

# 웨이브렛 변환과 사면체 분할을 이용한 볼륨 데이터 모델링

권 오 봉<sup>†</sup> · 이 건<sup>††</sup>

## 요 약

볼륨 데이터 모델링은 삼차원 공간 내부에 존재하는 데이터 사이의 관계를 함수로 표현하는 것이다. 볼륨 데이터를 기하학적으로 모델링하면 볼륨을 복셀로 분할하지 않고 서피스 렌더링 기법을 이용하여 가시화할 수 있어, 고속 처리가 가능해지며 정보를 저장하기 위한 메모리의 용량도 적어지는 이점이 있다. 본 논문에서는 웨이브렛(wavelets) 변환과 사면체 분할(tetrahedrization)을 기반으로 볼륨 데이터를 모델링하는 기법을 제안하고, 이것을 이용하여 프로토타입 시스템을 구현하여 평가하였다. 본 모델링 기법은 웨이브렛 변환과 사면체 분할의 특성을 이용할 수 있어 많은 양의 데이터의 압축이 가능하며, 애매성도 발생하지 않았다. 본 모델링 기법에서는 전체 데이터의 13%만을 이용하여 모델링하였음에도 불구하고 마칭큐브 알고리즘에 떨어지지 않는 영상을 생성하였다.

## Volume Data Modeling by Using Wavelets Transformation and Tetrahedrization

Ou-Bong Gwon<sup>†</sup> · Kun Lee<sup>††</sup>

### ABSTRACT

Volume data modeling is concerned with finding a mathematical function which represents the relationship implied by the 3D data. Modeling a volume data geometrically can visualize a volume data using surface graphics without voxelization. It has many merits in that it is fast and requires little memory. We proposes, a method based on wavelet transformation and tetrahedrization. We implemented a prototype system based on the proposed method. Last, we evaluated the proposed method comparing it with marching cube algorithm. The evaluation results show that though the proposed method uses only 13% of the volume data, the images generated is as good as the images generated by the marching cubes algorithm.

### 1. 서 론

최근에 볼륨 그래픽스(volume graphics)가 의료, 비파괴 검사, 지질학 등에서 물체 내부의 정보를 표시하

는 기술로써 사용됨에 따라 이 분야에 대한 관심이 높아져 많은 연구가 이루어지고 있다. 볼륨 그래픽스는 통계학적인 최적화 이론을 바탕으로 물체의 내부를 성분별로 분류하고, 각 성분을 구성하는 볼륨 데이터에 불투명도 및 색상 정보를 주어 가시화하는 것을 말한다. 현재 볼륨 데이터 가시화의 대표적인 기법으로는 마칭큐브 알고리즘[2], Levoy 기법[3] 등의 볼륨 렌더링이 있으나 이러한 기법은 MR, CT 등의 데이터에서와

\* 본 연구는 한국과학재단 핵심전문연구(과제번호:971-0908-051-2) 지원으로 수행되었음.

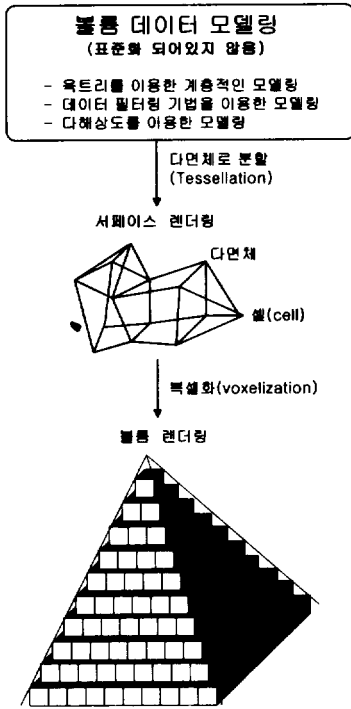
† 종신회원 : 전북대학교 컴퓨터학과 교수

†† 정 회 원 : 한동대학교 전산·전자공학부 교수

논문접수 : 1998년 11월 5일, 심사완료 : 1999년 3월 10일

같이 규칙적인 복셀(voxel)에 의한 모델링을 요구한다. 그러나 대부분의 3차원 볼륨 데이터는 불규칙적으로 흩어진 데이터(scattered data)이고 대용량이기 때문에, 볼륨 렌더링을 사용하여 가시화하는 방법으로는 만족할 만한 결과를 얻을 수 없다. 이러한 문제점은 3차원 볼륨 데이터를 복셀의 모음으로 분해하지 않고 직접 모델링(즉 볼륨 데이터 모델링) 함으로써 해결할 수 있다.

현재 볼륨 데이터 모델링에 대한 표준 방법은 정립되어 있지 않고, 옥트리를 이용한 계층적인 모델링(Hierarchical Octree Modeling), 다해상도를 이용한 모델링(Multiresolution Modeling), 데이터 필터링을 이용한 모델링(Modeling through Data Filtering) 등 여러 가지 기법이 제안되어 사용되고 있다. (그림 1)에서는 위의 개념들을 나타내고 있다. 일단 볼륨 데이터를 기하학적으로 모델링하면 볼륨을 복셀로 분할하지 않고도 서피스 렌더링 기법을 이용하여 고속으로 가시화할 수 있다. 더군다나 기하학적으로 구성된 서피스만을 저장하면 되기 때문에 필요한 메모리의 용량도 적어지는 이점이 있다.



