

컨투어 트리를 이용한 삼차원 볼륨 영상의 대화형 시각화 기법 개발

손 봉수*

Development of Interactive 3D Volume Visualization Techniques Using Contour Trees

Bong-Soo Sohn*

요 약

본 논문은 삼차원 볼륨 영상으로부터 컨투어 트리를 이용하여 볼륨 영상의 구조를 보여주고 등위면과 그 요소들을 대화형으로 선택하고 시각화하여 영상의 깊은 이해를 돕는 새로운 기법과 프로그램의 개발에 관하여 기술한다. 이 기법의 특징은 컨투어 트리를 사용자가 이해하기 쉽게 2차원 평면상에 배치하는 새로운 알고리즘과, GPU의 병렬구조를 활용하여 등위면 요소를 효율적으로 추출할 수 있도록 하는 알고리즘을 제시한 데 있다. 이러한 알고리즘의 구현을 통해 본 연구진이 개발한 프로그램은 컨투어 트리를 이용하여 등위면 요소를 추출하는 대화형 사용자 인터페이스와 기존의 등위면 및 볼륨 렌더링이 융합된 시각화를 가능하게 해주는 특징이 있다. 본 논문에서 제안하는 기법의 우수성을 검증하기 위하여, 제안된 알고리즘을 삼차원 생의학 영상에 적용하여 그 성능을 측정해 보았다. 그 결과 제안된 컨투어 트리 배치 기법에 기반한 사용자 인터페이스를 이용하여 주어진 영상의 관심 영역인 폴리헵타이드 체인과 뇌실 그리고 대퇴골을 나타내는 등위면 요소를 각각 대화형으로 선택하고 이를 기존 방법에 비교하여 3배~4배이상 빠른 속도로 계산할 수 있었다.

▶ Keyword : 등위면, 컴퓨터 그래픽스, 시각화, 컨투어 트리

Abstract

This paper describes the development of interactive visualization techniques and a program that allow us to visualize the structure of the volume data and interactively select and visualize the isosurface components using contour tree. The main characteristic of this technique is to provide an algorithm that draws the contour tree in 2D plane in a way that users easily understand the

• 제1저자, 교신저자 : 손봉수

• 투고일 : 2011. 09. 23, 심사일 : 2011. 10. 18, 게재확정일 : 2011. 10. 24.

* 중앙대학교 컴퓨터공학부(School of Computer Science and Engineering, Chung-Ang University)

tree, and to provide an algorithm that can efficiently extract an isosurface component utilizing GPU's parallel architecture. The main characteristic of the program we developed through implementing the algorithms is to provide us with an interactive user interface based on the contour tree for extracting an isosurface component and visualization that integrates with previous isosurface and volume rendering techniques. To show the excelland vof our methods, we applied 3D biomedical volume data to our algorithms. The results show that we could interactively select the isosurface components that represent a polypeptide chain, a ventricle and a femur respectively using the user interface based on our contour tree layout method, and extract the isosurface components with 3x-4x higher speed compared to previous methods.

▶ Keyword : Isosurface, Computer Graphics, Visualization, Contour Tree

I. 서 론

과학적 시뮬레이션 또는 CT나 MRI와 같은 영상 스캐닝 장치들은 고해상도의 삼차원 볼륨 영상을 생성한다. 등위면 추출은 볼륨 영상을 시각화하는 가장 흔한 방법 중 하나이다. 등위면은 $I(w) = \{(x,y,z) | F(x,y,z) = w\}$ 로 나타내어지는 등위 집합(level set)으로 정의된다. 여기서 F 는 볼륨 영상으로부터 정의되는 함수이고 w 는 등위값(isovalue)이다. 등위면은 주어진 볼륨 영상의 구조를 효과적으로 나타내기 때문에 영상을 깊이 이해하고 분석하는데 큰 도움이 된다.

컨투어 트리(Contour Tree) [1]는 <그림 1>에서 볼 수 있듯이 등위값 변화에 따른 등위면의 위상 변화를 나타냄으로써 볼륨 영상의 구조를 보여주는 자료 구조이며 등위면을 시각화하는데 매우 유용한 툴이다. 첫째, 컨투어 트리는 일반적인 렌더링 기법으로부터 직접적으로 얻어질 수 없는 볼륨 영상의 위상학적 구조를 제공해 준다. 둘째, 컨투어 트리는 개별 등위면 요소를 선택 및 분할하고 그려주는 것을 가능하게 해준다. 셋째, 컨투어 트리를 이용하여 개개의 등위면 요소나 전체 등위면을 효율적으로 추출하기 위한 씨드(seed) 집합 [2]을 생성할 수 있다. 그 추출 과정은 주어진 씨드셀(seed cell)에 등위면 요소 표면으로 연결된 셀들을 점진적으로 방문하고 삼각화(triangulation)하는 전이 알고리즘[2]을 사용한다.

하나의 등위면은 흔히 여러 개의 등위면 요소로 구성된다. 이 때, 중요성이 높거나 낮은 등위면 요소들이 섞여있는 경우, 중요한 등위면 요소만을 선택하고 재빨리 그려줄 수 있는 기능은 주어진 영상내의 관심 영역을 찾고 분석하는데 중요한 역할을 한다. 반면, <그림 5> (c)에서 볼 수 있듯이, 기존의 등위면 시각화 기법은 등위면 요소의 세부적인 구분 없이 등위면 전체를 시각화 하므로 효과적인 볼륨 시각화에 한계를

가진다. 컨투어 트리를 이용하여 개별 등위면 요소를 추출하는 방법에 대한 시도[1][3]가 있었다. 그러나, 이러한 시도들은 컨투어 트리를 사용자가 이해하고 조작하기 쉬운 형태로 그리고, 분석하고자 하는 등위면 요소를 선택하여 시각화하는 효과적인 사용자 인터페이스를 제공하지 못하였다. 또한 등위면 요소를 추출하는데 필요한 전이 알고리즘[2]은 순차적으로 진행되어야 하는 성질 때문에 아직 GPU 및 하드웨어를 이용한 가속화된 방법이 개발되어 있지 않다. 그러므로, 반응 속도가 매우 중요한 대화형(interactive) 시각화 프로그램의 구현에 큰 제약이 있었다.

