

논문 2006-43C1-2-9

볼록 집합 투영 기법을 이용한 3D 메쉬 워터마킹

(3D Mesh Watermarking Using Projection onto Convex Sets)

이 석 환*, 권 성 근*, 권 기 룡*

(Suk-Hwan Lee, Seong-Geun Kwon, and Ki-Ryong Kwon)

요 약

본 논문에서는 3D 메쉬 모델에 대한 POCS 기반의 워터마킹 방법을 제안하였다. 제안한 방법에서는 워터마킹 시스템의 조건들 중 견고성 및 비가시성에 대한 볼록 집합을 설계한 후 3D 메쉬 모델의 꼭지점들을 이 두 집합들로 수렴 조건을 만족할 때 까지 반복 교대 투영한다. 견고성 제약 조건 집합은 각 꼭지점의 거리 분포에 워터마크를 삽입하는 방법에 의하여 정의되며, 비가시성 제약 조건 집합은 꼭지점 좌표의 변화량에 의하여 정의된다. 실험 결과로부터 제안한 방법이 좌표 변환, 스케일링, 메쉬 간단화, 절단, 및 꼭지점 잡음 첨가 등의 공격에 대한 우수한 견고성 및 비가시성을 확인하였다.

Abstract

This paper proposes a robustness watermarking for 3D mesh model based on projection onto convex sets (POCS). After designing the convex sets for robustness and invisibility among some requirements for watermarking system, a 3D-mesh model is projected alternatively onto two constraints convex sets until the convergence condition is satisfied. The robustness convex set are designed for embedding the watermark into the distance distribution of the vertices to robust against the attacks, such as mesh simplification, cropping, rotation, translation, scaling, and vertex randomization. The invisibility convex set are designed for the embedded watermark to be invisible. The decision values and index that the watermark was embedded with are used to extract the watermark without the original model. Experimental results verify that the watermarked mesh model has invisibility and robustness against the attacks, such as translation, scaling, mesh simplification, cropping, and vertex randomization.

Keywords : 3D mesh watermarking, POCS, Closed Convex Set

I. 서 론

최근 웹 상에서는 평면 이미지뿐만 아니라 3D 그래픽을 구현할 수 있는 웹 3D 기술에 대한 관심이 증가되고 있다. 특히 국제 표준 기구인 ISO/IEC는 웹 상에서 3D 그래픽을 표현하는 표준으로 VRML^[1]를 공인

하고 있다. 그러나 VRML의 소스가 공개되어 있고, 라이선스를 요구하지 않아 원천기술 개발뿐만 아니라 누구나 자유로이 웹 상에서 3D 그래픽을 표현할 수 있다. 따라서, VRML로 구현된 3D 그래픽 모델의 저작권을 보호하기 위한 워터마킹 연구가 진행되고 있다.^{[2]-[12]} 3D 그래픽 모델은 베지에르 (bezier) 및 NURBS (nonuniform rational B-spline) 등의 곡면과 다각형 형태의 메쉬로 구현된다. 빠른 렌더링이 요구되는 웹 상에서는 복잡한 수식에 의하여 표현되는 곡면보다는 간단한 형태의 삼각 메쉬로 3D 그래픽 모델을 구현한다. 즉 VRML은 3D 그래픽 모델을 꼭지점 좌표 및 꼭지점들의 연결 정보에 의하여 정의되는 삼각 메쉬로 구현한다. VRML로 구현된 3D 그래픽 모델을 간단히 3D 메쉬 모델이라 한다. 이 메쉬 데이터들은 2D의 정지 영상 및 비디오 그리고 1D의 오디오 데

* 정회원, 동명대학교 정보보호학과
(Dept. of Information Security, TongMyong University)

** 정회원, 삼성전자 무선사업부
(Mobile Communication Division, SAMSUNG electronics co)

*** 정회원(교신저자), 부경대학교
(Division of Electronics, Computer and Telecommunication Eng., Pukyong University)

※ 본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음

접수일자: 2005년1월13일, 수정완료일: 2006년3월3일

이터와 비교하여 몇 가지 다른 특성을 가진다. 첫 번째로 2D 영상은 고정된 수평 및 수직 좌표 상의 화소 밝기값으로 나타난다. 그러나 3D 메쉬 모델은 임의의 정렬 순으로 나열되어 있는 꼭지점 좌표와 하나의 메쉬를 구성하는 세 꼭지점들의 정렬 순서인 연결 정보로 나타난다. 여기서 꼭지점의 정렬 순서는 바뀔 수 있으며, 이 때 꼭지점들의 연결정보도 이 순서에 따라 바뀌어야 한다. 그러나 꼭지점의 정렬 순서가 바뀐 모델도 원 모델과 동일하다. 두 번째로 3D 메쉬 모델은 기하학적 (geometrical) 및 위상학적 (topological) 연산에 의하여 수정이 용이하다. 여기서 기하학적 연산은 꼭지점 좌표를 바꾸는 것이고, 위상학적 연산은 메쉬를 구성하는 꼭지점들의 연결 정보를 바꾸는 것이다. 그러나 이들 두 연산에 의하여 수정된 모델은 원 모델의 형상을 그대로 유지한다. 세 번째로 웹 상에서는 렌더링 속도를 높이기 위하여 3D 메쉬 모델의 꼭지점 개수를 줄일 수 있다. 이는 3D 메쉬 모델의 데이터량을 줄이는 것으로서 2D 영상의 압축 알고리즘과 유사하다. 그러나 2D 영상에서는 해상도 및 화소의 개수가 유지되지만, 3D 메쉬 모델에서는 기존의 꼭지점 및 메쉬가 없어지고, 새로운 꼭지점 및 메쉬가 생성된다. 이와 같이 3D 메쉬 모델에서는 이를 구성하는 요소인 꼭지점 좌표 및 꼭지점들의 연결 정보가 바뀌더라도 원 모델의 형상을 유지한다. 그러므로 3D 메쉬 모델에 워터마크를 삽입하는 방법이 2D 영상에서보다 복잡하고 어렵다.

Ohbuchi 등^[2]은 기하학적 및 위상학적 변형에 기반한 TSQ (Triangle Similarity Quadruple), TVR (Tetrahedral Volume Ratio), MDP (Mesh Density Pattern) 워터마킹을 제안하였다. TSQ 방법에서는 인접한 메쉬들의 길이 비율에 워터마크를 삽입하며, TVR 방법에서는 사면체 체적 비율에 워터마크를 삽입한다. 그리고 MDP는 메쉬의 연결 정보에 워터마크를 시각적으로 삽입한다. 또한 이들은 꼭지점들의 연결 정보에 의하여 정의된 라플라시안 행렬의 고유 벡터에 투영함으로써 얻어지는 메쉬 분광 영역 (mesh spectral domain) 상에서 워터마크를 삽입하였다.^[3] 그러나 이들 방법들은 메쉬 간단화 및 리메쉬 등의 메쉬 연결성을 바꾸는 공격에 대하여 워터마크 추출하기 전에 원 메쉬의 연결성 정보를 찾는 재표본화 (resampling) 과정이 필요하다. Kanai 등^[4]이 제안한 방법에서는 3D 메쉬 모델의 다해상도 웨이블릿 상에서 웨이블릿 계수 벡터에 워터마크를 삽입한다. 이 방법에서 적용된 웨이

블릿 분해는 4개의 메쉬를 1개의 메쉬로 분할하는 정규적인 (regular) 형태의 부분할 기법이므로, 비정규적인 (irregular) 3D 메쉬 모델의 위상 (topology)을 4-to-1의 연결성으로 바꾸어야 하는 단점이 있다. 그리고 메쉬 간단화 및 리메쉬된 모델에 대하여 워터마크 추출하기 전에 재표본화 과정이 필요하다. Benedens^[5]은 3차원 방향 히스토그램인 EGI 분포 상에서 랜덤하게 선택된 방향에 속해 있는 메쉬 법선 벡터 분포에 워터마크를 삽입하는 방법을 제안하였다. 그러나 절단과 같은 기하학적 공격이 가해질 경우, 그 방향에 속해 있는 메쉬들이 없어지므로 삽입된 워터마크 정보가 없어진다. 또한 회전 등과 아핀 변환에서는 원 메쉬의 동일한 EGI 분포를 가지기 위하여 재배열 (realignment) 과정이 필요하다. 이상과 같이 기존 방법들에서는 기하학적 및 위상학적 공격에 모두 견고하지 못하다. 또한 특정 공격에 변형된 모델에서 워터마크를 추출하기 전에 두 가지의 과정이 필요하다. 좌표 변환 등의 아핀 변환된 모델에서는 원 모델의 좌표 방향으로 재배열한 후에 워터마크를 추출한다. 만약 꼭지점의 연결 정보에 워터마크를 삽입하였을 경우에는 재배열 과정이 필요하다. 그러나 이 방법은 위상학적 공격에 대하여 매우 취약하다. 그러므로 원 모델과 동일한 연결 정보를 가지기 위하여 재표본화 과정이 필요하다. 이 때, 기존의 방법에서는 원 모델의 꼭지점 좌표 및 연결 정보를 이용하여 재배열 또는 재표본화 과정을 수행한다. 따라서 이 두 과정을 원 모델의 꼭지점 좌표 및 연결 정보없이 워터마크를 추출하는 방법이 필요하다.

