

확장된 이차오차 척도를 이용한 개선된 메쉬 간략화

한 태 화* · 전 준 철**

요 약

최근 복잡한 3차원 모델의 활용 범위가 확대됨에 따라 메쉬 모델의 간략화에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 기존의 모델 간략화 과정에서 널리 사용되는 모델의 정점에 대한 위치 정보에 근거한 기하 정보 기반의 간략화 방법에 모델의 속성 정보를 동시에 이용한 새로운 간략화 방법을 제시한다. 대부분의 3차원 메쉬 모델의 정보에는 기하 정보뿐만 아니라 모델의 색상, 질감, 그리고 곡률등과 같은 속성 정보가 포함되며, 기존의 간략화 방법은 통상적으로 기하학적 정보나 속성 정보를 개별적으로 적용하여 메쉬를 간략화한다. 본 논문에서 제시된 간략화 방법은 모델의 기하학 정보와 속성 정보를 동시에 적용하여 메쉬 간략화를 수행하였다. 특히 본 논문에서는 메쉬의 간략화에 상대적으로 수행 시간과 충실도에 장점을 지닌 이차 오차 척도(quadric error metric)를 확장하여 일반적인 기하학적 정보에 속성 정보를 추가하였다. 따라서, 제안된 메쉬 간략화 방법은 기하 정보기반으로 간략화를 수행하는 이차 오차 척도에 속성 정보가 추가된 간단한 이차식으로 확장하여 표현할 수 있다. 이는 기하 정보만을 이용하였을 때의 이차식의 공간 차수를 $m=0$ 으로 두었을 때 추가된 속성 정보의 특성에 따라 차수를 확장 함($m>0$)으로서 계산이 가능하다. 실험 결과, 제안된 방법에 의한 모델의 간략화 결과를 원 모델과 비교시 기하 정보만을 이용한 기존의 간략화 방법의 수행 결과에 비하여 모델의 전체적인 외형등 특성 정보의 충실도가 높다는 것을 입증할 수 있었다.

Enhanced Mesh Simplification using Extended Quadric Error Metric

Taehwa Han* · Junchul Chun**

ABSTRACT

Recently, the studies for mesh simplification have been increased according to the application area of the complicate 3D mesh models has been expanded. This paper introduces a novel method for mesh simplification which uses the properties of the mesh model in addition to the geometric locations of the model. The information of the 3D mesh model includes surface properties such as color, texture, and curvature information as well as geometric information of the model. The most of current simplification methods adopt such geometric information and surface properties individually for mesh simplification. However, the proposed simplification method combines the geometric information and surface properties and applies them to the simplification process simultaneously. In this paper, we exploit the extended geometry based quadric error metric(QEM) which relatively allows fast and accurate geometric simplification of mesh. Thus, the proposed mesh simplification utilizes the quadric error metric based on geometric information and the surface properties such as color, normal, and texture. The proposed mesh simplification method can be expressed as a simple quadric equation which expands the quadric error metric based on geometric information by adding surface properties such as color, normal, and texture. From the experimental results, the simplification of the mesh model based on the proposed method shows the high fidelity to original model in some respects such as global appearance rather than using current geometry based simplification.

키워드 : 메쉬 간략화(Mesh Simplification), 모델의 속성(Model Properties), 이차 오차 척도(Quadric Error Metric)

1. 서 론

컴퓨터 그래픽스의 많은 응용분야와 이에 관련된 연구분야는 3차원 물체의 시뮬레이션과 디스플레이를 위한 다각형 표면모델의 표현 방법에 대한 것이라 할 수 있다. 레인지 스케너의 사용은 3차원 모델 데이터를 획득하기 쉽게 하였으며 그 정확성을 표현하기에 충분히 많은 데이터를 제공한다. 다각형 표면 표현법을 이용한 3차원 물체 표현은 이미 실시

간 상호 작용 컴퓨터 그래픽스에서 지배적으로 이용되고 있다. 아울러 이런 다각형 모델은 간략화 표현이나 렌더링 알고리즘에 이용되어 렌더링 가속화를 가능하게 하는데 결정적인 역할을 하였다. 이러한 3차원 모델의 이용 영역이 확대됨에 따라 모델의 복잡도를 제어해야 할 필요성과 함께 관련 기술 연구가 수행되고있다. 대용량 3차원 모델 데이터를 온라인 상에서 실시간으로 활용하기 위해서는 보다 효과적인 모델의 복잡도 제어가 필요하다. 모델의 복잡도 제어는 모델의 표면 표현을 구성하는 다각형의 개수를 제어하는 것으로, 메쉬 간략화 기술을 이용하여 가능하다. 특히 그래픽스의 질적 보존을 전제로 한 메쉬 간략화는 초기 모델의 형

* 준 회 원 : 경기대학교 대학원 전자계산학과

** 정 회 원 : 경기대학교 정보과학부 교수

논문접수 : 2004년 7월 28일, 심사완료 : 2004년 8월 27일

태와 특징을 최대한 유지하면서 필요이상의 다각형의 수를 감소시키는 것이다. 간략화의 목적은 사용 모델의 크기, 관측자와의 거리, 모델의 중요한 특성을 가진 부분에 따라 시각적인 손실 없이 렌더링 비용을 줄이고자 하는데 있다[15, 16].

특히 3D 스캐너로부터 획득하여 구성한 모델의 기하 모델링과 자연스럽게 표현하기 위한 전역 조명(global illumination) 등은 복잡한 메쉬의 사용을 활성화시키는 계기가 되었다. 이런 메쉬 모델은 기존의 기하학적 위치 기반의 모델 간략화 알고리즘만으로 처리하여 저장 및 전송하고 렌더링하기에 어려움이 따른다. 특히 메쉬 모델은 그 정점에서 외형에 대한 속성값을 포함할 수 있다. 법선(normals), 색상(colors), 그리고 질감 정보(texture coordinate)등과 같은 것으로, 기존의 기하 정보기반 간략화 알고리즘으로는 간략화 수행동안 이런 속성들을 고려하기에 충분하지 못하였다.