(그림 1) 볼륨데이터 모델링 개념  
(Fig. 1) Volume Data Modeling Concept

본 논문에서는 웨이브렛 변환과 사면체 분할을 이용하여 대용량의 볼륨 데이터를 압축하고, 기하학적으로 모델링하는 방법에 대하여 고찰한다. 일반적으로 CT나 MR 등의 볼륨 데이터의 크기는 방대하기 때문에 데이터의 양을 줄이는 것은 볼륨 그래픽스의 실용화와 많은 관계가 있다. 웨이브렛 변환에서는 함수를 계층적으로 변환하여 미세한 변화와 전체적인 변화를 동시에 관찰할 수 있는데 최근 영상의 압축 등에 많이 이용되고 있다[1]. 본 논문에서는 웨이브렛 변환을 이용하여 중요 데이터를 추출한 후 이 데이터만을 사면체 분할기법을 이용하여 모델링하는 방법에 관하여 논한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 우선 2장에서는 현재까지 제안된 여러 가지 모델링 기법을 조사하고, 3장에서는 조사된 자료를 바탕으로 본 논문에서 제안된 기법의 접근 방법에 대하여 설명한다. 다음으로, 4장에서는 웨이브렛을 이용하여 중요 데이터를 선택하는 방법을, 그리고 5장에서는 선택된 데이터와 사면체 분할을 이용하여 볼륨 데이터를 모델링하는 방법을 제안한다. 이어서, 6장에서는 제안된 방법을 구현하여 마칭큐브 알고리즘과 비교 고찰하고, 마지막으로 7장에서 결론을 내린다.

## 2. 여러 가지 데이터의 모델링 기법

볼륨 데이터 모델링 기법은 크게 옥트리를 이용한 계층적인 모델링, 다해상도를 이용한 모델링, 데이터 필터링을 이용한 모델링 등으로 분류할 수 있다.

옥트리를 이용한 계층적인 모델링은 모델링 공간을, 부분 공간이 물체(object)의 내부와 외부로 확정될 때까지 8등분으로 재귀적인 분할을 계속하여 볼륨 데이터를 모델링하는 것이다. 이 모델링 기법은 기계 부품 등의 내부 성분이 동일한 물체를 모델링하는 경우에 많이 사용된다. 데이터 필터링 기법은 푸리에 변환(Fourier transformation) 등의 변환 함수를 이용하여 모델링하는 방법으로, 지금까지는 주로 2차원 영상의 압축 모델링에 많이 사용하여 왔으나, 최근에는 3차원 데이터를 모델링하는데도 이용되고 있다. 이 기법은 중요한 데이터만을 변환하여 저장하여 사용하므로 저장 공간을 줄일 수 있다. 다해상도를 이용한 모델링은 웨이브렛 기반의 모델링 기법으로, 웨이브렛의 고유한 특성 때문에 데이터를 전체 또는 일부를 자세히 관찰할 수

있는 장점이 있다. 이러한 특성은 볼륨 데이터를 이용하여 등평면(isosurface)을 찾거나, 위상 그래프를 그릴 때도 유효하게 이용할 수 있다. 다해상도를 이용한 모델링은 충돌 감지(collision detection), 볼륨 교차 계산 등의 기하 처리 프로그램에서 효과적으로 이용된다.

계층적인 옥트리를 이용한 모델링으로는 고전적인 옥트리 기법[5], MSG(Minimum Size Gray voxel) 기법[6], 면 옥트리(Face Octree) 기법[7] 등이 있다. 고전적인 옥트리 기법에서는 노드(node)를 백색(white), 흑색(black), 회색(gray) 노드로 정의한다. 이 기법에서는 부분 공간을 물체의 내부에 속하는 부분과 외부에 속하는 부분으로 분할하는데 물체 내부에 속하는 부분을 백색 노드, 물체 외부에 있는 속하는 부분을 흑색 노드로 표시한다. 이 기법은 입체를 기하학적으로 표현하는 모델링과 복셀 모델링에서 모두 사용할 수 있으나, 복셀 모델링에서는 물질을 두 가지 종류만으로 분류하는 단점이 있다. MSG 기법은 고전적인 옥트리 기법에서 정의한 백색 및 흑색 노드 외에 최소 크기의 회색 복셀(Minimum Size Gray voxel)을 정의한다. 이 복셀은 주어진 성분의 등평면과 교차하는 더 이상 분할될 수 없는 부분 공간이다. 이 기법에서 모델링 공간을 백색 노드, 흑색노드, 회색 복셀로 분할한다. 고전적인 옥트리 기법 및 MSG 기법은 많은 메모리를 필요로 하고 물체 내부의 성분을 표시할 수 없는 단점이 있다. 면 옥트리 기법은 면(face), 에지(edge), 정점(vertex) 등의 종단 노드를 정의하여 부분 분할의 회수를 줄인다. 이 기법은 여러 형태의 종단 노드를 정의함으로써 다면체를 정확히 표현할 수 있는 장점이 있다.