Yang 등^{[13],[14]}은 POCS (Projection Onto Convex Sets) 이론에 기반한 블록 부호화된 영상의 복원 기법을 제안하였다. 이 방법에서는 전송된 DCT 계수들의 정보를 포함하는 블록 집합 및 인접한 블록간의 연속성을 가지는 집합으로 블록 부호화된 영상을 반복 교대 투영한다. 이와 같이 POCS 기반으로 한 영상 복원 기법들이 많이 제안되어지고 있다.

일반적으로 워터마킹 시스템의 필요조건에는 견고성 및 비가시성 등이 있으며, 이 조건들은 워터마킹 시스템에 따라 상호 교환 (trade-off)적이다. 기존의 디지털 미디어에 대한 워터마킹 방법에서는 이들 조건을 만족하기 위하여 공간 영역 또는 변환 영역 상에서 견고성이 우수한 계수에 비가시적으로 워터마크를 삽입한다. 그러나 이 두 성질을 만족하는 조건들이 상호 의존적이다.

따라서 본 논문에서는 POCS 기반의 3D 메쉬 모델 워터마킹을 제안한다. 제안한 방법에서는 견고성 및 비

가시성의 조건을 독립적으로 설계한 후, 반복 투영 과정에 의하여 이 두 조건을 동시에 만족하는 하나의 수렴점을 찾는다. 여기서 견고성 및 비가시성의 조건은 디지털 미디어에 대한 워터마킹 시스템에 따라 적응적으로 설계되어질 수 있다.

제안한 방법에서는 각 꼭지점 거리를 등간격으로 나눈 후, 꼭지점 밀도가 높은 간격의 표본 평균값에 워터마크를 삽입한다. 그리고 꼭지점의 거리 분포 상에서 워터마크 정보에 따른 견고성 블록 집합 및 꼭지점의 좌표 변화량에 따른 비가시성 블록 집합을 각각 구한다. 각 표본 평균값들을 두 가지 블록 집합 상으로 반복 투영함으로써 수렴점인 워터마크가 삽입된 모델을 얻는다. 제안한 방법은 꼭지점의 거리 분포 상에 워터마크를 삽입하므로 워터마크 검출시 재표본화 과정이 필요없으나 아핀 변환된 모델에서는 재배열 과정이 필요하다. 따라서 원 모델 없이 꼭지점 밀도가 높은 간격의 위치 정보 및 각 간격의 워터마크 결정치를 이용하여 재배열 과정을 수행한 후 워터마크를 검출한다. 본 논문에서 제안한 방법의 성능을 평가하기 위한 실험에서 제안한 방법이 메쉬 간단화, 랜덤 잡음 첨가 및 절단 등의 공격에 대하여 우수한 견고성 및 비가시성을 가짐을 확인할 수 있었다.

II. 제안한 3D 메쉬 모델 워터마킹

1. POCS

N 개 꼭지점을 가지는 3D 메쉬 모델 M 은 $N \times 1$ 길이의 벡터로 표현되며, 이는 힐버트 공간 H 상에서의 원소라 가정한다. H 상에서 m 개의 단편 블록 집합 C_i ($i=0,1,\dots,m-1$)이 주어지고 이들 교집합 $C_0 = \bigcap_{i=1}^m C_i$ 이 공집합이 아닐 때, 이들 집합으로 n 회 투영된 모델 M_n 은

$$M_n = P_m P_{m-1} \dots P_1 M_{n-1}, \quad n=1,2,\dots \quad (1)$$

이다. 여기서 초기 모델 M_0 은 원 모델 M 이다. 임의의 집합 C_i 상으로의 투영기 P_i 는

$$\| M - P_i M \| = \min \| M - G \| \quad (2)$$

$$G \in C_i$$

와 같이 정의되며, G 는 M 의 투영된 모델이다. 이들

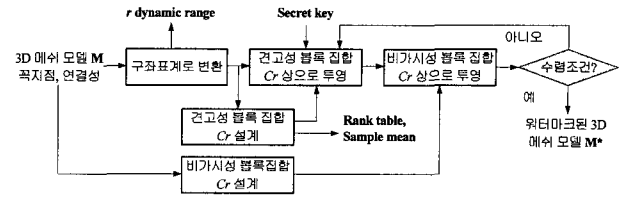


그림 1. POCS 기반의 워터마킹 삽입 과정
Fig. 1. The watermark embedding process based on POCS.

집합으로 반복 교대 투영 과정에 의하여 M 은 집합

$C_0 = \bigcap_{i=1}^m C_i$ 의 한 원소로 수렴한다. POCS에 기반한 워터마킹에서 가장 주요한 사항은 원하는 워터마크된 모델의 모든 특성을 단편된 블록 집합으로 표현하는 것이다. 그리고 한 원소로 수렴하기 위하여 이들 교집합이 공집합이 아니어야 한다. 따라서 이들 집합의 교집합 원소인 워터마크된 M^* 은 각각의 단편된 블록 집합으로 교대로 반복 투영함으로써 얻어진다.

제안한 방법에서는 워터마크 삽입 조건인 견고성 및 비가시성을 만족하는 두 개의 단편 블록 집합 C_r 및 C_v 을 각각 정의한 후, 수렴 조건을 만족할 때까지 M 을 두 집합으로 반복적으로 교대 투영함으로써 이들 집합의 교집합 성분인 M^* 을 얻는다. 여기서 수렴 조건은

$$\sum_{k=0}^{N_w} \| E'_{k,n} - E'_{k,n-1} \|^2 \leq 10^{-4}$$

이며, $E'_{k,n}$ 및 $E'_{k,n-1}$ 은 각각 M_n 및 M_{n-1} 에서 k 번째 구간에서의 표본 평균값이며, 이는 다음 절에 자세하게 설명하기로 한다. 위의 과정에 의하여 최종 수렴되는 벡터는 이들 집합의 교집합 성분인 M^* 이며, 워터마크가 삽입된 모델이다. 여기서 원 모델 M 은 비가시성 블록 집합 C_v 에 속해 있으므로, 투영 순서는 $M_n = P_v P_r M_{n-1}$ 이다. 제안한 방법의 전체적인 블록도는 그림 1에서와 같다.

2. 제안한 3D 메쉬 워터마킹

가. 워터마크 삽입 개요

제안한 방법에서는 기하학적 및 위상학적 공격에 견고하기 위하여 워터마크를 각 꼭지점의 거리 분포 상에 삽입한다. 따라서 워터마크 추출하기 전에 재표본화 과정은 필요없으나, 아핀 변환된 모델에 대하여 재배열 과정이 필요하다.