본 논문에서는 3차원 메쉬모델에 대해 간략화를 수행할 때 모델의 외형 속성정보를 같이 고려하여 간략화를 수행하는 방법을 제시한다. 원 모델의 기하학적 유지를 위하여 간략화 알고리즘으로는 반복 에지 축약(iterative edge collapse)을 이용하였다. 이 방법은 기존의 다른 기법에 비해 재삼각화 수행이 필요하지 않다. 모델의 속성정보를 이용하기 위하여 Garland와 Heckbert의 이차 오차 측정법인 QEM(quadric error metric)을 확장하여 간략화를 수행한다[13]. 본 연구에서는 기존의 기하 정보기반의 방법에 속성 정보를 추가하여 확장함으로써 메쉬 간략화 수행 시 원 모델에 더욱 충실한 모델로의 간략화를 할 수 있는 방법을 제시하였다. 아울러 실험을 통해 확장된 이차 오차 측정방법을 이용한 간략화 방법이 기존에 모델 간략화 시 모델의 재특성을 개별적으로 적용하는 방법에 비하여 우수한 간략화 결과를 생성함을 입증하였다. 논문의 구성은 다양한 3차원 메쉬모델의 간략화 방법을 2장에서 소개하며, 3장에서는 기본적인 이차 오차 척도의 개념을 설명하고, 메쉬 모델의 기하 정보와 특성 정보를 함께 고려할 수 있는 확장된 이차 오차 척도를 유도하는 방법을 설명한다. 4장에서는 제안된 방법의 의한 간략화 모델과 기존 모델의 결과를 비교 설명하고, 5장에서는 결론 및 향후 연구에 관하여 기술하였다.

2. 관련 연구

메쉬 간략화기술은 초기 모델에서 필요 이상의 정보를 가지고있는 다각형을 제거하여 간단한 모델을 만드는 과정이다. 이때 충실도(fidelity)란 원 모델의 특성을 간략화 된 결과 모델이 얼마나 유지하고 있는가에 대한 사용자의 오차 측정을 위한 것으로, 간략화 된 모델이 사용자가 지정하는 화소(pixel)의 수를 초과하지 않고 스크린에 디스플레이 되었을 때, 원래 모델의 외형을 크게 벗어나지 않음을 의미한

다. 기존에 연구된 메쉬 간략화 수행 알고리즘을 분류하면, 삼각메쉬 제거(triangle mesh decimation[1]), 정점 군집(vertex clustering[2]), 복셀기반 물체 간략화(voxel-based object simplification[4]), 간략화 외피법(simplification envelopes[5]), 외형보존 간략화(appearance-preserving simplification[6]), 이차 오차 척도(quadric error metrics[13]), 영상기반 간략화(image-driven simplification[7]), 점진 메쉬(PM : progressive meshes[8])등으로 분류된다.

삼각 메쉬 제거 알고리즘[1]은 Schroeder, Zarge 및 Lorensen에 의해 발표되었으며 사용자가 거리오차(distance error)를 지정하면 이 거리 범위 내의 모든 정점이 제거된다. 즉, 하나의 정점이 선택되면 알고리즘은 정점의 제거 기준을 평가하고, 그 정점과 인접 정점들의 평균 면까지의 거리를 계산하여 지정값보다 적을 경우 그 정점을 제거하는 과정을 수행한다. 이 방법은 간략화된 모델의 정점이 원 모델의 부분 집합이기 때문에 정점의 법선과 질감 정보를 재사용 하는데 편리함을 제공하지만, 원 모델과 이에 간략화 모델사이의 기하학적 오차(geometric error)를 최소화하기 때문에 간략화의 충실도에 제한을 받게 되고, 정점 제거 후 생성되는 구멍(hole)의 지역적 재삼각화 과정이 필요하다.

Rossinac과 Borrel에 의해 제안된 정점 정합(vertex clustering) 알고리즘[2]은 위상에 민감하지 않은 알고리즘으로 각 정점에 대해 가중치를 정한 후, 3차원 그리드를 모델에 덮어씌워서 그리드의 각 셀(cell)안의 모든 정점을 대표할 수 있는 한 개의 정점으로 대신한다. 이때 그리드의 해상도가 간략화 결과에 밀접한 영향을 미치게 되며, 클러스터링이 진행되는 동안 모서리 상의 삼각형은 사라지기도 한다.

Lindstrom[3]은 Rossinac-Borrel의 알고리즘을 확장하여 최종 간략화 모델을 저장하기 위한 충분한 공간의 요구에 대비하여 out-of-core 알고리즘을 기술하여 다른 방향으로 확장하였다. 정점 정합 알고리즘과 out-of-core 확장 알고리즘은 정점들을 3D 그리드로 군집화하며, n 개의 정점에 대해 $O(n)$ 의 시간이 들기 때문에 상대적으로 매우 수행속도가 빠른 알고리즘이다. 그러나 정점 정합에 근거한 알고리즘들은 원래 모델의 위상을 간략화 후에 유지하기 어렵기 때문에 상대적으로 속도가 느린 다른 알고리즘에 비해 간략화 결과 모델의 충실도가 만족스럽지 못하다. 이에 비해 복셀기반(voxel-based) 모델 간략화 기법[4]은 위상보존 알고리즘으로 원 모델의 위상(genus)을 그대로 보존한다. 정점 정합 방법에 비해 위상 간략화를 위해서 점진적인 알고리즘의 수행과, 신호처리적 접근법을 이용하여 조절하고자 하였다.

Cohen 등은 간략화 외피법[5]에서 전체적이고 지역적인 위상을 고수함과 동시에 모델을 일정 범위 내에서 충실도를 보장하는 알고리즘을 제시하였다. 이 알고리즘은 모델의 표면에 대해서 두 개의 *offset* 표면을 구성하거나, 원래 표면에 대해서 거리 오차(ϵ)를 벗어나지 않는 범위에서 표면 *offset*

값을 복사해서 가지고 있도록 구성한다. 외피(outer envelope)는 원래 메쉬의 정점에서 모델을 따라 ϵ 차이만큼의 범선으로 구성하고, 내피(inner envelope)는 $-\epsilon$ 만큼의 거리로 구성한다. 외피와 내피는 서로 교차하지 않으며, 알고리즘은 지역적으로 ϵ 을 감소시키면서 수행된다. 다른 간략화 기법보다 다소 복잡한 이 알고리즘은 원 모델의 충실도와 위상 보존이 중요한 문제이긴 하지만 ϵ 범위를 정하는 것 역시 이 알고리즘에서 중요한 특징이다.

