

계층적 Shrink-Wrapping 알고리즘을 이용한 등밀도면의 재구성

(Iso-density Surface Reconstruction using Hierarchical
Shrink-Wrapping Algorithm)

최영규[†] 박은진^{**}
(Young-Kyu Choi) (Eun-Jin Park)

요약 본 논문에서는 입력 볼륨 데이터와 출력 메쉬 데이터에서 모두 계층성을 지원하는 새로운 등밀도 표면의 재구성 방법을 제안한다. 제안된 방법은 먼저 입력 볼륨 데이터로부터 3차원 팽창 필터를 사용하여 볼륨 피라미드라 불리는 볼륨의 계층구조를 만든다. 볼륨 피라미드가 만들어진 후 해상도가 최저인 피라미드의 최상단 볼륨에서부터 셀경계표현 방법을 이용하여 조각한 초기 메쉬를 생성한다. 이러한 메쉬를 반복적으로 변형하여 $O(3)$ -인접성 조건하에서 추출한 등밀도점을 잘 근사하도록 하는데, 이를 위해 SWIS (표면축소기반의 등밀도면 재구성법[6]) 알고리즘에서 사용되었던 표면 축소 단계와 평활화 단계를 사용한다. 또한 최종등밀도면의 정밀한 표면을 만들 수 있도록 메쉬를 반복적으로 분할(subdivision)한다. 제안된 방법은 생성되는 표면이 표면의 압축이나 점진적인 전송 등과 같은 다중 해상도 알고리즘에 활용될 수 있다는 장점이 있다.

키워드 : 등밀도면 재구성, 다중해상도, 셀경계 표현, 표면축소포장 알고리즘

Abstract In this paper, we present a new iso-density surface reconstruction scheme based on a hierarchy on the input volume data and the output mesh data. From the input volume data, we construct a hierarchy of volumes, called a *volume pyramid*, based on a 3D dilation filter. After constructing the volume pyramid, we extract a coarse base mesh from the coarsest resolution of the pyramid with the Cell-boundary representation scheme. We iteratively fit this mesh to the *iso-points* extracted from the volume data under $O(3)$ -adjacency constraint. For the surface fitting, the shrinking process and the smoothing process are adopted as in the SWIS (Shrink-wrapped isosurface) algorithm[6], and we subdivide the mesh to be able to reconstruct fine detail of the *isosurface*. The advantage of our method is that it generates a mesh which can be utilized by several multiresolution algorithms such as compression and progressive transmission.

Key words : isosurface reconstruction, multi-resolution, cell-boundary representation, and shrink-wrapping algorithm

1. 서론

CT나 MRI와 같은 단층촬영 장치에 의해 추출된 볼륨 데이터의 가시화를 위해 사용되는 가장 대표적인 방법이 표면기반 렌더링(Surface based rendering)인데, 이는 볼륨 데이터에서 가시화하고자 하는 표면(iso-surface)을 먼저 추출해 내고 이를 렌더링하는 방법이다. 이들 방법은 볼륨정보의 실감있는 렌더링 영상만을 제공하는 볼륨기반 렌더링(Volume-based rendering 또는 Volume rendering)[1]과는 달리, 표면모델을 추출할 수 있으므로 렌더링목적 외에도 체적의 계산 등과 같은 볼륨에 대한 여러 가지 연산이 가능하여 의료영상분야

[†] 종신회원 : 한국기술교육대학교 정보기술공학부 교수
ykchoi@kut.ac.kr

^{**} 학생회원 : 한국기술교육대학교 전기전자공학과
ejinpark@kut.ac.kr

논문접수 : 2008년 5월 29일
심사완료 : 2009년 8월 24일

Copyright©2009 한국정보과학회 : 개인 목적이나 교육 목적일 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이 때, 사본은 상업적 수단으로 사용할 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와 출처를 반드시 명시해야 합니다. 이 외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송 등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 얻고 비용을 지불해야 합니다.

정보과학회논문지: 시스템 및 이론 제36권 제6호(2009.12)

등에서 다양하게 활용되고 있다. 이러한 등밀도면의 재구성을 위한 최초의 연구는 Herman과 Liu에 의해 보고 되었으나[2], 현재 가장 대표적인 방법이 Lorensen과 Cline이 제안한 마칭 큐브(Marching Cube) 알고리즘[3]이다.

마칭큐브는 서브복셀 연산(sub-voxel operation)을 통해 복셀내 정밀도의 매우 정교한 등밀도 표면을 만들어 내는데, 현재 다양한 모델링 분야에서 가장 많이 이용되고 있는 논문 중의 하나이다. 그러나 일반적으로 너무 많은 표면조각을 만들고, 표면에 크랙이 발생할 수 있으며 표면 생성시 모호성이 발생할 수 있다는 등의 약점도 함께 가지고 있다. 특히 입력 볼륨데이터에서 직접 생성되는 등밀도 표면은 일반적으로 매우 많은 삼각형 표면조각을 포함하게 되고 형태가 바람직하지 않은(가늘고 긴) 삼각형 표면조각을 다수 포함한 메쉬 데이터를 생성하게 된다. 이러한 메쉬 데이터들은 표면조각 감축(decimation)이나, 표면 평활화, 또는 재샘플링(resampling)등의 후처리 기법을 통해 개선할 수 있으나, 이러한 후처리법들은 일반적으로 많은 메모리와 처리시간 소비하게 된다[4,5].

이러한 문제를 해결하기 위해 Labsik등은 계층적인 등밀도 표면 생성방법을 제안하였다[6]. 먼저 볼륨 데이터를 여러 단계에 걸쳐 다운스케일 하여 계층구조로 바꾸고, 가장 조악한(coarse) 단계에서 기본메쉬(base mesh)를 만들었으며, 이를 다음 단계에서 보다 정밀하게 근사하는 과정을 여러 차례 반복하여 원래의 볼륨데이터에서의 정밀한 표면을 생성하고자 하였다. 등밀도면 생성에서 이러한 계층적인 특성은 매우 중요한데, 볼륨의 형태를 빨리 파악하고 싶은 경우 해당 밀도의 수많은 표면을 모두 생성하지 않고도 빠르게 대략적인 표면을 추출해서 가시화할 수 있는 등의 목적으로 사용할 수 있다.

본 논문에서는 이러한 볼륨데이터로부터 계층적인 방법으로 표면을 생성하는 새로운 알고리즘을 제안한다. 특히 제안된 방법은 기존의 Shrink-Wrapping 알고리즘을 이용해 단층영상으로부터의 등밀도표면을 재구성하는 방법[7]을 계층적으로 확장한 것으로, [7]에서와 같이 조악한 단계에서 기초 메쉬를 추출하고 이를 다음의 정밀한 단계에서 연속적으로 맞추어 나가는(fitting) 방법을 사용한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서 제안된 방법과 관련된 기존의 연구를 소개한다. 3장에서는 계층적인 볼륨데이터를 만들고 셀경계표현(cell-boundary representation)[8]으로 초기메쉬를 생성하는 방법을 설명하며, 4장에서는 다단계 축소포장에 의한 등밀도 표면의 근사방법을 제안한다. 5장에서 실험결과를 보이고 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다.