먼저 R^3 상에 N 개의 꼭지점 $v_{i \in [1, M]}$ 을 가지는 3D 메쉬 모델 M 이 주어졌을 때, 먼저 M 의 무게 중심

$m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i$ 이 기준 원점이 되도록 좌표 변환한다. 그리고 이 기준 원점에 대하여 각 꼭지점 좌표의 거리 $r_{i \in [1, M]}$ 를 구한 후에 그림 2 (a)에서와 같이 반지름이 r_{\max} 인 구 상에서 각 구간의 체적 비율이 $V_i = \alpha_i V_1$

$$\begin{aligned} V_i &= \frac{4}{3} \pi^3 ((r_{\min} + \Delta r_i)^3 - (r_{\min} + \Delta r_{i-1})^3) \\ &= \alpha_i V_1 = \frac{4}{3} \pi^3 \alpha_i ((r_{\min} + \Delta r_1)^3 - (r_{\min} + \Delta r_0)^3) \end{aligned} \quad (3)$$

where $\Delta r_0 = 0$, $\Delta r_1 = (r_{\max} - r_{\min})/K$

와 같이 되도록 K 개의 구간 $Q_{i \in [1, K]}$ 으로 분할한다. 여기서 r_{\max} 및 r_{\min} 는 각각 r 의 값들 중 최대값 및 최소값을 나타내며, K 는 삽입되는 이진 워터마크의 비트 수에 의하여 결정된다. α_i 는 랜덤하게 결정되는 체적의 비율이며, 워터마크의 비밀키이다. 각 구간의 범위는 $[r_{\min} + \Delta r_{i-1}, r_{\min} + \Delta r_i]$ 이고, Δr_i 는

$\sqrt{\frac{3\alpha_i}{4\pi} V_1 + (r_{\min} + \Delta r_{i-1})^3} - r_{\min}$ ($i \geq 2$)이다. 모든 $r_{i \in [1, M]}$ 들을 각 구간으로 표본화한다. r_i 가 $[r_{\min} + \Delta r_{i-1}, r_{\min} + \Delta r_i]$ 범위 내에 있을 때, r_i 의 표본 구간은 $Q_{i \in [1, K]}$ 이다. 그리고 각 구간 $Q_{i \in [1, K]}$ 에 표본화된 꼭지점의 밀도 $D_i = N_i/V_i$ 및 표본 평균 $E_i = \sum_{j=1}^{N_i} r_j/N_i$, $r_j \in [r_{\min} + \Delta r_{i-1}, r_{\min} + \Delta r_i]$ 을 각각 구한 후, 밀도가 높은 순으로 각 구간의 순위를 정한다. 여기서 N_i 는 Q_i 내에 표본화된 꼭지점의 개수이다.

제안한 방법에서는 그림 2 (b)에서와 같이 높은 순위를 가지는 구간의 표본 평균에 N_w 길이의 이진 워터마크를 삽입한다. 이 그림에서 $rank(D_i)$ 는 구간 Q_i 의 꼭지점 밀도 순위를 나타내며, 이의 역함수 $rank^{-1}(k)$ 는 k 번째 순위를 가지는 구간 Q_i 의 주소 i 를 나타낸다. k ($0 \leq k < N_w \leq K-1$) 번째 워터마크 비트 w_k 는 k 번째 순위를 가지는 구간의 표본 평균 $E_{rank^{-1}(k)}$ 에

$$E'_{rank^{-1}(k)} = (1 + \alpha R_k) \times E_{rank^{-1}(k)} \quad (4)$$

where $R_k = \begin{cases} -1, & \text{if } w_k = 0 \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases}$

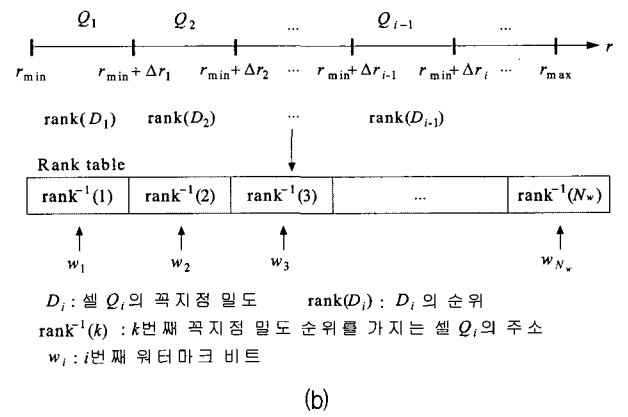
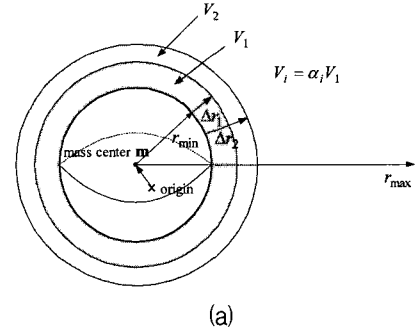


그림 2. (a) 체적 비율이 $V_i = \alpha_i V_1$ 되도록 구간 $Q_{i \in [1, K]}$ 분할 및 (b) 꼭지점 밀도가 높은 구간에 이진 워터마크 삽입

Fig. 2. (a) Samples the distance r_i into the bin $Q_{i \in [1, K]}$ that is to be volume ratio $V_i = \alpha_i V_1$ and (b) embeds the watermark into bins with high vertex density.

와 같이 삽입된다. α 는 삽입 강도를 나타낸다.

반복 투영 과정에서 원 모델 M 을 초기 벡터 M_0 로 간주하므로, 본 논문에서는 원 모델 M 의 표본 평균 $E_{rank^{-1}(k)}$ 을 $E_{rank^{-1}(k), 0}$ 로 나타낸다. $E_{rank^{-1}(k), 0}$ 는 워터마크 삽입시 기준값이며, 또한 워터마크 추출시 결정값으로 사용된다.

나. 블록 집합 및 투영기

워터마크 삽입 개요에 의하여 두 가지의 닫힌 블록 집합이 정의된다. 첫 번째로는 견고성 블록 집합으로 이는 식 (4)에 의하여 정의되는 전체적 제약 집합이다. 두 번째로는 비가시성 블록 집합으로, 이는 꼭지점의 좌표 변화량에 의하여 정의되는 국부적 제약 집합이다.

(1) 견고성 블록 집합

k 번째 순위를 가지는 구간에서의 표본 평균 $E_{rank^{-1}(k)}$ 는 식 (4)에 의하여 w_k 에 따라 이동된

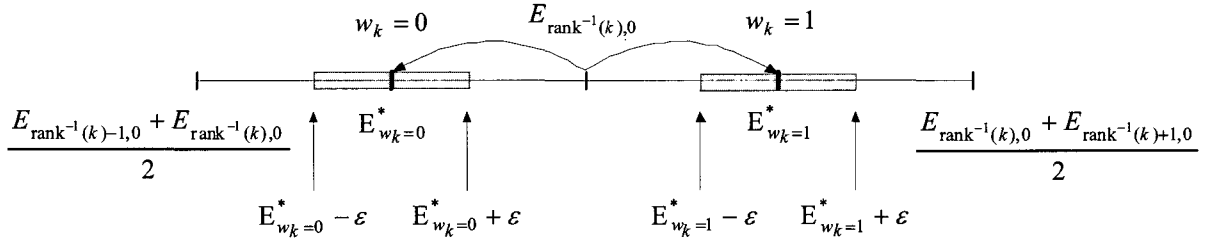


그림 3. k 번째 워터마크 비트 w_k 에 따라 구간 $Q_{rank^{-1}(k)}$ 의 표본 평균 $E_{rank^{-1}(k),0}$ 이동

Fig. 3. Move the sample mean $E_{rank^{-1}(k),0}$ of bin $Q_{rank^{-1}(k)}$ according to the watermark bit w_k

다. 즉, 그림 3에서와 같이 w_k 가 1이면, $E_{rank^{-1}(k)}$ 는 $[E_{rank^{-1}(k),0}, \frac{E_{rank^{-1}(k),0} + E_{rank^{-1}(k)+1,0}}{2}]$ 의 범위 내에, 그리고 w_k 가 0이면, $E_{rank^{-1}(k)}$ 는 $[\frac{E_{rank^{-1}(k)-1,0} + E_{rank^{-1}(k),0}}{2}, E_{rank^{-1}(k),0}]$ 내에 있다. 여기서 $E_{rank^{-1}(k)}$ 는 임의의 공격에 대하여 견고성을 갖는 위치에 있어야 한다. 제안한 방법에서는 그림 3에서와 같이 기준되는 표본 평균 $E_{rank^{-1}(k),0}$ 과 인접한 구간 경계 상의 중간값 $E_{w_k}^*$ 에 근접한 위치로 $E_{rank^{-1}(k)}$ 을 이동시킨다. 따라서 견고성 집합 C_r 는

$$C_r = \{ M \mid |E_{rank^{-1}(k)} - E_{w_k}^*| \leq \epsilon, k = 1, 2, \dots, N_w \} \quad (5)$$

와 같이 정의되며, $E_{w_k}^*$ 는

$$E_{w_k}^* = \begin{cases} (3E_{rank^{-1}(k),0} + E_{rank^{-1}(k)+1,0})/4, & \text{if } w_k = 1 \\ (3E_{rank^{-1}(k),0} + E_{rank^{-1}(k)-1,0})/4, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

이다. 식 (7)에서 집합 C_r 는 볼록이고 닫혀진 집합임을 알 수 있다. 그리고 이 집합은 워터마크 비트가 삽입되는 구간의 표본 평균이 범위 $E_{w_k}^* - \epsilon$, $[E_{w_k}^* + \epsilon]$ 내에 있는 3D 메쉬 모델들을 원소로 가진다. ϵ 는

$$\epsilon = \begin{cases} [\frac{1}{2}(\frac{E_{rank^{-1}(k)+1,0} + E_{rank^{-1}(k),0}}{2} + E_{w_k=1}^*) - E_{w_k=1}^*] / c, & \text{if } w_k = 0 \\ [E_{w_k=0}^* - \frac{1}{2}(\frac{E_{rank^{-1}(k)-1,0} + E_{rank^{-1}(k),0}}{2} + E_{w_k=0}^*)] / c, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$= \begin{cases} \frac{E_{rank^{-1}(k)+1,0} - E_{rank^{-1}(k),0}}{8 \times c}, & \text{if } w_k = 0 \\ \frac{E_{rank^{-1}(k),0} - E_{rank^{-1}(k)-1,0}}{8 \times c}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

와 같이 식 (7)에서 제약 조건 범위를 결정한다. ϵ 의 값이 매우 작을수록 $E_{w_k}^*$ 에 근접하므로 견고성이 매우 우수하나, 다른 블록 집합과의 교집합이 공집합일 수 있다. 따라서 반복 투영 과정에서 한 점으로 수렴하지 못하므로, 상수 c 에 의하여 ϵ 을 실험적으로 결정한다.

