

# 의료영상 가시화를 위한 셀 경계 방식 체적 재구성 방법

(Volume Reconstruction by Cellboundary Representation for Medical Volume Visualization)

최영규<sup>†</sup> 이의택<sup>††</sup>

(Young-Kyu Choi) (Ee-Taek Lee)

**요약** 본 논문에서는 단층 촬영 영상(tomographic cross-section image)에 포함되어 있는 볼륨 정보를 표현하기 위한 새로운 방법을 제안하였다. 이 방법은 큐베릴 공간을 셀 공간으로 변환하고 경계셀들을 추출하여 볼륨을 재구성하는 방법이다. 셀 경계 표현은 이러한 경계셀들과 이들의 지지 복셀들의 구조에 의해 표현되어 지는데, 항상 볼륨 정보를 정확하게 표현해낼 수 있다. 이 표현에서부터 가시화등의 작업에 필요한 표면모델을 추출하기 위해 19개의 모델링 원형을 제안하고 체적형, 표면형 그리고 선형으로 분류하였으며, 이들로부터 3차원 표면을 표 참조방식으로 빠르게 추출할 수 있는 알고리즘을 제안하였다.

제안된 방법의 장점은 기존에 제안된 마칭 큐브나 PVP알고리즘 등에서 흔히 발생하는 표면생성시의 모호성문제가 전혀 발생하지 않으며, 마칭 큐브 알고리즘에서 발생하는 표면의 크랙문제도 완전히 해결된다는 장점이 있다. 또한 알고리즘이 표 참조방식을 취하므로 하드웨어화 하기가 매우 용이하여 고속의 모델링이 필요한 분야에 매우 적합한 방법이다.

**Abstract** This paper addresses a new method for constructing surface representation of 3D structures from a sequence of tomographic cross-sectional images. Firstly, we propose cell-boundary representation by transforming the cuberille space into cell space. A cell-boundary representation consists of a set of boundary cells with their 1-voxel configurations, and can compactly describe binary volumetric data. Secondly, to produce external surface from the cell-boundary representation, we define 19 modeling primitives (MP) including volumetric, planar and linear groups. Surface polygons are created from those modeling primitives using a simple table look-up operation.

Comparing with previous method such as Marching Cube or PVP algorithm, our method is robust and does not make any crack in resulting surface model. Hardware implementation is expected to be easy because our algorithm is simple(scan-line), efficient and guarantees data locality in computation time.

## 1. 서론

기술의 발달로 인하여 현대의학에서는 컴퓨터 단층촬영 장비나, 자기공명, SPECT, PET 및 초음파 등과 같은 다양한 영상장비를 통해 인체의 내부 기관들에 대한

영상 정보를 얻어내고 있다. 이에 따라 이들로부터 얻어지는 영상들을 분석하며 내부에 포함된 볼륨 정보를 추출하고 표면모델을 구하는 일이 많은 분야에서 요구되고 있다. 본 논문에서는 이러한 단층 촬영 영상에 포함되어 있는 볼륨 정보를 표현하기 위한 새로운 방법을 제안한다.

단층 영상에서부터 그 안에 포함된 볼륨 정보를 가시화하기 위하여 다양한 방법이 제시되었는데, 렌더링의 관점에서 이들을 분류하면 볼륨에서 가시화를 위해 표면모델을 먼저 추출한 후 이들 표면을 렌더링하는 *표면 기반(surface-based)* 렌더링방법[3-17]과, 표면모델을

<sup>†</sup> 정 회 원 : 한국기술교육대학교 정보기술공학부 교수  
ykchoi@kut.ac.kr

<sup>††</sup> 정 회 원 : 한국전자통신연구원 컴소연 가상현실 연구개발센터 센터장  
ctlee@etri.re.kr

논문접수 : 1999년 5월 6일

심사완료 : 2000년 1월 25일

생성하지 않고 볼륨 데이터에서 직접 영상을 얻어내는 볼륨기반(volume-based)렌더링법[1,2]으로 크게 나눌 수 있다. 각 방법이 장단점을 갖지만, 본 논문에서는 보다 생동감 있는 영상을 만들지는 못하지만, 계산량이 훨씬 적고, 가시화목적뿐만 아니라 중간 결과로 생성되는 표면 모델을 체적의 계산이나 모의 수술 등 다양한 응용에 사용할 수 있는 표면기반 렌더링방법에 초점을 맞춘다.

이 방법은 다시 모델링시 입력의 종류에 따라 두 가지로 나눌 수 있는데, 인접한 층에서 추출한 등고선으로부터 이들 사이의 영역을 삼각형 표면조각으로 채우는 표면 재구성법[3-6]과, 공간이 복셀이라고 하는 정육면체 체적으로 균일하게 나뉘어져 있다고 가정하고 이들 사이에서 표면을 만들고자 하는 체적 재구성법[7-17]으로 다시 나눌 수 있다. 체적 재구성법은 일정한 두께를 갖는 단층영상이 연속적으로 쌓여있는 것으로 쉽게 상상해 볼 수 있는데 본 논문에서는 복셀기법이라고도 불리는 이 방법으로 분류되는 새로운 볼륨데이터 재구성 방법을 제안한다. Herman과 Liu는 최초로 복셀기법의 알고리즘을 제안하였는데[9], 정확한 모델을 만들지는 못하지만 적절한 표면법선을 구하여 렌더링 할 경우 어느 정도 자연스러운 영상을 얻을 수 있었다. 체적 재구성법의 가장 대표적인 알고리즘은 Lorensen과 Cline이 제안한 마칭 큐브(Marching Cube)알고리즘[11]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. Kelvin[10]과 Wallin[16]은 서브 복셀 처리를 하지 않는 표면 근사화 알고리즘을 제안하였으며, Yun과 Park[17]은 체적을 몇 가지 종류로 분류하고 이들을 이용하여 표면을 근사화 하는 PVP알고리즘을 제안하였으나 모델의 정확도가 떨어지고 표면생성이 유일하지 않게 되는 등의 문제점을 가지고 있다. 이들을 해결하기 위하여 본 논문에서는 볼륨정보를 보다 정확하게 표현하면서 모호성이 전혀 발생하지 않는 셀 경계 표현(cell-boundary representation)법을 제안하였다. 제안된 방법은 마칭 큐브나 PVP알고리즘 등에서 흔히 발생하는 표면생성시의 모호성문제가 전혀 발생하지 않으며, 마칭 큐브에서 발생하는 표면의 크랙문제도 완전히 해결된다는 장점이 있다. 또한 알고리즘이 표 참조방식을 취하므로 하드웨어화 하기가 매우 용이하여 고속의 모델링이 필요한 분야에 매우 적합한 방법이다.

