

계층적 표면축소 기법을 이용한 등밀도면 모델링 방법

박은진*, 최영규*

*한국기술교육대학교 정보기술공학부
e-mail:ykchoi@kut.ac.kr

Iso-density Surface Modelling using Hierarchical Shrink-Wrapping Technique

Eun-Jin Park*, Young Kyu Choi*

*School of Information Technology, Korea University of Tech. and Edu.

요 약

본 논문은 볼륨 데이터를 입력받아 계층성을 지원하는 등밀도 표면을 재구성하는 방법을 제안한다. 제안된 방법은 먼저 입력 볼륨 데이터에서 볼륨 피라미드를 구성하고 해상도가 최저인 피라미드의 최상단 볼륨에서부터 셀경계표현 방법을 이용하여 조악한 초기 메쉬를 생성하며, 이 메쉬를 표면축소기법을 사용하여 반복적으로 변형하여 O(3)-인접성 조건하에서 추출한 등밀도점을 잘 근사할 수 있도록 한다. 제안된 방법은 생성되는 표면이 압축이나 점진적인 전송 등과 같은 다중 해상도 알고리즘에 활용될 수 있다는 장점이 있다.

1. 서론

단층영상에서부터 등밀도면을 추출하는 가장 대표적인 방법인 마칭큐브[1]는 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[2], 최근까지 다양한 방법들이 이를 해결하기 위해 제안되고 있다[3-4]. 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.

이와 다른 접근법으로 Labsik등은 다단계 등밀도 표면 생성방법을 제안하였는데[5], 계층적인 볼륨 데이터를 만들어 가장 조악한 단계에서 먼저 기본 메쉬를 만들었고, 이를 다음 단계에서 보다 정밀하게 변환하는 방법을 사용하였다. 이러한 다해상도적인 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 가시

화 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 사용하였으며, 따라서 표면에 크랙이 발생할 가능성은 여전히 남아 있다. 또한 표면의 변환 과정에서 메쉬 정점을 이동시킬 때, 각 정점의 법선벡터를 유추하고 이 벡터가 가상의 등밀도면을 안쪽에서 바깥쪽으로 통과하는지 그 반대인지를 판단하기 위해 거리함수를 사용하고 이 함수의 부호를 이용하였는데, 전체적으로 매우 복잡하고 계산량이 많고 최종 표면을 만들기 전에 가상의 등밀도면을 이용한다는 것 등이 바람직하지 않은 특성으로 볼 수 있다.

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[6]을 다단계적으로 확장하는 것이 그 핵심이 되는데, 초기 메쉬의 생성을 보다 안정적으로 하며, 표면의 근사에서 보다 간단하고 빠른 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.

2. 볼륨 피라미드 (Volume Pyramid)

제안된 방법에서는 복셀의 형태로 주어지는 볼륨데이터를 정밀도에 따른 다단계의 계층적인 형태로 변환하고, 이후 가장 조악한 단계에서 초기메쉬를 생성한다. 이를 위해 먼저 볼륨 데이터와 볼륨 피라미드를 정의한다.

[정의 1] 볼륨 데이터(Volume Data) : 단위 복셀의 각 방향의 길이가 동일한 정규적인 그리드의 큐베일 공간상에서 정의된 밀도 데이터는 이산 밀도함수 $f^0 : G^0 \rightarrow \mathbb{D}\mathbb{N}$ 으로 표현할 수 있는데, 이는 다음과 같이 그리드 G^0 상의 임의의 복셀에 대해 밀도 값을 대응시키는 함수로 정의된다.

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

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 그리드의 크기를 나타내며, (x_i, y_j, z_k) 는 각 복셀의 위치를 나타낸다. 이러한 이산 밀도함수 f^0 를 레벨(level) 0에서의 볼륨데이터라고 정의한다.

단층 영상으로 주어지는 밀도 데이터는 볼륨데이터의 좋은 예가 되는데, 다운 샘플링이 이루어지기 전의 원 데이터가 f^0 가 된다. 볼륨데이터를 1/2로 다운 샘플링 하고자 하는 경우 볼륨내에서 큐브를 이루는 8개의 인접한 복셀 값을 이용하여 하나의 복셀 값을 만들게 된다.

