

2D 평면 표본화와 웨이브릿 변환을 이용한 효율적인 3차원 객체 간소화 알고리즘

(Efficient 3D Object Simplification Algorithm Using 2D Planar Sampling and Wavelet Transform)

장명호[†] 이형석^{**} 한규필^{***} 박양우^{****}

(Myung-ho Jang) (Heng-Suk Lee) (Kyu-phil Han) (Yang-Woo Park)

요약 본 논문에서는 컴퓨터 응용환경에서 3차원 물체를 효율적으로 표현하기 위해 웨이브릿 변환과 2D 평면 표본화를 이용한 3D 객체 간소화 알고리즘을 제안한다. 기존의 웨이브릿 변환을 이용한 메쉬의 압축 및 간소화 알고리즘은 3차원 정점에 대해서 변환을 수행하기 때문에 연결 정보가 필요한 합성과정에서 정점들을 다시 다각형으로 연결시키는 타일링 최적화 문제를 해결해야만 하는 단점을 가지고 있다. 그러나 제안한 방식은 3차원 메쉬를 2차원 평면 상으로 표본화하여 각 평면에 대한 2차원 다각형을 최소화하기 때문에 변환이 용이하며 2차원 정점을 순서적으로 나열하면 2개의 1차원 배열 자체가 연결정보를 포함하기 때문에 1차원 변환으로 다각형을 변환 및 표현할 수 있다는 장점이 있다. 그리고 표본화 평면의 간격조절과 각 평면에서의 웨이브릿 계수를 선택적으로 조정함으로써 간단히 LOD를 조절할 수 있다. 2차원 다각형의 간소화는 주관적 화질에 영향을 주지 않는 작은 웨이브릿 계수를 선택하여 제거함으로써 수행되어진다. 그 결과 제안된 알고리즘은 간단하지만 효율적이다. 실험을 통하여 제안한 알고리즘은 적은 외부 붕괴를 가지면서 정확한 간소화 메쉬를 보여준다는 것을 알 수 있다.

키워드 : 메쉬 간소화, 다각형 표면 간소화, 웨이브릿 변환

Abstract In this paper, a mesh simplification algorithm based on wavelet transform and 2D planar sampling is proposed for efficient handling of 3D objects in computer applications. Since 3D vertices are directly transformed with wavelets in conventional mesh compression and simplification algorithms, it is difficult to solve tiling optimization problems which reconnect vertices into faces in the synthesis stage highly demanding vertex connectivities. However, a 3D mesh is sampled onto 2D planes and 2D polygons on the planes are independently simplified in the proposed algorithm. Accordingly, the transform of 2D polygons is very tractable and their connection information is replaced with a sequence of vertices. The vertex sequence of the 2D polygons on each plane is analyzed with wavelets and the transformed data are simplified by removing small wavelet coefficients which are not dominant in the subjective quality of its shape. Therefore, the proposed algorithm is able to change the mesh level-of-detail simply by controlling the distance of 2D sampling planes and the selective removal of wavelet coefficients. Experimental results show that the proposed algorithm is a simple and efficient simplification technique with less external distortion.

Key words : Mesh simplification, Polygonal surface simplification, Wavelet transform

· 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2001-1-30300-005-1)지원으로 수행되었음

† 비 회 원 : LG전자 디스플레이제품연구소 연구원
endofall@hotmail.com

** 학생회원 : 금오공과대학교 컴퓨터공학과
hslee@cespc1.kumoh.ac.kr

*** 비 회 원 : 금오공과대학교 컴퓨터공학부 교수
kphan@cespc1.kumoh.ac.kr

**** 비 회 원 : 경운대학교 멀티미디어공학부 부교수
ywpark@ikw.ac.kr

논문접수 : 2003년 5월 7일

심사완료 : 2004년 2월 27일

1. 서론

21세기에 접어들면서 컴퓨터와 정보통신산업의 꾸준한 발전으로 멀티미디어 데이터의 수요가 급증하였으며 특히 근래에는 2차원 영상 자료보다 입체를 표현하는 3차원 모델의 사용분야가 점차 증대되고 있으며 향후 3차원 관련 산업이 크게 발전할 것으로 기대된다. 그러나 일반적으로 물체를 3차원으로 표현할 때 모델 데이터의 방대함 때문에 이것을 가공 없이 그대로 저장, 전송 및

응용할 경우 많은 비용과 노력이 들게된다. 그러므로 3차원 데이터를 효율적으로 사용하기 위해 압축 및 간소화하는 것이 반드시 필요하며 현재까지 많은 사람들에게 의해 여러 가지 방법으로 연구되어져 왔다.[1]

3차원 메쉬 단순화의 기본 아이디어는 모델이 가지는 시각적 중요성에 대해 심각한 손실이 없이 특정 오차 한계 내에서 메쉬의 중요하지 않은 점이나 삼각형을 제거하는 것이다[1]. 메쉬 단순화는 모델의 렌더링 외에도 다음과 같은 이점을 제공한다. 3차원 모델은 매우 큰 저장공간을 필요로 하는데 메쉬 단순화와 압축 과정을 통해 데이터의 저장공간을 절약할 수 있으며 네트워크 상에서 3차원 모델 데이터를 전송할 때에도 전송의 부하를 줄일 수 있다[1,2]. 이와 같이 메쉬 단순화는 하드웨어 성능의 한계와 모델의 복잡성 사이의 간격을 좁혀 사용자에게 보다 나은 3차원 영상을 제공하기 위한 노력이라고 할 수 있다. 이론적으로 보면 메쉬 단순화는 가장 적은 수의 메쉬로 원래 모델과 최대한 비슷한 품질을 가지게 압축하여 표현하는 것이 그 목표이다[1,3].