한편 Hoppe는 점진 메쉬[8]에서 초기의 정점 V_0 와 그 정점들로 만들어진 삼각메쉬 M_0 에 대해 에너지 함수 E 를 이용하여 간략화 메쉬 M_j 를 반복적으로 만들어내는 알고리즘을 제안하였다. 에너지 함수 $E(K, V) = E_{dist}(K, V) + E_{rep}(K, V) + E_{spring}(K, V)$ 는 세 부분으로 구성되고, E_{dist} 는 현재 메쉬와 초기 메쉬 사이의 거리, E_{rep} 는 현재 메쉬의 정점의 수에 비례하며, E_{spring} 은 모서리의 길이의 합으로 구성된다. 즉, 정점의 수와 위치와 연결성 정보로 에너지 함수의 최소화를 위한 비선형 최적화 과정에 기반을 둔 에너지 함수를 사용한다. 이 방법은 다해상도 데이터 구조 표현에 효과적이지만 최적화된 결과를 얻기 위해서 많은 시간이 필요한 단점이 있다.

외형보존 알고리즘[6]은 간략화 외피법의 오차범위를 확장시킨 알고리즘으로 다른 간략화 기법보다 높은 충실도를 보장한다. 이때 간략화 외형에 영향을 미치는 속성들은 정점의 위치, 색상, 그리고 법선벡터 영역 이 세 가지이다. 외형보존 간략화는 표면의 색상과 곡률에 대한 위치 정보를 분리시켜 질감과 노말맵을 따로 분리하여 저장한다. 에지 축약을 이용하며, 원 모델의 속성 정보를 부분적으로 이용할 수 있기 때문에 현재의 간략화 알고리즘 중에 가장 미래 지향적인 간략화 알고리즘으로 간주된다.

Lindstrom과 Turk는 영상기반(image-driven) 간략화기법[7]에서 모델 사이의 기하 오차를 사용하는 대신 영상의 차이로 오차 척도를 계산하였다. 영상 오차 척도는 두 영상 사이의 화소간 차이를 기반으로 하여, 간략화하는데, 이는 대부분의 기하학 기반 알고리즘이 취약점을 드러내고 있는 색상이나 질감과 같은 표면의 속성 정보를 같이 고려함으로써 기하학적 충실도를 보존하면서 상대적으로 표면 속성정보도 고려할 수 있는 장점이 있지만, 알고리즘의 수행 속도 측면에서는 단지 몇 백개의 다각형을 처리하는데도 수 시간이 걸리는 심각한 속도문제를 안고 있다.

기하학적 간략화에 비해 상대적으로 모델 자체의 특성을 가지고 간략화를 수행하는 연구는 부족하다. 지형 모델[9]과 같은 다소 제한적인 종류의 표면 모델에 대해 매우 간단한 방법들이 지역적으로 적용 될 따름이다. 그러나 좀 더 일반적인 표면 모델에 대해서 적용하기 위해서는 좀 더 진보적인 기법들이 필요한데, Hoppe는 점진 메쉬[8]에서 오차 척도에

속성 정보를 명시적으로 포함하려하였으며, Certain 등[10]은 웨이블릿 기반의 다해상도 프레임워크에 표면의 색상 정보를 추가하려 하였다. Hughes 등[11]은 그로드 셰이딩(gouroud shading)된 메쉬의 간략화를 시도하였으며, Cohen 등[12]은 간략화 될 표면의 질감맵에 대한 매개 변수의 재구성을 가능하게 하는 간략화 알고리즘을 제안하기도 하였다.

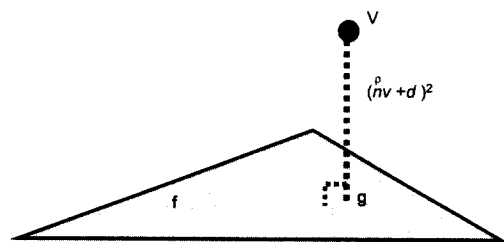
3. 확장 이차 오차 척도에 의한 간략화 알고리즘

모델의 기하학적 위치 정보만을 고려하여 간략화를 수행한 경우 다른 속성 정보를 이용하여 간략화를 수행하는것보다 계산량의 감소로 수행속도의 잇점을 얻을수는 있지만 원 모델과의 유사도 여부를 두고 판단할 때 충실도를 보장하기가 어렵다. 본 장의 앞절에서는 메쉬의 위치 정보를 이용한 기본적인 이차 오차 척도를 이용한 메쉬 간략화에 대해 설명하고, 2장에서는 이를 확장하여 속성 정보를 추가하였을 경우에 오차 척도를 확장한 간략화에 대해 기술하였다.

3.1 기하 정보를 이용한 메쉬 간략화

메쉬 모델의 간략화 방법은 주로 메쉬의 기하 정보를 이용하여 수행된다. 일반적으로 다각형 메쉬 모델 M 은 정점 V 와 면 F 의 집합으로 구성되었다. 각 정점 $v \in V$ 는 기하 정보 $g_v \in R^3$ 와 특정 스칼라 값인 속성 정보 $m, s_v \in R^m$ 의 집합으로 구성되어있다. 기하 정보 요소와 속성 정보 요소는 각각 정점 $v_v = (g_v, s_v)^T \in R^{3+m}$ 의 열 벡터로 g_v 와 s_v 를 구성하고, 점 $v = (g, s)^T \in R^{3+m}$ 으로 표현할 수 있다.

