

음함수 곡면의 날카로운 형상 가시화를 위한 확장 Adaptively Sampled Distance Fields 방법

차주환*, 이규열**, 김태완**

Extended Adaptively Sampled Distance Fields Method for Rendering Implicit Surfaces with Sharp Features

Cha, J.-H.*, Lcc, K.-Y.** and Kim, T.-W.**

ABSTRACT

Implicit surfaces are geometric shapes which are defined by implicit functions and exist in three-dimensional space. Recently, implicit surfaces have received much attention in solid modeling applications because they are easy to represent the location of points and to use boolean operations. However, it is difficult to chart points on implicit surfaces for rendering. As efficient rendering method of implicit surfaces, the original Adaptively Sampled Distance Fields (ADFs) method^[1] is to use sampled distance fields which subdivide the three dimensional space of implicit surfaces into many cells with high sampling rates in regions where the distance field contains fine detail and low sampling rates where the field varies smoothly. In this paper, in order to maintain the sharp features efficiently with small number of cells, an extended ADFs method is proposed, applying the Dual/Primal mesh optimization method^[2] to the original ADFs method. The Dual/Primal mesh optimization method maintains sharp features, moving the vertices to tangent plane of implicit surfaces and reconstructing the vertices by applying a curvature-weighted factor. The proposed extended ADFs method is applied to several examples of implicit surfaces to evaluate the efficiency of the rendering performance.

Key words : Surfaces, Rendering, Adaptively Sampled Distance Fields, Solid Modeling

1. 서 론

1.1 연구 배경

컴퓨터 그래픽스 및 Computer Aided Design(CAD) 분야에서 임의의 물체를 표현하기 위해 일반적으로 쓰이는 방법으로는 매개변수 곡면(parametric surfaces)을 사용하는 방법과 음함수 곡면(implicit surfaces)을 사용하는 방법이 있다. 매개변수 곡면은 삼차원 공간의 각 좌표를 매개변수를 이용하여 표현하는 곡면을 말하며, 다각형(polygon) 곡면이나 스플라인(spline) 곡면, trimmed NURBS 곡면과 같은 범주의 곡면들을

포함한다. 매개변수 곡면은 매개변수의 값을 이용하여 표면의 점을 일괄적으로 추출해 낼 수 있기 때문에 가시화하기 쉽고, 따라서 삼각화(tessellate), 분할(subdivide)과 같은 기능을 효과적으로 사용할 수 있는 장점이 있다. 또한 매개변수 값의 범위를 지정하여 가장자리(boundary)를 규정하는 것도 간단하게 이루어진다^[3]. 특히, 가공을 해야 되는 물체를 설계하는 경우와 같이 CAM을 고려한 형상 모델의 표현 방법으로 많이 사용된다. 그 외에도 여러 가지 장점들이 많기 때문에 지금까지 컴퓨터 그래픽스 및 CAD 분야에서는 매개변수 곡면을 사용한 모델링 방법이 주로 사용되었다. 그러나 매개변수 곡면은 대부분 B-rep (Boundary-representation)을 이용하여 기하학적 정보를 저장하기 때문에 복잡한 자료 구조를 가질 수 밖에 없으며, 불리안 연산(Boolean operation)을 수행하는데 많은 계산과 시간이 필요하고 때로는 수치적으로 불안정하다는 단점이 있다. 또한 임의의 점이 물체의 내부에 있는지 외부에 있는지를 판별하는 것도 어려운

*서울대학교 조선해양공학과 대학원
**중신회원, 서울대학교 조선해양공학과 및 해양시스템공학 연구소
- 논문투고일: 2003. 10. 01
- 심사완료일: 2004. 09. 16

이 논문은 2003년 한국CAD/CAM학회 학술발표회 학술 발표상 수상 논문임.

문제이다. 따라서 매개변수 곡면을 사용한 모델링 방법은 한계에 도달하게 되었고, 이를 극복할 수 있는 새로운 기술에 대한 논의가 진행되고 있으며, 음함수 곡면을 이용한 모델링 방법이 새로운 패러다임으로 제기되고 있다^[1].

1.2 음함수 곡면을 이용한 모델링 연구 현황

음함수 곡면은 음함수식 $f(x, y, z) = 0$ 을 이용하여 곡면을 표현한 것으로서 주어진 음함수식을 만족하는 삼차원 점들로 이루어지는 곡면을 말한다. 음함수 곡면을 이용하여 물체를 표현할 경우 임의의 점에 대한 함수값의 부호를 이용하여 볼체의 내/외부를 쉽게 판별할 수 있기 때문에 Solid 볼체로서의 특징을 가질 수 있으며^[2], 여러 물체를 나타내는 음함수식 간의 최대·최소 및 Revachev operation^[5,6]을 이용하여 불리안 뿐만 아니라 블렌딩(blending) 연산까지도 간단하게 수행할 수 있는 장점이 있다. 또한 음함수식만 저장하면 곡면을 표현할 수 있기 때문에 가볍고 간단한 자료 구조를 가지게 된다. 이러한 장점 때문에 현재 컴퓨터 그래픽스 분야에서는 이미 많은 연구가 진행되고 있으며, 대표적으로 Mitsubishi Electric Research Laboratory에서는 음함수 곡면을 이용한 3차원 가상 조각 소프트웨어인 KIZAMU를 연구 및 개발하였고^[7], Sensible Devices사에서는 음함수 곡면을 이용한 모델링 툴인 FreeForm을 상용화하였다^[8]. 마찬가지로 SGDL System사에서도 음함수 곡면을 이용한 모델링 툴인 SGDL Script를 개발하여 상용화하고 있으며^[9], 프랑스의 INRIA(Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique) 연구소에서는 음함수 곡면을 이용하여 실제와 같은 움직임을 표현할 수 있는 애니메이션 방법에 대해서 연구 중에 있다^[10]. 또한 CAD 분야에서도 음함수 곡면을 이용한 연구가 진행 중인데, 대표적으로 일본의 이화학연구소(RIKEN)에서는 음함수 곡면을 이용하여 CAD/CAM/CAE을 통합할 수 있는 볼륨 CAD 시스템을 2001년부터 국책 과제로 연구 및 개발 중에 있다^[11].

1.3 본 논문의 연구 내용 개괄

그러나 음함수 곡면은 표면에 있는 점을 일괄적으로 추출하기 어렵기 때문에 가시화가 어렵다는 단점이 있다. 음함수 곡면을 가시화하는 일반적인 방법으로는 sampled distance fields를 이용하는 방법이 있는데, 이 방법은 음함수 곡면에 이르는 거리(distance) 값을 이용하여 음함수 곡면이 존재하는 삼차원의 공간을 여러 개의 균일 셀(cell; 정육면체)로 분할

(subdivide)하고, 곡면이 지나가는 셀을 기반으로 가시화하기 위한 표본점을 추출하는 것(sampling)이다. 이 중, 균일한 셀 분할(Regularly sampled distance fields) 방법은 음함수 곡면이 지나가는 셀을 무조건 균일하게 분할하는 방법으로서, 분할할수록 셀의 수가 기하급수적으로 증가하므로 계산량이 많아지기 때문에 빠른 가시화가 어려우며, 메모리의 한계 때문에 물체를 정밀하게 표현하는데 제한적일 수 밖에 없다. 반면 Adaptively Sampled Distance Fields(ADFs) 방법^[12]은 곡률이 큰 부분에 대해서는 많은 개수의 셀로 분할하고, 평평한 부분에 대해서는 적은 개수의 셀로 분할하는 선택적인 방법을 사용하여 계산량을 줄이고, 물체를 더욱 정밀하게 표현할 수 있게 하였다.

ADFs 방법을 사용하면 곡률이 큰 부분을 더 많은 셀로 분할하여 표본점을 추출하기 때문에 날카로운 형상을 효과적으로 가시화할 수 있기는 하지만, 적은 개수의 셀로 분할하였을 경우에는 날카로운 형상에서 표본점을 추출할 경우가 상대적으로 적기 때문에 효과적으로 가시화하는데 어려움이 있다. 이에 본 논문에서는 균일한 셀 분할 방법 중의 하나인 Marching Cube 방법^[13]에 적용되었던 Dual/Primal 메쉬 최적화 방법^[14]을 기존 ADFs 방법에 적용하여 확장 ADFs 방법을 제안한다. 즉, 균일하게 셀을 분할하는 방법에 사용된 메쉬 최적화 방법을 선택적인 셀 분할 방법에 적용하는 것이다. Dual/Primal 메쉬 최적화 방법이란 음함수 곡면의 접면 쪽으로 점을 이동하고, 곡률 가중치로 점을 재구성함으로써 날카로운 형상을 효과적으로 가시화하는 방법이다.

