

메타큐브를 이용한 볼륨 데이터 자동 모델링 방법

김은석^U 김재정
전남대학교 전산학과
{karas, jaykim}@chonnam.chonnam.ac.kr

An Automatic Modeling Method of Volume Data Using Metacubes

Eun-Seok Kim^U Jay Jeong Kim
Dept. of Computer Science, Chonnam National University

요 약

음함수 곡면 모델의 대표적인 구조 요소인 메타볼은 다양한 형태의 곡면을 모델링하는데 뛰어난 성능을 갖는다[1]. 그러나 복잡한 형태의 물체는 곡면 뿐 아니라 평면적인 요소를 포함하기 때문에 메타볼만으로 부정형 물체를 모델링하는 데에는 많은 어려움이 따른다. 메타큐브는 메타볼의 장점을 수용하면서 적은 수의 데이터로 평면 형태의 물체까지 모델링할 수 있는 메타볼의 확장 형태로서, 두 개의 매개변수만으로 구에서 정육면체까지 자유로운 확장이 가능하다[2]. 본 논문은 메타큐브를 이용하여 볼륨 데이터로부터 3차원 물체를 자동 모델링하는 방법을 제안한다. 제안 방법은 볼륨 데이터의 형태에 기반하여 분할된 볼륨 트리를 이용하여 비교적 빠른 시간에 볼륨 데이터로부터 비슷한 형태의 3차원 물체를 재구성하는 메타큐브 집합을 추출한다. 다양한 볼륨데이터에 대한 실험 결과를 제시함으로써 제안 방법의 효용성을 증명한다.

1. 서론

음함수 곡면 모델은 다항식 형태의 수식 표현에 의한 매개 변수 곡면 표현의 형태 규칙성에서 벗어나 다양한 형태의 변형이 가능한 모델이다[1,3]. 기존의 음함수 곡면 모델에서 사용되어온 구조 요소는 점요소로서 3차원 위치 정보로 자기장, 전기장과 같은 필드 영역을 정의할 수 있다. 그러나 모델링하고자 하는 부정형 물체의 형태가 항상 곡면으로 구성되는 것은 아니므로 점요소만으로 부정형 물체를 모델링하기에는 한계가 있다. 메타볼과 같은 점 형태의 구조요소는 구형과 같은 곡면 형태를 적은 양의 데이터로 쉽게 정의할 수 있으나 다면체와 같은 평면적 요소를 모델링하기 위해서는 많은 양의 데이터가 요구되어진다.

평면적 형태를 포함하는 물체를 모델링하기 위해 제안된 음함수 곡면 모델의 구조요소인 메타큐브는 메타볼의 확장 형태로서 두 개의 매개변수만으로 구형의 곡면부터 정육면체의 자유자재로 표현할 수 있어 적은 양의 데이터로 복잡한 형태의 부정형 물체를 표현할 수 있다는 장점을 갖는다[2].

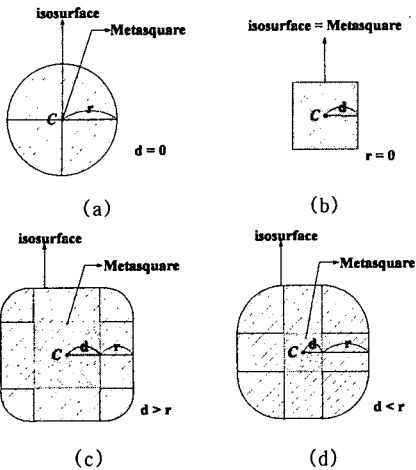
본 논문에서는 볼륨 데이터로 표현된 부정형 물체로부터 구조요소인 메타큐브 집합을 추출하는 자동 생성 알고리즘을 제안한다. 제안 방법은 부정형 물체의 형태에 기반하여 추출된 분할점인 임계점을 이용하여 볼륨 데이터에 적합하는 메타큐브 집합을 자동 생성한다.

