

Shrink-Wrapping 알고리즘을 이용한 단층영상으로부터의 표면 재구성

(Surface Reconstruction from Cross-Sectional Images using
the Shrink-Wrapping Algorithm)

박은진[†] 최영규^{**}
(Eun-Jin Park) (Young-Kyu Choi)

요약 단층촬영 영상으로부터 임의의 등밀도 표면을 재구성하기 위한 새로운 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 이 분야의 가장 대표적인 알고리즘인 마칭큐브에서와는 달리 단층영상에서 직접 등밀도 표면을 생성하지 않고 등밀도점을 먼저 추출하며, 셀경계 알고리즘을 이용하여 구한 초기메쉬의 각 정점들을 이들 등밀도점 방향으로 표면축소포장(Shrink-wrapping)하는 과정을 반복적으로 적용하여 등밀도 표면을 추출한다. 이렇게 함으로써 마칭큐브에서 나타나는 크랙이나 표면결정의 모호성이 발생하지 않고 안정적인 표면을 재구성 할 수 있다. 또한, 마칭큐브에서 $O(1)$ -인접한 등밀도점만을 사용할 수 있는데 비해, 제안된 방법은 $O(2)$ 및 $O(3)$ -인접한 등밀도점을 표면재구성에 활용할 수 있게 함으로써 이론적으로 마칭큐브 알고리즘보다 더 정밀한 표면을 추출할 수 있도록 하였다. 실험을 통해 제안된 표면 재구성 알고리즘이 단층영상에서부터 등밀도면을 재구성하는데 매우 안정적이고 정확하며 효과적임을 확인할 수 있었다.

키워드 : 표면재구성, 등밀도면, 마칭큐브 알고리즘, 셀경계 알고리즘, 표면축소포장

Abstract This paper addresses a new surface reconstruction scheme for approximating the isosurface from a set of tomographic cross sectional images. Differently from the novel Marching cube algorithm, our method does not extract *iso-density surface(isosurface)* directly from the voxels but calculates the *iso-density point(isopoint)* first. After building the relatively coarse initial mesh by the Cell-boundary algorithm approximating the isosurface, it produces the final *isosurface* by iteratively shrinking and smoothing the initial mesh. Comparing with the Marching Cube algorithm, our method is robust and does not make any crack in resulting surface model. Furthermore, the proposed method surmounts the $O(1)$ -adjacency limitation of MC in defining the isopoints by permitting the $O(2)$ and $O(3)$ -adjacent isopoints in surface reconstruction, and can produce more accurate isosurface. According to experiments, it is proved to be very robust and efficient for isosurface reconstruction from cross sectional images.

Key words : surface reconstruction, isosurface, marching cube, cell-boundary method, and shrink-wrapping algorithm

1. 서론

CT나 MRI와 같은 단층촬영 장치에 의해 추출된 영상에서부터 그 안에 포함된 물체의 표면모델을 재구성하기 위한 다양한 방법들이 연구되어왔다. 표면기반 렌더링법으로 분류되는 이들 방법들은 단지 볼륨정보의 실감있는 렌더링 영상만을 제공하는 볼륨기반 렌더링과

는 달리, 표면모델을 추출할 수 있으므로 렌더링 이외에도 체적의 계산 등 물체에 대한 여러 가지 연산이 가능하여 모의수술과 같은 다양한 응용분야에 널리 사용되고 있다.

이러한 표면 재구성법은 일정한 두께를 갖는 단층영상이 연속적으로 쌓여있는 복셀공간(voxel space)에서 원하는 밀도의 표면을 추출하는 문제로 정의되며, 따라서 복셀기법이라고도 불리고 있다. 이 방법에 대한 최초의 연구는 Herman과 Liu에 의해 보고되었는데[1], 정확한 표면모델을 만들지는 못하지만 적절한 표면법선을 구하여 렌더링 할 경우 어느 정도 자연스러운 영상을

[†] 학생회원 : 한국기술교육대학교 정보기술공학부
ejinpark@kut.ac.kr

^{**} 종신회원 : 한국기술교육대학교 정보기술공학부 교수
ykchoi@kut.ac.kr

논문접수 : 2006년 6월 29일

심사완료 : 2006년 11월 2일

일을 수 있었다. 복셀기법의 가장 대표적인 방법은 Lorensen과 Cline이 제안한 마칭 큐브(Marching Cube) 알고리즘[2]으로 서브복셀연산(sub-voxel operation)을 하여 복셀과 복셀사이에서 매우 정교한 표면을 만들어 낸다. 그러나 현재 이 분야에서 가장 많이 사용되고 있는 이 방법은 너무 많은 표면조각을 만들며, 표면에 크랙이 발생 할 수 있고 표면 생성시 모호성이 발생하는 등의 단점을 가지고 있다. 본 논문은 이러한 단층 영상에서부터 표면을 재구성하는 안정적이면서 정확한 알고리즘을 제안한다.

마칭큐브의 이런 단점을 보완하기 위해 제안된 방법 중 하나가 셀경계 표현법(cell-boundary representation) [3]인데, 이 방법은 마칭큐브에서와 같은 표면의 크랙이 발생할 가능성이 전혀 없이 안정적인 표면을 만들며, 표면조각의 개수도 마칭큐브에 비해 줄어든다는 장점이 있으나, 서브복셀연산을 하지 않기 때문에 최종적인 표면의 정밀도가 마칭큐브에 비해 떨어진다는 단점이 있다. 본 논문에서는 이러한 마칭큐브와 같이 정밀한 표면을 만들어내면서도 표면생성에 모호성이 없고 표면에 크랙이 발생하지 않는 방법을 제안한다.