데이터 필터링을 이용한 모델링으로서는 Hughes 기법[8], Levoy 기법[9] 등이 있다. Hughes 기법에서는 볼륨 모델로 표현된 물체를 물평 변환하는 과정에서 중간 물체를 정확하고 빠르게 생성하기 위하여 FFT(Fast Fourier Transformation)을 이용한다. 이 기법에서는 키 프레임이 되는 볼륨을 우선 푸리에 변환한 다음, 이들을 보간하여 사이에 있는 볼륨을 구한 후, 마지막으로 푸리에 역변환을 통하여 목적으로 하는 볼륨을 구한다. FFT 변환은 보간 과정을 복잡하게 하는 높은 주파수(high frequency)를 줄이기 위하여 사용한다. Levoy 기법에서도 복셀 모델링에 푸리에 변환을 이용하였다. 이 기법은 고속 렌더링을 목적으로 하며, 복셀의 휘도 값을 푸리에 변환을 한 후, 광선 방향에 따라 적분하였다. 푸리에 공간에서 적분을 함으로서

렌더링 시간을  $O(n^3)$ 에서  $O(n^2 \log(2))$ 로 단축하였다. 그러나, 이 기법은 X-ray 같은 기관이 중첩되는 반투명 영상을 생성하기 때문에 기관의 경계를 명확히 구분할 수 없는 단점이 있다.

3차원 데이터를 압축 모델링하는데 웨이브렛을 이용한 연구는 많지 않고, Muraki 기법[10] 및 Lyche 기법[11] 등이 있다. Muraki는 텐서곱(tenser product)을 이용하여 단변수(univariate) 웨이브렛을 다차원 데카르트 격자(multidimensional Cartesian grid)로 변환하여 3차원에서 사용할 수 있도록 일반화를 시도하였다. Lyche는 곡선과 곡면을 근사 하는데 다해상도 기법을 이용하여 볼륨 데이터에도 사용할 수 있음을 시사하였다.

등평면을 찾는 알고리즘으로 유명한 것은 마칭큐브 기법이 있는데, 이 기법은 8개의 정점을 갖는 복셀에서 등평면을 찾는다. 이 기법의 원리는 정점의 휘도 값을 이용하여 복셀을 15종류로 분류하고, 각각에 해당하는 다각형을 찾는다. 그러나 이 기법은 어떤 경우에 빈 공간(hole)이 발생하는 문제와 흩어진 데이터(scattered data)에서는 사용할 수 없는 단점이 있다[4].

### 3. 접근 방법 및 제안한 기법의 개요

우리는 위에서와 같이 볼륨 데이터의 모델링에 대한 조사를 한 결과, 볼륨 데이터의 모델링에 있어서는 고속으로 영상을 생성하고 데이터 양을 줄이는 것이 중요하다는 것을 알았다. 이것을 위해 다음과 같은 접근방법을 채택하였다.

#### 3.1 데이터의 양을 줄인다.

일반적으로 복셀 모델에서 요구하는 메모리의 양은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\text{총 메모리의 양} = n \times n \times n \times \sum_{i=1}^n (P_i)$$

여기에서,  $n$ 은 차원 당 복셀의 개수,  $n_p$ 는 한 개의 복셀 안에 있는 속성의 수(즉 복셀이 밀도와 온도에 관한 정보를 가지고 있다면 2)를 나타내고,  $P_i$ 는 하나의 속성을 표현하는데 필요한 비트의 수이다. 현재 의료 분야에서 사용되는  $n$ 의 값은 약 512 정도이다. 만일, 복셀이 한 개의 속성을 표현하기 위하여 한 바이트를 사용한다면 총 메모리의 양은 약 128MB이다. 이는 가장 단순한 경우를 예로 든 것이고, 지질학 등의

용용에서는 이것의 수십 배의 메모리가 필요하게 된다. 이처럼 방대한 양의 데이터는 계산 속도를 느리게 할 뿐 아니라 통신 속도를 저하시켜 멀티미디어 등에서의 응용에 장애가 되어 데이터의 양을 줄이는 것은 매우 중요하게 되었다.

### 3.2 중요한 데이터는 보존한다.

블룸 데이터는 측정 또는 시뮬레이션에 의해서 얻어 지는데 값의 크고 작음에 관계없이 블룸 데이터의 모든 값은 의미를 가지고 있다. 따라서 데이터의 크기를 줄이기 위하여 무손실 압축(lossless compression) 알고리즘을 사용하는 것이 바람직하나 이는 압축률이 매우 작아 데이터의 양이 거의 줄지 않는 단점이 있다. 따라서 압축률을 크게 하기 위해서는 손실 압축(lossy compression) 알고리즘을 사용하는 것이 좋으나 데이터 양이 많다. 여기에서 데이터가 가지고 있는 원래의 정보를 유지하도록 각 데이터를 중요한 것과 중요하지 않은 것으로 분류하여 중요한 데이터는 필수로 손상을 입히지 않도록 한다.