2. 메타큐브

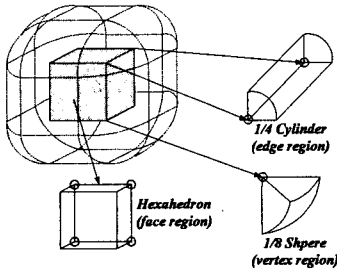
메타큐브는 기존 구조 요소들이 점요소이기 때문에 발생하는 형태적 제약을 해결하기 위해 구조요소 자체 형태를 가변크기의 정육면체로 설정함으로써 정육면체부터 구까지 다양한 형태의 필드를 형성할 수 있도록 하였다[2].

메타큐브는 구조요소의 위치 정보를 나타내는 중심점 C 와 C 를 중심으로 정육면체인 큐브를 형성하는 큐브 반경 d , 필드값이 존재하는 최대 범위를 나타내는 필드반경 R , 그리고 메타큐브의 밀도값 w 의 네가지 요소로 구성된다. <그림 1>은 정육면체의 크기를 결정하는 d 와 필드함수가 존재하는 최대 범위 R 을 조정하여 얻을 수 있는 다양한 형태의 등가곡면의 형태를 2차원으로 나타낸 것이다. 메타큐브의 2차원 형태인 메타스퀘어의 정사각형의 반경 d 가 0이 되면 정사각형의 크기가 0이 되므로 결국 위치정보만을 나타내는 점과 동일해져 메타스퀘어에서 동일한 거리에 있는 점들은 원형의 등가곡면을 형성한다(a). 그와 반대로 정사각형의 크기가 0이 아니고 최대 필드 반경 R 이 0이라면 메타스퀘어만이 필드를 형성하므로 결국 사각형의 형태를 표현하게 된다(b). 정사각형의 크기와 필드 반경을 적절히 조정함으로써 그림과 같이 원형과 사각형의 중간 형태들 또한 표현할 수 있다(c)(d). <그림 2>는 메타큐브의 구조와 각 영역의 등가곡면 형태를 도형으로 표현한 것이다.

메타큐브의 필드함수로는 2차 연결도(C^2 continuity)를 갖는 [3]의 6차 함수를 사용하였고, sturm sequence 방법을 이용하여 렌더링을 위한 등가곡면의 위치를 찾았다[4].



<그림 1> 메타스퀘어의 다양한 등가곡면 형태



<그림 2> 메타큐브의 구조

3. 메타큐브 자동생성 알고리즘

본 논문에서는 메타큐브 자동생성을 위한 볼륨 데이터로 물체의 내부는 1, 외부는 0으로 표현된 이진 볼륨 데이터를 사용하였다.

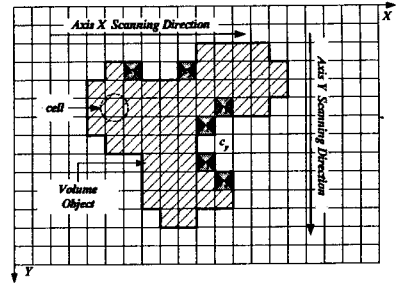
3.1 볼륨의 형태 기반 분할 방법

메타큐브를 자동생성하기 위해 먼저 볼륨으로부터 메타큐브를 형성할 수 있는 영역을 구분하는 클러스터링이 필요하다. 이러한 영역 구분을 위해 볼륨을 일정한 형태의 트리로 구성한다.

제안 방법은 볼륨의 형태에 기반하여 트리를 생성할 수 있도록 트리 분할의 분할점이 될 임계점(critical point)들을 추출하여 사용한다. 볼륨을 서브볼륨으로 분할하는 기준이 되는 점이 볼륨의 오목한 부분이라는 점에 착안하여 볼륨으로부터 오목한 특성(concavities)을 갖는 위치들을 임계점으로 선택될 후보 셀로 선정한다. 폐곡면으로 형성된 물체의 볼륨은 항상 외부에서 내부로 들어갈때 0에서 1로, 그리고 내부에서 외부로 나올 때 1에서 0으로 셀 값이 변하므로 첫번째와 마지막 셀 값의 변화는 후보에서 제외한다.

