

논문 2005-42CI-1-8

패치 CEGI를 이용한 메쉬 워터마킹

(A Mesh Watermarking Using Patch CEGI)

이 석 환^{*}, 권 기 룡^{**}

(Suk-Hwan Lee and Ki-Ryong Kwon)

요 약

본 논문에서는 복소 가우시안 영상 (Complex Extended Gaussian Image, CEGI)을 이용한 3D 메쉬 모델의 블라인드 워터마킹을 제안하였다. CEGI는 메쉬의 법선 벡터 분포를 나타내는 3차원 방향 히스토그램으로, 이는 메쉬의 면적 및 임의의 기준점에 대한 거리로 표현되는 복소 가중치의 합으로 구현된다. 제안한 방법에서는 먼저 3D 메쉬 모델을 모델의 형상에 따라 여러 개의 패치로 분할한다. 그리고 워터마크를 삽입하기 위하여 각 패치별로 CEGI를 구한 후에 복소 가중치의 크기가 큰 셀을 선택하여, 각 패치 CEGI 상에 동일한 순위의 셀들에 각각 삽입한다. 그리고 패치의 중점 좌표 및 셀 순위표를 이용하여 원 메쉬 모델없이 워터마크를 추출한다. 이 때, 회전과 같은 아핀 변환된 모델에서는 오일러 각을 이용한 재배열 과정을 수행한다. 실험 결과에서 제안한 방법이 절단, 아핀 변환, 및 랜덤 잡음 첨가등의 기하학적 공격 및 메쉬 간단화 등의 위상학적 공격에 견고하였으며 또한 워터마크의 비가시성을 확인하였다.

Abstract

We proposed a blind watermarking for 3D mesh model using the patch CEGIs. The CEGI is the 3D orientation histogram with complex weight whose magnitude is the mesh area and phase is the normal distance of the mesh from the designated origin. In the proposed algorithm, we divide the 3D mesh model into the number of patch that determined adaptively to the shape of model and calculate the patch CEGIs. Some cells for embedding the watermark are selected according to the rank of their magnitudes in each of patches after calculating the respective magnitude distributions of CEGI for each patches of a mesh model. Each of the watermark bit is embedded into cells with the same rank in these patch CEGI. Based on the patch center point and the rank table as watermark key, watermark extraction and realignment process are performed without the original mesh. In the rotated model, we perform the realignment process using Euler angle before the watermark extracting. The results of experiment verify that the proposed algorithm is imperceptible and robust against geometrical attacks of cropping, affine transformation and vertex randomization as well as topological attacks of remeshing and mesh simplification.

Keywords : 3D mesh watermarking, patch CEGI

I. 서 론

정보통신 기술의 발달로 인하여 인터넷 및 네트워크 등의 웹 상에서는 디지털 미디어들이 편리하게 상호 교

환되고 있다. 그러나 웹은 분산된 네트워킹, 비대면성, 및 개방적인 특징을 지니고 있으므로 디지털 미디어들의 불법 복제 및 배포가 용이하다. 따라서 이들의 저작권을 보호하는 기술인 디지털 워터마킹(digital watermarking)에 대한 연구가 진행되어 왔으며, 특히 정지 영상 및 비디오 등의 미디어에 대한 워터마킹 연구가 활발히 진행되어 왔다.^{[1],[2]} 최근 웹 상에서는 2D 영상 뿐만 아니라 웹 3D 기술에 의하여 구현된 3D 그래픽 모델 (graphic model)의 콘텐츠 제작에 관심이 증대되고 있다. 국제 표준 기구인 ISO/IEC는 웹 상에서 3D 그래픽 모델을 구현하는 표준으로 가상 현실 구현 언어 (virtual reality modeling language, VRML)를 공인하

^{*} 정회원, 경북대학교 전기전자컴퓨터학부
(School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University)

^{**} 정회원, 부산외국어대학교 디지털정보공학부
(Division of Digital and Information Engineering, Pusan University of Foreign Studies)

※ 본 논문은 2004년도 Brain Busan 21 Project으로 수행한 연구결과입니다.

접수일자: 2004년9월6일, 수정완료일: 2005년1월7일

였다.^[3] 그러나 VRML은 소스 자체가 공개되어 있고 라이선스를 요구하지 않으므로 웹 상에서 불법 복제, 편집, 및 분배가 용이하다. 따라서 VRML로 구현된 3D 그래픽 모델의 저작권을 보호하기 위한 워터마킹 연구가 최근에 들어서 진행되고 있다.^{[4]-[11]}