메쉬 모델의 기하 정보는 모델을 구성하는 일련의 정점 v 들의 위치 정보와 연결 정보인 면 정보 f 로 구성된다. 본 논문에서 기하 정보의 오차 척도로 이용하고자 하는 이차 오차 척도(quadric error metric : QEM)[13]는 Garland와 Heckbert가 제안한 알고리즘을 적용한다. 기본 QEM은 한 점에서 모든 평면까지의 거리의 제곱의 합으로 (그림 1)과 같이 나타낸다.



(그림 1) 점-면의 제곱 거리 : QEM

기하 정보만을 고려한 QEM에서는 위의 속성 정보 m 에 대해 $m=0$ 인 경우를 해결한다. 원래 메쉬의 각 면 f 는 한

점 $v = (g) \in R^3$ 에서 그 면을 포함한 평면까지의 제곱 거리와 같은 이차식 $Q^f(v)$ 로 정의된다. 원래 메쉬 상의 각 정점 v 에, 그 이웃하는 면에 대한 이차식에 면의 넓이 (S)만큼의 가중치가 합해진 이차식의 합으로 다음 식 (1)과 같이 할당된다.

$$Q^g(v) = \sum_{f \in \mathcal{F}} S(f) \cdot Q^f(v) \quad (1)$$

간략화 과정의 에지 축약, $(v_1, v_2) \rightarrow v$ 된 후 새로운 정점 v 는 이차식 $Q^v(v) = Q^{v_1}(v) + Q^{v_2}(v)$ 가 최소가 되는 위치의 점으로 할당된다. 그리고 다음으로 축약될 에지는 가장 작은 비용을 가진 것을 선택하여 이를 반복적으로 수행하여 메쉬 간략화를 하게 된다.

평면 $f = (v_1, v_2, v_3)$ 에 대해서 이차식 $Q^f(v)$ 는 다음 과정을 통해 구할 수 있다. 평면 f 를 포함하는 임의의 점 v 에서 거리는 점과 법선 벡터의 정의에 의해 $n^T v + d = 0$ 로 정의된다. 이때 속성 정보를 고려하지 않는 $m=0$ 인 정점을 $v = (g)$ 라 하면, g 에서 면 f 를 포함하고 있는 면 P 의 방정식은 $n^T g + d$ 로 유도할 수 있다. 이때 면의 법선 $n = (g_2 - g_1) \times (g_3 - g_1) / \|(g_2 - g_1) \times (g_3 - g_1)\|$ 이고, 스칼라 $d = -n^T g_1$ 이다. 이 식은 $\|n\| = 1$ 이라는 제약 조건 상에서, 다음 선형 시스템 식 (2)의 해를 구하면서 파라미터를 얻는다.

$$\begin{pmatrix} P_1^T & 1 \\ P_2^T & 1 \\ P_3^T & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

따라서, 한 점 g 와 평면 P 사이의 제곱 거리는 $Q^f(v = (g)) = (n^T v + d)^2 = v^T (n n^T) v + 2 d n^T v + d^2$ 로 나타낼 수 있고, 이때 이차 함수는 $v^T (A) v + 2 b^T v + c$ 라 표현할 수 있다. 여기서 A 는 대칭 3×3 행렬, b 는 크기 3의 열 벡터, c 는 상수이다. 그러므로 이차식 Q^f 는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$Q^f = (A, b, c) = ((n n^T), (d n), d^2) \quad (3)$$

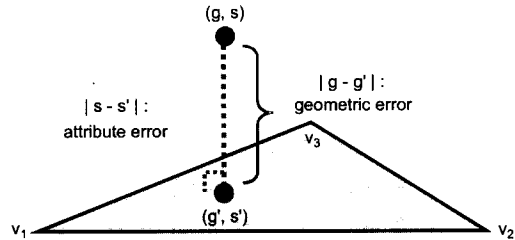
이때, 각 계수는 6, 3, 1로서 총 10개의 계수가 이용된다. 이차식은 4×4 의 대칭 행렬로 동차 행렬로 표현할 수 있기 때문에 식 (1)의 이차식 Q^f 이 10개의 계수 벡터들의 간단한 선형 조합을 이용하면 얻을 수 있다는 점에서 이 표현은 매우 효율적인 표현 방식이다. 에지 축약 후, 식 (1)을 최소화 하는 v_{\min} 의 위치는 1차 미분 $\nabla Q_v(v) = 2Av + 2b$ 가 0이 되는 조건을 만족하면 되므로, 다음 선형 시스템 식 (4)의 해가 바로 그 위치가 된다.

$$A v_{\min} = -b \quad (4)$$

그리고 에지 축약 후 새로운 위치 v 에 대한 이차식은 축약된 v_1 과 v_2 에서의 면적이 가중된 식 (5)와 같은 이차식의 합으로 할당된다.

$$Q^V(v) = \sum_{v_1 \in f} S(f) \cdot Q^f + \sum_{v_2 \in f} S(f) \cdot Q^f \quad (5)$$

3.2 모델의 추가된 특성 정보들을 위한 이차 오차 척도 확장 본 절에서는 3.1절에서 설명된 기하 정보만을 이용한 이차 오차 척도(QEM) 방법을 메쉬 표면의 특성 정보까지 포함한 확장 모델을 유도하는 과정을 설명한다. 기하 정보에 대한 모델의 간략화가 속성 차수 $m=0$ 인 경우를 고려하여 간략화를 수행한 반면, 정점의 속성 정보를 고려하면, 이 이차식은 속성 정보를 가진 ($m > 0$) 이차식으로 확장 할 수 있다. QEM의 점과 평면 (R^3)과의 거리 방정식을 확장시켜서 정점의 속성 정보가 포함된 차원으로 확장하면, 점과 초평면 (R^{3+m}) 사이의 거리로 간략화를 수행할 수 있다. $v = (p, s) \in R^{3+m}$ 인 정점 v 에 대하여 $Q^f(v)$ 는 점 v 로부터 세 정점 (v_1, v_2, v_3)의 확장된 아핀 공간 ($P' \subset R^{3+m}$)상의 거리로 정의할 수 있다. (그림 2)와 같이 축약으로 생긴 v 의 새로운 점 v' 에 대해서 이차 오차 $Q^f(v) = \|v - v'\|^2$ 은 기하 거리 오차인 $\|p - p'\|^2$ 과 속성 오차인 $\|s - s'\|^2$ 인 두 요소로 구성된다고 할 수 있다.

