

# 구면 좌표계의 특성을 이용한 듀얼 컨투어링 기법 개선

김종현<sup>0</sup>      박태정      김창헌

고려대학교 컴퓨터전파통신학과

{gogogosc@korea.ac.kr, taejung.park@gmail.com, chkim@korea.ac.kr}

## Enhanced Dual Contouring method by using the Feature of Spherical Coordinate System

Jong-hyun Kim<sup>0</sup>      Tae-jung Park      Chang-hun Kim

Korea University

### 요 약

본 논문에서는 일반적으로 직교 좌표계에서 구현되는 듀얼 컨투어링을 구면 좌표계에서 구현하고 그 특성들을 살펴 본다. 듀얼 컨투어링을 구면 좌표계에서 구현하기 위해서 먼저 팔진 트리(octree)를 구면 좌표계에서 정의 한다. 이렇게 정의된 구면 팔진 트리(spherical octree)를 기반으로 하는 듀얼 컨투어링 방식은 SDF(signed distance field) 등의 점진적 폴리곤화에서 직교 좌표계에서의 팔진 트리에 비해 동일한 트리 레벨에서 생성되는 버텍스(vertex) 갯수가 줄어드는 특징을 가진다. 특히 구면에 가까운 모델의 경우 압축 등 이용 가능한 정보가 제한적인 애플리케이션에서 직교 좌표계 보다 세밀하고 부드러운 곡면을 얻을 수 있는 장점이 있다.

### Abstract

The Dual Contouring method has an advantage over the primal polygonization methods like the Marching Cube method in terms of better expression of sharp features. In this paper, the Dual Contouring method is implemented in Spherical coordinates, not the Cartesian ones to examine some characteristics. For this purpose, our octree is defined in Spherical coordinates, which is called "S-Octree". Among some characteristics, the proposed Dual Contouring method in the S-Octree tends to produce less vertices at the same octree level. In particular, for any surface models close to surface sphere, the generated mesh surfaces are smoother and more detailed than those of the Cartesian Dual Contouring approach for specific applications including mesh compression where available geometric information is quite limited.

키워드: 듀얼 컨투어링, 마칭 큐브, 직교 팔진 트리, 구면 팔진 트리

Keywords: Dual Contouring, Marching cube, Cartesian Octree, Spherical Octree

# 1. 서론

음함수 표면(Implicit Surface)을 이용한 모델링 방식은 부피 데이터와 부드러운 곡면을 표현하기에 적합하다. 그러나 하드웨어 그래픽 파이프라인에서 음함수 표면을 표현하기 위해서는 폴리곤화 과정이 필수적이다. 이러한 특징으로 인해 음함수 표면을 표현하는 여러 가지 방법들이 연구, 개발되어 왔다. 이러한 방식들 중 하나인 듀얼 컨투어링(dual contouring) 기법[8]은 마칭 큐브(marching cube) 방식[6]에 비해서 날카로운 특징(sharp feature)을 잘 나타낼 수 있는 장점을 가지고 있다.

그러나 기존 듀얼 컨투어링 방법이나 마칭 큐브 방법은 모두 직교 좌표계에서 음함수를 처리한다. 이 논문에서는 직교 좌표계가 아닌 구면 좌표계에서 듀얼 컨투어링 방법을 구현하고 그 특성을 살펴 본다.

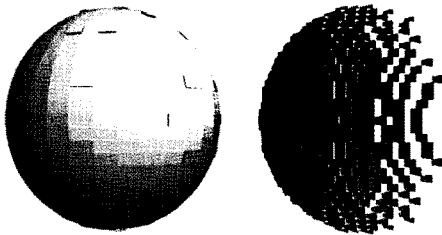


그림 1 : 구면 좌표계 듀얼 컨투어링 방법(왼쪽)과 직교 좌표계 듀얼 컨투어링 방법(오른쪽)

이 논문에서는 구면 좌표계에서 듀얼 컨투어링을 방법을 구현하기 위해서 먼저 팔진 트리(octree)를 구면 좌표계에서 정의한다. 그 후 이렇게 정의된 구면 팔진 트리(S-Octree 또는 spherical octree)를 기반으로 하는 듀얼 컨투어링 방식을 구현한다.