## 2. 큐베릴 공간에서의 반경계(Semiboundary)

### 표현

먼저 Udupa[14]가 제안한 3차원 공간의 큐베릴 모델상에서의 반경계 표현법(semiboundary representation)과 본 논문에서 사용된 용어들을 간략히 소개한다. 다음 장에서 이 전개방식을 이용하여 셀경계 표현법을 제안한다. Herman과 Lieu[9]는 3차원 공간을 서로 직교하는 3 가지 방향(예를 들면  $x$ ,  $y$  및  $z$ 축 방향)의 평행판들에 의해 분할하고 이것을 큐베릴 공간(Cuberille space)이라 정의하였다. 이러한 큐베릴 공간상의 하나의 체적소를 복셀(voxel)이라 정의하였는데, 이 복셀이라는 용어는 그 후 이 분야의 핵심 용어로서 널리 사용되고 있다. 이러한 복셀은 일반적으로 정육면체로 가정되지만, 실제로는 다양한 형태로 나타날 수 있는데, 그림 1은 그 예를 나타내고 있다. 즉 일반적인 복셀로 가정되어지는 정육면체나, 직육면체, 또는 일반적이지는 않지만 단층영상이 육각 화소로 이루어지는 경우, 복셀은 육각 기둥의 형태가 된다. Udupa는 3차원 공간이 큐브형태의 복셀들로 분할되어 있다고 가정하고, 이러한 복셀들로 이루어진 큐베릴 공간에서 상을 다음과 같이 정의한다.

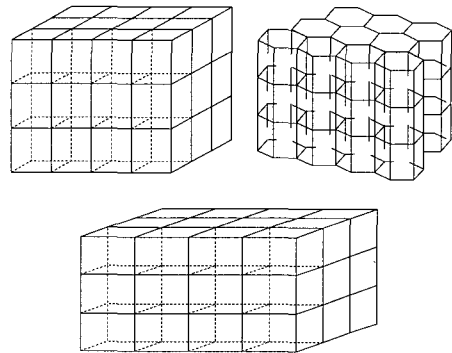


그림 1 3차원 공간분할을 위한 체적소들

#### [정의 1] 상(scene)

큐베릴 공간  $V$ 에서의 하나의 사례(instance)  $V$ 를 상(scene)이라 정의하며  $(g, V)$ 로 표시한다. 이때  $V$ 의 원소는 복셀이며,  $g(v)$ 는 복셀  $v$ 의 밀도(density)이다.

예를 들면 일정한 간격으로 얻어진 단층촬영 영상들을 일정한 간격을 두고 쌓아놓은 것도 큐베릴 공간상에서의 하나의 상이 된다. 이를 바탕으로 하여 이진 상을 다음과 같이 정의한다.

#### [정의 2] 이진 상(binary scene)

큐베릴 공간  $V$ 에서의 이진 상(binary scene)  $V_s$ 는  $(g_s, V)$ 로 표시되는데, 이때  $g_s$ 는 그 상의 영역화 함수(segmentation function)이다.

이러한 이진 상은 임의의 상을 특정한 방법으로 영역분할한 결과인데, 의료영상의 영역분할에는 여러 가지 방법이 제안되고 있다[18]. 가장 간단한 방법이 복셀들을 임의의 문턱 밀도로 이진화하는 것이다. 이 경우 영역분할 함수  $g$ 는 다음과 같다.

$$g_s(v) = \begin{cases} 1 & \text{if } g(v) > T_{density} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

이때  $T_{density}$ 는 이진화를 위한 밀도의 문턱치이다.

임의의 이진 상에서 각각의 복셀들은 물체 내부에 포함되는 내부 복셀  $v^i$  과, 그 외의 영역, 즉 외부에 해당하는 외부 복셀  $v^o$  로 나뉘어지게 되는데 이들은 다음과 같이 정의된다.

$$v^o \in N_s(V) = \{v \in V \mid g_s(v) = 0\}$$

$$v^i \in U_{sV} = \{v \in V \mid g_s(v) = 1\}$$

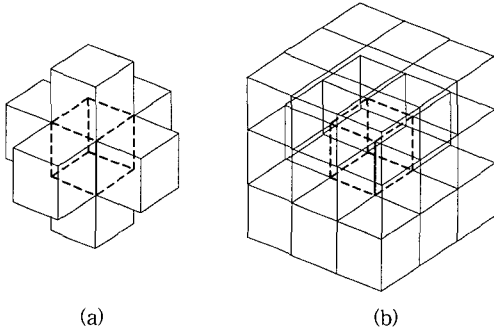


그림 2 (a) O(1)-adjacency, (b) O(3)-adjacency

일반적으로 상에서 모델링하여 분석하거나 가시화하고자 하는 부분이 내부 복셀의 집합  $U_{sV}$ 이 되며,  $N_s(V)$ 는 빈 공간을 표현하게 된다. 임의의 복셀  $v$ 의 이웃복셀은  $v$ 의 여섯 개의 면과 인접하고 있는 복셀들로 정의되는데,  $n(v)$ 로 표기한다. 이와 같이 면과 면이 접하는 것을 인접성을 O(1)-인접(adjacency)이라 한다. 그림 2의 (a)는 이러한 O(1)-인접의 이웃 복셀을 보여주고 있는데, 점선으로 표시된 중앙 복셀(점선)과 O(1)-인접관계에 있는 여섯개의 이웃 복셀들을 나타내고 있다. 이러한 인접성은 변, 또는 꼭지점까지 확장할 수 있으며, 이들을 각각 O(2)-인접 및 O(3)-인접라 한다. 그

림 2의 (b)는 O(3)-인접을 보여주고 있는데, 이웃 복셀의 수가 26개가 된다. O(2)-인접은 면과 변이 연결된 것들만을 이웃화소로 생각하는 방법으로 이 경우는 중앙 복셀에 대해 18개가 이웃 복셀이 된다. 경계 복셀(boundary voxel)  $B$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$B = \{v \mid v \in V, g_s(v) = 1, g_s(u) = 0 \text{ for some } u \in n(v)\}$$

Udupa는 체적을 모델링하기 위하여 내부복셀에 해당하는 영역을 다음과 같이 반경계 표현법을 이용하여 표현하였다.