본 논문에서는 컴퓨터 환경에서 3차원 물체를 효율적으로 취급하기 위해 2차원 평면 표본화와 웨이브릿 변환을 이용한 3D 객체 간소화 기법을 제시한다. 2차원 표본화는 연결 정보가 중요시 되는 3차원적 형태 문제를 간단히 할 수 있으며 표본화된 2차원 다각형에 대해서 주파수 해석을 수행하기 때문에 보다 빠른 변환을 가능하게 한다. 그 결과 투영된 다각형의 좌표 값들의 순서열을 변환하기 때문에 메쉬의 3차원 연결 정보를 고려할 필요가 없으며 간소화 알고리즘의 구조가 간단해진다. 실제 간소화는 투영된 다각형 좌표들에 대해서 웨이브릿 변환을 수행하고 주파수 공간상에서 작은 에너지를 갖는 계수를 제거함으로써 간소화의 효율성을 높일 수 있었다.

2. 기존의 메쉬 단순화 관련 연구

지금까지 연구된 메쉬 단순화 알고리즘들은 메쉬 제거(mesh decimation)[4], 2차 오류 척도(quadric error metric)[5,6], 에너지 함수 최적화(energy function optimization)[7,8], 정점 군집화(vertex clustering)[9,10], 웨이브릿(wavelet) 기반 기법[11-14] 등으로 구분된다.

William J. Schroeder, Jonathan A. Zarge, 그리고 William E. Lorensen에 의해 개발된 삼각 메쉬 제거 알고리즘은 marching cubes 알고리즘에 의해 생성된 모델에서 좋은 결과를 나타낸다. 이는 사용자가 거리 오류(distance error) 항목을 지정하면 이 거리 내의 정점들은 모두 제거된다. 메쉬 제거 방법은 메쉬의 요소들, 즉 정점(vertex), 모서리(edge), 면(face)을 반복적으로 제거하는 작업으로 이루어져 있다. 즉 하나의 정점이 선

택되면 알고리즘은 제거 기준을 평가하고 그 정점과 부근의 정점들의 평균 면까지의 거리를 계산하여 만약 사용자가 지정한 값보다 적을 경우 그 정점을 제거하는 과정으로 수행되며 제거 후 발생한 홀(hole)을 지역적 재삼각화 과정을 거쳐 메우는 형식이다.

Garland와 Heckbert에 의해 소개된 QEM은 정점들의 쌍의 반복적인 병합으로 수행된다. 초기화 시점에 사용자가 지정한 문턱치 값(threshold value) t 에 따라 유효 쌍들(valid pairs)을 선택하여 이 정점들만 제거 대상으로 고려된다. 이 알고리즘에서 가장 중요한 점은 정점 병합 절차에서 이차 오류 척도라는 새로운 방법론에러를 표현했다는 것이다. 그러나 후보 정점 쌍들의 숫자가 증가될 때, 수행시간이 $O(n^2)$ 만큼 증가되고 문턱치 t 의 값을 지정하는 것이 쉽지 않기 때문에 일반적인 모델에 대한 자동적인 문턱치 선택이 어렵다는 것이다. 하지만 이러한 제약에도 불구하고 이 알고리즘은 효율성과 결과 모델의 충실도 및 알고리즘의 일반성 등에서 훌륭한 조화를 이루고 있다.

Hoppe[7,8]는 초기의 정점 V_0 와 그 정점들로 만들어진 삼각형 메쉬 M_0 에 대해 같은 형태를 가지면서 초기 메쉬보다 더 적은 수의 정점을 가지는 메쉬 M_f 를 반복적으로 만들어 내는 알고리즘을 고안했다. 이것은 에너지 함수 E 를 아래와 같이 정의하고 이 함수를 최소화하는 단순화 된 메쉬를 찾아낸다.

$$E(K, V) = E_{dist}(K, V) + E_{rep}(K) + E_{spring}(K, V) \quad (1)$$

이 과정은 정점의 수, 위치 그리고 연결성 등이 에너지 함수를 줄이기 위해 변하는 비선형적인 최적화 과정에 기반을 두고 있다. 식 (1)에서 볼 수 있는 것처럼 에너지 함수 E 는 세 부분으로 구성되어 있는데 먼저 E_{dist} 는 현재 메쉬에서 초기 메쉬의 정점 V_0 와의 거리를 나타낸다. 그리고 E_{rep} 는 현재 메쉬에서 정점의 수에 비례하고 E_{spring} 는 모서리들의 길이의 합으로 구성되어 있다. 또한 Hoppe[8]는 모서리 붕괴와 에너지 함수 최적화 기반한 메쉬 단순화 기법과 새로운 해상도 표현방법을 제시하였다. 전체 단순화 과정을 다해상도 데이터 구조에 저장하도록 하였는데, 즉 낮은 해상도의 메쉬와 단순화 과정의 역단계인 정점 분할에 의해 얻어지는 일련의 상세화 기록들로 구성하였다. 이러한 상세화 기록들이 점진적(progressive)으로 메쉬를 상세히 표현할 수 있게 해준다. 단순화 과정에서 붕괴되어야 할 모서리의 선택은 모서리 붕괴에 의한 에너지 함수가 가장 큰 것부터 이루어진다. 이런 방법들은 최적화된 결과를 얻을 수 있으나 최적화 된 결과를 얻기 위해서는 많은 시간이 필요한 단점이 있다.