1.4 본 논문의 구성

2장에서는 음함수 곡면의 가시화 방법에 대한 관련 연구 현황을 다루고, 3장에서는 음함수 곡면의 장점을 매개변수 곡면과 비교한다. 4장에서는 기존 ADFs 방법에 대해 소개하고, 5장에서는 Dual/Primal 메쉬 최적화 방법을 기존 ADFs에 적용한 확장 ADFs 방법에 대해 자세하게 다루고, 6장에서는 확장 ADFs 방법을 여러 예제에 대해 적용해 본 결과를 보여준다.

2. 관련 연구 현황

임의의 곡면을 가시화하기 위해서는 곡면의 표면에 있는 점들을 일괄적으로 추출해 내어야 한다. 음함수 곡면에서 곡면의 표면을 이루고 있는 점들은 음함수식 $f(\mathbf{p}) = 0$ 을 만족하는 점 \mathbf{p} 들인데, 임의의 점이 음함수식을 만족하는지 안하는지는 알 수 없지만, 만족하

는 점들을 일괄적으로 추출하는 것은 어려운 문제이다.

따라서 음함수 곡면을 가시화하는 방법으로 제시된 것이 곡면의 표면을 지나는 표본점(sample point)을 추출하는 방법이다. 표본점을 추출하기 위해 이차원에서 격자 모양을 만드는 것과 같은 원리로, 삼차원 공간을 정육면체 모양의 여러 개의 셀(cell)로 분할하는 방법이 사용되었는데, 이러한 방법을 sampled distance fields 방법이라고 부른다. 초기에 사용되었던 방법은 균일한 셀 분할(regularly sampled distance fields) 방법으로서 Lorensen과 Cline이 고안한 Marching Cube 방법^[10]과 Suffern^[13-15]의 방법인데, 이 방법들은 삼차원 공간을 균일한 크기의 셀로 분해하여 표면을 지나는 셀을 추출한 다음, 그 셀들로부터 표면을 근사하는 삼각형을 구해내는 방법이다. 그러나 균일한 크기의 셀로 분해하는 경우에는 표면의 점들을 효과적으로 추출할 수 없을 뿐 아니라 불필요한 점들을 추출해서 메모리를 낭비할 수도 있다. 또한 신뢰할 만큼 표본점을 추출하기 위해서는 셀을 균일하게 작게 나누어야 하고 따라서 셀의 수가 기하급수적으로 증가하기 때문에 빠른 가시화가 어렵게 된다.

이러한 단점을 극복하기 위해 고안된 방법이 선택적으로 셀을 분할하는 방법인 Adaptively Sampled Distance Fields(ADFs) 방법^[11]이다. ADFs 방법에 대해서는 4장에서 자세하게 설명하고, 본 논문에서는 이를 구현하고, 몇 가지 예제에 대해 적용해 보았다.

한편 Y. Ohtake와 A. Belyaev은 Marching Cube 방법^[12]에 의해 생성된 삼각 메쉬를 수정하여 더욱 날카로운 형상이 잘 나타나도록 하는 방법인 Dual/Primal 메쉬 최적화 방법^[2]을 최근에 발표하였다. 본 논문에서는 Dual/Primal 메쉬 최적화 방법을 기존 ADFs에 적용하여 적은 개수의 셀로 날카로운 형상을 효과적으로 가시화할 수 있는 확장 ADFs 방법을 제안하고 몇 가지 예제에 대해 적용하였다.

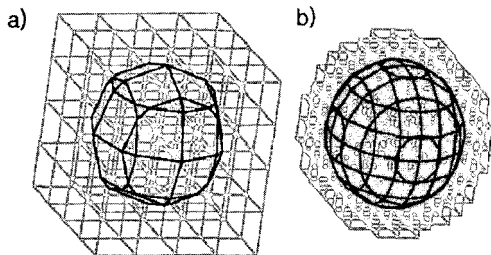


Fig. 1. An example of the regularly sampled distance fields method applied to unit sphere^[10]. a) for few cells, b) many cells.

3. 음함수 곡면(Implicit surfaces)

음함수 곡면이란 음함수식 $f(x, y, z) = 0$ 을 이용하여 곡면을 표현한 것으로서 주어진 음함수식을 만족하는 삼차원 점들로 이루어지는 곡면을 말한다. 예를 들어 이차원의 단위 원을 매개변수 곡선으로 표현한다면 $S = \{(x, y) | x = \cos\theta, y = \sin\theta, \theta \in [0, 2\pi]\}$ 과 같이 나타낼 수 있고, 음함수 곡선으로 표현한다면 $S = \{(x, y) | 1 - (x^2 + y^2) = 0, x, y \in \mathbb{R}^2\}$ 과 같이 나타낼 수 있다.

음함수 곡면이 매개변수 곡면에 비해 뛰어난 주된 장점은 다음과 같다.

3.1 물체의 내/외부 판단 여부

음함수 곡면의 경우에는 음함수식 $f(\mathbf{p})$ 에 점 \mathbf{p} 를 넣었을 때의 부호에 따라 다음과 같이 분류할 수 있다.

$$\begin{cases} f(\mathbf{p}) > 0 & \text{- 내부} \\ f(\mathbf{p}) = 0 & \text{- 경계} \\ f(\mathbf{p}) < 0 & \text{- 외부} \end{cases}$$

부호를 판단하는 정도의 간단한 계산으로 물체의 내/외부 판단이 가능하며 내/외부 구분이 자연스럽게 이루어지기 때문에 Solid 모델로서의 특징을 가지게 된다.

매개변수 곡면의 경우에는 점 \mathbf{p} 에서 레이(ray)를 쏘아서 물체의 표면과 만나는 교차점(intersection point)의 개수가 홀수이면 내부이고 짝수이면 외부라고 판단한다. 이러한 방법은 교차점을 계산하는 복잡한 과

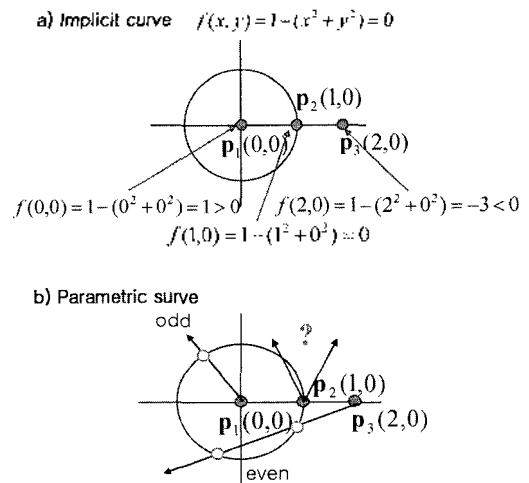


Fig. 2. An example of the distinction between interior and exterior of a two-dimensional unit circle. a) implicit curve, b) parametric curve.

정이 들어가야 하기 때문에 시간이 오래 걸릴 수 밖에 없고, 점 **p**가 경계에 있을 경우에는 레이의 방향에 따라 교차점의 개수가 달라지게 되는 문제점이 있다.

3.2 불리안 연산(Boolean operation) 및 블렌딩(Blending)

음함수 곡면의 경우 합집합(union), 교집합(intersection), 차집합(subtraction) 등의 불리안 연산 수행은 다음과 같은 수의 대소반으로 간단하게 이루어지며 정확한 값을 구할 수 있다.

$$\begin{cases} \max(f_1(x, y), f_2(x, y)) & \text{- 합집합(union)} \\ \min(f_1(x, y), f_2(x, y)) & \text{- 교집합(intersection)} \\ \min(f_1(x, y), -f_2(x, y)) & \text{- 차집합(subtraction)} \end{cases}$$

예를 들어 두 단위 원과의 교집합을 계산하는 과정은 Fig. 3과 같다.