2. 제안된 방법의 배경

단층영상에서부터 등밀도면을 추출하는 가장 대표적인 방법인 마칭큐브는 면(face)으로 인접하는 복셀간의 밀도를 선형으로 근사하는 서브복셀 연산을 통해 등밀도점을 추출하고 토폴로지(topology)에 따른 연결법을 제안하여 이들 등밀도점으로부터 직접적으로 표면 조각을 생성한다. 이 논문이 발표된 후 Dürst는 마칭큐브의 14가지 토폴로지 중 하나의 토폴로지에서 표면 결정의 모호성이 존재하며, 이에 따라 표면에 구멍이 생기는 문제를 제기하였는데[9], 최근까지 다양한 방법들이 이를 해결하기 위해 제안되고 있다[9-12]. Nielsen은 이러한 모호성이 큐브의 어느 한 면의 4개 에지가 모두 등밀도 표면에 의해 절단되는 경우에 발생한다는 것을 밝히고, 안장점(saddle point)의 개념을 도입하여 해결하고자 하였으며[10], Natarajan[11]은 마칭큐브에 추가적으로 표면 결정의 모호성이 발생함을 제기하고 안장점의 개념을 확장하는 방법으로 해결하고자 하였다. 최근 Lopes [12]등도 셀 안에 작은 수의 열쇠점(key point)을 추가하여 셀 내부의 구조를 보다 정확히 근사하고자 하였다. 그러나 이들은 기본적으로 하나의 큐브 내부의 구조에 대한 예측을 보다 정확하게 하고자 하는 것으로, 표면에 크랙이 발생하는 문제가 완화될 수는 있지만 표면에 삼각형 조각이 매우 많이 발생하는 것은 해결하지는 못한다. Newman등은 이러한 모호성 문제를 포함하여 마칭큐브와 관련하여 지금까지 발표된 다양한 문헌들을 정리한 논문을 발표하였다[13].

마칭큐브가 단일해상도 알고리즘인데 비해 이와 다른 접근법으로 Labsik등은 다단계 등밀도 표면 생성방법을 제안하였는데[6], 계층적인 볼륨 데이터를 만들어 가장 조악한 단계에서 먼저 기본 메쉬를 만들었고, 이를 다음 단계에서 보다 정밀하게 변환하는 방법을 사용하였다. 이러한 다해상도(multi-resolution)적인 접근은 마칭큐브와 같은 단일해상도 알고리즘에 비해 큰 장점을 갖는데, 필요에 따라 볼륨의 표면의 상세도를 달리하여 제공할 수 있다는 것이 매우 중요한 장점이 된다. 예를 들어, 볼륨의 형태만 빨리 파악하고 싶은 경우 해당 밀도의 수많은 표면을 모두 생성하지 않고도 저해상도에서 빠르게 표면을 추출해 가시화 할 수 있으며, 고해상도 표면이 필요한 경우 저해상도로 추출된 표면을 단계별로 변환하여 단일해상도 알고리즘과 같은 정밀도를 나타낼 수 있게 된다. 그러나 이 방법에서도 초기 메쉬의 생성방법으로는 마칭큐브를 사용하였고, 따라서 표면에 크랙이 발생할 가능성은 여전히 남아 있다. 또한 표면의 변환 과정에서 메쉬 점점을 이동시킬 때, 각 점점의 법선벡터를 유추하는데 곡률법선벡터(curvature normal

vector)[14]를 정규화하는 방법을 이용하였고, 이 벡터의 가상 등밀도면 통과방향을 유추하기 위해 거리함수(distance function)을 사용하여 이것의 부호를 이용해 법선 벡터의 방향이 안쪽에서 바깥쪽인지 그 반대인지를 판단하였다. 따라서 매우 복잡하고 계산량이 많고 최종 표면을 만들기 전에 가상의 등밀도면을 이용한다는 것 등이 바람직하지 않은 특성을 포함한다.

본 논문에서는 볼륨 데이터로부터 다단계적인 접근법으로 등밀도 표면을 생성하는 새로운 방법을 제안한다. 본 논문의 기본적인 흐름은 Labsik이 제안한 방식을 따르는데, 초기메쉬를 생성하는 방법과 메쉬를 변형하여 보다 정밀한 표면을 구하는 방법에서 새로운 접근법을 사용한다. 특히 기존에 제안했던 Shrink-Wrapping 알고리즘[7]을 다단계적으로 확장하는 것이 그 핵심이 되는데, 초기 메쉬의 생성을 보다 안정적으로 하며, 표면의 근사에서 보다 간단하고 안정적인 알고리즘을 제공한다. 특히 인접성의 확장을 통해 마칭큐브와 같은 기존의 방법에서 사용된 데이터에 비해 더 많은 정보를 표면모델링에 이용함으로써 이론적으로 보다 정밀한 표면을 생성할 수 있도록 한다.

3. 계층적 볼륨데이터 생성 및 초기메쉬 추출

Herman과 Lieu[2]는 3차원 공간을 서로 직교하는 3가지 방향(예를 들면 x, y 및 z축 방향)의 평행판들에 의해 분할하고 이것을 *큐베릴 공간(Cuberille space)*이라 정의하였다. 이러한 큐베릴 공간상의 하나의 체적소가 *복셀(voxel)*로 정의되는데, 예를 들어 단층영상의 형태로 주어지면 볼륨데이터에서 영상내의 각 화소는 높이를 갖는 하나의 체적소, 즉 복셀로 생각될 수 있다. 제안된 방법에서는 먼저 이러한 복셀의 형태로 주어지는 볼륨데이터를 정밀도에 따른 다단계의 계층적인 형태로 변환한다. 이후 가장 조악한 단계에서 초기 메쉬를 생성하게 된다.

3.1 계층적 볼륨 데이터의 생성

주어진 볼륨데이터는 연속적으로 다운 샘플링하여 정밀도가 점점 감소되는 다단계의 볼륨데이터로 변환한다. 이를 위해 먼저 볼륨 데이터와 볼륨 피라미드의 개념을 정의한다.

정의 1. 볼륨 데이터(Volume Data) : 단위 복셀의 각 방향의 길이가 동일한 정규적인 그리드의 큐베릴 공간상에서 정의된 밀도 데이터는 이산 밀도함수(discrete density function) $f^0 : G^0 \rightarrow DN$ 으로 표현할 수 있는데, 이는 다음과 같이 그리드 G^0 상의 임의의 복셀에 대해 밀도(density) 값을 대응시키는 함수로 정의된다.

$$G^0 = \{(x_i, y_j, z_k) | 0 \leq i < n_x, 0 \leq j < n_y, 0 \leq k < n_z\} \quad (1)$$

이때, n_x, n_y 와 n_z 는 각각 x, y, 및 z의 각 축 방향으로의 최대 그리드의 개수를 나타내고, $h_x = h_y = h_z = h$ 는 각 방향의 단위 그리드(정규 그리드라 가정함)의 크기를 나타내며, $x_i = x_0 + ih_x, y_j = y_0 + jh_y$ 및 $z_k = z_0 + kh_z$ 는 각 복셀의 위치를 나타낸다. 이러한 이산 밀도함수 f^0 를 *레벨(level) 0에서의 볼륨데이터(Volume data)*라고 정의한다.

