

다중해상도해석을 위한 Boundary를 가지는 비정규 메쉬의 Normal 메쉬화 방법

강성찬*, 이규열**, 김태원***

Normal Meshes for Multiresolution Analysis on Irregular Meshes with a Boundary

Kang, S. C.*, Lee, K. Y.** and Kim, T. W.***

ABSTRACT

In this paper we present a remeshing algorithm for irregular meshes with boundaries. The irregular meshes are approximated by regular meshes where the topological regularity is essential for the multiresolutional analysis of the given meshes. Normal meshes are utilized to reduce the necessary data size at each resolution level of the regularized meshes. The normal mesh uses one scalar value, i.e., normal offset value which is based on the regular rule of a uniform subdivision, while other remeshing schemes use one 3D vector at each vertex. Since the normal offset cannot be properly used for the boundaries of meshes, we use a combined subdivision scheme which resolves a problem of the proposed normal offset method at the boundaries. Finally, we show an example to see the effectiveness of the proposed scheme to reduce the data size of a mesh model.

Key words : Multiresolution analysis, Normal mesh, Remeshing, Irregular meshes, Subdivision, Wavelets

1. 서 론

최근의 컴퓨터 그래픽스와 형상 모델링 분야에서 3D 레이저 스캐닝 시스템을 이용해서 3차원 물체를 스캔하여 메쉬 모델을 얻는 방법이 많이 사용되고 있다. 그러나 이렇게 얻어진 메쉬 모델은 다루기 어려운 큰 용량의 데이터를 가진 상세한 모델이기 때문에 사용자에게 필요한 상세화 정도(Level-of-Detail)를 조정하여 저장, 전송, 가시화, 수정에 효과적인 방법을 제공할 수 있는 다중해상도 해석(Multiresolution Analysis)이 최근에 많이 연구되고 있다.

그러나 다중해상도 해석을 하기 위해서는 기본적인

로 낮은 해상도의 형상을 subdivision하고 웨이블릿(wavelets) 계수를 더하면, 높은 해상도의 형상이 되는 subdivision 관계 정보(subdivision connectivity)를 가지고 있어야 하나, 3D 레이저 스캐닝 시스템에서 얻게 되는 메쉬 모델은 이러한 관계 정보를 가지고 있지 않는 비정규 메쉬 모델이다.

이에 본 논문은 subdivision 관계 정보가 없는 비정규(irregular) 메쉬를 재메쉬화(remeshing) 방법을 통하여 정규(regular) 메쉬로 만드는 방법에 대한 연구를 하였다.

특히 기존의 연구에서 웨이블릿 계수를 세 개의 좌표 값으로 나타내었던 것과는 달리, 한 개의 좌표 값인 normal offset(normal 방향 거리 값)으로 웨이블릿 계수를 나타내는, normal 메쉬로 재메쉬화 하는 방법을 연구하였다. 그리고 가장자리(boundary)는 normal offset만을 가지고 표현하기 어려운 점을 개선하기 위해, combined subdivision 을 이용하여 가장자리를 가지는 메쉬도 normal 메쉬로 재메쉬화 하는 방법을 개발하였다.

*(주)이지그라프

**중신회원, 서울대학교 조선해양공학과 및 해양시스템공학연구소

***정회원, 세종대학교 컴퓨터공학부 디지털콘텐츠학과
- 논문투고일: 2001. 3. 5

- 심사완료일: 2001. 5. 8

- 이 논문은 2001 한국CAD/CAM학회 학술발표회 학술발표상 수상 논문임.

2. 관련 연구 현황

2.1 재메쉬화 관련 연구

1995년부터 subdivision 관계를 가지지 않는 비정규 메쉬를 정규 메쉬로 재메쉬화 하는 기법이 많이 연구되기 시작하였다. 연구된 재메쉬화 기법은 비정규 메쉬를 바로 정규 메쉬로 재메쉬화 하는 것이 아니라, 주로 Fig. 1과 같이 우선 기본 도메인(base domain)을 찾은 뒤, 이 기본 도메인을 subdivision하여 새로 생긴 각 모서리(edge)의 중점에 웨이블릿을 적용하여, 성긴 정규 메쉬(coarse semi-regular mesh)를 만들고, 이를 반복하여 원래의 비정규 메쉬에 근사한 정규 메쉬를 만들어 낸다. 여기서 기본 도메인이란 subdivision을 하게 될 맨 처음의 성긴 비정규 메쉬를 말한다.

1995년에 Eck^[1] 등은 Voronoi 다이어그램과 Delaunay 삼각화의 개념을 이용하여 주어진 삼각형 비정규 메쉬 곡면을 분할하고, 그 분할된 곡면을 3차원 상의 여러 평면으로 사상하는 harmonic 사상을 사용하여 기본 도메인을 구하였다. 이때 분할된 곡면상의 한 점에 대응되는 기본 도메인 상의 매개변수를 구한다("parameterization"). 그리고 난 후 기본 도메인을 subdivision하여 정규 메쉬로 재메쉬화 하는 방법을 제시하였다. 1998년에 Lee^[2] 등은 vertex removal을 통하여 원래의 주어진 삼각형 비정규 메쉬를 단순화(simplification)하고 이러한 단순화 과정을 여러 번 수행하여 최종적으로 기본 도메인을 얻었다. 이때 3차원 꼭지점(vertex)을 3차원상의 평면으로 사상하는 conformal 사상을 이용하여, 단순화 과정에서 삭제되는 꼭지점을 barycentric coordinate로 저장하여 매개변수를 구해 놓는다. 본 연구에서도 vertex removal을 하는 메쉬 단순화 기법인 Garland의 vertex pair contraction^[3,4]을 이용하여 기본 도메인을 구하고, 이를 subdivision하여 정규 메쉬를 만드는 방법을 사용하였다.

