

가상벨트 분할에 기반한 등고선으로부터의 표면재구성 방법

최 영 규[†] · 이 승 하^{**}

요 약

등고선으로 표현된 물체의 볼륨정보에서부터 3차원 표면을 재구성하는 새로운 알고리즘을 제안한다. 등고선 삼각분할법이라고도 불리는 이 방법의 가장 어려운 문제가 인접 단층사이에서 표면이 다중으로 분기하는 경우에 발생하는데, 이것은 하나의 등고선이 인접한 층의 두 개 이상의 등고선과 연결되는 형태로 나타나며, 표면 생성시 많은 모호성을 발생시킨다. 본 논문에서는 이러한 다중분기문제를 여러 개의 가상벨트와 가상계곡으로 나누어 이들에 대한 표면생성문제로 단순화 시키는 방법을 제안한다. 가상벨트의 표면생성에는 미분할 알고리즘을 채택하였으며, 가상계곡은 반복적인 볼륨점점 제거와 중앙점점 추가로 보다 자연스러운 표면을 생성한다. 기존의 대부분의 알고리즘들이 다중분기문제를 한 쌍의 등고선간의 표면생성문제로 변환하는데 초점을 맞추는데 비해 제안된 방법은 더 작은 형태인 가상벨트와 가상계곡으로 단순화한다. 또한 제안된 방법은 표면정의에 복잡한 기준을 사용하지 않으며, 표면삼각분할을 위한 매우 명확하고 일관된 알고리즘을 제공한다. 실험을 통해 제안된 방법이 많은 분기가 발생하는 복잡한 데이터에서도 잘 동작하는 것을 알 수 있었다.

키워드 : 표면 재구성, 등고선 삼각분할, 다중분기문제, 표면렌더링

A Surface Reconstruction Method from Contours Based on Dividing Virtual Belt

Choi, Young Kyu[†] · Lee, Seung-ha^{**}

ABSTRACT

This paper addresses a new technique for constructing surface model from a set of wire-frame contours. The most difficult problem of this technique, called contour triangulation, arises when there are many branches on the surface, and causes lots of ambiguities in surface definition process. In this paper, the branching problem is reduced as the surface reconstruction from a set of virtual belts and virtual canyons. To tile the virtual belts, a divide-and-conquer strategy based tiling technique, called the BPA algorithm, is adopted. The virtual canyons are covered naturally by an iterative convex removal algorithm with addition of a center vertex for each branching surface. Compared with most of the previous works reducing the multiple branching problem into a set of tiling problems between contours, our method can handle the problem more easily by transforming it into more simple topology, the virtual belt and the virtual canyon. Furthermore, the proposed method does not involve any set of complicated criteria, and provides a simple and robust algorithm for surface triangulation. The result shows that our method works well even though there are many complicated branches in the object.

Key Words : Surface Reconstruction, Contour Triangulation, Branching Problem, Surface Rendering

1. 서 론

최근 3차원 물체의 표면정보에 대한 요구가 컴퓨터 그래픽스 기술을 활용하는 의료영상이나 가상현실 등 다양한 분야에서 급격히 증가하고 있는데, 이에 따라 3차원 볼륨 정보를 재구성하기 위한 여러 가지 방법들이 활발히 연구되고 있다. 렌더링의 관점에서 보면 이들 방법들은 볼륨 렌더링(volume rendering)과 같이 볼륨 데이터에서 직접 영상을 추출하는 볼륨기반(volume-based) 기법[1,2]과 표면모델을

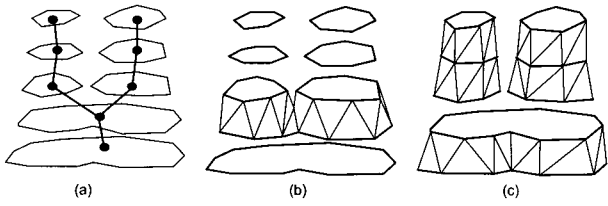
먼저 추출한 다음 이들을 표면 렌더링 알고리즘을 이용해 3차원 영상을 만드는 표면기반(surface-based) 기법[3-18]으로 크게 분류할 수 있다. 본 논문에서는 가시화뿐만 아니라 체적의 계산이나 모의 수술 등 다양한 목적으로도 활용할 수 있는 표면기반 알고리즘에 초점을 맞춘다.

표면기반 알고리즘은 입력데이터의 종류에 따라 다시 CT 영상과 같이 복셀(voxel) 데이터가 입력으로 주어지는 체적 재구성법(volume reconstruction)[3-6]과, 각 단층면과 물체의 표면이 만나는 등고선(contour)이 주어지고 이들 사이의 표면을 삼각형 조각으로 채우는 표면 재구성(surface reconstruction)법[7-18]으로 나눌 수 있다. 체적 재구성법은 일반적으로 알고리즘이 간단하며, 다양한 예외상황에도 비

[†] 통신회원 : 한국기술교육대학교 정보기술공학부 교수(교신저자)

^{**} 정 회 원 : 단국대학교 의과대학 의공학교실 교수

논문접수 : 2007년 7월 9일, 심사완료 : 2007년 10월 2일



(그림 1) 등고선 삼각분할에 의한 표면 재구성 단계

교적 강건하게 수행된다는 장점이 있다. 이에 비해, 표면 재구성법은 등고선 삼각분할법(contour triangulation)이라고도 하는데, 등고선이 선형으로 보간되어 있으므로 추가적인 안티앨리어싱(anti-aliasing) 과정이 필요 없고, 체적 재구성법에서 발생하는 거친 표면(jagged surface)처리가 필요 없으며, 각 단층에 대한 영상을 저장할 필요가 없이 추출된 경계선만을 이용하여 모델링 할 수 있으므로 데이터양이 적다는 장점을 가지고 있다. 또한 등고선에 직선 근사화법을 적용할 수 있어 체적에 근거한 방법에 비하여 생성되는 표면 조각의 수가 훨씬 적으며, 평활 명암법이나 Phong 명암법 등을 적용하여 가시화 하거나, 광선추적법 등을 적용하여 고화질의 3차원 영상을 만들어 낼 수 있다는 장점이 있다. 이러한 장점에도 불구하고 표면 재구성법은 입력 등고선의 형태에 따라 경우에 따라서는 매우 부자연스러운 표면을 만들어지는 단점이 있는데, 특히 표면이 여러 가닥으로 복잡하게 분기되고 인접 등고선의 형태가 매우 상이한 경우 이런 현상이 심각하게 발생할 수 있다.