본 논문에서 이렇게 제안하는 폴리곤화 방식의 장점은 다음과 같다.

- 직교 좌표계에서의 듀얼 컨투어링 방법과 유사한 왜곡률을 유지하면서, 보다 적은 수의 버텍스(vertex) 갯수로 음함수를 메쉬로 표현.
- 점진적 압축 방식 등과 같이 이용 가능한 정보가 제한적인 애플리케이션에서 중간 단계 메쉬에서 보다 부드러운 곡면 및 세부 묘사 표현 가능.

본 연구에서 제안하는 방식을 비교 사례를 그림 1에서 제시하였다. 왼쪽은 본 연구에서 제안하는 구면 좌표계에서

구를 메쉬로 표현한 그림이고 오른쪽은 기존 직교 좌표계에서의 결과를 표현하고 있다. 이러한 그림은 특징적으로 점진적 압축(progressive compression)과 같이 메쉬 표현을 위해 충분한 데이터가 주어지지 않는 경우(즉, 이 경우에는 팔진 트리의 말단 노드(leaf node) 정보만 이용 가능하며 말단 노드의 중심점으로 버텍스 좌표 지정)에 흔히 나타나는 결과이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 본 논문에서 제안하는 구면 좌표계 기반 듀얼 컨투어링 방식은 적은 기하 정보에도 불구하고 매끄러운 표면으로 나타나는 반면, 기존의 직교 좌표계 기반 듀얼 컨투어링에서는 매끄러운 표면임에도 계단 같은 모습으로 보인다.

# 2. 관련 연구

컴퓨터 그래픽스 분야에서 일반적으로 곡면을 나타내기 위해서 음함수 형태를 이용할 경우 다음과 같이 곡면을 정의한다.

$$f(x, y, z) = f(\mathbf{p}) = 0 \quad (1)$$

이 때 이 음함수  $f=0$ 을 만족시키는 점  $\mathbf{p}$  는 곡면 상에 위치한다. 음함수 곡면은 직선과의 교차 테스트에서 매개변수로 표현된 형태보다 더 간단하기 때문에 자주 사용된다. 음함수 곡면의 또 다른 장점은 CSG(constructive solid geometry) 알고리즘이 쉽게 적용될 수 있다는 것이다. 즉 음함수로 표현된 곡면들에 속하는 점들의 집합들에서 서로 간의 차집합이나 교집합, 합집합을 구하기가 쉽다. 또한 음함수간의 블렌딩(blend)이나 변형(deform)도 쉽게 표현할 수 있다.

음함수 곡면의 간단한 예는 반지름의 크기가 1인 단위 구이다. 단위 구는  $f(x, y, z) = x^2 + y^2 + z^2 - 1$ 이라는 음함수로 표현된다. 보다 일반적인 경우  $c$ 가 상수일 때  $f(x, y, z) = c$ 의 형태로 표현할 수도 있다.

이러한 음함수 곡면 표현 방식에서 법선 벡터는 그래디언트(gradient)로 표현된다.

$$\nabla f(x, y, z) = \left( \frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial f}{\partial z} \right) \quad (2)$$

음함수 곡면의 블렌딩은 블로비 모델링(bloby modeling)[1], 소프트 오브젝트(soft object), 혹은 메타볼(meta-ball)이라고 불리는 모델링 방법에서 유용하게 사용된다. 기본적으로 이 과정은 구나 타원 등과 같은 몇 개의 기본 요소들을 부드럽게 섞어서 복잡한 모양을 만드는 것이다. 각 구들은 원자를 나타내고, 이들을 섞어서 분자의 구조를 나타내는 모델을 얻을 수도 있다. 음함수 곡면의 블렌딩 과정은 다

음과 같은 식으로 표현 가능하다.

$$f(\mathbf{p}) = \sum_{i=0}^{n-1} h(r_i) \quad (3)$$

위 식에서  $n$ 개의 기본 요소(primitive)들이 있고, 각 기본 요소에 대해서 반지름  $r_i$ 가 주어진다.  $r_i$ 는 점  $\mathbf{p}$ 에서 구의 중심까지의 거리 또는 다른 방식으로 정의된 거리일 수 있다. 블렌딩 함수  $h$ 는  $i$ 번째 요소가 영향을 끼치는 범위를 나타낸다. 그러므로  $h(0) = 1$ 이고, 최대 영향 범위가  $R$ 이 라면,  $r > R$ 인  $r$ 에 대해서  $h(r) = 0$ 이다.