단층 영상으로 주어지는 밀도 데이터는 볼륨데이터의 좋은 예가 되는데, 다운 샘플링(down sampling)이 이루어지기 전의 원 데이터가 f^0 가 된다. 일반적으로 3차원 공간에서 표면적은 반지름의 제곱에 비례하기 때문에, 각 축의 방향으로 복셀의 개수가 1/n배로 줄어들게 되는 경우 추출되는 표면조각의 개수는 보통 $1/n^2$ 배로 줄어들게 된다. 볼륨데이터를 1/2로 다운 샘플링 하고자 하는 경우 볼륨내에서 큐브를 이루는 8개의 인접한 복셀 값을 이용하여 하나의 복셀값을 만들게 되는데, Labsik은 여기에 3차원 필터의 개념을 적용하여 f^0 에 대한 다운 샘플링된 볼륨을 구하였다. 이것은 G^0 상에서 큐브를 이루는 인접한 8개의 복셀의 밀도 값에 대해 3차원 필터를 적용하여 이를 대표하는 하나의 밀도값을 추출하는 것으로, 예를 들어, 박스필터(box filter)라고도 불리는 평활필터(low pass filter)를 사용하는 경우 8개의 밀도 값의 평균을 다운 샘플링된 값으로 사용할 수 있다. 이러한 개념은 다양하게 확장이 가능한데, 밀도 값들을 정렬하여 중앙값을 사용하는 미디언필터(median filter) 등 영상처리에서 일반적으로 사용되는 다양한 필터를 3차원으로 확장하여 적용할 수 있다.

정의 2. 볼륨 피라미드(Volume Pyramid) : 볼륨데이터 f^0 을 다운 샘플링한 축약된 볼륨데이터 f^1 는 G^1 상에서 정의되어지는데, G^1 의 정밀도는 G^0 에 비해 x, y, 및 z 각 축 방향으로 절반으로 줄어든다. 레벨 1의 그리드 G^1 상에서 정의된 축약된 볼륨데이터 f^1 는 G^{l-1} 에서 정의된 f^{l-1} 에 3차원 필터(filter)의 컨벌루션(convolution)을 적용하여 구해지며, 그리드 G^l 의 정밀도는 각각 $\lfloor 2^{-l}n_x \rfloor, \lfloor 2^{-l}n_y \rfloor$ 와 $\lfloor 2^{-l}n_z \rfloor$ 가 된다. 이때, n_x, n_y 와 n_z 는 각각 f^{l-1} 의 각 방향의 최대 정밀도이다. 볼륨 데이터 f^0 에서부터 이와 같은 방법으로 연속적으로 축약된 볼륨 데이터 $\{f^0, f^1, f^2, f^3, \dots, f^l\}$ 를 *볼륨 피라미드(Volume Pyramid)*라고 정의하고, l을 볼륨 피라미드의 *높이(height)*라고 정의한다.

이렇게 f^0 으로부터 볼륨 피라미드를 생성하기 위해서 여러 가지를 종류의 필터를 사용할 수 있는데, 앞에서 설명한 평활 필터나 미디언 필터 이외에도 2차원 영상 처리에서 사용하는 다양한 필터를 3차원으로 확장하여

적용할 수 있다. 이러한 필터의 선택은 볼륨 피라미드의 특성을 결정하고 메쉬의 형성에 큰 영향을 미치므로 목적에 맞게 적절히 선택하여야 한다. 제안된 방법에서는 볼륨 데이터에서 볼륨 피라미드를 먼저 만들고, 최상위 볼륨에서 먼저 세밀하지 않은 표면을 만들어 이를 아래 레벨로 내려가면서 표면의 정밀도를 점점 높여가는 방법을 취한다. 이때 정밀하지 않은 상위 볼륨에서 추출한 초기 메쉬에서 정밀한 볼륨에서는 나타나는 어떤 부분에 대한 표면의 골격이 누락되면 그 다음 단계에서 그 부분에 대한 복원되지 쉽지 않다는 문제가 발생하는데, 이는 볼륨데이터에 대한 다단계 접근법에서 항상 발생하게 되는 문제이다[6].

일반적으로 볼륨데이터의 등밀도면 모델링에서 표현하고자 하는 물체 영역은 배경 영역에 비해 밀도가 높은 복셀 값을 갖는다고 볼 수 있는데, 이를 고려하면 초기표면을 생성하는 단계에서 원래의 등밀도 표면보다 큰 부피를 갖는 표면을 생성하는 것이 더 바람직하게 된다. 이것은 그림 1에서 잘 보여주고 있는데, 입력 볼륨 데이터 (a)에 대한 필터 처리에서 주어진 등밀도 문턱치 T_d 에 대해 원래의 데이터에는 존재하는 등밀도 표면이 (b)와 같이 평활필터를 적용한 경우 누락되는 경우가 많이 발생할 수 있다. 이러한 경우는 특히 밀도 값이 등밀도 경계치에 인접한 영역들에서 많이 발생하는데, 이 경우 초기메쉬 표면에 원하지 않은 구멍(hole)이 발생할 가능성이 많아지게 되고, 따라서 이러한 문제를 줄일 수 있는 3차원 필터를 채택하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 [6]에서 사용한 것과 같은 팽창필터(dilation filter)를 사용하였다. 이 필터는 다음과 같이 정의되는데, 그림 1의 (c)에서와 같이 입력 데이터의 등밀도면을 더 많이 포함할 수 있도록 한다.

$$f^i(x_i, y_j, z_k) =$$

$$MAX\{f^{i-1}(x_i, y_j, z_k) | i' \in \{i, i+1\}, j' \in \{j, j+1\}, k' \in \{k, k+1\}\} \quad (2)$$

이때 i, j 및 k 는 2'의 배수이다. 그림 2는 다양한 3차원 필터를 적용하였을 때 발생할 수 있는 표면의 문제



(a) 평활필터 후



(b) 미디언필터 후

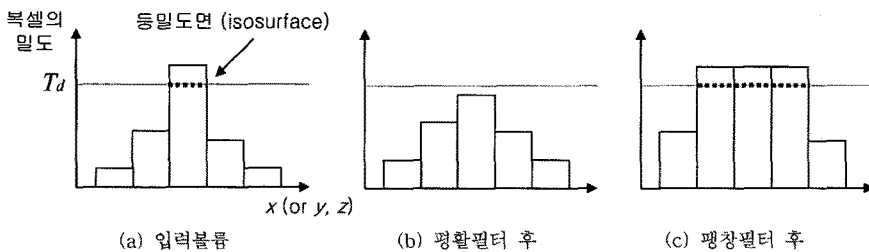


(c) 팽창필터 후

그림 2 human aneurysm 데이터(www.volvis.org)에 대해 레벨 2로 축소된 볼륨에서의 셀경계방식에 의한 초기메쉬를 생성 예

를 보여주고 있는데, 평활필터나 미디언 필터를 적용한 경우 (a)와 (b)에서와 같이 초기 메쉬에 구멍이 발생할 가능성이 많아지게 된다(이러한 구멍은 마칭큐브를 사용해도 동일하게 발생함). 이에 비해 팽창 필터를 적용하는 경우 그림 2의 (c)에서 볼 수 있듯이 구해지는 초기 메쉬의 크기가 보다 커져서 표면의 구멍이 발생하지 않는 것을 알 수 있는데, 원래의 표면의 골격을 유지하는 보다 안정적인 초기 메쉬가 만들어지게 된다.