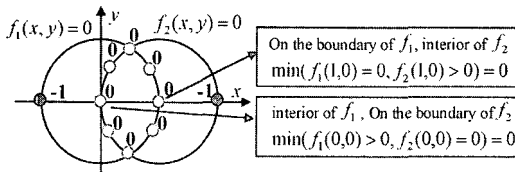


Fig. 3. The intersection of two unit circles in implicit form.

또한, Rvachev operation^{15,16}을 이용해도 간단하게 불리안 연산을 수행하여 두 음함수 곡면을 하나의 음함수 곡면으로 만들 수 있다. 더 나아가 이를 이용하면, 매개변수 곡면에서는 어렵게 계산될 수 밖에 없는 블렌딩(blending)작업을 간단하게 수행할 수 있다.

$$\begin{aligned} f_1 + f_2 + \sqrt{f_1^2 + f_2^2} & \text{- 합집합(union)} \\ f_1 + f_2 - \sqrt{f_1^2 + f_2^2} & \text{- 교집합(intersection)} \\ f_1 \cap f_2 & \text{- 차집합(subtraction)} \end{aligned}$$

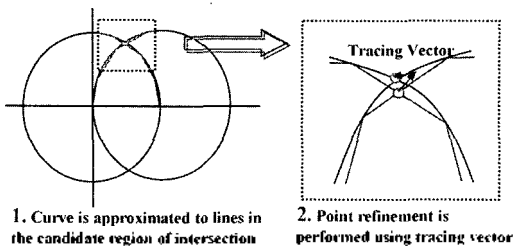


Fig. 4. The intersection of two unit circles in parametric form using tracing algorithm.

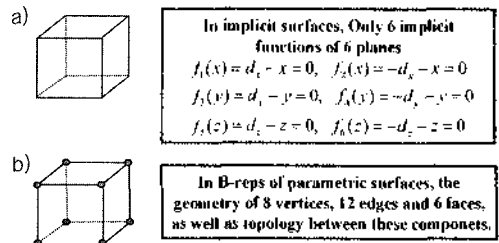


Fig. 5. The comparison of data structure about rectangular hexahedron between a) implicit surfaces and b) B-rep of parametric surfaces.

매개변수 곡면의 경우에는 불리안 연산을 수행하기 위해 곡면간 교차계산(Surface/Surface Intersection; SSI)을 수행해야 한다. 대표적인 곡면간 교차계산 방법 중의 하나인 Tracing algorithm을 예로 들어 설명하면 Fig. 4와 같다.

곡면간 교차 계산을 수행하면서 근사화 과정을 거치기 때문에 수치적으로 부정확하며 계산량이 많아지고, 특별한 경우에 대해서는 값을 찾을 수 없는 불안정성을 가지고 있다.

3.3 간단한 자료구조

음함수 곡면을 이용하여 물체를 표현할 경우 자료구조 안에 음함수 곡면을 이루는 음함수식만 가지고 있으면 필요할 경우 계산(evaluation)이 가능하기 때문에 자료구조가 간단하다. 이에 반해 매개변수 곡면의 경우에는 경계면 상의 모든 꼭지점들(vertices), 모서리선들(edges), 면들(faces)의 기하학적인 정보(geometry)와 이들의 연결관계인 위상정보(topology)까지도 가지고 있어야 하기 때문에 자료구조가 무거울 수 밖에 없다. Fig. 5에서 직육면체에 대한 음함수 곡면의 자료구조와 매개변수 곡면의 자료구조인 B-rep을 비교하고 있다.

음함수 곡면은 매개변수 곡면에 비해 위와 같은 여러 가지 장점들을 가지고 있기 때문에 앞으로 각광 받을 모델링 기술이라고 할 수 있다.

4. 기존 Adaptively Sampled Distance Fields(ADFs) 방법

4.1 기존 ADFs 방법의 개요

기존 ADFs 방법¹¹의 전체 흐름도는 Fig. 6과 같다. 각 과정에 대한 자세한 내용은 4.2절, 4.3절, 4.4절에서 다룰 것이고 먼저 간단하게 설명하면 다음과 같다. 먼저 음함수식을 입력 받아서 디스턴스 필드를 생

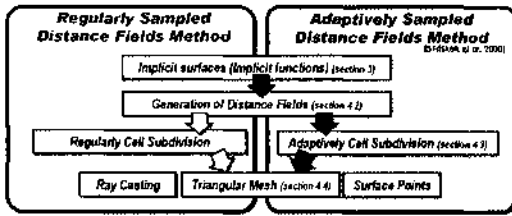


Fig. 6. The outline of the original ADFs method (marked by (↓)).

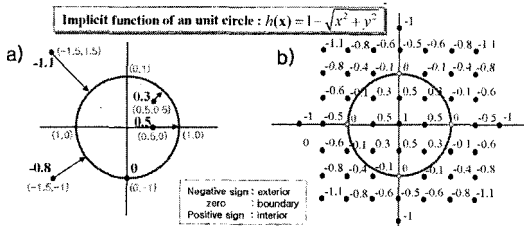


Fig. 7. An example of the distance field applied to a two-dimensional unit circle for rendering implicit surfaces. a) the minimum distance from five sample points to the curve, b) the distance field of grid.

성하게 된다. 그리고 선택적인 셀 분할을 거치고, 분할된 셀을 이용하여 삼각 메쉬를 생성하여 가시화 한다.

4.2 디스턴스 필드 생성

ADFs를 설명하기에 앞서 우선 디스턴스 필드(distance field)의 개념을 이해해야 한다.

디스턴스 필드란 공간 상의 각 점이 곡면의 표면으로부터의 최소 거리를 저장하고 있는 스칼라 필드(field)라고 할 수 있다. 즉, 곡면의 표면에 있는 점은 모두 0이라는 값을 저장하고 있으며, 곡면의 외부에 있는 점은 음(-)의 값, 곡면의 내부에 있는 점은 양(+)의 값을 저장하고 있다. 이러한 디스턴스 필드를 구하기 위해서, 점의 좌표를 입력하면 디스턴스 값을 구할 수 있는 디스턴스 함수가 사용된다. 예를 들면 Fig. 7은 이차원 단위 원의 디스턴스 함수인 $h(x) = 1 - \sqrt{x^2 + y^2}$ 을 통해서 구한 디스턴스 필드를 나타내고 있다. 이러한 디스턴스 함수는 주어진 음함수식으로부터 도출될 수 있고, 때로는 수치적인 방법을 이용하여 디스턴스 필드를 구한다.

4.3 선택적인 셀 분할

4.3.1 선택적인 셀 분할 알고리즘

주어진 음함수식으로부터 디스턴스 필드가 구해졌다면 이제 이것을 이용해 선택적으로 셀을 분할하는

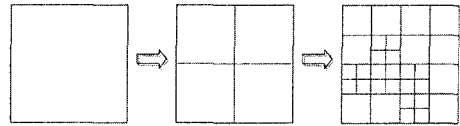


Fig. 8. A top-down approach subdividing the two-dimensional space into adaptive cells^[11].

단계로 넘어간다. 선택적인 셀 분할 방법은 최상위 수준의 루트 셀(root cell)에서 시작하여 점차 작은 셀로 분할해 나가는 방식이다.

Fig. 8은 이에 대한 이차원으로 도식화한 것이다. 이 방식은 셀을 저장하는 자료구조인 옥트리^[17]의 이웃 셀을 검색하는 양이 많고 거리(distance) 계산을 중복해서 수행해야 하는 단점이 있다. 이러한 단점들을 극복하고 더 효과적인 가시화 방법을 구현하기 위해 R. Perry와 S. Frisken은 자신들의 기존 ADFs 방법을 보완한 방법을 제시하였다^[7].

4.3.2 선택적인 셀 분할의 예

정육면체에 대해 Fig. 6의 흐름에 따라 선택적으로

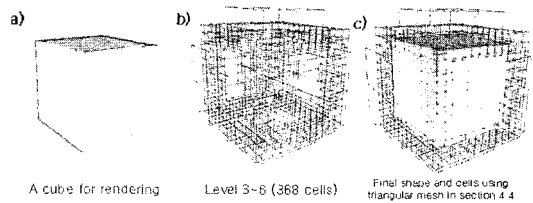


Fig. 9. An example of subdivided cells applied to a cube using the implemented the original ADFs method. a) a cube for rendering. b) 368 cells of level 3-6. c) final shape and cells using a triangular mesh in section 4.4.

