

## 표면 축소포장에 기반한 단층영상으로부터의 표면 재구성

박은진 최영규<sup>o</sup>

한국기술교육대학교

{ejinpark, ykchoi<sup>o</sup>}@kut.ac.kr

### Shrink-wrapping based surface reconstruction from cross sectional images

Eunjin Park, Young Kyu Choi<sup>o</sup>

Korea University of Technology and Education

#### 요 약

단층촬영영상(Tomographic cross-section images)으로부터 임의의 등밀도 표면(iso-density surface)을 재구성하기 위한 새로운 방법을 제안하였다. 이 방법에서는 마칭큐브 알고리즘에 비해 정밀도는 떨어지지만 안정적인 표면을 생성하는 셀경계 알고리즘(Cell-Boundary Method)을 이용하여 초기메쉬를 구하고 이를 표면축소포장(Shrink-wrapping)처리를 통해 정밀한 등밀도 표면을 생성하게 된다. 이는 마칭큐브와 같이 단층영상에서 등밀도표면을 직접 추출하는 것이 아니라 등밀도점(iso-density point)을 먼저 추출하고 표면의 모호성이 없는 안정적인 초기메쉬를 이 방향으로도 축소하여 정확한 표면모델링을 가능하게 한다. 이를 통해 마칭큐브에서 발생하는 표면 결정의 모호성이 없이 보다 안정적인 표면을 정확하게 만들 수 있다.

#### 1. 서 론

단층영상에서부터 그 안에 포함된 물체의 표면모델을 재구성하기 위한 다양한 방법들이 연구되어왔다. 이들 방법은 불투기반 렌더링방법과 달리 계산량이 일반적으로 훨씬 적으며, 표면모델(Iso-density surface model)을 얻을 수 있으며 이를 이용해 렌더링 이외에도 체적의 계산 등 물체에 대한 여러 가지 연산이 가능하여 모의수술과 같은 다양한 응용에 널리 사용되고 있다.

이러한 표면 재구성법은 일정한 두께를 갖는 단층영상이 연속적으로 쌓여있는 복셀공간(Voxel Space)에서 원하는 밀도의 표면을 추출하는 문제로 정의되는데, 복셀 기법이라고도 불린다. Herman과 Liu는 최초로 복셀 기법의 알고리즘을 제안하였는데[1], 정확한 표면모델을 만들지는 못하지만 적절한 표면법선을 구하여 렌더링 할 경우 어느 정도 자연스러운 영상을 얻을 수 있었다. 가장 대표적인 알고리즘은 Lorensen과 Cline이 제안한 마칭 큐브(Marching Cube)알고리즘[2]으로 서브 복셀 연산을 하여 복셀과 복셀사이에서 매우 정교한 표면을 만들어 낸다. 하지만 너무 많은 표면조각을 만들며, 표면에 크랙이 발생 할 수 있고 표면 생성시 모호성이 발생하는 등의 단점을 가지고 있다. 본 논문은 이러한 단층 영상에서부터 표면을 재구성하는 안정적이면서 정확한 알고리즘을 제안한다.

제안된 알고리즘의 기본 아이디어는 재구성 문제의 접근 방법을 달리하는 것이다. 예를 들어, 마칭큐브에서는 단층영상에서 직접적으로 등밀도 근사표면(iso-density approximation surface)을 만들어 내는데, 제안된 방법에서는 직접적으로 등밀도 표면을 추출하지 않고 등밀도점(iso-density points)들을 먼저 추출하는 것이다. 공간에서 표면은 세 개의 점에 의해 정의될 수 있는

데, 마칭큐브에서도 인접한 복셀들 사이에서 선형으로 근사한 등밀도점들을 임의의 방법으로 직접 연결하여 표면을 만들게 된다. 그러나 같은 점들이 주어지더라도 이들을 연결하는 방식에 따라 다른 표면이 만들어질 수 있고, 따라서 만들어진 표면들은 처음 추출한 등밀도점 보다 정확하지 않다고 할 수밖에 없다. 따라서 본 논문에서는 마칭큐브에서와 같이 등밀도면을 직접 만드는 것이 아니라 먼저 등밀도점을 추출하고, 이들을 이용하여 표면을 재구성하는 방법을 사용한다. 일반적으로 3차원 공간상에서 등고선이나 복셀같이 정렬되어 있지 않은 점(unorganized points)에서부터 표면을 재구성하는 문제는 해결하기가 쉽지 않다[3]. 그러나 본 논문에서 발생하는 점들은 기본적으로 단층영상에서부터 추출되었으며 일반적인 정렬되지 않은 점으로부터의 표면재구성 문제보다 훨씬 간단하고 안정적으로 해결할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서 단층영상에서부터 등밀도점을 추출하는 방법을 설명한다. 3장에서는 표면 근사를 위한 초기메쉬를 만드는 방법을 다루는데, 셀경계 알고리즘을 사용하여 안정적인 근사표면을 생성하게 된다. 4장에서는 근사표면을 측정점으로 이동하여 실제로 정확한 표면을 생성하는 단계인 축소포장에 의한 표면 재구성 방법에 대해 설명한다. 5장에서 실험결과를 보이고 결론을 맺는다.