### 3.3 처리 시간을 고속화한다.

대화적인(interactive) 환경에서 응용 프로그램을 사용할 때 1분 이상 기다리게 되면 사용자는 그 프로그램을 사용하는데 거부감을 갖게 된다. 3차원 데이터를 처리하는 알고리즘은 해상도가 높지 않더라도 대체적으로 많은 계산 시간을 필요로 한다. 특히 블룸 렌더링은 모든 복셀을 탐색하여야 하기 때문에 서피스 렌더링보다 계산 시간이 길어 많은 시간을 기다려야 한다. 따라서 계산 시간을 단축하기 위해서는 블룸 렌더링을 사용하는 것보다 서피스 렌더링이 바람직하다. 이것은 현재 가시화하는데 있어서 폴리곤 모델 및 Z 버퍼 알고리즘을 기반으로 하는 많은 고속 그래픽스 카드를 이용할 수 있기 때문이다. 처리 시간을 단축하기 위하여 서피스 렌더링을 이용하여 렌더링 할 수 있는 블룸 데이터의 모델링 기법을 고안한다.

### 3.4 웨이브렛 변환을 이용한다.

블룸 데이터의 모델링은 원래 데이터를 그대로 유지하기 위해서 무손실 압축 알고리즘을 사용하는 것이 바람직하나 압축률을 높여 메모리 사용량을 줄이기 위하여 손실 압축을 사용한다. 영상을 기계로 분석하는 것이 목적이라면 손실 압축을 사용할 수 없으나, 단지

인간이 관찰할 영상이라면 손실 압축 알고리즘을 사용하여 모델링하는 것도 가능하다. 이는 손실 압축 알고리즘을 사용하여 생성된 영상이 손실이 없는 모든 데이터를 사용하여 생성된 영상과 육안으로 판별하여 구별할 수 없을 정도로 정확하게 나타낼 수 있기 때문이다. 전체 데이터를 사용하여 생성한 영상과 전혀 차이가 없으면서도 높은 압축률로 데이터를 압축할 수 있는 변환이 웨이브렛 변환이다. 웨이브렛 변환을 사용하면 생성된 영상에 큰 변화를 주지 않는 많은 데이터를 제거하여 데이터를 매우 압축할 수 있다.

위와 같은 접근 방법에 따라 우리는 다음과 같이 블룸 데이터를 모델링하는 하나의 기법을 고안하였다. 본 논문에서 대상으로 하는 블룸 데이터는 방대하며 불규칙하게 흩어진(scattered) 데이터로써 육면체 형태의 규칙적인 복셀 데이터가 아니다. 이러한 흩어진 데이터는 규칙성이 없기 때문에 마칭큐브 알고리즘을 적용하기가 어렵기 때문에, 우리는 사면체 분할에 의한 모델링(tetrahedrization) 방법을 사용하였다. 이는 마칭큐브의 모호성 때문에 발생하는 구멍(hole)과 같은 문제점이 없고 불규칙적으로 흩어진 데이터에 사용할 수 있다는 장점이 있다. 본 논문에서 제안한 기법은 다음 순서로 모델링되고 3차원 가시화된다.

- ① 블룸 데이터에서 웨이브렛 변환을 이용하여 중요한 데이터를 선택한다.
- ② 선택된 데이터를 사면체로 모델링한다.
- ③ 사면체의 각 정점의 속성 값을 선형 보간하여 등평면을 구한다.
- ④ 등평면을 서피스 렌더링 기법을 이용하여 렌더링 한다.

위의 과정을 구체적으로 설명하면 다음과 같다.

- (1) 블룸 데이터에서 웨이브렛 변환을 이용하여 중요한 데이터를 선택한다.

압축 알고리즘의 목적은 필요한 정보를 원래의 데이터보다 작은 양으로 정보를 표현하는 것이다. 예를 들어 어떤 함수  $g(x)$ 가 베이스 함수  $u_1(x), \dots, u_2(x)$ 의 가중치의 합(weighted sum)으로 표현된다고 하자.  $g(x)$ 는 다음과 같다.

$$g(x) = \sum_{i=1}^n c_i u_i(x)$$

여기서  $c_1, \dots, c_m$ 은 베이스가 주어졌을 경우 원래의 데이터를 표현하는 계수이다.

