

메타큐브 : 부정형 물체의 모델링을 위한 새로운 구조 요소

(MetaCube : A New Skeletal Element for Modeling Informal Objects)

김 은 석 [†] 김 재 정 ^{**}
(Eun Seok Kim) (Jay Jeong Kim)

요 약 컴퓨터 그래픽스에서 모델링 요소를 선택하는 것은 사실적인 이미지를 실시간에 생성하는데 중요한 영향을 미친다. 특히 부정형 물체를 모델링하는데 있어서 적은 양의 데이터, 용이한 렌더링 및 확장성은 모델링 요소의 중요한 선택 기준이 된다. 음함수 곡면을 표현하는 많은 모델링 방법들 중 하나인 메타볼 모델은 적은 양의 데이터로 복잡한 곡면을 모델링할 수 있다는 장점을 갖는다. 그러나 곡면이 아닌 육면체와 같은 평면으로 구성되는 물체를 메타볼로 모델링하게 되면 다각형으로 모델링하는 것보다 더 많은 수의 데이터량을 요구하게 된다. 본 논문은 메타볼의 장점을 수용하면서 적은 수의 데이터로 평면 형태의 물체까지 모델링할 수 있는 메타볼의 확장 형태인 메타큐브를 제안한다. 메타큐브는 두 개의 매개변수 값에 의해 구에서 정육면체까지 자유로운 확장이 가능하므로 적은 수의 데이터로 곡면과 평면이 혼합된 물체를 쉽게 모델링할 수 있다.

Abstract In Computer Graphics, to select the element for modeling is very important in aspect of real-time processing of photorealistic images. Especially in modeling of informal objects, the criteria of choice are such as the minimum number of data, the easy rendering technique, and the expansibility. The metaball model which is one of the methods for modeling the implicit surface is excellent in modeling the complicated surface with a few data. However, a greater number of data are required for modeling objects that consist of planar surfaces with metaballs than with polygons. In this paper, we propose the new skeletal element, metacube which has the merits of metaball and improves the modeling ability of informal objects containing planar surfaces. A metacube has two parameters to change freely its shape from the cube to the sphere and can easily do the modeling of objects with curved surfaces and plane surfaces.

1. 서 론

컴퓨터 그래픽스에 있어서 물체를 쉽고 빠르게 표현하는 방법에 대해 많은 연구가 있어 왔다. 정의하기 쉽고 다루기 간편한 요소들을 사용하여 물체를 나타내는 것은 많은 응용분야에서 필수적인 용도가 되고 있다. 그

러나 사실적인 장면을 생성하기 위해서는 복잡한 형태의 물체를 표현하고 렌더링하는 것이 필수적이다. 이러한 복잡한 형태의 곡면을 표현하는 방법으로 크게 매개변수 곡면 표현(parametric surfaces)과 음함수 곡면 모델(implicit surfaces)의 두 가지를 들 수 있다[1].

매개변수 곡면 방법은 두 개의 매개변수에 관한 다항식으로 곡면을 정의하는 방법으로 Hermite 곡면, Bèzier 곡면, Spline 곡면 표현 등이 있다. 특히 Bèzier 곡면과 Spline 곡면은 제어점들(control points)에 의해 정의되는데, 제어점들의 위치에 따라 형성되는 곡면의 모양이 달라진다. 매개변수 곡면 표현법은 매개변수의 차수가 낮은 경우 유연성이 부족하고 차수가 높은 경우

· 본 연구는 1998년 전남대학교 연구년교수연구비의 지원으로 수행되었습니다.

[†] 학생회원 : 전남대학교 전산학과
karas@chonnam.chonnam.ac.kr

^{**} 중신회원 : 전남대학교 전산학과 교수
jaykim@chonnam.chonnam.ac.kr

논문접수 : 1999년 10월 28일
심사완료 : 2000년 1월 25일

에는 복잡하여 실용적이지 못하다는 단점을 갖는다[2].

음함수 곡면 모델은 보통 등가곡면(isosurface) 모델이라 불리며 blob[3], soft object[4], 메타볼(meta-ball)[5] 등과 같은 구조 요소(skeletal element)를 이용하여 3차원 공간상에서의 기하학적 형태를 함수의 0값을 갖는 점들의 집합(zero-set) 형태로 표현하는 컴퓨터 그래픽스의 강력하고 융통성 있는 형태를 갖는 모델이다[6]. 80년대 메타볼의 개념이 소개된 이후 탁월한 물체 표현능력으로 인해 많은 연구가 진행되어 왔다. 메타볼은 자유곡면(free-form surface) 표현에 뛰어나며 특히 사람의 몸이나, 동물의 동체, 신체의 장기, 혹은 액체 등의 부정형 물체를 모델링하는데 뛰어난 적응력을 보여주어 그 응용 범위가 매우 높은 것으로 평가되어 중요한 관심을 끌어 왔다[1]. 또한 음함수 곡면 모델은 매개 변수 곡면 표현의 다항식 형태의 수식 표현에 의한 형태 규칙성에서 벗어나 다양한 형태의 변형이 가능하여 애니메이션 및 인체, 유체 등의 모델링에 유용하다는 장점을 갖는다[7].