#### 2. 등밀도점(Iso-density point)의 추출

단층영상에서부터 원하는 밀도의 점을 추출하는 방법은 등밀도 표면을 추출하는 것에 비해 매우 간단히 정의될 수 있다. 단층영상을 수직으로 쌓아놓으면 하나의 복셀은 그림 1에서와 같이 정육면체의 형태로 생각할 수 있다. (정확히는 x, y, 및 z방향의 샘플링 간격에 따라 직육면체가 될 수 있으나, 알고리즘에서 그 형태는 중요하지 않으며, 일반성을 잃지 않고 이를 정육면체로 볼

수 있다.) 각 복셀은 밀도값을 가지며 다른 복셀들과 이웃하고 있는데, 그림에서와 같이 3차원 공간상에 임의의 복셀(점선으로 된)의 이웃복셀은 몇 가지 방법으로 정의될 수 있다[4]. 이는 면, 에지, 및 꼭지점으로 인접하는 이웃인데, (a)와 같이 면으로 접하는 경우를 O(1)-adjacent하다고 정의하며, 에지, 및 꼭지점으로 인접하는 복셀까지 이웃복셀로 정의하는 경우 O(2)-adjacent 및 O(3)-adjacent란 용어를 쓴다.

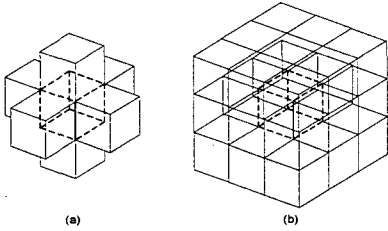


그림 1 (a) O(1)-인접, (b) O(3)-인접

모든 복셀이 밀도를 가지므로, 등밀도점은 이웃하는 복셀의 밀도에 의해 결정된다. 즉 이웃하는 두 복셀중 하나가 문턱치(iso-density)보다 높은 밀도를 가지고, 하나가 낮은 밀도를 갖는 경우(이하 경계이웃(boundary neighbor)이라 함), 이 두 복셀의 중심을 연결하는 선분 상에서 선형근사하여 등밀도점을 유추할 수 있다. 예를 들어 이웃하는 한 복셀의 밀도가 80이고 다른 복셀이 120이며, 밀도가 100인 등밀도점을 구하고자 하는 경우, 두 복셀의 중심을 연결하는 선분의 중심에서 표면(isosurface)이 지나갈 것으로 예상할 수 있다. 따라서 등밀도점의 추출은 이웃복셀의 정의에 의해 바로 결정될 수 있다.

O(1)-인접을 사용하는 경우, 한 복셀 이웃에서의 등밀도점은 최대 6개(면의 개수)가 될 수 있으며, O(3)의 경우 최대 26개까지의 등밀도점을 생성할 수 있다. 마칭큐브 이런 분석에 적용하면, 마칭큐브는 기본적으로 O(1)-인접성만을 사용하고 있다(이것을 확장할 수 없다.) 제안된 방법은 O(2) 및 O(3)를 적용할 수 있으므로, 이론적으로 마칭큐브보다 더 정밀한 표면의 생성이 가능하다고 할 수 있다.

이렇게 이웃복셀을 정의하고 모든 경계이웃(에서 등밀도점을 추출하면 이것이 모델링하고자 하는 등밀도면의 점근사(point approximation) 모델이 된다.