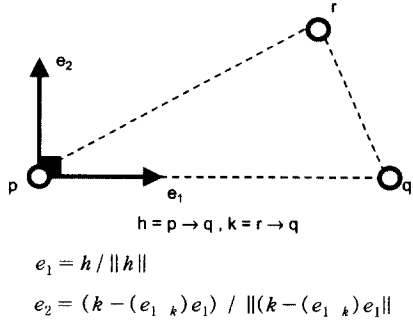


(그림 2) 기하 정보와 오차 정보의 차이

확장된 공간을 R^n 이라 하면 점 v 는 R^n 공간상의 위치 정보와 속성 정보를 가진 벡터 성분으로 표현 할 수 있다. 기하 성분에 색상 속성 성분을 추가하여 확장하면, 기존의 위치 정보 $[x, y, z]^T$ 성분은 $[x, y, z, r, g, b]^T$ 의 $n = 6$ 인 6차원 공간의 벡터 성분을 가진 정점이 된다. 기존의 기하 정보만을 고려한 이차 오차 척도를 확장하여 다음과 같이 유도할 수 있다.

확장된 공간상의 삼각형 T 를 이루는 세 점 p, q, r ($T = (p, q, r)$)은 색상을 가진 표면상의 한 점 p 는 $p = [p_x, p_y, p_z, p_r, p_g, p_b]^T$ 와 같이 기하 정보와 속성 정보를 함께 표현할 수 있다. 세 개의 선형 독립된 점은 항상 2차원 평면을 정의하고, 이때 세 점은 R^n 공간의 이차 평면을 정의하는데,

이 주어진 평면에서, R^n 공간상의 한 점과 이 평면과의 제곱 거리를 측정할 수 있는 이차식을 구할 수 있다. 2차원 평면이 삼각형 T 를 포함한다면, 한 점과 두 개의 직교 벡터를 정의할 수 있다. 임의의 한 점 p 에서, $h=q-p$ 와 $k=r-p$ 로 각각 h 와 k 를 정의하면, Gram-Schmidt의 직교 정규화 과정에 의해 (그림 3)과 같이 두 개의 직교 법선 벡터 e_1 과 e_2 를 계산할 수 있다.



(그림 3) e_1, e_2 의 계산

이것은 점 p 를 원점으로 하고 e_1 과 e_2 를 축으로 하는 공간을 구성할 수 있으며, 이론적으로 e_1, \dots, e_n 을 계산하면 축을 확대하여 공간을 확장 구성할 수 있다. 기존의 QEM을 일반화시켜보면 이때의 e_1 과 e_2 를 구할 수 있다. R^n 공간상의 점 v 에 대해서 T 의 평면으로의 제곱 거리 Q^v 를 고려하여 이를 구할 수 있다. 벡터 $u = p - v$ 의 제곱 길이는 식 (6)으로 풀어서 표현할 수 있으며, 이는 직각 이론에 따라 e_3 항 이후와 축이 되는 e_1, e_2 의 관계로부터 식 (7)로 재정리할 수 있다.

$$\|u\|^2 = u^T u = (u^T e_1)^2 + \dots + (u^T e_n)^2 \quad (6)$$

$$(u^T e_3)^2 + \dots + (u^T e_n)^2 = \|u\|^2 - (u^T e_1)^2 - (u^T e_2)^2 \quad (7)$$

식 (7)의 좌항은 T 의 평면에 수직인 모든 축을 따라 난 u 의 제곱 길이로서, 점 v 로부터 T 의 2차 평면까지의 직교 제곱 거리임을 의미한다. 식 (7)의 우항을 정리하면 식 (8)로 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \|u\|^2 - (u^T e_1)^2 - (u^T e_2)^2 \\ &= u^T u - (u^T e_1)(e_1^T u) - (u^T e_2)(e_2^T u) \\ &= v^T v - 2p^T v + p \cdot p \\ &\quad - v^T(e_1 e_1^T)v + 2(p \cdot e_1)e_1^T v - (p \cdot e_1)^2 \\ &\quad - v^T(e_2 e_2^T)v + 2(p \cdot e_2)e_2^T v - (p \cdot e_2)^2 \quad (8) \end{aligned}$$

이 식은 $v^T A v + 2b^T v + c$ 의 이차 함수 형태로 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A &= I - e_1 e_1^T - e_2 e_2^T \\ b &= (p \cdot e_1)e_1^T + (p \cdot e_2)e_2^T - p \\ c &= p \cdot p - (p \cdot e_1)^2 - (p \cdot e_2)^2 \end{aligned} \quad (9)$$

따라서, 표면 정보의 속성이 이차식에 추가가 되면, A 는 $n \times n$ 차의 행렬이 되고, b 는 n -벡터로 이차식의 확장이 가능하다. 색상 정보 뿐만 아니라 질감이나 법선의 속성을 더 추가할 경우에는 추가적인 차원 증가가 필요하다. 메쉬 표면의 정점의 위치 정보 이외에 속성 정보를 더 추가할 경우 속성의 요소가 증가되고 계산에 수반되는 수행 시간 역시 증가한다. <표 1>은 표면의 속성 추가에 따른 이차식의 각 계수들의 정보를 나타내고 있다.

<표 1> 표면의 속성 추가

모델의 정보	v의 표현	A의 차수	사용 계수
g (geometry)	$[x, y, z]^T$	3×3	10
$g + t$ (t : texture)	$[x, y, z, s, t]^T$	5×5	21
$g + c$ (c : color)	$[x, y, z, r, g, b]^T$	6×6	28
$g + c + n$ (n : normal)	$[x, y, z, r, g, b, u, v, w]^T$	9×9	55

칼라 모델의 경우 그로드 셰이딩 모델의 색상을 rgb 색상 체계로 표현하였다. 이는 다른 색상 모델의 체계에 비해 rgb 모델의 경우 0에서 1사이의 정규화된 값으로 표현되어 있기 때문에 이차식으로서의 확장이 편리하기 때문이다.