제안된 알고리즘의 기본 아이디어는 재구성 문제의 접근 방법을 달리하는 것이다. 마칭큐브에서는 단층영상에서 직접적으로 등밀도 근사표면(iso-density approximation surface)을 만들어 내는데, 제안된 방법에서는 직접적으로 등밀도 표면을 추출하지 않고 등밀도점(iso-density points)들을 먼저 추출한다. 메쉬의 생성은 먼저 이들을 등밀도면에 대한 조악한(coarse) 근사모델인 초기메쉬를 구하고, 이 초기메쉬를 추출된 등밀도점 방향으로 표면축소포장(shrink-wrapping)함으로써 정교한 근사표면을 구하는 방법이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서 제안된 방법과 관련된 기존의 연구를 소개한다. 3장에서는 단층 영상에서부터 등밀도점을 추출하는 방법을 제안하며, 4장에서는 표면 근사를 위한 초기메쉬를 만드는 방법을 다루는데, 셀경계 알고리즘을 사용하여 안정적인 근사표면을 생성하게 된다. 5장에서는 초기메쉬를 등밀도점으로 이동하여 실제적으로 정확한 표면을 생성하는 단계인 축소포장에 의한 표면 재구성 방법에 대해 설명한다. 6장에서 실험결과를 보이고 마지막으로 7장에서 결론을 맺는다.

2. 제안된 방법의 배경

단층영상에서부터 등밀도면을 추출하는 가장 대표적인 방법인 마칭큐브[2]는 면으로 인접하는 복셀간의 밀도를 선형으로 근사하는 서브복셀 연산을 통해 등밀도점을 추출하고 이들을 임의의 방법으로 연결하여 직접

적으로 표면을 추출한다. 이 논문의 발표 이후 “표면품질 향상”과 “표면개수의 감소”라는 두 가지 방향으로 다양한 연구가 이어졌는데 본 논문은 이 중에서 전자에 초점을 맞춘다. Dürst가 처음으로 마칭큐브의 14가지 토폴로지 중 하나의 토폴로지에서 표면 결정의 모호성이 존재하며, 이에 따라 표면에 구멍이 생기는 문제를 제기하였다[4]. Nielsen은 이러한 문제가 인접한 8개의 복셀로 이루어지는 큐브의 어느 한 면의 4개 에지가 모두 등밀도 표면에 의해 절단되는 경우에 발생한다는 것을 밝히고, 안장점(saddle point)의 개념을 도입하여 모호성을 해결하고자 하였다[5]. 이후 Natarajan[6]과 Chernyaev[7]는 표면에 구멍이 생기는 것은 아니지만 마칭큐브에 추가적으로 표면결정의 모호성이 다른 몇 개의 토폴로지에 대해서도 발생함을 제기하였고 안장점의 개념을 확장하는 방법으로 해결하고자 하였다. 최근에 Lopes[8]등도 셀 안에 작은 수의 열쇠점(key point)을 추가하여 셀 내부의 구조를 보다 정확히 근사하고자 하였다. 그러나 이런 방법들은 기본적으로 하나의 셀 내부의 구조에 대한 예측을 보다 정확하게 하자는 것으로, 표면에 구멍이 생기는 것과 같은 치명적인 문제가 아니면 단층영상의 정밀도를 향상시키므로써 어느 정도 해결이 될 수 있는 것이라 볼 수 있는데, 본 논문에서는 이들과는 다른 각도에서 표면품질을 향상시키고자 한다.

마칭큐브에서 표면에 구멍이 생기는 크랙(crack) 문제는 기본적으로 입력 CT데이터가 주어졌을 때 추출되는 등밀도점(iso-density point)은 항상 매우 안정적이며 신뢰할 수 있는 정보인데 비하여 이를 연결하여 생성된 표면(iso-density surface)은 연결방식에 따라 신뢰도가 떨어질 수 있다는 것을 의미하며, 따라서 등밀도점의 추출과 메쉬의 생성을 분리하는 것이 좋은 방안이 될 수 있다는 것이 제안된 논문의 주요 아이디어가 된다.

일단 단층 영상에서 등밀도점을 먼저 추출하고 이들을 근사하는 표면을 재구성하는 것은 정렬되지 않은 측정점(unorganized points)으로부터 표면을 재구성하는 문제와 유사해진다[9-12]. 이 문제는 측정점들 사이에 거리영상이나 등고선등에서 주어지는 인접성 정보가 전혀 존재하지 않기 때문에 일반적으로 해결하기가 어렵고, 표면의 변화가 많은 부분에서 효과적인 모델링 결과가 나오기 어렵다. 이 문제에 대한 최초의 해결책이 Hoppe[9]에 의해 소개되었으며, 최근의 제시된 방법들 중 하나가 이 측정점들로부터 비교적 조악한(coarse) 초기메쉬를 먼저 구한 후 이를 축소포장 알고리즘(shrink-wrapping algorithm)을 이용하여 정밀하게 변형하는 방법[12]인데, 기존방법에 비해 상대적으로 좋은 결과를 보여주고 있다. 그렇지만 이 방법에서도 초기메쉬의 형

태에 따라 원래는 떨어져있는 가까운 표면이 붙게 된다. 단지 표면에 구멍이 생기는 등의 문제점은 여전히 존재하는데, 이러한 초기메쉬 정의의 문제는 정렬되지 않은 측정점으로부터의 표면 재구성에서는 어떤 방법을 사용하더라도 피할 수 없는 근본적인 문제점이다.

그러나 본 논문에서 해결하고자 하는 문제에서는 이것을 해결할 수 있다. 즉, 제안된 방법은 기본적으로는 등밀도점을 먼저 추출하는 방식이지만, 이와 함께 여전히 단층 영상정보를 활용할 수 있다. 따라서 초기메쉬를 단층영상 정보를 통해 모호성이 없이 안정되게 추출할 수만 있으면 앞의 문제가 해결이 되며, 이후에 축소포장 알고리즘을 적용하여 이 메쉬를 앞서 추출한 등밀도점을 충분히 근사할 수 있도록 변형할 수 있게 된다. 이러한 초기메쉬의 생성 방법으로는 셀경계 표현방식을 사용하였는데, 4장에서 이것을 사용한 이유와 방법을 자세히 설명한다.

등밀도점을 먼저 추출하는 방식이 마칭큐브에 비해 우월한 또 하나의 이유는, 마칭큐브에서 사용되는 등밀도점을 일반화할 수 있다는 것이다. 앞서 설명한바와 같이 마칭큐브에서는 등밀도점을 두 복셀이 면으로 인접한 경우에 대해서만 추출하게 된다. 그러나 인접성을 일반화시키면 변(edge) 및 정점(vertex)으로 인접하는 복셀사이에서도 등밀도점을 추출할 수 있으며, 표면 재구성에 보다 많은 등밀도정보를 활용할 수 있다는 측면에서 마칭큐브에 비해 이론적으로 더 정밀한 표면을 생성할 수 있게 된다. 이러한 등밀도점의 추출에 대해서는 3장에서 자세히 설명한다.

