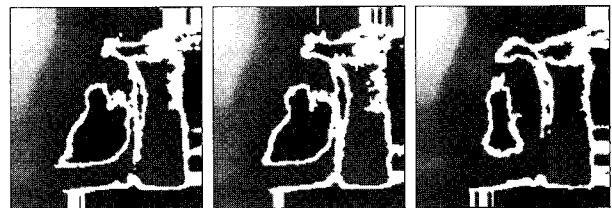
(그림 8)은 (그림 5)의 영상에 대하여 제안 필터링의 결과로 생성된 표면의 sagittal 방향의 절단면 영상이다. 표면을 검출함에 있어서 명암도 값과 명암도 변화량을 동시에 사용함으로써 대상 영상에서 분할 대상이 되는 물체와 비슷한 영상 정보를 가지는 부분만이 불투명도를 갖는 표면으로 검출되었다.



(a) (b) (c)

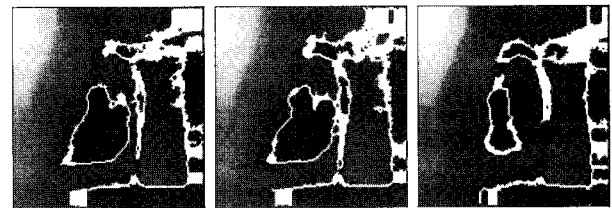
(그림 8) 소벨 연산자를 결합한 르보이 필터링에 의한 표면 검출 결과

(그림 9)는 3×3×3의 structuring element를 사용하여 삼차원 closing 연산을 수행한 결과의 절단면 영상을 보여준다. (그림 8)의 필터링 영상보다 표면이 더 두꺼워졌으나, 서로 분리되어 있던 표면이 하나로 연결되고 영상 잡음이나 hole이 제거된 것을 확인할 수 있다.



(a) (b) (c)

(그림 9) 삼차원 Closing 연산에 의한 닫힌 표면 검출 결과



(a) (b) (c)

(그림 10) 삼차원 Thinning 연산에 의한 표면 검출 결과

(그림 10)은 삼차원 thinning 연산의 결과로 표면의 두께

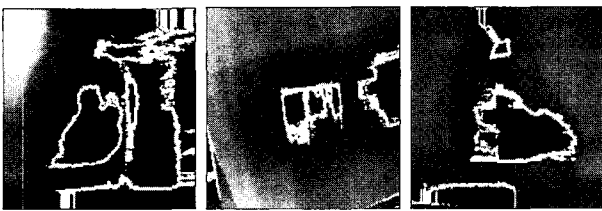
가 얇아진 것을 쉽게 확인할 수 있다. 즉, 심혈관 조영영상으로부터 분할 대상인 좌심실에 대해 표면의 연결성을 유지하면서도 정확한 중앙 표면을 검출해 내었다.

(그림 11)은 볼륨 확장에 의한 물체의 선택 분할 결과로서 floodfill 알고리즘을 적용하여 (그림 10)의 thinning 연산으로 생성된 골격 표면에서 삼차원 좌심실 분리해낸 분할 결과의 절단면을 보여주고 있다. 볼륨 확장을 위한 초기 씨드점은 필터링의 복셀값 추정시 지정된 물체 내부의 한 점으로 초기화하였다. 분할된 영상에서 측정된 복셀의 개수는 (a)의 경우 98218개, (b)는 74118개, (c)는 19456 이다. 복셀 크기에 복셀의 개수를 곱함으로써 대상 물체의 볼륨을 측정하는 데도 유용하게 사용될 수 있다.



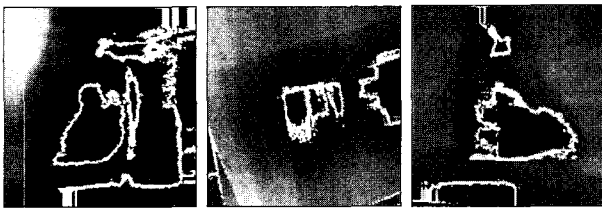
(a) (b) (c)
(그림 11) 볼륨 확장에 의한 물체 분할 결과

(그림 12)는 본 논문에서 제안한 필터링 방법과 르보이 필터링에 의한 필터링 결과를 비교 하기 위한 영상들이다. 영상 결과의 비교를 위해 표면 복셀 값은 28로 동일하게 지정하였다. (그림 12)의 (a)는 제안 필터링 방법에 의한 결과로 sagittal, transaxial, coronal 세 방향의 절단면 영상들