다음은 원래의 데이터를 변환하여, 베이스  $\hat{u}_1(x), \dots, \hat{u}_m$ 에서 원래의 데이터의 개수보다 작은 개수의 계수  $\hat{c}_1, \dots, \hat{c}_m$ 으로 표현하면 다음과 같다.

$$\hat{g}(x) = \sum_{i=1}^m \hat{c}_i \hat{u}_i(x)$$

만일  $g(x)$ 와  $\hat{g}(x)$ 의 차이가 오차 이내에 들고  $\hat{m}$ 이  $m$ 보다 작다면 함수  $\hat{g}(x)$ 는 원래의 데이터를 압축하여 표현한 함수에 해당한다. 여기에서 웨이브렛 변환을 이용하면 간단한 변환만을 사용해서, 원래의 함수를 다른 베이스로 표현하는데 필요한 계수  $\hat{c}_1, \dots, \hat{c}_m$ 을 구할 수 있다. 또, 이 계수를 원래의 데이터에 미치는 중요도에 따라 순위를 정할 수 있다. 이러한 성질을 이용하면 중요하지 않은 데이터를 버리고 중요한 데이터만을 사용하므로 작은 양을 사용하여 모델링이 가능하다. 중요한 데이터를 선택하는 기법에 대해서는 4장에서 구체적으로 설명한다.

(2) 선택된 데이터를 사면체로 모델링한다.

홀어진 볼륨 데이터를 서피스 알고리즘을 이용하여 가시화하기 위해서, 우선 해야할 일은 볼륨 공간내의 데이터가 위치한 각 셀의 위치(cell point)를 기하학적으로 모델링을 하는 것이다. 우리는 위에서 언급한 이유로 모델링의 기본 물체(primitive)로 사면체를 선택하였는데, 모델링으로는 Joe의 사변형 분할 알고리즘을 사용하였다.

Joe의 사변형 분할 알고리즘은 델로네삼각분할(Delaunary triangulation) 알고리즘을 확장한 것으로, 평가 기준(criterion)으로 구가 사용된다. 즉, 구 내부에는 4개의 점만이 속할 수 있다는 특성을 사용하였다. 이 알고리즘은 우선 시작 위치(reference point)에서 가장 가까운 4개의 점을 선택하여 사면체를 만든 후, 사면체의 각 면이 물체 내부에 속하는 면인지, 외부에 속하는 면인지를 확인한다. 내부에 속하는 면이면 해당 사면체가 구성되고, 외부에 속하는 면이면 다음의 데이터 위치가 평가된다. 알고리즘의 구체적인 내용에 관해서는 참고 논문 [12]를 참조하기 바란다.

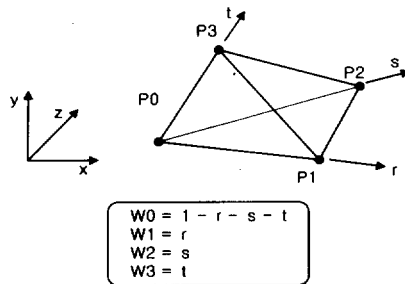
(3) 사면체 각 정점(vertex)의 값을 선형 보간하여 등평면을 구한다.

우선 사면체의 각 정점에 있는 값을 보간하여 사면체 내부의 모든 값을 구하고, 사용자로부터 입력된 값과 동일한 값을 갖는 면을 구하여, 이를 삼각형으로 분할하여 이것의 꼭지점의 좌표를 계산하였다.

사면체 내부의 모든 점의 데이터 값은 다음과 같은 보간식을 이용하여 계산하였다.

$$v = \sum_{i=0}^3 W_i \times d_i$$

여기서  $d_i$ 는 사면체의 각 정점에서의 속성 값이고,  $W_i$ 는 구하려는 점의 위치와 관련된 매개 변수  $r, s, t$ 를 독립 변수로 하는 보간 함수이다. 매개변수의 최소 값은 0, 최대 값은 1이다. 각각의 매개변수의 의미를 (그림 2)에 보인다.



(그림 2) 사면체의 보간함수 (Fig. 2) interpolation function for tetrahedron

(4) 등평면을 서피스 렌더링 기법을 이용하여 렌더링한다.

입체의 모델링은 삼각형을 이용한 폴리곤 모델을 사용하고, 렌더링은 3차원 컴퓨터 그래픽스 렌더링 파이프라인, 즉, Z 버퍼 은면 소거 알고리즘과 풍 셰이딩(Phong shading)을 이용하였다.

4. 웨이브렛 변환을 이용한 데이터의 선택

웨이브렛 변환은 함수를 계층적으로 분해하는 성질이 있어 함수의 전체적인 형상(coarse overall shape)에 영향을 주는 계수와 여러 범위에 걸쳐서 미세하게 영향을 주는(details that range from broad to narrow)

주는 계수로 분리할 수 있다. 미세하게 영향을 주는 계수를 일부 삭제해도 전체의 모양에 큰 영향을 주지 않으므로, 이 계수를 허용오차 안에서 제거할 수 있다. 본 논문의 기법은 볼륨 데이터를 웨이브렛 변환하면 계수가 생성되는데, 이 계수 중 값이 작은 것은 원래의 볼륨 데이터에 영향을 작게 미치는 데이터 즉 중요하지 않은 데이터라는 가정을 한다.