음함수 곡면 모델에 사용되는 구조 요소들은 자체가 점요소(point element) 형태를 가지며 중심점에서의 거리에 따라 필드를 형성한다. 따라서 하나의 구조요소에 형성되는 곡면은 구(sphere)를 형성하게 된다. 이러한 점요소들을 이용하여 구형에 가까운 곡면을 모델링하는 것은 적은 양의 데이터로 충분한 성능의 표현이 가능하지만, 주사위와 같은 평면적인 요소가 포함된 물체들을 모델링하려면 단순한 다각형을 이용하는 것 보다 더 많은 양의 구조 요소를 필요로 한다.

본 논문은 음함수 곡면의 다양한 모델링 성능을 위한 새로운 구조 요소인 메타큐브(metacube)를 제안한다. 메타큐브는 메타볼의 확장 형태로서 두 개의 매개변수를 이용하여 구형에서부터 완전한 정육면체까지 다양한 형태의 등가곡면을 형성할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 자유곡면을 표현하기 위한 기존의 방법들에 대해 살펴보고, 3장에서는 본 논문에서 제안하는 메타큐브를 설명하였다. 4장에서는 제안한 메타큐브를 이용한 실험 결과를 보여주며, 5장에서 결론을 맺는다.

2. 관련 연구

2.1 음함수 곡면 모델(Implicit Surface Model)

음함수 곡면은 $f: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$ 형태의 값이 0이 되는 점들(zero-set)의 함수로 정의되며, 복잡한 형태의 물체도 하나 또는 몇 개의 함수만 정의되어지면 표현이 가능하다는 장점을 가진다. 하지만 모델링의 편의성에 반해 이

를 렌더링하는 것은 대부분 다각형과 같은 모델링 요소로 다시 변환한 후 이들을 렌더링하는 복잡한 방법을 사용하여 왔다[6,8,9]. 이는 음함수 곡면 모델을 결정하는 함수의 복잡도에 따라 표면에 해당하는 위치를 찾기 어렵고, 또한 렌더링에 필수적인 표면의 법선 벡터를 구하는 식이 쉽지 않기 때문이다[6].

Blobs, Soft Objects 또는 메타볼들은 렌더링할 곡면을 표현하기 위해 요소의 중심으로부터의 거리에 대한 함수로 표현되는 밀도 함수를 갖는 점요소들이다. 이러한 유한 요소들에 의한 모델링은 곡면을 형성하는 필드 함수와 곡면을 찾는 해법에 따라 성능이 좌우된다[2].

2.2 Blobs, Soft Objects, 메타볼

Blobs는 음함수 곡면을 모델링하기 위한 요소들 중 하나로서 1982년 Blinn에 의해 처음 제안된 모델링 요소이다. 부정형 물체를 정의하기 위해 점을 기본요소로 하는 Blobs는 점요소가 주어진 밀도값을 가지며, 점요소 주위의 밀도값은 점요소와의 거리에 반비례하여 점차 감소된다. Blinn의 경우 이러한 밀도값 분포를 지수함수로 모델링하였다. 점요소로 형성되는 모델링 요소들은 표면을 결정하기 위한 공간상의 밀도값 분포를 나타내는 필드함수에 따라 다르게 불려져 왔는데, Blinn은 Blobs, Nishimura의 경우는 메타볼이라 하였고, Wyvill은 soft object라 하였다. 표 1은 지금까지 제안된 필드 함수들을 제시한 것이다. f_i 는 i 번째 점요소의 밀도값을 나타내는 필드 함수를 의미하며 R_i 는 점요소 i 의 밀도값이 영향을 미치는 최대 범위를 나타낸다.

Blinn의 blobby model은 필드함수로 지수함수를 사용함으로써 자연현상에서 나타나는 중력장, 자기장과 같은 역장을 가장 자연스럽게 모델링하지만 볼의 중심점에서 아주 먼 거리에 있는 위치조차 필드값이 0이 아니기 때문에 광선과 등가곡면의 교차 검사시 모든 요소들을 고려해야 한다는 단점을 갖는다. 또한 지수함수는 계산 비용이 크기 때문에 지수함수를 근사하는 다항식을 필드함수로 갖는 요소들로 대체되어 왔다. Nishimura는 독자적으로 음함수 곡면 모델을 개발하여 메타볼이라 하였고, 지수함수를 두 개의 간단한 2차 다항식으로 근사하는 구간별 2차식을 필드함수로 사용하였다. 그러나 차수가 낮은 함수로 인해 지수함수를 근사하는 두 개의 2차 함수가 만나는 부분에서의 계산상의 오차가 크다는 단점이 있다. Wyvill의 지수함수를 근사하는 다항식의 필드함수를 갖는 요소를 정의하고 이에 관한 디스플레이 함수를 개발하여 soft object라 불렀다. [1,7,10]

이러한 점요소들은 점을 중심으로 하여 동일한 거리에 있는 위치들이 모두 같은 밀도값을 가지므로 하나의

점요소는 구형의 표면을 생성할 수 있다. 또한 이러한 점요소들을 적당한 거리에 배치하게 되면 서로의 밀도 함수값이 더해져(blending) 새로운 형태의 곡면을 형성할 수 있다(그림 1).