등밀도점과 초기메쉬가 만들어지면 이어지는 표면의 축소포장단계는 기존에 비정렬된 데이터에서부터 표면을 재구성하는 방법에서와 동일한 방법이 적용된다. 그러나 이때에도 입력 단층영상의 복셀정보를 이용하여 최단거리의 등밀도면을 찾는 과정을 전역탐색이 아닌 지역탐색으로 처리할 수 있게 되고, 이에 따라 처리시간을 단축할 수 있다. 이러한 표면 축소포장에 대해서는 5장에서 자세히 설명한다.

3. 등밀도점(Iso-density point)의 추출

Herman과 Lieu[1]는 3차원 공간을 서로 직교하는 3가지 방향(예를 들면 x, y 및 z축 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, 즉 일반적인 복셀로 가정되어지는 정육면체나, 직육면체, 또는 일반적

이지는 않지만 단층영상이 육각 화소로 이루어지는 경우, 복셀은 육각기둥의 형태가 된다. Udupa는 3차원 공간이 큐브형태의 복셀들로 분할되어 있다고 가정하고, 이러한 복셀들로 이루어진 큐베릴 공간에서 상을 다음과 같이 정의한다[3].

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.

CT나 MRI를 이용해 촬영한 단층촬영 영상들의 경우 이들 영상이 일정한 두께(화소크기)를 갖는다고 생각하고 인접한 영상들을 순서대로 쌓으면 하나의 큐베릴 공간을 구성할 수 있으며, 이때 영상의 한 화소는 큐베릴 공간상의 하나의 복셀이 된다.

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 영역 분할한 결과인데, 의료영상의 영역분할에는 여러 가지 방법이 제안되고 있다[13]. 가장 간단한 방법이 복셀들을 임의의 문턱 밀도로 이진화하는 것이다. 이 경우 영역분할 함수 g 는 다음과 같다.

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

이때 T_d 는 이진화를 위한 밀도의 임계값이다.

임의의 이진 상에서 각각의 복셀들은 물체 내부에 포함되는 *내부 복셀* v^1 과, 그 외의 영역, 즉 외부에 해당하는 *외부 복셀* v^0 로 나뉘어지게 되는데 이들은 다음과 같이 정의된다.

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

$$v^1 \in U_s(V) = \{v \in V \mid g_s(v) = 1\}$$

일반적으로 상에서 모델링하여 분석하거나 가시화하고자 하는 부분이 내부 복셀의 집합 $U_s(V)$ 이 되며, $N_s(V)$ 는 빈 공간을 표현하게 된다. 임의의 복셀 v 의 이웃복셀 $n(v)$ 는 인접성의 종류에 따라 세 가지 방법으로 정의될 수 있다. 먼저 면으로 인접하고 있는 경우를 $O(1)$ -인접(adjacency)이라 하며, 이 경우 그림 2의 (a)에서와 같이 점선으로 표시된 중앙 복셀(점선)과 $O(1)$ -인접한 여섯 개의 이웃이 정의된다. 이러한 인접성은 면(face) 뿐만이 아니라 변(edge), 또는 꼭지점(vertex)을 공유하는 경우까지도 확장할 수 있으며, 이들을 각각 $O(2)$ -인접 및 $O(3)$ -인접라 한다. 그림 1의 (b)는 $O(3)$ -인접의 예를 보여주고 있는데, 이웃 복셀의 수가 26개가 된다. $O(2)$ -인접은 면과 변이 연결된 것들만을 이웃복

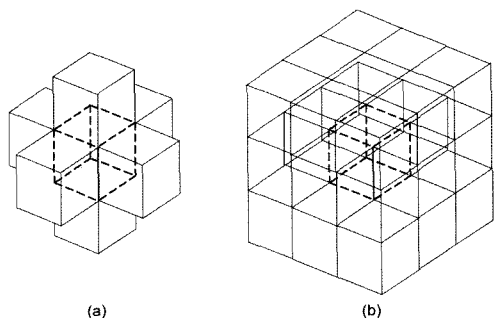


그림 1 (a) O(1)-adjacency, (b) O(3)-adjacency

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

셀로 생각하는 방법으로 이 경우는 하나의 복셀에 대해 18개의 이웃이 존재한다. 이러한 이웃의 정의를 바탕으로 경계 복셀(boundary voxel) B 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

단층영상으로 주어진 큐베릴 공간 V 에서의 하나의 상 V 가 주어졌을 때 밀도가 T_d 인 점들을 추출하고자 한다. V 상에서 밀도가 T_d 인 점들은 이 밀도로 영역화한 이진상 $\mathbf{V}_s = (g_s, V)$ 의 내부 복셀 v^1 과 외부 복셀 v^0 사이에서 추출할 수 있다. 즉, 주어진 데이터가 복셀의 형태로 샘플링되어 있으므로 정확히 밀도가 T_d 인 점들의 위치는 이웃하여 나타나는 v^1 과 v^0 사이에서 이들 복셀의 밀도를 선형적으로 보간하여 다음과 같이 정의한다.

정의 3. 등밀도 점(Iso-density point, 또는 Isopoint)

임의의 상 V 을 이진화 임계값 T_d 로 영역화 한 이진상 \mathbf{V}_s 내에 인접한 한 쌍의 내부 및 외부복셀 (v^0, v^1)이 있다고 하자. 이들 사이에서 등밀도점(Iso-density point, 또는 Isopoint)은 $p_{T_d}(v^0, v^1)$ 로 표기하며, 다음과 같이 정의한다.

$$p_{T_d}(v^0, v^1) = p(v^0) + (p(v^1) - p(v^0)) \frac{T_d - g(v^0)}{g(v^1) - g(v^0)}$$

이때 $p(v)$ 는 복셀 v 의 중심의 좌표를 나타내고, $g(v)$ 는 v 의 밀도를 나타낸다.