모든 음함수 곡면은 삼각형으로 이루어진 메쉬로 변환할 수 있다. 이러한 작업을 수행하기 위해서 제안된 알고리즘 [2, 3, 4, 5] 중에 가장 많이 알려진 것이 마칭 큐브(marching cube)[6]라고 할 수 있다.

마칭 큐브(Marching Cube) 방법은 William Lorensen과 Harvey E Cline에 의해 제안되었으며 3D 공간에서 메쉬 표면 정보를 추출하는 알고리즘이다. 이 알고리즘은 3차원 격자 배열을 전체 곡면에 걸쳐서 설정한다. 격자상의 각 점들은 음함수 곡면의 내부 또는 외부에 존재한다. 격자의 모양인 직육면체는 8개의 꼭지점을 가지므로 각 격자는 8개의 꼭지점들이 음함수 곡면의 내부나 외부에 존재하는지에 따라  $2^8 = 256$ 가지로 분류된다. 각 상황에 따라 격자마다 음함수 곡면의 표면을 나타내는 삼각형을 최대 4개까지 생성하게 된다. 그림 2는 마칭 큐브의 알고리즘에서 버텍스의 위치가 결정되는 조건을 표현한 것이다.

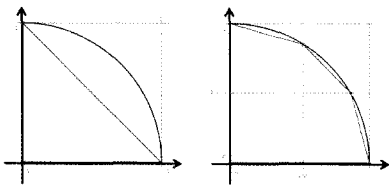


그림 2 : 마칭 큐브(Marching Cube) 방식

그러나 마칭 큐브 방법은 날카로운 부분(sharp feature)을 잘 표현하지 못하는 단점이 있다. 이러한 단점을 개선하기 위해 듀얼 버텍스(vertex) 및 에지(edge)와의 듀얼 관계를 가지는 듀얼 공간 격자 분할 방식들이 제안되었다. [7, 8, 9]

가장 널리 사용되는 듀얼 공간 분할 방식이 듀얼 컨투어링 방식(dual contouring) 이다.

듀얼 컨투어링(Dual Contouring) 방식은 격자 공간 내에서 버텍스의 위치를 결정하기 위해서 격자 내에서 2차 에러 함수(quadratic error function)를 이용한다.

2차 에러 함수는 다음과 같이 정의한다.

$$QEF(x) = \sum_i (n_i \cdot (x - p_i))^2 \quad (4)$$

이 때  $p_i$ 는 격자의 모서리선과 음함수 표면의 교차점의 위치이며,  $n_i$ 는 그 교차점에서의 법선 벡터이다.

따라서,  $n_i \cdot (x - p_i) = 0$ 을 만족하는 점  $x$ 의 위치는 점  $p_i$ 를 지나며 법선 벡터  $n_i$ 를 가지는 평면이며 따라서, 식 (4)를 최소화 하는 위치  $x$ 는 각 평면의 교차점임을 알 수 있다. 그림 3은 듀얼 컨투어링 알고리즘에서 버텍스의 위치가 결정되는 조건을 표현한 것이다.

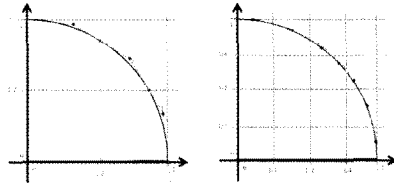


그림 3 : 듀얼 컨투어링(Dual Contouring) 방법

이 방식은 그리드의 에지 부분에서 버텍스를 생성하는 마칭 큐브와는 달리 셀 공간 내에 버텍스를 생성하기 때문에 마칭 큐브 방법에 비해 날카로운 부분을 잘 표현한다.

구형 좌표계 기반 듀얼 컨투어링 방식은 2차 에러 함수를 사용하지 않고, 셀의 중심값(Center of Mass)을 이용하여 음함수 표면을 메쉬화 하였다.