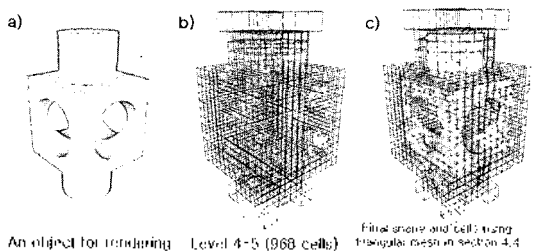


Fig. 10. An example of subdivided cells applied to an object, a combination a cube and cylinders using the implemented the original ADFs method. a) an object for rendering. b) 968 cells of level 4-5. c) final shape and cells using a triangular mesh in section 4.4.

셀을 분할 하는 과정은 다음과 같다. Fig. 5의 정육면체에 대한 음함수식을 입력받게 되고, 셀 분할 조건에 따라 셀을 분할하게 된다. Fig. 9는 이에 대한 결과이다. 마찬가지로 Fig. 10은 정육면체와 원통형이 결합된 물체에 적용한 셀 분할 결과이다.

위의 예제를 보면 알 수 있듯이 곡률이 커서 형상의 변화가 큰 모서리 같은 부분에서 더 많은 셀로 나누어진 것을 볼 수 있다.

4.4 가시화를 위한 삼각 메쉬 생성(Triangulation)

기존 ADFs 방법을 이용하여 효과적으로 셀을 분할 하였으면 이를 가시화 하기 위해 삼각형 메쉬로 만드는 과정이 필요하다. 가시화 하는 방법에는 레이 캐스팅(ray casting)과 같은 정밀한 방법부터 표면에 점들을 뿌려주는 대략적인 방법까지 여러 가지가 있지만, 많은 컴퓨터 그래픽 하드웨어가 삼각형을 그려주는 것에 최적화되어 있기 때문에 삼각 메쉬로 만들어 주는 것이 일반적이다.

여기까지가 기존 ADFs 방법^[11]에 대하여 연구한 과정이며, 이러한 삼각화 방법을 적용한 최종 예제가

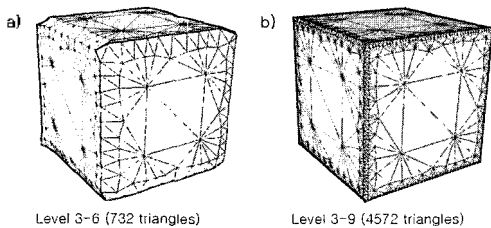


Fig. 11. An example of final shape applied to a cube using implemented the original ADFs method. a) 732 triangles of level 3-6, b) 4,572 triangles of level 3-9.

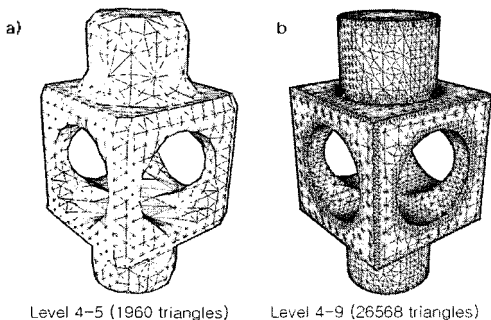


Fig. 12. An example of final shape applied to an object, a combination a cube and cylinders using implemented the original ADFs method. a) 1,960 triangles of level 4-5, b) 26,568 triangles of level 4-9.

Fig. 11, Fig. 12에 나타나 있다. 아래의 최종 예제들의 결과를 보면 기존 ADFs가 선택적으로 날카로운 형상을 작은 수의 삼각형으로 효과적으로 표현하고 있다는 것을 확인해 볼 수 있다.

5. 음함수 곡면의 날카로운 형상 가시화를 위한 확장 ADFs 방법

5.1 날카로운 형상 가시화의 요구 배경

기존 ADFs 방법으로 삼각형을 만들 경우 날카로운 부분에서는 작은 삼각형이 만들어지고 완만한 부분에서는 큰 삼각형이 만들어지기 때문에 효율적으로 날카로운 부분을 날카롭게 보이도록 가시화 해 준다. 그러나 날카로운 부분에서 셀을 더 작게 많이 분해하여 점을 많이 생성하기 때문에 날카로워 보이는 것에 불과한 것이기 때문에 일반적인 경우에는 날카로운 부분이 완벽하게 나타나는 것은 아니다. 물론 셀을 많이 분해할수록 날카롭게 보이겠지만, 그만큼 메모리 낭비가 심하게 되고 시스템에 많은 부하가 걸리게 되며 근본적인 해결 방법이라고 할 수 없다.

기존 ADFs 방법과는 별개로 Y. Ohtake와 A. Belyaev는 균일한 셀 분할 방법 중의 하나인 Marching Cube 방법^[12]에 의해 구현된 삼각 메쉬의 점들을 물체의 접면 방향으로 이동하여 날카로운 형상을 표현하는 방법인 Dual/Primal 메쉬 최적화 방법^[13]을 고안하였다. 이 방법은 크게 세 가지의 세부 항목으로 나눌 수 있는데, 첫 번째 방법은 곡면의 접면 방향으로 메쉬의 점들을 이동하는 방법이고, 두 번째 방법은 곡률 가중치에 따라 점을 재구성하는 방법이고, 세 번째 방법은 곡률이 큰 곳에 더 많은 점을 생성하는 방법이다. Dual/Primal 메쉬 최적화 방법의 전체 흐름도

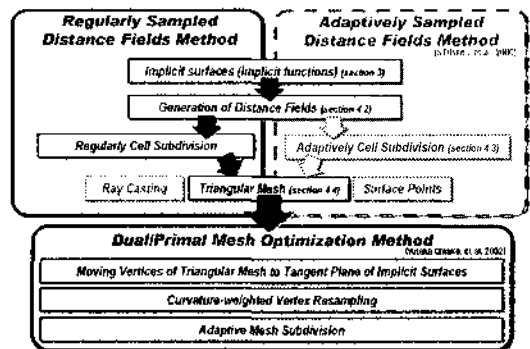


Fig. 13. The outline of Dual/Primal mesh optimization method (marked by ↓).

Table 1. Comparison of the extended ADFs method with other methods

	Original ADFs method	Dual/Primal mesh optimization method	Extended ADFs method
Adaptive cell subdivision	○	△ (Regular mesh is input first, and adaptively subdivided as a post-process)	○
Representation of a complex object which has very small sharp features	○	×	○
Sharp features	×	○	○

는 Fig. 13과 같다.

본 논문에서는 기존 ADFs 방법과는 독자적으로 연구된 위의 방법을 기존 ADFs 방법에 적용하여 적은 개수의 셀을 가지고도 효과적으로 날카로운 형상을 나타내는 확장 ADFs 방법에 관하여 연구하고 몇 가지 예제에 대해 적용해 보았다. 여기서 특별히 세 번째 방법인 곡률이 큰 곳에 더 많은 점을 생성하는 방법은 ADFs 방법의 특성(곡률이 큰 곳에 더 많은 셀을 나누는 특성)상 자연스럽게 만족이 되기 때문에 세 가지 방법 중 첫 번째와 두 번째 방법만을 적용하였다. 이 중 핵심이라고 할 수 있는 첫 번째 방법에 대해 5.2절에서 자세하게 다룬다. 이러한 확장 ADFs 방법의 전체 흐름도는 Fig. 14와 같고, Table 1은 확장 ADFs 방법과 기존 ADFs 방법 및 Dual/Primal 메쉬 최적화 방법을 비교해 놓고 있다.

5.2 곡면의 접면으로 메쉬의 점 이동 방법

Y. Ohtake와 A. Belyaev는 자신의 논문^[2]에서 곡면의 접면으로 메쉬의 점을 이동하는 방법에 대하여 이해를 돕기 위해 이차원의 경우로 설명하고 있다. 이차원의 경우라면 접면이 아니라 접선으로 메쉬의 점을 이동하는 것이라고 할 수 있다. Fig. 15는 이를 자세하게 설명하고 있다.