임의의 복셀에 대해 이러한 등밀도점은 인접성의 정의에 다르게 나타나게 되는데, 인접성에 따른 등밀도 점 모델(Iso-density point model)은 다음과 같이 정의한다.

정의 4. 등밀도 점 모델(Iso-density point model, 또는 isopoint model)

큐베릴 공간 V 에서의 임의의 상 V 에 대한 등밀도 점 모델(Iso-density point model) $P_{iso}(T_d)$ 는 이진화 임계값 T_d 로 영역화 한 이진상 \mathbf{V}_s 내의 모든 $p_{T_d}(v^0, v^1)$ 의 집합으로 정의한다. 이때, 복셀의 인접성 정도에 따

라 O(1), O(2) 및 O(3)-인접 등밀도 점 모델로 정의된다.

예를 들어, 인접성으로 O(1)-인접을 사용할 경우 하나의 복셀과 관련된 등밀도점의 최대 개수는 6개이다. 그러나 O(2)를 사용하는 경우는 면 및 변과 인접하는 복셀을 이웃으로 고려하므로, 최대 18개의 등밀도점이 발생할 수 있으며, O(3)를 사용하는 경우 최대 26개의 등밀도점이 발생하게 된다. (이것은 그림 1에서와 같이 하나의 복셀이 내부(또는 외부) 복셀이고, 그 이웃이 모두 외부(내부) 복셀인 경우임)

이러한 개념을 마칭큐브 알고리즘에 적용하면, 마칭큐브에서 발생하는 모든 표면조각의 정점들은 O(1)-인접의 등밀도 점 모델상에서만 이루어진다. 즉 인접한 두 복셀이 면으로 만나는 경우에만 등밀도점이 생성되며 이들만을 표면조각 생성에 사용하는 것이다. 이에 비해 제안된 방법에서는 이를 확장하여 변으로 인접하거나 O(2) 꼭지점으로 인접하는(O(3)) 두 복셀간에서도 등밀도점을 추출하여 표면재구성에 사용할 수 있다. 이렇게 할 경우 표면재구성에 사용되는 기준점(등밀도점)의 수가 마칭큐브에 비해 많아지고, 따라서 마칭큐브에 비해 보다 정확한 표면을 만들 수 있는 이론적 근거를 제공하고 있다.

4. 초기 메쉬의 생성

제안된 표면 재구성 알고리즘은 기본적으로 재구성하고자 하는 표면의 조악한 근사표면인 초기메쉬를 생성하고 이를 등밀도점 모델의 방향으로 축소포장(Shrink-wrapping) 하는 것을 기본 아이디어로 한다. 이 장에서는 먼저 축소포장을 위한 초기메쉬를 만드는 방법을 제안한다.

단층영상으로 주어진 큐베릴 공간의 임의의 상 V 에 대한 등밀도 점 모델(Iso-density point model) $P_{iso}(T_d)$ 이 주어졌다고 하자. 표면 재구성을 위한 초기 메쉬 M^I 는 V 에 내재되어 있는 이상적인 등밀도면 M^{Iso} 을 근사할 수 있어야 한다. 이러한 초기메쉬를 구하기 위하여 여러 가지 알고리즘을 적용할 수 있으나 고찰을 통해 다음과 같은 특성이 필요하다는 것을 발견하였다.

- 안정성(Robustness): 어떠한 입력이 들어오더라도 표면조각의 정의에서 모호성이 없이 항상 안정된 결과를 낼 수 있어야 하며, 표면의 크랙이 발생하지 않아야 한다.
- 유일성(Uniqueness): 같은 입력 데이터에 대해서는 항상 동일한 메쉬를 만들 수 있는 유일성이 보장되어야 한다.
- 근사성(Approximation): 초기메쉬가 너무 자세한 표면을 만들 필요는 없으나 실제표면을 어느 정도 잘 근

사하여야 한다. 즉, 표면의 축소포장과정에서 전역탐색을 피하고 지역탐색만으로 처리가 될 수 있는 수준 이상으로는 근사할 수 있어야 한다.

- 단순성(Simplicity): 표면조각의 수가 지나치게 많이 발생하지 않아야 한다. (마칭큐브 알고리즘 이하)

이러한 고찰을 근거로 본 논문에서는 기존에 제안한 바 있었던 셀경계 알고리즘을 초기메쉬 생성방법으로 사용하였다[3]. 이 방법은 어떠한 입력에 대해서도 안정적이며 유일한 표면을 만드는데, 특히 마칭큐브에서 발생하는 표면 정의상의 모호성이나 크랙이 발생하지 않는다. 또한 볼륨데이터의 등밀도면을 잘 근사하는 메쉬를 만들어 주고 표면 축소포장에서 지역탐색을 가능하게 하며, 표면조각의 개수도 마칭큐브보다 훨씬 적게 발생시킨다.

셀경계 알고리즘은 3차원 큐베릴 공간 V 가 주어졌을 때, 먼저 이를 변환한 공간인 셀 공간 C 로 변환하고 이 공간상의 셀들을 기반으로 표면을 생성하는 방법으로 마칭큐브 알고리즘과 기본 접근방법이 동일하다. 그림 2에서와 같이 셀 공간 C 는 정육면체 형태의 셀(cell)의 무한한 집합으로 생각할 수 있으며, 정육면체의 8개의 꼭지점은 각각 큐베릴 공간상의 인접한 복셀들(지지복셀, supporting voxel)로 대응된다. 이렇게 이론적으로 정의된 가상의 공간인 셀 공간은 큐베릴 공간의 하나의 변환 공간, 또는 이동 공간이라고 생각할 수 있다. 이러한 셀 공간상에서 가상 상(virtual scene)과 가상 이진 상(virtual binary scene)을 다음과 같이 정의할 수 있다.

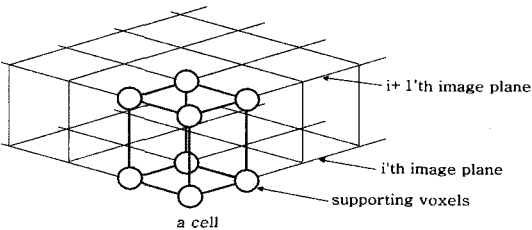


그림 2 3 차원 공간의 셀 공간 모델(cell space model)

정의 5. 가상 상(virtual scene)

셀 공간 C 의 하나의 사례 C 를 가상 상(virtual scene)이라 정의하고 (G, C) 로 표기한다. 이때 C 의 원소가 셀(cell)이며, $G(c)$ 는 셀 c 의 8개의 지지복셀의 밀도 구성이라 한다.