표 1 필드함수의 종류

함수의 종류	표현식	제안자	제안 연도
지수함수	$f_i(r) = e^{-ar^2}$	Blinn [3]	1982
구간별 2차 다항식	$f_i(r) = \begin{cases} 1 - 3(\frac{r}{R_i})^2 & \text{if } (0 \leq r < \frac{R_i}{3}) \\ \frac{3}{2}(1 - (\frac{r}{R_i}))^2 & \text{if } (\frac{R_i}{3} \leq r \leq R_i) \end{cases}$	Nishimura [5]	1983
4차 다항식	$f_i(r) = (1 - (\frac{r}{R_i})^2)^2$	Murakami [11]	1987
6차 다항식	$f_i(r) = -\frac{4}{9}(\frac{r}{R_i})^6 + \frac{17}{9}(\frac{r}{R_i})^4 - \frac{22}{9}(\frac{r}{R_i})^2 + 1$	Wyvill [4]	1986
6차 다항식	$f_i(r) = (1 - (\frac{r}{R_i})^2)^3$	김은석 [10]	1996

수를 f_1 과 f_2 라 할 때, B_1 과 B_2 가 겹쳐있는 부분에서의 필드함수는 두 요소의 함수가 더해진 f_1+f_2 가 되어 새로운 등가곡면을 형성하게 된다. 그림 1에서 t 는 광선상의 위치를 나타내는 매개변수를, $f(t)$ 는 위치 t 에서의 필드값을, 그리고 T 는 등가곡면을 형성하는 임계값을 나타낸다.

w_i 를 i 번째 구조요소의 중심에서 밀도값이라 할 때 n 개의 구조요소로 형성되는 물체의 등가곡면은 다음 방정식을 만족하는 점들의 집합으로 정의할 수 있다.

$$F(x, y, z) = \sum_{i=1}^n w_i f_i(x, y, z) - T = 0$$

또한 이 방정식의 편미분을 이용하여 등가곡면의 법선 벡터 N 을 구할 수 있다.

$$N(x, y, z) = \left(-\frac{\partial F(x, y, z)}{\partial x}, -\frac{\partial F(x, y, z)}{\partial y}, -\frac{\partial F(x, y, z)}{\partial z} \right)$$

그러나 이 점요소들이 자체적으로 구의 형태를 지니고 있기 때문에 구가 아닌 다른 형태의 표면을 형성하려면 여러 개의 점요소들이 적당한 간격으로 배치되어 blending되어야 하고, 특히 육면체와 같이 평면을 구성하기 위해서는 정교한 배치가 필요하며 또한 많은 양의 요소 데이터를 필요로 한다. 제안한 메타큐브는 형태에 있어서 확장성을 가지므로 하나의 메타큐브로도 다양한 형태의 표면을 표현할 수 있다는 장점을 갖는다.

2.3 Superellipsoid

Superellipsoid는 식 (1)과 같은 함수 형태로 나타낼 수 있다. 매개변수 s_1 과 s_2 의 값이 1일 경우 일반적인 타원(ellipsoid)의 방정식과 같아진다. Superellipsoid는 두 개의 매개변수 s_1 과 s_2 의 값을 조정함으로써 육면체에서 구, 8면체(octahedron), 그리고 더욱 복잡한 모양까지 다양한 형태를 형성할 수 있다[12].

$$\left[\left(\frac{x}{R_x} \right)^{2/s_1} + \left(\frac{y}{R_y} \right)^{2/s_1} \right]^{s_2} + \left(\frac{z}{R_z} \right)^{2/s_2} = 1 \quad (1)$$

(식 2)는 superellipsoid가 2차원으로 축소된 superellipse의 표현식이며, $R_x=R_y$ 인 원의 형태가 매개변수 s 의 값에 따라 변하는 모양은 그림 2와 같다.

$$\left(\frac{x}{R_x} \right)^{2s} + \left(\frac{y}{R_y} \right)^{2s} = 1 \quad (2)$$

superellipsoid는 단순히 매개변수 값을 변화시킴으로써 다양한 형태의 변형이 가능하지만, 필드함수가 제공

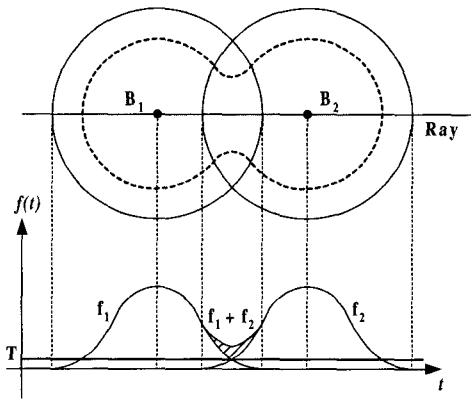


그림 1 2차원 점요소가 형성하는 등가곡면과 blending 효과

2차원 상에서 형성되는 점요소의 등가곡면은 그림 1과 같이 원형을 이룬다. 점요소 B_1 과 B_2 각각의 필드함

근의 형태를 가지기 때문에 직접 근을 구하거나 분석적인 방법으로 근을 얻는 것이 매우 어렵다는 단점을 갖는다. 특히 육면체 형태의 경우 3차원 표현식(식 1)에서 두 개의 매개변수 s_1, s_2 가 모두 0 값을 가져야 하는데, 실제 컴퓨터에서는 2/0의 계산이 불가능하고, 0에 가까운 작은 값으로 계산한다 하더라도 매우 큰 값의 제곱이 되므로 정밀도에 따라 오버플로우(overflow)나 심각한 계산 오차를 발생시킬 수 있다. 또한 매개변수 값에 따라 함수 형태가 달라지므로 필드함수의 합(blending)으로부터 표면을 찾기위한 계산이 어렵다는 단점을 갖는다.