이 방법을 삼차원으로 확장해서 생각해 보면 우선 초기 메쉬의 중점들을 곡면 위로 이동하고 이 중점들을 연결하여 듀얼(Dual) 메쉬를 생성한다. 그 다음 이 중점들에서 곡면에 대한 접면을 구한다. 초기 메쉬의 점들을 인접한 듀얼 메쉬들의, 앞에서 구한 접면들에 대해 최소 거리인 점으로 이동하게 된다. 변경된 초기

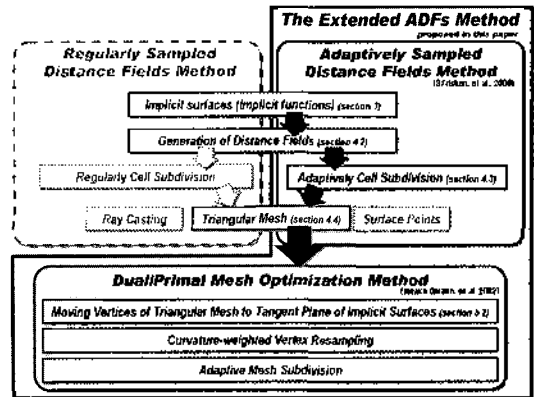


Fig. 14. The outline of the extended ADFs method proposed in this paper for rendering implicit surfaces with sharp features (marked by ↓).

의 점들을 연결하여 최종 메쉬를 생성한다.

이 방법에서 가장 정확성을 요구하는 과정은 듀얼 메쉬 점에서 곡면에 대한 접면을 구하는 과정이다. 접면을 구하는 과정에서 역행렬을 구해야 하는데, 이때 역행렬이 존재하지 않아 무수히 많은 해가 나오는 경우가 있다^[2]. 이러한 경우에 대해서 안정적으로 해를 구하기 위해 Y. Ohtake와 A. Belyaev^[2]는 Singular Value Decomposition (SVD) 방법^[18]을 사용하였으나, 이 방법은 풀고자 하는 행렬의 크기가 매우 크고 일반적인 경우에 사용되기 때문에 부겁고 복잡하다는 한계점이 있다. 또한 수치적으로 해결하기 때문에 복잡한 형상에 대해 불안정한 해를 계산해 낸다. 따라서 본 연구에서 제안한 확장 ADFs 방법에서는 이러한 한계점을 극복하기 위해, Underdetermined System of Linear Equation 방법^[19]을 사용하여 안정적으로 해결하였으며, 이 방법은 사용자가 추정값을 입력할 수 있다는 추가적인 장점을 가지고 있다. 수많은 해들 중에서 추정한 값에 가까운 해를 구해 주며 우리는 주어진 형상으로부터 적절한 추정값을 줄 수 있다.

또한, 듀얼 메쉬 점들의 음함수 곡면에 대한 접면의 식을 구하기 위해서는 법선 벡터를 구할 수 있어야 하는데, S. Frisken과 R. Perry는 자신의 논문^[11]을 통해 기존 ADFs에서 음함수 곡면에 대한 법선 벡터, 즉 그레디언트(gradient)를 근사적으로 간단하게 구할 수 있는 방법을 소개하였다.

그러나 이 방법은 어디까지나 법선 벡터를 근사적으로 구한 것에 불과하기 때문에 아주 정확한 법선 벡터를 필요로 하는 곳에서는 사용하기 어렵다. 따라서 정확한 법선 벡터를 구하기 위해 standard central-

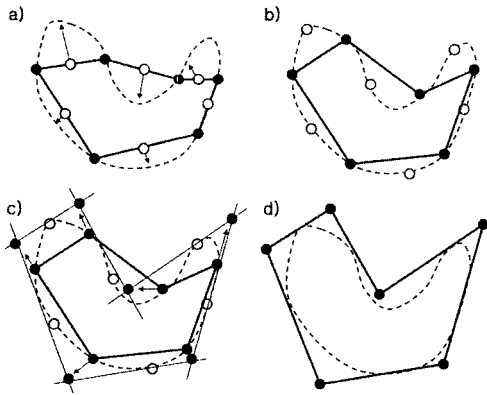


Fig. 15. A two-dimensional example of the movement of vertices of a triangular mesh to tangent planes of implicit surfaces in the Dual/Primal mesh optimization method^[2]. a), b) The vertices of the dual mesh are projected onto the implicit surfaces and form an optimized dual mesh; c) the planes tangent to the implicit surface at the vertices of the modified dual mesh are determined; and d) for each vertex of the primal mesh, its optimal position is found by minimizing the sum of the squared distances from the vertex to the tangent planes at the neighboring vertices of the modified dual mesh.

difference formula를 사용하였는데, 이 방법은 다음과 같은 식을 사용하여 수치적으로 기울기를 구하는 것이다.

$$\begin{aligned} \mathbf{n} &= \text{grad } f = (f_x, f_y, f_z) \\ &= \left(\frac{f(x+\Delta x) - f(x-\Delta x)}{2\Delta x}, \frac{f(y+\Delta y) - f(y-\Delta y)}{2\Delta y}, \frac{f(z+\Delta z) - f(z-\Delta z)}{2\Delta z} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

Fig. 16은 원기둥 모양의 구멍이 뚫린 정육면체에 대해서 기존의 ADFs의 방법과 본 연구에서 제안한 확장 ADFs 방법을 비교한 예이다. a)를 보면 면이 울퉁불퉁해 보이며 원기둥 구멍의 모서리가 각이 지어 있는 것을 볼 수 있는데, b)를 보면 완벽하게 평면으로 보이며 원기둥 구멍의 모서리도 날카롭게 잘 보이는 것을 알 수 있다.

6. 적용 예제

본 논문에서는 음함수 곡면의 효과적인 가시화 방법인 기존 ADFs 방법^[1]에 Dual/Primal 메쉬의 최적

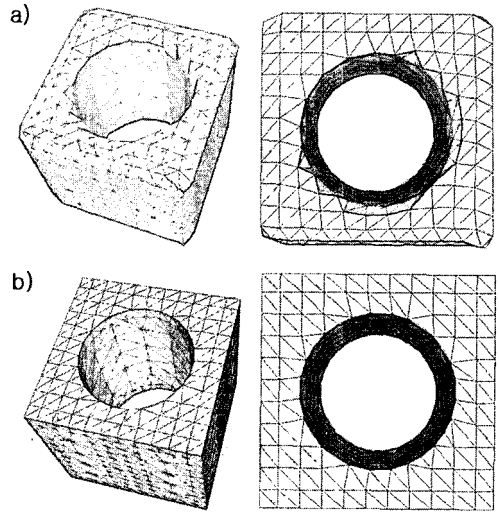


Fig. 16. The comparison of the extended ADFs method proposed in this paper for rendering implicit surfaces with sharp features by applying the algorithm that moves the vertices of a triangular mesh to tangent planes of implicit surfaces for a cube with a cylindrical hole(1,476 triangles of level 4-5). a) using the original ADFs method, b) using the extended ADFs method.

화 방법을 적용하여 제안한 음함수 곡면의 날카로운 형상 가시화를 위한 확장 ADFs 방법을 몇 가지 예제에 대해 적용해 보았다. 6.1절에서는 기존 ADFs 방법과 비교한 예제를 보여주며, 6.2절에서는 Dual/Primal 메쉬 최적화 방법과의 비교 예제를 보여줌으로써, 기존 ADFs 방법과 Dual/Primal 메쉬 최적화 방법을 연동하여 본 연구에서 제안한 음함수 곡면의 날카로운 형상 가시화를 위한 확장 ADFs 방법의 효과를 보여준다.

6.1 기존 ADFs 방법과의 비교

6.1.1 셀 개수를 같게 했을 경우에 대한 품질 비교
우선 같은 셀 개수에 대해 기존 ADFs 방법과 확장 ADFs 방법의 품질을 비교해 보았다.

Fig. 17, Fig. 18은 정육면체와 원통형이 결합된 물체에 대한 예이다. 날카로운 형상이 잘 드러나야 하는 모서리 부분을 확대해 보면 원래의 ADFs 방법은 메쉬의 점들이 정확히 모서리에 있지 않아서 울퉁불퉁해 보이는데, 날카로운 형상이 강화된 확장 ADFs 방법은 메쉬의 점들이 정확히 모서리로 이동해서 날카롭게 보인다. 따라서 적은 개수의 셀(삼각형)로도 날카로운 형상을 잘 가시화 할 수 있었다.