본 논문은 위에서 기술한 기존 시각화 기법들의 문제점을 극복하고 컨투어 트리를 이용한 대화형 볼륨 영상 시각화 기법을 개발하는 것에 관하여 기술한다. 이 기법을 통해 볼륨 영상을 입력으로 읽은 뒤, 찾고자 하는 등위면 요소를 선택하고 효율적으로 추출하여 대화형 시각화의 기능을 향상시켰다. 본 논문이 고유하게 기여하는 바는 다음과 같다.

- (i) 컨투어 트리를 사용자가 이해하고 조작하기 쉬운 형태로 2차원 평면상에 배치하는 새로운 알고리즘을 제안하였다.
- (ii) 등위면 요소의 추출 과정을 순차적인 부분과 병렬적인 부분으로 나눈 뒤, 병렬적인 부분을 다중코어 GPU를 이용하여 매우 빠르게 수행함으로써 추출 과정의 속도를 향상시켰다.
- (iii) 컨투어 트리를 이용하여 등위면 요소를 선택하고 추출하는 새로운 사용자 인터페이스와 기존의 등위면 및 볼륨 렌더링 기능이 융합된 대화형 볼륨 시각화 프로그램을 개발하였다.

본 논문의 나머지 부분은 다음과 같이 구성되어 있다. II장에서 관측분은구를 검토한 뒤, III장에서 우리는 등위면 요소의 추출 및 시각화를 위한 전체적인 과정을 보여준다. IV장은 컨투어 트리와 씨드 집합 생성을 위한 선처리 과정을 요약하

여 설명한다. V장은 등위면요소의 대화형 시각화를 위한 인터페이스로서 컨투어 트리를 2차원 평면에 배치하여 그리는 방법과 선택된 등위면 요소를 GPU를 이용하여 효율적으로 추출하는 방법, 그리고 이를 통합하여 개발한 대화형 볼륨 영상 시각화 프로그램의 개발 결과를 설명한다. VI장은 컨투어 트리 인터페이스 생성 결과와 등위면 요소 추출의 시간적 효율성을 측정할 실험 결과를 설명한다. 마지막으로, VII장에서 우리는 본 논문의 결론을 제시한다.

II. 관련 연구

볼륨 영상으로부터 등위면을 빠르게 추출하기 위한 많은 연구가 있었다. 가장 기본적인 알고리즘으로서 Marching Cubes 기법[4]은 데이터 내의 각 셀을 방문하고 셀 내부의 등위면에 대한 삼각화를 수행하여 전체 등위면을 추출한다. 이 때, 정육면체형 셀이 가지고 있는 여덟 정점에서의 부호 형상에 따라 미리 계산된 삼각화 표를 통해 등위면을 추출한다. 이 과정을 가속화하는 알고리즘은 필요 없는 셀의 방문을 피하여 셀 검색 시간을 최소화하도록 개발되었다[2].

등위면 요소 표면을 포함하고 있는 셀들은 미리 계산된 씨드셀로부터 전이 알고리즘에 의해 추적될 수 있다[2]. 이 성질은 작은 크기의 씨드셀들을 이용하여 등위면을 포함하는 셀들을 검색하는데 필요한 시간과 메모리 공간을 줄여준다. 볼륨 영상의 크기가 증가함에 따라 병렬 계산 및 외부 메모리를 이용하는 등위면 추출 방법들이 큰 데이터 용량을 관리하고 높은 성능을 얻기 위하여 개발되었다[5][6]. 시간이 변하는 볼륨 영상에서 등위면을 추출하는 경우 시공간적인 응집성을 이용한 자료 구조를 생성하여 등위면 추출 과정을 가속화할 수 있다[7].

최근에는 GPU의 높은 병렬 처리 능력을 이용한 실시간 등위면 추출 방법 [8][9]이 개발되었으나, 본 논문의 주제중 하나인 등위면 요소의 효율적인 추출을 위해서는 전이 알고리즘의 순차적 특성 때문에 적용되지 못하는 한계가 있다.

하나의 볼륨 영상에는 무한히 많은 등위면이 정의되어 있으므로 찾고자 하는 등위면을 발견하고 선택하는 과정은 매우 중요하다. 이 과정을 효과적으로 해주기 위한 사용자 인터페이스로서 컨투어 스펙트럼[10]과 사파리[11]가 개발되었다. 이 방식들은 각 등위면의 표면적이나 부피와 같은 정량적인 성질값을 미리 계산하여 하나의 평면에 보여주어 유의미한 등위면을 얻을 수 있는 등위값을 사용자가 선택할 수 있도록 해준다.

컨투어 트리는 영상 처리 및 지리 정보 시스템등의 다양한 영역에서 이용되어 왔다. 우리의 주요 관심사는 컨투어 트리를 시각화에 사용하는 데 있다. Carr, Snoeyink와 Axel[14]은 이전 알고리즘들[12][13]을 확장하여 컨투어 트리를 모든 차원에서 계산하는 알고리즘을 개발하였다. 집합 트리와 분리 트리가 계산된 뒤 합병되어 컨투어 트리가 계산되며, 주어진 입력 데이터가 M 개의 요소와 N 개의 정점으로 이루어진 단순형 메쉬에서 정의될 때, 이 처리 과정은 $O(M + M \log N)$ 의 시간 복잡도를 가진다. Pascucci는 컨투어 트리의 단일한 간선에서 정의되는 등위면 요소의 서로 다른 위상을 구분하기 위하여 각 등위면 요소의 베타 수 (Betti Number)를 계산하였다[15]. 분할정복 방법을 이용하면 직선형 격자에서 정의된 볼륨 영상으로부터 컨투어 트리를 더욱 빠르게 계산할 수 있으며 병렬 구현으로 쉽게 확장될 수 있다[15].

Carr와 Snoeyink[1]는 컨투어 트리를 등위면의 위상학적 구조를 나타내고 단일 등위면 요소를 추출하는 목적으로 이용하였다.