집합 C_r 상의 투영기 P_r 은

$$E'_{rank^{-1}(k)} = \begin{cases} \alpha(E_{w_k=1}^* + \epsilon) + (1-\alpha)E_{rank^{-1}(k)}, & \text{if } w_k = 1 \\ \alpha(E_{w_k=0}^* - \epsilon) + (1-\alpha)E_{rank^{-1}(k)}, & \text{else } w_k = 0 \end{cases} \quad (8)$$

와 같이 정의된다. 여기서, $E'_{rank^{-1}(k),0}$ 는 C_r 상으로 투영되기 위하여

$$\begin{cases} (E_{w_k=1}^* - \epsilon) \leq E'_{rank^{-1}(k),0} \leq (E_{w_k=1}^* + \epsilon) & \text{if } w_k = 1 \\ (E_{w_k=0}^* - \epsilon) \leq E'_{rank^{-1}(k),0} \leq (E_{w_k=0}^* + \epsilon) & \text{else } w_k = 0 \end{cases} \quad (9)$$

내에 있어야 하므로 α 는

$$\begin{cases} \frac{(E_{w_k=1}^* - \epsilon) - E_{rank^{-1}(k)}}{(E_{w_k=1}^* + \epsilon) - E_{rank^{-1}(k)}} \leq \alpha \leq 1, & \text{if } w_k = 1 \\ \frac{E_{rank^{-1}(k)} - (E_{w_k=0}^* + \epsilon)}{E_{rank^{-1}(k)} - (E_{w_k=0}^* - \epsilon)} \leq \alpha \leq 1, & \text{else } w_k = 0 \end{cases} \quad (10)$$

의 범위를 갖는다. 제안한 방법에서는 α 를 각 범위의 중간값으로 결정하였다. 따라서 반복 투영 과정에서 n 회 투영에서 C_r 상으로의 투영기 P_r 는 다음과 같다.

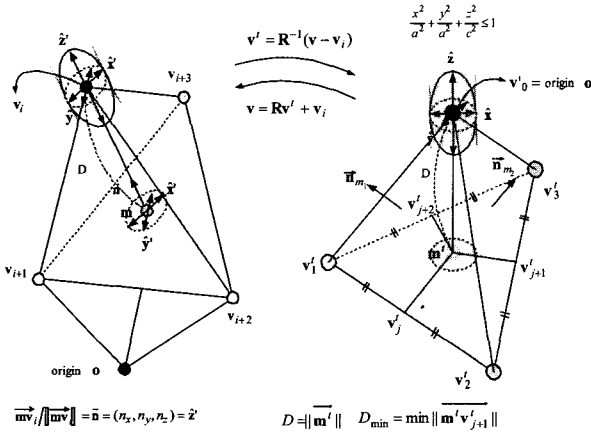


그림 4. 꼭지점 $v_i = \{x_i, y_i, z_i\}$ 의 이동 가능한 영역 제한

Fig. 4. Limit the possible movement range of a vertex $v_i = \{x_i, y_i, z_i\}$.

$$E^{rank^{-1}(k), n} = \begin{cases} \alpha(E_{w_k=1}^* + \epsilon) + (1-\alpha)E_{rank^{-1}(k), n-1}, & \text{if } w_k=1 \\ \alpha(E_{w_k=0}^* - \epsilon) + (1-\alpha)E_{rank^{-1}(k), n-1}, & \text{else } w_k=0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\alpha = \begin{cases} \frac{E_{w_k=1}^* - E_{rank^{-1}(k), n-1}}{(E_{w_k=1}^* + \epsilon) - E_{rank^{-1}(k), n-1}}, & \text{if } w_k=1 \\ \frac{E_{rank^{-1}(k), n-1} - E_{w_k=0}^*}{E_{rank^{-1}(k), n-1} - (E_{w_k=0}^* - \epsilon)}, & \text{else } w_k=0 \end{cases} \quad (12)$$

(2) 비가시성 블록 집합

2D 영상에서의 마스크 효과와 같이 3D 그래픽 모델에서는 꼭지점의 변화량이 셰이딩 영역에 따라 시각적으로 다르게 보여진다. 견고성 블록 집합으로 투영은 각 꼭지점들의 거리 분포에 워터마크를 삽입하는 과정이다. 그러나 각 꼭지점들의 좌표가 워터마크에 의해 변화되므로, 가시성이 떨어진다. 제한한 방법에서는 각 꼭지점들의 거리 변화를 셰이딩 영역에 따라 다르게 제한함으로써 비가시성 블록 집합을 정의한다. 즉, 꼭지점 $v_i = (x_i, y_i, z_i)$ 의 거리 r_i 변화 가능 범위를 그림 4

에서와 같이 셰이딩 영역에 따라 간단하게 모델링된 타원체 $F_i(v)$ 내로 제한함으로써 비가시성 블록 집합 C_v 을

$$C_v = \{ M \mid r_i \in F_i(v_i) \ i=1, 2, \dots, N \} \quad (13)$$

와 같이 정의한다. 여기서 각 꼭지점 v_i 에 대한 타원체 $F_i(v)$ 는 인접 꼭지점들의 평균 좌표 m 과 v_i 의 거리 벡터 \vec{n} 와 같은 방향인 \hat{z}' 방향과 B를 포함하는 평면 내에 서로 직각인 두 벡터 \hat{x}' \hat{y}' 방향을 타원체의 축으로 모델링된다. 이는 기준 좌표계 XYZ에 대한 타원체 $x^2/a^2 + y^2/b^2 + z^2/c^2 \leq 1$ 가 \hat{x}' \hat{y}' \hat{z}' 방향으로 회전 R 및 v_i 으로 변환 이동된 것으로 기준 좌표계 XYZ로 나타내어야 한다. 먼저, 기준 좌표계 XYZ에서 각 축간의 단위 벡터는 $\hat{x} = (100)$, $\hat{y} = (010)$, $\hat{z} = (001)$ 이고, 상대 좌표계 X'Y'Z'에서 각 축의 단위 벡터는 \hat{x}' , \hat{y}' , \hat{z}' 이라 한다. 여기서 \hat{z}' 는 평균 좌표B에서 v_i 와의 거리 벡터 $\vec{m} \cdot v_i$ 의 단위 벡터 $\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)$ 이다. 그리고 $\hat{x}' = (x_{\hat{x}'}, y_{\hat{x}'}, z_{\hat{x}'})$, $\hat{y}' = (x_{\hat{y}'}, y_{\hat{y}'}, z_{\hat{y}'})$ 는 v_i 에 연결된 인접 꼭지점들의 평균 좌표 B를 포함하는 평면에 속하며, 서로 직각인 단위 벡터이다. 회전 행렬 R 및 이의 역행렬 R^{-1}

$$R = \begin{bmatrix} \hat{x}' \cdot \hat{x} & \hat{y}' \cdot \hat{x} & \hat{z}' \cdot \hat{x} \\ \hat{x}' \cdot \hat{y} & \hat{y}' \cdot \hat{y} & \hat{z}' \cdot \hat{y} \\ \hat{x}' \cdot \hat{z} & \hat{y}' \cdot \hat{z} & \hat{z}' \cdot \hat{z} \end{bmatrix}, \quad R^{-1} = R^T$$

이므로 상대 좌표계를 기준 좌표계에 의하여 나타내면

$$v = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R v' + v_0 = \begin{bmatrix} x_{\hat{x}'} & x_{\hat{y}'} & n_x \\ y_{\hat{x}'} & y_{\hat{y}'} & n_y \\ z_{\hat{x}'} & z_{\hat{y}'} & n_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (14)$$