2.2 Normal 메쉬 관련 연구

2000년에는 더 나아가 Guskov^[5]와 Lee^[6] 등이 재메쉬화 할 때 적은 수의 기본 도메인과 normal offset

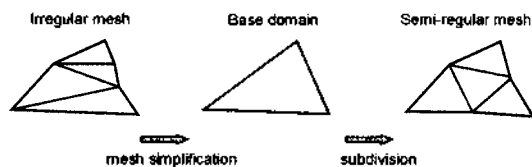


Fig. 1. Semi-regular mesh through a base domain subdivision.

정보만을 이용하여 정보의 양을 줄이는 normal 메쉬 또는 displaced 메쉬에 대한 연구를 발표하였다.

Guskov는 주어진 점을 보간하는 Butterfly subdivision을 이용하여 기본 도메인을 subdivision하고, 동시에 기본 도메인을 subdivision하여 생성된 꼭지점에서의 normal 벡터와 원래의 주어진 삼각형 비정규 메쉬와의 교점을 찾아 normal offset을 구한다. 이러한 subdivision과정과 normal offset을 구하는 과정을 반복하여 normal 메쉬를 만든다. Lee는 기본 도메인을 구하고, triangular B-spline을 일반화 한 Loop subdivision을 몇 번 수행하여 구한 곡면(smooth domain surface)을 기본 도메인으로 하여 원래의 곡면과의 차이(displacement)를 구하여 displacement map을 만든다. 그런데 가장자리에 관해서는 두 논문 중 Guskov는 가장자리가 없는 경우만을 다루었고, Lee는 가장자리에서의 웨이블릿 계수는 세 개의 좌표 값(x, y, z)을 사용하여 나타내었다.

3. 다중 해상도 해석과 Normal 메쉬

다중해상도 해석이란, 어떠한 정보가 여러 해상도의 정보를 가지고 있도록 변환하는 것을 말한다.

Fig. 2의 a)와 같은 선형 B-spline 곡선은, b)와 같이 중간의 조정 점들을 제거한 보다 단순한 곡선과, 단순한 곡선의 중점에서 원래의 조정 점과의 차이(웨이블릿 계수)로서 표현할 수 있다. a)와 b)는 같은 곡선을 나타내지만 b)표현 방식은 높은 해상도와 낮은 해상도의 두 가지 곡선을 일정한 규칙으로 함축적으로 나타내고 있다. 따라서 여러 해상도의 정보를 가지고 있는 b)가 다중 해상도 표현이다. 그리고 이때 일정한 규칙이란 b)의 단순화 된 직선을 subdivision한 후, 새로 생성된 중점에 웨이블릿 계수를 더하면 a)가 된다는 규칙이다.

Fig. 3에서 낮은 해상도의 곡선(조정점 두 개로 이루어진 선형 B-spline 곡선)이 subdivision되어, 중점에 새로운 조정점이 생겨 조정점 세 개로 이루어진 높은 해상도의 곡선의 뼈대를 이루고, 여기에 상세 형상인

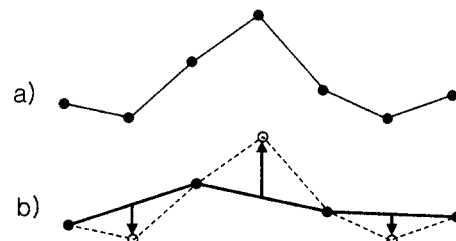


Fig. 2. Multiresolution analysis of a linear B-spline curve.

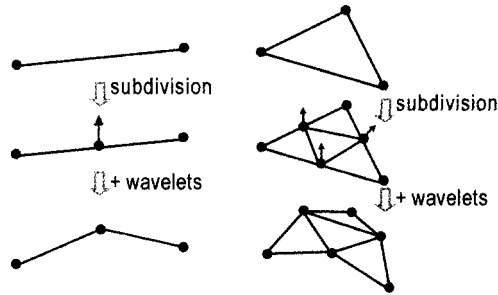


Fig. 3. Subdivision-connectivity at curve and surface.

웨이블렛 계수를 선형 B-spline 곡선의 중점에 더하면 높은 해상도의 곡선이 된다^[7].

마찬가지로 삼각형 곡면 역시, subdivision 단계를 거쳐 각 모서리의 중점에 새로운 조정점을 만들고 이 점으로부터 새로운 면을 생성하고, 여기에 웨이블렛 계수를 더하여 높은 해상도의 곡면을 만든다.

이와 같이 낮은 해상도의 곡선 또는 곡면은 높은 해상도의 곡선 또는 곡면과 subdivision 관계가 있다. 따라서 오직 subdivision을 통해 만들어진 곡선 또는 곡면만이, 다중해상도 해석에서 subdivision 규칙에 따라 낮은 해상도의 형상과 웨이블렛으로 계층적으로 분해될 수 있다^[8].

그런데 웨이블렛 계수를 normal offset 값으로만 표현하는 메쉬를 normal 메쉬라고 한다. Fig. 4는 normal 메쉬를 일반 메쉬와 비교하여 나타내고 있다.

Fig. 4a)의 일반 메쉬는 회색으로 표시된 기본 도메인의 각 모서리의 중점 m 과 원래의 주어진 비정규 메쉬 곡면상의 꼭지점 v 의 차이를 나타내는 웨이블렛 계수를 세 개의 값 (x_1, y_1, z_1) 으로 나타낸다. 즉 $\vec{v} = \vec{m} + (x_1, y_1, z_1)$ 이다. 이에 비해 Fig. 4b)의 normal 메쉬는 웨이블렛 계수를 normal offset (s_1) 만을 사용하여 나타낸다. 즉 $\vec{v} = \vec{m} + s_1 \cdot \vec{N}$ (\vec{N} 은 기본 도메인의 normal 단위 벡터)이다. 따라서 한 개의 값 (s_1) 으로 꼭지점 v 를 나타내어 데이터 양을 줄일 수 있다.