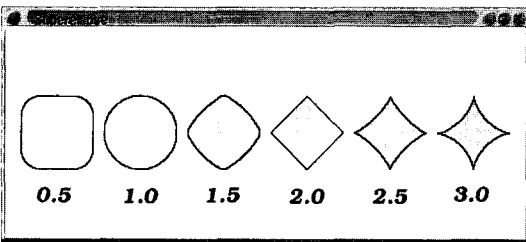


그림 2 매개변수 s값에 따른 Superellipses

3. 메타큐브

본 논문에서는 기존의 점요소의 문제점을 해결하기 위해 새로운 모델링 요소인 메타큐브(metacube)를 제안한다. 메타큐브는 정육면체 형태로서 메타큐브에서부터의 거리에 대한 필드함수를 가지며, 두 개의 매개변수 값에 따라 정육면체에서 구형까지 다양한 형태를 가질 수 있다.

3.1 메타큐브의 정의

메타큐브 M은 중심점 C와 큐브를 형성하는 중심점에서 각 축으로의 거리를 나타내는 큐브 반경 d, 큐브로부터 필드값이 존재하는 범위를 나타내는 필드반경 r, 그리고 메타큐브 자체의 밀도값 w의 네 가지 요소에 의해 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$M = (C, d, r, w)$$

그림 3은 정육면체의 크기값 d와 필드함수값이 존재하는 범위 r을 조정하여 얻을 수 있는 다양한 등가곡면의 형태를 2차원으로 그린 것이다. 정육면체의 2차원 형태인 메타스퀘어의 정사각형의 크기가 0이 되면 점과 동일해지므로 메타큐브에서 동일한 거리에 있는 점들의 필드값은 서로 같아 결국 원형의 등가곡면을 형성할 것이다. 그와 반대로 정사각형의 크기가 0이 아니고 필드

함수 값이 존재하는 범위를 0으로 설정하게 되면 정사각형만이 필드값을 형성하므로 결국 사각형의 형태를 표현할 수 있다. 정사각형의 크기와 필드 범위에 따라 그림과 같이 원형과 사각형의 중간 형태들 또한 표현할 수 있을 것이다.

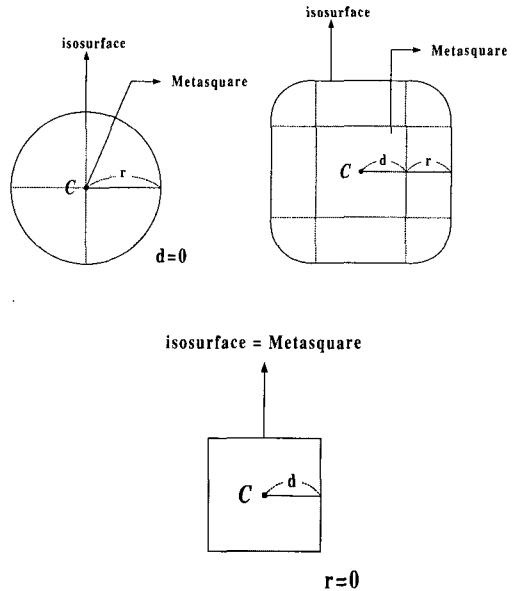


그림 3 메타스퀘어의 다양한 등가곡면

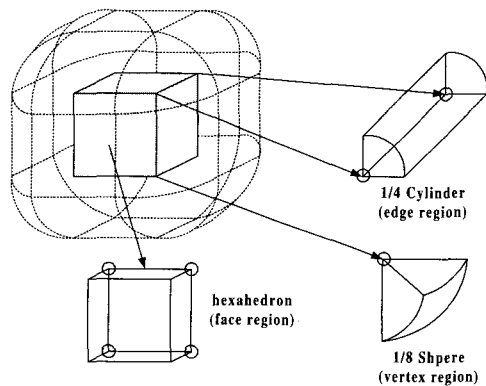


그림 4 메타큐브의 구조

메타큐브는 이러한 메타스퀘어를 3차원으로 확장한 형태를 갖는다(그림 4). 메타큐브로부터 동일한 거리에 있는 모든 점들을 같은 필드값을 가지므로 메타큐브가

형성하는 등가곡면의 형태는 큐브의 면(face)에서는 각 면과 평행한 육면체, 큐브의 모서리(edge)에서는 1/4 원통(cylinder), 그리고 꼭지점(vertex)에서는 1/8 구(sphere)가 된다. 이러한 형태에 따라 메타큐브의 필드 영역을 평면 영역(face region), 에지 영역(edge region), 꼭지점 영역(vertex region)으로 나눌 수 있다.