**[정의 3] 반 경계 표현(semiboundary representation)**

주어진 영역함수  $g_s$ 에 대한 상  $V$ 의 반경계 표현  $S_s$ 은 하나 이상의 외부 복셀을 갖는 내부복셀(경계복셀)의 집합으로  $(B, \theta)$ 로 표기된다. 이때  $B$ 는 경계복셀의 집합이며,  $\theta$ 는 각 경계복셀의 이웃 복셀의 상태를 나타내는 인코딩 함수이다.

O(1)-adjacency에서, 임의의 복셀에 대한 이웃 복셀들의 상태, 즉 어느 이웃 복셀이 내부 복셀인지 외부 복셀인지를 나타내기 위해서는 6 bit의 코드가 필요하며 이를 이웃 복셀 상태코드(neighbor status code)라 한다.

**3. 셀공간 모델상에서의 셀경계(Cellboundary) 표현**

앞에서 정의한 3차원 큐베릴 공간  $V$ 가 주어졌을 때, 셀 공간  $C$ 를 정육면체 형태의 셀의 무한한 집합으로 생각할 수 있는데, 정육면체의 8개의 꼭지점은 각각 인접한 복셀로 대응된다. 이들 복셀은 하나의 셀을 구성하기 위한 것으로 그 셀의 지지복셀이라 한다. 이렇게 이론적으로 정의된 가상의 공간인 셀 공간은 큐베릴 공간의 하나의 변환 공간, 또는 이동 공간이라고 생각할 수 있다. 그림 3은 3차원 공간을 이러한 셀 공간으로 생각한 그림을 보여주고 있다.

큐베릴 공간상에서의 상과 마찬가지로 셀 공간상에서 가상 상(virtual scene)과 가상 이진 상(virtual binary scene)을 다음과 같이 정의할 수 있다.

**[정의 4] 가상 상(virtual scene)**

셀 공간  $C$ 의 하나의 사케  $C$ 를 가상 상(virtual scene)이라 정의하고  $(G, C)$ 로 표기한다. 이때  $C$ 의 원

소가 셀(cell)이며,  $G(c)$  는 셀  $c$  의 8개의 지지복셀의 밀도 구성이라 한다.

**[정의 5] 가상 이진 상(virtual binary scene)**

셀 공간  $C$  의 가상 이진 상(virtual binary scene)  $C_s$  는  $(G_s, C)$  로 표기되는데, 이때  $G_s$  는 영역화 함수  $g_s$  를 가상 상  $C$  에 적용한 결과 나타나는 내부 복셀의 구성이다.

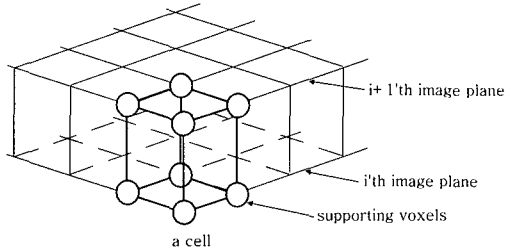


그림 3 3 차원 공간의 셀 공간 모델(cell space model)

큐베릴 공간상의 어떠한 상에 대해서도 변환공간인 셀 공간상에서 이에 대응하는 가상 상이 항상 존재하며, 이것은 이진 상에 대해서도 마찬가지이다. 모든 셀  $c$  는 여덟 개의 지지복셀  $n_s(c)$ 로 구성되는데 그림 3에서 볼 수 있듯이 각각의 복셀은 셀에서 하나의 꼭지점이 된다. 공간을 가상으로 분할하는 임의의 셀의 8개의 지지복셀 중 최소한 하나 이상의  $v^i$ 과 하나 이상의  $v^j$ 을 갖는 셀들을 **경계셀(boundary cell)**이라고 정의하고 다음과 같이 표기한다.

$$BC = \{ c \mid c \in C, g_s(v) = 1, g_s(u) = 0 \text{ for some } v, u \in n_s(c) \}$$

Udupa가 큐베릴 공간에서 경계 복셀을 이용하여 체적을 표현한 것과 같이, 본 논문에서는 셀 공간에서 경계셀들을 이용하여 체적을 표현하는 셀경계 표현법을 제안하는데, 다음과 같이 정의된다.

**[정의 6] 셀 경계 표현(cellboundary representation)**

가상 이진 상  $C_s$  의 셀 경계 표현  $C$  는  $(BC, \Delta)$  로 표기되는데, 이때  $BC$  는 가상 이진상의 경계 셀의 집합이며, 인코딩 함수  $\Delta$ 는  $BC$ 의 각 원에 대한 8개의 지지복셀의 구성을 나타낸다.

그림 4는 임의의 셀에 대한 지지 복셀들의 표시방법과 경계셀의 예를 보여주고 있는데, 흰 원은 외부 복셀을 검은 원은 내부 복셀을 나타내고 있다. 임의의 셀에

대한 지지복셀의 구성은 8비트의 이진 코드로 나타나며, 하나의 셀에 대한 여덟개의 지지복셀들이 각각 내부 복셀인지 외부 복셀인지를 표시하고 있다. 이러한 구성이 지지 복셀들의 기하학적 구조를 유일하게 표현하므로 하나의 셀경계 표현은 하나의 가상 이진 상으로부터 유일하게 정의된다. 즉, 가상 이진 상과 셀경계 표현은 항상 일대일 대응이 되며, 결과적으로 적당한 영역분할 알고리즘에 의해 분할된 단층촬영 영상들은 셀경계 표현으로 유일하게 정의되어 진다. 결국, 하나의 가상 이진 상은 그의 경계셀들만을 이용하여 재구성 할 수 있으며, 따라서 셀경계  $C$ 와 가상 이진 상  $C_s$ 는 동등하며 서로 정확하게 변환할 수 있다. 이러한 셀경계 표현은 체적의 계산이나, 조작, 가시화등의 여러 응용에 사용될 수 있으며, 이런 작업을 위해서 등밀도 **표면(isosurface)**의 추출이 필요하게 되는데, 셀경계 표현에서부터 이러한 표면정보를 추출하는 방법을 다음 장에서 제안한다.