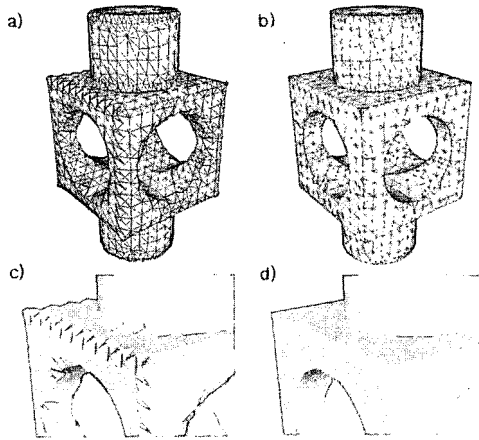


Fig. 17. The quality of the extended ADFs method proposed in this paper for rendering implicit surfaces with sharp features as compared with the original ADFs method for the same number of cells(1,432 cells of level 4-6) applied to an object, a combination a cube and cylinders. a) using the original ADFs method, b) using the extended ADFs method. c) d) detail views using each method.

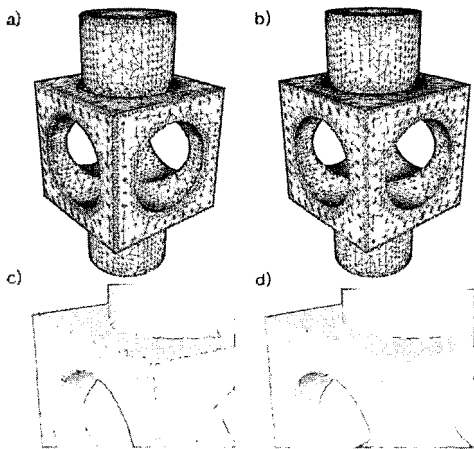


Fig. 18. The quality of the extended ADFs method proposed in this paper for rendering implicit surfaces with sharp features as compared with original ADFs method for the same number of cells (23,280 cells of level 4-9) applied to an object, a combination of a cube and cylindrical objects. a) using the original ADFs method, b) using the extended ADFs method. c) d) detail views using each method.

Fig. 19는 좀 더 복잡한 볼체(뾰족하게 파인 부분과 원통형 구멍이 있는 볼체에 대해서 비교한 예이다. 그

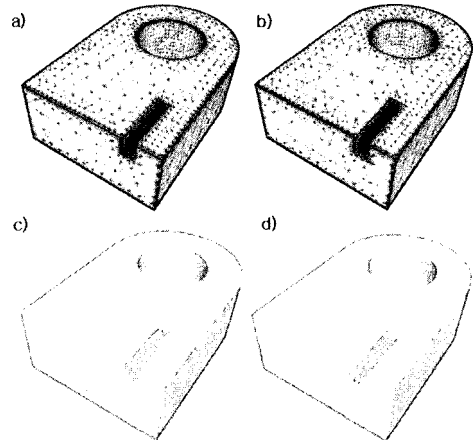


Fig. 19. The quality of the extended ADFs method proposed in this paper for rendering implicit surfaces with sharp features as compared with the original ADFs method for the same number of cells (44,096 cells of level 3-10) applied to a finely carved object with a cylindrical hole. a) triangular mesh using the original ADFs method, b) triangular mesh using extended ADFs method, c) d) shading views using each method.

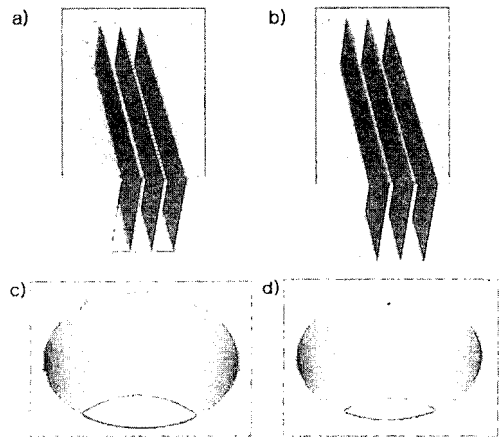


Fig. 20. The detail view of the fine carved part and the cylindrical hole of the object shown in Fig. 19. a) the fine carved part using the original ADFs method, b) a) the fine carved part using the extended ADFs method. c) the cylindrical hole using the original ADFs method, d) the cylindrical hole using the extended ADFs method.

리고 Fig. 20은 뾰족하게 파인 부분 및 원통형 구멍에 대해 확대한 모습이다. 확대한 모습을 보면 날카로운 형상이 강화된 확장 ADFs 방법이 기존 ADFs 방법에 비해 날카로운 형상을 더욱 효과적으로 가시화 하는

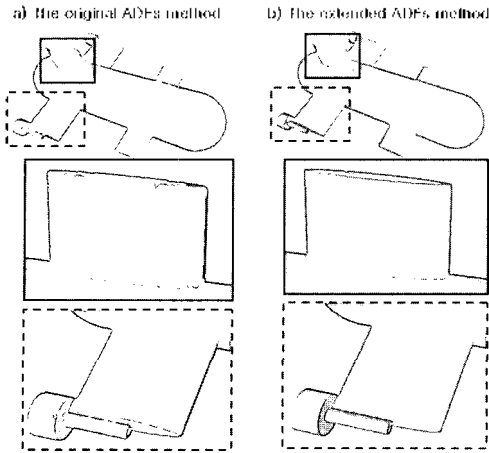


Fig. 21. The quality of the extended ADFs method proposed in this paper for rendering implicit surfaces with sharp features as compared with the original ADFs method for the same number of cells applied to AUV(Autonomous Underwater Vehicle). a) using the original ADFs method, b) using the extended ADFs method.

것을 확인해 볼 수 있다.

Fig. 21은 좀 더 실제적인 예제에 적용해 보기 위해 무인 자율 잠수정(Autonomous Underwater Vehicle; AUV)을 음함수 곡면으로 모델링하여 기존 ADFs 방법과 확장 ADFs 방법에 대해 적용해 본 결과이다. 수직 날개와 수평 날개를 확대한 모습을 보면, 확장 ADFs 방법이 기존 ADFs 방법에 비해 날카로운 형상을 효과적으로 가시화 하고 있음을 확인해 볼 수 있다.

6.1.2 품질을 같게 했을 경우에 대한 수행시간 비교

확장 ADFs 방법은 기존 ADFs 방법 수행 이후에 Dual/Primal 매쉬 최적화 방법을 적용한 것이므로, 같은 셀 개수에 대해서는 당연히 Dual/Primal 매쉬 최적화 방법을 위한 추가적인 계산 시간이 필요하기 때문에 더 많은 시간이 필요하다. 그러나 기존 ADFs 방법은 확장 ADFs 방법과 비슷한 정도의 날카로운 모서리 품질을 내기 위해 확장 ADFs 방법에 비해 더 많은 셀로 분해해야 한다. 이에 따라 기존 ADFs 방법은 셀을 분해하는데 걸리는 시간이 기하급수적으로 늘어나게 된다.

Fig. 22와 Fig. 23은 기존 ADFs 방법과 확장 ADFs 방법을 뺀쪽하게 파인 부분과 원통형 구멍이 있는 물체에 적용한 예이다. 기존 ADFs 방법으로 206,159개의 셀을 분해한 경우와 확장 ADFs 방법으로 24,951개의 셀을 분해한 경우가 품질이 서로 비슷하다는 것

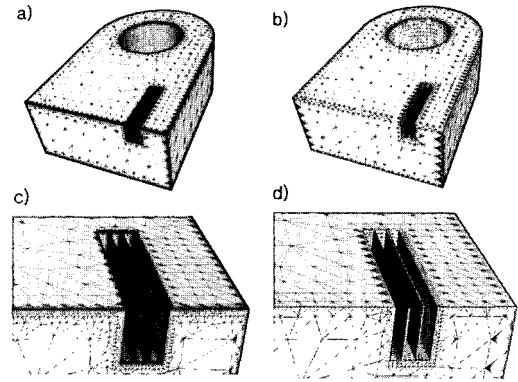


Fig. 22. An example of the extended ADFs method(24,951 cells of level 3-9) proposed in this paper for rendering implicit surfaces with sharp features as compared with the original ADFs method(206,159 cells of level 3-12) to maintain the same quality applied to a finely carved object with a cylindrical hole. a) triangular mesh using original ADFs method, b) triangular mesh using extended ADFs method, c) d) detail views using each method.