<그림 3>은 2차원 볼륨 데이터로서 그림에서 □은 볼륨 오브젝트의 내부를 표시하는 셀을 의미하고 □은 외부를 표시하는 셀을 나타낸다. ■은 각 축의 스캐닝에 의해 선정된 임계점의 후보셀을 나타낸다. x_1 과 x_2 셀은 X축을 따

라 스캐닝할 때 선정된 후보셀로서, 이 셀들이 임계점으로 선정되면 볼륨을 나눌 절단 축(Cutting Axis)은 X축이 된다. y_1, y_2, y_3, y_4 는 Y축을 따라 스캐닝할 때 선정된 후보셀로서, 이 셀들이 임계점으로 선정되면 볼륨을 나눌 절단 축은 Y축이 된다.



<그림 3> 볼륨 데이터의 후보셀 선정

오목한 특성의 셀들이 볼륨 데이터에서 인접해 있기 때문에 후보 셀이 중복되거나 인접한 후보셀들이 모두 추출될 가능성이 크다. 인접한 후보 셀들 중 볼륨 분할의 기준이 될 셀은 물체가 가장 오목한 즉 절단 축으로서 연속된 내부 셀들의 수인 런(run)의 길이가 가장 작은 것이 될 것이다. <그림 3>에서 y_1, y_2, y_3, y_4 는 y_1, y_2 와 y_3, y_4 가 절단 축인 Y축에 대해 인접해 있다. 모두 임계점으로 선택하면 볼륨 데이터를 X축으로 긴 서브 볼륨을 만든다. 따라서 볼륨 오브젝트의 중심점에 가깝고 런 길이가 작은 y_2 와 y_3 만 임계점으로 선정된다. 또한 중복 요소가 제거된 후보 셀들에 대해 절단 축에 대한 런 길이의 형태를 분석함으로써 임계점의 수를 최소화 할 수 있다.

3.2 볼륨 트리로부터 큐브 추출

볼륨에 적합하는 메타큐브의 수를 최소화하기 위해 우선 일 노드의 셀들을 최대한 포함하는 큐브를 찾아 그 큐브를 기반으로 메타큐브를 생성한다. 되도록 많은 셀이 큐브에 포함되도록 볼륨 트리의 일 노드들을 포함한 내부 셀의 수가 많은 것부터 적은 것의 순서로 정렬하여 내부 셀의 수가 가장 많은 노드부터 큐브를 생성한다.

노드에서 메타큐브의 구조 자체에 해당하는 큐브로 확장될 초기 셀은 되도록 큰 큐브를 형성하기 위해 노드의 중심에 있는 셀을 선택함으로써 시작한다. 노드의 중심 셀이 이미 다른 메타큐브의 생성에 포함된 경우는 노드의 내의 셀들을 볼륨의 표면에서 내부로 조사해가며 셀 값이 1인 첫번째 셀을 초기 셀로 선정한다. 초기 셀의 큐브 확장은 인접한 셀들을 조사하여 확장가능성을 결정함으로써 이루어진다.

큐브의 확장가능성은 각 축에 대해 큐브의 최대값의 +1 증가 방향, 큐브의 최소값의 -1 증가 방향의 6 방향에 대해 조사한다. 6 방향의 확장 가능성은 확장가능벡터에 저장하는데 각 방향으로 확장 가능한 경우 해당 원소 값은 0보다 큰 값을 가지며, 확장이 불가능한 경우 -1값을 갖는다. 확장 가능한 경우 확장 벡터의 원소는 0~3의 정수값 중 하나를 갖는데 각 정수값은 현재 검사하고 있는 축의 증가 방향