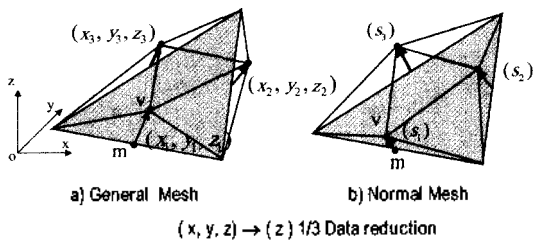


Fig. 4. Normal mesh on the base domain.

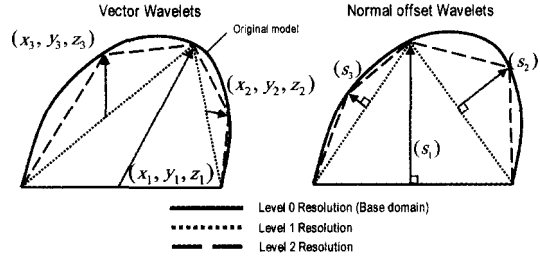


Fig. 5. Multiresolution of a normal mesh.

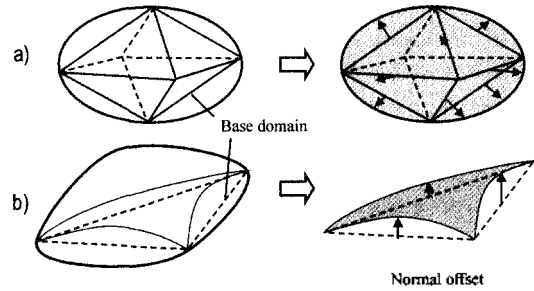


Fig. 6. Normal mesh at boundary.

Fig. 5는 normal offset 웨이블렛을 이용하여, 어떻게 다중해상도로 곡선을 표현할 수 있는지를 보여주고 있다. 낮은 해상도의 각 곡선 조각의 중점에서 원래의 곡선과의 차이를 웨이블렛 계수로 나타내며, 벡터 웨이블렛과는 달리 normal offset 웨이블렛은 항상 낮은 해상도 단계의 normal 방향으로 웨이블렛 계수를 정한다.

그런데 Fig. 6의 a)와 같이 단혀있는 곡면의 경우에는 기본 도메인의 normal offset으로 원래의 곡면을 표현가능하나, b)와 같이 가장자리가 있는 곡면을 회색 곡면 부분만이 기본 도메인의 수직선상에 있다고 할 때, 회색 부분을 제외한 부분은 normal offset으로 표현이 불가능하다. 따라서 가장자리가 있는 곡면은 normal 메쉬로 만들기 어렵다.

곡면의 가장자리를 normal offset으로만 표현하기 위해서는, 곡면의 가장자리가 항상 기본 도메인의 가장자리 선 상에 정확히 있어야 하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 subdivision을 할 때 기본 도메인의 가장자리를 곡면의 가장 자리로 이동시키는 combined subdivision^[9,10]을 이용하여 normal 메쉬를 만들었다.

4. 제안된 재메쉬화 알고리즘

4.1 제안된 재메쉬화 알고리즘 개요

본 연구에서는 Eck와 Lee의 연구를 개선하여 Fig. 7과 같이 5단계로 이루어지는 재메쉬화 알고리즘을 제

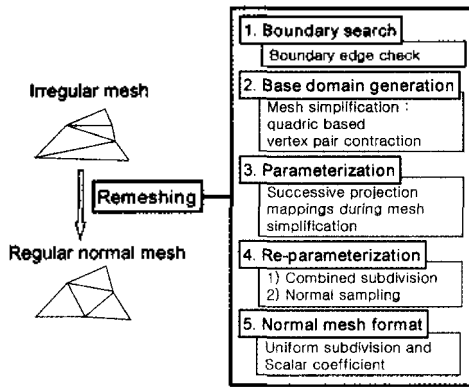


Fig. 7. Proposed remeshing algorithm.

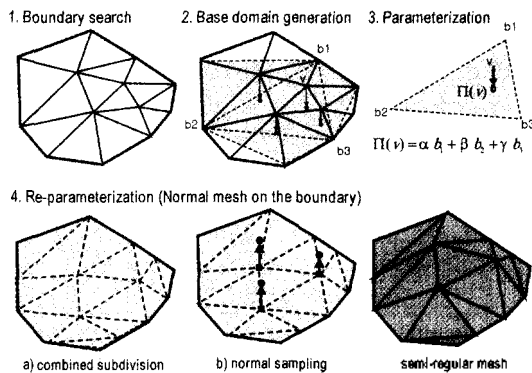


Fig. 8. Remeshing steps of irregular meshes with boundaries.

안하고, 구현하여 사용 예를 보였다.

Fig. 8은 제안된 재메쉬화 알고리즘의 각 단계를 나타낸다.

1) 첫 번째 단계로, 입력된 비정규 메쉬의 가장자리를 찾아 가장자리 꼭지점에 표시를 한다.

2) 두 번째 단계로, 입력된 비정규 메쉬를 vertex pair contraction 방법^[3,4]을 사용하여 메쉬 단순화를 하여 기본 도메인을 구한다.

3) 세 번째 단계는, 기본 도메인을 구하면서 동시에 진행되는데, 꼭지점이 제거될 때마다 그 꼭지점을 기본 도메인에 사상하여 매개 변수를 구하고 그것을 barycentric coordinates로 저장한다.