볼륨 데이터를 가시화하기 위해서는 등평면을 찾아야 하는데, 단지 등평면만을 찾기 위해서라면 이웃의 셀과 값 차이가 많이 나는 셀을 선택하여야 한다. 본 논문에서는 중요한 데이터의 선택과 등평면을 찾는 것은 분리하여 중요한 데이터의 선택은 웨이브렛을 이용하고, 등평면을 찾는 것은 사면체 분할 모델링 기법을 이용한다. 즉, 사면체 분할로 모델링한 후에 보간에 의해 등평면을 구한다.

본 논문에서는 볼륨 데이터를 삼차원 공간에서 정방향(piecewise-constant)의 베이스를 갖는 계수라고 가정한다. Haar 베이스를 사용하여 웨이브렛 변환하면 웨이브렛 계수가 구해지는데, 이것 중 일부를 허용오차 내에서 제거하고 나머지 계수만으로 사면체 분할을 이용하여 볼륨 모델링을 한다.

제안된 기법의 처리 순서는 다음과 같다.

- ① 전체의 볼륨 데이터를 사면체 분할로 모델링한 후에 렌더링 한다.
- ② 삼차원 Harr 베이스 공간에서 볼륨 데이터를 웨이브렛 변환하여 웨이브렛 계수를 구한다.
- ③ 웨이브렛 계수를 내림차순으로 정렬한다.
- ④ 웨이브렛 계수 중 특정 크기보다 작은 모든 것을 일시적으로 제거한다. 단, 일시 제거된 웨이브렛 계수는 버퍼에 보관한다.
- ⑤ 작은 계수가 제거된 웨이브렛 계수를 역변환하여 원래의 볼륨 데이터로 복원한다.
- ⑥ ⑤의 볼륨 데이터를 사용하여 사면체 분할로 모델링한 후에 렌더링 한다.
- ⑦ ①과 ⑥의 결과를 비교한 후 허용오차 이내에 들면 종료하고, 그렇지 않으면 ④로 되돌아가서 조정하고 ⑤, ⑥, ⑦을 반복한다.

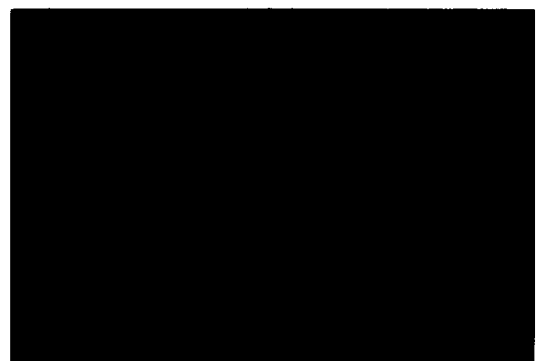
**5. 구현 결과 및 평가**

우리는 본 논문에서 제안된 기법을 운영체제 IRIX

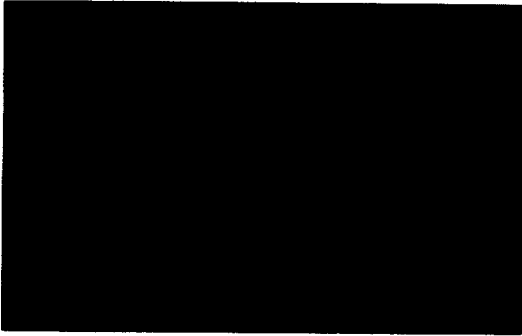
6.3을 사용하는 실리콘 그래픽스 워크스테이션 O<sub>2</sub>에서 C++ 언어를 이용하여 구현하였다. 평가용 볼륨 데이터로는 CT로 촬영한 해상도 64×64×8의 두개골 데이터를 사용하였다. 본 시스템에서 사용된 모든 프로그램은 볼륨 데이터를 사면체로 분할하는 부분을 제외하고 직접 코딩하여 실행시켰다. 사면체로 분할하는 부분 즉, Joe의 알고리즘을 구현한 부분은 인터넷상의 공개 소프트웨어를 이용하였다. 3차원 웨이브렛 변환은 영상 압축에 사용하는 표준 분해(standard decomposition) 기법을 사용하였다[1].

본 시스템의 평가 목적은 다음과 같다.

- (1) 본 논문에서 제안한 기법의 타당성을 검증한다. 즉, 볼륨 데이터에서 등평면을 가시화하기 위하여 본 논문에서 제안한 것처럼 사면체 분할로 모델링하는 것이 타당인지, 또 중요한 데이터를 선택하는데 웨이브렛 변환을 이용하는 것이 가능한지를 확인한다.
- (2) 제안한 기법의 실용화 가능성을 찾는다. 즉, 마칭큐브 알고리즘은 복셀 데이터에서 등평면을 찾는 방법으로 널리 알려져 있고 렌더링 된 결과가 사실적이다. 제안된 방법의 렌더링 결과를 마칭큐브 알고리즘과 비교하여 실용화 가능성이 있는지를 알아본다.
- (3) 제안한 기법의 데이터 압축률을 조사한다. 즉, 제안된 기법의 목적 중 하나는 원래의 데이터 양을 압축하여 모델링하는 것이다. 실제로 CT로 측정된 데이터를 평가 지표로 이용하여 제안된 기법의 데이터 압축률을 조사한다.