에 있는 셀들 중 모서리에 있는 네 개의 셀에 대한 인덱스 값이다. 확장될 사각형 형태의 셀 그룹의 모서리 부분의 4개의 모서리 부분 중 확장 가능한 첫 번째 모서리의 인덱스가 확장가능벡터의 원소값이 된다. X축의 최대값의 +1 증가 방향의 셀들에 대한 모서리 셀의 인덱스 값은 다음과 같다 : $(Max_x+1, Min_y-1, Min_z-1)$ 셀은 0, $(Max_x+1, Min_y-1, Max_z+1)$ 셀은 1, $(Max_x+1, Max_y+1, Min_z-1)$ 셀은 2, 그리고 $(Max_x+1, Max_y+1, Max_z+1)$ 셀은 3값을 갖는다.

큐브의 확장과 이동은 확장가능벡터를 이용한 가중방향벡터를 계산함으로써 이루어진다. 예를 들어 확장가능벡터의 값이 $(0, 1, 0, -1, 2, 1)$ 이라고 하자. 이 확장가능벡터의 각 원소의 인덱스값에 해당하는 방향을 가중 값으로 하는 가중방향벡터는 $(1, -1, -1)$ 이 되며 이것은 큐브가 X축 최대값 +1, Y축 최소값 -1, Z축 최소값-1 방향으로 확장가능함을 의미한다. 확장이 불가능한 경우는 확장이 가능한 축 방향으로 이동을 한다. 큐브의 이동은 확장 가능성을 높이기 위한 것으로 현재 위치에서의 확장이 불가능한 경우, 큐브의 전체 위치를 이동시켜 확장성을 다시 조사한다.

3.3 큐브의 메타큐브 확장

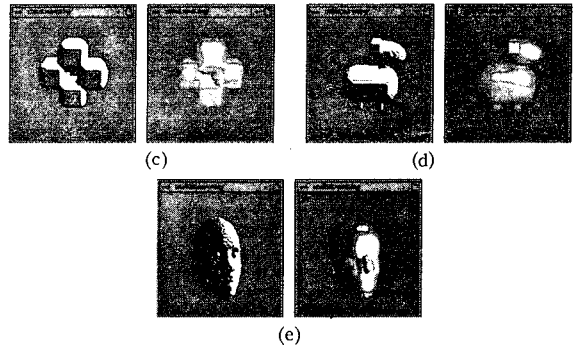
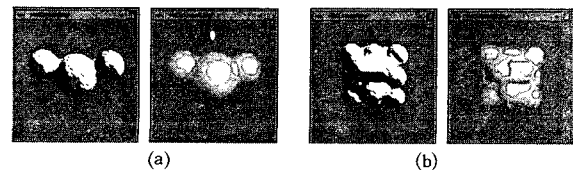
메타큐브는 큐브 반경에 의한 정육면체 뿐 아니라 필드반경에 의한 곡면을 포함할 수 있으므로 최종 결정된 큐브로부터 최대 구형까지의 필드반경 확장을 시도한다. 확정된 큐브의 한 변의 절반 길이를 메타큐브의 큐브 반경 d 로 하면 큐브의 중심에서 모서리 셀까지의 거리는 $\sqrt{3}d$ 이므로 확정된 큐브를 포함하는 구형 확장은 큐브의 에지부분에서 최대 $(\sqrt{3}-1)d$ 거리 내의 셀들을 조사함으로써 이루어진다.

구형 확장은 확정된 큐브에서 동일한 거리의 셀들을 모두 조사하여야 하며, 구의 곡률에 따라 중심에서 거리가 멀어질 수록 조사할 셀의 수는 줄어들어야 한다. 메타큐브는 확장된 필드반경 r 에 대해 $r/(\sqrt{3}-1)$ 조정값을 더하고, 큐브반경 d 에 대해 같은 값을 뺌으로써 셀들의 형태에 근사하는 메타큐브를 얻을 수 있다.