1998년 Ohbuchi 등^[4]은 에지를 공유하는 4개의 삼각 메쉬 (triangle similarity quadruple, TSQ)들로 구성된 매크로 삽입 원형에 워터마크를 삽입하는 방법을 제안하였다. 이 방법에서는 워터마크가 메쉬 간단화 (mesh simplification) 및 리메쉬 (remesh) 등의 위상학적 변형 및 잡음 첨가 등의 기하학적 변형에 취약한 단점이 있다. 1998년 Kanai 등^[6]이 제안한 방법에서는 3D 메쉬 모델의 다해상도 웨이블릿 변환을 이용하여 3D 웨이블릿 계수 벡터에 워터마크를 삽입한다. 이 방법에서 적용된 3D 웨이블릿 변환은 1개의 메쉬를 4개의 메쉬로 분할하는 정규적인 (regular) 형태의 부분할 방법이다. 그러므로 비정규적인 (irregular) 3D 메쉬 모델에서는 1대 4의 정규적인 형태로 바꾸어야 하는 단점이 있다. 1999년 Praun 등^[7]은 꼭지점 상에서 스칼라 기저 함수 (scalar basis function)의 집합을 구한 후, 이 기저 함수의 가중치에 워터마크를 삽입하는 방법을 제안하였다. 그러나 이 방법에서는 워터마크 검출시 원 모델의 위상학적 특성을 가지도록 하는 재표본화 (resampling) 과정이 필요하다. 1999년 Benedens^[8]이 제안한 방법에서는 메쉬의 법선 벡터에 워터마크를 삽입한다. 이 방법에서는 메쉬의 법선 방향을 여러 개로 분할한 후에 이 방향 중에서 워터마크가 삽입되는 방향을 랜덤하게 선택한다. 그리고 선택된 방향에 속하는 메쉬들의 법선 벡터들을 2차원 좌표계로 투영시킨 후, 이들 평균 좌표값에 워터마크를 삽입한다. 이 방법은 메쉬 간단화 및 리메쉬 등의 위상학적 공격에 견고한 장점을 가진다. 그러나 절단과 같은 기하학적 공격에 견고하지 못하며, 한 부분이 비어 있는 열린 모델에는 적용 못하는 단점을 가진다. 또한 회전 등의 아핀 변환에서는 원 메쉬 모델의 방향으로 재배열 (realignment)하는 과정이 필요하다.

한편, 1993년 Kang 등^[14]은 3D 모델의 형상을 인식 (object recognition)하는 방법으로 CEGI (Complex Extended Gaussian Image)를 제안하였다. 여기서 CEGI는 메쉬의 법선 방향을 3차원 단위 구 상으로 투영시킨 후, 각 방향에 투영된 메쉬들의 복소 가중치를 가지는 3차원 방향 히스토그램 (orientation histogram)이다. 이는 메쉬의 법선 방향 분포를 나타내므로, 원 모

델의 형상이 유지되면 꼭지점 좌표 및 꼭지점의 연결 정보가 바뀌더라도 이의 분포는 바뀌지 않는다.

본 논문에서는 패치별 CEGI를 이용한 3D 메쉬 모델의 워터마킹 방법을 제안하였다. 제안한 방법에서는 먼저 3D 메쉬 모델을 여러 개의 패치로 분할한다. 한 모델에서 분할되는 패치의 개수는 워터마크의 비가시 및 견고 측면에서 CEGI 상의 셀 크기 분포에 의하여 결정되어진다. 패치 CEGI는 각 패치에 속하는 메쉬들의 법선 벡터들을 동일한 면적의 셀로 등분된 단위 구 상에 이들 법선 벡터 방향에 가장 가까운 셀로 투영함으로써 얻어진다. 각 패치별 CEGI 상에서 복소 가중치의 크기가 큰 셀들을 워터마크 삽입할 대상으로 선택한다. 이때 n_w 길이의 이진 워터마크 삽입시 각 패치별로 n_w 개의 셀들을 선택하며, 하나의 워터마크 비트를 이들 셀에 각각 삽입한다. 워터마크 검출 과정에서는 원 메쉬 모델없이 워터마크 키를 이용하여 워터마크를 검출한다. 워터마크 키로는 워터마크 삽입 과정에서 구한 패치의 중점 좌표 및 패치별 CEGI 상의 셀 순위표를 사용한다. 회전과 같은 아핀 변환된 모델에서는 재배열 과정을 거쳐 원 모델의 방향으로 일단 전환시킨 후에 워터마크를 검출한다.

본 논문에서 제안한 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 Stanford bunny, Knots, Venus, 및 Agrippa bust 모델에 대하여 각각 모의 실험하였다. 각 실험에서는 비가시 및 견고에 대한 성능을 평가하였다. 실험 결과, 제안한 방법이 메쉬 간단화의 위상학적 공격과 절단, 잡음 첨가, 및 아핀 변환 등의 기하학적 공격에 대하여 견고함을 확인할 수 있었다.

II. 제안한 3D 메쉬 모델 워터마킹

본 논문에서는 기하학적 및 위상학적 공격에 견고한 블라인드 워터마킹을 위하여 패치별 CEGI를 이용하였다. 먼저 CEGI에 대하여 간략히 살펴보기로 한다.