이다. $A_x = [x_{\hat{x}'} \ x_{\hat{y}'} \ n_x]$, $A_y = [y_{\hat{x}'} \ y_{\hat{y}'} \ n_y]$,

$A_z = [z_{\hat{x}'} \ z_{\hat{y}'} \ n_z]$ 일 때, 타원체 $F_i(v)$ 는

$$F_i(v) = \frac{(A_x v + v_i)^2}{a^2} + \frac{(A_y v + v_i)^2}{a^2} + \frac{(A_z v + v_i)^2}{c^2} \leq 1 \quad (15)$$

이다. 제한한 방법에서는 타원체를 식 (15)에서와 같이 \hat{z} 축 방향에 따라 대칭인 회전타원체 (spheroid)로 간단히 모델링한다. 여기서 타원체의 형태를 결정하는 두 변수 a, c 는 셰이딩 인자 α_i 에 따라 설정된다. 즉, v_i 및 인접 꼭지점들을 v_i 가 기준 원점이 되도록 $v' = R^{-1}(v - v_i)$ 와 같이 변환시킨 후, \hat{z} 축

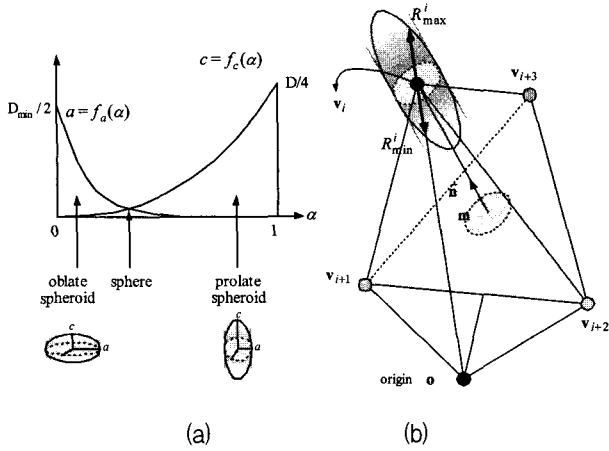


그림 5. (a) 셰이딩 인자 α 에 의하여 모델링된 회전타원체의 매개변수 a, c 및 (b) 각 꼭지점의 거리를 타원체 $F_i(v)$ 내에 제한
 Fig. 5. (a) Parameter a, c in spheroid that is modeled by shading factor α and (b) the limit range of vertex distance r_i in sphere $F_i(v)$.

방향으로 임의의 크기를 가지는 \vec{v}_i^t 와 이에 연결된 메쉬들의 법선 벡터 \vec{n}^t 와의 평균 사이각을 셰이딩 인자 $\alpha_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\vec{v}_i^t \cdot \vec{n}_j^t)$, ($0 < \alpha \leq 1$)로 정의한다. 그리고 a, c 는 그림 5에서와 같이 $a = \frac{D_{\min}}{2}(\alpha - 1)^K$, $c = \frac{D}{4} \alpha^2$ 으로 모델링하였다. 여기서 D 는 $\|\vec{m}^t\|$ 이며, D_{\min} 은 평균 좌표 m 와 인접한 꼭지점들을 이은 선분들의 중간 좌표 $v^t_{j \in [1, N]}$ 와 의 최소 거리 $D_{\min} = \min \|\vec{m}^t \cdot \vec{v}^t_{j \in [1, N]}\|$ 이다. N_i 는 \vec{v}_i 에 연결된 꼭지점들의 개수를 나타낸다. 급격한 셰이딩 영역에서의 꼭지점일 경우에는 α 가 1에 가까우므로 $c > a$ 인 길쭉한 (prolate) 회전타원체로 모델링된다. 이 때 꼭지점의 이동 범위는 \hat{z} 축 방향으로 제한된다. 이와는 반대로 완만한 셰이딩 영역에서의 꼭지점일 경우에는 α 가 0에 가까우므로 $a > c$ 인 편평한 (oblate) 회전타원체로 모델링되며, 이 때 꼭지점의 이동 범위는 \hat{x} 및 \hat{y} 축 방향으로 제한된다.

집합 C_v 으로의 투영기 P_v 는 꼭지점의 좌표가 이 타원체 내에 있도록 변환시킨다. 제안한 방법에서는 각 꼭지점의 거리 r 분포에 워터마크를 삽입하므로, 투영기 P_v 는 각 꼭지점의 거리 제한 범위를

$$r'_i = \begin{cases} R^i_{\max}, & \text{if } r_i > R^i_{\max} \\ R^i_{\min}, & \text{else if } r_i < R^i_{\min} \\ r_i, & \text{else} \end{cases} \quad (16)$$

와 같이 제한한다. 여기서 R^i_{\max} 및 R^i_{\min} 는 그림 5에서와 같이 원점 O 과 꼭지점 v_i 을 지나는 선과 v_i 의 타원체 $F_i(v)$ 의 두 교점이다. 따라서 n 회 반복 투영에서 C_v 상으로의 투영기 P_v 는 다음과 같다.

$$r'_{i,n} = \begin{cases} R^i_{\max}, & \text{if } r_{i,0} > R^i_{\max} \\ R^i_{\min}, & \text{else if } r_{i,0} < R^i_{\min} \\ r_{i,0}, & \text{else} \end{cases} \quad (17)$$

여기서 $r_{i,0}$ 은 M_0 의 r_i 이며, R^i_{\max} 및 R^i_{\min} 는 M_0 상에서 구하여진 값들이다.

다. 워터마크 추출

삽입된 워터마크를 추출하기 위하여 워터마크 삽입 과정에서 획득된 분할 구간의 초기 표본 평균 $E_{i \in [1, K]}$, 각 구간의 꼭지점 밀도에 대한 순위표, 및 원 모델의 r_{\min} , r_{\max} 를 이용한다. 그러나 워터마크를 추출하기 전에 좌표축 변환 및 스케일링된 모델에 대하여 원 모델의 기준 원점 및 스케일링 인자를 찾는 재배열 과정이 필요하다.

가. 좌표축 변환

임의의 좌표축으로 이동된 모델에서는 원 모델의 꼭지점 좌표없이 기준 원점을 찾아야 한다. 제안한 워터마크 삽입 과정에서는 원 모델의 무게 중심을 기준 원점으로 간주하며, 이는 그림 6 (a), (b)에서와 같이 좌표축 변환 및 회전된 모델에서의 무게 중심과 동일하므로, 재배열 과정없이 워터마크를 추출한다. 그러나 그림 6 (c)에서와 같이 좌표축 변환 및 회전된 모델들이 메쉬 간단화 및 부분 절단 등의 공격과 함께 변환되었을 경우에는 무게 중심이 다르므로, 원 모델의 기준 원점을 찾아야 한다.

먼저, 공격된 모델에서 무게 중심 m' 을 기준 원점으로 가정하고, 이 기준 원점에서부터 각 꼭지점의 거리 r' 를 구한다. 그리고 r' 를 원 모델의 초기 표본 평균 $E_{i \in [1, K]}$ 를 이용하여 각 구간 $Q'_{i \in [1, K]}$ 으로 표본화한 후, 각 구간의 밀도 $D'_{i \in [1, K]}$ 에 대한 순위표를 구한다. 여기서 원 모델의 순위표와 공격된 모델의 순위

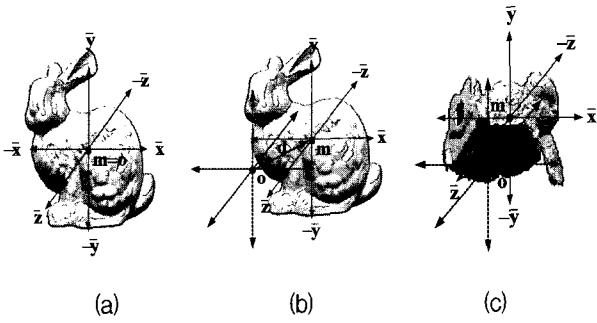


그림 6. (a) Stanford bunny 모델에서 기준 원점인 무게 중심 m , (b) d 만큼 좌표축 이동된 Stanford bunny 모델에서의 무게 중심 m^d , 및 (c) 절단, 회전, 및 좌표축 이동된 Stanford bunny 모델에서의 무게 중심 m'

Fig. 6. (a) mass center m of vertices in Stanford bunny, (b) mass center m^T of vertices in Stanford bunny that is translated to d , and (c) mass center m' of vertices in Stanford bunny that is translated, cropped and rotated.