Michael Lounsbery와 Tony DeRose, 그리고 Joe Warren은 메쉬의 다해상도 표현(multiresolution repre-

sentation)을 생성하기 위해 웨이브릿 이론을 사용한 바 있다. 그리고 이것에 기초한 적응적 재분할(adaptive subdivision) 알고리즘은 한 모델의 LOD(level-of-detail)를 완벽하게 저장하기 위해 웨이브릿 계수를 사용하는데 서로 다른 LOD를 갖는 모델의 수정은 웨이브릿 이론을 사용하는 또 다른 이점 중의 하나이다. 그러나 웨이브릿 변환은 정점들의 연결정보를 고려해서 변환을 수행하여야 하기 때문에 2차원 변환보다 복잡도가 증가하며, 복잡도를 줄이기 위해 연결정보를 고려하지 않고 변환을 수행하면 매단계마다 tiling을 최적화하여야 하며 최적화된 타일링 알고리즘이라 할지라도 거리를 고려해서 적용되기 때문에 변화가 심한 모델에 대해서는 사용자의 간섭을 필요로 하는 단점이 있다[12,15].

3. 제한한 웨이브릿 기반 메쉬 간소화 알고리즘

3차원 모델의 메쉬를 효과적으로 다루기 위해 본 논문에서는 3차원 메쉬를 2차원 평면으로 표본화하여 웨이브릿 변환을 수행한 후 주관적 화질에 영향을 작게 미치는 계수를 선택적으로 제거하여 단순화된 메쉬를 획득한다. 그림 1은 제한한 알고리즘의 전체적인 흐름을 나타낸다. 먼저 바운딩 볼륨(bounding volume:BV)을 생성한 후에 그 볼륨에 평행한 2차원 평면상에 모델의 정점을 투영시킨다. 그리고 각 평면에 투영된 다각형의 2개 좌표열에 대해서 웨이브릿 변환(forward wavelets transform)을 수행하며 사용자가 입력한 오차의 문턱치 값에 따라 제거할 계수를 선택적으로 제거한 후 그 결과를 웨이브릿 역변환(inverse wavelets transform)하여 다시 메쉬를 재건하는 과정으로 구성되어진다.

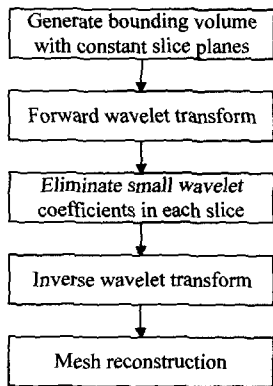


그림 1 제한한 웨이브릿 기반 메쉬 압축 알고리즘 블록도

3.1 등가경계를 가지는 슬라이스 생성

이 단계는 모델을 정점의 3차원 연결정보가 없이 웨이브릿 변환이 가능하도록 메쉬 데이터를 변환하는 과

정이며 먼저 메쉬의 바운딩 볼륨으로부터 다음과정을 거쳐 등가경계(equivalent contour)를 생성한다.

- 1) 물체의 x, y, z 축에 평행한 바운딩 볼륨, 즉 NMC (nearest minimum cubic)을 생성한다.
- 2) 바운딩 볼륨에서 가장 작은 폭을 갖는 좌표축을 기준 축으로 선택한다.
- 3) 선택된 좌표축의 수직방향으로 바운딩 볼륨을 등간격 슬라이스로 나눈다.
- 4) 메쉬를 이루고 있는 모든 정점들을 각각 가장 가까운 슬라이스로 투영시킨다.

여기서 x, y, z 축에 평행한 볼륨을 생성하는 이유는 투영시간을 최소화하기 위한 것이다. 예를 들어 x 축이 슬라이스들과 수직인 기준 축으로 결정되었다면, 한 정점의 (x, y, z) 좌표 중에서 x 값이 가장 가까운 슬라이스로 대체되며 이것이 곧 투영된 결과를 가져온다. 이렇게 표본화된 평면에서는 x 를 제외한 좌표들만이 변환에 사용되며 재건과정에서 제외된 x 좌표가 삽입된다. 투영 과정에서 슬라이스의 불연속적인 간격에 의한 표본화 오차가 발생되지만 물체의 전반적인 부분은 왜곡되지 않으며 슬라이스의 개수를 늘림으로써 표본화 오차를 줄일 수 있지만 고려해야할 평면이 증가된다. 그림 2는 2차원 표본화 과정을 보여준다.