sagittal transaxial coronal

(a) 소벨 연산자를 결합한 르보이 필터링 결과의 절단면 영상



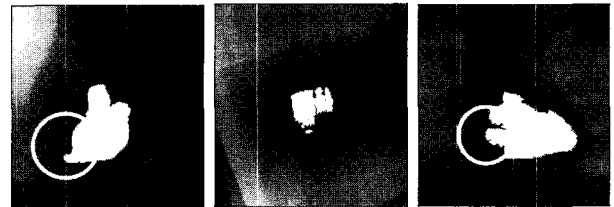
sagittal transaxial coronal

(b) 르보이 필터링 결과의 절단면 영상

(그림 12) 제안 필터링 방법과 르보이 필터링의 결과 비교 : 확장기 심장영상

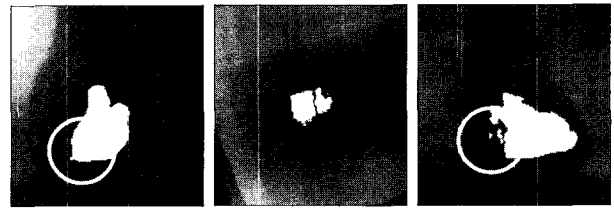
보여준다. (a)의 결과가 (b)의 르보이 필터링에 의한 결과보다 잡음이 적고 표면을 확실하게 검출해 내는 것을 볼 수 있다.

(그림 13)은 본 논문의 제안 방법에 의한 물체 분할의 결과와 르보이 필터링에 형태학적 연산 및 볼륨 확장을 적용한 물체 분할의 결과를 비교한 영상이다. (그림 13)의 (a)는 제안 방법에 의해 분할된 결과의 sagittal, transaxial, coronal 세 방향에서의 절단 영상으로 보여주고, (b)는 르보이 필터링에 의한 물체 분할의 결과의 절단 영상들을 보여준다. 시각적인 비교 결과 제안 방법에 의한 분할 결과의 절단면이 영상 잡음의 영향을 덜 받으며 보다 정확하게 심장을 분할한 것을 확인할 수 있다.



sagittal transaxial coronal

(a) 제안 필터링과 형태학적 연산 및 볼륨 확장 알고리즘에 의한 물체 분할 결과



sagittal transaxial coronal

(b) 르보이 필터링과 형태학적 연산 및 볼륨 확장 알고리즘에 의한 물체 분할 결과

(그림 13) 최종적으로 분할된 결과 비교 : 확장기 심장영상

6. 결 론

본 논문에서는 소벨 연산자를 결합한 르보이 필터링을 제시함으로써 볼륨 영상으로부터 연결성이 보다 잘 유지된 형태로 물체의 표면을 검출할 수 있도록 하였다. 또한 형태학적 연산과 삼차원 볼륨 확장 알고리즘을 결합하여 삼차원 물체를 선택적으로 분할할 수 있도록 하였다. 합성된 삼차원 구 영상을 통해 볼륨당 오류 복셀 수를 비교한 결과 소벨 연산자를 결합한 르보이 필터링에 의한 분할 결과가 르보이 필터링에 의한 분할 결과에 비해 평균 2350개의 오류 복셀이 감소되었다. 제시한 방법이 가지는 의의는 살펴보면 다음과 같다. 첫째, 기존 필터링에 의한 표면 검출방법에서 문제점으로 지적되었던 잡음에 대한

민감성 문제를 개선하였다. 제시된 방법은 잡음 영상에 대해 뛰어난 효과를 보이는 소벨 연산자를 르보이 필터링에 결합함으로써 기존 필터링에 비해 검출된 표면의 연결성이 우수하다. 또한 검출된 표면은 볼륨 가시화와 바로 연계되어 효과적으로 사용할 수 있다. 둘째, 필터링의 결과로 검출된 표면을 보다 완전한 형태로 생성하기 위해 형태학적 연산을 적용하고, 볼륨 확장 알고리즘을 적용함으로써 대상 물체를 분할함과 동시에 물체의 삼차원 볼륨을 측정하기가 쉽다. 제시된 방법은 삼차원 영상처리에서 자주 함께 사용되어지는 분할, 가시화, 측정을 쉽게 연계할 수 있어 볼륨 영상을 위한 분할로써 효과적으로 사용될 수 있다.

참 고 문 헌

[1] J. S. Duncan and N. Ayache, "Medical Image Analysis : Progress over Two Decades and the Challenges Ahead," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence Vol.22, No.1, pp.85-106, Jan. 2000.

[2] S. M. Choi, J. E. Lee, J. Kim and M. H. Kim, "Volumetric Object Reconstruction Using the 3D-MRF Model-Based Segmentation," IEEE Transactions on Medical Imaging Vol.16, No.6, pp.887-892, Dec. 1997.

[3] J. Park, M. Kim, T. McInerney and D. Terzopoulos, "A Multiscale Deformable Model for Extracting Complex Surfaces from Volume Images," Proceedings of Pacific Graphics '99, pp.208-215, Oct. 1999.