음함수 곡면의 블렌딩(blending) 특성을 고려하여 메타큐브 형성에 셀의 중복을 허용하고 곡면의 오차를 고려하여 외부 셀을 허용함으로써 추출되는 메타큐브의 수를 줄일 수 있다[5].

4. 실험 결과

제안한 볼륨 데이터의 자동 모델링 방법은 175MHz, 128M M/M의 SGI indigo2 R10000 시스템 상에서 구현하여 시물레이션 하였다. <그림 4>의 각 이미지들의 왼쪽은 실험에 사용된 볼륨 데이터를 마칭 큐브를 이용하여 렌더링한 것이고, 오른쪽은 제안한 방법을 이용하여 추출된 메타큐브들을 렌더링하여 얻은 이미지들이다. 각각의 이미지에 대한 모델링 성능평가는 <표 1>에 나타내었다.



<그림 4> 모델링 이미지들

<표 1> 볼륨데이터의 모델링 성능평가

	볼륨데이터 해상도	삼각형 수(개)	마칭 큐브 렌더링 시간(sec)	모델링 시간(sec)	메타큐브 수(개)	메타큐브 렌더링 시간(sec)
(a)	64× 64× 64	10260	110	0.77	17	31.31
(b)	64× 64× 64	19184	104	0.82	68	50.24
(c)	64× 64× 64	9616	108	0.40	28	17.49
(d)	128× 128× 128	38136	223	6.78	49	34.27
(e)	128× 128× 128	59964	199	13.74	142	87.64

5. 결론

음함수 곡면 모델의 요소를 이용한 볼륨 데이터의 자동생성 알고리즘은 1991년 Muraki에 의해 제안되었다[6]. 그러나 이 방법은 최적화 방법을 기본으로 하여 2개의 프로세서를 갖는 TITAN3000에서도 며칠 정도의 시간을 필요로 하므로 현실적으로 적합하지 않다는 문제점이 있다. 본 논문에서는 주어진 볼륨 데이터의 표면을 잘 적합하는 메타큐브 집합을 자동생성하는 알고리즘을 제안하였다. 제안한 방법은 하나의 셀에서 시작하여 메타큐브의 형태로 셀들을 그룹화하는 상향식(bottom-up) 알고리즘으로서, 볼륨 형태를 복원시킬 수 있는 메타큐브를 빠르게 생성할 수 있다. 추출된 메타큐브들의 집합에 최적화 알고리즘을 적용함으로써 볼륨 데이터를 더욱 잘 적합하는 메타큐브들을 얻을 수 있다.

6. 참고 문헌

[1]. 조청운, 윤경현, "메타볼 모델에 대한 광선 추적 알고리즘", 컴퓨터 그래픽스학회 논문지, Vol.1, No.1, pp.39-46, March 1995.
 [2]. 김은석, 김재정, "메타큐브 : 부정형 물체의 모델링을 위한 새로운 구조 요소", 정보과학회논문지, Vol.27, No.4, April 2000.
 [3]. 김은석, 김재정, "메타볼 모델링 향상을 위한 새로운 필드합수와 메타볼 모델에서의 빠른 광선 추적 알고리즘", 한국정보과학회 학술발표 논문집, Vol.23, No.1, pp739-742, 1996.
 [4]. 김은석, 김재정, " Sturm Sequence를 이용한 메타볼 렌더링에 관한 연구", 한국정보과학회 가을 학술발표 논문집, Vol.23, No.2, pp.437-440, 1996.
 [5]. Jay Jeong Kim, Eun-Seok Kim, Seung-Ki Park, "An Automatic Description of Volumetric Objects using Metaballs", Computer Graphics International '97 Conference Proceedings, pp.65-73, June 1997.
 [6]. Muraki, S. "Volumetric Shape Description of Range Data using 'Blobby Model'", ACM Computer Graphics, Vol25, No.4, pp.227-235, July 1991.