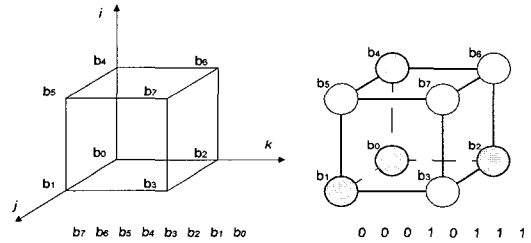


그림 4 지지복셀들의 indexing(좌) 및 경계셀의 예

**4. 물체 표면 모델링을 위한 기본형의 정의**

셀경계 표현방식에 의해 물체의 외부 등밀도 표면을 추출하기 위해서 먼저 모델링 원형을 정의하고 이들과 표면과의 관계를 설명한다. 셀은 8개의 지지 복셀을 가지고, 각각의 복셀이 내부 또는 외부 복셀이 될 수 있으므로 셀의 모든 가능한 형태는 256가지가 된다. 회전에 의해 같아지는 형태를 고려하면 다시 22개의 패턴으로 줄어든다. 그림 5는 이러한 가능한 22가지 패턴 P0 ~ P21을 보여주고 있는데 흑, 백의 원은 각각 외부 복셀 및 내부 복셀을 나타내고 있다. 표 1은 이러한 22개 패턴에 대해 회전에 의해 만들 수 있는 모든 형태의 수, 각 모델링 원형들의 색인 방법 및 생성되는 표면조각의 수를 분석하고 있다. 이것은 Yun과 Park[17]이 제안한 PVP(Polygonal Volume Primitive) 개념을 일반화시킨 것으로, 모든 경우를 포함하는 일반화된 모델링 원형(MP)을 나타낸다. 이 MP들은 내부 복셀들이 셀을 차

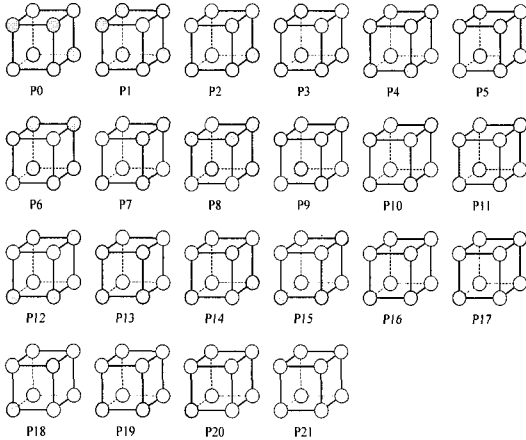


그림 5 셀에 대한 지지복셀들의 가능한 22 가지 패턴 P0 ~ P21

표 1 각 모델링 원형 패턴에 대한 가능한 형태의 수, 색인 방법, 분류 및 표면조각의 수

| 패턴    | 회전에 의한 형태의 수 | 모델링 원형의 색인 방법 | 분류  | 생성되는 표면조각의 수 |
|-------|--------------|---------------|-----|--------------|
| P0    | 1            | x             |     |              |
| P1    | 8            | MP1           | 체적형 | 1            |
| P2    | 8            | MP2           |     | 1            |
| P3    | 12           | MP3           |     | 1            |
| P4    | 24           | MP4           |     | 2            |
| P5    | 4            | MP5           |     | 2            |
| P6    | 12           | MP6           |     | 2            |
| P7    | 24           | MP7           |     | 2            |
| P8    | 24           | MP8           |     | 2            |
| P9    | 8            | MP9           |     | 3            |
| P10   | 24           | MP10          |     | 3            |
| P11   | 2            | MP11          |     | 4            |
| P12   | 6            | MP12          | 표면형 | 2            |
| P13   | 6            | MP13          |     | 1            |
| P14   | 8            | MP14          |     | 2            |
| P15   | 24           | MP15          |     | 2            |
| P16   | 24           | MP16          | 1   |              |
| P17   | 4            | MP17          | 선형  |              |
| P18   | 12           | MP18          |     |              |
| P19   | 12           | MP19          |     |              |
| P20   | 8            | x             |     |              |
| P21   | 1            | x             |     |              |
| Total | 256          | 22            |     |              |

지하고 있는 형태에 따라서 평면 그룹, 체적 그룹 및 선형 그룹으로 다시 분류할 수 있다. 하나의 경계셀은 내부 복셀과 외부 복셀을 함께 포함해야 하므로 패턴

P0와 P21은 모델링 원형에서 제외된다. 또한 모델링의 목적이 체적 가시화이라면 패턴 P20은 3차원 공간상에서 체적이나, 직선 등 눈에 보이는 물체를 구성하는데 기여할 수 없으므로 모델링 원형에서 제외시킨다. 따라서 가시화를 위한 모델링의 경우 P1에서 P19까지 19개의 패턴들만을 모델링 원형으로 사용한다.

이러한 19가지의 모델링 원형은 그 형태에 따라서 체적, 표면 및 선형그룹으로 다음과 같이 나뉘어진다.

**4.1 체적형 모델링 원형 (volumetric modelling primitives)**

MP1에서 MP11까지 11개의 패턴에서의 내부 복셀들을 연결해 보면 이들은 독특한 다면체를 이룬다. 이러한 다면체는 3차원 공간상에서 일정한 체적을 가지므로 이들을 체적그룹의 모델링 원형으로 분류한다. 이 그룹의 패턴들에 의한 3차원 표면은 항상 8개의 지지 복셀들이 이루는 정육면체의 내부에 존재한다. 하나의 표면 조각에서의 모든 꼭지점들은 같은 평면상에 존재해야 하므로, 이러한 모델링 원형들 중에서 MP1에서 MP3까지는 하나의 표면 조각이 만들어지고 MP4에서 MP8까지는 두 개, 또 MP9와 MP10은 각각 세 개의 표면 조각들로 구성된다는 것을 알 수 있으며 MP11은 네 개의 표면 조각들을 생성하게 된다.