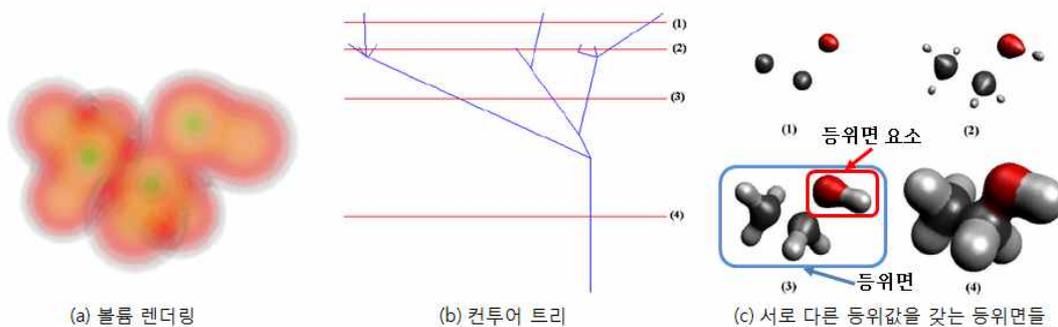


그림 1. 에탄올 분자(CH_3CH_2OH) 볼륨 영상의 시각화 및 컨투어 트리

Fig. 1. Visualization of an Ethanol molecule(CH_3CH_2OH) density map and its associated Contour Tree

이 방식에서 컨투어 트리의 각 간선에 대하여 경로 씨드(path seed)가 계산되어 선택된 등위면 요소의 재빠른 추출에 필요한 씨드셀을 실행 중 생성할 수 있도록 한다. 이러한 컨투어 트리의 장점은 시간이 변하는 볼륨 데이터로 확장되었다[3][16]. 이는 주어진 등위면 요소의 영역을 시간적으로 추적하는 방식[17][18]에 비해 더욱 효율적이고 편리하다. 주어진 자료로부터 계산된 원래의 컨투어 트리는 이해하고 조작하기에 너무 복잡하므로 트리의 단순화가 실행될 수 있다[19]. 단순화된 컨투어 트리를 미적인 감각으로 그리기 위한 방법[21]이 개발되었으나, 등위면 요소 추출을 위한 인터페이스로서의 사용은 고려되지 않았다. 위와 같이 추출된 등위면 요소는 [22]의 방법을 이용하여 시간이 변하는 볼륨 영상 [23]에서 시간에 따른 움직임이 추적될 수 있다.

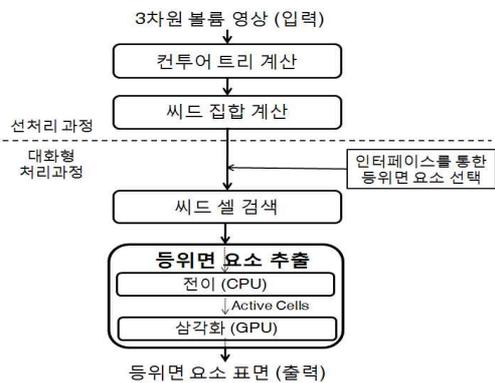


그림 2. 등위면 요소의 대화형 시각화를 위한 전체적인 과정
Fig. 2. Overall process for interactive visualization of isosurface components

III. 개요

본 연구에서 개별 등위면 요소의 대화형 추출을 위한 전반적인 과정은 <그림 2>와 같이 요약된다. 입력은 삼차원 볼륨 영상이다. 우리는 선처리 과정으로서 입력 영상으로부터 컨투어 트리와 각 간선에 대한 씨드 집합(Seed Set)을 계산한다.

컨투어 트리의 간선 위에 있는 각 점은 등위면 요소와 일대일 대응이 된다. 사용자는 컨투어 트리상의 점을 클릭함으로써 특정 등위면 요소를 선택하고 추출할 수 있다. 특정 등위면 요소가 선택되었을 때, 씨드셀이 미리 계산된 씨드 집합으로부터 식별되고 선택된 등위면 요소의 전체 표면은 씨드셀로부터의 전이를 통하여 대화형으로 추출된다.

우리는 다중코어(multi-core) GPU상에서 실행되는 삼각화 과정의 병렬 구현을 개발하여 등위면 추출 과정의 속도를 향상시켰다. 삼각화 과정은 등위면 요소와 교차하는 셀들, 즉 활성 셀들(Active Cells)로부터 등위면 요소 표면의 기하정보(e.g. 정점 위치, 법선벡터, 삼각형 연결정보 등)를 계산한다. 우리는 이 과정을 CUDA를 통해 다중코어 GPU상에서 병렬로 실행하여 속도를 비약적으로 향상시켰다. 삼각화 과정은 각 셀의 데이터가 서로 독립성을 가지고 있으며 계산 집중적인 일로 구성되어 있어 CUDA를 이용한 효율적인 병렬 구현에 적합하다.

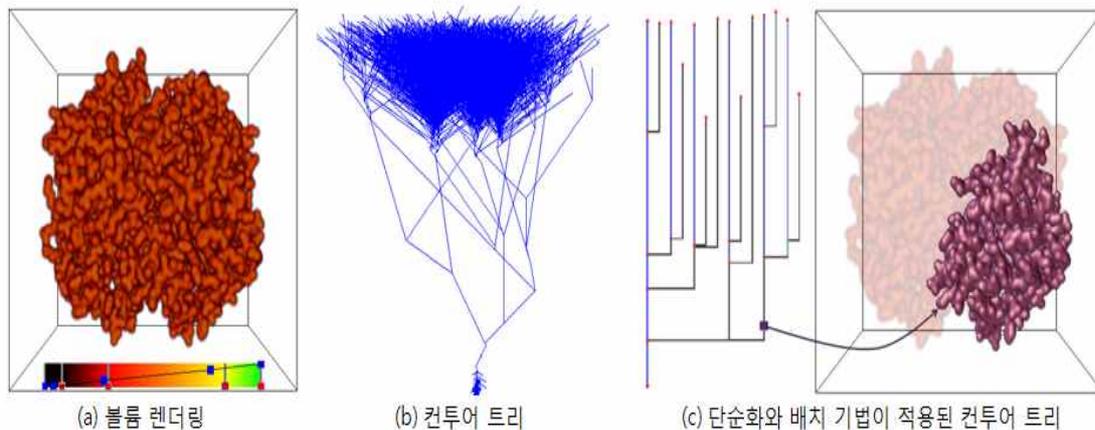


그림 3. 컨투어트리 인터페이스를 이용한 등위면 요소 추출 (입력자료: 헤모글로빈 분자의 전자밀도 근사볼륨)
Fig. 3. Isosurface component extraction using contour tree interface (input data: Hemoglobin electron density map)

IV. 선처리과정 (Preprocessing)

선처리과정은 삼차원 직선형 볼륨 영상으로부터 컨투어 트리와 각 간선에 대한 씨드 집합의 계산으로 구성되어 있다. 이 과정들을 위한 각 알고리즘은 다음과 같이 설명된다.