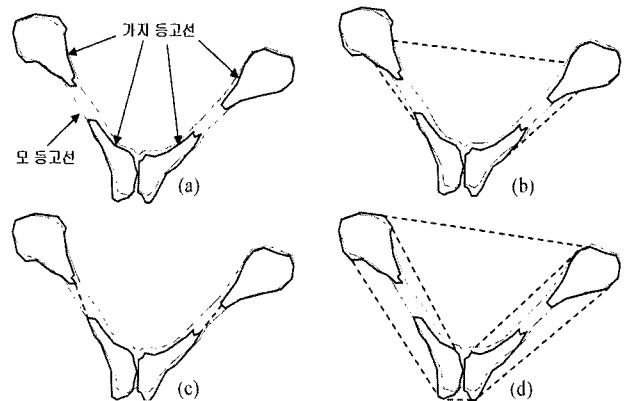
(그림 1)은 등고선 삼각분할에 의한 물체의 표면모델 재구성 과정을 보여주고 있는데, 모델링을 위해서는 먼저 인접한 층의 등고선들 사이의 연결성을 결정하고(a), 표면의 분기를 해결하며(b) 마지막으로 표면조각을 생성하는 과정이(c) 처리되어야 한다. 그림과 같이 등고선이 주어졌을 때, 임의의 등고선이 인접한 층의 어느 등고선과 표면으로 연결되어야 하는지를 먼저 결정해야 하는데, 이를 등고선 대응문제(correspondence problem)라고 한다. 일반적으로 CT나 MRI 등에 의해 얻어지는 단층 영상들은 층간 거리가 비교적 좁은데, 이 경우 보통 중첩성(superimposition)을 이용하여 인접한 층에 있는 두 등고선들이 표면으로 연결되어야 하는지 아닌지를 결정한다. 즉, 두 등고선을 단층면과 수직방향으로 투영하였을 때, 두 등고선의 내부 영역들이 중첩되는 정도가 전체 면적에 대해 임계치보다 큰 경우, 이들은 연결되어야 한다고 판단하게 된다. 이와 달리 인체 내의 동맥이나 정맥등을 모델링 할 경우 단층사이의 간격이 등고선의 크기에 비해 비교적 크게 나타나며, 등고선의 중첩성만을 이용하여 대응문제를 해결할 수가 없게 되는데, 실린더 성장법(cylinder growing)[7]이나 최근에 발표된 3차원 Delaunay 삼각분할에 기반한 베타연결법(β -connection)[8] 등이 이러한 경우의 대응문제를 해결하기 위해 제안되었다. 본 논문에서는 층간 거리가 등고선의 크기에 비해 상대적으로 작은 분야에 적용한다고 가정하고 등고선의 중첩성을 이용하여 등고선 대응문제를 처리하였다.

등고선의 연결 관계가 결정되면 대부분의 등고선은 인접층의 하나의 등고선으로 연결이 되겠지만 (a)의 두 번째 층의 등고선과 같이 표면이 분기하는 경우도 발생하는데, 이를 표면분기문제(branching problem)라 하고 일반적으로 매우 처리가 어려운 문제로 알려져 있다. 마지막으로 (c)와 같이 인접한 층의 한 쌍의 등고선 사이의 표면을 삼각 분할하는 표면생성문제(tiling problem)를 해결함으로써 등고선으로 표현되는 물체의 최종적인 표면모델을 재구성하게 된다. 본 논문에서는 등고선 삼각분할에서 가장 어려운 문제인 표면분기문제와 표면생성문제를 해결하기 위한 새로운 방법을 제안한다.

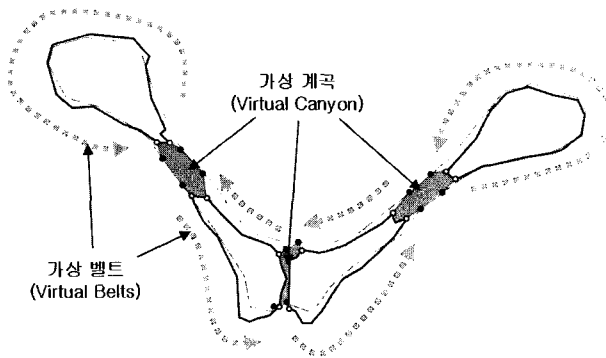
본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서 이들에 대한 기존연구들을 살펴보고, 제안된 방법의 동기를 설명한다. 3장에서는 새로운 표면분기문제 해결방법을 제안하며, 4장에서 표면을 삼각분할하여 표면조각을 만드는 알고리즘을 기술한다. 5장에서 실험결과를 보이고, 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다.

2. 기존 연구 및 본 연구의 동기

(그림 2)의 (a)는 표면의 분기문제를 잘 나타내고 있는데, 하나의 모 등고선(root contour, 회색)이 인접 층의 4 개의 가지 등고선(branch contour)과 연결되고 있다. 이 문제 해결을 위한 가장 일반적인 접근방법은 가지 등고선들의 형태를 이용하여 하나의 가상의 등고선을 만들고 모 등고선과 가상 등고선 사이를 표면생성 알고리즘으로 처리하는 방법이다[9-12]. 이때 가상의 등고선으로는 (b)와 같이 각 가지 등고선의 무게중심들의 볼록 껍질(convex hull)[9]을 사용하거나, (c)와 같이 가지 등고선들의 가까운 정점들을 선분으로 연결하여 하나의 등고선으로 만드는 방법(이 방법은 2중 분기만 처리가 가능 함)[10] 등이 제시되었다. Meyers[7]도 이중분기 해결책을 제시했는데, 가지 등고선 사이를 계곡(canyon)이라 정의하고 그 계곡의 바닥을 삼각형 표면으로 채워서 먼저 표면 모델을 얻고 후처리과정에서 계곡의 골짜기를 만들었지만 다중분기로 확장하는 방법을 제시하지



(그림 2) 다중분기 해결을 위한 기존 방법들



(그림 3) 제안된 다중분기 해결방법 및 가상벨트, 가상계곡 정의

는 못하였다. 또한 Boissonnat[11]은 Voronoi Diagram을 이용하여 분기문제를 해결하고자 하였다. 이들 알고리즘은 이중분기(double branching)에만 적용되거나 모든 다중분기문제를 동일하게 놓고 처리하였는데, Choi등은[12] 이러한 다중분기의 원인을 인접한 단층사이의 거리가 멀어서 생긴 문제로 분석하고 다중분기 문제를 가장 흔히 발생하는 이중분기와 3중 이상의 다중분기로 구분하였으며, 다중분기문제를 연속적인 이중분기문제로 단순화하는 알고리즘 (d)을 제안하였다. 그러나 이들 방법들은 (c)와 같이 2중 분기에 제한되어 있거나 (b)와 (d)에서 보는 것과 같이 분기되는 가지가 많고 등고선의 형태 차이가 심하며 모 등고선에 오목(concave)한 부분이 많은 경우 일반적으로 매우 자연스럽게 못한 표면을 만들어 내게 된다.

이들과는 달리 Bajaj는 등고선 삼각분할 문제를 (그림 1)의 (a), (b) 및 (c)와 같이 등고선 대응, 표면 분기, 표면 생성문제로 분리하지 않고 한꺼번에 처리하는 방법을 제안하였다[13]. 이들은 인접한 층의 모든 등고선을 함께 놓고 좋은 표면을 위한 3가지의 기준(criteria)을 제시하였으며, 이 기준을 만족하는 부분에 대해 표면을 생성하였다. 그러나 이들 기준만으로 닫힌 표면을 만들 수 없으며, 표면이 정의되지 않는 많은 부분(기준을 만족하지 않는 영역)이 나타나게 되는데, 즉 인접한 등고선간의 형태 차이가 큰 경우 이러한 3가지 기준에 만족하지 않는 정점들이 많이 나타나게 되고, 이들에 대해서는 추가적으로 Voronoi Diagram을 이용하여 표면을 생성하였다. 따라서 알고리즘의 완전성이 없으며 일관성이 부족하고 구현이 복잡하게 된다는 문제가 있다.