이와 같이 입력 볼륨데이터 f^0 에 대해 팽창 필터링을



(a) 입력볼륨

(b) 평활필터 후

(c) 팽창필터 후

그림 1 입력 볼륨데이터에 대한 필터처리 예

적용하여 레벨 1의 볼륨 데이터 f^1 을 만들고, 같은 방법으로 연속적으로 적용하여 f^2, f^3 등 계층적인 볼륨 데이터를 생성하여 볼륨 피라미드를 생성하게 된다. 이러한 볼륨 피라미드는 원 데이터 f^0 와 적용한 3차원 필터에 의해서만 결정되고, 표현하고자 하는 밀도 문턱치 T_d 에 상관없으며, 따라서 T_d 가 변하더라도, 즉, 같은 데이터에 대해 추출하고자 하는 등밀도 표면이 달라지더라도 동일한 볼륨 피라미드를 사용할 수 있게 되므로 렌더링 시간 향상에 도움이 된다.

3.2 초기메쉬의 생성

볼륨 피라미드가 만들어지면 초기 메쉬는 가장 높은 레벨에서 구하게 된다. 초기 메쉬의 생성을 위해 다양한 표면 재구성 알고리즘을 적용할 수 있는데, Labsik은 마칭큐브를 사용하였다. 서브복셀 연산을 통해 정밀한 표면을 생성하는 이 방법은 표면의 정의 과정에서 모호성이 발생하고, 이에 따라 크랙이 발생할 수 있다는 문제가 있다. 본 연구에서 초기 메쉬 생성 방법의 바람직한 특성을 고찰해 본 결과 다음과 같은 요인들이 고려되어야 함을 알 수 있었다.

- **안정성(Robustness):** 어떠한 입력이 들어오더라도 표면조각의 정의에서 모호성이 없이 항상 안정된 결과를 낼 수 있고 표면에 크랙이 발생하지 않아야 한다.
- **유일성(Uniqueness):** 같은 입력 데이터에 대해서는 항상 동일한 결과를 만들어 주어야 한다.
- **근사성(Approximation):** 초기 메쉬로는 지나치게 자세한 표면이 만들어질 필요는 없지만 실제표면을 가능한 한 잘 근사하여야 한다. 이를 통해 실제 표면과 초기 메쉬가 항상 일정한 수준 이하의 오차를 나타낼 수 있어야 한다.
- **단순성(Simplicity):** 초기 메쉬 표면 조각 수는 가능한 한 적은 것이 바람직하다.

이러한 고찰을 통해 본 논문에서는 셀 경계 표현(Cell-boundary representation) 방법을 채택하였다[8]. 이 방법은 어떤 입력에 대해서도 안정적이며 유일한 표면을 만드는데, 특히 마칭큐브에서 발생하는 표면 정의 과정의 모호성이나 크랙이 발생하지 않는다. 또한 볼륨데이터의 등밀도면을 잘 근사하는 메쉬를 만들어 주고 표면 맞춤(fitting) 등의 후처리 과정에서 지역탐색을 가능하게 하며, 표면조각의 개수도 마칭큐브보다 훨씬 적게 발생시키는 특성을 갖는다. 이러한 셀경계 알고리즘은 3차원 큐베릴 공간이 주어지면 먼저 이를 **셀 공간(Cell Space)**으로 변환하고 이 공간상의 셀들을 기반으로 표면을 생성하는데, 그림 3은 이 방법에서 셀의 유형에 따라 생성되는 표면의 종류를 보여주고 있다.

볼륨 피라미드의 최상위 레벨 i 에서의 볼륨데이터 f^i 이 주어지면 셀경계 알고리즘으로 초기메쉬 M^i 를 생성

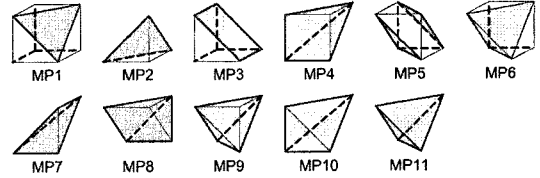


그림 3 셀경계 표현의 표면 생성 종류[8]

한다. 이 메쉬의 점점들은 서브복셀 연산을 하지 않으므로 항상 복셀 중심이고, 따라서 마칭큐브에 비해 다소 정밀하지 않은 표면 근사표면이라 할 수 있다. 그러나 마칭큐브와는 달리 표면 정의의 모호성이 전혀 없어 알고리즘이 매우 안정적으로 동작한다. 또한 동일한 입력에 대해 메쉬 표면의 유일성이 보장되고, 마칭큐브에서 발생하는 표면의 크랙이 전혀 발생하지 않는다. 또 셀경계 표현에서의 각 메쉬점들은 항상 하나의 셀 크기 이내의 거리에 하나이상의 등밀도점이 존재할 수 밖에 없는데, 이러한 특징은 표면 개선을 위한 후처리 과정에서 지역탐색만으로 최적의 결과가 가능하게 한다. 마지막으로 이 방식에 의한 표면조각의 개수도 마칭큐브에 비해 훨씬 적어서 앞에서 고찰해 본 초기메쉬의 바람직한 특징을 매우 잘 만족시킨다. 그림 2의 (c)는 human aneurysm 데이터(3T MRT Time-of-Flight Angiography dataset of a human head)에 대해 밀도 문턱치를 23으로 설정하고 셀 경계 표현으로 표면을 생성한 결과를 보여주고 있는데, 이러한 특징들을 잘 나타내고 있다.

4. 다단계 축소포장에 의한 등밀도 표면 재구성 알고리즘

일단 초기 메쉬 M^i 이 추출되면 이를 등밀도면으로 투영(projection)하여 보다 표면을 세밀하게 근사하도록 하는데, 이 결과는 다시 다음 레벨에 반복적으로 적용하여 점점 더 표면이 입력 볼륨데이터 f^0 의 등밀도면을 잘 나타내도록 변환하는 과정이 이어진다. 볼륨 피라미드상의 하나의 레벨 i 에서 초기 메쉬 M_{init}^i 와 볼륨데이터 f^i 가 주어졌다고 하자. 먼저 M_{init}^i 를 변형하여 f^i 의 등밀도면을 보다 잘 근사하는 표면인 M_{fit}^i 를 구하는 과정이 처리되어야 한다. 제안된 방법에서는 이를 위해 표면 축소포장(shrink-wrapping) 알고리즘을 이용한 등밀도면의 재구성 방법[7]을 채택하였다. 또한 레벨이 0이 아닌 경우($i \neq 0$)는 다음 레벨에 대한 초기 메쉬를 생성하는 과정이 필요한데, M_{fit}^i 를 이용하여 $i-1$ 레벨에서의 처리를 위한 초기 메쉬 M_{init}^{i-1} 를 구해야 한다. 본 장에서는 먼저 표면의 축소포장을 통한 메쉬 근사과정

($M_{init}^i \rightarrow M_{jit}^i$)을 설명하고, M_{jit}^i 을 이용하여 다음 레벨의 초기메쉬 M_{init}^{i-1} 을 생성하는 방법($M_{jit}^i \rightarrow M_{init}^{i-1}$)을 기술한다.