1. 컨투어 트리 계산

정점 집합 V 와 간선 집합 E 를 가진 컨투어 트리는 다음과 같이 스칼라 함수 F 에서 정의된다. V 는 등위면 요소들이 생성/소멸/병합/분리되는 지점인 F 의 극점으로 이루어진다. 등위면 요소 클래스를 극점을 포함하지 않는 연속된 등위면 요소들의 최대 집합이라고 정의하자. 간선 집합인 E 는 등위면 요소 클래스가 생성되고 소멸되는 두 극점을 잇는 간선들로 구성된다.

우리는 경로 씨드 계산에 있어 단순성을 가지는 이점을 얻기 위해, 컨투어 트리의 계산에 [14]의 방법을 확장하여 적용하였다. 최대값을 가지는 정점부터 함수값의 내림차순으로 정점들을 방문하면서 정점들과 간선들을 Union-Find구조를 이용하여 차례로 추가한다. 이 과정을 통하여 영역 M 위에서 연결 집합인 $X(w) = \{v \in M | F(v) \geq w\}$ 을 점진적으로 만들어나간다. 이 과정을 반복하면, 등위값 w 가 최대값에서 최소값으로 연속적으로 감소함에 따라 $X(w) = \{x | F(x) \geq w\}$ 의 연결 요소들이 접합하는 과정을 나타내는 접합 트리 (Join Tree)를 생성한다. 분리 트리 (Split Tree)는 이 과정을 반대 방향인 최소값에서 최대값으로 수행하여 생성한다. 접합 트리의 위쪽 리프(upper leaves)들과 분리 트리의 아래쪽 리프(lower leaves)를 연속적으로 삭제하고 그와 인접한 간선들을 삽입하여 만든 트리에서 정규 정점(regular vertex)를 삭제하면 컨투어 트리를 얻을 수 있다.

2. 씨드 집합 계산

우리는 선처리 과정에서 경로 씨드 방법[1]을 이용하여 컨투어 트리의 각 간선에 대한 씨드 집합을 계산한다. 경로 씨드는 사용자가 선택한 등위면 요소와 교차하는 씨드셀을 생성하고 그 씨드셀로부터의 전이가 이루어져 등위면 요소 표면을 효율적으로 추출하는데 사용된다.

컨투어 트리상에 있는 임의의 간선 $e = (x, y)$ 를 고려하자. x 와 y 는 e 와 연관된 등위면 요소 클래스가 시작하고 끝나는 두 극점이며 $F(x) \geq F(y)$ 를 만족한다. 이때 x 가 위에서 아래 방향으로 하나의 컨투어 트리 간선을 가지는 접합 정점이면 x 와 인접하며 $F(x)$ 보다 작은 값을 가지는 정

점 z 가 있을 때 간선 (x, z) 가 e 의 경로 씨드가 된다. 만약 x 가 위에서 아래 방향으로 두 개 이상의 컨투어 트리 간선을 가지는 분리 정점이면 (x, y) 에 해당되는 분리 트리상의 간선에 속하는 정점들 중 x 와 인접하며 $F(x)$ 보다 작은 값을 가지는 정점 z' 가 있을 때, 간선 (x, z') 이 e 의 경로 씨드가 된다. 이러한 방식으로 컨투어 트리의 모든 간선에 대한 경로 씨드가 계산된다. 사용자가 컨투어 트리의 간선위에 있는 임의의 점을 선택하여 그에 해당하는 등위면 요소를 추출하고자 할 때, 그 간선의 경로 씨드로부터 인접한 정점들 중 값이 가장 작은 정점을 방문하는 과정을 반복하면 선택된 등위면 요소와 교차하는 씨드셀을 찾아 전이 과정을 수행하여 등위면 요소 표면을 추출한다.

V. 등위면 요소의 대화형 시각화

1. 컨투어 트리의 레이아웃

이전 장에서 설명된 컨투어 트리 계산의 결과에 의하여 정점집합 V 와 간선 집합 E 로 구성된 트리 (V, E) 가 생성된다. 이 컨투어 트리는 입력 볼륨 영상의 위상학적 구조만을 내포하고 있어 그 구조를 사용자가 이해하기 쉽고 조작하기 쉬운 인터페이스 형태로 보여주기 위한 방법이 필요하다. 이를 위하여 우리는 컨투어 트리의 효과적인 2차원 배치 방법과 같이 제안한다.

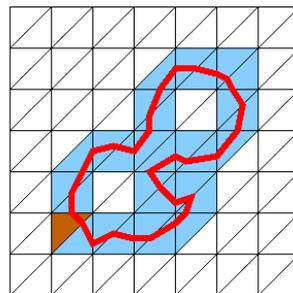


그림 4. 씨드셀(갈색)로부터 등위면 요소(빨간색)를 추출하기 위한 전이 알고리즘
Fig. 4. Propagation algorithm for extracting isosurface component(red) from seed cell(brown)

계산된 원본 컨투어 트리는 <그림 3> (b)와 같이 일반적으로 사람이 보고 이해하기 어려운 정도의 많은 정점과 간선으로 이루어져 있어, 이해하기 쉽도록 우선 단순화 과정을 거쳐야 한다[19]. 단순화 과정의 목적은 트리의 중요하지 않은 부분을 제거하여 중요한 부분을 강조하여 보여주는 것이다. 우

리는 [20]에서 제안한대로 간선의 중요성을 그 간선의 지속성(persistence) 즉 두 정점의 함수값 차이로 간주하여, 지속성 값이 작은 간선을 우선적으로 제거하는 정책을 수행하였다. 또한, 사용자가 원하는 단순화 정도를 한계값(threshold)으로 사용하여 그 한계값보다 지속성 값이 작은 간선들을 모두 제거하였다. 단순화된 컨투어 트리는 다음과 같이 배치된다.