본 논문에서는 이러한 기존방법들의 문제를 해결하기 위한 새로운 방법을 제안한다. (그림 3)은 제안된 다중분기 알고리즘의 기본 개념을 보여주고 있다. 제안된 방법은 먼저 다중분기 처리를 위해 하나의 가상등고선을 만드는 것이 아니라 분기영역을 여러 개의 가상벨트(virtual belt)와 가상계곡(virtual canyon) 영역으로 나누게 된다. (그림 3)에서 모 등고선의 정점(검은색)과 가지등고선의 정점(흰색)을 연결한 선분을 스패ן(span)이라고 하는데, 한 쌍의 인접한 스패는 한 쌍의 정점 체인(vertex chain)을 정의하게 된다. 결국 가상벨트는 인접한 층의 한 쌍의 정점 체인(vertex chain)에 의해 정의되며, 이 공간의 삼각분할이 완료되면 삼각형 표면

으로 이루어진 하나의 띠를 형성하게 된다. 이와는 달리 가상 계곡은 표면에서 분기가 실제로 서서히 발생하는 영역으로 그림에서와 같이 모 등고선의 여러 체인들과 가지등고선의 여러 부분의 체인이 서로 연결되어 이루어진다. (그림 3)과 같이 주어진 등고선 데이터에 대해 이들을 자연스럽게 분할한다면, 6개의 가상벨트와 3개의 가상계곡으로 나누어지며, 이에 따라 다중분기의 표면생성 문제는 한 쌍의 등고선 사이의 표면생성문제가 아니라 여러 개의 가상벨트와 가상계곡의 표면생성 문제로 단순화된다. 즉 (그림 2)의 (b), (c) 및 (d)와 같이 부자연스러운 가상등고선을 만들고 이를 모 등고선과 연결하는 문제가 아니라 형태가 훨씬 유사할 것으로 기대되는 가상벨트의 표면생성으로 문제로 단순화되고, 따라서 보다 자연스러운 표면을 기대할 수 있게 된다. 이러한 접근 방법에서 해결되어야 할 문제는 다음과 같다.

- 1) 다중분기를 가상 벨트와 가상 계곡으로 분할하는 방법
- 2) 가상 벨트의 표면생성 방법
- 3) 가상 계곡을 삼각분할 하는 방법

본 논문에서는 1)에 대한 알고리즘을 다음 장에서 제안한다. 2)에 대한 해결책으로는 다양한 기존의 알고리즘을 사용할 수 있으나, 본 논문에서는 Choi가 제안한 BPA알고리즘[14]을 채택하였는데, 기존의 최적화 방법과 경험적 방법을 서로 보완하며 한 쌍의 등고선이 아니라 가상벨트의 표면재구성문제로 쉽게 확장할 수 있는 알고리즘이다. 3)에 대한 해결책은 다양한 다각형 삼각분할 알고리즘을 채택할 수 있는데, 본 논문에서는 볼록 정점을 연속으로 제거하는 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘에서는 최종적으로 가상계곡이 볼록다각형(convex polygon)이 되면 정점을 추가하는 방법을 채택하여 부자연스러운 삼각형 표면의 발생을 줄이고자 하였다. 이들 표면 생성 알고리즘은 4장에서 기술한다.

3. 다중분기 알고리즘

본 장에서는 다중분기를 위해 새로운 알고리즘을 제안한다. 먼저 본 논문에서 사용되는 용어 및 표기를 정리하면 다음과 같다.

[정의 1] 단층의 레벨(level)은 그 단층의 높이를 나타내고 z_k 로 표기한다. z_k 와 z_{k+1} 은 인접한 단층의 레벨이며, z_k 가 하위레벨이다.

[정의 2] 등고선(contour)은 평면상의 임의의 단순 다각형(simple polygon)으로 정의되며 C_i^k 로 표기된다. C_i^k 는 레벨이 z_k 인 단층의 i 번째 등고선이며, 정점 $(v_0, v_1, v_2, \dots, v_{n-1})$ 으로 구성된다. 이때 n 은 등고선의 총 정점의 수이며, 정점들은 반 시계 방향으로 정렬되어 있다.

[정의 3] 체인(chain)은 평면상의 순서화 된 정점들의 집합으로 정의되며 Ch_i^k 로 표기되는데, Ch_i^k 는 레벨이 z_k 인 단층의 i 번째 체인을 의미한다.

[정의 4] 가상벨트(virtual belt)는 Bt^k 로 표기하는데 인접한 층(z_k 과 z_{k+1})에 있는 한 쌍의 체인 $\langle Ch_i^k, Ch_j^{k+1} \rangle$ 으로 정의된다.

[정의 5] 가상계곡(virtual canyon)은 임의의 다각형으로 정의되며 Ch_i^k 로 표기되며, 정점 $(v_0, v_1, v_2, \dots, v_{n-1})$ 으로 구성된다. 이때 n 은 다각형의 총 정점의 수이며, 이 정점들의 레벨은 z_k 또는 z_{k+1} 가 된다.

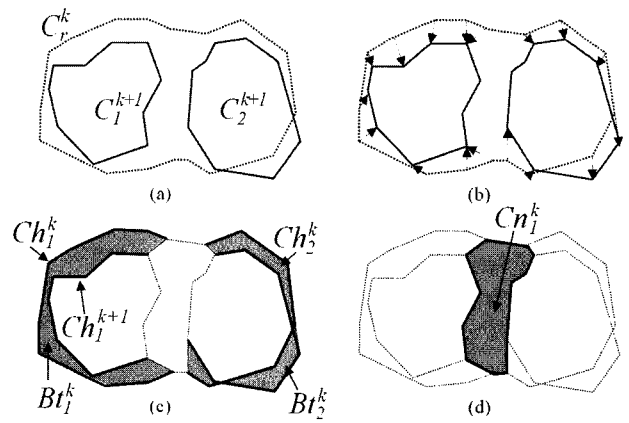
레벨 z_k 의 등고선 C_r^k 이 레벨 z_{k+1} 의 M 개의 가지등고선 ($C_1^{k+1}, C_2^{k+1}, \dots, C_M^{k+1}$)과 연결되는 다중분기문제가 주어졌다고 하자. 기존의 방법들이 이 문제를 단일분기문제로 단순화시키는데 비해서, 제안된 방법은 이 문제를 여러 개의 가상벨트와 가상 계곡으로 분할한다. 다중분기를 가상벨트와 가상계곡으로 단순화시키는 위한 알고리즘은 초기화와 가상벨트 생성 그리고 가상 계곡 생성 단계로 이루어진다.

초기화 단계: 제안된 방법에서는 C_r^k 의 모든 정점들에 대해 최단거리의 정점을 가지등고선에서 찾고, 이를 가상벨트와 가상계곡 생성을 위한 기본정보로 사용한다. 모든 정점에 대해 거리가 가장 가까운 정점 u_{min} ,을 가지등고선에서 찾는다.

$$dist(v_i, u_{min}) = MIN\{dist(v_i, u) | \forall u \in C_j^{k+1}, 1 \leq j \leq M\}$$

이때 $dist(v, u)$ 는 두 정점의 유클리디언 거리이며, C_r^k 의 두 개 이상의 정점에 대해 동일한 정점 u_{min} ,이 선택될 수도 있다. (그림 4)의 (a)와 같이 등고선이 주어지는 경우, 초기화 단계에서 먼저 (b)와 같이 모 등고선의 모든 정점에 대해 대응점을 찾는다.