4) 네 번째 단계로, 기본 도메인을 combined subdivision^[9,10]을 하여 가장자리를 표현하는 성긴 정규 메쉬(coarse semi-regular mesh)를 구하고, 이 성긴 정규 메쉬의 각 꼭지점에서 normal offset을 구하여 normal 메쉬를 만든다. 이러한 과정을 반복하면 성긴 정규 메쉬로부터 점차 세밀한 정규 메쉬(fine semi-regular mesh)를 구할 수 있다.

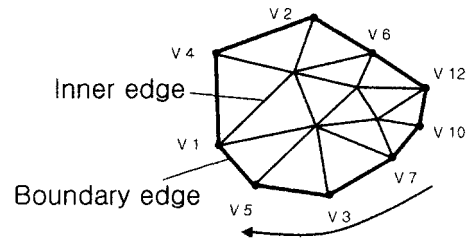


Fig. 9. Boundary edge and inner edge.

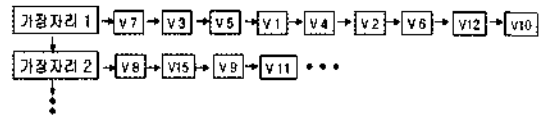


Fig. 10. Data structure of boundary edges.

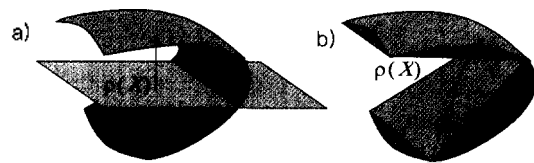


Fig. 11. Base domain for normal meshes.

5) 재메쉬화 된 메쉬를 normal 메쉬 형식으로 저장한다.

4.2 재메쉬화의 각 단계

4.2.1 Boundary search

가장자리가 없는 경우에는 일반적인 normal 메쉬화 방법을 사용하면 되나, 가장자리가 있는 경우에는 특별한 처리를 위해 우선 가장자리를 찾아야 한다.

Fig. 9와 같이 내부 모서리는 두 개의 면에 의해 공유되는 모서리이며, 가장자리 모서리는 한 개의 면에 의해 공유되는 모서리이다. 가장자리 모서리에 속하는 꼭지점을 가장자리 꼭지점이라고 한다. 하나의 메쉬 모델에서 가장자리는 여러 개가 될 수 있으므로, 가장자리를 표현하는 자료 구조는 다음 Fig. 10과 같다.

그리고 나중의 combined subdivision을 위해서 각 가장자리 꼭지점은 자신이 속하는 가장자리 리스트의 번호와, 그 리스트에서 자신이 몇 번째 꼭지점인지 나타내는 매개변수를 저장한다. 예로 Fig. 10에서 꼭지점 5는 가장자리 번호로서 '1'을 가지며, 매개변수로서 '3'을 갖는다.

4.2.2 Base domain generation

Fig. 11의 곡면에 대해 a)와 같이 하나의 3차원상의 평면을 기본 도메인으로 하고, 그 기본 도메인에서의 높이, 즉 normal offset으로 곡면을 표현하는 매개 합

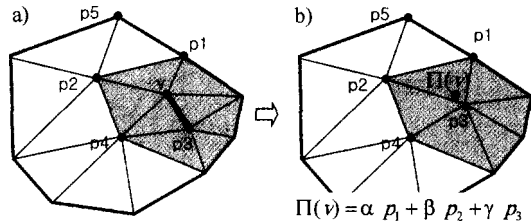


Fig. 12. Generation of base domain by vertex pair contraction.

수 $z=f(x, y)$ 를 만들었을 때, 이 매개 함수는 기본 도메인의 한 점에 대하여 두 개의 값을 가져야 하므로 잘못된 것이다. 따라서 이런 경우는 b)와 같이 기본 도메인을 바꿔, 곡면의 형상에 따라 여러 개의 3차원 평면으로 이루어진 기본 도메인이 되도록 해야 한다.

따라서 본 연구에서는 Fig. 12와 같이 vertex pair contraction^[3,4]을 사용하여 원래의 형상에 근사한 기본 도메인을 구하였다. Fig. 12의 a)는 vertex pair contraction 연산이 행해지기 전의 메쉬이고, b)는 꼭지점 v 와 p_3 가 contraction이 된 메쉬이다. 꼭지점 v 는 삭제되고, 꼭지점 p_3 는 a)의 회색 면들과의 각 거리의 제곱의 합이 최소가 되는 위치로 이동한다.

기본 도메인을 생성하기 위하여 이러한 방식으로 단순화된 메쉬는 원래의 형상에서 곡률이 심한 부분은 유지하고, 곡률이 작은 부분은 단순화하여 본 연구에서 원하는 normal offset을 사용하기에 적당한 기본 도메인이 될 수 있다.

4.2.3 Parameterization

parameterization은 기본 도메인을 구하면서, 동시에 진행되는데, 다음 세 가지 작업을 한다.

1) Fig. 12의 b)와 같이, 제거된 꼭지점 v 를, 꼭지점 p_3 를 공유하는 회색으로 표시된 면들 중에서 가장 거리가 가까운 면에 수직 사상하여, 사상된 점 $\Pi(v)$ 를 포함하는 면의 꼭지점 p_1, p_2, p_3 의 barycentric coordinate로 식 (1)을 사용하여 저장한다. 이 점 $\Pi(v)$ 은 삭제된 꼭지점 v 의 매개 변수가 된다.

$$\Pi(v) = \alpha p_1 + \beta p_2 + \gamma p_3 \tag{1}$$

2) 꼭지점 v 가 삭제된 후, 또 vertex pair contraction이 적용되어 Fig. 13과 같이 꼭지점 p_3 가 삭제될 때에, 꼭지점 p_3 와 p_4 를 공유하는 회색 면들이 변경되므로 이 영역에 속하는 면에 이미 저장되어 있는 매개 변수 $\Pi(v)$ 의 새로운 barycentric coordinate를 구한다.