1. 우선 트리에서 단조증가 또는 단조감소하는 가장 긴 간선 경로를 찾는다. 이 경로의 두 끝 정점을 v_1 과 v_2 라고 했을 때, 화면 가장 왼쪽에 수직으로 v_1 과 v_2 를 연결하는 직선, 즉 $(0, F(v_1))$ 과 $(0, F(v_2))$ 를 잇는 직선을 삽입한다.

2. 이전 단계에서 얻어진 가장 긴 간선 경로에 연결된 각 정점 v_3 에 대하여 다시 v_3 와 연결된 단조증가 또는 단조감소하는 가장 긴 간선 경로를 찾는다. 또한 그 경로 상에서 유도될 수 있는 모든 리프 정점의 수를 저장해둔다. 이때 찾아진 가장 긴 간선의 다른 끝 정점을 v_4 라고 하자. v_3 와 v_4 를 \perp 또는 γ 모양으로 연결하는 직선을 삽입한다. 이 때 v_4 의 x 축(수평) 좌표값은 가장 긴 간선 경로를 나타내는 수직 직선의 x 축 좌표값에 v_3 보다 위에 있는 간선 경로에 연결된 정점에서 계산된 리프 정점의 수를 전체 리프 정점의 수로 나눈 값을 더한 값이 되며, y 축(수직) 좌표값은 v_4 의 함수값 $F(v_4)$ 가 된다.

3. 2 과정을 모든 정점이 처리될 때까지 재귀적으로 실행한다. 위의 과정을 통해 그려진 컨투어 트리는 <그림 3> (c)에서 볼 수 있듯이 2차원 평면에 배치되어 3차원 공간상에 그려지는 경우보다 사용자가 직관적으로 이해하기 쉬우며, 각 리프 정점이 고유한 x 축 좌표값을 가지게 되어 대부분의 경우 정점과 간선이 교차하지 않아 정돈된 느낌을 주며 혼동을 줄여주어 자료에 대한 이해도를 높게 해준다.

2. 효율적인 등위면 요소 선택 및 추출

경로썬드는 선처리 과정의 결과로서 저장되어 있다. 실행 중 사용자가 원하는 특정 등위면 요소를 컨투어 트리 인터페이스 상에서 선택하였을 때, 선택된 등위면 요소와 교차하는 썬드 셀이 경로썬드로부터 유도된다. 우리는 썬드셀로부터 전이 알고리즘을 수행하여 단일한 등위면 요소 표면을 추출할 수 있다. 전이 알고리즘은 <그림 4>에서 볼 수 있듯이 주어진 썬드셀로부터 등위면 요소로 연결된 이웃하는 셀들을 방문하

```

전체전이알고리즘( $s$ )
입력 썬드셀  $s$ 
출력  $s$  와 교차하는 등위면 요소  $C$ 
1:  $A \leftarrow$  순수전이알고리즘( $s$ ) 실행 //  $A$ 는 활성셀리스트
2:  $C \leftarrow$  삼각화( $A$ );
   // 각 활성셀을 GPU에서 병렬로 삼각화함

순수전이알고리즘( $s$ )
입력 썬드셀  $s$ 
출력 등위면 요소와 교차하는 모든 셀 (활성셀 리스트  $A$ )
3:  $s$  를 방문한다;
4:  $s$  를 큐에 삽입한다;
5: 큐가 비게 될 때까지 다음 과정을 반복
6:  $c \leftarrow$  큐에서 원소를 빼낸다;
7:  $c$  를 활성셀리스트인  $A$  에 삽입한다;
8: 등위면 요소와 교차하는  $c$  의 각 면  $f_i$  에 대하여 반복
9:    $c' \leftarrow c$  와  $f_i$  를 공유하는 셀
10:   만약  $c'$  이 이미 방문한 셀이 아니라면
11:     큐에  $c'$  을 삽입한다;

삼각화( $A$ )
입력 활성셀 리스트  $A$ 
출력 등위면 요소 표면 매쉬 정보  $C$ 
12: GPU쓰레드를 생성한다;
13: 각 GPU쓰레드는 활성셀리스트에서 셀을 가져온다;
14: 가져온 활성셀을 MC표에 따라 삼각화한다;
15: 삼각화결과를 기하배열  $C$  의 해당 활성셀 자리에 쓴다;

```

알고리즘 1. 본 논문에서 제안하는 전이 알고리즘, 순수 전이와 삼각화 과정으로 분리됨.
Algorithm 1. Proposed propagation algorithm, which is divided into pure propagation and triangulation process.

여 방문한 셀 안에 있는 등위면의 기하 정보를 추출하는 과정을 반복함으로써 등위면 요소 전체의 기하 정보를 추출한다.