**4.2 표면형 모델링 원형 (planar modelling primitives)**

MP12에서 MP16까지의 모델링 원형들은 하나의 표면을 생성하게 되며 표면그룹으로 분류된다. 만약 표면 조각이 MP13이나 MP16과 같이 셀의 여섯 면상에 존재하면 이 표면 조각들은 단 방향성이다. 즉 표면의 방향이 그 표면에서 셀 내부의 중심을 향하게 된다. 그 외의 경우들, 즉 표면들이 셀의 내부에 존재하면 이들은 양방향성의 표면이 된다. 이것은 얇은 종이를 모델링 하는 것으로 생각할 수 있다. 이들은 PVP방법에 의해서 는 표현되지 않는 것으로써 제한된 모델링 방법이 보다 다양한 방법으로 물체를 모델링할 수 있음을 나타낸다. 더욱이 이 방법은 마칭 큐브[11]에서 발생하는 등밀도 표면 추출시 모호성이 전혀 발생하지 않는다는 장점을 가지고 있다. 따라서 어떤 경우에서라도 표면 결정의 모호성이 존재하지 않고, 같은 입력에 대해서는 항상 같은 출력을 내게된다.

**(3) 선형 모델링 원형 (linear modeling primitives)**

P17, P18 그리고 P19와 같은 패턴들에서는 각각 선형 모델이 생성되며 따라서 이들을 선형그룹으로 분류된다. 이들도 실제로 체적을 형성하지는 못하지만 바늘이나 털과 같이 물체의 매우 가는 부분을 모델링 하는

데 사용할 수 있다.

| 그룹  | 모델링 원형 |  |  |  |  |  |
|-----|--------|--|--|--|--|--|
| 체적형 |        |  |  |  |  |  |
|     |        |  |  |  |  |  |
| 표면형 |        |  |  |  |  |  |
| 선형  |        |  |  |  |  |  |

그림 6 모델링 원형의 분류

셀 경계 표현을 표면기반의 의료영상을 3차원 화면 가시화를 위해 사용하는 경우, 실제로 표면을 만들 수 있는 그룹들, 즉 체적그룹과 표면그룹의 모델링 원형들만을 이용하여 표현하게 된다. 표 1은 각 그룹의 모델링 원형들에 대한 표면 조각의 수를 함께 나타내고 있다.

|        | S1        | S2        | S3        | S4        | S5        |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 면 방향   |           |           |           |           |           |
|        | S6 - S10  | S11 - S15 | S19 - S20 | S21 - S25 | S26 - S30 |
| 변 방향   |           |           |           |           |           |
|        | S31 - S35 | S36 - S40 | S41 - S45 | S46 - S50 | S51 - S55 |
| 꼭지점 방향 |           |           |           |           |           |
|        | S61 - S65 | S66 - S70 | S71 - S75 | S76 - S80 | S81 - S85 |
| 면 방향   |           |           |           |           |           |
|        | S86 - S90 |           |           |           |           |
| 면 방향   |           |           |           |           |           |
|        | S91       | S92       | S93       | S94       | S95       |
| 면 방향   |           |           |           |           |           |
|        | S96       | S97       | S98       | S99       | S100      |
| 면 방향   |           |           |           |           |           |
|        | S101      | S102      | S103      | S104      | S105      |
| 면 방향   |           |           |           |           |           |
|        | S106      | S107      | S108      | S109      | S110      |

그림 7 모델링 원형에 대한 표면 생성 표

제안된 19개의 모델링 원형들을 이용하여 물체를 표

현하는 경우 나타낼 수 있는 표면 조각의 방향은 모두 26가지가 된다. 즉 셀을 구성하는 정육면체의 각각의 면 방향에 대해서 하나씩 하여 6개, 12개의 정사각형의 변 방향으로 하나씩 하여 12개, 그리고 정육면체의 각 꼭지점 방향으로의 8개가 가능한 표면 조각의 방향이 나타날 수 있다. 이것은 Chen[7]이 제안한 체적/표면 8진 트리(octree)로 표현할 수 있는 경우와 같으며, Herman과 Lieu[9]가 제안한 알고리즘이 면 방향의 6가지의 표면밖에 생성하지 못하는 것과 비교하면 훨씬 세밀하고 다양하게 표면을 모델링 할 수 있다. 이 분야 대표적인 방법인 마칭 큐브(서브 복셀 연산을 하여 정확한 물체 표면 재구성이 가능함)와 비교하면 정밀하지 않은 표면을 만들지만, 훨씬 빠르고 효율적인 모델을 가질 수 있으며, 그 모델 자체가 충분히 정밀한 표면을 만들어 낸다는 장점이 있으며, 체적의 계산 등과 같이 모델에 대한 다양한 연산에 보다 적합하다는 장점이 있다. 또한 좋은 방법으로 법선 벡터를 구하여 일반적인 평활 명암법을 사용하여 3차원 영상으로 가시화 할 경우, 시각적인 흠들을 크게 줄여 보다 실감 있는 영상을 만들 수 있다.