3) Fig. 14와 같이 가장자리에 있는 꼭지점 p_5 가 삭제될 때는, 빗금 친 채된 두 개의 면이 삭제되므로 가장자리 꼭지점이라고 표시되지 않은 꼭지점 p_2 가 가장자리

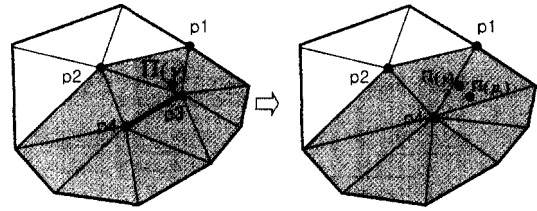


Fig. 13. Update parameterization of changed faces.

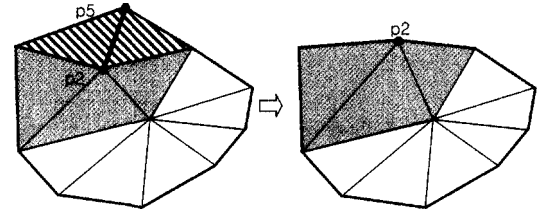


Fig. 14. Update boundary information of changed faces.

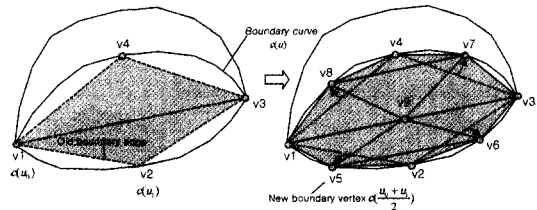


Fig. 15. Combined subdivision of the base domain.

꼭지점이 된다. 따라서 이 경우에는 꼭지점 p_5 의 가장자리 정보를 꼭지점 p_2 가 이어받아야 한다.

4.2.4 Re-parameterization

re-parameterization 단계에서는 먼저 기본 도메인의 combined subdivision을 한 후, subdivision을 하여 생성된 점에서 normal offset을 구하여 normal 메쉬를 만든다.

1) Combined subdivision

우선 Fig. 15와 같이 반원 모양의 가장자리가 있는 곡면의 기본 도메인(회색으로 표시된 두 개의 3차원 평면 삼각형)을 combined subdivision^[9,10]을 한다. combined subdivision이란 가장자리의 subdivision에서만 가장자리 조건을 고려하고, 그 외의 영역에서는 일반적인 subdivision을 하는 것이다. 가장자리 조건은 매개변수 곡선이나 그 밖의 다른 형식으로 주어질 수 있는데, 본 연구에서는 가장자리 곡선을 boundary search 단계에서 찾은 가장자리 꼭지점을 보간하는 균일 노트 간격의 선형 B-spline 곡선 $c(u)$ 로 가정한다.

Fig. 15의 기본 도메인 a)를 combined subdivision할 때에 새로운 꼭지점은 다음과 같이 생성된다. 먼저 각 모서리의 중점을 subdivision하여 꼭지점 v_3, v_6, v_7 ,

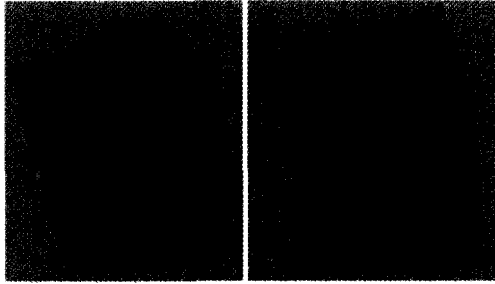


Fig. 16. Parameter of boundary vertex.

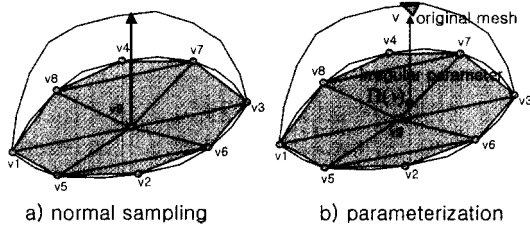


Fig. 17. Normal sampling using the parameterization.

v_8, v_9 를 생성한다. 이때 꼭지점 v_5, v_6, v_7, v_8 는 가장자리 꼭지점이므로 가장자리 꼭선 상으로 이동시킨다. 예로서 꼭지점 v_1, v_2 로 이루어지는 모서리가 subdivision이 되어 생기는 꼭지점 v_3 의 경우에, 꼭지점 v_1, v_2 의 매개변수 u_0, u_1 의 매개변수의 평균값($(u_0+u_1)/2$)에 해당하는 가장자리 꼭선 상의 점이 꼭지점 v_3 의 위치가 된다.

다음 Fig. 16은 combined subdivision의 예로 휘어진 곡면의 기본 도메인과, 가장자리, 그리고 가장자리 꼭지점의 매개변수를 표시한 것이다.

2) Normal sampling

normal sampling이란 기본 도메인을 combined subdivision을 한 후에 생성된 생긴 정규 메쉬의 각 꼭지점에서의 normal 벡터를 구하고, 그 normal 벡터와 원래의 주어진 비정규 메쉬 곡면과의 교차점의 높이인 normal offset을 구하는 것을 말한다. Fig. 17a)에서 v_9 의 normal 벡터는 v_9 를 공유하는 면들의 normal 벡터의 평균값을 사용한다. 그런데 가장자리 꼭지점 (v_5, v_6, v_7, v_8)은 그 점이 바로 곡면상의 점이므로 normal sampling을 하지 않는다.