정의 6. 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.

큐베릴 공간상의 어떠한 상에 대해서도 변환공간인 셀 공간상에서 대응하는 가상 상이 항상 존재하며, 이것은 이진상에 대해서도 마찬가지이다. 모든 셀 c 는 여덟개의 지지복셀 $n_s(c)$ 로 구성되는데 그림 2에서 볼 수 있듯이 각각의 복셀은 셀에서 하나의 꼭지점이 된다. 공간을 가상으로 분할하는 임의의 셀의 8개의 지지복셀중 최소한 하나 이상의 v^1 과 하나 이상의 v^0 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, 셀 경계표현은 다음과 같이 정의된다.

정의 7. 셀 경계 표현(cellboundary representation)

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

셀 경계표현에서는 이러한 지지복셀의 인코딩 함수 Δ 에 따라 경계셀을 체적형, 표면형 및 선형의 세 가지 그룹으로 분류하고, 체적형 및 표면형 경계셀들에서 표면을 추출하게 되는데 생성되는 표면의 형태는 다음 그림 3과 같으며, 셀경계표현 표면추출 알고리즘은 그림 4와 같다.

단층영상이 주어지면 이러한 셀경계 알고리즘으로 초기메쉬 M^i 를 생성한다. 이 메쉬의 정점들은 서브복셀 연산을 하지 않으므로 항상 복셀 중심이고, 따라서 마칭큐브에 비해 다소 정밀하지 않은 표면 근사표면이라 할 수 있다. 그러나 마칭큐브와는 달리 표면 정의의 모호성이 전혀 없어 알고리즘이 매우 안정적으로 동작한다. 또한 동일한 입력에 대해 메쉬 표면의 유일성이 보장되고, 마칭큐브에서 발생하는 표면의 크랙이 전혀 발생하지 않는다. 또 셀경계표현에서의 각 메쉬정점들은 항상 하나의 셀 크기 이내의 거리에 하나 이상의 등밀도점이 존재할 수 밖에 없는데, 이러한 특징은 축소포장과정에서 각 메쉬정점에 대해 최단거리의 등밀도점을 찾는 과정을 지역탐색으로 가능하게 한다. 마지막으로 이 방식에 의한 표면조각의 개수도 마칭큐브에 비해 훨씬 적어서 앞에서 고찰해 본 초기메쉬의 바람직한 특징을 매우 잘 만족시키며, 이어지는 축소포장과정을 위한 좋은 초기메쉬가 된다.

5. 표면 축소포장을 통한 등밀도면 근사

주어진 단층영상과 밀도 임계값(density threshold)