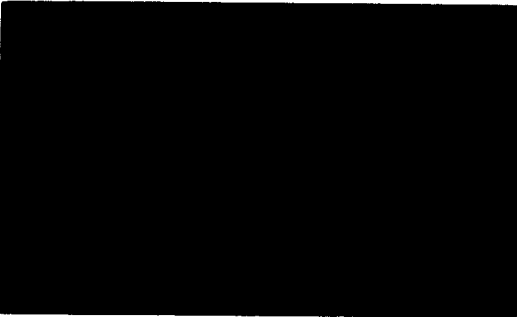


(a)



(b)

(그림 3) 제안된 기법  
(Fig. 3) Proposed method



(그림 4) 모든 데이터 사용  
(Fig. 4) Using all data



(그림 5) 마칭 큐브 알고리즘  
(Fig. 5) Marching cubes algorithm

제안된 기법(웨이브렛 변환 및 사면체 분할)으로 가시화한 것을 (그림 3)에, 모든 데이터를 사용하여 사면체 분할 기법으로 가시화한 것을 (그림 4)에, 마칭큐브 알고리즘으로 가시화한 것을 (그림 5)에 각각 나타낸다. 세 기법 모두 같은 등평면을 찾아 가시화하였는데, 표시 대상이 되는 영역(Region of Interest)은 256 그레이 레벨에서 12.6으로 하였다. 표면의 바깥쪽은 노란색으로 표시하였으며, 안쪽은 빨간 색으로 표시하였다.

위의 평가 목적에 따라 고찰하면 다음과 같다.

- (1) 제안된 기법으로 가시화한 (그림 3)과 다른 기법들로 가시화한 (그림 4)와 (그림 5)를 비교하여 보면 제안된 기법의 논리가 타당한 것을 알 수 있다. (그림 3a)와 (그림 3b)에서 알 수 있듯이 중요한 데이터 일부만을 가지고 가시화하였는데도 전체의 데이터를 가지고 렌더링 한 것(사면체 분할 기법만 사용: (그림 4), 마칭큐브 알고리즘: (그림 5)와 같이 가시화 결과가 두개골처럼 표현된 것을 알 수 있다. 따라서 웨이브렛 변환을 이용하여 중요한 데이터를 선택할 수 있고 사면체 분할을 이용하여 볼륨 데이터를 모델링할 수 있음을 알 수 있다.
- (2) (그림 3)과 (그림 4), (그림 5)를 서로 비교하여 보면, 마칭큐브 알고리즘으로 가시화한 것이 다른 두 기법으로 가시화한 것보다는 약간 우수한 것을 알 수 있다. 그러나, 모든 데이터를 가지고 사면체 분할 기법으로 가시화한 것(그림 4)은 본 논문에서 제안된 기법으로 가시화한 것과는 별 차이가 없음을 알 수 있다. 이것으로 그림의 품질이 데이터의 양에 의해서 결정되는 것이 아니라 사면체 분할 기법과 마칭큐브 알고리즘의 차이에 의한 것임을 알 수 있다. 우수한 영상을 생성하기 위해서는 사면체 분할 기법을 개선할 필요가 있다. 영상의 생성 시간은 마칭큐브 알고리즘이 약 2초, 제안된 기법이 약 10초 걸렸는데 제안된 기법이 처리해야 할 면이 마칭큐브 알고리즘이 처리해야 할 면보다 많기 때문이라 사료된다. 제안된 기법에서는 면의 수를 줄이는 알고리즘이 필요하다.
- (3) (그림 3)을 생성하는데는 전체 볼륨 데이터의 13%만 사용하였고 (그림 4)와 (그림 5)를 생성하는데는 전체 볼륨 데이터를 사용하였다. 이러한 데이터의 압축은 사용 메모리 양과 통신 부하를 동일한

비율로 줄일 수 있어 알고리즘을 개선하면 활용 가치가 있으리라 기대된다.