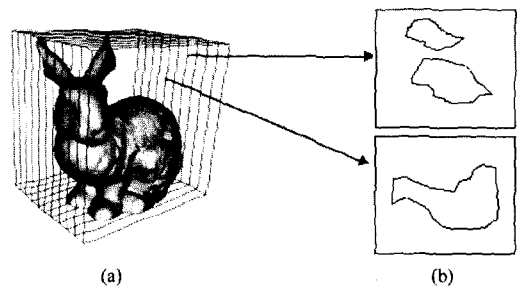


그림 2 바운딩 볼륨의 슬라이스 분할과 슬라이스에 투영된 메쉬의 등가경계 (a)바운딩 볼륨의 z -축을 균일하게 분할한 슬라이스 (b)가까운 슬라이스에 투영된 정점들로 이루어진 등가경계

제한한 방식은 가장 좁은 폭을 가지는 축에 수직으로 2차원 표본화 평면을 설정하고 정점 이동에 비해 무시할 정도로 작은 표본화 오차를 발생시키기 위해서 실험적으로 평면의 개수를 설정하였으며 실험 및 고찰에서 "triceratops" 및 "bunny" 모델에서 표본화로 인해 발생한 정점오차와 간소화 과정에서 발생한 정점오차를 복합적으로 계산하는 과정과 각 오차의 크기를 설명하겠다.

3.2 웨이브릿 변환

슬라이스에 투영된 정점들을 웨이브릿 변환하기 위해서 2개의 정점으로 만들어야만 한다. 본 논문에서는 보

편적으로 사용되는 중점 추가(mid-point insertion)방법을 사용하였다[12]. 즉, 가장 긴 거리를 갖는 정점들 사이에 무의미한(dummy) 중점을 추가하여 웨이브릿 변환을 가능하게 한다. 이들 중점은 이웃 정점을 잇는 한 직선상에 존재하므로 1단계 웨이브릿 analysis과정에서 계수값이 0이 되므로 쉽게 제거된다[12].

웨이브릿 변환 필터는 표 1에서 보는 것과 같이 크기 5의 Daubechies wavelets를 사용하였다. 왜냐하면 이 필터 계수는 polygon 좌표의 변환에 대해서 Haar 웨이브릿 필터 계수보다 좋은 특성을 가지기 때문이다 [12,16,17]. 그러므로 웨이브릿 변환 식은

$$\Phi(x_i) = \sum_{j=-n}^n h_L x_{2i+j} \quad (2)$$

$$\Psi(x_i) = \sum_{j=-n}^n h_H x_{2i+j} \quad (3)$$

와 같이 표현되며, 여기서 h_L 과 h_H 은 analysis filter 계수를 각각 나타낸다. 2차원 평면에 투영된 다각형의 연결 순서대로 나열된 두 좌표열에 대해서 1차원 웨이브릿 변환을 수행한다. 즉, 식 (2)를 적용하여 간소화된(decimated) 정보를 추출하고 식 (3)을 사용하여 (2)에 의해 제거된 세부 정보를 얻을 수 있다. 만약 한 평면에 2개 이상의 다각형이 발생되면 각각의 다각형에 대해서 독립적으로 변환이 수행된다.

표 1 Analysis filter 계수(Daubechies wavelets)

n	h_L	h_H
0	0.6029490182363579	1.115087052456994
±1	0.2668641184428723	-0.5912717631142470
±2	-0.07822326652898785	-0.05754352622849957
±3	-0.01686411844287495	0.09127176311424948
±4	0.02674875741080976	.

3.3 Threshold

웨이브릿 변환을 통해 그림 3에서와 같이 각 해상도에 따른 다각형 좌표열 2개에 대한 웨이브릿 변환 결과를 얻을 수 있다. 그러므로 원래의 1차원 신호 $f(x)$ 를 m 개의 웨이브릿 계수들의 선형조합으로 표현하면

$$f(x) = \sum_{i=1}^m c_i \Psi_i(x) \quad (4)$$

와 같다. 여기서 c_i 와 Ψ_i 는 analysis 과정에 의해 획득된 웨이브릿 계수와 basis vector를 각각 나타낸다. 그리고 주관적 화질의 기여도가 작은 계수들이 제거된 \tilde{m} ($\tilde{m} < m$)개의 웨이브릿 계수로 표현된 신호를 표현하면

$$\tilde{f}(x) = \sum_{i=1}^{\tilde{m}} \tilde{c}_i \Psi_i(x) \quad (5)$$

로 표현된다. 여기서 \tilde{m} 은 계수의 큰 값부터 허용된 오차를 유지하는 계수의 개수이다. 그러므로 크기 순으로

정렬된 웨이브릿 계수와 basis vector로써 식 (5)를 표현하면 다음과 같다.

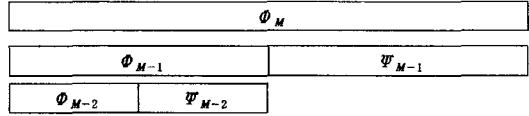


그림 3 정점의 웨이브릿 계수

$$\tilde{f}(x) = \sum_{i=1}^{\tilde{m}} c_{\alpha(i)} \Psi_{\alpha(i)} \quad (6)$$

여기서 $\alpha(i)$ 는 크기 순으로 정렬된 계수를 뜻한다. 원 신호를 나타내는 식 (4)과 식 (6)의 차이는 제거된 $m - \tilde{m}$ 개의 계수의 에너지가 되므로

$$|f(x) - \tilde{f}(x)|^2 = \sum_{i=\tilde{m}+1}^m (c_{\alpha(i)})^2 \quad (7)$$

와 같이 표현되고 $|f(x) - \tilde{f}(x)|^2 \leq \epsilon$ 만큼 근사화 오류를 포함하는 모델을 표현한 수식이다. 여기서 ϵ 는 사용자로부터 입력받게 되며 원 모델과의 허용 근사화 오류이다. 본 논문에서 사용된 오류는 제거된 정점과 새롭게 생성되는 정점사이의 거리를 사용하였다. 그러므로 허용 오차를 초과하지 않는 작은 크기의 웨이브릿 계수는 이 과정에서 제거된다.