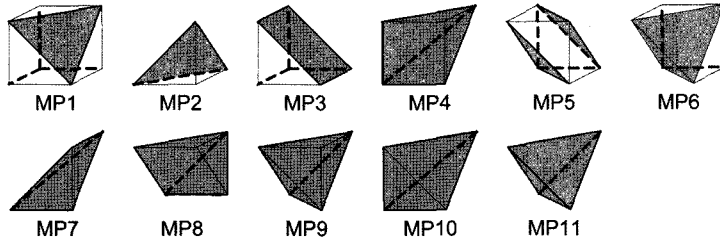


그림 3 셀경계 표현의 표면 생성 종류

```

Procedure GenCBoundary
Input: 2 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 4 셀 경계 표현 추출 알고리즘

Td에 대해 3절과 4절에서 제안한 방법으로 등밀도 점 모델(Iso-density point model) $P_{iso}(T_d)$ 와 이를 근사하는 초기메쉬 M^f 를 구했다고 하자. 마지막으로 처리해야 할 단계는 M^f 의 정점들을 움직여 이 메쉬가 $P_{iso}(T_d)$ 를 보다 잘 근사할 수 있도록 처리하는 과정이다. 이러한 처리 과정은 기존의 방법들[10-12]과 유사하며, 연속적인 축소와 평활화 과정이 수행되는데, 이러한 과정을 통해 $P_{iso}(T_d)$ 로 샘플링 된 원래의 등밀도면에 보다 가까워지도록 변형된다.

5.1 메쉬 정점의 축소 (shrinking process)

초기 메쉬 M^f 가 구해지면 먼저 축소과정이 수행되는데, 이는 메쉬의 각 정점들을 $P_{iso}(T_d)$ 내의 등밀도점들의 방향으로 이동시키는 과정이다. 즉, 초기 메쉬 M^f 를 구성하는 각 정점 q_i 에 대해 $P_{iso}(T_d)$ 내의 모든 등밀도점까지의 거리를 계산하여 가장 가까운 점을 찾고 그 방향으로 정점을 이동시킨다. 이 때, 기존의 정렬되지 않은 정점들을 이용한 표면재구성 방법에서는 초기메쉬의 정점과 측정점과의 관계가 전혀 없으므로 모든 측정점까지의 거리를 계산하여 최단거리 측정점을 찾아야 한다. 그러나 제안된 방법은 단층영상에 대한 것이고, 초기메쉬의 어떠한 정점도 $P_{iso}(T_d)$ 상의 정점과 하나의 셀 크기 이내의 거리에 있게 되므로 지역탐색만으로 가

능하다. 즉 q_i 가 포함된 셀과 이와 O(3)로 인접하는 26개의 이웃셀(면으로 인접하는 6개의 셀과, 변으로 인접하는 12개의 셀, 그리고 꼭지점으로 인접하는 8개의 셀) 내에 있는 등밀도점들과의 거리만을 계산하면 된다. 이들 27개의 셀들 안에 최소한 하나 이상의 등밀도점이 반드시 존재하며, 이렇게 추출한 측정점이 $P_{iso}(T_d)$ 에서 전역탐색으로 구한 최단거리 측정점과 항상 동일하기 때문이다.

최단 거리의 측정점이 결정되면 메쉬의 정점을 그 방향으로 이동하는데 이것은 초기 메쉬 M^f 를 축소시켜 $P_{iso}(T_d)$ 로 표현되는 등밀도면(iso-surface)과 보다 근사해 지도록 하게 된다. 메쉬 정점의 이동은 원래 메쉬의 정점과 최단 등밀도점간의 선분상의 임의의 위치로 옮겨지게 된다. 이동할 메쉬의 정점을 q_i 라고 하고 이 정점의 최단 등밀도점을 $p_{nearest}$ 라고 하면, 메쉬 정점의 이동은 다음과 같이 이루어진다.

$$q_i \leftarrow q_i + \alpha(p_{nearest} - q_i)$$

이때, 계수 α 는 이동의 정도를 나타내며 0에서 1사이의 값을 갖는다. 이 값이 1이면 메쉬 정점을 바로 $p_{nearest}$ 으로 옮기는 것을 의미하는데, 이것은 같은 등밀도점에 여러 개의 메쉬 정점이 모이게 될 수 있으므로 적절하지 않다. 또한 이 값이 너무 작으면 초기 메쉬가

등밀도점으로 수렴해 가는 속도가 느려져 처리시간이 많이 걸릴 수 있다는 단점이 있다. 보통 이 값은 0.5 정도를 사용하게 된다.

5.2 메쉬 평활화(smoothing process)

메쉬 정점의 축소과정에서 적당한 α 값을 사용 하더라도 비교적 등밀도점이 적게 분포되어 있는 부분에서는 하나의 측정점 방향으로 여러 개의 메쉬 정점들이 몰리게 되는 현상이 발생할 수 있다. 예를 들어 그림 5의 경우 정점 q_i 가 q_{nbr3} 과 q_{nbr4} 보다는 q_{nbr1} 과 q_{nbr2} 쪽으로 더 가깝게 치우쳐 있는데, 이러한 정점들이 한쪽으로 쏠리는 현상은 전체 표면의 품질을 떨어뜨리게 된다. 복잡한 표면에 많은 정점들이 사용되는 것은 의미가 있지만 일반적으로 복잡도가 비슷한 표면의 경우에는 전체 표면에 대해 골고루 메쉬의 정점들이 분포하는 것이 더 바람직하다. 따라서 이러한 메쉬 정점들이 국부적으로 하나의 등밀도점들로 편중시키는 결과를 완화시키기 위하여 메쉬 평활화 과정이 수행된다.

메쉬 평활화 과정은 축소된 각 정점의 위치를 이 정점과 이웃하는 정점들의 위치를 평균하여 가능한 한 이웃 정점들의 중앙부로 이동시키는 방향으로 진행된다. 임의의 메쉬 정점 q_i 에 대해서, 먼저 이 정점과 이웃하는 n 개(그림 5의 경우 4개)의 이웃 정점 $q_{nbr1}, q_{nbr2}, q_{nbr3}, q_{nbr4}$ 를 구하고 이들의 중심까지의 벡터 v_{mid} 를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$v_{mid} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (q_{nbrj} - q_i)$$

메쉬 정점 q_i 를 이동벡터 v_{mid} 만큼 단순하게 이동하는 것은 정점들의 평활화는 되지만 표면의 축소 현상을 일으키게 된다. 즉 평활화 과정이 처리될 때 마다 전체 물체의 크기가 점점 줄어드는 문제점을 일으키게 된다. 따라서 이러한 정점의 이동은 표면의 접선 방향으로만 발생하도록 최종 이동 벡터 u 를 다음과 같이 구하고, 메쉬 정점 q_i 를 다음과 같이 평활화 한다.

$$u = v_{mid} - (v_{mid} \cdot n)n$$