우리는 이러한 기존 전이 알고리즘[1]을 더욱 가속화하기 위하여 GPU의 병렬 계산 기능을 이용하였다. 본 연구에서 제안하는 전체 전이 알고리즘은 <알고리즘 1>과 같이 순수 전이 알고리즘과 삼각화 알고리즘으로 분리되어 실행된다. 순수 전이 알고리즘에 의해 계산된 활성셀, 즉 선택된 등위면 요소와 교차하는 셀의 목록이 얻어진 후, 우리는 GPU상에서 CUDA를 이용하여 각 활성셀안의 등위면 요소 표면을 삼각화한다. 삼각화 구현을 최적화하기 위해서 우리는 nVidia사의 Marching Cubes 샘플 코드[8]에 있는 generateTriangles2 라는 CUDA 커널 함수를 수정하여 사용하였다. CUDA에서 생성되는 각 GPU 쓰레드는 각 활성셀을 목록으로부터 하나씩 얻어서 등위면 요소 표면의 정점 위치, 법선 정보, 삼각형 연결 정보 등의 기하 정보를 Marching Cubes

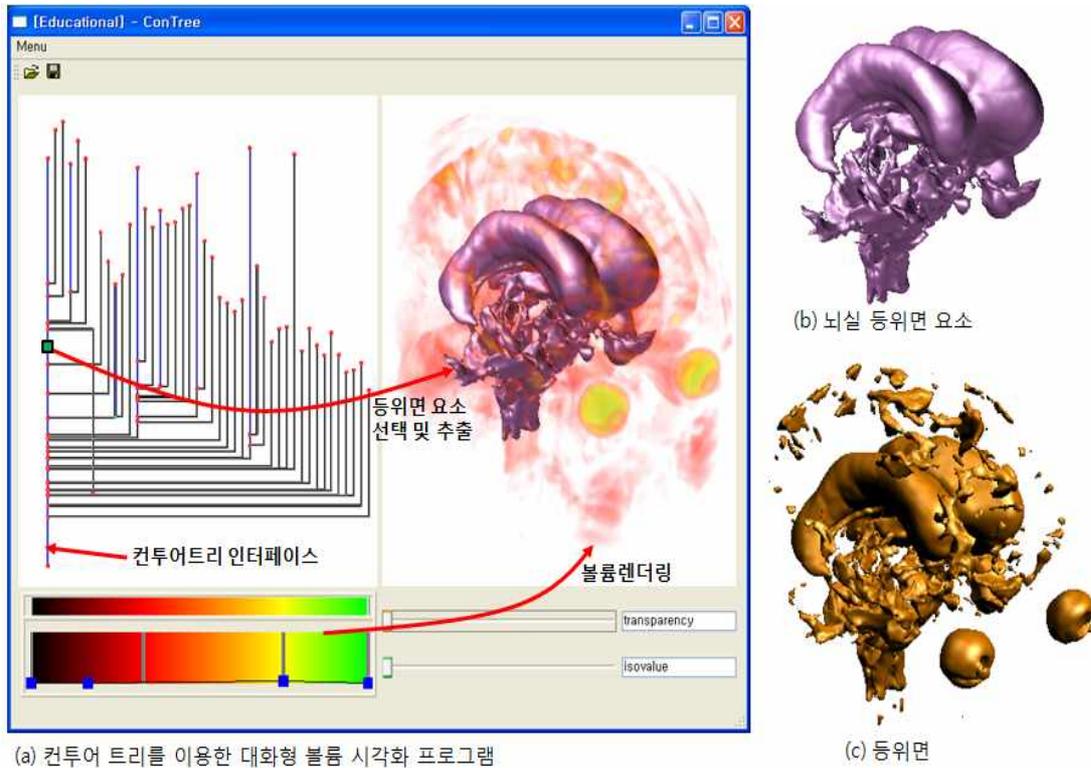


그림 5. 본 연구에서 개발한 볼륨 영상의 대화형 시각화 프로그램과 등위면 요소 추출
 Fig. 5. Our interactive volume visualization program and Isosurface component extraction

방식에 기반하여 계산한다. 계산된 기하 정보는 선택된 등위면 요소의 삼각형 목록을 저장하는 결과 배열에 쓰여진다.

3. 대화형 볼륨 시각화 프로그램 개발

본 논문에서 제안하는 방법을 이용하여 컨투어 트리를 이용한 대화형 볼륨 시각화 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램은 볼륨 데이터 파일을 선택하면, 그 데이터에 대하여 다음과 같은 볼륨 시각화 기능을 수행한다.

- 볼륨 렌더링 : 색-투명도 대응 표(color-opacity mapping table)를 이용하여 각 밀도값에 따른 색상과 투명도 값을 조절하여 볼륨 렌더링 영상을 생성한다. 투명성이 있기 때문에 등위면이나 등위면 요소와 동시에 그려져 시각화의 효과를 높일 수 있다.
- 등위면 추출 : 등위값을 대화형으로 선택하여 등위면을 시각화 한다. 컨투어 트리의 시각화를 통해 사용자가 찾고자 하는 등위면을 선택하는데 필요한 정보를 제공한다.
- 컨투어 트리 계산 및 가시화 : 컨투어 트리를 계산하여 2

차원 형태로 배치하여 그려준다.

- 등위면 요소 선택 및 시각화 인터페이스: 사용자가 컨투어 트리의 간선 위 임의의 점을 마우스로 클릭하면 그에 해당하는 등위면 요소가 추출되어 그려진다. 해당 등위면을 표시하기 위하여 컨투어 트리 위에 그 점을 표시해 준다. 사용자는 대화형으로 그 점을 옮기거나 삭제함으로써 원하는 등위면 요소들을 선택하여 시각화 할 수 있다. 등위면 요소의 추출 및 시각화 과정에서 다중코어 GPU의 병렬 계산 기능이 이용하여 대화형 시각화가 가능할 정도로 처리 속도가 매우 향상되었다.

<그림 5>는 본 연구의 결과로서 개발된 볼륨 시각화 프로그램의 화면을 나타내며, 입력으로 주어진 머리MRI 볼륨 영상의 컨투어 트리와 선택된 등위면 요소인 뇌실의 표면을 보여준다. 볼륨 구조를 보여주고 단일 등위면 요소를 대화형으로 선택하고 추출하는 기능을 볼륨 렌더링과 등위면 시각화 기능과 융합하여 주어진 볼륨 영상을 대화형으로 분석할 수 있게 하였다. 기존의 볼륨 시각화 프로그램은 볼륨 렌더링과 등위면 시각화에 제한되어 있어 한계성을 가진다.