3.4 웨이브릿 역변환

웨이브릿 역변환은 아래의 식을 이용하여 수행되어진다.

$$y_i = \sum_{j=-n}^n h'_L \Phi(2i+j) + \sum_{j=-n}^n h'_H \Psi(2i+j) \quad (8)$$

여기서 h'_L 과 h'_H 은 synthesis filter로서 계수는 표 2에서와 같다.

표 2 Synthesis filter 계수(Daubechies wavelets)

n	h'_L	h'_H
0	1.115087052456994	0.6029490182363579
±1	0.5912717631142470	-0.2668641184428723
±2	-0.05754352622849957	-0.07822326652898785
±3	-0.09127176311424948	0.01686411844287495
±4	0.02674875741080976	.

그림 4는 2차원 슬라이스 평면으로 투영된 모델에 대해서 웨이브릿 간소화를 보여주는 그림이다. 그림 4(a)는 추출된 2018개의 정점에 대해서 30개의 중점을 삽입하여 표현한 원모델을 보여주고 있다. 여기에서 3단계의 coarse 레벨로 변환된 간소화 다각형이 그림 4(b)이다. 이 과정을 반복적으로 거쳐 허용 왜곡 오류를 초과하지

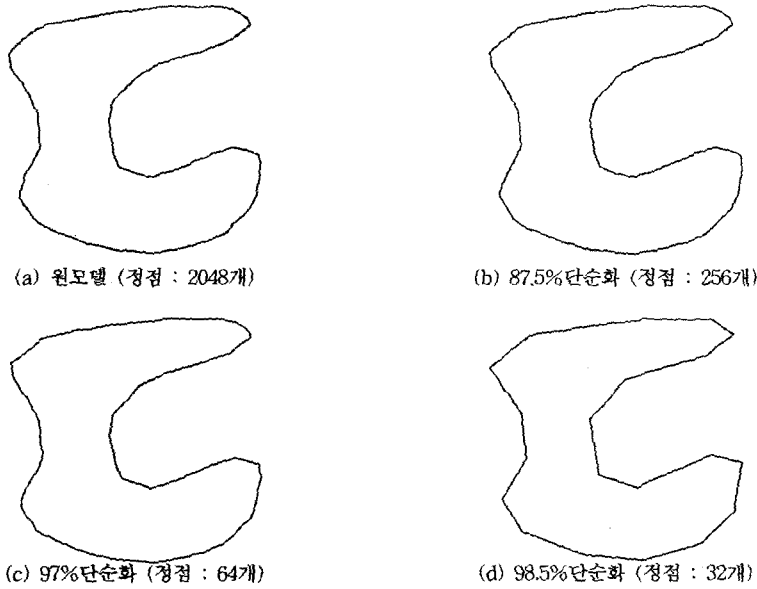


그림 4 슬라이스에 투영된 등가경계를 이루고 있는 정점의 단순화

않는 최종 base 메쉬 그림 4(d)까지 적용된다. 이 예에서 볼 수 있듯이 원모델의 외형을 유지하면서 간소화된 결과를 볼 수 있다. synthesis 과정은 문턱치 처리 이후 0이 아닌 계수값을 이용하여 합성되어진다.

3.5 메쉬 재생성

3.1절에서 3.4절에 걸쳐 설명된 과정을 통해 처리된 모델은 원 모델에서 중요하지 않은 정보를 포함한 정점들이 제거되고 이 제거된 정점들에 의해 2차원 다각형으로 표현되어지므로 이들 슬라이스들을 통합하여 다시 3차원 메쉬로 재생성하여야만 한다. 단순화된 평면 슬라이스 상의 2차원 좌표들은 바운딩 볼륨의 간격으로 다시 3차원 좌표로 표현된 후 그림 5에서처럼 정점들의 연결성을 부여하는 과정을 거쳐야만 한다. 본 논문에서 사용된 재 삼각화 과정은 Voronoi diagram을 이용한 Delaunay triangulation 방법을 사용하여 메쉬를 구성할 삼각형들을 만든다[18]. 이 과정에서는 'empty circumcircle'이라는 제약조건을 두어 삼각형의 세 정점이 이루는 외접원의 내부에 다른 정점이 존재하지 않도록 구성되어야 한다. 이러한 조건을 만족하기 위하여 각 삼각형의 세 정점을 외접하는 외접원의 내부에 다른 정점이 존재한다면 갱신 과정을 거쳐 항상 모든 삼각형이 이 조건을 만족하도록 구성하였다.