표가 일치하지 않을 경우, 원 모델의 순위표 상에서 구간 $Q_{rank^{-1}(k)}$ 의 밀도 순위 k ($1 \leq k \leq N_w$)와 이 구간이 공격된 모델에서의 밀도 순위 $rank(D'_{rank^{-1}(k)})$ 와의 차이가 최소가 되는 위치 m^* 을

$$m^* = \arg \min \left[\sum_{k=1}^{N_w} |k - rank'(D'_{rank^{-1}(k)})| \right] \quad (18)$$

$$m' \in \mathbb{R}^3$$

와 같이 찾는다. m^* 을 기준 원점으로 하여 구하여진 구간의 표본 평균 $E^*_{rank^{-1}(k),0}$ 와 원 모델의 초기 표본 평균 $E_{rank^{-1}(k),0}$ 와의 차이를

$$w_k = 1 \quad \text{if } E_{rank^{-1}(k),0} - E^*_{rank^{-1}(k),0} < 0 \quad (19)$$

$$w_k = 0 \quad \text{otherwise}$$

와 같이 비교하여 워터마크를 추출한다.

나. 스케일링

임의의 인자로 스케일링된 모델에서는 원 모델의 스케일 인자를 찾은 후에 워터마크를 추출한다. 이 때, 본 논문에서는 균일 스케일링 (uniform scaling)으로 가정하며, 스케일링과 좌표축 변환이 동시에 가해지지 않는다고 가정한다.

스케일링된 모델에서의 스케일링 인자 α , β 는 $\alpha = r'_{\max}/r_{\max}$, $\beta = r'_{\min}/r_{\min}$ 이며, 이는 각 꼭지점 거리의 최대 r'_{\max} 및 최소 r'_{\min} 를 구한 후에

원 모델의 최대 및 최소 거리, r_{\max} , r_{\min} 와의 비율이다. 여기서 $\alpha = \beta$ 이면, 워터마크된 모델은 다른 공격이 가해지지 않은 스케일링된 모델이다. 이 모델에서는 꼭지점의 r 성분들을 r/α 으로 재스케일링한 후 식 (14)에 의하여 워터마크를 추출한다. 그러나 스케일링된 모델이 다른 공격에 의하여 변형되었을 경우에는 $\alpha \neq \beta$ 이다. 이 때, 원 모델의 순위표와 공격된 순위표와의 차이가 최소가 되는 스케일링 인자 α^* 를

$$\alpha^* = \arg \min \left[\sum_{k=1}^{N_w} |k - rank'(D'_{rank^{-1}(k)})| \right] \quad (20)$$

$$\alpha' \in \mathbb{R}$$

찾는다. 그리고 공격된 모델의 r 성분들을 r/α 으로 재스케일링한 후 식 (19)에 의하여 워터마크를 추출한다.

III. 실험 결과

본 논문에서 제안한 방법의 성능을 평가하기 위하여 컴퓨터 모의 실험을 행하였다. 본 실험에서는 Stanford bunny, knots, 및 Venus 모델의 VRML 데이터^[15]를 사용하였고, 길이가 50인 가우시안 랜덤 시퀀스를 이진 부호화하여 워터마크로 사용하였다. 그리고 임의의 체적 비율에 따라 나뉘어진 꼭지점 거리 r 의 표본화 구

표 2. 본 실험에 사용된 모델의 워터마크 삽입 시간, 투영 횟수, 및 VSNR

Table 2. Embedding time, iteration number for projection, and VSNR of models.

모델	꼭지점 수	면의 수	워터마크 삽입시간 [s]	투영 횟수	VSNR [dB]
Stanford bunny	35,947	69,451	10.23	8	43.85
Knots	23,232	46,464	6.84	7	42.05
Venus	33,591	67,178	9.34	8	41.35

표 2. 원 모델과 워터마크된 모델와의 대칭 RMS 거리

Table 2. Symmetric RMS distance between the original model and the watermarked model.

모델	경계상자 대각선 길이	표본 구간	대칭 RMS 거리
Stanford bunny	1.60724	0.00803	0.23718
Knots	2.22101	0.01110	0.02828
Venus	2.36235	0.01181	0.03244

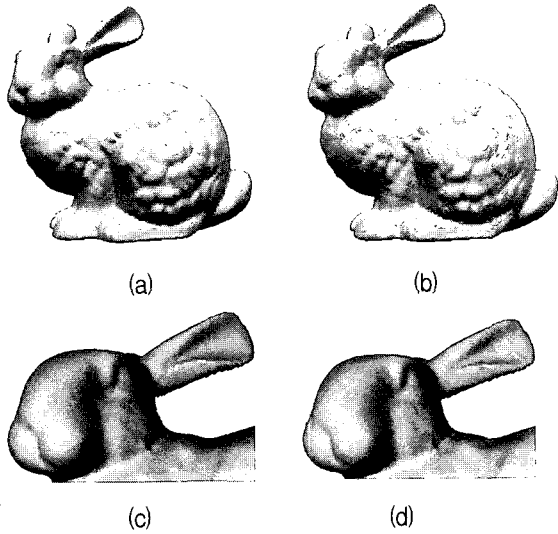


그림 7. 모의 실험에 사용된 (a) Stanford bunny, (b) 제안한 방법으로 워터마크된 Stanford bunny, (c) 확대된 (a) 모델, 및 (d) 확대된 (b) 모델
 Fig. 7. (a) Stanford bunny used for simulation (b) watermarked Stanford bunny, (c) magnified (a) model, and (d) magnified (b) model.

간 중 꼭지점 밀도가 높은 50개 구간의 표본 평균값에 워터마크를 삽입하였다. 각 모델에 대한 워터마크 삽입 시간 및 블록 집합으로의 투영 교대 횟수는 표 1에서와 같이 각각 약 7-10초 및 8회 정도이며, 이는 각 모델의 꼭지점 수에 따라 달라진다.

가. 비가시성 평가

본 실험에서는 워터마크된 모델의 비가시성을 평가하기 위하여 객관적 및 주관적 화질을 평가하였다. 먼저 객관적 화질에 대한 척도로 SNR 비인 VSNR와 MESH 측정^[16]을 사용하였다. 여기서 VSNR은 $10 \log_{10} (\text{var}(\|v - v_M\|) / \text{var}(\|v - v'\|))$ 이며, v 및 v' 는 원 모델 및 워터마크된 모델의 꼭지점 좌표이며, v_M 은 원 모델의 중심 좌표이다. 이 VSNR은 동일한 꼭지점의 개수 및 꼭지점 정렬로 이루어진 모델에 대해서만 적용되어진다. 제안한 방법에 의하여 워터마크된 Stanford bunny, Knots, 및 Venus 모델의 VSNR은 표 I에서와 같이 41 dB 이상이며, 이는 우수한 비가시성을 나타냄을 알 수 있다. 최근 3D 모델의 객관적 화질 척도로 Hausdorff 거리를 이용한 MESH 기법^[16]이 사용되고 있다. 본 실험에서는 측정된 거리의 정밀도를 나타내는 표본 구간 (sampling step)를 경계 상자 (bounding box) 대각선 길이의 0.5%로 두고

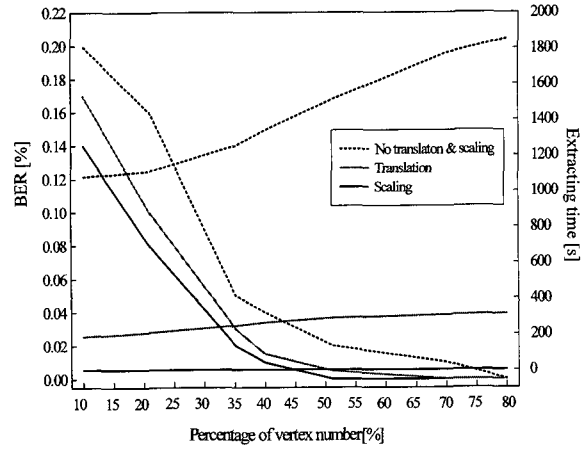


그림 8. 메쉬 간단화된 모델 그리고 좌표 변환 또는 스케일링과 함께 메쉬 간단화된 모델에서의 BER과 추출 시간
 Fig. 8. BER and extracting time of mesh simplified model without translation and scaling and with translation or scaling.