그림 7은 이 방법을 사용하여 물체를 모델링 할 경우 발생할 수 있는 모든 가능한 표면 조각의 종류를 나타내고 있다. 하나의 면 방향 및 변 방향에 대해서는 모두 다섯 가지의 가능한 표면이 나타날 수 있는데 하나의 사각형 및 네 개의 삼각형들이 그것들이다. 그리고 각각의 꼭지점 방향에 대해서는 두개씩의 가능한 표면 조각 형태가 나오게 되므로, 결과적으로 면 방향에 대해서 30개의 표면 조각이 생길 수 있으며 변 방향으로는 60개 그리고 꼭지점 방향으로 16개하여 모두 106개의 가능한 표면 조각이 생길 수 있다. 이들 표면 조각들은 면 방향에 대한 표면을 S1 에서 S30으로 정의하고 변 방향에 대한 것들을 S31에서 S90, 마지막으로 꼭지점 방향의 것들을 S91에서 S106까지로 정의하였다. 셀 경계 표현에서의 하나의 경계셀은 지지 복셀의 형태에 의해 위에서와 같이 하나 이상의 표면 조각을 만들며 그 형태는 삼각형이거나 사각형이다. 경우에 따라서는 사각형의 표면 조각에 대한 처리가 삼각형의 표면에 대한 처리에 비해 두 배 이상의 시간이 걸리는 경우가 있는데, 이 경우 두 개의 삼각형 표면 조각으로 분할하여 표현할 수 있으며, 가능한 표면 조각의 수는 88 개로 줄어든다. 실제로 삼각형 표면을 보다 빨리 가시화 하기 위한 그래픽 가속기가 있는 시스템의 경우는 이와 같이 삼각형 표면만으로 표면을 재구성하는 것이 바람직하다.

지지 복셀의 구성에 따라서 발생하는 표면 조각의

집합을 테이블로 구성하면, 하나의 가상 이진 상에서의 물체의 외부 표면은 이러한 테이블로부터 직접 구할 수 있다. 따라서 이 알고리즘은 하드웨어화가 매우 용이하며, 밀도를 변화시켜가면서 표면모델을 구해 가시화 하는 등의 고속의 모델링이 필요한 경우 매우 적합한 알고리즘이다. 또한 이렇게 하더라도 표면 영역에서와 셀 영역에서의 기하학적인 연결성은 그대로 유지되게 된다.

```

Procedure GenCBoundary
Input: Two slices of scenes at adjacent level with a proper
segmentation function  $g_s$ .
Output: A cell-boundary  $c = (CB, \Delta)$ .

Begin
[1] Generate binary scenes for each scenes using the
segmentation function  $g_s$ .
[2] Scan two slices of binary scenes and create a cube
from supporting voxels:
four neighbors on one slice and four neighbors on the
next slice.
[3] Calculate the number of 1-voxel  $n_1$  in the cube.
[4] If  $2 < n_1 < 8$  then
[4.1] Compute the 1-voxel configuration  $\Delta$  for the cell.
[4.2] Insert the cell into  $c$ .
[5] If scanning is not over, goto 2.
[6] Return the cell-boundary  $c$ .
End
    
```

그림 8 셀 경계 표현 추출 알고리즘

### 5. 셀 경계 표현 알고리즘

그림 8의 Procedure GenerateSurface는 인접한 층에서 촬영된 두 장의 단층 영상으로부터 셀 경계 표현을 추출하는 방법을 기술하고 있다. 먼저 두 입력 영상을 적절한 영역분할 알고리즘을 이용하여 물체영역과 배경영역으로 분할하여 이진 영상을 만들어야 하는데, 본 알고리즘에서는 밀도 문턱치를 이용하여 이진화 하는 방법을 사용하였다. 그림 9는 셀 경계 표현 모델에서 가시화를 위한 표면 모델을 추출하는 알고리즘을 나타내고 있다. 지지 복셀의 구조에 대한 표면 조각 테이블을 미리 구해서 헤더파일에 넣고 참조함으로써 표면조각을 빠르게 추출할 수 있다.

제안된 방법을 Yun과 Park의 PVP 알고리즘 및 Lorensen 과 Cline의 마칭 큐브 알고리즘 비교해 보면 다음과 같은 특징을 나타낸다.

먼저, PVP 알고리즘에서는 각각의 지지 복셀에 대한

```

Procedure SurfaceFromCBoundary
Input: A cell-boundary  $c = (CB, \Delta)$ .
Output: A boundary surface patch list  $s$ .

Begin
[0] Initialize  $s \leftarrow \emptyset$ .
[1] Extract a boundary cell  $c$  from the list  $C$ .
[2] Using the configuration code  $\delta$  of  $c$ 
find the surface patch list from a predefined look-up
table.
[3] Insert the surface patches into the surface patch list.
[4] Delete  $c$  from  $c$ .
[6] If  $c$  is not empty, goto 1.
[7] Return the the surface patch list..
End
    
```

그림 9 셀 경계 표현에서 표면모델 추출 알고리즘

법선 성분을 모든 셀에서 계산하여 이를 이용하여 그 경계 셀의 법선 성분을 구하게 된다. 그리고 이 법선 성분을 이용하여 등 밀도 표면을 가장 잘 근사화 하는 체적 모델(PVP)을 찾는다. 그러나 제안된 방법에는 이러한 근사화 과정이 필요 없으며 따라서 모델링 시간을 줄이게 된다. 또한 마칭 큐브에서와 같이 복잡한 서브복셀 연산을 하지 않기 때문에 모델링 시간이 크게 줄어들고 모델들을 저장하기 위해서 필요한 기억공간의 양도 크게 줄어들게 된다.

또한 PVP 알고리즘은 앞에서 언급되었듯이 각 지지 복셀들의 표면 법선을 계산하여 이를 모델링에 사용하는데, 복셀의 법선 벡터를 구하는 알고리즘이 다양하므로 이러한 법선벡터들은 사용하는 알고리즘에 따라 서로 다르게 나타날 수 있게 되며, 결과적으로 가장 적합한 PVP를 찾는 데도 영향을 줄 수 있게 된다. 결과적으로 PVP알고리즘에 의해서 생성되는 단층 영상의 표면 모델들은 복셀의 법선을 구하는 알고리즘에 따라 서로 달라질 수가 있게 된다(일반적으로 법선벡터를 이용하는 데는 3x3x3 필터를 사용한다). 이에 비하여 제안된 방법은 모델링시에 이러한 법선 벡터를 사용하지 않으므로 같은 입력 영상으로부터는 항상 같은 모델을 제공해 준다. 이러한 특징은 마칭 큐브의 최대 약점인 크랙 발생 문제(그림 10의 왼쪽) 및 표면 생성시의 모호성 문제(그림 10의 오른쪽)를 전혀 발생시키지 않고, 항상 단혀있고 유일한 표면 모델을 생성하게 된다.