공간 분할(Spatial partitioning) 알고리즘은 수많은 객체들의 가시성 판단을 효율적으로 수행하기 위해, 매우 간단한 관점으로 보이지 않는 객체들을 가시 집합으로부터 제외시킬 수 있는 구조로 객체들을 조직화한다. 흔히 이러한 접근 방식을 공간 분할(Spatial partitioning) 이라고 한다.

펼친 트리(Octree)는 공간 분할 기법중 하나로, 전체 공간 또는 전체 공간 내 특정 영역에 속한 모든 기하 구조가 포함되는 바운딩 박스 B를 8개의 자식 노드로 분할한다. 그림 4(왼쪽)는 펼친 트리의 2차원 버전인 사진트리(Quadtree)로, 하나의 공간을 포함하는 한 영역에 적용된 예이다. 그림 4(오른쪽)는 펼친 트리의 노드를 나타낸 그림이다. 사진트리의 각 노드는 최대 4개의 하위 노드들을 가진다. 펼친 트리의 경우에는 최대 8개이다.

그림 4(왼쪽)에서 볼 수 있듯이, 문제 공간의 기하 구조(그림 4에서의 k)를 포함하지 않거나 교차하지 않는 노드는 분할되지 않으며, 어떠한 객체를 완전하게 담지 못하는 노

드는 트리에서 제거 된다.

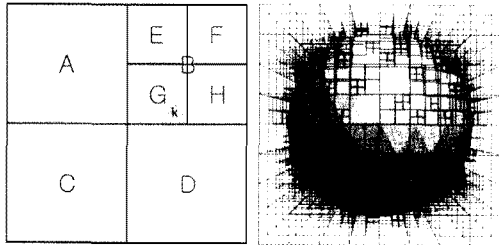


그림 4 : 팔진트리 구조

지금까지 언급한 연구들은 모두 직교 좌표계 상에서 음함수를 다룬다. 이와 달리 본 논문에서는 직교 좌표계가 아닌 구면 좌표계에서 팔진트리를 정의하고, 이렇게 정의된 팔진트리를 기반으로 듀얼 컨투어링 방법을 적용한다.

### 3. 구면 좌표계를 이용한 구면 팔진트리 및 듀얼 컨투어링

#### 3.1 구면 좌표계

구면 좌표계(Spherical coordinate system)는 3차원 공간 상의 점들을 나타내는 좌표계의 하나로, 보통  $(r, \theta, \phi)$ 로 나타낸다. 원점에서의 거리  $r$ 은 0부터  $\infty$ 까지, 양의 방향의  $z$ 축과 이루는 각도  $\theta$ 는 0부터  $\pi$ 까지,  $z$ 축을 축으로 양의 방향의  $x$ 축과 이루는 각도  $\phi$ 는 0부터  $2\pi$ 까지 범위가 지정된다. 즉,

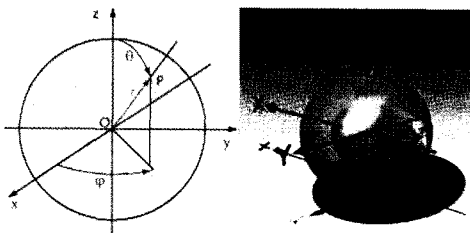


그림 5 : 2차원 구면 좌표계(왼쪽)와 3차원 구면 팔진트리의 구성(오른쪽)

그림 5에서 좌표  $(r, \theta, \phi)$ 는 다음과 같이 정의 된다. 주어

진 점을 P라고 하면

→  $r$  : 원점으로부터의 P까지의 거리,  $r \geq 0$

→  $\theta$  :  $z$ 축으로 양의 방향으로부터 원점과 P가 이루는 직선까지의 각,  $0 \leq \theta \leq \pi$

→  $\phi$  :  $x$ 축으로 양의 방향으로부터 원점 P가 이루는 직선을  $xy$ 평면에 투영시킨 직선까지의 각,  $0 \leq \phi \leq 2\pi$

직교 좌표계와 구면 좌표계의 변환 식은 다음과 같다.