가상벨트의 생성단계: 모 등고선 C_r^k 의 모든 정점들에 대해 최단거리 정점을 구하고 나면, 다음으로 C_r^k 상의 정점들 중에서 같은 특성을 갖는, 즉 최단정점이 같은 가지등고선에 대응되는, 모든 인접한 정점들을 모아 정점체인을 만든다. 이렇게 만들어진 C_r^k 의 하나의 정점체인 Ch_i^k 의 시작과 끝 정점이 포함된 스캔에 의해 Ch_i^k 에 대응되는 하나의 정점체인 Ch_j^{k+1} 이 가지등고선에서 찾아진다. 이렇게 추출된 인접한 층(z_k 과 z_{k+1})에 있는 한 쌍의 체인 $\langle Ch_i^k, Ch_j^{k+1} \rangle$ 이 하나의 가상벨트 Bt^k 를 형성하게 된다. 예를 들어, (그림 4)의 (c)에서와 같이 모 등고선의 인접한 정점들에 대해 같은 가지등고선을 갖는 인접정점들을 그룹화 하는데, 이 그림에



(그림 4) 다중분기에서 가상벨트 영역 추출

서는 C_r^k 의 좌측 부분에 있는 정점들은 모두 최단정점이 C_1^{k+1} 으로 대응되었으며, 오른쪽 정점들은 C_2^{k+1} 로 대응되었다. 이에 따라 C_r^k 에는 두 개의 정점체인 생기고, 이들 중 Ch_i^k 와 대응되는 z_{k+1} 층의 정점체인이 Ch_j^{k+1} 이 되며 이들에 의해 가상벨트 $Bt^k = \langle Ch_i^k, Ch_j^{k+1} \rangle$ 가 정의된다. 같은 방법으로 모 등고선의 모든 정점체인에 대해 이 과정을 수행하여 스캔들을 그룹화 하면 가상벨트들이 만들어지는데, (그림 4)에서는 왼쪽과 오른쪽으로 두 개의 가상벨트를 생성할 수 있다. 이렇게 정의되는 가상벨트에서 표면을 생성하기 위한 모델링 알고리즘은 다음 장에서 제시한다.

가상계곡의 생성단계: 가상 계곡은 등고선의 모든 에지들 중에서 가상 벨트에 포함되지 않은 에지들에 의해 정의되는 데, 하나의 다중분기 문제에서 여러 개의 가상계곡이 나타날 수도 있다. (그림 4)의 (d)에서와 같이 가상벨트 Bt^k 와 Bt_2^k 의 초기 및 종료스캔과 Bt^k 와 Bt_2^k 에 포함되지 않은 에지, 그리고 가지등고선의 에지들 중에서 Bt_1^k 와 Bt_2^k 에 포함되지 않은 에지에 의해 가상계곡 Ch_i^k 이 정의된다. 특히 이러한 가상계곡은 동일 평면상의 정점들이 아니라 인접한 두 평면에 추출된 체인들이 섞여서 만들어지는 닫힌 다각형이 된다. 또한 정점들의 순서에서는 모 등고선의 정점체인에서는 원래의 방향(반시계)으로 진행되지만 가지 등고선에서는 원래의 정점순서의 역방향(시계방향)으로 정점이 등록되게 된다.

(그림 5)는 제안된 다중분기 알고리즘을 기술하고 있는데, 입력으로 주어지는 등고선의 다중분기를 여러 개의 가상벨트와 가상계곡으로 분할하는 기능을 한다. 제안된 방법을 연속적으로 적용하면 (그림 4)와 같은 이중분기 뿐만 아니라 (그림 3)의 4중 분기 등 일반적인 다중분기문제에 매우 효과적으로 대처할 수 있게 된다. 또한 Bajaj가 제안한 방법이 표면 생성을 위한 3가지의 기준을 제시하고 이를 만족하는 부분에 대해서만 표면을 생성하고 그렇지 못한 부분들에 대해서는 추가적으로 다른 알고리즘(Voronoi Diagram)을 이

```

Procedure Simplifying_Multiple_Branching
// 초기화 단계
1. 모 등고선  $C_r^k$ 의 모든 정점  $v$ 에 대해
    1.1 가지 등고선  $C_1^{k+1}, \dots, C_M^{k+1}$ 의 모든 정점 중에서 최
        단거리 정점  $u_{\min}$ 을 찾음
    1.2  $v$ 에 최단정점  $u_{\min}$ 과  $u_{\min}$ 이 포함된 가지등고선의 ID
        를 저장
2.  $C_r^k$ 의 정점들 중에서  $dist(v_i, u_{\min_i})$ 가 최소인 스패를 초
    기스패 ( $v_0, u_{\min_0}$ )으로 결정하고  $C_r^k$ 의 모든 정점의 인덱
    스를 초기 스패의 인덱스를 기준으로 재설정
// 가상벨트 생성단계
3.  $i \leftarrow 0, j \leftarrow \min_i$ 
4. 새로운 가상벨트  $Bl^k$ 의 시작스패 등록:  $Bl^k \leftarrow (v_i, u_j)$ 
    // 새로운 가상벨트 시작
5. 스패를 다음으로 이동:  $i \leftarrow i + 1, j \leftarrow \min_{i+1}$ 
6.  $u_j$ 가 이전 스패와 같은 가지등고선의 정점인 경우 goto step
    5.
7.  $Bl^k$ 의 종료스패 등록:  $Bl^k \leftarrow (v_{i-1}, u_{\min_{i-1}})$ 
    // 가상벨트 종료
8. 가상계곡  $Cn^k$ 의 시작스패 등록:  $Cn^k \leftarrow (v_{i-1}, u_{\min_{i-1}})$ 
    // 새로운 가상계곡 시작
9.  $v_i \neq v_0$  이면 goto step 4.
// 가상계곡 생성단계
10. 모든 가상계곡  $Cn^k$ 의 시작스패 ( $v_i, u_j$ )에 대해
    10.0 ( $v_i, u_j$ )가 가상계곡의 에지에 포함되어 있으면 continue
        (skip the span)
    10.1 가상계곡 시작정점 저장:  $v_{org} \leftarrow v_i$ 
    10.2  $Cn^k$ 에 정점 등록 및 모 등고선 정점 진행 :
         $Cn^k \leftarrow v_i, i \leftarrow i + 1$ 
    10.3  $v_i$ 가 가상벨트의 시작점이 아니면 goto step 10.2
    10.4  $Cn^k$ 에 모 등고선 정점 등록 :  $Cn^k \leftarrow v_i, j \leftarrow \min_i$ 
    10.5  $Cn^k$ 에 가지 등고선 정점 등록 및 진행:  $Cn^k \leftarrow u_j,$ 
         $j \leftarrow j - 1$  // 역방향 정점등록
    10.6  $u_j$  가상벨트의 종료스패에 있지 않으면 goto step 10.5
    10.7  $Cn^k$ 에 스패 ( $v_i, u_j$ )의 가지등고선 정점 등록 :
         $Cn^k \leftarrow u_j$ 
    10.8  $v_i \neq v_{org}$  이면 goto step 10.2.
    10.9  $Cn^k$  등록 (polygon 생성 완료) 및 goto step 10
    // 가상계곡 종료
    
```

(그림 5) 제안된 다중 분기 알고리즘

용하여 표면을 생성하는데 따라 알고리즘의 완전성과 일관성이 부족하고 구현이 복잡하게 되는데 비해 매우 알고리즘이 명확하고 일관적이며 구현이 간단해지는 장점을 갖는다. 또한 이 과정에서는 영역만을 구분하며 최종 표면의 생성에는 다양한 알고리즘을 적용할 수 있다는 점도 제안된 방법의 장점이라고 할 수 있다.

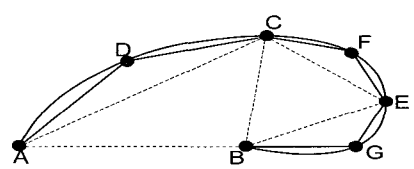
제안된 알고리즘의 시간 복잡도는 $O(mn)$ 인데, 이때 m 과 n 은 각각 모 등고선과 모든 가지등고선들의 정점의 개수를 나타낸다.