4.1 표면 축소포장 알고리즘을 이용한 표면의 맞춤

등밀도면의 재구성을 위한 표면 축소포장(shrink-wrap-ping) 알고리즘에서는 단층영상에서 마칭큐브와 같이 직접 표면조각을 생성하지 않고 먼저 등밀도점을 추출한다. 이러한 등밀도점은 추출하고자 하는 표면을 대표하는데, 초기 메쉬의 정점들을 등밀도점 쪽으로 이동하는 축소포장 과정을 반복하여 최종적으로 등밀도점을 잘 표현하는 메쉬로 변형하게 된다. 이를 위한 전체 과정은 초기메쉬의 생성, 등밀도점 추출, 초기메쉬에 축소와 평활화의 적용으로 나눌 수 있지만, 이를 본 논문에서와 같은 다단계 블록에서의 모델링에 적용해 보면, 초기메쉬 M_{init}^i 는 주어지게 되고, 따라서 등밀도점 추출과 초기메쉬에 축소와 평활화의 적용과정이 적용되어야 한다.

먼저, 레벨 i 에서 초기메쉬 M_{init}^i 와 블록데이터 f^i 가 주어졌고, 추출하고자 하는 표면의 밀도가 T_d 라고 하자. 밀도가 T_d 이상인 복셀을 내부 복셀 v^1 , 그렇지 않은 복셀을 외부 복셀 v^0 이라 하면, 등밀도 점은 인접한 한 쌍의 복셀이 각각 v^0 와 v^1 인 경우에 발생하게 된다. 이러한 등밀도점(iso-density point, 또는 Isopoint) $p_{r_d}(v^0, v^1)$ 는 두 복셀의 밀도를 선형적으로 보간하여 다음과 같이 정의된다.

$$p_{r_d}(v^0, v^1) = p(v^0) + (p(v^1) - p(v^0)) \frac{T_d - g(v^0)}{g(v^1) - g(v^0)} \quad (3)$$

이때 $p(v)$ 는 복셀 v 의 중심의 좌표를 나타내고, $g(v)$ 는 v 의 밀도를 나타낸다. 임의의 복셀에 대해 이러한 등밀도점은 인접성의 정의에 의해 세 가지로 나타나게 되는데, 먼저 두 복셀이 면으로 접하는 $O(1)$ -인접성을 이용하는 경우 하나의 복셀과 관련된 등밀도점의 최대 개수는 6개가 된다. 그러나 변(edge)을 공유하는 복셀들도 "인접하다"고 정의하는 $O(2)$ -인접성의 경우는 큐브의 변의 개수(12)만큼의 등밀도점이 추가로 생성될 수 있으며, $O(3)$ -인접성의 경우 8개 꼭지점(vertices)을 공유하는 복셀까지 이웃으로 판단되어 하나의 복셀과 관련해서 최대 26개의 등밀도점이 발생하게 된다. 블록 피라미드의 레벨 i 에서의 등밀도 점 모델 $P_{iso}^i(T_d)$ 는 f^i 의 모든 인접복셀에서 추출한 등밀도점의 집합으로 정의된다.

이러한 개념을 마칭큐브 알고리즘에 적용하면, 마칭큐브에서 발생하는 모든 표면조각의 정점들은 $O(1)$ -인접의 등밀도 점 모델상에서만 이루어진다. 즉 인접한 두 복셀이 면으로 만나는 경우에만 등밀도점이 생성되며 이를

만을 표면조각 생성에 사용하는 것이다. 이에 비해 제안된 방법에서는 이를 확장하여 변으로 인접하거나($O(2)$) 꼭지점으로 인접하는($O(3)$) 두 복셀간에서도 등밀도점을 추출하여 표면재구성에 사용할 수 있다. 이렇게 할 경우 표면재구성에 사용되는 기준점(등밀도점)의 수가 마칭큐브에 비해 많아지고, 따라서 마칭큐브에 비해 보다 정확한 표면을 만들 수 있는 이론적 근거를 제공한다.

레벨 i 에서 $P_{iso}^i(T_d)$ 가 구해지면 초기메쉬 M_{init}^i 를 변형하여 보다 $P_{iso}^i(T_d)$ 를 잘 근사하도록 하는 과정들이 이어지는데, 이것은 메쉬 정점의 축소(shrinking)와 평활화(smoothing) 과정으로 나누어진다.

축소 과정은 메쉬의 각 정점들을 $P_{iso}^i(T_d)$ 내의 등밀도점들의 방향으로 이동시키는 과정이다. 즉, M_{init}^i 를 구성하는 각 정점 q 에 대해 $P_{iso}^i(T_d)$ 의 모든 등밀도점까지의 거리를 계산하여 가장 가까운 점을 찾고 그 방향으로 정점을 이동시킨다. 메쉬 정점 q 에 대해 최단 등밀도점 p_{nrst} 가 찾아지면 q 를 그 방향으로 이동하는데 이것은 M_{init}^i 를 변형시키게 되고, 메쉬가 $P_{iso}^i(T_d)$ 로 표현되는 등밀도면(iso-surface)을 보다 잘 근사하도록 한다. 이러한 메쉬 정점 q 의 이동은 다음과 같이 선분 $\overline{qp_{nrst}}$ 상의 임의의 위치로 옮겨지게 된다.

$$q \leftarrow q + \alpha(p_{nrst} - q) \quad (4)$$

이때, 계수 α 는 이동의 정도를 나타내는데, 이 값이 1이면 q 를 바로 p_{nrst} 로 이동하는 것을 의미하며, 이것은 같은 등밀도점에 여러 개의 메쉬 정점이 모이게 될 수 있으므로 적절하지 않다. 또한 이 값이 너무 작으면 초기 메쉬가 등밀도점으로 수렴해 가는 속도가 느려져 처리시간이 많이 걸릴 수 있다는 단점이 있는데, 실험적으로 0.5 정도가 적절하였다.

메쉬 정점의 축소과정에서 적당한 α 값을 사용 하더라도 비교적 등밀도점이 적게 분포되어 있는 부분에서는 하나의 측정점으로 여러 정점들이 몰리는 경우가 발생하는데, 이러한 현상은 전체 표면의 품질을 떨어뜨리게 된다. 즉, 복잡한 표면에 많은 정점들이 사용되는 것은 의미가 있지만 일반적으로 복잡도가 비슷한 표면의 경우에는 전체 표면에 대해 골고루 메쉬의 정점들이 분포하는 것이 더 바람직하며, 따라서 이러한 메쉬 정점들이 국부적으로 하나의 등밀도점들로 편중시키는 결과를 완화시키기 위하여 메쉬 평활화 과정이 수행된다. 이를 위해, 먼저 각 메쉬 정점 q 에 대해 예지로 연결된 모든 인접 정점을 구하고, 이들로부터 다음 식과 같이 중심벡터 v_{mid} 를 구한다.

$$v_{mid} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (q_{nbr}^j - q) \quad (5)$$