Fig. 17a)에서 꼭지점 v_9 의 normal 벡터가 원래의 주어진 비정규 메쉬 곡면과 어느 점에서 교차하는지 알기 위해, b)와 같이 parameterization 단계에서 저장해 두었던 매개변수 $\Pi(v)$ 수와 원래의 비정규 메쉬 곡면상의 꼭지점 v 간의 관계를 이용하여 교차점을 계산한다.

우선 꼭지점 v_9 와 가장 가까운 매개변수 $\Pi(v)$ 를 찾는다. 그리고 매개변수 $\Pi(v)$ 의 원래 꼭지점 v 를

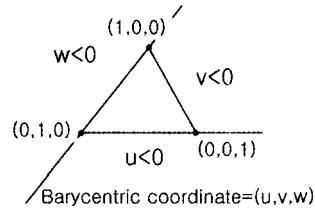


Fig. 18. Direction of position of intersection point.

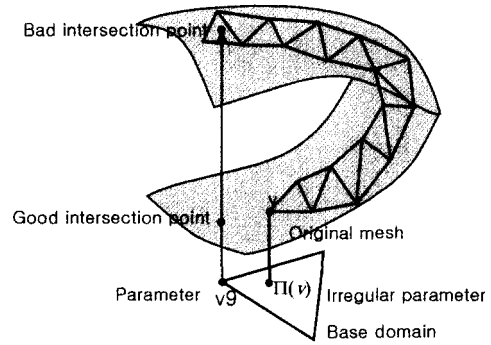


Fig. 19. Bad intersection point.

찾아, 그 꼭지점 v 를 포함하는 삼각형과, v_9 의 normal 벡터와 교차계산을 한다.

만약에 교차점의 barycentric coordinate가 모두 0과 1사이의 값이 아니라면, 교차점이 교차계산을 한 삼각형에 있지 않은 것이고, 실제 교차점이 있는 방향을 부호에 따라서 Fig. 18과 같이 추정할 수 있다.

예를 들어 구해진 교차점의 barycentric coordinate 중에서 w 가 음수로 나왔다면, 실제의 교차점은 삼각형 내부에 있지 않고 삼각형의 왼쪽 방향에 있는 것임을 알 수 있다. 이때에는 이 삼각형의 왼쪽에 이웃한 삼각형과 다시 교차계산을 해나가며, 최종적으로 교차점의 barycentric coordinate들이 모두 0과 1사이의 값이 될 때까지 행한다. Bunny 모델^[11]의 경우에는 보통 10번 정도 이내에 삼각형을 이동해가면서 교차계산을 하여 교차점을 찾았다.

그런데 곡면이 휘어진 경우에 다음 Fig. 19와 같은 이유로 잘못된 교차점을 찾는 경우가 있다.

이런 경우에는 normal 벡터가 일반적인 경우보다 크다. 그래서 본 연구에서는 각 normal sampling 단계마다 normal 벡터 크기의 평균을 구해서, 이상적으로 normal 벡터가 큰 경우는 무시하였다.

이렇게 구해진 normal offset이 꼭지점 v_9 의 웨이블릿 계수이며, Fig. 20의 a)는 꼭지점 v_9 에 이 웨이블릿 계수를 더하여 v_9 점으로 이동한 것이다, b)는 웨이블릿

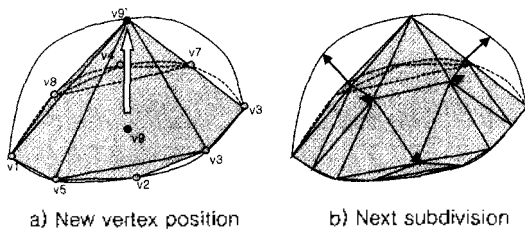


Fig. 20. New vertex position and next subdivision.

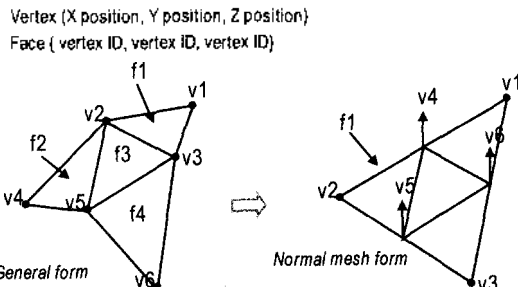


Fig. 21. General mesh form and normal mesh form.

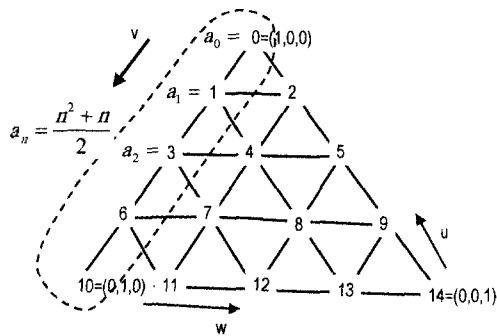


Fig. 22. Rules for barycentric coordinate decision.

체수가 더해진 성긴 정규 메쉬를 가지고, 다시 subdivision을 하여 생성한 보다 세밀한 정규 메쉬의 꼭지점상에서 normal sampling을 하는 것을 보여 준다. 이렇게 반복하여 re-parameterization이 이루어진다.

4.2.5 Normal 메쉬 형식

Fig. 21과 같이 면이 4 개로 이루어진 경우의 일반적인 메쉬의 표현은 6개의 꼭지점(위치정보)과 4개의 면 정보(위상정보:꼭지점의 연결구조)가 필요하다. 그러나 메쉬가 normal 메쉬라면 위치정보는 z값만 저장하면 되므로 3분의 1로 줄어들고, subdivision으로 만들어진 것이라면 적은 수의 기본 도메인 면을 가지고 많은 면을 나타낼 수 있으므로 위상정보를 줄일 수 있다.