$$q_i \leftarrow q_i + \lambda u$$

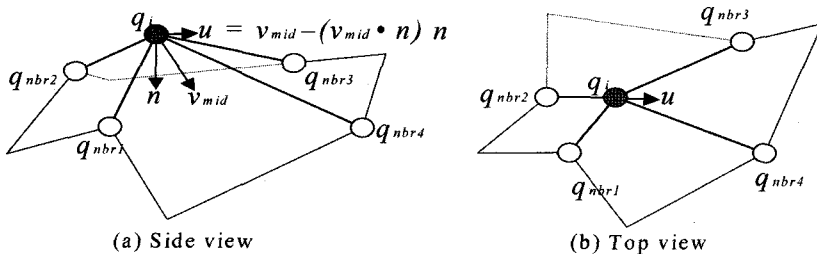


그림 5 메쉬 정점의 평활화 방법의 예

이때 n 은 메쉬 정점 q_i 의 법선 벡터로 4개의 인접 정점들에 의해 구해지는 삼각 표면의 법선벡터를 이용해 구해지며, λ 는 평활화의 정도(0~1)를 나타내는데, 이 값이 크면 보다 더 평활화 된 결과는 얻을 수 있으나 움푹 들어간 부분이나 튀어나온 부분의 모델링이 부자연스러워 질 수 있고, 이 값이 너무 작으면 평활화의 효과가 줄어들게 된다. 보통 이 값은 0.2~0.4 정도로 사용한다[11,12]. 이러한 방법으로 축소된 메쉬를 평활화 함으로써 국부적으로 메쉬 정점들이 하나의 측정점에 몰리게 되는 현상을 크게 완화시킬 수 있다.

5.3 메쉬 축소 및 평활화의 반복과 삼각형 표면조각의 생성

이와 같은 축소 과정과 메쉬 평활화 과정을 반복하면 초기 메쉬 M' 가 등밀도 점모델로 대표되는 실제 등밀도표면과 점점 더 가까워지도록 변형된다. 반복 회수는 미리 지정할 수도 있고, 축소와 평활화를 통해 메쉬정점이 움직이는 거리를 이용하여 반복하더라도 메쉬의 변화가 거의 없는 정도를 임계값으로 하여 자동으로 종료할 수도 있다. 실험 결과 일반적으로 3~4회 이상만 반복하더라도 충분히 등밀도점에 수렴되는 것을 알 수 있었다.

앞에서 설명한 셀계방식의 초기메쉬에서 각 표면조각의 형태는 그림 3의 MP3에서와 같이 사각형이 될 수도 있다. 따라서 최종적인 표면 모델을 만들기 위해서는 사각형 형태의 각 면들을 삼각형 표면조각으로 분할하여야 한다. 본 논문에서는 대각선의 길이를 사용하였는데, 사각형의 경우 대각선의 길이가 짧은 방향으로 에지를 추가하여 두개의 삼각형 표면조각으로 분할하게 된다. 결과적으로 초기메쉬는 등밀도점 모델의 표면공간을 잘 근사하는 등밀도면으로 변환된다.

6. 실험

제안된 방법은 Windows-XP 운영체제하의 PC에서 구현되었는데, 모델링 알고리즘은 C++ 언어를 이용하여 작성하였으며, 렌더링을 위해 OpenGL과 MFC를 이용해서 GUI를 작성하였다. 그림 6은 입력 단층영상이며,

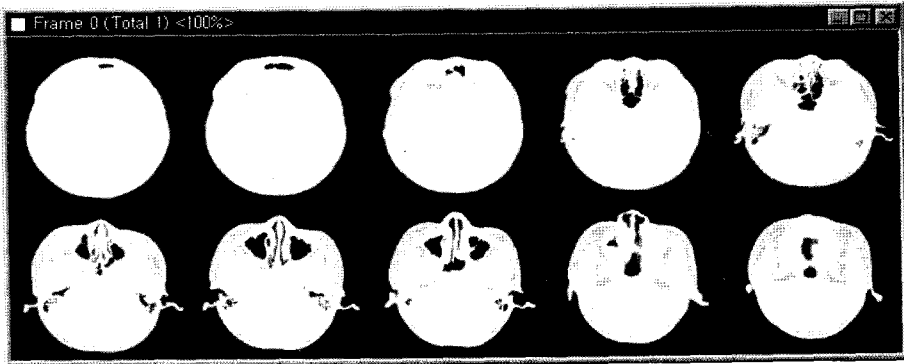


그림 6 Human head (총 30장 중 10장)

그림 7의 위 영상은 제안된 방법으로 추출한 등밀도점 모델을 보여주고 있고(O(3)-인접), 아래 영상은 입력영상에 셀계표현을 적용해 추출한 초기 메쉬를 렌더링하고 있다. 그림 8은 초기메쉬에 축소포장과정을 반복적으로 적용한 결과를 보여주고 있는데, 4번 정도의 반복만으로도 표면이 거의 수렴함을 알 수 있다. 이때 사용된 표면축소와 평활화의 계수는 각각 $\alpha=0.5$, $\lambda=0.3$ 로 설정하였다. 그림 9는 제안된 방법에 의한 최종 표면모델(wireframe(상), smooth shading(하))을 보여주고 있는데, 표면의 크랙이 없이 매우 안정적인 표면을 추출하였다. 이 결과를 그림 10의 마칭큐브와 비교해 보면 마칭큐브에서 발생하는 크랙(그림 10에서의 귀부분 등)이 전혀 발생하지 않으며, 마칭큐브 알고리즘에서 여전히 남아있는 완만한 곡면부의 계단현상(jagged surface)도 거의 나타나지 않음을 알 수 있다. 표 1은 Head 데이터에 대한 실험결과를 마칭큐브 알고리즘과 비교하여 정리하였는데 40%정도 적은 표면조각으로 훨씬 자연스럽게 안정적인 표면을 만들어낸다. 실험을 통해 제안된 방

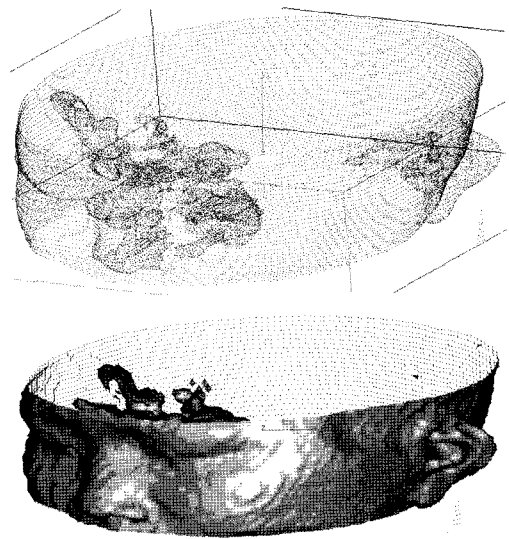


그림 7 O(3)-인접으로 추출된 등밀도점모델(상)와 셀계방식의 초기메쉬(하)

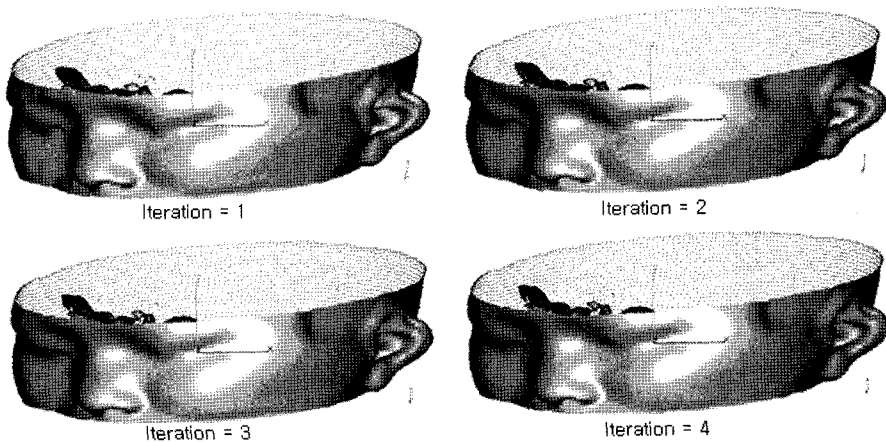


그림 8 초기메쉬의 축소포장 과정

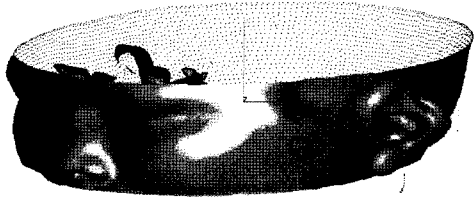
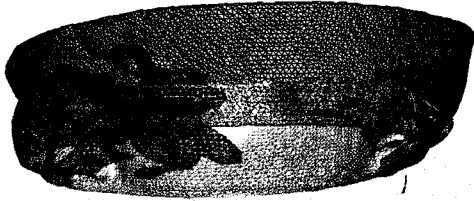


그림 9 최종 표면 재구성 결과메쉬(상) 및 렌더링 결과(하)

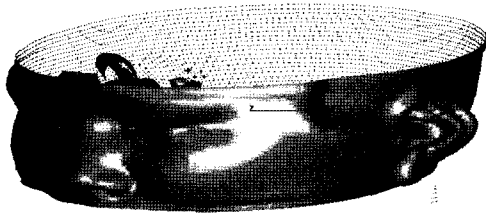


그림 10 마칭큐브의 재구성 결과(표면의 크랙발생)

법이 단층영상에서부터 등밀도면을 재구성하는 새로운 방법으로, 크랙이나 표면결정의 모호성이 없이 단층 영상으로부터 보다 정확한 등밀도 표면을 재구성 할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

표 1 Head 데이터에 대한 표면 재구성 결과

Head Data (30 Frames)	제한된 방법			마칭큐브
	인접성	O(3)	O(1)	O(1)
	정점의 개수	16,345	28,430	28,430
	표면조각수	32,259	55,536	55,536

7. 결론

본 논문에서는 단층촬영 영상으로부터 임의의 등밀도 표면을 재구성하기 위한 새로운 방법을 제안하였다. 이 방법에서는 마칭큐브에서와는 달리 단층영상에서 직접 표면을 생성하지 않고, 먼저 등밀도점을 추출하고 셀경계 알고리즘을 이용하여 구한 초기메쉬를 표면축소포장(Shrink-wrapping) 알고리즘 처리를 반복적으로 적용하여 등밀도 표면을 추출하였다. 이렇게 함으로써 마칭큐브에서 나타나는 크랙이나 표면결정의 모호성이 발생하지 않고 안정적인 표면을 재구성 할 수 있었다. 또한, 마칭큐브에서는 O(1)-인접한 등밀도점만을 사용하는데 비해, 제안된 방법은 O(2) 및 O(3)-인접한 등밀도점을