메쉬 정점 q 를 이동벡터 v_{mid} 만큼 단순하게 이동하는 것은 정점들의 평활화는 되지만 표면이 축소되는 현상을 발생하는데, 평활화가 처리될 때 마다 물체의 크기가 점점 줄어드는 문제점을 일으키게 된다. 따라서 이러한 정점의 이동은 표면의 접선 방향으로만 발생하도록 최종 이동 벡터 u 를 다음과 같이 구하고, 메쉬 정점 q_i 를 다음과 같이 평활화 한다.

$$u = v_{mid} - (v_{mid} \cdot n) \tag{6}$$

$$q_i \leftarrow q_i + \lambda u \tag{7}$$

이때 n 은 메쉬 정점 q_i 의 법선 벡터로 인접 정점들에 의해 구해지는 삼각 표면의 법선벡터를 이용해 구해지며, λ 는 평활화의 정도(0~1)를 나타내는데, 이 값이 크면 보다 더 평활화 된 결과는 얻을 수 있으나 움푹 들어간 부분이나 튀어나온 부분의 모델링이 부자연스러워질 수 있고, 이 값이 너무 작으면 평활화의 효과가 줄어들게 된다. 보통 이 값은 0.2~0.4 정도로 사용하는데, 이렇게 축소된 메쉬를 평활화 함으로써 국부적으로 메쉬 정점들이 하나의 등밀도점에 몰리게 되는 현상을 크게 완화시킬 수 있다. 초기 메쉬 M_{init}^i 에 대해 축소와 평활화 과정을 반복하여 적용하면 레벨 i 의 최종 등밀도면 근사표면인 M_{fit}^i 이 구해진다.

4.2 다음 레벨의 초기메쉬 생성 방법

레벨 i 의 최종 등밀도 근사표면인 M_{fit}^i 에 대해 만약 $i \neq 0$ 이면 다음 레벨 $i-1$ 의 초기메쉬 M_{init}^{i-1} 을 만들어야 한다. 이를 위해 메쉬의 확장과 메쉬의 세분화(subdivision) 과정이 필요하다. 볼륨 피라미드의 생성시 레벨 $i-1$ 의 각 좌표 방향을 1/2로 축소하여 레벨 i 의 볼륨 데이터를 만들기 때문에 f^{i-1} 에 비해 f^i 가 각 축의 방향으로 1/2로 축소되어 있으며, 마찬가지로 레벨 $i-1$ 의 메쉬에 비해 M_{fit}^i 가 축소되어 있다. 따라서 M_{fit}^i 로부터 다음 레벨의 초기 메쉬 M_{init}^{i-1} 를 생성하기 위해서는 M_{fit}^i 의 각 정점을 각 축의 방향으로 먼저 두 배로 확대하여야 한다. 이 과정을 통해 메쉬의 크기는 레벨 $i-1$ 에 맞게 확대되었지만, 표면의 정밀도(표면조각의 수)는 동일하다. 따라서 한 단계 더 정밀한 표면을 만들기 위해서는 표면의 정밀도를 늘리는 과정이 필요하게 되며, 이는 메쉬의 세분화(subdivision)를 통해 얻을 수 있다. 현재까지 메쉬의 다양한 세분화 방법들이 소개되고 있는데[15-17], 본 논문에서는 Loop의 방법[15]을 사용하였다. 이 방법은 그림 4와 같이 삼각형의 각 변의 중심에 정점을 추가하여 하나의 삼각형 표면을 4개의 조각으로 분할하여 표면의 해상도를 증가시키는 방법으로 단순한 형태이지만, 제안된 방법이 세분화 후 반복적인 표면 축소포장 과정에 의해 자연스럽게 원래의

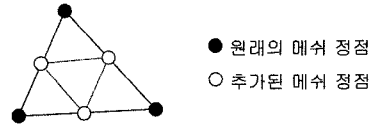


그림 4 메쉬의 세분화(subdivision) 방법

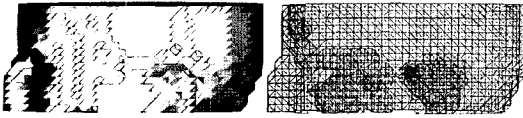
표면을 찾아가는 구조로 되어 있으며, 따라서 제안된 방법에서는 충분한 방법으로 판단되었다.

이전 레벨의 메쉬 M_{fit}^i 에 이러한 확대와 세분화 과정을 적용하여 최종적으로 다음 레벨의 초기 메쉬가 되는 M_{init}^{i-1} 를 구하게 된다. 이 메쉬에 4.1절에서 기술한 축소와 평활화 과정을 다시 반복하여 처리함으로써 보다 정밀한 표면을 구하게 되고, 입력 데이터와 같은 최 하단 레벨(레벨 0)에서 축소와 평활화 과정이 처리되면 최종적으로 볼륨 데이터의 등밀도 표면을 잘 근사하는 메쉬 M_{fit}^0 가 만들어진다.

5. 실험

제안된 방법은 Windows-XP 운영체제의 Pentium-PC에서 구현되었다. 모델링 알고리즘은 C++ 언어를 이용하여 작성하였으며, 렌더링을 위한 GUI는 OpenGL과 MFC를 이용해서 구현하였는데, 개발 환경으로는 Microsoft Visual Studio 6.0을 이용하였다.

그림 5는 의료영상 관련 알고리즘의 실험 위해 다양한 데이터를 제공하고 있는 Volvis 홈페이지(<http://www.volvis.org>)에서 구한 Head aneurysm 데이터에 대한 단계별 처리결과를 보여주고 있는데, 이 데이터는 256x320x8bit의 128프레임으로 구성되어 있다. 제안된 방법에서는 먼저 입력 볼륨을 볼륨 피라미드로 변환하였는데, 3장에서 설명한 팽창필터를 사용하였고, 세 단계(레벨 1, 2 및 3)의 볼륨을 생성하였다. 이때 등밀도 문턱치 T_d 는 20으로 설정하였고, 각 레벨에서 등밀도 점 모델을 추출하였는데, O(3)-인접성을 이용하였다. 초기 메쉬는 레벨 3의 볼륨 f^3 에 셀경계 알고리즘을 적용하여 추출하였고, 이는 표면 축소포장 알고리즘을 통해 보다 정밀한 표면을 변형되었는데, (a)는 초기 메쉬를 나타내고, (b)는 레벨 3의 초기메쉬에 대해 축소포장 알고리즘을 적용한 결과를 보여준다. (c)는 메쉬 (b)를 두배로 확대하고 세분화 과정을 거친 결과를 보여주고 있는데, (b)의 하나의 삼각형이 (c)에서 4개로 분할되고, 이러한 메쉬는 다음 레벨(레벨 2)의 입력 메쉬가 된다. (c)는 다시 레벨 2의 등밀도 점모델을 이용하여 (d)와 같이 축소포장되며, (e)와 같은 상세화 과정을 거쳐 (f)와 같이 동일한 축소와 평활화 과정이 반복적으로 적용되어 보다 정밀한 표면으로 변환된다. 이때, 상세한 레벨로 내