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \theta = \arccos \frac{z}{r}, \phi = \arctan \frac{y}{x}$$

식 1 : 직교 좌표계에서 구면 좌표계로의 변환

$$x = r \sin \theta \cos \phi, y = r \sin \theta \sin \phi, z = r \cos \theta$$

식 2 : 구면 좌표계에서 직교 좌표계로의 변환

#### 3.2 구면 팔진 트리

앞서 언급한 대로 본 논문에서는 음함수 표현을 메쉬화하기 위해 구면 팔진 트리를 사용 한다. 일반적으로 컴퓨터 그래픽스에서는 내부(solid)가 아니라 표면 모델(surface model)만 다루기 때문에 구면 팔진 트리를 적용하면 검색이 불필요한 내부 공간을 무시하고 표면에 근접한 공간만 다루는 장점이 있다.

팔진 트리를 구성하기 위해서 먼저 최소/최대 구를 정의한다. 그림 5(오른쪽)를 보면 3차원 구면 팔진트리의 구성을 볼 수 있다. 내부에 있는 구가 최소 R, 외부에 있는 구가 최대 R을 나타낸다. 직교 팔진트리는  $x, y, z$ 를 기준으로 분할을 하듯이, 구면 팔진트리도 마찬가지로  $r, \theta, \phi$ 를 기준으로 분할한다.

구면 팔진 트리에서 주의해야 할 점 중 하나는 구면 좌표계의 원점을 어떻게 정의하느냐에 따라서 그 결과가 차이가 있다는 점이다. 이 문제에 대해 몇 가지 방식을 테스트했으며 공간 상의 점들을 모두 포함하는 최소의 구를 근사적으로 구하는 방법인 Smallest Enclosing Discs [10] 방법을 사용해서 구면 좌표계에서의 원점을 정의할 경우 가장 효율적이라는 사실을 발견했다.

그림 6은 직교 팔진트리와 구면 팔진트리의 노드이다.

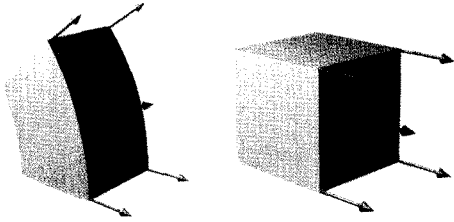


그림 6 : 직교 팔진트리 노드(오른쪽)와 구면 팔진트리 노드(왼쪽)

본 논문에서 제안하는 구면좌표계에서의 듀얼 컨투어링 방법을 적용하려면, 팔진트리의 인접노드에 대한 정보를 알아야 한다. 이러한 작업을 위해 팔진트리를 분할 하는 동시에 인접 노드에 대한 리스트를 계속 업데이트 시켜야 할 필요가 있다. 이 때 인접 노드를 찾는 과정을 팔진노드에 대한 지오메트리 정보를 사용하지 않고, 팔진노드에 대한 연결정보만을 사용하여 속도를 향상 시켰다.

### 3.3 구면 좌표계에서의 듀얼 컨투어링

팔진트리를 기반으로 듀얼 컨투어링을 적용하는 과정은 구면 좌표계에서의 듀얼 컨투어링 방법과 직교 좌표계에서의 듀얼 컨투어링 방법과 유사하다. 앞서 구면 팔진트리에서도 논의한 것처럼  $x, y, z$  값 대신에,  $r, \theta, \phi$ 를 이용해서 폴리곤화를 수행한다.

그림 8에서는 직교 좌표계와 구면 좌표계에서의 점진적인 폴리곤화를 보여주고 있다. 특징적으로 직교 좌표계의 경우 주어진 정보의 제한으로 인해 표면의 법선 벡터가  $x, y, z$  축에 모두 평행한 방향으로 설정될 수 밖에 없어서 곡면으로 나타나야 할 부분이 평면으로 표현되어 3차원 모델이 2차원적으로 나타나는 것에 비해 제안하는 방식에서는 입체감이 나타남을 볼 수 있고 (위쪽 2개 모델 비교, 직교 좌표계의 경우 법선 벡터가 시선 방향과 일치해서 회색으로만 표시) 시선 방향의 변화에 따라 진중 중인 모델의 특징적인 부분이 잘 나타나는 것을 볼 수 있다(아래 쪽 레벨 8에서 눈 주변 비교).