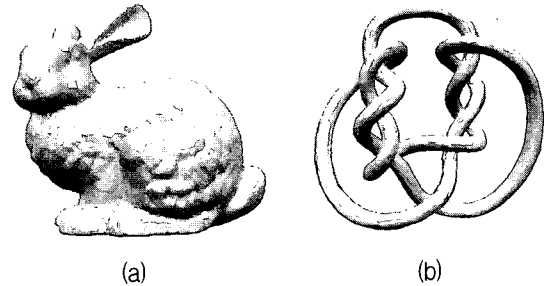


그림 9. 메쉬 간단화에 의하여 (a) 21.0%로 간단화된 Stanford bunny 및 (b) 24.3%로 간단화된 Knots 모델
 Fig. 9. (a) Stanford bunny simplified to 35.28% and (b) Knots simplified to 24.3% by using mesh simplification.

대칭 (symmetric) RMS 거리를 구하였다. 원 모델과 워터마크된 모델과의 대칭 RMS 거리는 표 II에서와 같다. 표 II를 살펴보면, 원 모델과 워터마크된 모델와의 대칭 RMS 거리가 0.033 이내에 있음을 확인할 수 있다. 여기서 화질의 우수성을 가지는 대칭 RMS 거리가 얼마인지는 정량적으로 나타내어 있지는 않다. 주관적인 화질 척도를 위하여 워터마크된 Stanford bunny 모델 및 원 모델과 특정 부분의 확대된 모델들을 그림 7에 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 시각적으로는 워터마크의 삽입 여부를 구분하기 어렵다.

나. 견고성 평가

제안한 방법의 견고성을 평가하기 위하여 본 실험에서는 워터마크가 삽입된 모델에 대하여 메쉬 간단화, 절단, 및 랜덤 잡음 첨가 등의 공격을 스케일링 및 좌표

변환과 함께 행하였다. 그리고 검출된 워터마크의 비트 에러가 발생될 때까지 각 공격의 강도를 가변하였다. 좌표 변환에서는 임의의 한 점으로 변환되며, 스케일링에서는 임의의 비율로 모든 꼭지점들의 좌표를 일정하게 축소 또는 확대하였다. 견고성 척도로는 추출된 워터마크의 비트 에러율 (bit error rate, BER)로 나타내었다.

메쉬 간단화에 대한 실험에서는 MeshToSS^[14]을 이용하여 워터마크 삽입된 모델의 꼭지점 개수를 다양한 비율로 줄였다. 좌표 변환 또는 스케일링과 메쉬 간단화된 모델에 대하여 추출된 워터마크의 BER 및 추출 시간은 그림 8에서와 같다. 여기서 %는 원 메쉬의 꼭지점 개수와 간단화된 메쉬의 꼭지점 개수의 비율을 나타낸다. 이 그림에서 살펴보면, 좌표 변환 및 스케일링이 없는 경우에는 메쉬 간단화가 40-50%될 때까지 비트 오류가 없으며, 21% 간단화되었을 때 10% 이상의 비트가 손실됨을 알 수 있다. 또한 워터마크 추출 시간은 모델의 꼭지점 수에 따라 약 0.15-0.25[s] 정도이다. 그러나 좌표 변환 및 스케일링이 있는 경우에는 재배열 과정을 수행한 후 워터마크를 추출하므로 추출 시간이 좌표 변환일 경우에는 17-25m, 스케일링 경우에는 3-5m 정도로 매우 길어진다. 이 때 추출된 워터마크의 BER이 좌표 변환 및 스케일링이 없는 경우보다 약 0.01-0.12 정도 높아진다.

표 3. 꼭지점 잡음 첨가 및 절단에 대한 실험 결과
Table 3. Results of vertex randomization and cropping experiment.

모델	공격	좌표 변환 및 스케일링이 없는 경우		좌표 변환		스케일링	
		BER	추출시간	BER	추출시간	BER	추출시간
Stanford bunny	꼭지점 잡음 첨가	0.04	0.33	0.06	28m02s	0.04	5m41s
	절단 (14,284개 꼭지점)	0.01	0.24	0.08	37m23	0.05	4m29s
	메쉬간단화 및 절단 (4,957개 꼭지점)	0.12	0.12	0.23	34m58s	0.18	3m01s
Knots	꼭지점 잡음 첨가	0.09	0.29	0.12	26m45s	0.09	5m15s
	절단 (10,455개 꼭지점)	0.00	0.22	0.10	35m08s	0.07	3m45s
	메쉬간단화 및 절단 (6,050개 꼭지점)	0.12	0.17	0.19	33m26s	0.18	3m18s
Venus	꼭지점 잡음 첨가	0.05	0.32	0.07	27m44s	0.05	5m31s
	절단 (13,347개 꼭지점)	0.01	0.22	0.13	36m53s	0.10	4m20s
	메쉬간단화 및 절단 (8,187개 꼭지점)	0.08	0.18	0.20	35m12s	0.19	3m32s

꼭지점 잡음 첨가에 대한 실험에서는 모든 꼭지점 v 에 $v \times (1 + \alpha \times \text{uniform}())$ 와 같이 균등한 랜덤 잡음을 첨가하였다. 여기서 α 는 변조도로 0.02이며, $\text{uniform}()$ 는 [-0.5 0.5]의 범위를 가지는 균등한 랜덤 함수이다. 따라서 각 꼭지점의 좌표값이 최대 소수 2자리까지 바뀌어진다. 꼭지점 잡음이 첨가된 모델은 그림 9 (a), (b)와 같이 메쉬의 연결성이 보존되지만, 꼭지점의 좌표값이 모두

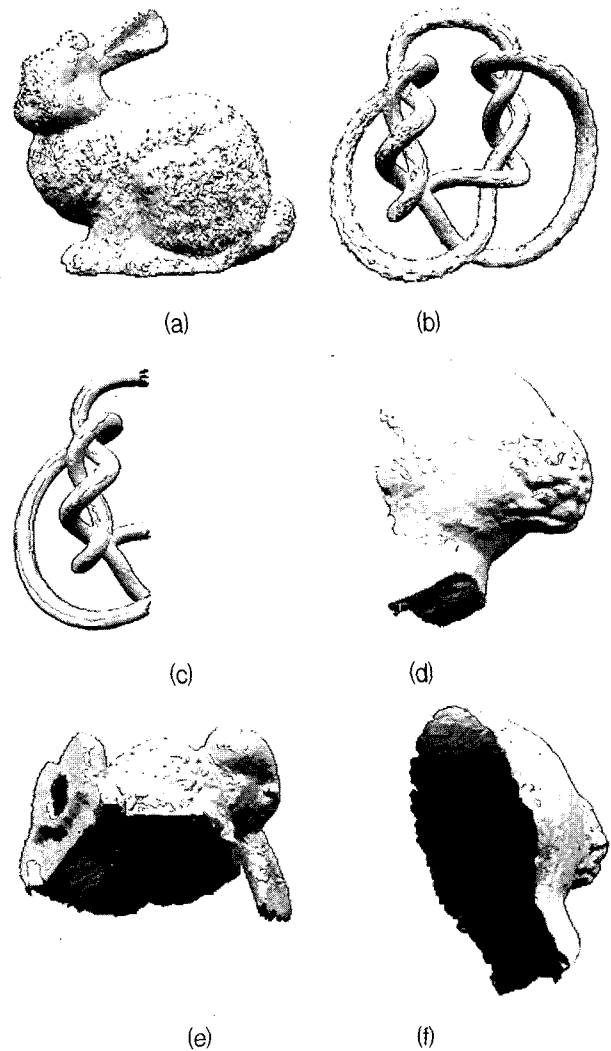


그림 9. 꼭지점 잡음 첨가된 (a) Stanford bunny 및 (b) Knots 모델, 왼쪽 또는 오른쪽의 꼭지점들을 40% 절단된 (c) Knots 및 (d) Venus 모델, (e) 절단, 메쉬 간단화, 및 (45°, 45°, 45°) 회전된 Stanford bunny 모델, 그리고 (f) 절단, 메쉬 간단화, 및 (0°, -45°, 0°) 회전된 Venus 모델

Fig. 9. (a) Stanford bunny and (b) Knots with vertex randomization, (c) Knots and (d) Venus cropped to 40% of the left or right vertices, (e) Stanford bunny cropped and simplified to 35.28 %, and rotated to (45°, 45°, 45°), and (f) Venus model cropped and simplified to 33.0%, and rotated to (0°, -45°, 0°).