Fig. 22는 subdivision의 규칙성 만을 이용해서, 위상

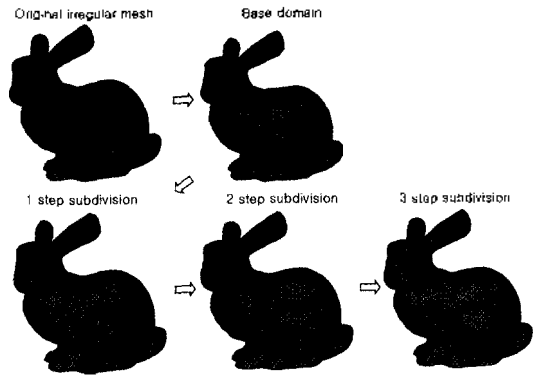


Fig. 23. Multiresolution of remeshed normal Bunny model.

정보를 어떻게 찾아내는지 설명하고 있다. 기본 도메인 면이 2번 subdivision이 되었을 때 normal offset이 필요한 자리가 0번부터 14번까지 차례대로 번호가 붙어 있다. 이 번호는 subdivision 횟수에 따라 결정된다. normal offset을 저장할 때 이 번호 순으로 저장한다면 따로 위상 정보를 저장할 필요가 없게 된다.

5. 재메쉬화 결과

다음 Fig. 23은 개발한 재메쉬화 방법을 사용하여 시험 모델로 비정규 메쉬인 Stanford 대학의 Bunny 모델(69451 faces)에서 기본 도메인 (1089 faces)을 구하고, 3번의 subdivision을 행하였으며, normal sampling을 하여 normal 메쉬 (69696 face)를 만든 것이다.

이렇게 재메쉬화 된 메쉬를 normal 메쉬 형식으로 저장하였을 때, 원래의 Bunny 모델의 크기가 2.3M 바이트였던 것에 비해, 본 연구에서 제안한 normal 메쉬 형식으로 저장한 모델은 크기가 0.52M 바이트로 원래의 크기의 5분의 1 수준으로 줄어들었다.

5.1 기본 도메인 면의 수에 따른 결과

정보의 양을 줄이기 위해서 기본 도메인의 면의 수를 적게 하고, subdivision을 많이 하는 것이 좋다. 그러나 재메쉬화 된 곡면의 품질은 기본 도메인을 이루는 면의 수가 많을수록 좋아진다. 많은 면을 기본 도메인으로 사용한 재메쉬화는 원래의 곡면에 잘 근사한 결과를 보여준다. 그러나 많은 면을 기본 도메인으로 사용하면 그만큼 저장해야 할 정보의 양이 많아진다.

또한 원래의 곡면 정보가 다면체라, subdivision을 많이 해서 원래 메쉬의 면의 수보다 많이 생성한다고

Table 1. The error of Bunny model according to the number of base domains

	3 Level Subdivision		4 Level Subdivision	
	Face	Error	Face	Error
Base domain	1089	0.188%	270	0.415%
Subdiv. Level 1	4356	0.071%	1080	0.224%
Subdiv. Level 2	17424	0.027%	4320	0.093%
Subdiv. Level 3	69696	0.012%	17280	0.042%
Subdiv. Level 4			69120	0.032%
Normal Mesh Size	524 KB		414 KB	
Non-normal (%)	0.93%		1.67%	
Time (min)	1.58		2.48	

해서 곡면의 품질이 좋아지는 것은 아니다. 이러한 측면을 고려할 때 원래 mesh의 면의 수와, 기본 도메인의 면의 수와 subdivision 횟수는 다음 식 (2)와 같은 관계에 따라 정할 수 있다.

$$\text{Num. of original faces} \approx \text{Num. of base domain} \times 4^{\text{Num. of subdiv.}} \quad (2)$$

다음 표 1은 기본 도메인의 면의 수를 1089개로 하여 3번의 subdivision을 한 결과와, 270개로 4번의 subdivision을 한 결과를 비교하고 있다. 오차는 재메쉬화 된 메쉬의 각 꼭지점에서 원래의 메쉬와의 거리를 전체 메쉬를 포함하는 구(bounding sphere)의 지름에 대한 퍼센트로 나타내었으며, non-normal 퍼센트는 normal sampling에서 실패한 퍼센트이며, 모든 계산 시간은 펜티엄III 667 MHz, 256 MB 메모리에서

Table 2. The remeshing results of various models

Data set	Cat	Engine	Mannequin
Input face	6989	11891	15544
Input size	231 KB	411 KB	560 KB
Base domain	109	185	241
Subdiv. Level	3	3	3
Output face	6976	11840	15424
Output size	56 KB	97 KB	116 KB
Error	0.033%	0.022%	0.021%
Non-normal	1.53%	0.62%	0.99%
Time (min)	0.11	0.18	0.23

측정된 것이다.

5.2 다른 모델의 결과

표 2와 그림 24는 여러 가지 메쉬 모델을 개발된 알고리즘을 이용하여 재메쉬화 한 결과를 보여주고 있다. 특히 분리된 3개의 메쉬 꼭면으로 이루어진 engine 모델은, 가장자리를 가지는 메쉬 꼭면도 normal 메쉬로 재메쉬화 할 수 있는 본 논문의 알고리즘의 장점을 잘 나타내고 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 대용량의 3차원 형상 정보를 사용자가 쉽게 사용할 수 있게 해주는 다중 해상도 해석을 하기 위하여, 비정규 메쉬를 subdivision 관계 정보를 가지고 있는 정규 메쉬로 재메쉬화 하는 방법을 연구 하였다.