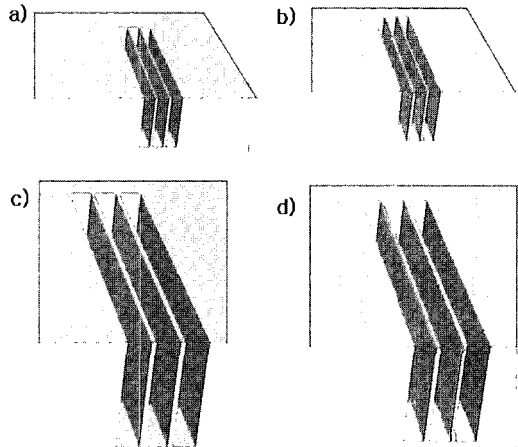


Fig. 23. The detail view of finely carved part of the object shown in Fig. 22. a) c) using original ADFs method, b) d) using extended ADFs method.

을 실험적으로 도출하였다. 이에 대해 계산 시간을 비교한 것은 Table 2와 같다.

결과를 비교해 보면, 기존 ADFs 방법에 비해 확장 ADFs 방법이 더 적은 셀로 날카로운 형상을 잘 표현할 수 있으므로, 셀 개수는 90% 정도 줄일 수 있으며(1/10), 이로 인한 시간 감소 효율도 80% 정도 된다. 따라서 확장 ADFs 방법이 품질이나 셀 개수나 시간 면에서 기존 ADFs 방법에 비해 효율적이라는

Table 2. The comparison of the execution time between the extended ADFs method (24,951 cells of level 3-9) proposed in this paper for rendering implicit surfaces with sharp features and the original ADFs method (206,159 cells of level 3-12) to maintain same quality applied to a finely carved object with a cylindrical hole. (unit : sec)

	Number of cells	Execution time of subdividing into cells	Execution time of generating triangular mesh	Execution time of enhancing sharp features	
				Step 1	Step 2
Original ADFs method	206,159 (level 3-12)	50.8	23.5	N/A	N/A
Extended ADFs method	24,951 (level 3-9)	5.9	4.8	1.5	3.0

것을 알 수 있다.

6.2 Dual/Primal 메쉬 최적화 방법^[2]과의 비교

Dual/Primal 메쉬 최적화 방법^[2]은 균일한 셀 분할 방법 중의 하나인 Marching Cube 방법에 의해 생성된 가시화를 위한 삼각 메쉬를 입력 받아 후처리 과정을 거쳐서 날카로운 형상을 강화하는 방법이다. 반면에 본 논문에서 제안된 음함수 곡면의 날카로운 형상 가시화를 위한 확장 ADFs 방법은 선택적인 셀 분할 방법 중의 하나인 기존 ADFs 방법에 의해 생성된 가시화를 위한 삼각 메쉬를 입력 받으므로, Dual/Primal 메쉬 최적화 방법과 입력 데이터가 다르다고 할 수 있다.

균일한 셀 분할 방법은 음함수 곡면이 존재하는 모든 공간을 균일한 셀로 분할하기 때문에, 많은 계산 시간을 필요로 할 뿐 아니라 아주 작고 날카로운 형상이 있는 복잡한 물체를 표현할 수 없다는 한계점이 있다. 반면에 선택적인 셀 분할 방법은 작고 날카로운 형상이 있는 부분은 작은 셀로 분할하고, 형상이 원만한 부분은 큰 셀로 분할하기 때문에 복잡한 물체도 효과적으로 표현이 가능하다. 따라서 Dual/Primal 메쉬 최적화 방법은 태생적으로 아주 작고 날카로운 형상이 있는 복잡한 물체를 표현할 수 없는 한계점을 지니게 된다. 물론 Dual/Primal 메쉬 최적화 방법이 후처리 과정으로 삼각 메쉬를 선택적으로 분할하는 방법을 적용하기는 하나, 후처리 과정이기 때문에 입력 데이터의 손실은 피할 수 없게 된다.

Fig. 24, Fig. 25는 이러한 예를 효과적으로 나타내고 있다. Fig. 24는 Fig. 19의 뾰족하게 파인 부분과 원통형 구멍이 있는 물체에 대해 본 논문에서 제안한 음함수 곡면의 날카로운 형상 가시화를 위한 확장 ADFs 방법을 이용하여 가시화 한 것이고, Fig. 25는 동일한 물체에 대해 Dual/Primal 메쉬 최적화 방법을 이용하여 가시화 한 것이다. Fig. 24의 확장 ADFs 방법의 삼각 메쉬를 보면 선택적인 셀 분할 방법을 기

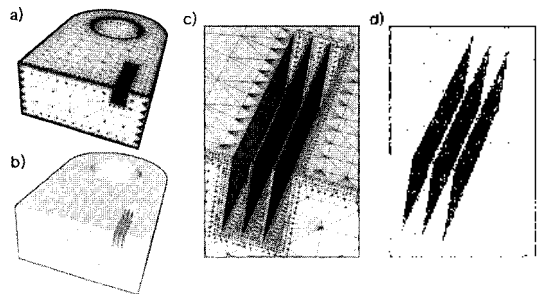


Fig. 24. An example of the extended ADFs method proposed in this paper for rendering implicit surfaces with sharp features applied to a finely carved object with a cylindrical hole. a) a triangular mesh, b) a shading view of a), c) the detail view of finely carved part, d) a shading view of c).

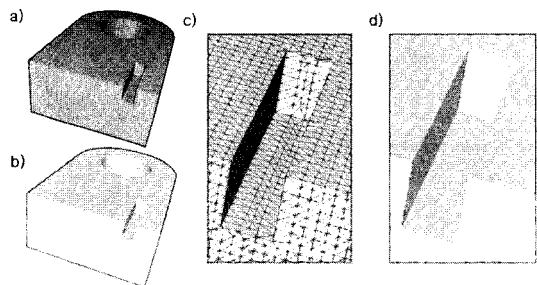


Fig. 25. An example of the Dual/Primal mesh optimization method applied to a finely carved object with a cylindrical hole. a) a triangular mesh, b) a shading view of a), c) the detail view of finely carved part, d) a shading view of c).

반으로 하고 있기 때문에 물체의 형상에 따라 삼각형의 크기가 다른 것을 볼 수 있다. 즉, 평평한 부분은 삼각형의 크기가 크며, 뾰족하게 파인 부분 같은 경우에는 삼각형의 크기가 작기 때문에, 복잡한 물체를 효과적으로 가시화 할 수 있는 것이다. 반면에 Fig. 25

의 Dual/Primal 메쉬 최적화 방법의 삼각 메쉬를 보면 균일한 셀 분할 방법을 기반으로 하고 있기 때문에 물체의 형상에 상관없이 삼각형의 크기가 균일한 것을 볼 수 있다. 따라서 뾰족하게 파인 부분 같은 경우에 가시화가 불가능하다.

7. 결론 및 향후 연구 계획

본 논문에서는 매개변수 곡면의 한계점을 극복할 수 있는 효과적인 모델링 방안인 음함수 곡면에 대해 소개하고 있다. 음함수 곡면이란 음함수식 $f(x, y, z) = 0$ 을 이용하여 곡면을 표현한 것으로서, 불리안 연산이 간단하고 안정적이며 블렌딩이 쉽고 자료구조가 가볍다는 장점을 가지고 있어, 기존의 매개변수 곡면을 대체할 수 있을 것으로 많은 전문가들이 의견을 제시하고 있다.

한편 음함수 곡면은 가시화가 어렵다는 단점이 있는데, 이러한 단점을 극복하고 아울러 날카로운 형상을 효과적으로 가시화하기 위해 본 논문에서는 기존 ADFs(Adaptively Sampled Distance Fields) 방법¹¹⁾에 Dual/Primal 메쉬의 최적화 방법¹²⁾을 적용하여 확장 ADFs 방법을 제안하였다. 기존 ADFs 방법은 음함수 곡면 고유의 수식적인 특성을 이용하지 못한다는 단점이 있는 반면, Dual/Primal 메쉬의 최적화 방법은 음함수 곡면의 접면 등의 수식적인 특성을 활용하는 방법¹³⁾이므로 이 두 방법의 연동 효과는 매우 크다.