4. 표면생성 알고리즘

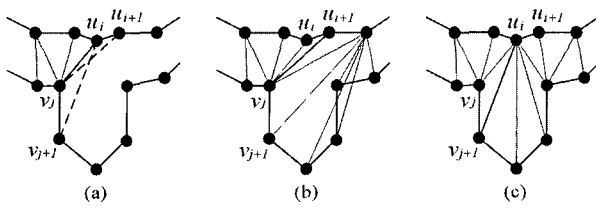
다중분기가 가상벨트와 가상계곡으로 단순화되면 마지막으로 이들을 삼각분할하여 표면모델을 재구성한다. 이때, 가상벨트의 모델링에는 기존에 제안된 등고선 삼각분할의 여러 가지 표면생성(tiling) 알고리즘을 적용할 수 있고, 동일한 평면상에 주어지지 않지만 다각형으로 주어지는 가상계곡의 모델링에는 일반적인 다각형 삼각분할 알고리즘들을 응용할 수 있다. 본 논문에서는 가상벨트의 표면모델링을 위해 Choi가 제안한 방법[14]을 확장하여 사용하였고, 가상계곡의 모델링에는 연속적인 불록 정점제거에 기반한 새로운 방법을 제안한다.

4.1 가상 벨트 표면생성 알고리즘

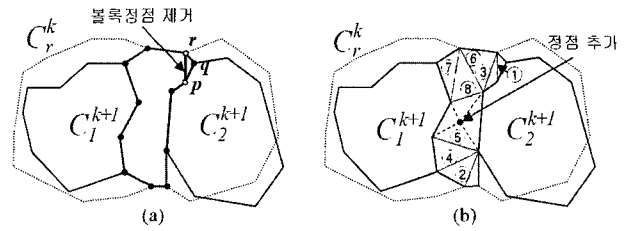
인접한 층에 있는 두 등고선 사이의 실제 표면을 잘 근사하는 삼각형 표면조각들을 구하는 표면생성 문제를 Fuchs[15]는 환형 그래프(Toroidal graph)를 이용하여 설명하였는데, 이 그래프의 노드는 등고선 사이의 스패으로, 에지는 하나의 삼각형 표면조각으로, 그래프의 하나의 경로(path)는 두 등고선 사이의 하나의 가능한 표면 구성으로 대응된다. 이러한 표면생성문제의 해결을 위해 여러 방법들이 제시되었는데, 이들은 그래프에서 최적의 경로(주어진 비용 함수에 대한)를 찾고자 하는 최적해 방법[15,16]과, 휴리스틱을 사용하여 국부적인 탐색으로 삼각형 조각을 생성하고자 하는 경험적 방법[10,17]들로 나눌 수 있다[14]. 본 논문에서는 Choi등이 제안한 띠분할 알고리즘(Band Partitioning Algorithm, BPA)[14]을 확장하여 가상벨트의 표면생성에 사용하였다. BPA는 분할 및 정복(divide and conquer)전략을 사용하여 MSA와 같은 기존의 경험적 방법의 문제를 해결하고자 하였다. BPA는 개념적으로 Ramer의 평면 곡선을 다각형으로 근사하는 알고리즘과 유사한데[20], (그림 6)과 같이 주어진 곡선을 곡선의 두 끝점을 연결하는 선분에서부터 가장 먼 정점을 연속적으로 찾아 곡선을 분할하여 최종적으로 곡선을 근사하는 다각형을 구하게 된다. BPA는 이 개념을 등고선 사이의 표면생성문제에 적용한 방법으로 가상의 띠를 최대변위기준(maximum deviation criteria)을 사용하여 연속적으로 분할하는 방법으로 표면을 생성한다. 기존의 경험적 방법들이 선형시간에 표면을 생성할 수 있는데 비해 이 방법은 $O(n \log n)$ 의 시간 복잡도를 갖지만, 보다 많은 전역 정보를 활용하여 표면을 생성하므로 경험적 방법의 문제인 에러 과급현상을 막을 수 있고 따라서 표면의 품질이 개선된다.



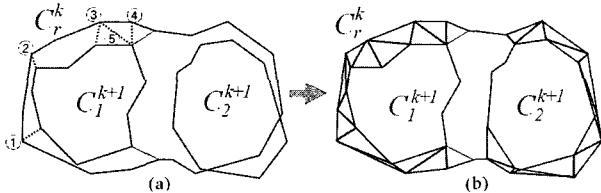
(그림 6) Ramer의 직선 근사법



(그림 7) 경험적 방법의 문제점: (b) MSA, (c) BPA



(그림 9) 제안된 가상계곡 삼각분할 예



(그림 8) BPA에 의한 가상벨트 삼각분할 예

(그림 7)는 Christiansen이 제안한 MSA에 대한 BPA의 장점을 잘 보여주고 있는데, MSA에서는 현재의 스패 $\overline{u_i v_j}$ 다음으로 가능한 $\overline{u_i v_{j+1}}$ 와 $\overline{u_{i+1} v_j}$ 중에서 길이가 짧은 스패($\overline{u_{i+1} v_j}$)을 연속적으로 선택하게 되고 이러한 예러가 파급되어 결국 (b)와 같이 매우 부자연스러운 모델을 만들게 된다. 그러나 BPA에서는 MSA와 같이 두 가지 스패중 하나를 선택하는 것이 아니라 가상 벨트를 연속적으로 분할하는 방법을 사용하고, 따라서 제안된 방법에 의한 가상벨트의 삼각분할에 매우 적합한 구조를 갖는다. 즉 가상 벨트에서 특이하게 생긴 부분 (예를 들어 길쭉하게 튀어나와 있거나 움푹 들어간 곳)들이 먼저 선택되어 보다 많은 정보를 이용하여 대응점이 찾고, 벨트를 분할하게 된다. 따라서 그림의 (c)에서와 보여주고 있는 것과 같이 예러가 누적되어 파급되는 문제를 크게 줄일 수 있다. (그림 8)은 BPA에 의한 가상벨트의 삼각분할 예를 보여주고 있는데, (a)에서 분할의 순서를 예시하고 있다.

4.2 가상 계곡 표면생성 알고리즘

가상벨트에 대한 표면모델링이 끝나면 마지막으로 가상계곡을 삼각분할하여 최종적인 표면모델을 재구성한다. 정의 5에서 언급한 바와 같이 임의의 가상계곡 C_h^k 은 레벨이 z_k 또는 z_{k+1} 이 되는 정점들의 집합으로 이루어진다. 즉 C_h^k 는 평면 다각형이 아니고, 따라서 삼각분할을 위해서는 3차원 Delaunay 알고리즘[21]과 같은 복잡한 3차원 알고리즘을 적용할 수도 있다. 그러나 각 정점의 레벨이 z_k 또는 z_{k+1} 으로 한정되어 있으므로 완전한 3차원 데이터가 아닌 2.5차원 데이터로 볼 수 있으며, 따라서 2차원으로 단순화하여 표면 재구성 알고리즘을 적용할 수 있다. 즉 C_h^k 를 x-y평면으로 투영하여 평면다각형 $\overline{C_h^k}$ 를 만들고 이를 평면 다각형의 삼각분할 알고리즘을 적용해 분할하며, 이후 각 표면조각의 정점들에 대해 원래의 높이 값을 복원하여 삼각분할 하는 방법을 사용한다. 결국 가상계곡에 대한 표면생성문제는 다

각형의 삼각분할 문제로 단순화할 수 있다. 현재까지 계산기하학 분야에서 평면다각형의 삼각분할을 위한 다양한 방법들이 보고되고 있는데, 이들은 대부분 Lee[21]와 같이 시간복잡도를 최적화하는 방법($O(n)$)을 찾거나, Delaunay 알고리즘과 같이 분할된 삼각형의 특성을 최적화하고자 하는 방향으로 진행되었다. 또 다른 접근방법으로 Toussaint이 제안한 방법(sleeve-searching algorithm) [22]에서는 알고리즘의 구현을 간단하게 하며 알고리즘의 복잡도가 형태의 복잡도를 따라가게 하여 실제 문제에서의 효율성을 지향하고자 하였다. 즉 최악의 경우는 $O(n^2)$ 의 시간 복잡도를 갖지만 단순한 형태에서는 실제적으로 선형에 가까운 처리시간을 갖게 하여, 형태가 복잡하지 않은 단순다각형에 대해 효율적인 방법이다. 이 알고리즘의 시간복잡도는 $O(n(1+t_o))$ 로, t_o 가 형태의 복잡도(분할된 삼각형 중에서 어느 한 변도 다각형의 간선이 아닌 삼각형의 수)를 의미하는데, t_o 가 크면 그만큼 복잡한 다각형이고 처리시간이 많이 걸리지만 가상 계곡과 같이 일반적인 다각형의 경우에는 형태가 비교적 간단하고 따라서 실제적인 시간복잡도는 거의 선형에 가깝게 된다.