[4] T. McInerney and D. Terzopoulos, "T-snakes : Topology adaptive snakes," Medical Image Analysis Vol.4, pp.73-91, 2000.

[5] R. Shekhar, R. M. Cothren, D. G. Vince, S. Chandra, J. D. Thomas and J. F. Cornhill, "Three-dimensional segmentation of luminal and adventitial borders in serial intravascular ultrasound images," Computerized Medical Imaging and Graphics Vol.23, No.6, pp.299-309, Dec. 1999.

[6] M. Levoy, "Display of surfaces from volume data," IEEE Computer Graphics and Applications, pp.29-37, May, 1988.

[7] T. A. Buck, H. Ehrlicke, W. Strasser and L. Thutfjell, "3-D segmentation of medical structures by integration of ray-casting with anatomic knowledge," Computers & Graphics Vol.19, No.3, pp.441-449, 1995.

[8] M. N. Ahmed and A. A. Farag, "3D Segmentation and Labeling Using Unsupervised Clustering for Volumetric Measurements on Brain CT Imaging," proceedings of ANNIE '96, 1996.

[9] M. Bomans, K. H. Hoehne, U. Tiede and M. Riemer, "3-D Segmentation of MR Images of the Head for 3-D Display,"

IEEE Transactions on Medical Imaging Vol.9, No.2, pp.177-183, Jun. 1990.

[10] K. H. Hoene and W. A. Hanson, "Interactive 3D Segmentation of MRI and CT Volumes using Morphological Operations," Journal of Computer Assisted Tomography, Vol.16, No.2, pp.285-294, 1992.

[11] S. W. Zucker and R. A. Hummel, "A three-dimensional edge operator," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence Vol.3, pp.324-331, May, 1981.

[12] P. S. P. Wang and Y. Y. Zhang, "A Fast and Flexible Thinning Algorithm," IEEE Transactions on Computers Vol.38, No.5, pp.741-745, 1989.

[13] J. Jaeger, "3D HeartView," Computer Graphics Topics(CG Topics), Report of the INI-GraphicsNet Vol. 4, pp. 6-7, 1997.

[14] R. Westermann and T. Ertl, "A Multiscale Approach to Integrated Volume Segmentation and Rendering," Proceedings of EUROGRAPHICS '97, pp.117-129, 1997.

[15] J. Sijbers, M. Verhoye, P. Scheunders, A. V. Linden, D. V. Dyck, and E. Raman, "Watershed based segmentation of 3D MR data for volume quantization," Magnetic Resonance Imaging Vol.15, No.6, pp.679-688, 1997.

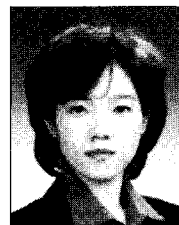
[16] X. Yu and J. yla-Jaaski, "Interactive Surface Segmentation for Medical Images," Proceedings of SPIE on Application of Digital Image Processing Vol.2564, pp.519-527, 1995.



배 소 영

e-mail : sybae@lge.com
 1997년 이화여자대학교 전자계산학과 졸업(학사)
 1999년 이화여자대학교 대학원 컴퓨터학과 (공학석사)
 1999년~현재 LG전자기술원 정보기술연구소 주임연구원

관심분야 : 의료영상처리, 음향 정보 처리 등



최 수 미

e-mail : smchoi@sejong.ac.kr
 1993년 이화여자대학교 전자계산학과 졸업(학사)
 1995년 이화여자대학교 대학원 전자계산학과 (이학석사)
 2001년 이화여자대학교 대학원 컴퓨터학과 (공학박사)

2001년~2002년 이화여자대학교 컴퓨터 그래픽스/가상현실 연구센터 연구교수

2002년~현재 세종대학교 소프트웨어공학과 전임강사

관심분야 : 비주얼 시뮬레이션, 형상 모델링, 가상·증강 현실 등



최 유 주

e-mail : choirina@mm.ewha.ac.kr

1989년 이화여자대학교 전자계산학과
졸업 (학사)

1991년 이화여자대학교 대학원 전자계산
학과 (이학석사)

1991년~1993년 (주)한국컴퓨터 기술 연구소
주임연구원

1994년~1999년 포스데이터주식회사 기술연구소 주임연구원

1999년~ 현재 이화여자대학교 대학원 컴퓨터학과 박사과정

관심분야 : 영상가시화, 형상복원, 가상현실 등



김 명 희

e-mail : mhkim@mm.ewha.ac.kr

1979년 서울대학교 계산통계학과 (석사)

1986년 독일 괴팅겐대학교 전자계산학과
(박사)

1987년~현재 이화여자대학교 컴퓨터학과
교수

관심분야 : 영상가시화, 시뮬레이션 및 가상현실 등