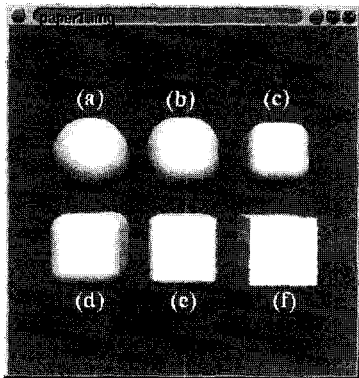


그림 5 메타큐브가 형성하는 다양한 등가곡면의 모양

그림 5는 큐브 반경 d 와 필드반경 r 값에 따른 형성되는 메타큐브의 다양한 등가곡면을 렌더링한 이미지이다. 메타큐브의 각 매개변수 값은 왼쪽 위부터 차례로 (a) $d=0.0, r=1.5$ (b) $d=0.2, r=1.2$ (c) $d=0.4, r=0.9$ (d) $d=0.6, r=0.6$ (e) $d=0.8, r=0.3$ (f) $d=1.0, r=0.0$ 이다. 그림에서 볼 수 있듯이 큐브반경 d 가 필드반경 r 에 비해 클 경우 육면체에 가까운 형태를 형성하며, 반대인 경우는 구에 가까운 형태를 갖는다. $d=0$ 인 경우는 구조 요소가 점요소가 되므로 메타볼과 같은 구형의 등가곡면을 형성하고, $r=0$ 인 경우는 필드를 형성하는 부분 없이 메타큐브만 존재하므로 정육면체가 된다.

3.2 메타큐브의 렌더링

구조요소들로 형성된 등가곡면을 렌더링하는 것은 요소에서 사용된 필드함수에 따라 근을 구하는 방법이 다르다. 간단한 필드함수의 경우 쉽게 근을 구할 수 있으나 복잡한 형태의 자유곡면을 형성하려면 좀 더 높은 차수의 다항식을 사용하여야 하였고, 따라서 수치 해석적인 방법을 이용하여 근을 구하는 방법들이 제안되어 왔다[1,3,4,5,11].

필드함수는 거리에 대한 함수이므로, 구조요소(skeletal element)로부터의 거리를 구하는 것이 선행되어야 한다. 점요소의 경우 3차원 공간상의 임의의 점에서부터 점요소의 위치를 표시하는 중심점까지의 유클

리디안 거리를 계산하는 것으로 간단히 구해지지만, 메타큐브의 경우 구조요소가 정육면체이기 때문에 각각의 영역에 따라 거리를 구하는 식이 달라진다.

그림 6은 2차원 메타스퀘어 상에서 본 각 영역별 최단거리를 표시한 것이다. 에지 영역(Edge Region)에 있는 점들은 에지(Edge)까지의 직선의 길이가, 꼭지점 영역(vertex region)에서는 꼭지점까지의 직선의 길이가 최단 거리가 된다. 따라서 꼭지점 V 를 중심으로 하는 꼭지점 영역상의 점 P_1 는 V 와 P_1 을 잇는 직선(line segment)의 길이, 에지 E 를 중심으로 하는 에지 영역상의 점 P_2 는 P_2 에서 직선 E 로의 수직선의 길이에 따라 각 점에서의 필드값이 달라진다. 마찬가지로 메타큐브의 각 영역별 최단거리는 영역에서 중심이 되는 꼭지점이나 에지 또는 평면까지의 최단 직선의 길이를 구해야 얻을 수 있다.

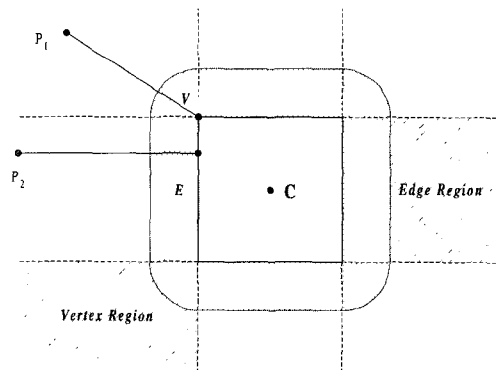


그림 6 메타스퀘어의 영역별 최단 거리

우리는 메타큐브의 중심점 C 와 큐브 반경 d 로부터 구조요소인 메타큐브가 차지하는 영역을 최소 위치점 $\text{Min}(x_{\min}, y_{\min}, z_{\min})$ 과 최대 위치점 $\text{Max}(x_{\max}, y_{\max}, z_{\max})$ 의 두 점으로 표시할 수 있다. Min 의 요소값은 (중심점의 요소값 - 큐브 반경 d)로, Max 는 (중심점의 요소값 + 큐브반경 d)로 각각 얻을 수 있다. 이 때 임의의 점 $P(x, y, z)$ 이 속하는 메타큐브의 어떤 영역은 다음과 같이 영역 벡터 $\mathbf{U}(U_x, U_y, U_z)$ 를 구함으로써 알 수 있다. 영역 벡터 \mathbf{U} 의 x 요소값 U_x 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$U_x = \begin{cases} 1 & \text{if } (P_x > x_{\max}) \\ 0 & \text{if } (x_{\min} < P_x \leq x_{\max}) \\ -1 & \text{if } (P_x \leq x_{\min}) \end{cases}$$