### 3.4 고스트(ghost) 노드를 이용한 매니폴드 메쉬

구면 좌표계를 이용한 폴리곤화 과정에서 모든 계산은 구면 좌표계 시스템에서 처리되지만, 그래픽 하드웨어/소프트웨어 시스템의 좌표가 직교 좌표이기 때문에 최종적으로

다시 직교 좌표계로 변환할 필요가 있다. 이 과정에서 부득이하게 두 좌표 시스템 사이에서 수치적인 차이가 발생한다. 이러한 수치적 차이의 근본 원인은 기본적으로 무한 소수인 원주율( $\pi$ )이 시스템 상에서는 64 비트 double 형으로 표현되면서 유한한 값을 가지게 되는데 그 원인이 있다. 그러므로 우리는 구면 팔진트리를 분할하기 전에  $\theta, \phi$ 의 값을 조정해주어야 한다.

우리는 이 문제를 해결 하기 위해, 고스트 노드를 삽입해야 한다. 고스트 노드 처리를 위한 식은 다음과 같다.

$$N^{ghost} = v_{polar} (u_{ambiguity} \cdot v_{polar}) \quad (8)$$

여기에서,  $u_{ambiguity}$ 는 그림 7에서 보면 알수 있듯이, 구면 좌표계에서 벌어지는 양쪽 부분을 말한다.

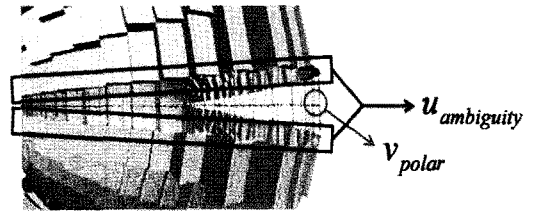


그림 7 : 고스트 노드 구조

$u_{ambiguity}$ 를  $v_{polar}$ 로 프로젝션 시킨 부분이 바로 고스트 노드이다. 고스트노드를 공유하는 쌍을 찾아서 폴리곤화 고스트 노드의 길이를 임계값으로 설정했다. 이러한 과정의 결과가 제시된 그림 7에서는 정확하게 서로의 쌍이 이어지는 모습을 볼 수 있다. 여기서 파란색 점이 고스트 노드이다.

이 과정은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- $\phi, \theta$ 에서 최소 각과, 최대 각의 값을 원주율( $\pi$ )의 근사 값(64 비트 double)으로 조정 시킨다.
- 각 음과 양의 범위 부분을 극 부분으로 투사시키고, 그 투사된 위치가 일치되는 부분에 고스트 노드를 삽입한다.
- 직교 좌표계에서 고스트 노드로 연결된 부분을 연결시킨다.

레벨 : 4

레벨 : 6

레벨 : 8



그림 8 : 직교/구면 듀얼 컨투어링 노드 비교 (모델 : Max)

#### 4. 결과 분석

본 논문에서 제안하는 방법을 점진적 압축에서 활용하기 위한 폴리곤화 과정에 적용했을 때 특징적으로 나타나는 결과는 3.3절과 그림 8에서 제시한 것과 같이 1) 중간 단계의 메쉬에서도 보다 사실적인 입체감과 세부 묘사가 가능하다는 점과 2) 동일한 팔진 트리 레벨에서 듀얼 컨투어링을 위해 필요한 버텍스의 개수가 줄어든다는 점이다. 표 3은 각 직교 좌표계와 구면 좌표계에서 듀얼 컨투어링 방법을 사용했을 경우에 대한 버텍스 수를 비교한 것이다.

모델	레벨	직교 좌표계	구면 좌표계	구면/직교(%)
Venus	4	1,008	720	71
	6	17,616	14,488	82
	8	288,336	251,924	87
Max	4	936	756	81
	6	16,928	14,372	85
	8	279,150	241,616	87
Lion	4	1,056	504	48
	6	20,984	11,300	54
	8	362,840	209,348	58
Head	4	1,016	644	63
	6	18,976	13,508	71
	8	309,824	227,024	73
Bunny	4	760	648	85
	6	14,972	13,788	92
	8	237,462	224,482	95
Cow	4	792	528	67
	6	14,746	9,409	64
	8	96,582	65,427	68