[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 l의 그리드 G^l 상에서 정의된 축약된 볼륨데이터 f^l 은 G^{l-1} 에서 정의된 f^{l-1} 에 3차원 필터의 컨벌루션을 적용하여 구해지며, 그리드 G^l 의 정밀도는 각각 $\lceil 2^{-l}n_x \rceil$, $\lceil 2^{-l}n_y \rceil$ 와 $\lceil 2^{-l}n_z \rceil$ 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 피라미드라고 정의하고, l을 볼륨 피라미드의 높이라고 정의한다.

이렇게 f^0 으로부터 볼륨 피라미드를 생성하기 위해서 다양한 필터를 사용할 수 있는데, 일반적으로 볼륨데이터의 등밀도면 모델링에서 표현하고자 하는 물체 영역은 배경 영역에 비해 밀도가 높은 복셀 값을 갖고, 따라서 초기 표면을 생성하는 단계에서 원래의 등밀도 표면보다 큰 부피를 갖는 표면을 생성하는 것이 더 바람직하다. 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 팽창필터(dilation filter)를 사용하였는데, 입력 데이터의 등밀도면을 더 많이 포함할 수 있도록 한다.

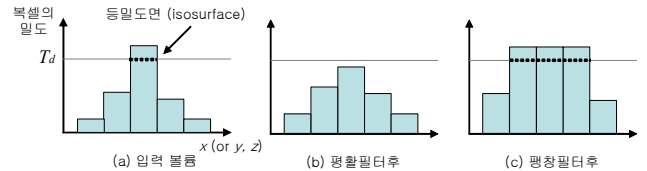


그림 1. 입력 볼륨데이터에 대한 필터처리 예

이와 같이 입력 볼륨데이터 f^0 에 대해 팽창 필터링을 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 상관 없으며, 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. 초기 메쉬 (Initial Mesh)

가장 조악한 볼륨 레벨에서 구하게 되는 초기 메쉬의 생성을 위해 다양한 방법을 적용할 수 있는데, Labsik은 마칭큐브 알고리즘을 사용하였다. 그러나 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 표면 조각의 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 방법을 채택하였다[7]. 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 등 초기메쉬로의 좋은 특성을 갖는다.

4. 다단계 축소포장(Shrink-Wrapping)

일단 초기 메쉬 M^i 가 추출되면 이를 등밀도면으로 투영하여 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 하는데, 본 논문에서는 표면 축소포장(shrink-wrapping) 알고리즘을 이용한 등밀도면의 재구성 방법[6]을 채택하였다. 이 방법은 먼저 표현하고자 하는 등밀도점을 추출하고 초기메쉬를 변형하여 등밀도점을 잘 표현할 수 있도록 한다. 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[6]. 볼륨 피라미드의 레벨 i 에서의 등밀도 점 모델 $P_{iso}^i(T_d)$ 는 f^i 의 모든 인접복셀에서 추출한 등밀도점의 집합으로 정의된다.

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.

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

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. 초기 메쉬 M_{init}^i 에 대해 축소와 평활화 과정을 반복하여 적용하면 레벨 i 의 최종 등밀도면 근사표면인 M_{fit}^i 가 구해진다.

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 필요한데, 본 논문에서는 Loop의 방법[8]을 사용하였다. 이 방법은 많은 논문에서 채택하고 있는 기법으로 하나의 삼각형 표면조각을 4개의 조각으로 분할하여 표면의 해상도를 증가시킨다.

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 축소와 평활화 과정을 다시 반복하여 처리함으로써 보다 정밀한 표면을 구하게 되고, 입력 데이터와 같은 해상도인 레벨 0에서 축소와 평활화 과정이 처리되면 최종적으로 볼륨 데이터의 등밀도 표면을 잘 근사하는 메쉬 M_{fit}^0 가 만들어진다.