U_y, U_z 도 U_x 와 같은 방법으로 구할 수 있다. 영역 벡터 U 의 각 요소들의 절대값의 합($|U_x|+|U_y|+|U_z|$)이 1이면 평면 영역, 2이면 에지 영역, 3이면 꼭지점 영역임을 나타낸다. 또한 각 영역의 거리 계산을 위한 중심이 되는 꼭지점, 에지, 평면은 영역 벡터의 각 요소값에 따라 1이면 Max값, -1이면 Min값, 그리고 0일 경우 Min과 Max값 모두를 취하도록 함으로써 얻을 수 있다. 예를 들어 꼭지점 영역인 경우 영역벡터는 절대값의 합이 3이므로 모든 요소들의 값이 1이거나 -1일 것이고, 각 요소 값에 따라 Min값과 Max값을 선택하면 메타 큐브의 각 꼭지점중의 한 점을 얻을 수 있다. 또한 에지 영역의 경우 영역 벡터의 절대값의 합이 2이므로 각 요소 값들 중 하나는 0이고 영역 벡터는 0값을 갖는 요소 축에 수직인 벡터이므로, 중심이 되는 에지는 그 축 값의 Min, Max값을 갖는 두 점으로 이루어져 있을 것이다.

영역벡터 U 를 이용하여 3차원 공간상의 한 점에서 메타큐브까지의 거리는 각 영역에 대해 Affine 공간상의 벡터 계산으로 다음과 같이 구할 수 있다.

1) 꼭지점 영역(Vertex Region)

꼭지점 영역은 영역 벡터 U 에 대해 벡터 내적 연산 $U \cdot U=3$ 을 만족한다. 큐브 반경 d 에 대해 $V_1 = dU$ 는 메타큐브의 중심 C 에서 거리 계산을 위한 중심 꼭지점으로의 방향을 나타내는 벡터가 된다. 메타큐브의 중심 점 C 에서 임의의 점 P 로의 방향 벡터를 $V_2 = P - C$ 라 하면, 메타큐브에서 임의의 점 P 까지의 거리 r 은 다음과 같이 얻어 질 수 있다(그림 7 (a)).

$$r = | V_2 - V_1 | \tag{3}$$

2) 에지 영역(Edge Region)

에지 영역에서는 영역 벡터 U 가 $U \cdot U=2$ 를 만족한다. 꼭지점 영역과 같은 방법으로 V_1, V_2 를 얻으면 이 두 벡터에 의해 새로운 벡터 $V_3 = V_2 - V_1$ 를 얻을 수 있다. 또한 V_3 와 V_2 를 이용하면 다음과 같이 에지에 평행한 벡터 V_4 를 얻을 수 있다.

$$V_4 = (\frac{V_3 \cdot V_2}{V_2 \cdot V_2})V_2 \tag{4}$$

우리가 구하고자 하는 메타큐브에서 임의의 점 P 까지의 거리 r 은 다음과 같이 얻어질 수 있다(그림 7 (b)).

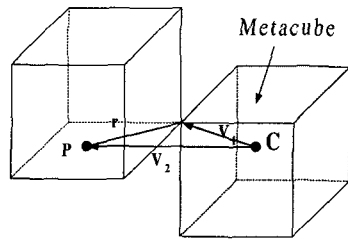
$$r = | V_3 - V_4 | \tag{5}$$

3) 평면 영역(Face Region)

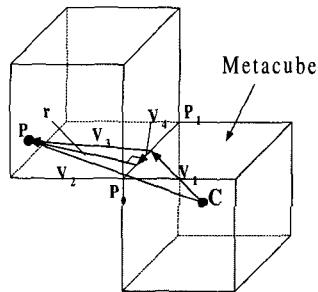
평면 영역에서는 $U \cdot U=1$ 이 된다. 평면 영역은 꼭지

점 영역과 같이 V_1, V_2 를 얻으면 이 두 벡터에 의해 쉽게 거리 r 을 구할 수 있다(그림 7(c)).

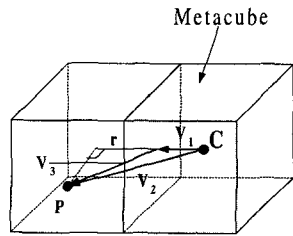
$$\begin{aligned} V_3 &= V_2 - V_1 \\ r &= | (V_3 \cdot V_1)V_1 | \end{aligned} \tag{6}$$



(a)



(b)



(c)

그림 7 영역별 거리 계산

4. 실험 결과

본 논문에서 실험을 위해 필드함수는 [10]의 6차 다항식을 사용하였고, 메타큐브를 렌더링하는 알고리즘은 Sturm의 정리를 이용한 반복법을 사용하였다. Sturm의 정리는 실계수 방정식 $f(x)$ 에 대해 도함수들을 이용하여