본 논문에서 제안한 확장 ADFs 방법의 효율성을 검증하기 위해 기존의 ADFs 방법 및 Dual/Primal 메쉬 최적화 방법과 비교하여 분석하였다. 기존의 ADFs 방법에 대하여서는, 분할되는 셀 개수를 같게 하였을 경우에 대한 형상의 품질 비교와 형상의 품질을 같게 하였을 경우에 대한 수행 시간 비교를 수행하여, 확장 ADFs 방법이 기존의 ADFs 방법에 비해 약 90% 감소된 적은 정보(셀 개수)를 이용하여 음함수 곡면을 날카로운 형상까지도 효과적으로 가시화 할 수 있으며, 이로 인한 가시화 시간을 80% 정도 단축하여 준다는 것을 확인하였다. Dual/Primal 메쉬 최적화 방법에 대하여서는, Dual/Primal 메쉬 최적화 방법이 표현할 수 없는 초기 입력 값에 대한 비교를 수행하여, 본 논문에서 제안한 확장 ADFs 방법이 더욱 복잡한 음함수 곡면도 가시화가 가능하다는 것을 확인하였다.

한편 셀 분할 방법은 초기에 셀을 분할하는데 많은 계산 시간을 요구한다. 물론 초기의 계산 시간을 줄이기 위해 선택적인 셀 분할 방법이 제안되었지만, 앞으로 시간을 단축시킬 수 있는 방법이 연구되어야 할

다. 이러한 초기 계산 시간을 단축시킬 수 있는 방법이 개발된다면 음함수 곡면의 실시간 애니메이션 및 변형 시뮬레이션 등, 컴퓨터 그래픽스 및 CAD 분야에서 매우 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는,

a) 과학기술부의 국가지정연구실 사업(NRL) 연구 과제 “ROV·AUV의 자율 제어와 음향 장비를 이용한 탐사”(과제 번호: 2000-N-NL-01-C-288)

b) 한국과학재단 특정기초연구 과제 “피쳐 맵핑 기법을 이용한 2차원 선박 모델의 3차원 디지털 모델 자동 변환 기술”(과제 번호: R01-2002-000-00061-0)

c) 산업자원부 신기술 실용화 기술 개발 사업 과제 “선체 구조의 의미론적 제품 모델링 기술 개발”(과제 번호: 10005460)

d) 한국학술진흥재단 선도 연구자 지원 사업 과제 “신박의 배치 도면정보로부터 3차원 선박 구획 및 장비 배치 모델 생성 기법 및 최적배치설계 응용”(과제 번호: D00568)

e) 서울대학교 공과대학 해양시스템공학연구소(RIMSE)의 지원으로 이루어진 연구 결과의 일부임을 밝히며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Frisken, S., Perry, R., Rockwood, A. and Jones, T., “Adaptively Sampled Distance Fields: A General Representation of Shape for Computer Graphics”, *Proc. SIGGRAPH 2000*, pp. 249-254, 2000.
2. Ohtake, Y. and Belyacv, A. G., “Dual/Primal Mesh Optimization for Polygonized Implicit Surfaces”, *Symposium on Solid Modeling and Applications 2002*, Germany, pp. 171-178, June 17-21, 2002.
3. Bloomenthal, J. et al., *Introduction to Implicit Surfaces*, Morgan Kaufman Publishers, San Francisco, California, 1997.
4. Elber, G. and Shapiro, V. ed., *Eighth ACM Symposium on Solid Modeling and Applications*, *Solid Modeling 2003*, ACM Press, Seattle, Washington, USA, June 16-20, 2003.
5. Rvachev, V. L., “On the Analytical Description of Some Geometric Objects”, *Reports of Ukrainian Academy of Sciences*, Vol. 153, No. 4, pp. 765-767, 1963.
6. V. L. Rvachev, *Methods of Logic Algebra in Mathematical Physics*, Naukova Dumka, Kiev., 1974.
7. Perry, R. and Frisken, S., “Kizamu: A System for Sculpting Digital Characters”, *Proc. SIGGRAPH*

2001, pp. 47-56, 2001.

8. Sensable Devices' FreeForm Modeling Software, <http://www.sensable.com/freeform>
9. SGDL System Inc., SGDL Script, <http://www.sgdl-sys.com/>
10. INRIA(Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique), <http://www.inria.fr/>
11. RIKEN, "V-CAD Project", <http://www.riken.go.jp/lab-www/V-CAD/index.html>
12. Lorensen, W. E. and Cline, H. E., "Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm", *Proc. SIGGRAPH '87*, pp.163-169, 1987.
13. Suflem, KG., "An Octree Algorithm for Displaying Implicitly Defined Mathematical Functions", School of Computing Sciences, University of Technology, Sydney, Technical Report 87.9, 1987.
14. Suflem, KG., "Recursive Space Subdivision Technique for Displaying Implicitly Defined Surfaces", *Proc. of Ausgraph '89*, pp. 239-249, 1989.
15. Suflem, KG., "An Octree Algorithm for Displaying Implicitly Defined Mathematical Functions", *The Australian Computer Journal*, Vol. 22, pp. 2-10, 1990.
16. Bloomenthal, J., "Polygonization of Implicit Surfaces", *Computer Aided Geometry Design*, Vol. 5, pp. 341-355, 1998.
17. Samet, H., *The Design and Analysis of Spatial Data Structure*, Addison-Wesley, 1989.
18. Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T.

and Flannery, B. P., *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*, Cambridge University Press, 1993.

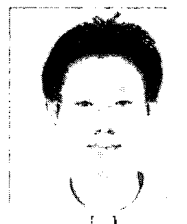
19. Gerald Farin, *Curves and Surfaces for CAGD Fifth Edition*, Morgan Kaufmann publishers, pp.374-375, 2002.
20. Kobbelt, L. P., Botsch, M., Schwanecke, U. and Seidel, H. P., "Feature Sensitive Surface Extraction from Volume Data", *Proc. SIGGRAPH 2001*, pp. 57-66, August 2001.
21. Lee, K. W., *Principles of CAD/CAM/CAE Systems*, Addison-Wesley Longman, 1999.
22. 최동혁, 김태완, 이진우, "특징형상 변환을 이용한 B-rep 모델의 다중해상도 구현", 한국CAD/CAM학회 논문집, 제7권, 제2호, pp. 121-130, 2002.



이 규 열

1971년 서울대학교 공과대학 조선공학과 학사
 1975년 독일 하노버 공과대학 조선공학 석사(Dipl.-Ing.)
 1982년 독일 하노버 공과대학 조선공학 박사(Dr.-Ing.)
 1975년~1983년 독일 하노버 공과대학 선
 박설계 및 이론연구소, 수장부 연구원

1983년~1994년 한국기계연구원 선박해양공학연구소, 선박설계, 생산자동화 연구사업(CSDP)단장
 1994년~2000년 서울대학교 공과대학 조선해양공학과 부교수
 2000년~현재 서울대학교 공과대학 조선해양공학과 교수
 관심분야: 최적설계, 형상모델링, CALS



차 주 환

2002년 서울대학교 조선해양공학과 학사
 2004년 서울대학교 조선해양공학과 석사
 2004년~현재 서울대학교 조선해양공학과 박사과정
 관심분야: 볼륨모델링, 모델링 및 시뮬레이션



김 태 완

1985년 한양대학교 산업공학과 학사
 1993년 미국 Arizona State Univ., Computer Science 석사
 1996년 미국 Arizona State Univ., Computer Science 박사
 1996년~1999년 미국 EDS-PLM(이전 SDRC), 소프트웨어엔지니어
 1999년~2001년 서울대학교 정밀기계설계공동연구소 특별연구원

2001년~2003년 세종대학교 컴퓨터공학부 디지털콘텐츠학과 조교수
 2003년~현재 서울대학교 조선해양공학과 조교수
 관심분야: NURBS 곡면 및 곡면 모델링, CAGD, 컴퓨터그래픽스