가상 계곡의 삼각분할에 대한 또 다른 접근 방법은 다각형의 골격(skeleton)이나 중앙축(medial axis)[23]을 적용하는 것으로, 앞서 설명한 일반적인 다각형 삼각분할에서는 추가적인 정점을 사용하지 않는데 비해 골격의 표현을 위해 많은 정점을 다각형에 추가하게 된다[12]. 이들 방법은 다중분기가 발생한 부분을 보다 세밀하게 표현할 수는 있지만 삼각형 표면의 개수가 많이 늘어나고, 특히 가상벨트 영역과 가상계곡 부분의 표면조각의 밀도를 차이가 나게 되므로 제안된 방법에 적용하는 것은 바람직하지 않다.

본 논문에서는 단순하면서 제안된 문제의 특성을 잘 고려한 알고리즘을 연구하였는데, 연속적인 블록정점 제거방법을 사용하였다. (그림 9)의 (a)와 같이 가상계곡 C_h^k 를 x-y 평면으로 투영하여 평면다각형 $\overline{C_h^k}$ 이 주어졌을 때, 이 다각형의 정점들은 블록(검은색)하거나 오목(흰색)한 정점인데, 이들 중 블록한 정점(또는 귀(ear))을 연속적으로 제거하는 방법을 사용한다. 이때 어떤 정점을 제거할 것이냐가 문제인데, 본 논문에서는 선분의 길이를 최소화하는 블록 정점을 선택하였다. 즉, 그림 (a)에서 블록 정점 q의 제거를 위한 선분 \overline{pr} 의 길이가 최소인 경우 q를 제거하게 되며(이때 삼각형 표면조각이 생성됨), 이에 따라 인접 정점 p와 r의 특성이 변하게 되므로 이를 갱신하고, 이를 오목한 정점이

```

Procedure Sharp_Convex_Vertex_Removal
// 초기화 단계
1. 다각형 P의 모든 정점  $v_i$ 에 대해
    1.1  $v_i$ 가 볼록 정점(convex vertex)이면
         $L_{dist}(v_i) \leftarrow dist(v_{i-1}, v_{i+1})$ 
    1.2  $v_i$ 가 볼록 정점이 아니면 (concave vertex)
         $L_{dist}(v_i) \leftarrow \infty$ 
    1.3  $v_i$ 를  $L_{dist}(v_i)$ 를 키 값으로 하여 Priority Queue에
        등록 (길이가 작은 순서)
// 연속적인 Convex Vertex 제거 단계
2. Priority Queue의 최단정점  $v_{min}$ 를 꺼냄(pop)
3. 표면조각 생성:
     $T_{list} \leftarrow \langle v_{min}, v_{min+1}, v_{min-1} \rangle$ 
4.  $v_{min}$ 를 리스트에서 제거
5.  $v_{min-1}$ 과  $v_{min+1}$ 의 길이 값 갱신:  $L_{dist}(v_{min-1})$  및
     $L_{dist}(v_{min+1})$  값을 갱신
6. 모든 정점이 볼록해 질 때까지 goto step 2.
// Convex Polygon Triangulation
7. 모든 정점들의 중심점  $v_{center}$ 을 구함 (평균 사용)
8. 모든 인접한 에지와  $v_{center}$ 를 연결한 표면조각 생성:
     $T_{list} \leftarrow \langle v_i, v_{i+1}, v_{center} \rangle$ 
    
```

(그림 10) 가상 계곡 삼각분할 알고리즘

더 이상 없을 때 까지 계속 반복한다. 최종적으로 모든 정점이 볼록해지면 볼록다각형의 중심을 구하고 (b)에서와 같이 새로운 정점을 중심에 추가하여 최종적인 삼각분할을 끝낸다.

(그림 10)에 제안된 알고리즘을 기술하고 있는데, 이 알고리즘은 우선순위 큐(priority queue)를 사용하여 구현하는 경우 n 개의 정점을 갖는 가상 계곡을 $O(n \log n)$ 시간에 삼각분할 할 수 있다. 평면 다각형의 삼각분할을 위해 Delaunay 알고리즘을 비롯해 다양한 알고리즘이 제안되었는데, 이러한 방법들은 구현이 복잡하며 정점의 추가가 불가능하므로 둥근 모양의 볼록 다각형에서는 좁고 긴 삼각표면을 생성할 수 있다. 이에 비해, 제안된 방법은 가상계곡이 일반적으로 단순한 형태로 나타나므로 짧게 제거할 수 있는 정점들은 제거하고 나머지 볼록다각형에 대해 하나의 정점(중심점)만을 추가하여 바람직하지 않은 형태의 삼각표면조각을 최소화 할 수 있다. 실험을 통해 제안된 알고리즘이 일반적인 가상계곡의 삼각분할에 매우 효과적임을 알 수 있었다.

6. 실험

제안된 알고리즘은 C++ 언어를 이용하여 작성되었고 OpenGL을 기반 그래픽 라이브러리로 사용하여 Pentium-PC 환경에서 구현되었다. 실험을 위해 여러 가지 데이터들 사용하였는데, 다양한 다중분기문제에 대한 처리능력을 확인하기 위해 몇 개의 인공적으로 합성한 등고선이 사용되었으며, 실제로 단층영상에서 직접 추출한 등고선 데이터에 최종적으로 적용해 보았다.

(그림 12-14)는 합성데이터에 대한 실험결과를 보여주고 있다. 먼저 (그림 12)에서 입력데이터 (a)에는 두 개의 2중분기가 발생하는데, (c)와 (d)에서와 같이 제안된 방법이 잘 문제를 해결하였다. (c)와 (d)에서 이중분기 문제가 각각 하나의 가상계곡과 2개씩의 가상벨트에 대한 삼각분할 문제로 변환되었으며, 제안된 알고리즘을 적용하여 매우 자연스러운 표면을 생성하였다. (d)에서 가상 계곡과 함께 등고선이 더 이상 연결되지 않고 마감되는 고립 등고선(isolated contour)이 하나 발생하였는데, 이 등고선의 삼각분할에도 가상계곡에서 사용한 알고리즘을 동일하게 적용하였다.