4. 실험 및 결과

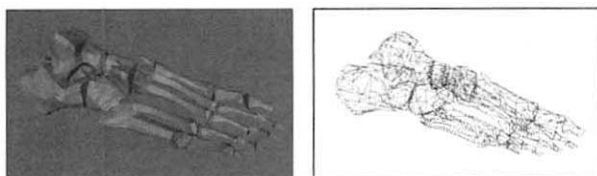
제안된 메쉬 간략화 방법의 평가를 위하여 다양한 메쉬 모델에 대한 간략화를 수행하였다. 본 논문에서 사용한 모델은 스탠포드 대학의 3D 메쉬모델을 사용하였으며, 실험의 평가를 위해 Intel Pentium IV 2.66GHz CPU, 512Mb 컴퓨터의 MS Windows 2000 운영 체제 환경에서 수행하였다. 실험에 사용된 메쉬모델은 bones, bunny 모델과 swirl 모델이다. 간략화 모델의 평가는 두 모델 M_A 와 M_B 의 사이의 차이로 모델의 원 모델과의 오차를 측정하는데, 본 논문에서 식 (10)과 같이 측정된 모델의 전체 오차 부분은 기하 오차 부분과 속성 오차 부분으로 나누어서 측정하였다.

$$E_{total}(v) = E_{geometry}(v) + E_{attributes}(v) \quad (10)$$

기하 오차의 측정을 위하여 Metro[14]를 이용하여 오차를 측정하였다. Cignoni 등에 의해 개발된 Metro는 모델의 표면 오차를 측정하기 위한 기하학적 도구로서, 입력 데이터로 두 모델을 받아들인다. 아울러 원 모델(M_A)과 간략화된 모델(M_B)간의 기하 오차를 측정하는데, M_B 모델에서 정점 샘플

플링을 하여, 각 샘플에서의 법선을 추정하기 위해 Phong-보간법을 이용한다. 그리고 M_A 가 가진 법선과 정점 샘플링에서의 선을 서로 교차하여 수행한다. Metro는 현재 모델의 기하학적 오차를 측정하는 대표적인 도구로서 닫힌 성질의 모델의 경우에는 체적의 변화율까지 측정하지만, 속성의 변화에 대한 오차를 측정할 수 없다. 따라서, 본 논문의 실험에 사용된 간략화 모델의 경우 속성에 대하여 별도의 오차 측정을 실시하였다. 기하 정보 측정을 위해 메쉬 M_A 와 메쉬 M_B 에 대해 각각 샘플링한 정점에 대하여 속성 정보를 계산하여 오차를 측정하였다. 샘플링 된 두 메쉬 사이의 속성 오차에 대해 RMS(L^2 -노름)과 최대(L^∞ -노름)값을 이용하여 비교하였다. 이 때 속성 변화의 편차를 측정하기 위하여 샘플링된 메쉬 사이의 속성 값에 대한 선형적 보간이 필요하다.

(그림 4) 및 (그림 6)은 bone 모델과 bunny 모델의 실험 결과이다. (그림 4)(b)와 (그림 6)(b)는 원 모델과 기하학적 위치 정보만을 이용한 QEM의 간략화 결과이고, (그림 4)(d)와 (그림 6)(d)는 기하 정보와 *rgb* 색상에 대한 속성 정보를 이용했을 때, 여기에 법선 정보를 추가하여 간략화 했을 때의 결과를 상호 비교하였다. 원래 bones 모델은 4,204개의 면(*f*)으로 구성되어있다. 이를 기하 정보만을 이용하여 1,500개의 면으로 간략화를 수행한 경우 (그림 4)(b)와 같은 메쉬 모델로 표현된다. 메쉬만으로 구성된 모델은 현실감이 부족하므로 본 논문에서 제시한 속성 정보를 추가한 방법에 의해 같은 면의 개수로 구성된 모델을 간략화 하였을 경우 (그림 4)(c)와 같은 결과를 얻을 수 있다. (그림 4)(d)는 기하 정보에 색상 정보뿐만 아니라 법선 정보까지 함께 고려하여 간략화한 결과로 좀더 원 모델에 시각적으로 충실한 간략화 결과를 볼 수 있다. 법선 정보를 이용하기 위해서 간략화 모델의 법선에 대한 분포와, 법선의 정규화 과정을 거쳐야 한다. (그림 7)은 bones 모델에서 법선의 분포와 정규화 정보를 나타내고 있다.



(a) bones 원 모델(*f*: 4,204) (b) *geometry f*: 1,500



(c) *color f*: 1,500 (d) *color + normal f*: 1,500

(그림 4) bones 모델의 간략화 결과: color 및 normal 속성 추가

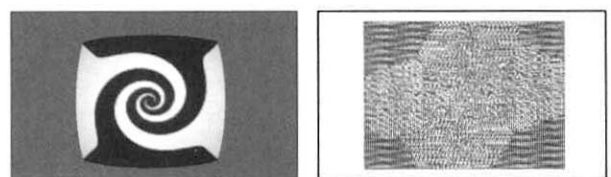
(그림 5)는 질감 정보가 추가된 swirl 모델의 실험 결과이다. 원 모델에 대하여 기하 정보만을 이용한 간략화 결과와 비교하면 질감 정보가 추가되어 간략화 한 (그림 5)(c)와 (그림 5)(d)의 경우는 간략화 수행 시 속성 정보를 고려하여 원 모델과의 질감 오차가 시각상 충실도가 높다는 것을 알 수 있다. (그림 6)에서는 법선 정보를 이용하지 않은 (그림 6)(c)의 경우 부분적으로 손실될 수 있는 정보에 대해 (그림 6)(d)의 경우 누락된 정보를 보정해주는 역할을 법선 정보가 담당하고 있음을 유추할 수 있다. (그림 8)은 Metro를 이용하여 원 모델과 간략화 모델들 간의 기하 오차 측정 결과(RMS)를 보여준다.