마지막으로 PVP알고리즘에서는 그림 11에 나타난 것과 같이 5가지의 체적이 있는 패턴들만을 이용하게 되는데 이에 비해 제안된 방법은 훨씬 다양한 모델링 원형을 이용하므로 훨씬 다양하고 복잡한 형태에도 적

용이 가능하다. 이러한 장점들과 함께, 제안된 방법은 미리 계산되어진 테이블에 의해서 동작되고 랜덤한 데이터의 접근을 필요로 하지 않는 스캔라인 알고리즘이므로 하드웨어로 제작하기가 매우 간편하며 소프트웨어로 동작해도 다른 알고리즘들에 비하여 훨씬 빨리 물체의 표면 모델을 구해낼 수 있다.

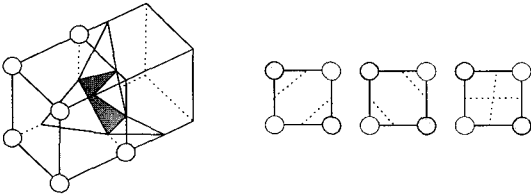


그림 10 마칭 큐브 알고리즘의 크랙 발생 및 모호성 문제

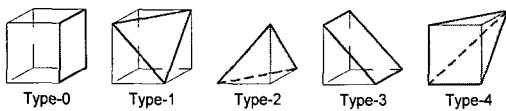


그림 11 PVP알고리즘의 모델링 원형

6. 실험

제안된 셀 경계 표현 및 표면추출 알고리즘은 C언어로 구성되었고, Sun Workstation 및 PC에서 구현되었다. 또한 가시화를 위한 툴은 Windows 98상에서 OpenGL 라이브러리를 이용해 구현하였다. 실험 데이터로는 총 60장(128x128)의 플라스틱 해골을 CT로 단층 촬영한 영상(그림 12)과, 인간의 머리부위를 30장(128x128) 단층 촬영한 영상(그림 17)을 사용하였다. 이들 영상을 밀도 문턱치를 130으로 하여 이진화하고 제안된 알고리즘을 이용하여 모델링 한 결과를 그림 14와 그림 18에서 보여주고 있다.

플라스틱 해골의 경우 제안된 알고리즘의 표면 모델링 결과가 그림 14에, 이를 평활 명암법으로 렌더링한 영상이 그림 15에 나타나 있다. 그림 16은 이 데이터를 마칭 큐브 알고리즘을 이용하여 모델링 한 결과이며 그림 17은 렌더링 영상인데, 마칭 큐브는 서브 복셀 연산을 통해 표면 모델 자체는 훨씬 부드럽게 만들어 내지만 표면 결정시의 모호성으로 원으로 표시된 곳과 같이 다수의 크랙이 생겨 닫힌 표면의 구하지 못하는 단점이 있다.

표 2는 이 데이터를 제안된 알고리즘, PVP 및 마칭 큐브로 모델링하였을 때 생성된 표면조각의 수와 처리 시간을 각각 보여주고 있다. 본 알고리즘이 마칭 큐브에 비해 훨씬 적은 수의 표면조각을 만드는 것을 알 수 있다. 이것은 마칭 큐브가 상대적으로 정확한 표면을 만들어 내는 것을 나타내지만 표면에 구멍이 생기는 결함이 발생하는데 비해 본 방법은 항상 견고하고 닫힌 표면모델을 보다 효율적으로 만들어 내는데 장점이 있다. 또한 적절한 표면 법선 계산법을 이용한 평활 명암법 또는 풍(Phong) 명암법을 사용할 경우 자연스러운 영상을 만들어 낼 수 있다. 표 2의 모델링 시간은 생성된 표면 모델의 파일 저장시간을 제외한 모든 과정에 대한 처리시간으로 마칭 큐브가 서브 복셀 연산을 하고 많은 표면조각을 만들어 내므로 상대적으로 많은 시간이 소요되었다(Pentium PC 330MHz, Windows 98환경). 또한 PVP에서는 모델링 원형은 제안된 알고리즘보다 적게 나타나지만(표 3) 이들로부터 나타나는 표면조각들에서 물체의 내부표면과 외부표면을 분리하는 과정이 추가되어 제안된 알고리즘보다 조금 시간이 더 걸렸다.

본 실험에서는 가시화를 목적으로 모델링 하였기 때문에 모델링 원형 중에서 선형을 사용하지 않았으며, 표면형도 의미 있는 체적을 형성하지 못하므로 본 실험에서는 사용하지 않았고 체적형만을 이용하여 모델링하였다. 표 3은 플라스틱 해골에 대해 제안된 방법에서 생성된 경계셀의 수와 PVP알고리즘에서 이에 대응하는 PVP의 수를 나타내고 있는데, PVP알고리즘은 제한된 모델링 원형을 사용하므로 제안된 방법에 비해 적은 수의 PVP를 만드는데, 제안된 방법이 볼륨을 보다 정확하게 표현하는 것을 알 수 있다. 이들 실험을 통하여 단층 영상내의 볼륨 정보에 대한 표면 모델링에 제안된 알고리즘이 잘 동작한다는 것을 알 수 있었다.

표 2 제안된 방법과 PVP 및 마칭큐브의 비교

|              | 셀경계 표현 | PVP           | Marching Cube |
|--------------|--------|---------------|---------------|
| 표면조각의 수      | 40318  | 38712(161950) | 98506         |
| 모델링시간 (msec) | 650    | 940           | 1870          |

표 3 제안된 방법과 PVP알고리즘의 비교

| 셀 경계표현에서 모델링 원형의 수 | PVP 방식에서 PVP의 수 |
|--------------------|-----------------|
| 35265              | 28490           |



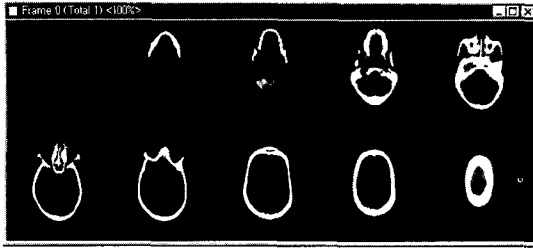


그림 12 Plastic skull data (총 60장(128x128) 중 10장)