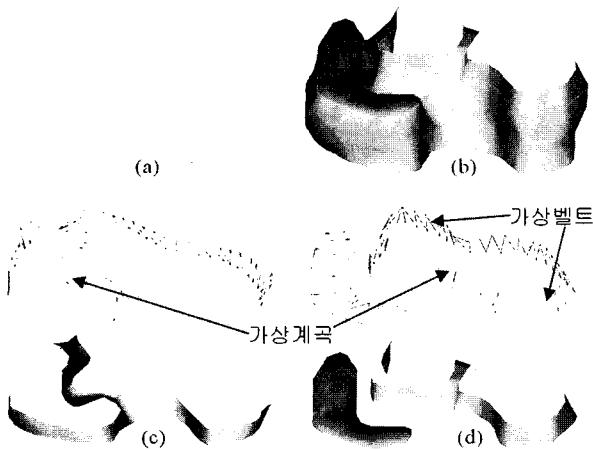
(그림 13)의 (a)에서 두 번째 층과 세 번째 층 사이에 표면이 세 갈래로 분기되는 3중분기가 발생하는데, 제안된 방법을 적용하여 (b)와 같이 자연스럽게 표면을 생성하였다. 제안된 방법에 의해 하나의 가상계곡과 3개의 가상벨트가 생성되었는데, 이러한 3중 분기에서 항상 가상계곡이 하나만 발생하는 것은 아니며, 경우에 따라서 2개의 가상계곡과 여러 개의 가상벨트가 만들어 질 수 있다. 또한 (c)에서와 같이 제안된 가상계곡 삼각분할 알고리즘은 하나의 추가 정점을 분기처리에 사용하는데, 일반적으로 정점을 추가를 사용하지 않는 경우 매우 긴 삼각형 표면조각이 만들어 질 수 있으며, 너무 많은 추가정점을 사용하는 것도 표면조각의 개수 증가와 품질이 좋지 않은 삼각형을 다량 생성할 수 있다. 예를 들어 Choi등이 제안한 방법[12]의 분기처리를 보여주는 (d)에서는 가상계곡 영역을 “분할”하기 위하여 많은 정점이 추가되며, 이에 따라 매우 많은 표면조각들이 발생하며, 그 중에서 많은 수가 매우 길다란 형태로 나타남을 알 수 있다. (그림 14)는 5중분기가 발생하는 경우를 보여주고 있는데, 제안된 방법이 이러한 다중분기문제에 잘 대응하고 있음을 알 수 있다.

(그림 15)은 사람의 hip joint영상에서 추출한 등고선 데이터에 대한 실험결과를 보여주고 있는데, 제안된 방법이 분기를 잘 처리하고 자연스러운 표면을 생성하였다. 특히 (그림 16)의 (a)와 같은 등고선에 대해서 Christiansen등이 제안한 최단스팬 알고리즘(BPA)은 그림 (b)와 같이 매우 자연스럽지 못한 표면을 만드는데 비하여 본 논문에서 채택한 BPA 알고리즘은 (c)와 같이 훨씬 우수한 표면 모델을 만든다. 즉 등치선의 형태가 비슷한 부분에서는 두 방법의 차이가 크지 않으나, 형태가 다른 부분에서는 경험적 방법에 비해 BPA 알고리즘이 훨씬 우월하다는 것을 보여주고 있다.

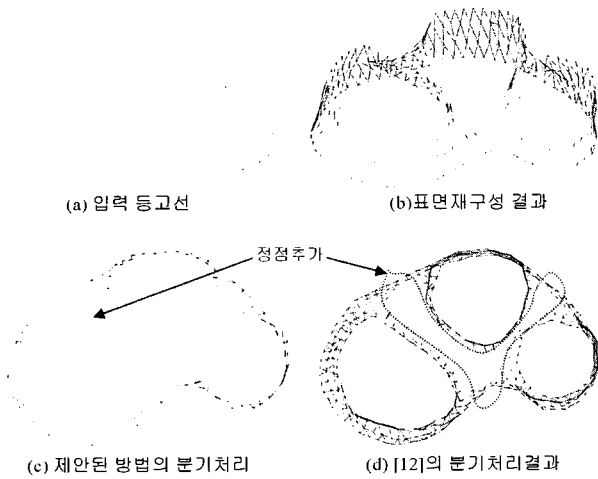
(그림 17)은 Pelvis 데이터에 대한 모델링 결과를 보여준다. 입력 등고선 (a)에 대해 제안된 방법으로 재구성 한 표면을 와이어프레임과 Gouraud 명암법으로 렌더링한 결과를 (b)와 (c)에서 보여주고 있다. 특히 이 데이터에서는 4중 분기가 발생하는데, (e)에서 보여주고 있는 것처럼 제안된 방법에 의해 이러한 다중분기가 세 개의 가상계곡과 6개의 가상벨트 영역으로 나누어지고, 이어지는 삼각분할 단계에서 성공적으로 이들 사이의 표면을 재구성하였다.

<표 1>은 각 데이터에 대한 입력 및 표면 모델링 결과를 정리하여 보여주고 있는데, 복셀기반 표면재구성 알고리즘

에 비해 매우 적은수의 표면조각을 생성하며, 체적 재구성
 법에서 일반적으로 발생하는 거친 표면에 대한 추가적인 엔
 티앨리어싱 처리과정이 필요 없음을 알 수 있다. 또한 처리
 해야 할 데이터양이 매우 적다는 장점을 가지는데, 실험에
 서 사용된 어떤 데이터에 대해서도 수백 msec 이하의 시간
 에 모델링이 되었다. 이러한 실험들을 통해 제안된 다중분
 기 알고리즘은 복잡한 분기문제에 매우 효과적이며 자연스
 럽게 적용된다는 것을 알 수 있었으며, 가상벨트와 가상계
 곡의 삼각분할 알고리즘은 등고선의 형태가 상이한 데이터
 에 대해서도 자연스러운 표면을 생성함을 알 수 있었다.



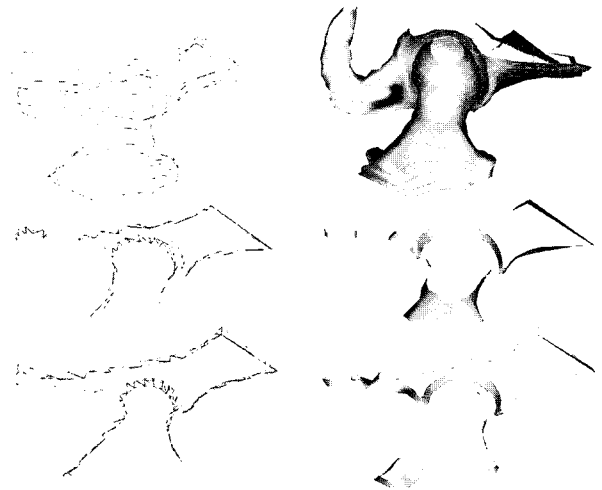
(그림 12) 다중분기와 가상벨트 및 가상계곡



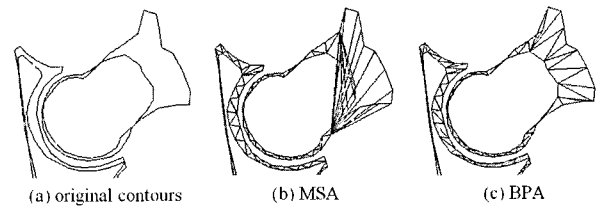
(그림 13) 3중 분기 등고선



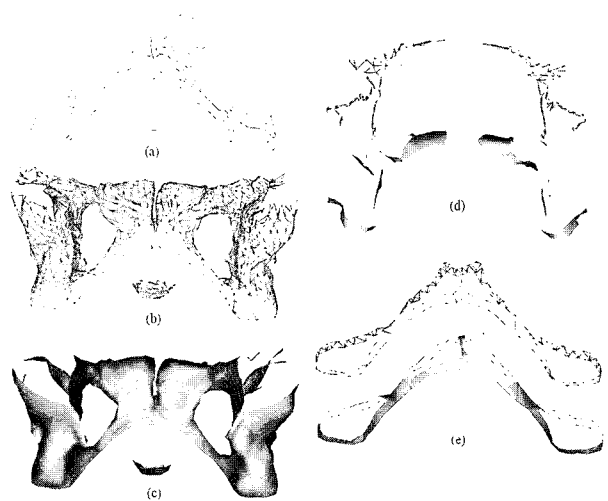
(그림 14) 5중 분기 등고선



(그림 15) Hip Joint 데이터



(그림 16) BPA와 최단스팬 알고리즘(MSA)의 비교



(그림 17) Pelvis 데이터

〈표 1〉 실험 결과

Data	Input Contour			Output Surface	
	#sections	#contours	#vertices	#vertices	#triangles
Double	5	8	385	388	654
multiple3	4	8	347	348	528
multiple5	2	6	146	147	156
hip joint	14	38	926	964	1737
Pelvis	16	51	1850	1905	3741