표본화되어 간소화 된 각각의 슬라이스는 모델의 등가 경계를 이루고 있는 정점들로 구성되므로 슬라이스와 슬라이스간의 정점들에 대해서 중간 경계를 구성하여 그림 5에서와 같이 먼저 Voronoi diagram(점선)을

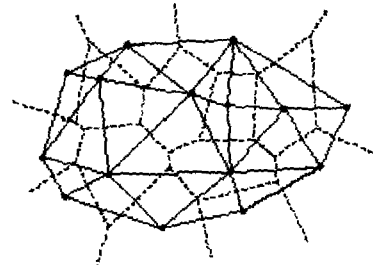


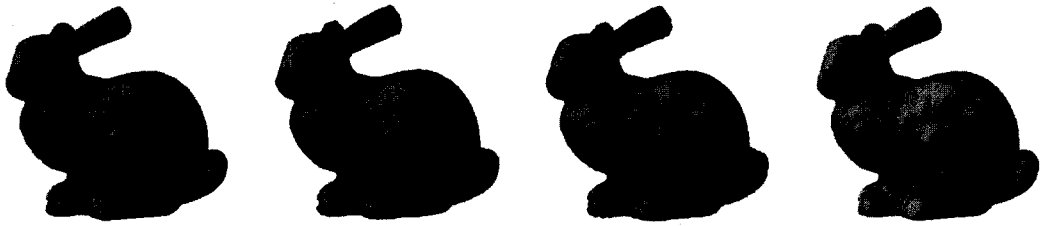
그림 5 Voronoi diagram(점선)을 이용한 Delaunay triangulation(실선)의 과정

생성한다. 이렇게 생성된 Voronoi diagram에 의해 영역으로 나누어진 슬라이스와 슬라이스 사이의 인접한 정점들을 연결함으로써 메쉬를 구성할 삼각형들을 재생성 한다.

앞서 언급한 것과 같이 기존의 웨이브릿 변환과 달리 제안한 방법은 연결 정보를 완전히 제거한 후 새롭게 만드는 것이 아니라 2차원 연결 정보를 띠고 있는 슬라이스의 정점을 기준으로 생성하기 때문에 원모델과 차이가 심한 왜곡은 발생하지 않는다. 또한 사용자의 간섭이 필요없으며 표본화 간격에 의한 미소 왜곡만 발생된다.

4. 실험 및 고찰

성능평가를 위해 사용된 컴퓨터는 Microsoft Windows2000 Professional 운영체제, Intel Pentium III 733의 CPU, 메모리는 256Mbyte인 환경 하에서 실험하



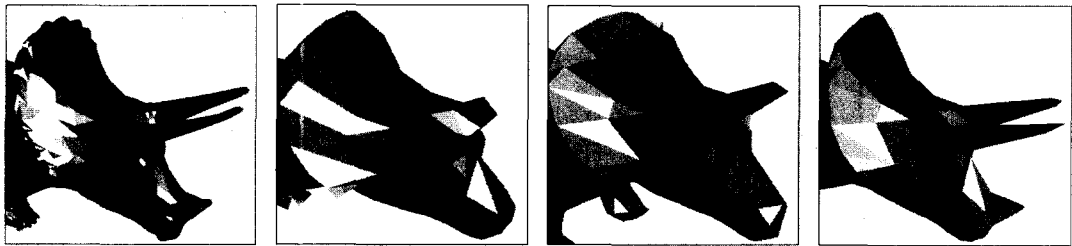
(a) 원 모델 (b) 균일 분할 군집화 (c) 부동 셀 군집화 (d) 제안한 방법

그림 6 단순화 결과



(a) 원 모델 (b) 균일 분할 군집화 (c) 부동 셀 군집화 (d) 제안한 방법

그림 7 단순화 결과



(a) 원 모델 (b) 균일 분할 군집화 (c) 부동 셀 군집화 (d) 제안한 방법

그림 8 300개의 정점으로 표현한 "triceratops" 모델의 국부적인 결과비교

였다. 사용된 3차원 모델은 비교적 부드러운 형태를 갖는 "bunny"와 급격한 변화가 많은 "triceratops"를 사용했고 기존의 메쉬 단순화 방법인 균일 분할 군집화 방법과 부동 셀 군집화 방법이 제안한 기법과 비교되었다. 그림 6(a)는 "bunny"의 원 모델이고 정점 개수는 34,834개, 삼각형 메쉬의 개수는 모두 69,451개이다. 그림 7(a)는 "triceratops"의 원 모델이며 정점 개수는 2832개, 메쉬는 5660개이다.

객관적 비교를 위해 원 모델의 정점 개수를 20%로 간소화해서 표현하였으며 그림 6과 7의 (b)~(d)는 균일 분할 군집화, 부동 셀 군집화 및 제안한 방법의 결과이다. 제안한 방법이 기존의 메쉬 웨이브릿 기법과 비교하지 않은 이유는 3차원 메쉬를 평면으로 표본화하여 3차원 문제를 2D curve로 변환한 후 각 평면에 대해서 curve wavelet을 적용하여 단순화를 시도하기 때문에 제안한 curve wavelet 기법은 군집화와 가장 비슷한 형식으로 동작된다. 참고적으로 mesh wavelet 기법은 3차원 공간상에서 정점이 간소화되기 때문에 error metric과 같은 형식으로 단순화된다. 제안한 방법에서

사용한 2차원 평면의 표본화 면의 개수는 150개를 사용하였다. 그림 6(b)의 메쉬는 4,989개, (c)의 메쉬의 개수는 5,426개이며 모델의 귀 부분을 보면 오차가 많이 발생한 것을 확인할 수 있다. 그러나 제안한 알고리즘의 결과는 동일한 정점 개수이지만 삼각형의 개수는 그림 6(b)와 (c)보다 적은 4,862개이며 "bunny"의 귀와 목, 코 등 모델의 전체적인 외형이 비교적 잘 유지되어 있는 것을 볼 수 있다. 또한 그림 7(b)~(d)에서 보는 것과 같이 기존의 방법에서는 "triceratops"의 코부분의 작은 뿔이 제대로 유지되지 못했으나 제안한 방식은 원 모델과 같이 급격한 변화가 왜곡되지 않은 것을 볼 수 있다. 그림 8은 300개의 정점으로 과도하게 간소화 시킨 후 "triceratops" 모델의 얼굴부분을 국부적으로 확대한 결과이다.