표 1 : 직교 좌표계와 구면 좌표계의 버텍스 수 비교

표 1을 통해 듀얼 컨투어링을 이용해서 생성한 메쉬는 각 레벨에서 직교 좌표계 보다 구면 좌표계에서의 버텍스 개수가 더 적다는 사실을 확인할 수 있다. 이러한 특징은 효율성 측면에서 구면 좌표계에서의 메쉬 표현이 더 효율적이라는 점을 의미한다. 또한 일반적으로 다루는 메쉬가 토폴로지 측면에서는 고체(soild)가 아닌 구와 등가인 닫힌 표면인 경우가 많고 따라서 구면 좌표계로 데이터 표현의 효율성을 더 높일 수 있다는 점을 시사한다.

그림 9는 직교 좌표계 기반의 듀얼 컨투어링 기법과 구면 좌표계 기반의 듀얼 컨투어링 기법을 비교한 것이다. 직교 좌표계보다 적은 버텍스 정보를 가지고 구형 모델이 아닌

입의 모델에서도 계단 현상을 줄이고, 더 보기 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

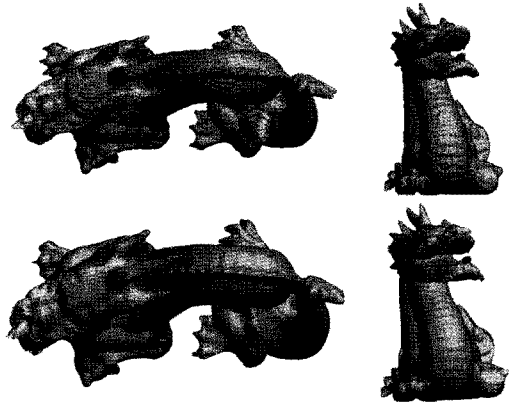


그림 9 : 직교 좌표계 기반 듀얼 컨투어링 기법(위)과 구면 좌표계 기반 듀얼 컨투어링 기법(아래), 레벨(8)

그림 11은 충분한 기하 정보가 전달된 레벨 8에서의 직교 좌표계와 구면 좌표계에서의 메쉬 모델을 나타낸 것이다.

이 정도 수준에서는 원본 모델과 직교 좌표계 듀얼 컨투어링과 제안한 방식 사이의 차이를 시각적으로 구분하기가 힘들 정도로 유사해 보인다. 그러나 표 3에서 볼 수 있듯이 제안하는 방식에서의 버텍스 갯수는 레벨 8에서 최대 10%까지 줄어 든다는 점을 확인할 수 있다.

본 논문에서 제시하는 방법은 구면 좌표계 시스템 기반이기 때문에 모델이 날카로운 특징을 가지고 있는 부분에서는 그 특징들이 제대로 표현되지 못하는 단점이 있다. 그림 10에서 빨간색으로 된 부분이 특징을 제대로 표현을 하지 못한 결과 이다.

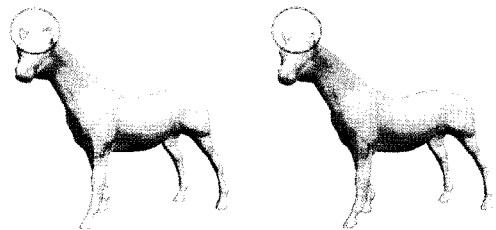


그림 10 : 직교 좌표계 듀얼 컨투어링(왼쪽) 과 구면

#### 4. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문은 구면 좌표계에서의 듀얼 컨투어링을 이용한 폴리곤화 방법을 검토하였다. 결과를 통해 특히 이용 가능한 기하 정보가 제한적인 점진적 압축 등에서 산출되는 중간 단계의 메쉬들을 표현할 때 직교 좌표계에서보다도 적은 버텍스 개수로 세부적 표현이 비교적 상세한 높은 품질의 듀얼 컨투어링 메쉬 표면을 표현할 수 있음을 알 수 있었다.

날카로운 특징을 가지고 있는 모델에 대해서 구면 좌표계 기반의 2차 에러 함수 (quadratic error function) 적용하면 직교 좌표계에의 특징들을 잘 표현 할 수 있을 것이다.