### 3. 초기메쉬생성 (셀경계 알고리즘)

점근사 모델에서 직접 표면모델을 재구성하는 데는 많은 어려움이 있다. 왜냐하면, 점근사 모델에서의 모든 점들은 서로 관계가 없는 점으로 생각이 되기 때문이다. 이러한 문제를 해결하는 대표적인 방법을 Hoppe가 제안하였으나[3], 표면의 정확성이나 속도 등 여러측면에서 문제가 있다. 최근 축소포장에 의한 표면재구성 방법들[5]이 제안되었는데, 최종적인 표면의 품질이나 처리시간의 효율등을 생각할 때 초기메쉬가 매우 중요하다.

본 논문에서는 이러한 초기메쉬를 구성한 후 이를 점

근사모델로 변환하는 방법을 사용하였다. 이를 위한 초기메쉬로는 셀경계 알고리즘을 사용하였다[4]. 이 방법은 서브복셀 연산을 하는 마칭큐브와 같이 정교한 표면을 만들지는 못하지만 매우 안정적인 표면을 만들어낸다. 즉, 마칭큐브가 너무 많은 표면조각을 만들며, 표면에 크랙이 발생 할 수 있고 표면 생성시 모호성이 발생하는 등의 문제가 있는데, 셀경계에서는 이러한 표면 정의에서 모호성이 전혀 없이 매우 안정적인 표면을 생성한다는 장점이 있으나 표면의 정밀도가 마칭큐브에 비해 많이 떨어지는 단점이 있다. 그러나 이러한 특성이 본 논문에서 추구하는 초기메쉬의 조건에는 매우 잘 적합하다. 즉 정밀하지는 않지만(오차는 항상 정해진 범위(셀 크기)안에 있다.) 매우 안정적으로 등밀도표면을 근사하고, 표면의 개수도 마칭큐브보다는 적다. 이러한 표면은 그림 2에서 잘 나타나고 있는데, 회전, 대칭등의 변환을 고려하여 추출되는 모델링 원형은 체적형, 표면형, 그리고 선형으로 이루어 지게 된다.

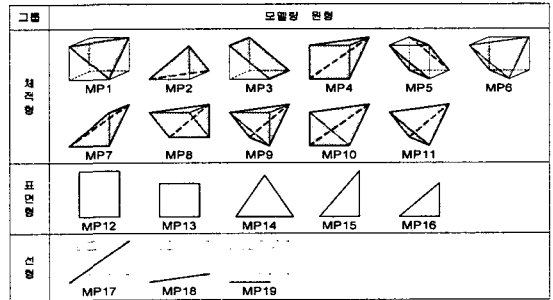


그림 2 모델링 원형의 분류

### 4. 축소포장에 의한 표면 재구성

축소과정은 초기메쉬  $M'$ 의 각 정점들을 점모델  $P$ 의 등밀도점들의 방향으로 이동시키는 과정이다. 즉, 초기메쉬  $M'$ 를 구성하는 각 정점  $q$ 에 대해  $P$ 내의 모든 측정점들까지의 거리를 계산하여 가장 가까운 측정점을 찾고 그 방향으로 정점을 이동시킨다[5]. 이 때, 기존의 방법에서는  $P$ 내의 모든 측정점들과의 거리를 계산해야 하는데, 제안된 방법에서는  $q$ 가 포함된 복셀과 이것과 O(3)로 인접하는 26개의 이웃셀(면으로 인접하는 6개의 셀과, 변으로 인접하는 12개의 셀, 그리고 꼭지점으로 인접하는 8개의 셀) 내에 있는 측정점들과의 거리만을 계산하면 된다. 이들 27개의 셀들 안에 최소한 하나 이상의 등밀도점이 반드시 존재할 수 밖에 없기 때문이다.

최단 거리의 측정점이 결정되면 메쉬의 정점을 그 방향으로 이동하는데 이것은 초기 메쉬  $M'$ 를 축소시켜 실제의 등밀도표면과 보다 근사해 지도록 하게 된다. 메쉬 정점의 이동은 원래 메쉬의 정점과 최단 측정점간의 선분상의 임의의 위치로 옮기게 된다. 이동할 메쉬의 정점을  $q_i$ 라고 하고 이 정점의 최단 측정점을  $p_{nearest}$ 라고 하면, 메쉬 정점의 이동은 다음과 같이 이루어진다.

$$q_i \leftarrow q_i + \alpha (p_{nearest} - q_i)$$

이때, 계수  $\alpha$ 는 이동의 정도를 나타내며 0에서 1사이의 값을 갖는다. 이 값이 1이면 메쉬 정점을 바로 최단 측정점으로 옮기는 것을 의미하는데, 이것은 같은 측정점에 여러 개의 메쉬 정점이 모이게 될 수 있으며 표면이 겹치는 문제를 발생시킬 수 있다. 또한 이 값이 너무 작으면 초기 메쉬가 측정점으로 수렴해 가는 속도가 너무 느려 처리시간이 많이 걸릴 수 있다. 보통 이 값은 0.5 정도를 사용하게 된다.