5. 실험

제안된 방법은 Pentium-PC상의 Windows-XP환경에서 구현되었다. 모델링 알고리즘은 C++ 언어를 이용하여 작성하였으며, 렌더링을 위한 GUI는 OpenGL과 MFC를 이용해서 구현하였는데, MSVC6.0에서 Debug모드에서 컴파일하였다. 실험을 위한 데이터로는 Volvis 홈페이지(<http://www.volvis.org>)에서 구한 여러 가지 볼륨 데이터를 활용하였다.

그림 2는 Volvis 홈페이지에서 구한 Head aneurysm 데이터에 대한 단계별 처리결과를 보여주고 있는데, 제안된 방법이 볼륨데이터를 계층화 시키고 저해상도에서부터 연속적으로 고해상도의 표면 모델을 잘 만들어 주는 것을 알 수 있다. 그림 3은 미 Iowa대학의 Department of Radiology의 의료영상 데이터베이스(<http://radiology.uiowa.edu>)에서 구한 인간의 뇌 영상에 대한 실험 결과를 보여주고 있는데, 표면 모델링 결과를 마칭큐브와 비교하여 보여주고 있다. 제안된 방법이 MC에서의 계단현상을 줄여주고 훨씬 적은(50%정도) 표면조각을 생성하지만 비슷한 수준의 정밀도를 보여줌을 알 수 있었다. 표 1은 실험 결과를 요약하고 있다.

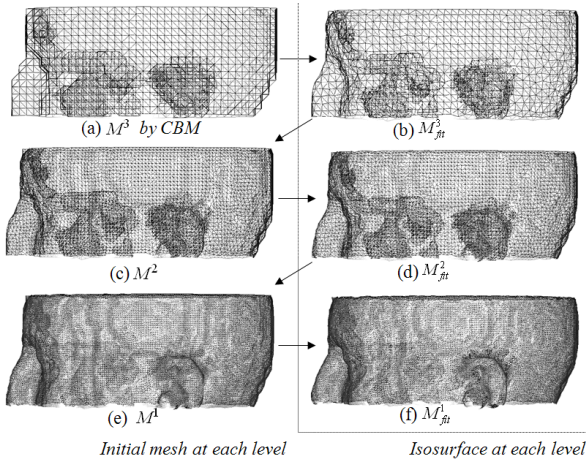


그림 2 Head aneurysm 데이터 처리결과

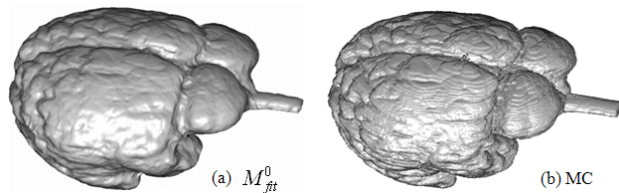


그림 3 MR_SEGBRAIN 데이터 처리결과

<표 1> 실험 결과에 대한 요약

이름	Head Aneurysm	Mr_SegBrain
입력 볼륨크기 (WxHxFrames)	256x320x128	256x256x124
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)	41.3	10.63

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 최종 등밀도면의 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.

참고문헌

[1] 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.

[2] M. Du`rst, "Letters: Additional Reference to Marching Cubes," *Computer Graphics*, vol. 22, no. 2, pp. 72-73, 1988.

[3] G. Nielson and B. Hamann, "The Asymptotic Decider: Resolving the Ambiguity in Marching Cubes," *Proc. IEEE Visualization '92*, pp. 83-91, 1992.

[4] B. Natarajan, "On Generating Topologically Consistent Isosurfaces from Uniform Samples," *The Visual Computer*, vol. 11, pp. 52-62, 1994.

[5] 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.

[6] 박은진, 최영규, "Shrink-Wrapping 알고리즘을 이용한 단층영상으로부터의 표면 재구성," *정보과학회논문지* 27권, 3호, pp. 235-244, 2000년 3월

[7] 최영규, 이의택, "의료영상 가시화를 위한 셀 경계 방식 체적 재구성 방법," *정보과학회논문지* 27권, 3호, pp. 235-244, 2000년 3월

[8] 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, January-March 2003.