위의 실험에서 보았듯이 bunny와 bones의 경우에 전체 모델의 과도한 간략화 이전의 경우인 1/6까지 축약한 결과에서는 기하오차가 기존의 기하정보기반 간략화와 비교했을 때 비슷하거나 부분적으로 동일하였다. 이에 비해 swirl 모델의 경우는 질감 정보가 포함된 모델이기 때문에 기하 오차만을 측정할 경우 오차의 편차가 다소 크다는 것을 알 수 있다.

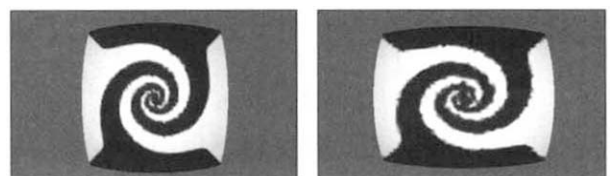
<표 2>는 모델의 색상과 법선 정보에 대한 RMS 오차를 측정하여, PM 모델의 결과와 비교하였다. 에너지 함수를 이용하므로 색상이나 노말 정보를 부분적으로 적용하는 기존의 PM 모델과 비교하였을 때 제안한 방법은 속성이 추가됨에 따라 간략화 수행 시간이 기하 정보만을 이용했을 때보다 많이 걸렸지만, 색상 오차와 법선 오차가 유사하거나 오히려 낮은 결과를 보임을 알 수 있다.

<표 2> 속성정보에 대한 오차 측정

모 델	RMS Color Error		RMS Normal Error	
	PM	제안방법	PM	제안방법
bones	0.059	0.056	0.27	0.26
bunny	0.034	0.032	0.12	0.12

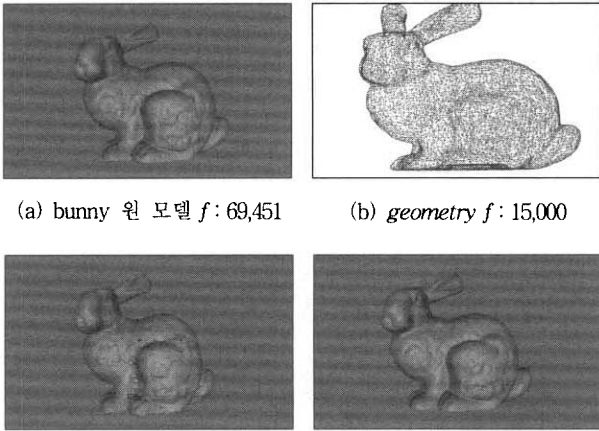


(a) swirl 원 모델 (b) *geometry f*: 12,000



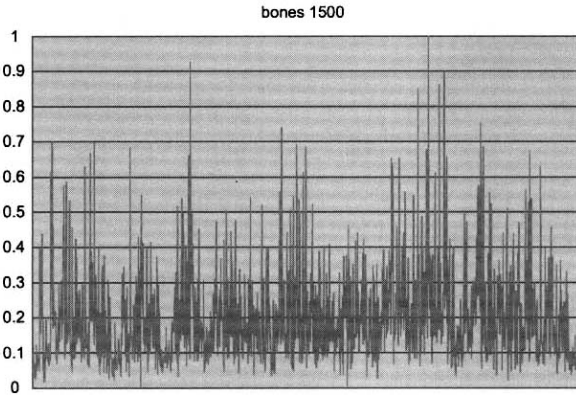
(c) *geometry + texture f*: 12,000 (d) *geometry + texture f*: 6,000

(그림 5) swirl 모델의 실험 결과: texture 속성 추가



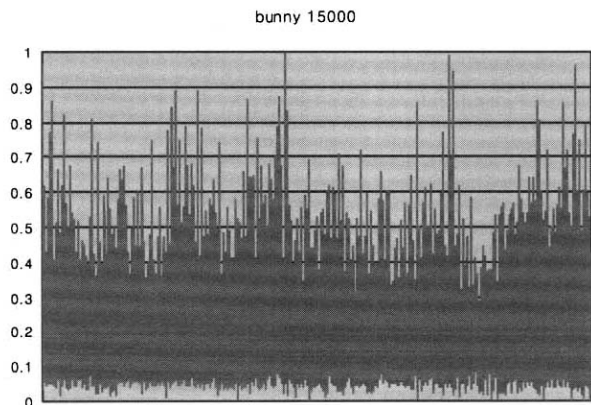
(a) bunny 원 모델 $f: 69,451$ (b) geometry $f: 15,000$
 (c) 속성 - color 이용 $f: 15,000$ (d) color + normal $f: 15,000$
 (그림 6) bunny 모델의 실험 결과 : color + normal 속성 추가

bones $f: 1500$ 모델의 법선
 Max : 0.6819603389096
 Min : 0.0075429046245
 Mean : 0.1417385151292



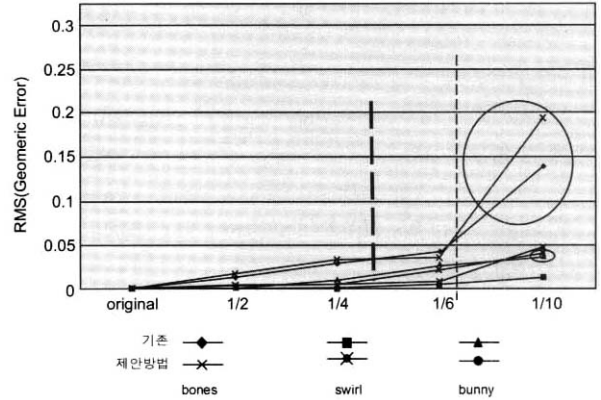
(a) bones 모델의 법선 정규화

bunny $f: 15000$ 모델의 법선
 Max : 0.0000398023251
 Min : 0.0000000070285
 Mean : 0.0000076013125