(a) CBM에 의한 초기메쉬 : L3



(b) 축소포장 알고리즘 적용 결과 : L3



(c) Subdivision후 : L2의 초기메쉬



(d) 축소포장 알고리즘 적용 결과 : L2



(e) Subdivision후 : L1의 초기메쉬

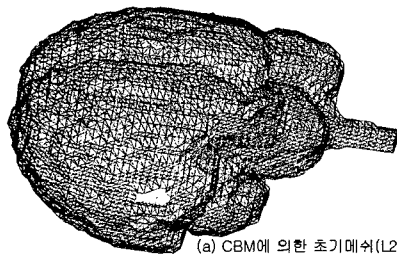


(f) 축소포장 알고리즘 적용 결과 : L1

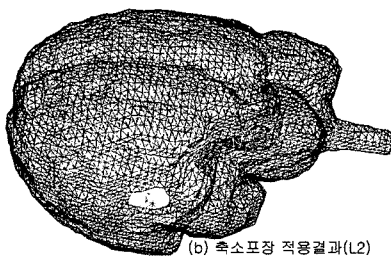
그림 5 Head aneurysm 데이터에 대한 단계별 처리결과

려감에 따라 메쉬 표면의 크기가 조금씩 작아지는 영향이 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이것은 팽창필터에 의한 영향으로, 초기 메쉬 생성에서 표면의 중요한 부분이 누락되는 것을 방지하기 위한 선택이다. 그렇지만 최종 레벨에서는 이런 문제가 없이 입력 볼륨을 잘 표현하는 메쉬 표면이 만들어지게 된다.

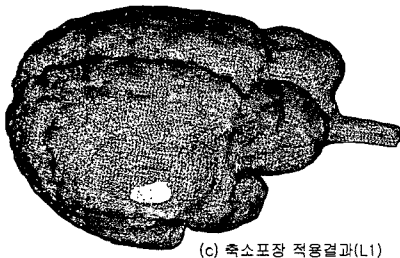
그림 6과 7은 미 Iowa대학의 Department of Radiology의 의료영상 데이터베이스(<http://radiology.uiowa.edu>)에서 구한 인간의 뇌 영상(MR_SEGBRAIN)에 대한 실험 결과를 보여주고 있다. 이 볼륨데이터는 256×256×8비트 영상으로 124 프레임에 대한 밀도영상으로 주어지는데, 본 실험에서는 먼저 원 볼륨 데이터(layer 0)에서 두 단계(layer 1, 2)의 볼륨 피라미드를 만들었는데, 3.1절에 기술한 바와 같이 팽창필터를 적용하였다. 등밀도 문턱치 T_d 는 80으로 설정하였으며, 이에 따라 각 레벨에서 등밀도 점 모델($P_{ISO}^0(T_d) \sim P_{ISO}^2(T_d)$)을 추출하였다. 초기 메쉬는 레벨 2의 볼륨 f^2 에 셀경계 표현방법을 적용하여 추출하였는데, (a)는 이러한 초기 메쉬 M_{init}^2 를 추출한 결과를 보여주고 있다. 이러한 메쉬는 표면 축소포장 알고리즘에 의해 보다 정밀한 표면을 근사하기 위해 변형되는데($M_{init}^2 \rightarrow M_{fit}^2$), 이때 M_{init}^2 은 등밀도 모델 $P_{ISO}^2(T_d)$ 를 보다 표현하는 방향으로 축소와 평활화 된다. (b)는 M_{fit}^2 를 나타내고 있는데, 이 메쉬는 확대와 세분화 과정을 거쳐 레벨 1의 초기메쉬 M_{init}^1 로 변환되고, 같은 방법을 적용하여 보다 정밀한 표면이 순차적으로 생성된다. (c)와 (d)는 각각 레벨 1과 레벨 0에서 최종적으로 추출된 표면을 보여주



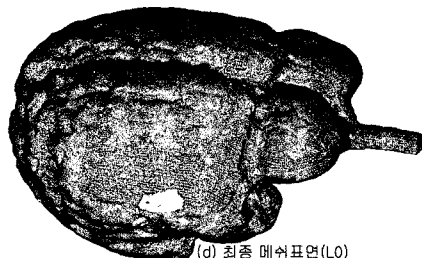
(a) CBM에 의한 초기메쉬(L2)



(b) 축소포장 적용결과(L2)



(c) 축소포장 적용결과(L1)



(d) 최종 메쉬표면(L0)

그림 6 MR_SEGBRAIN데이터에 대한 처리 결과(wire-frame)

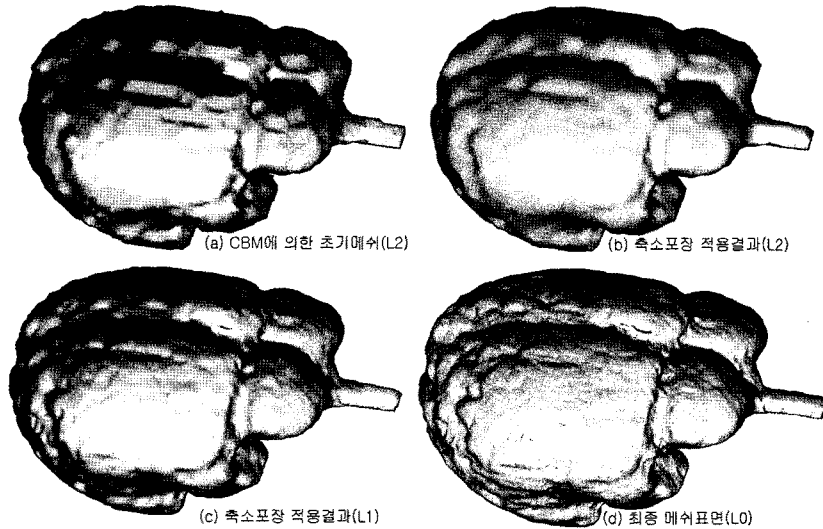


그림 7 MR_SEG BRAIN 데이터에 대한 처리 결과(surface)

고 있다. 그림 7은 그림 6의 각각의 단계별 메쉬에 대해 평활 명암법(Gouraud Shading)을 적용하여 렌더링 한 결과를 보여주고 있는데, 피라미드를 내려가면서 입력 볼륨의 등밀도 표면을 보다 상세한 부분까지 잘 나타내는 표면이 만들어지는 것을 알 수 있다.

표 1은 실험 결과를 요약하고 있는데, 이러한 실험을 통해 제안된 방법이 단층영상으로부터 등밀도 표면을 저해상도에서부터 점진적으로 세밀한 표면까지 잘 만드는 것을 알 수 있으며, 이러한 특성이 표면의 압축이나 점진적인 전송 등과 같은 다양한 다중 해상도 표면 재구성 응용분야에 제안된 방법을 활용될 수 있도록 한다.