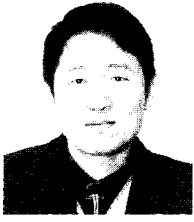
7. 결 론

본 논문에서는 등고선으로 표현된 물체의 볼륨정보에서부터 3차원 표면을 재구성하는 등고선 삼각분할법에서 가장 복잡한 문제인 표면분기문제를 해결하기 위한 효율적인 방법을 제시하였다. 제안된 방법의 특징은 복잡한 다중분기문제를 단순화된 여러 개의 가상벨트와 가상계곡으로 변환시키는데 있다. 가상벨트에서 최종 표면을 생성하기 위해서 띠분할 알고리즘을 채택하였으며, 가상계곡은 반복적인 볼륨정점 제거와 중심점 추가를 통해 보다 자연스러운 표면을 생성하도록 하였다. 기존의 방법들이 대부분 다중분기문제를 한 쌍의 등고선간의 표면생성문제로 단순화하고자 하는데 비해 제안된 방법은 더 작은 형태인 가상벨트와 가상계곡으로 단순화시켰으며, Bajaj가 제안한 방법과 같이 복잡한 조건을 사용하고 이를 만족하지 못하는 부분에 대한 후처리가 필요한 것이 아니라 명확한 기준에 의해 단순하고 일관성 있는 알고리즘을 제공한다. 제안된 방법은 등고선 삼각분할의 가장 어려운 문제인 분기문제를 해결하기 위한 매우 효과적인 접근방법으로, 의료영상에서 추출한 다양한 실제 등고선 데이터에 적용한 결과 좋은 성능을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] K. Höhne and R. Bernstein, "Shading 3d-images from CT using gray-level gradients," *IEEE Trans. Medical Imaging*, pp. 45-47, 1986.
- [2] M. Levoy, "Display of surfaces from volume data," *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 8, no. 3, pp. 29-37, 1988.
- [3] C. H. Chien and J. K. Aggarwal, "Volume/surface octrees for the representation of three-dimensional objects," *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, vol. 36, pp. 100-113, 1986.
- [4] 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.
- [5] W. E. Lorensen and H. E. Cline, "Marching cubes: a high resolution 3-d surface construction algorithm," *Comput. Graph.*, vol. 21, no. 4, pp. 163-169, 1987.
- [6] 최영규, 이의택, "의료영상 가시화를 위한 셀 경계 방식 체계 재구성 방법," *정보과학회논문지* 27권, 3호, pp. 235-244, 2000년 3월
- [7] D. Meyers, S. Skinner, and K. Sloan, "Surfaces from contours," *ACM Transactions of Graphics*, vol. 11, no. 3, pp. 228-258, July 1992.
- [8] L. G. Nonato, A. J. Cuadros-Vargas, R. Minghim, and M. C. Oliveira, "Beta-Connection: Generating a family of models from planar cross sections," *ACM Trans. on Graphics*, Vol.24, No.4, pp. 1239-1258, Oct. 2005
- [9] A. B. Ekoule, F. Peyrin, and C. L. Odet, "A triangulation algorithm from arbitrary shaped multiple planar contours," *ACM Transactions of Graphics*, vol. 10, no. 2, pp. 182-199, Apr. 1991.
- [10] H. N. Christiansen and T. W. Sederberg, "Conversion of complex contour line definition into polygonal element mosaics," *Comput. Graph.*, vol. 20, pp. 693-702, 1978.
- [11] J. D. Boissonnat, "Shape reconstruction from planar cross sections," *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, vol. 44, pp. 1-29, 1988.
- [12] 최영규, "이중분기 확장을 통한 등치선 삼각화의 다중분기 알고리즘," *정보과학회논문지* 제 27권, 2호, pp. 123-134, 2000년 2월
- [13] C. Bajaj, E. Coyle, and K. Lin, "Arbitrary topology shape reconstruction from planar cross sections," *Graph. Models Image Process.* vol. 58, no. 6, pp. 524-543, 1996.
- [14] Y.K. Choi, "Band partitioning algorithm for surface reconstruction from planar contours," *Electronics Letters*, Vol. 35, No. 20, pp. 1713-1714, Sep. 1999
- [15] H. Fuchs, F. Peyrin, and C. L. Odet, "A triangulation algorithm from arbitrary shaped multiple planar contours," *Communication of the ACM*, vol. 20, no. 10, pp. 693-702, Oct. 1977.
- [16] E. Keppel. "Approximating complex surfaces by triangulation of contour lines," *IBM. J. Res. Develop.*, vol. 19 pp. 2-11, 1975.
- [17] Ganapathy and T. G. Dennehy, "A new general triangulation method for planar contours," *Comput. Graph.*, vol. 16, no. 3, pp. 69-75, July 1982.
- [18] P. N. Cook and S. Batnitsky, "Three dimensional reconstruction from serial sections for medical applications," *14'th International Conference on System Science*, pp. 358-389, 1981.
- [19] 최영규, 조태훈, "등치선 삼각분할을 위한 띠 분할 알고리즘," *한국정보처리학회 논문지* 제 7권, 3호, pp. 943-952, 2000년 3월.
- [20] U. Ramer, "An iterative procedure for the polygonal approximation of plane curves," *Computer Graphics and Image Processing*, vol. 1, pp. 244-256, 1972.
- [21] F. P. Preparata and M. I. Shamos, *Computational Geometry, An Introduction*. Springer-Verlag, 1987.
- [22] G. Toussaint, "Efficient triangulation of simple polygons," *The Visual Computer*, vol. 7, no. 5-6, pp. 280-295, Sep. 1991.
- [23] D. T. Lee, "Medial axis transformation of a planar shape," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.4, no.4, pp. 363-369, July 1982.

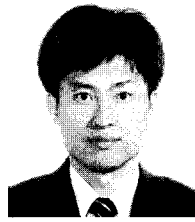
최영규



e-mail : ykchoi@kut.ac.kr
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 교수
관심분야: 컴퓨터그래픽스, Surface Modeling, 가상현실,
영상인식 등

이승하



e-mail : shalee@dankook.ac.kr
1988년 경북대학교 전자공학과 졸업(학사)
1999년 한국과학기술원 전기 및
전자공학과(공학석사)
1995년 한국과학기술원 전기 및
전자공학과(공학박사)

1995년~1996년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과
위촉연구원(Post-Doc)
1996년~2005년 경북대학교 전자전기 컴퓨터공학부 BK21 교수
2005년~현재 단국대학교 의과대학 의공학교실 교수
관심분야: 의공학시스템, 지능제어, 임베디드시스템