제안한 기법과 마칭큐브 알고리즘을 정성적으로 비교하면 마칭큐브 알고리즘은 불규칙적으로 흩어진 볼륨 데이터에는 사용할 수 없고 규칙성을 가진 복셀 데이터에만 사용이 가능하다는 것과 구멍(hole)이 발생할 수 있다는 문제점이 있다. 그러나 제안한 기법은 이러한 두 가지의 문제점을 발생하지 않는 장점이 있다. 마지막으로 (그림 3) (b)에서 볼 수 있듯이 등평면을 특정 위치에 따라 단면만을 가시화할 수 있어서 두개골 수술을 하기전 모의 실험을 하거나 해부학 실험을 할 수 있는 기반을 마련하였다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 사면체 분할과 웨이브렛 변환을 이용한 볼륨 모델링 기법을 제안하고, 이 기법을 이용하여 간단한 시스템을 구현하여 타당성을 검증하고, 마칭큐브 알고리즘과 비교 평가하였다. 제안한 기법을 정성적면에서 고찰하면 구멍이 발생하지 않고 흩어진 대량의 데이터에 사용할 수 있다는 면에서 마칭큐브 알고리즘 보다 우수하다고 할 수 있다. 정량적인 면에서 고찰하면 웨이브렛을 이용하여 원래 데이터에서 13% 정도에 해당되는 중요한 데이터를 선택하여 가시화하였는데도 품질은 전체 데이터를 이용하여 가시화한 것과 차이가 없었다. 따라서 본 논문에서 제안된 기법은 많은 데이터를 압축할 수 있고 흩어진 데이터를 모델링할 수 있다는 가능성을 보였다. 이러한 기술은 의료 데이터, 지질 데이터, 기상 데이터 등을 고속으로 가시화하여 분석하는데 활용할 수 있으리라고 기대된다. 또한 압축된 데이터를 사용함으로써 메모리와 통신 회선을 절약할 수 있어 멀티미디어 통신을 이용한 가시화 기술에 활용도 기대된다.

향후 다양한 데이터를 사용하여 제안된 기법을 보다 정확히 평가하고, 면의 수를 줄일 수 있는 기법 및 새로운 응용 분야를 찾을 예정이다.

## 참 고 문 헌

[1] E. J. Stollnitz, T. D. DeRose, "Wavelets for computer graphics : theory and application," Morgan Kaufman Publishers, 1996.

[2] W. E. Lorensen and H. E. Cline, "Marching cubes : a high resolution 3D surface construction algorithm," ACM Computer graphics, Vol.21, No. 4, pp.163-169, 1987.

[3] M. Levoy, "Display of surface from volume data," IEEE Comput. Graph. & Appl., Vol.3, No.3, pp. 29-37, 1988.

[4] K. Lee and O. Gwun, "A Study on three-dimensional image modeling and visualization of three-dimensional medical image," Journal of the Korea Computer Graphics Society, Vol.3, No.2, pp.27-34, 1997.

[5] D. Ayla, P. Brunet, R. Juan and I. Navazo, "Object representation by mean of non minimal division quadtrees and octrees," ACM Transactions on Graphics, Vol.4, pp.41-59, 1985.

[6] P. Brunet, R. Juan, I. Navazo, A. Puig, J. Sole and D. Tost, "Modeling and visualization through data compression," Scientific Visualization : advance and challenges, Academic Press, pp.157-169, 1994.

[7] N. Pla, "Boolean operations and spatial complexity of face octrees," Proceedings Eurographics '93, Computer graphics forum, pp.154-164, 1993.

[8] J. F. Hughes, "Scheduled Fourier volume morphing," ACM Computer Graphics, Vol.26, No.2, pp.43-46, 1992.

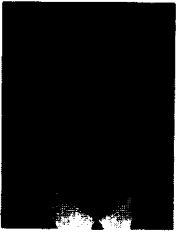
[9] M. Levoy, "Volume rendering using the Fourier projection-slice theorem," Proceedings of Graphics Interface 92, pp.61-69, 1992.

[10] S. Muraki, "Volume data and Wavelets transformation," IEEE Comput. Graph. & Appl., Vol.13, No.4, pp.50-56, 1993.

[11] T. Lyche and K. Morken, "A data-reduction strategy for splines with applications to the approximation of functions and data," IMA Journal of Numerical Analysis, Vol.8, pp.185-208, 1988.

[12] B. Joe. "Three-dimensional triangulations from local transformations," The SIAM J. Sci. Stat. Comput, Vol.10, pp.718-741, 1989.





### 권 오 봉

e-mail : obgwun@moak.chonbuk.ac.kr

1980년 고려대학교 전기공학과 졸업(학사)

1983년 고려대학교 전기공학과(공학석사)

1992년 일본구주대학교 총합이공학연구과(공학박사)

1992년~1993년 일본구주대학교 정보공학과 조수

1994년~1995년 전북대학교 컴퓨터과학과 전임강사

1996년~현재 전북대학교 조교수

관심분야 : 컴퓨터 그래픽스, 사이언티픽 비주얼라이제이션, 병렬처리



### 이 건

e-mail : kunlee@han.ac.kr

1978년 고려대학교 전자공학과 졸업(학사)

1983년 고려대학교 전자공학과(공학석사)

1985년 애리조나 주립대학 전기공학과(공학석사)

1995년 애리조나 주립대학 전산과학과(공학박사)

1995년~1996년 전북산업대학 컴퓨터 공학과 전임강사

1997년~현재 한동대학교 전산전자 공학부 조교수

관심분야 : 컴퓨터 그래픽스, 사이언티픽 비주얼라이제이션, 의료영상처리