표 1. 기존의 전이 알고리즘과 본 논문에서 제안하는 GPU를 이용한 전이 알고리즘의 시간 측정 결과
Table 1. Timing results for previous propagation algorithm and our GPU accelerated algorithm

데이터	볼륨 크기	등위면 요소의 삼각형 개수	기존 전이 알고리즘			제안된 전이 알고리즘(GPU 이용)		
			순수 전이 과정 (a)	삼각화 과정 (b)	전체 전이 과정 (a+b)	순수 전이 과정 (a')	삼각화 과정 (b')	전체 전이 과정 (a'+b')
헤모글로빈 볼륨 체인 등위면 요소	128x128x128	322,215	0.081초	0.217초	0.298초	0.081초	0.001초	0.082초
머리 MRI 뇌실 등위면 요소	256x256x128	644,704	0.179초	0.389초	0.568초	0.179초	0.002초	0.181초
무릎 볼륨 대퇴골 등위면 요소	64x64x64	19,177	0.005초	0.012초	0.017초	0.005초	0.001초	0.006초

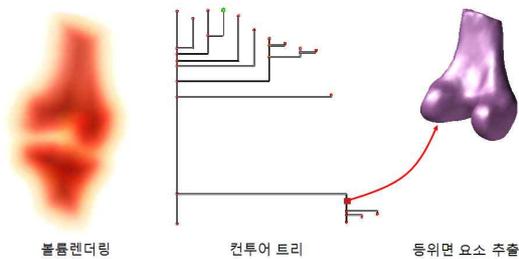


그림 6. 무릎 볼륨 영상으로부터 대퇴골 등위면 요소 추출
Fig. 6. Extraction of femur isosurface component from knee volume data

VI. 실험 결과

이 장에서는 본 논문에서 제안한 전이 알고리즘을 구현한 결과를 보고한다. 실험 결과는 인텔 i7 (2.66GHz) CPU와 2GB 메인메모리, 그리고 nVidia GeForce 480GTX 그래픽스 카드를 갖춘 데스크톱 PC에서 측정되었다.

<표 1>에서 볼 수 있듯이 실험을 위하여 세 개의 데이터를 사용하였다. 첫 번째 데이터는 헤모글로빈 분자의 전자 밀도 근사 볼륨이다. 헤모글로빈은 4개의 폴리펩타이드 체인으로 구성된 단백질이다. 각 체인은 헴(heme)이라고 불리는 고리 구조를 가지고 있으며 이 구조는 산화-비산화(oxy-deoxy) 과정에서의 활성 부위(active site) 역할을 한다. 폴리펩타이드 체인의 나머지 부분은 글로빈(globin)이라고 한다. 우리는 컨투어 트리 사용자 인터페이스를 이용하여 위에서 언급된 특징 부위를 나타내는 등위면 요소를 선택하고 효율적으로 추출할 수 있었다 (<그림 3> 참조). 두 번째 데이터는 뇌척수액(Cerebro Spinal Fluid) 부위를 강조하여 보여주는 머리 MRI로부터 생성되었다[24]. 세 번째 데이터는 무릎 뼈의 거

리 함수(Distance Function)를 나타내는 볼륨 영상이다.

<그림 3>과 <그림 5> 그리고 <그림 6>은 헤모글로빈 볼륨 영상, 머리 MRI 볼륨 영상 그리고 무릎 볼륨 영상으로부터 각각 폴리펩타이드 체인을 나타내는 등위면 요소와 뇌실을 나타내는 등위면 요소 그리고 대퇴골을 나타내는 등위면 요소를 추출한 결과를 보여준다. 각 볼륨 영상으로부터 계산된 컨투어 트리는 그 원래 형태가 매우 복잡하기 때문에 그려주기 전에 단순화 과정을 수행하였다. 컨투어 트리상의 간선 위에 있는 점을 마우스로 클릭하면, 해당하는 등위면 요소의 표면이 우리의 전이 알고리즘을 통해 재빨리 추출되었다. <그림 5> (b)와 (c)에서 볼 수 있듯이, 머리 MRI의 등위면은 뇌실뿐만 아니라 안구, 뇌조직 등을 나타내는 많은 개수의 등위면 요소를 포함한다. 우리 방법을 이용하여, 우리는 그 데이터의 주요 특징 부분인 뇌실의 등위면 요소만을 추출하여 시각화하였다. 이는 다른 특징 부분들에 의하여 방해되는 것 없이 뇌실 부분만 시각화하고 분석할 수 있도록 해주는 장점을 가진다.

우리는 기존 방식[1]과 GPU를 통해 가속화된 우리 방식을 이용한 등위면 요소 추출 시간을 측정하였으며 실험 결과는 <표 1>에 요약되어 있다. 이전 방식은 삼각화 과정을 포함한 전체 전이 알고리즘을 CPU에서 수행한 반면, 우리 방식은 전체 전이 알고리즘을 순수 전이 알고리즘과 삼각화 과정으로 분리하고 삼각화 과정을 다중코어 GPU를 이용하여 병렬적으로 계산하였다. 이를 통해 우리는 전이 알고리즘의 수행 속도를 약 3배 향상시켰다. <표 1>의 시간 측정 결과에서 볼 수 있듯이 기존 전이 알고리즘 전체 수행시간의 2/3~3/4 정도의 비중을 차지하는 삼각화 과정을 우리가 제안한 전이 알고리즘에서는 GPU를 이용하여 무시할만한 매우 짧은 시간으로 수행을 완수하였다. 이는 삼각화 과정이 다중코어 GPU를 이용하여 최적화하기 매우 좋은 성질을 가지고 있으며, 전체 전이 과정에서 삼각화 과정을 분리하여 최적화하는

우리 방식이 전이 알고리즘의 속도를 향상시키는데 매우 적절함을 암시한다.

VII. 결론

본 논문은 삼차원 볼륨 영상으로부터 개별 등위면 요소를 선택하고 추출할 수 있는 컨투어 트리 기반의 대화형 시각화 기법 및 프로그램의 개발을 기술하였다. 복잡한 형태의 컨투어 트리를 단순화하고, 사용자가 이해하고 조작하기 쉽도록 배치하는 알고리즘을 제시하여 컨투어 트리 인터페이스의 사용성을 높였다. 또한 다중코어 GPU의 병렬계산 기능을 이용하여 선택된 등위면 요소의 표면을 추출하는 속도를 향상시켰다. 구현 및 실험 결과는 이러한 기능들이 대화형 볼륨 시각화 프로그램으로 통합되어 사용자가 쉽고 빠르게 원하는 등위면 요소를 시각화할 수 있음을 보여준다.