제안된 방법은 다중해상도 처리의 기본적인 절차는 Labsik의 방법을 따르지만 많은 분야에서 강점이 있다. 먼저 초기메쉬를 만드는 방법이 마칭큐브가 아닌 CBM을 사용하였으므로 표면에 크랙문제가 발생하지 않았다. 또한 상대적으로 간단하고 강건한 축소 과정과 평활화 과정을 반복적으로 적용하여 메쉬가 점점 실제 표면에 가깝게 모델링 된다. Labsik이 굴곡이 완만한 면으로만 구성된 항아리와 같은 동질성 있는 재질(homogeneous

material)로 이루어진 데이터에 적용한데 비해 제안된 방법은 보다 복잡하고 굴곡이 많은 인체에서 추출한 단층영상에 적용하여 좋은 결과를 나타내고 있다. 마지막으로 제안된 방법은 이웃복셀의 인접성을 $O(3)$ 까지 적용할 수 있어 이론상 Labsik의 방법(또는 마칭큐브)에 비해 더 정교한 표면을 만들 수 있다는 장점이 있다.

6. 결론

본 논문에서는 입력 볼륨 데이터와 출력 메쉬 데이터에서 모두 계층성을 지원하는 새로운 등밀도 표면의 재구성 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 입력 볼륨 데이터로부터 3차원 팽창 필터를 사용하여 볼륨 피라미드를 먼저 만들고, 해상도가 최저인 피라미드의 최상단 볼륨에서부터 셀 경계표현 알고리즘을 이용하여 조악한 초기 메쉬를 생성하였다. 이러한 메쉬를 반복적으로 변형하여 $O(3)$ -인접성 조건하에서 추출한 등밀도점을 잘 근사하도록 하는데, 이를 위해 표면축소기반의 등밀도면 재구성법에서 사용하였던 표면 축소단계와 평활화 단계를 사용하였다. 또한 최종등밀도면의 정밀한 표면을 만들 수 있도록 메쉬를 반복적으로 분할하였다. 제안된 방법은 생성되는 표면이 표면의 압축이나 점진적인 전송 등과 같은 다중 해상도 알고리즘에 효과적으로 활용될 수 있다는 특징이 있다.

향후 연구방향은 크게 볼륨 피라미드 생성을 위한 팽창필터의 개선과 보다 효율적인 초기메쉬 생성법으로 나눌 수 있다. 팽창필터는 저해상도에서 표면을 크게 만들게 되는데, 저해상도 표면이 실제 표면과 일정의 오차를 보일 수 밖에 없는 문제를 발생시킨다. 따라서 초기

표 1 실험 결과에 대한 요약

이름	Head Aneurysm	Mr_SegBrain
입력 볼륨크기 (W×H×Frames)	256×320×128	256×256×124
계층수	4	3
초기메쉬(삼각형수)	4,554	9,802
등밀도점 인접성	$O(3)$	$O(3)$
중간메쉬(삼각형수)	18,216/72,864	39,208
최종메쉬(삼각형수)	291,456	156,832
처리시간(sec)	21.7	6.9

메쉬에서 중요한 표면이 누락되지 않으면서 표면을 너무 크게 만들지 않는 필터에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다. 또한 초기메쉬의 생성에서 셀경계 표현은 마칭큐브의 크랙 문제는 해결이 되지만 초기 표면의 정밀도가 너무 떨어진다는 단점이 있다. 따라서 크랙이 발생하지 않고 표면을 지나치게 많이 만들지 않으면서 가능한 한 표면을 보다 더 잘 근사하는 초기메쉬 생성방법에 대해 추가적인 연구가 필요하다.

참고 문헌

- [1] E. Lum, B. Wilson and K. Ma, "High-Quality Lighting and Efficient Pre-Integration for Volume Rendering," *Eurographics/IEEE Symposium on Visualization*, pp.25-34, 2004.
- [2] G. Herman and H. Liu, "Three-dimensional display of human organs from computed tomograms," *Computer Graphics and Image Processing*, vol.9, pp.1-21, 1979.
- [3] W. Lorensen and H. Cline, "Marching cubes: a high resolution 3-d surface construction algorithm," *Comput. Graph.*, vol.21, no.4, pp.163-169, 1987.
- [4] W. J. Schroeder, J. A. Zarge and W. E. Lorensen, "Decimation of triangle meshes," *Proc. of the 19th annual conference on Computer graphics and interactive techniques table of contents*, pp.65-70, 1992.
- [5] S. J. Kim, C. H. Kim and D. Levin, "Surface simplification using a discrete curvature norm," *Computers and Graphics*, vol.26, pp.657-663, 2002.
- [6] U. Labsik, K. Hormann, M. Meister and G. Greiner, "Hierarchical Iso-Surface Extraction," *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, vol.2, no.4, pp.323-329, 2002.
- [7] 박은진, 최영규, "Shrink-Wrapping 알고리즘을 이용한 단층영상으로부터의 표면 재구성", *정보과학회논문지*, 34권, 1호, pp.28-37, 2007년 2월.
- [8] 최영규, 이의택, "의료영상 가시화를 위한 셀 경계 방식 체적 재구성 방법", *정보과학회논문지*, 27권, 3호, pp.235-244, 2000년 3월.
- [9] M. Dürst, "Letters: Additional Reference to Marching Cubes," *Computer Graphics*, vol.22, no.2, pp.72-73, 1988.
- [10] G. Nielson and B. Hamann, "The Asymptotic Decider: Resolving the Ambiguity in Marching Cubes," *Proc. IEEE Visualization '92*, pp.83-91, 1992.
- [11] B. Natarajan, "On Generating Topologically Consistent Isosurfaces from Uniform Samples," *The Visual Computer*, vol.11, pp.52-62, 1994.
- [12] A. Lopes, and K. Brodlie, "Improving the Robustness and Accuracy of the Marching Cubes Algorithm for Isosurfacing," *IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics*, vol.9, no.1, pp.16-29, January-March 2003.
- [13] T. Newman and H. Yi, "A survey of the marching cubes algorithm," *Computers & Graphics*, vol.30, Issue 5, pp.854-879, Oct. 2006.
- [14] M. Desbrun, M. Meyer, P. Schroder, and A. H. Barr, "Implicit fairing of irregular meshes using diffusion and curvature flow," *ACM Computer Graphics (SIGGRAPH '99 Proceedings)*, pp.317-324, 1999.
- [15] C. Loop, "Smooth Subdivision Surfaces Based on Triangles," M.S. Thesis, *Department of Mathematics, University of Utah*, August 1987.
- [16] L. Kobbelt, " $\sqrt{3}$ -subdivision," 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp.103-112, July 2000.
- [17] G. Li, and W. Ma, "A method for constructing interpolatory subdivisions and blending subdivisions," *Computer Graphics Forum*, vol.26, no.2, pp.185-201, 2007.



최 영 규

1989년 경북대학교 전자공학과(학사). 1991년 KAIST 전기 및 전자공학과(공학석사). 1995년 KAIST 전기 및 전자공학과(공학박사). 1995년~1999년 LG산전연구소 영상연구실 선임연구원. 1999년~현재 한국기술교육대학교 정보기술공학부 부교수. 관심분야는 컴퓨터그래픽스, 가상현실, 영상인식 등



박 은 진

1991년 단국대학교 전자계산학과(학사) 2004년 한국기술교육대학교 전기전자공학과(공학석사). 2004년~현재 한국기술교육대학교 전기전자공학과 박사과정. 1990년~1998년 한라공조, 쌍용자동차, 쌍용정보통신 연구원. 2001년~현재 삼성멀티캡퍼스 강사. 관심분야는 컴퓨터그래픽스, 영상기반모형링, VR 저작도구 등