바뀌어져 원 형상이 변질됨을 볼 수 있다. 그러나 이에 대한 실험 결과인 표 III를 살펴보면 좌표 변환 및 스케일링이 없는 경우에 BER이 약 0.04-0.09 정도로 약 91% 이상의 워터마크가 오류없이 추출됨을 알 수 있다. 그러나 좌표 변환 및 스케일링과 함께 꼭지점 잡음을 첨가하였을 경우에는 재배열 과정이 수행되므로, 추출 시간이 좌표 변환 경우에 약 26m-28m 정도, 스케일링 경우에 약 5m 정도로 길어진다. 또한 BER이 좌표 변환 및 스케일링이 없는 경우보다 약 0.02정도 높아짐을 알 수 있다.

절단에 대한 실험에서는 직각 좌표계 x 축의 절대값이 $\max x/8$ 보다 큰 값을 가지는 모든 꼭지점들을 제거하였다. 여기서 $\max x$ 은 x 축의 값들 중 최대값이다. 이와 같이 절단된 모델들은 그림 9 (c) 및 (d)와 같이 약 40% 정도의 꼭지점들이 제거됨을 볼 수 있다. 그러나 이들 모델에서 추출된 워터마크들은 거의 손실없이 추출됨을 알 수 있다. 좌표 변환 및 스케일링된 절단 모델에서는 위의 실험에서와 같이 재배열 과정으로 인하여 추출 시간이 좌표 변환일 경우에 약 36m, 스케일링 경우에 약 4m 정도로 길어진다. 또한 추출된 워터마크의 BER이 좌표 변환 경우에 약 0.08-0.13 정도, 스케일링 경우에 약 0.05-0.10 정도 높아짐을 알 수 있다.

다양한 공격에 대한 견고성 실험을 위하여 메쉬 간단화, 절단, 및 회전 등을 동시에 수행하였다. 이에 대한 결과인 표 III를 살펴보면 BER가 약 0.08-0.12 정도이며, 좌표 변환 및 스케일링이 있는 경우에 BER가 0.18-0.23 정도로 높아짐을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 제안한 방법에 의하여 삽입된 워터마크는 메쉬 간단화, 꼭지점 잡음 첨가, 절단 및 좌표 변환, 스케일링 등의 모든 공격에 대하여 약 80% 이상 손실없이 추출됨을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 기존의 영상 복원에 응용되고 있는 POCS 이론을 3D 메쉬 워터마킹 기술에 적용하였다. 제안한 방법에서는 꼭지점의 거리를 동일 간격의 구간으로 나눈 후에 각 구간을 꼭지점 밀도에 따라 순위를 정한 후, 순위가 높은 구간의 표본 평균값에 이진 워터마크를 삽입한다. 여기서, 각 표본 평균값들은 견고성 및 비가시성의 조건을 만족하는 두 가지 제약 집합 상에 반복 투영됨으로써 워터마크 정보에 따라 이동된다. 삽입된 워터마크는 꼭지점 밀도가 높은 간격의 위치 정보 및 각 간격의 워터마크 결정치를 이용하여 원 모델 없이 추출된다. 본 논문에서 제안한 방법의 성능을 평

가하기 위한 실험에서 제안한 방법이 메쉬 간단화, 랜덤 잡음 첨가 및 절단 등의 공격에 대하여 우수한 견고성을 가지며, 또한 비가시성이 우수함을 확인할 수 있었다.

제안한 방법에서는 몇 가지 제약점이 있다. 먼저 꼭지점의 거리 표본화 구간이 제한되므로 삽입할 수 있는 워터마크 데이터가 100 비트 정도 제한된다. 그리고 좌표 변환과 스케일링이 동시에 수행된 공격 모델에 대해서는 워터마크 추출이 어렵다. 따라서 향후 용량성에 관한 새로운 블록 집합을 설계한 후 세 집합으로 교대 투영하는 워터마킹 기술과 효율적인 재배열 과정에 대한 연구가 수행될 것이다. POCS 방법은 사용자가 원하는 제약 조건 집합을 구현하여 임의의 신호를 이 집합에 반복 투영함으로써 최적의 결과치를 얻을 수 있는 장점을 가진다. 그러므로 POCS 이론이 오디오, 정지 영상, 비디오 등의 워터마킹 기술에 적용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] ISO/IEC 14772-1, "The virtual reality modeling language."
- [2] R. Ohbuchi, H. Masuda, and M. Aono, "Watermarking Three-Dimensional Polygonal Models Through Geometric and Topological Modification," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 16, no. 4, pp. 551-560, May 1998.
- [3] R. Ohbuchi, S. Takahashi, T. Miyazawa, and A. Mukaiyama, "Watermarking 3D Polygonal Meshes in the Mesh Spectral Domain," *Proc. Graphics Interface 2001*, pp. 9-17, 2001.
- [4] S. Kanai, H. Date, and T. Kishinami, "Digital Watermarking for 3D Polygons using Multiresolution Wavelet Decomposition," *Proc. Sixth IFIP WG 5.2 GEO-6*, pp. 296-307, Dec. 1998.
- [5] O. Benedens, "Geometry-Based Watermarking of 3D Models," *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 19, no. 1, pp. 46-55, Jan./Feb. 1999.
- [6] E. Praun, H. Hoppe, A. Finkelstein, "Robust Mesh Watermarking," *Proc. SIGGRAPH 99*, pp. 49-56, 1999.
- [7] B.-L. Yeo and M. M. Yeung, "Watermarking 3D Objects for Verification," *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 19, no. 1, pp. 36-45, Jan./Feb. 1999.
- [8] K.-R. Kwon, S.-G. Kwon, and S.-H. Lee, "3D

- Watermarking Shape Recognition System Using Normal Vector Distribution Modelling," *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 3397-9743, pp. 481-490, Feb. 2005.
- [9] S.-H. Lee and K.-R. Kwon, "Watermarking for 3D Mesh Model Using Patch CEGIs," *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 3481, pp. 557-566, May 2005.
- [10] S.-H. Lee, T.-S. Kim, S.-J. Kim, Y. H. K.-R. Kwon, K.-I. Lee, "3D mesh watermarking using projection onto convex sets," *International Conference on Image Processing, 2004. ICIP '04*, vol. 3, pp. 1577-1580, Oct. 2004.
- [11] 이석환, 권기룡, "패치 CEGI를 이용한 메쉬 워터마킹," *대한전자공학회논문지*, 제42권 CI편 제1호, pp. 67-78, 2005년 1월.
- [12] 전정희, 호요성, "3차원 메쉬 모델의 적응형 워터마킹 방법," *대한전자공학회논문지*, 제40권 SP편 제6호, pp. 41-50, 2003년 11월.
- [13] Y. Yang, N. P. Galatsanos, A. K. Katsaggelos, "Regularized Reconstruction to Reduce Blocking Artifacts of Block Discrete Cosine Transform Compressed Images," *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Tech*, vol. 3, no. 6, Dec. 1993.
- [14] Y. Yang, and N. P. Galatsanos, "Projection-Based Spatially Adaptive Reconstruction of Block-Transform Compressed Images," *IEEE Trans. on Image Processing*, vol. 4, no. 7, July 1995.
- [15] T. Kanai, MeshToSS Version 1.0.1, <http://graphics.sfc.keio.ac.jp/MeshToSS/indexE.html>.
- [16] N. Aspert, D. Santa-Cruz, and T. Ebrahimi, "MESH: Measuring Errors Between Surfaces Using the Hausdorff Distance," *IEEE International Conference in Multimedia and Expo, 2004, ICME*, vol. 1, pp. 705-708, Aug. 2002.

 저 자 소개



이 석 환(정회원)
 1999년 경북대학교
 전자공학과 학사 졸업.
 2001년 경북대학교
 전자공학과 석사 졸업.
 2004년 경북대학교
 전자공학과 박사 졸업.

2005년~현재 동명대학교 정보보호학과 전임강사
 <주관심분야 : 워터마킹, DRM, 영상신호처리>



권 기 룡(정회원)-교신저자
 1986년 경북대학교
 전자공학과 학사 졸업.
 1990년 경북대학교
 전자공학과 석사 졸업.
 1994년 경북대학교
 전자공학과 박사 졸업

2000년~2001년 Univ. of Minnesota, Post-Doc
 1996년~2005년 부산외국어대학교 디지털정보
 공학부 부교수

2006년~현재 부경대학교 전자컴퓨터정보통신
 공학부 부교수

<주관심분야 : 멀티미디어정보보호, 멀티미디어
 통신, 웨이브릿변환>

권 성 근(정회원)

1996년 경북대학교 전자공학과 학사 졸업.
 1998년 경북대학교 전자공학과 석사 졸업.
 2002년 경북대학교 전자공학과 박사 졸업.

2002년~현재 삼성전자 무선사업부
 <주관심분야 : 모바일컨텐츠, 워터마킹>