은 새로운 방정식들의 집합(sturm sequence)들의 구간 양끝에서의 부호 변화의 차이 값에 의해 실근의 개수를 판별할 수 있음을 보여준다[2,13]. 초기 구간에서의 실근의 존재 유무를 파악한 후 이 구간을 줄여나가면 결국 실근을 찾을 수 있다. 이 Sturm sequence를 이용한 반복법은 고차 다항식의 실근의 유무를 쉽게 판별할 수 있을 뿐만 아니라, 뉴턴 방법(Newton Method)과 같이 초기값에 민감하지 않고 근이 존재할 경우 항상 구간 내에 근을 포함하므로(bracketed root) 원하는 실근을 견고하게 찾을 수 있다는 장점을 갖는다.

메타큐브에 의해 형성되는 영역과 광선과의 빠른 교차 테스트를 위해 메타큐브와 메타큐브가 형성하는 영역을 높이(height) 4, 잎노드(leaf node) 27개를 갖는 큐브트리(CubeTree)로 구성하였다. 큐브트리는 메타큐브의 큐브 반경 d 에 의해 주어지는 1개의 몸체(body) 부분과 큐브 반경 d 와 필드 반경 r 에 의해 형성되는 26개의 영역별 바운딩 박스(bounding box)를 삼진 트리(ternary tree)로 구성한 것으로서 렌더링을 할 때 광선상의 영역 구분을 용이하게 함으로써 효율을 높일 수 있도록 하였다. 또한 각 영역별 영역 벡터는 바운딩 박스의 중심점과 메타큐브의 중심점에 의해 쉽게 구해질 수 있으므로 영역벡터를 저장하기 위한 부가적인 메모리를 절약할 수 있다는 장점을 갖는다.

그림 8, 9, 10은 각각 동일한 위치의 메타큐브들이 큐브반경 d 와 필드반경 r 이 달라짐에 따라 변하는 등가곡면의 형태를 보여준다. 이 그림들의 표면은 동일한 입체값으로 렌더링한 것이다. 이 이미지들은 큐브 반경과 필드 반경에 따라 구에서 정육면체까지 각 메타큐브의 형태의 차이뿐만 아니라 형성되는 등가곡면의 차이를 명확히 보여준다.

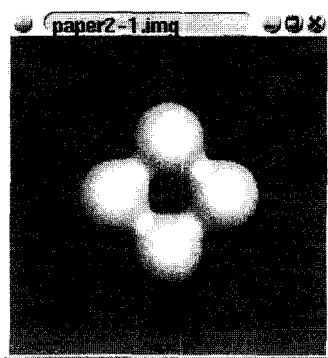


그림 8 $d=0.0$ $r=2.0$ 인 메타큐브들의 이미지



그림 9 $d=0.5$ $r=1.2$ 인 메타큐브들의 이미지

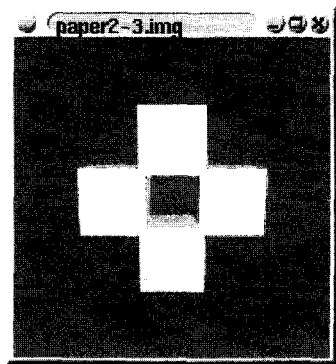


그림 10 $d=1.0$ $r=0.0$ 인 메타큐브들의 이미지



그림 11 메타큐브로 모델링한 강아지와 공의 측면 이미지

그림 11과 그림 12는 다양한 매개변수 값을 갖는 메타큐브들로 강아지 형태의 물체와 공을 표현한 것이다. 이 이미지는 22개의 메타큐브를 이용하여 얻어진 것

로 그림 11은 측면 이미지를, 그림 12는 같은 물체의 정면 쪽 이미지를 보여준다.

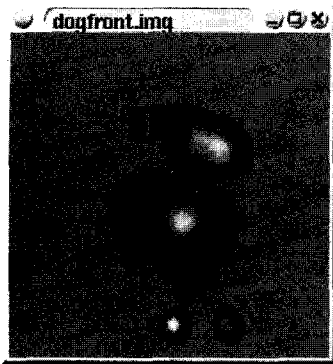


그림 12 메타큐브로 모델링한 강아지와 공의 정면 이미지

메타큐브를 이용한 더욱 복잡한 이미지는 물체에 적합하도록 요소들의 위치 및 각 매개변수의 값을 조정하는 복잡하면서 많은 시간을 필요로 하는 모델링 작업을 거쳐야 얻을 수 있다[8,14]. 따라서 메타큐브 모델링 요소를 효과적으로 이용하기 위해서는 물체의 3차원 표현을 쉽게 만들어 낼 수 있는 자동 모델링 기법이 필요하다.

5. 결론

본 논문에서는 음함수 곡면 모델의 성능향상을 위해 메타볼을 확장한 새로운 구조요소인 메타큐브를 제안하였다. 지금까지 음함수 곡면 모델은 등가곡면을 형성하는 기본 요소로 필드함수를 갖는 점요소가 주를 이루어 왔다. 그러나 점요소는 자체의 등가곡면이 구의 형태를 가지므로 곡면을 표현하는데 뛰어난 성능을 갖지만, 평면요소를 포함하는 물체의 모델링의 경우 다각형을 이용하는 경우보다 더 많은 수의 데이터가 필요 되어지고 따라서 많은 계산량이 요구되어진다는 단점을 갖는다.