객관적인 거리척도(distance measure)를 비교하기 위해 각 모델의 bounding volume의 양 끝점의 최대 대각선 거리를 1로 하여 발생된 최대오차를 백분율로 표기하였다. 왜냐하면 모델의 좌표 scale이 다르기 때문에 정규화를 하여 각 방식의 최대오차 점으로 표시하였다.

표 3 제안한 기법의 간소화 오차 계산에 사용된 변수

parameter	triceratops	bunny
BV의 끝점(x, y, z)	(7.42, 4.06, 2.94) (-10.30, -3.69, -2.91)	(0.06, 0.19, 0.06) (-0.09, 0.03, -0.06)
BV의 거리	20.21	0.25
2D slice 기준 축	z	z
slice 간격(150개)	0.039	0.0008
최대 표본화 오차(e_s)	0.0195(0.09%)	0.0004(0.16%)
최대 간소화 오차(d_{max})	0.56(2.78%)	0.0024(0.96%)
전체 오차	$\approx 0.56(2.78\%)$	$\approx 0.0024(0.96\%)$

표 4 기존 방식과 결과 비교(원모델의 정점 수를 12.5%로 단순화한 경우)

method	Uniform subdivision clustering	Floating-cell clustering	Proposed method
Bunny model. # of triangle	4,989	5,426	4,862
Triceratops model. # of triangle	1,850	1,856	1,832
Maximum error(%) of bunny model.	1.42	1.03	0.97
Maximum error(%) of triceratops model.	3.10	3.08	2.78

3.1절에서 언급했던 것과 같이 “triceratops” 및 “bunny” 모델에서 계산된 오차변수를 표 3에 나타내었고 여기서 좌표와 거리는 소수점 이하 둘째 자리까지 표기하였다.

BV의 대각선 거리는 L2 norm, 즉 Euclidean 거리를 사용하였고 2D 표본화 평면의 기준 축은 단축 방향으로 모두 z 축이 선택되었다. 이 경우 최소 축을 150개의 slice로 분할하면 슬라이스 간격을 알 수 있고 최대 표본화 오차(e_s)는 슬라이스 간격의 반이 된다. 또한 간소화 과정에서 발생한 최대오차(d_{max})는 병합과정에서 발생하는 거리이다. 그러므로 전체오차는 표본화가 수직으로 평면에 투영되기 때문에 각 거리의 L2 norm으로 표현될 수 있다. 대부분 표본화 오차는 간소화오차에 비해 수십 분의 일 정도이므로 거의 무시할 수 있다. 평면의 개수가 150인 이유는 실험적으로 여러 가지 모델에 대해 실험한 결과 경험적으로 결정한 값이다. 표 4는 제안한 방식과 가장 유사한 간소화 과정을 보이는 두 가지 군집화 기법과의 객관적인 결과 비교를 나타낸다. 최대 거리 오차는 변화가 작은 “bunny”에서 작게 나타났다. 이 결과에서 볼 수 있듯이 제안한 방식은 정점의 개수가 같다고 할지라도 적은 수의 메쉬로 왜곡을 줄인 모델 표현이 가능하였다. 각 방식에 따라 삼각형의 개수가 다른 이유는 세 방법 모두 Delaunay 삼각화를 사용했기 때문에 ‘empty circumcircle’ 제약에 의해 삼각형의 개수가 다르게 나타난 것이다.

5. 결론 및 향후연구

본 논문에서는 모델의 국부적인 특성을 유지하기 위

해 웨이브릿 계수를 선택적으로 제거하여 3차원 모델을 단순화하는 웨이브릿 기반 메쉬 단순화 방법을 제안하였다. 즉 웨이브릿의 이론적인 성질을 사용하여 시각적 기여도가 낮은 주파수 성분을 부분적으로 제거하였기 때문에 모델의 전체적인 형태와 더불어 세부적인 특징 또한 잘 유지할 수 있었다. 다시 말하면 메쉬를 제거하더라도 모델의 중요한 특징들은 제거되지 않는다. 그러므로 기존의 정점 군집화 방법에 비해 원래 모델에 대하여 보다 충실한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 3차원 모델에 대해서 웨이브릿 변환을 효율적으로 적용하기 위해 2차원 평면 표본화 기법을 적용하여 3차원적인 연결정보를 사용하는 tiling 문제를 피할 수 있었으며 2차원 다각형 정보를 순서적으로 저장하여 1차원 변환만을 사용하는 단순한 기법을 제시하였다. 그 결과 같은 정점 개수를 사용해서 주관적 화질이 우수하면서 삼각형 메쉬의 개수를 최소화 할 수 있었다. 그러나 제안한 방법은 표본화 슬라이스의 간격을 경험적으로 결정하였기 때문에 단순하지만 최적의 성능을 나타내었다고 볼 수 없다. 그러므로 향후 연구에서 정점들의 공간적 분포에 따른 표본화 평면의 간격 및 개수를 가변적으로 자동 조절하는 모델 간소화 기법에 대해서 연구할 예정이다.