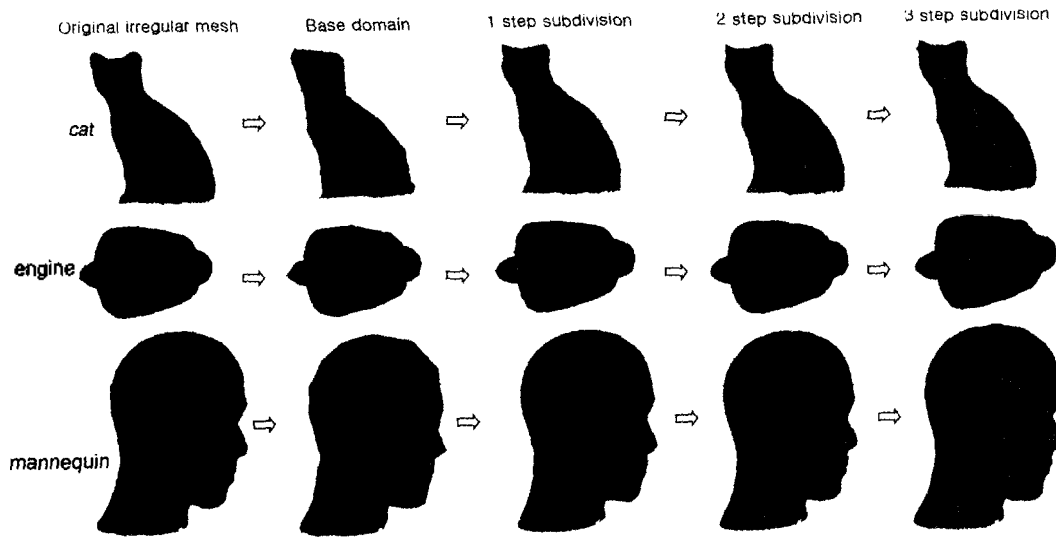


Fig. 24. The remeshing process of various model.

이때 기존의 연구를 참고하여 보다 적은 정보로 형상을 표현할 수 있도록 웨이블릿 계수가 한 개의 좌표값으로 표현되는 normal 메쉬로 재메쉬화 하는 방법을 연구하였다. 그리고 가장자리는 normal offset만을 가지고 표현하기 어려운 점을 개선하기 위해, combined subdivision 을 이용하여 재메쉬화 하는 방법을 제안하였다. 또한 재메쉬화 된 메쉬가 subdivision을 통하여 생성되었다는 규칙성을 이용하여, 적은 위상 정보로도 효과적으로 메쉬를 표현할 수 있는 normal 메쉬 형식을 제시하여 사용하였다.

감사의 글

이 연구는 서울대학교 공과대학 해양시스템공학연구소(RIMSE)의 지원과 과학기술부가 지원하는 국가 지정연구실인 서울대학교 공과대학 모델링 커널 개발 연구실의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Eck, M., DeRose, T., Duchamp, T., Hoppe, H., Lounsbery, M. and Stuetzle, W., "Multiresolution Analysis of Arbitrary Meshes," *Proc. of SIGGRAPH 95*, pp. 173-182.
2. Lee, A., Sweldens, W., Schroder, P., Cowsar, L. and Dobkin, D., "MAPS: Multiresolution Adaptive Parameterization of Surfaces," *Proc. of SIGGRAPH 98*, pp. 95-104.
3. Garland, M. and Heckbert, P.S., "Surface Simplification Using Quadric Error Metrics," *Proc. of SIGGRAPH 97*, pp. 209-216, <http://graphics.cs.uiuc.edu/~garland/home.html>.
4. Garland, M., *Quadric-Based Polygonal Surface Simplification*, Ph.D.'s thesis, School of Computer Science Carnegie Mellon University, 1999.
5. Guskov, I., Vidimce, K., Sweldens, W. and Schröder, P., "Normal Meshes," *Proc. of SIGGRAPH 2000*, pp. 95-102.
6. Lee, A., Moreton, H. and Hoppe, H., "Displaced Subdivision Surfaces," *Proc. of SIGGRAPH 2000*, pp. 85-94.
7. Lounsbery, M., DeRose, T. and Warren, J., "Multi-resolution Analysis for Surfaces of Arbitrary Topological Type," *ACM Transactions on Graphics*, 16(1), pp. 34-73, Jan, 1997.
8. Stollnitz, E.J., DeRose, T.D. and Salesin, D.H., *Wavelets*

for computer Graphics, Morgan Kaufmann Publishers, 1996.

9. Levin, A., "Combined subdivision schemes for the design of surfaces satisfying boundary conditions," *CAGD* 16, pp. 345-354, 1999.
10. Levin, A., *Combined Subdivision Schemes*, Ph.D.'s thesis, School of Mathematical sciences, Tel-Aviv University, March, 2000.
11. Bunny model, Stanford Computer Graphics Laboratory, <http://www-graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep/>.



강 성 찬

1999년 서울대학교 공과대학 조선해양공학과 학사
 2001년 서울대학교 대학원 조선해양공학과 석사
 2001년-현재 (주)이디지그래프 설계자동화기술연구소 연구원
 관심분야: 형상모델링



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 선박설계 및 이론연구소, 주정부 연구원
 1983년-1994년 한국기계연구원 선박해양공학연구원, 선박설계, 생산자동화 연구사업(CSDP)단장
 1994년-2000년 서울대학교 공과대학 조선해양공학과 부교수
 2000년-현재 서울대학교 공과대학 조선해양공학과 교수
 관심분야: 최적설계, 형상모델링, CALS



김 태 완

1985년 한양대학교 산업공학사
 1987년 한양대학교 산업공학석사
 1993년 Arizona State Univ. 컴퓨터과학석사
 1996년 Arizona State Univ. 컴퓨터과학박사
 1996년-1999년 SDRC, USA 소프트웨어 엔지니어
 1999년-2001년 서울대학교 특별연구원
 2001년-현재 세종대학교 디지털콘텐츠학과 조교수
 관심분야: Curves and Surfaces, NURBS, 솔리드모델링, 컴퓨터그래픽스