메타큐브는 큐브 반경과 필드 반경을 나타내는 두 개의 매개 변수를 이용하여 구의 형태부터 평면 요소인 정육면체까지 자유로운 형태의 등가곡면을 생성할 수 있다. 따라서 평면 표현을 위해 다각형과 같은 다른 모델링 요소를 사용하지 않고서도 자유 곡면의 모델링이 가능하며, 이러한 점은 불륨 데이터의 3차원 자동 모델링에서 장점으로 작용할 것이다.

앞으로 메타큐브를 기반으로 일반적인 형태의 기본 요소에 대한 연구와 이를 이용한 불륨 데이터로부터 3

차원 물체를 자동 모델링하는 방법에 대한 연구가 계속 진행되어야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] Nishita, T. and Nakamae, E., "A Method for displaying Metaballs by using Bèzier Clipping," Proc. Eurographics '94, Vol.13, No.3, pp.271-280, 1994.
- [2] 김은석, 김재정, "Sturm Sequence를 이용한 메타볼 렌더링에 관한 연구", 한국정보과학회 가을 학술발표 논문집, Vol.23, No.2, pp.437-440, 1996.
- [3] Blinn, J. F., "A Generalization of Algebraic Surface Drawing," ACM Transactions on Graphics, Vol.1, No.3, pp.235-256, July 1982.
- [4] Wyvill, G., MacPheeters, G. and Wyvill, B., "Data Structure for Soft Objects," SIGGRAPH '93 Course Notes, Vol.25, pp.227-234, August 1993.
- [5] Nishimura, H., Hirai, M., Kawai, T., Kawata, T., Shirakawa, I. and Omura, K., "Object Modeling by Distribution Function and a Method of Image Generation," Trans. IEICE Japan, Vol.J68-D, No.4, pp.718-725, 1986.
- [6] Hart, J. C., "Morse Theory for Implicit Surface Modeling," Proc. Visualization and Mathematics '98, Springer-Verlag, Berlin, 1998.
- [7] 조청운, 윤경현, "메타볼 모델에 대한 광선 추적 알고리즘", 컴퓨터그래픽학회 논문지, Vol.1, No.1, pp.39-46, March, 1995.
- [8] Curless, B. and Levoy, M., "A Volumetric Method for Building Complex Models from Range Images," SIGGRAPH '96 Conference Proceedings in Computer Graphics, pp.303-312, 1996.
- [9] Wyvill, B., "Explicating Implicit Surfaces," Graphics Interface '94, pp.165-173, 1994.
- [10] 김은석, 김재정, "메타볼 모델링 향상을 위한 새로운 필드함수와 메타볼 모델에서의 빠른 광선 추적 알고리즘", 한국정보과학회 봄 학술발표 논문집, Vol.23, No.1, pp.739-742, 1996.
- [11] Murakami, S. and Ichihara, H., "On a 3D Display Method by Metaball Technique," Journal of Electronics Communication, Vol.J70-D, No.8, pp.1607-1615, 1987.
- [12] Hearn, D. and Baker, M. P., *Computer Graphics*, 2nd Edition, pp.312-315, Prentice Hall, 1994.
- [13] Hook, D. G., AcAree, P. R., "Using Sturm Sequences to Bracket Real Roots of Polynomial Equations," *Graphics GEMS II*, pp.416-422, Academic Press Inc., 1990.
- [14] Muraki, S., "Volumetric Shape Description of Range Data using 'Bobby Model'," ACM Computer Graphics, Vol25, No.4, pp.227-235, July 1991.
- [15] Barr, A. H., "Faster Calculation of Superquadric

Shapes," IEEE Computer Graphics and Applications Vol.1, No.1, p.101, Jan. 1981.

- [16] Kalra, D., Barr, A. H., "Guaranteed Ray Intersections with Implicit Surfaces," Proceeding SIGGRAPH '89, Vol.23, No.3, pp.297-306, 1989.
- [17] Barr, A. H., "Rigid Physically Based Superquadrics," *Graphics Gem III*, pp.137-148, Academic Press Inc., 1992.



김 은 석

1995년 전남대학교 전산학과(학사). 1997년 전남대학교 전산통계학과(석사). 1997년 ~ 현재 전남대학교 전산학과(박사과정). 관심 분야는 컴퓨터 그래픽스, 음함수 곡면, 컴퓨터 애니메이션, 의료영상화



김 재 정

1976년 서울대학교 수학교육과(학사). 1978년 한국과학원 전산학과(석사). 1990년 뉴욕 주립대학 Stony Brook 전산학과(석사). 1992년 인디애나 주립대학 전산학과(박사). 1978년 ~ 1982년 한국표준연구소 연구원. 1983년 ~ 현재 전남대학교 전산학과 교수. 관심분야는 컴퓨터 그래픽스, 컴퓨터 애니메이션, 의료영상화