참고 문헌

- [1] Carl Erikson, Polygonal Simplification: An Overview. UNC Chapel Hill Computer Science Technical Report TR96-016. 1996.
- [2] Jonathan D. Cohen. Concepts and Algorithms for Polygonal Simplification. SIGGRAPH 99 Course Tutorial #20: Interactive Walkthroughs of Large

- Geometric Datasets. pp. C1-C34. 1999. also in SIGGRAPH 2000 Course Tutorial.
- [3] David P. Luebke, A Developer's Survey of Polygonal Simplification Algorithms. IEEE Computer Graphics&Applications. vol. 21, no. 3, pp. 24-35, 2001.
- [4] Schroeder, W. J., Zarge, J. A. and Lorensen, W. E., Decimation of triangle meshes. In *ACM Computer Graphics(SIGGRAPH'92 Proceedings)*, vol. 26, pp. 55-64, 1992.
- [5] Michael Garland, Paul S. Heckbert, August Surface Simplification Using Quadric Error Metrics, In *SIGGRAPH '97 Proc.*, pp.209-216. 1997.
- [6] Michael Garland, Paul S. Heckbert. Simplifying Surfaces with Color and Texture using Quadric Error Metrics. *IEEE Visualization'98*, pp. 263-270, Oct. 1998.
- [7] Hoppe, H., Progressive meshes. In *ACM Computer Graphics Proc.. Annual Conference Series(Siggraph '96)*, pp.99-108. 1996.
- [8] Hoppe, H., DeRose, T., Duchamp, T., Mcdonald, J. and Stuetzle, W., Mesh optimization. In *ACM Computer Graphics Proc.. Annual Conference Series(Siggraph '93)*, pp.19-26. 1993.
- [9] Low, K. L. and Tan, T. S., Model simplification using vertex clustering. In *1997 ACM Symposium on Interactive 3D Graphics*, pp.75-82. 1997.
- [10] Rossignac, J. and Borrel, P., Multiresolution 3D approximation for rendering complex scenes. In *Geometric Modeling in Computer Graphics*, pp. 455-465. 1993.
- [11] Jaideva C. Goswami and Andrew K. Chan. *Fundamentals of Wavelets : Theory, Algorithms, and Applications*. Published simultaneously in Canada. 1999.
- [12] Eric J. Stollnitz, Tony D. Deroese, and David H. Sallesin, *Wavelets for Computer Graphics-Theory and Applications*, Morgan Kaufmann Publishers, Inc., San Francisco, CA, 1996.
- [13] Matthias Eck, Tony DeRose, Tom Duchamp, Hugues Hoppe, Michael Lounsberry, and Werner Stuetzle, "Multiresolution Analysis of Arbitrary Meshes," *SIGGRAPH95*, pp 173-182, 1995.
- [14] Markus Gross, O. Staadt, and R. Gatti, "Efficient Triangular Surface Approximations Using Wavelets and Quadtree Structures," *IEEE Transactions on Visual and Computer Graphics*, vol. 2, no. 2, pp. 130-144, 1996.
- [15] Greg Turk, "Re-tiling Polygonal Surfaces," *SIGGRAPH92*, pp. 55-64, 1992.
- [16] I. Daubechies, "Orthogonal bases of compactly supported wavelets," *Commun. Pure Appl. Math.*, 41. pp. 909-996, 1988.
- [17] A. Chohen, I. Daubechies, *Ten Lectures on Wavelets*. CBMS-NSF Ser. App. Math.. 61. Philadelphia:SIAM, 1992.
- [18] Leach, G., Improving Worst-Case Optimal Delaunay Triangulation Algorithms, Department of Computer Science, Royal Melbourne Institute of Technology, Melbourne, Australia, June 15, 1992.



장명호

2001년 2월 금오공과대학교 컴퓨터공학과(학사). 2003년 2월 금오공과대학교 컴퓨터공학과(석사). 2003년 3월~현재 LG 전자 디스플레이제품연구소 근무. 관심분야는 컴퓨터 비전, 영상처리, 컴퓨터 그래픽스



이행석

2001년 2월 금오공과대학교 컴퓨터공학과(학사). 2003년 2월 금오공과대학교 컴퓨터공학과(석사). 2003년 3월~현재 금오공과대학교 컴퓨터공학과(박사과정). 관심분야는 컴퓨터 비전, 영상처리



한규필

1993년 경북대학교 전자공학과 학사. 1995년 경북대학교 전자공학과 석사. 1999년 경북대학교 전자공학과 박사. 현재 금오공과대학교 컴퓨터공학부 조교수. 관심분야는 DSP, 컴퓨터 비전, 영상처리, 컴퓨터 그래픽스, 가상현실



박양우

1988년 2월 경북대학교 전자공학과(공학사). 1990년 8월 경북대학교 전자공학과(석사). 2000년 8월 경북대학교 전자공학과(박사). 1997년 3월~현재 경운대학교 멀티미디어공학부 부교수. 관심분야는 컴퓨터비전, 영상처리, 신호처리