표면재구성에 활용할 수 있게 함으로써 이론적으로 마칭큐브 알고리즘보다 더 정밀한 표면을 추출할 수 있도록 하였다. 마지막으로 실험을 통해 제안된 실제 데이터에 잘 적용됨을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] Herman, G. and Liu, H., "Three-dimensional display of human organs from computed tomograms," Computer Graphics and Image Processing, vol. 9, pp. 1-21, 1979.
- [2] Lorensen, W. and Cline, H., "Marching cubes: a high resolution 3-d surface construction algorithm," Comput. Graph., vol. 21, no. 4, pp. 163-169, 1987.
- [3] 최영규, 이의택, "의료영상 가시화를 위한 셀 경계 방식 체적 재구성 방법," 정보과학회논문지 27권, 3호, pp. 235-244, 2000년 3월
- [4] Du`rst, M., "Letters: Additional Reference to Marching Cubes," Computer Graphics, vol. 22, no. 2, pp. 72-73, 1988.
- [5] Nielson, G. and Hamann, B., "The Asymptotic Decider: Resolving the Ambiguity in Marching Cubes," Proc. IEEE Visualization '92, pp. 83-91, 1992.
- [6] Natarajan, B., "On Generating Topologically Consistent Isosurfaces from Uniform Samples," The Visual Computer, vol. 11, pp. 52-62, 1994.
- [7] Chernyaev, E., "Marching Cubes 33: Construction of Topologically Correct Isosurfaces," Technical Report CN/95-17, CERN, 1995, <http://wwwinfo.cern.ch/asdoc/psdir/mc.ps.gz>.
- [8] Lopes, A. and Brodlie, K., "Improving the Robustness and Accuracy of the Marching Cubes Algorithm for Isosurfacing," IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics, Vol. 9, No. 1, January-March 2003.
- [9] Hoppe, H., DeRose, T., Duchamp, T., McDonald, J., and Stuetzle, W., "Surface reconstruction from unorganized points," In Computer Graphics (SIGGRAPH '92 Proceedings), pp. 71-78, July 1992.
- [10] Kobbelt, L., Vorsatz, J., Labsik, U., and Seidel, H., "A shrink wrapping approach to remeshing polygonal surfaces," In Computer Graphics Forum, Proceedings of Eurographics '99, volume 18, 3, pp. 119-129, September 1999.
- [11] Jeong, W. and Kim, C., "Direct Reconstruction of Displaced Subdivision Surface from Unorganized Points," Graphical Models, vol. 64, issue 2, Mar. 2002, pp. 78-93.
- [12] Koo, B., Choi, Y., "Shrink-Wrapped boundary face algorithm for mesh reconstruction from unorganized points," ETRI Journal, Vol 27, No. 2, pp. 235-238, April 2005.
- [13] 김명희, 남상아, 홍헬렌, "의료영상의 3차원 가시화기

술 및 발전 방향,” 정보과학회지, 16권, 12호, pp. 13-21,
1998년 12월



박 은 진

1987년 3월~1991년 2월 단국대학교 전자계산학과(학사). 2002년 3월~2004년 2월 한국기술교육대학교 전기전자공학과(석사). 2004년 3월~현재 한국기술교육대학교 전기전자공학과 박사과정. 1990년 12월~1998년 7월 한라공조, 쌍용자동차 쌍용정보통신 연구원. 2001년~현재 삼성멀티캠퍼스 강사. 관심분야는 컴퓨터그래픽스, 영상기반모델링, 가상현실 저작 도구 등



최 영 규

1985년 3월~1989년 2월 경북대학교 전자공학과(학사). 1989년 3월~1991년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과(석사). 1991년 3월~1995년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과(박사). 1995년 3월~1999년 2월 LG산전연구소 영상연구실 선임연구원. 1999년 3월~현재 한국기술교육대학교 정보기술공학부 부교수. 관심분야는 컴퓨터그래픽스, Visualization, 가상현실, 영상인식 등