그림 13 제안된 알고리즘을 이용한 모델링 결과



그림 14 평활 명암법을 이용한 가시화 결과

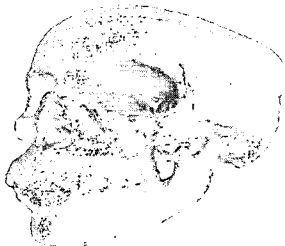


그림 15 마칭큐브에 의한 모델링 결과

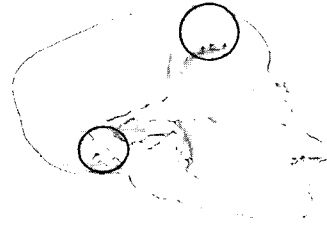


그림 16 마칭큐브 방식의 렌더링 결과(Crack이 나타남)

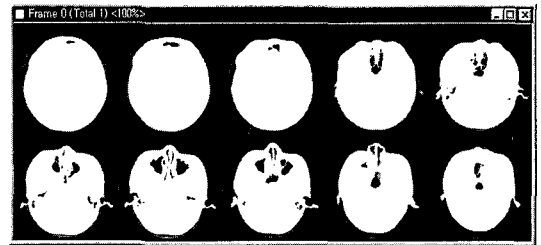


그림 17 Human head data (총 30장(128x128) 중 10장)

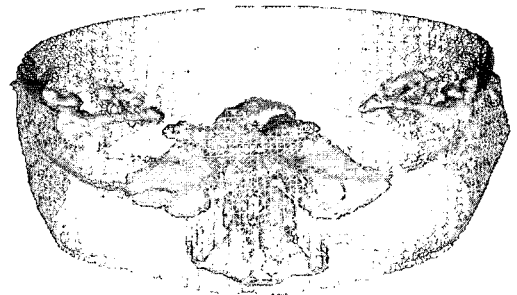


그림 18 제안된 알고리즘을 이용한 모델링 결과

## 7. 결론

본 논문에서는 단층 영상들로부터 내부에 포함되어 있는 3차원 구조를 표현하기 위한 셀 경계 표현방법을 제안하였다. 이 방법은 큐베일 공간을 셀 공간으로 변환하고 경계셀들을 추출하여 볼륨을 재구성하는 방법이다. 셀 경계 표현은 이러한 경계 셀들과 이들의 지지 복셀들의 구조에 의해 표현되어 지며, 이진 체적 정보를 정확하게 표현해낼 수 있다. 이 표현에서부터 가시화등의 작업에 필요한 표면모델을 추출하기 위해 19개의 모델링 원형을 제안하였으며, 이들을 체적형, 표면형 그리고 선형으로 분류하였다. 이들로부터 3차원 표면은 표 참조 방법으로 쉽게 추출하게 된다. 제안된 방법의 장점은 기

존에 제안된 마칭 큐브나 PVP알고리즘 등에서 흔히 발생하는 표면생성시의 모호성문제가 전혀 발생하지 않는다는데 있다. 또한 마칭 큐브에서 발생하는 표면의 크랙 문제도 완전히 해결된다는 장점이 있다. 또한 알고리즘이 표 참조 방식을 취하므로 하드웨어화 하기가 매우 용이하여 고속의 모델링이 필요한 분야에 매우 적합한 방법이다.

### 참 고 문 헌

- [1] K. Hähne 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] 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.
- [4] 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.
- [5] D. Meyers, S. Skinner, and K. Sloan, "Surfaces from contours," *ACM Transactions of Graphics*, vol. 11, no. 3, pp. 228-258, July 1992.
- [6] Y. K. Choi and K. H. Park, "A heuristic triangulation algorithm for multiple planar contours using an extended double branching procedure," *The Visual Computer*, vol. 10, no. 7, pp. 372-387, 1994.
- [7] 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.
- [8] H. Cline, W. Lorensen, S. Ludke, C. Crawford, and B. Teeter, "Two algorithms for three dimensional reconstruction of tomograms," *Medical Physics*, vol. 15, no. 3, pp. 320-327, 1988.
- [9] 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.
- [10] A. Kalvin, C. Cutting, B. Haddad, and M. Noz, "Constructing topologically connected surfaces for the comprehensive analysis of 3d medical structures," *SPIE Vol. 1445 Image Processing*, pp. 247-258, 1991.
- [11] 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.
- [12] P. Shirley and A. Tuckman, "A polygonal approximation to direct scalar volume rendering," *Comput. Graph.*, vol. 24, no. 5, pp. 63-70, 1990.
- [13] U. Tiede, K. Hoehne, M. Bomans, A. Pommert, M. Riemer, and G. Wiebecke, "Investigation of medical 3-d rendering algorithms," *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 10, no. 2, pp. 41-53, 1990.
- [14] J. Udupa and D. Odhner, "Fast visualization, manipulation, and analysis of binary volumetric objects," *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 4, no. 1, pp. 53-62, 1991.
- [15] J. Udupa, S. Srihari, and G.T.Herman, "Boundary detection in multidimensions," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 4, no. 1, pp. 41-50, 1982.
- [16] A. Wallin, "Constructing isosurfaces from CT data," *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 24, pp. 28-33, 1991.
- [17] H. J. Yun and K. H. Park, "Surface modeling method by polygonal primitives for visualizing three-dimensional volume data," *The Visual Computer*, vol. 8, pp. 246-259, 1992.
- [18] 김명희, 남상아, 홍헬렌, "의료영상의 3차원 가시화기술 및 발전 방향," *정보과학회지*, 16권, 12호, pp. 13-21, 1998년 12월

### 최영규

정보과학회논문지:시스템 및 이론  
제 27 권 제 2 호 참조



### 이 의 탁

1978년 서울대 공업교육학과 전자전공  
졸(학사). 1982년 서울대학교 대학원 전  
자공학과 졸(석사). 1996년 KAIST 전기  
전자과 졸(박사). 1980년 ~ 현재 한국전  
자통신연구원 재직. 관심분야는 가상현  
실, Mixed Reality, 온라인 게임,  
Virtual Prototype, VR Psychotherapy 등