(b) bunny 모델의 법선 정규화

(그림 7) 법선의 정규화 : $N_{min}(=0) < N < N_{max}(=1)$



(그림 8) Metro를 이용한 RMS 측정

5. 결론 및 향후 연구

기존의 메쉬 모델의 간략화는 기하 정보를 주로 이용하여 간략화를 수행하였다. 상대적으로 그 복잡함으로 인해 모델의 기하정보 이외의 속성 정보(색상, 법선, 질감정보)를 포함하여 간략화를 수행하기가 어려웠다. 그러나, 본 논문에서는 기하 정보의 간략화에 가장 많이 이용되는 기존의 이차 오차 측정 방법을 확장하여 색상, 법선, 그리고 질감 정보와 같은 속성 정보를 포함한 확장된 이차 오차 척도 방법에 의한 간략화 방법을 제시하였다. 실험 결과 제시된 방법을 이용했을 시 메쉬 모델의 위치 정보만을 이용한 기존의 기하 정보 기반의 간략화에 비하여 간략화 결과가 원래 모델에 더 충실하게 모델을 간략화 할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 위치 정보와 정점의 다른 성질들을 함께 고려하여 간략화 대상으로 수행한 결과로 판단된다.

향후 연구로는 제안된 방법의 개선되어야 할 사항은 단순 기하 정보 간략화에 비하여 모델에 대해 과도한 간략화 수행을 할 경우 속성 정보의 고려로 인해 간략화 결과가 시각적으로 충실하지 못할수도 있다는 점이다. 둘째, 결과 메쉬에 대한 평가 측면에서, 기하 오차와 속성 오차를 함께 측정하기 위한 새로운 평가 방법의 개발에 대한 연구가 필요하다. 아울러, 보다 향상된 간략화의 방법으로 과도한 간략화 시 모델의 일그러짐을 방지하기 위한 에너지함수를 이용한 전체적 보정 방법의 연구 및 제안된 방법을 기타 속성 정보로의 확장(색상계의 확장 등)에 대해서도 역시 추후 연구의 진행이 필요하다.

참 고 문 헌

[1] W. J. Schroeder, J. A. Zarge and W. E. Lorensen, "Decimation of triangle meshes," *Computer Graphics (SIGGRAPH '92 Proceedings)*, Vol.26, pp.65-70, 1992.
 [2] J. Rossignac and P. Borrel, "Multi-resolution 3D approximation for rendering complex scenes," In Second Confer-

ence on Geometric Modelling in Computer Graphics, pp. 453-465, 1993.

[3] P. Lindstrom, "Out-of-core simplification of large polygonal models," *In Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000*, pp. 259-262, 2000.

[4] T. He et al., "Voxel-Based Object Simplification," *Proc. Visualization '95, IEEE CS Press*, Los Alamitos, pp. 296-303, 1995.

[5] J. Cohen, A. Varshney, D. Manocha, G. Turk, H. Weber, P. Agarwal, F. P. B. Jr. and W. Wright, "Simplification Envelopes, In *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, 1996 (ACM SIGGRAPH '96 Proceedings)*, pp.119-128, 1996.

[6] J. Cohen, M. Olano and D. Manocha, "Appearance Preserving Simplification," *computer graphics proc. Siggraph 98*, ACM Press, Vol.32, pp.65-70, 1998.

[7] P. Lindstrom and G. Turk, "Image-Driven Simplification," *ACM Trans. Graphics*, Vol.19, No.3, pp.204-214, 2000.

[8] H. Hoppe, *Proressive Meshes*, In SIGGRAPH '96, pp.99-108, 1996

[9] M. Garland and P. Heckbert, *Fast Polygonal approximation of terrains and height fields*, Tech Report, CS Dept., Carnegie Mellon U., 1995.

[10] A. Certain, J. Popovic, T. Deroose, T. Duchamp, D. Salesin and W. Stuetzle, "Interactive multiresolution Surface Viewing," In SIGGRAPH '96, pp.91-98, 1996.

[11] M. Hughes, A. Lassta and E. Saxe, "Simplification of Global-illumination Meshes," *Computer Graphics Forum, Eurographics '96*, Vol.15, No.3, pp.339-345, 1996.

[12] J. Cohen, D. Manocha and M. Olano, "Simplifying Polygonal Model Using Succesive Mappings," In *Proceedings IEEE Visualization*, pp.395-402, 1997

[13] M. Garland and P. S. Heckbert, "Surface simplification using quadric error metrics," In *Computer Graphics (SIGGRAPH '97 Proceedings)*, pp.209-216, 1997.

[14] P. Cignoni, C. Rocchini and R. Scopigno, "Metro : Measuring Error on Simplified Surface," *Computer Graphics Forum*, Vol.17, No.2, pp.167-174, 1998.

[15] C. Erikson, *Polygonal Simplification : An Overview* UNC Chapel Hill Computer Science Technical Report RT 96-106, 1996.

[16] David P. Leubke, "A Developer's Survey of Polygonal Simplification Algorithms," *IEEE Computer Graphics & Applications*, Vol.21, No.3, pp.24-35, 2001.



한 태 화

e-mail : han@kyonggi.ac.kr
 1995년 경기대학교 전자계산학과
 1998년 경기대학교 전자계산학과 대학원
 (컴퓨터 그래픽스 및 영상처리 전공)
 1999년~현재 경기대학교 전자계산학과
 박사과정

관심분야 : 3차원 모델링, 모델 압축, 다해상도 표현기법 등



전 준 철

e-mail : jcchun@kyonggi.ac.kr
 1984년 중앙대학교 전자계산학과
 1986년 중앙대학교 전자계산학과 대학원
 석사(소프트웨어 공학전공)
 1988년~1989년 삼성전자 통신연구소
 연구원

1991년 The Univ. of Connecticut 컴퓨터공학과 대학원 석사
 (컴퓨터 그래픽스 전공)
 1995년 The Univ. of Connecticut 컴퓨터 공학과 대학원 박사
 (컴퓨터 그래픽스 및 영상처리)
 2001년~2002년 미시건 주립대학 패턴인식 및 영상처리연구실
 (PRIP) 객원교수
 1995년~현재 경기대학교 정보과학부 부교수
 관심분야 : 3차원 얼굴 모델링 및 인식, Telemedicine system,
 내용기반 영상 검색 등