메쉬 정점의 축소과정에서 적당한  $\alpha$ 값을 사용 하더라도 비교적 측정점이 적게 분포되어 있는 부분에서는 하나의 측정점 방향으로 여러 개의 메쉬 정점들이 몰리게 되는 현상이 발생할 수 있다. 복잡한 표면에 많은 측정점들이 사용되는 것은 의미가 있지만 일반적으로 복잡도가 비슷한 표면의 경우에는 전체 표면에 대해 골고루 메쉬의 정점들이 분포하는 것이 더 바람직하다. 따라서 이러한 메쉬 정점들이 국부적으로 하나의 측정점으로 편중시키는 결과를 완화시키기 위하여 메쉬 평활화(smoothing) 과정이 수행된다[5].

이렇게 초기메쉬의 축소 및 평활화 과정을 거치면서 메쉬가 등밀도점에 근사하게 되고 따라서 재구성되는 표면이 원래의 표면을 보다 정확히 근사하게 된다.

5. 실험 및 결론

제안된 방법은 Windows-XP 운영체제하의 PC에서 구현되었는데, 모델링 알고리즘은 C++ 언어를 이용하여 작성하였으며, 렌더링을 위해 OpenGL과 MFC를 이용해서 GUI를 작성하였다. 그림 3은 입력 단층영상이며, 그림 4는 제안된 방법으로 추출한 등밀도점 모델을 보여주고 있고(O(1)-인점), 그림 5는 입력영상에 셀 경계표현을 적용해 추출한 초기 메쉬를 렌더링하고 있다.

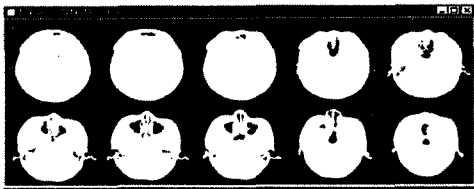


그림 3 Human head (총 30장 중 10장)

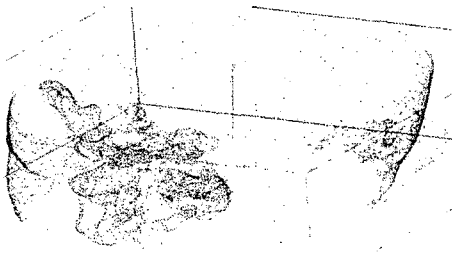


그림 4 등밀도점모델 추출

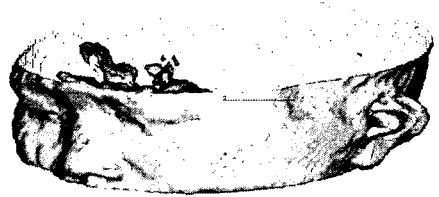


그림 5 초기 메쉬 (셀경계표현)



그림 6 최종 표면 재구성 결과

마지막으로 그림 6은 표면축소에 의한 최종 표면모델(wireframe(상), smooth shading(하))을 보여주고 있다. 결과에서 볼 수 있듯이 제안된 방법은 단층영상에서부터 등밀도면을 재구성하는 새로운 방법으로, 기존의 마칭큐브에서의 등밀도 근사표면을 바로 추출하는 방법과 달리 등밀도점을 먼저 추출하고 셀경계표현으로 초기메쉬를 만들어 축소포장함으로써 표면결정의 모호성이 없이 보다 정확한 표면을 재구성 할 수 있다는 장점이 있다.

참고 문헌

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] H. Hoppe, T. DeRose, T. Duchamp, J. McDonald, and W. Stuetzle. "Surface reconstruction from unorganized points," In Computer Graphics (SIGGRAPH '92 Proceedings), pp. 71-78, July 1992.
- [4] 최영규, 이의택, "의료영상 가시화를 위한 셀 경계 방식 체적 재구성 방법," 정보과학회논문지 27권, 3호, pp. 235-244, 2000년 3월
- [5] B.K. Koo, Y.K. Choi, "Shrink-Wrapped boundary face algorithm for mesh reconstruction from unorganized points," ETRI Journal, Vol 27, No. 2, pp. 235-238, April 2005