또한 본 연구를 통해 구면 좌표계에서의 공간 분할에서 축적된 직관을 바탕으로 정보 이론 측면에서의 효율성 개선 연구와 구면 좌표계 기반의 2차 에러함수 연구를 수행해 가고 있다.

#### 5. 감사의 글

이 연구에 참여한 연구자(의 일부)는 '2단계 BK21사업'의 지원비를 받았음, 이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구사업임(No.2010-0027656).

#### 참고 문헌

[1] James F. Blinn, "A Generalization of Algebraic Surface Drawing," ACM Transactions on Graphics, vol. 1, no. 3, pages. 235-256, 1982.

[2] Bloomenthal, Jules, "Polygonization of Implicit Surfaces," Computer-Aided Geometric Design, vol. 5, no. 4, pages 341-355, 1988.

[3] Bloomenthal, Jules, Introduction to Implicit Surfaces, Morgan Kaufmann Publishers, Inc., San Francisco, 1997.

[4] Karkanis, Tasso, and A. James Stewart, "Curvature-Dependant Triangulation of Implicit Surfaces," IEEE Computer Graphics and Application, vol. 22, no. 2, pages 60-69, March 2001.

[5] Velho, Luiz, "Simple and Efficient Polygonization of Implicit Surfaces," Journal of graphics tools, vol. 1, no. 2, pages. 5-24, 1996

[6] Lorensen William E., and Harvey E. Cline, "Marching

Cubes : A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm," Computer Graphics (Siggraph '87 Proceedings), pages. 163-169, July 1987.

[7] Gregory M. Nieson. "Dual marching cubes," In Proc. of IEEE Visualization 2004, pages 489-496 2004.

[8] Tao Ju, Frank Losasso, Scott Schaefer, and Joe Warren. "Dual contouring of hermite data," In Siggraph 2002, Computer Graphics Proceedings, page 339-346. ACM Press / ACM SIGGRAPH / Addison Wesley Longman, 2002.

[9] Joe Warren. and Scott Schaefer. "Dual marching cubes :Primal contouring of dual grids," In Pacific Graphics 2004, pages 70-76, 2004.

[10] M. de Berg, M. van Kreveld, M. Overmars, O. Schwarzkopf, "Computational Geometry" 2nd pages 86-90, 1999.



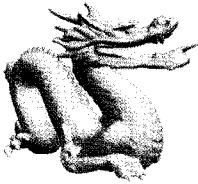



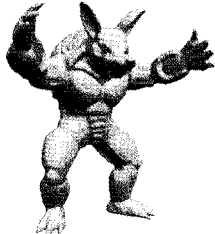
원본 모델	구면 좌표계 듀얼 킨투어링	직교 좌표계 듀얼 킨투어링
		
		
		

그림 11 : 원본 모델(왼쪽), 구면 좌표계(중간), 직교 좌표계(오른쪽) 듀얼 킨투어링 결과, 레벨 :8

## 〈저자 소개〉



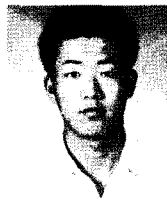
김창현

- 1979년 고려대학교 경제학과 학사
- 1988년 University of Tsukuba 전자정보 박사
- 1995년 3월~현재 고려대학교 컴퓨터학과 교수
- 2005년 11월~현재 고려대학교 컴퓨터 과학기술대학원 원장
- 2005년 1월 ~ 2006년 3월 한국정보과학회 이사
- 2008년 3월 ~ 2010년 2월 한국컴퓨터 그래픽스학회 회장
- 관심분야 : 컴퓨터그래픽스, 물리기반 시뮬레이션, Mesh Processing



박태정

- 1997년 서울대학교 전기공학부 학사
- 1999년 서울대학교 전기공학부 석사
- 2006년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사
- 2006년~현재 고려대학교 BK21 소프트웨어사업단 연구교수
- 관심분야 : 기하 정보 압축, TCAD, 3D 도형 모델링



김중현

- 2008년 세종대학교 컴퓨터학과 학사
- 2010년 고려대학교 컴퓨터 전파통신공학 석사
- 2010년~현재 고려대학교 영상정보처리 합동과정 박사과정
- 관심분야 : 물리기반 시뮬레이션, 지오메트리 프로세싱