참고문헌

- [1] H. Carr, J. Snoeyink and M. van de Panne, "Flexible Isosurfaces: Simplifying and Displaying Scalar Topology using the Contour Tree", *Computational Geometry: Theory and Applications*, Vol. 43, No. 1, pp. 42-58, Jan. 2010
- [2] C.L. Bajaj, V. Pascucci and D.R. Schikore, "Fast Isocontouring for Improved Interactivity", In Proc. of Symposium on Volume Visualization, pp. 39-46, San Francisco CA, USA, Oct. 1996
- [3] B.-S. Sohn and C. L. Bajaj, "Time-Varying Contour Topology", *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 12, No. 1, pp. 14-25, Jan. 2006
- [4] W. E. Lorensen and H. E. Cline, "Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm", *ACM SIGGRAPH*, pp.163-169, Anaheim CA, USA, July 1987
- [5] Q. Wang, J. Jájá and A. Varshney, "An Efficient and Scalable Parallel Algorithm for Out-of-Core Isosurface Extraction and Rendering", *J. Parallel Distrib. Comput.*, Vol. 67, No. 5, pp.592-603, May 2007
- [6] X. Zhang and C. L. Bajaj, "Scalable Isosurface Visualization of Massive Datasets on Commodity Off-the-Shelf Clusters", *J. Parallel Distrib. Comput.*, Vol. 69, No. 1, pp.39-53, Jan. 2009
- [7] P.M. Sutton and C. D. Hansen, "Isosurface Extraction in Time-Varying Fields using a Temporal Branch-On-Need Tree (T-BON)", In Proc. of IEEE Visualization Conference, pp. 147-154, San Francisco CA, USA, Oct. 1999
- [8] nVidia CUDA SDK Code Samples : Marching Cubes. http://developer.nvidia.com/object/cuda_sdk_samples.html
- [9] Luc Buatois , Guillaume Caumon and Bruno Lévy, "GPU Accelerated Isosurface Extraction on Tetrahedral Grids", In *Advances in Visual Computing (ISVC 2006)*, LNCS, pp. 383-392, Lake Tahoe NV, USA, Nov. 2006
- [10] C.L. Bajaj, V. Pascucci and D.R. Schikore, "The Contour Spectrum", In Proc. of IEEE Visualization Conference, pp. 167-173, Phoenix AZ, USA, Oct 1997
- [11] L. Kettner, J. Rossignac and J. Snoeyink, "The Safari Interface for Visualizing Time-Dependent Volume Data using Iso-surfaces and Contour Spectra", *Computational Geometry: Theory and Applications*, Vol 25, No. 1-2, pp.97-116, May 2003
- [12] S. P. Tarasov and M. N. Vyalyi, "Construction of Contour Trees in 3D in $O(n \log n)$ Steps", In Proc. of ACM Symposium on Computational Geometry, pp.68-75, Minneapolis MN, June 1998
- [13] M. J. van Kreveld, R. van Oostrum, C. L. Bajaj, V. Pascucci and D. Schikore, "Contour Trees and Small Seed Sets for Isosurface Traversal", In Proc. of ACM Symposium on Computational Geometry, pp.212-220, Nice, France, June 1997
- [14] H. Carr, J. Snoeyink and U. Axen, "Computing Contour Trees in All Dimensions", *Computational Geometry: Theory and Applications*, Vol. 24, No. 2, pp.75-94, Feb. 2003
- [15] V. Pascucci and K. Cole-McLaughlin, "Parallel Computation of the Topology of Level Sets", *Algorithmica*, Vol. 38, No. 1, pp. 249-268, Oct. 2003

- [16] H. Edelsbrunner, J. Harer, A. Mascarenhas, V. Pascucci and Jack Snoeyink, "Time-varying Reeb Graphs for Continuous Space-time Data", Computational Geometry: Theory and Applications, Vol. 41, No. 3, pp.149-166, Nov. 2008
- [17] D. Silver and X. Wang, "Tracking and Visualization of Turbulent 3D Features", IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 3, No. 2, pp.129-141, April 1997
- [18] G. Ji, H.-W. Shen and R. Wenger, "Volume Tracking using Higher Dimensional Isocontouring", In Proc. of IEEE Visualization Conference, pp. 209-216, Seattle, WA, USA, 2003
- [19] H. Carr, J. Snoeyink and M. van de Panne, "Simplifying Flexible Isosurfaces Using Local Geometric Measures", IEEE Visualization, pp. 497-504, Austin, TX, USA, Oct. 2004
- [20] V. Pascucci, K. Cole-McLaughlin, and G. Scorzelli, "Multi-Resolution computation and presentation of Contour Trees", In Proc. of the IASTED conference on Visualization, Imaging, and Image Processing (VIIP 2004), pp.452-290, Marbella, Spain, Sep. 2004
- [21] C. Heine, D. Schneider, H. Carr and G. Scheuermann, "Drawing Contour Trees in the Plane", IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 17, No. 11, pp.1599-1611, Nov. 2011
- [22] Bong-Soo Sohn, "Isosurface Component Tracking and Visualization in Time-Varying Volumetric Data", Journal of the Korea Society of Computer and Information, Vol. 14, No. 10, pp.225-231, Oct. 2009
- [23] Bong-Soo Sohn, "Compression and Visualization Techniques for Time-Varying Volume Data", Journal of the Korea Society of Computer and Information, Vol. 12, No. 3, pp.85-93, Sep. 2007
- [24] Real World Medical Datasets. <http://www.voWis.org>

저자 소개



손 봉 수

1999 : 서울대학교 전산과학 학사.
 2001 : 텍사스오스틴 대학교 전산과학 석사.
 2005 : 텍사스오스틴 대학교 전산과학 박사.
 현 재 : 중앙대학교 컴퓨터공학부 조교수
 관심분야 : 컴퓨터그래픽스, 볼륨 시각화
 Email : bongbong@cau.ac.kr