1. CEGI

CEGI는 3D 모델에서 면의 법선 벡터 분포를 나타내는 3차원 방향 히스토그램이며, 이는 EGI^[13](Extended Gaussian Image)의 확장된 개념이다. 즉, 임의의 면의 법선 벡터 \vec{n} 은 단위 구 상에서 이의 방향과 일치하는 점으로 투영되며, 이 점의 복소 가중치는 Ae^{jd} 이다. 여기서 A 는 면의 면적이며, d 는 원점과 이 면과의 거

리이다. 본 논문에서는 pentakis dodecahedron^[16]를 동일한 면적을 가지는 240개의 셀로 분할하여, 이를 그림 1에서와 같이 CEGI 상의 구로 사용한다. 메쉬 법선 벡터 \vec{n} 은 240개 셀들의 중점 벡터 \vec{BC}_k ($0 \leq k < 240$) 중에서 가장 유사한 방향의 셀로 투영된다. 즉 k 번째 방향에 대한 셀 C_k 상으로 투영되는 메쉬 법선 벡터들은

$$M_k = \{ \vec{n} : \cos^{-1}(\vec{n} \cdot \vec{BC}_k) < \cos^{-1}(\vec{BC}_k \cdot \vec{BC}_{k+1})/2, 0 < i < n_w \} \quad (1)$$

와 같이 집합 M_k 로 정의된다.

이 집합은 셀 C_k 의 중점 벡터 \vec{BC}_k 와의 사이각 $\cos^{-1}(\vec{n}_i \cdot \vec{BC}_k)$ 이 이 셀과 인접한 셀 C_{k+1} 의 중점 벡터 사이각 $\cos^{-1}(\vec{BC}_k \cdot \vec{BC}_{k+1})$ 의 0.5배 내의 값을 가지는 메쉬 법선 벡터들의 집합이다. 여기서 n_w 은 3D 메쉬 모델에서 메쉬의 개수이다. 셀 C_k 의 가중치 C_k 는

$$c_k = \sum_{\vec{n}_i \in M_k} A_{\vec{n}_i} e^{jd_{\vec{n}_i}} = \sum_{\vec{n}_i \in M_k} A_{\vec{n}_i} \cos(d_{\vec{n}_i}) + j \sum_{\vec{n}_i \in M_k} A_{\vec{n}_i} \sin(d_{\vec{n}_i}) \quad (2)$$

와 같이 이 셀에 투영되는 메쉬의 복소 가중치의 합이다. c_k 의 크기 성분 $\|c_k\|^2$ 및 위상 성분 $\angle c_k$ 는

$$\|c_k\|^2 = \sum_{\vec{n}_i \in M_k} A_{\vec{n}_i}^2 + 2 \sum_{\vec{n}_i \neq \vec{n}_m} A_{\vec{n}_i} A_{\vec{n}_m} \cos(d_{\vec{n}_i} - d_{\vec{n}_m}) \quad (3)$$

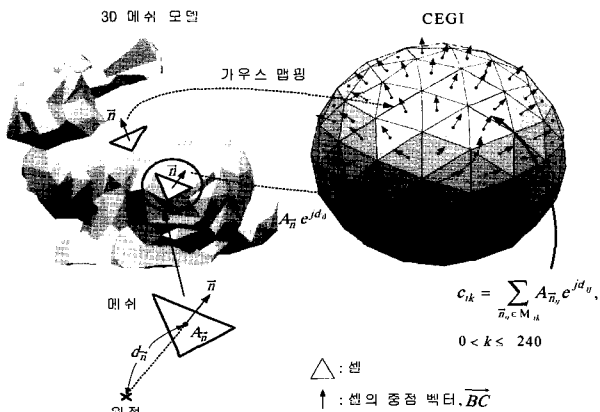


그림 1. 메쉬의 법선 벡터를 240개의 셀로 분할된 단위 구 상으로 투영

Fig. 1. Mapping the mesh normal vector into the unit sphere which is discretized into 240 cells.

$$\angle c_k = \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{\vec{n}_i \in M_k} A_{\vec{n}_i} \sin(d_{\vec{n}_i})}{\sum_{\vec{n}_i \in M_k} A_{\vec{n}_i} \cos(d_{\vec{n}_i})} \right) \quad (4)$$

와 같다. 셀의 복소 가중치 크기 $\|c_k\|$ 는 이에 투영되는 메쉬의 면적이 클수록 또는 메쉬들 간의 거리가 가까울수록 값이 크다. 복소 가중치 크기가 큰 셀은 이 방향에 투영되는 메쉬들이 많이 분포함을 나타내며, 이들 셀에 의하여 3D 메쉬 모델의 형상을 인지할 수 있다.

2. 워터마크 삽입

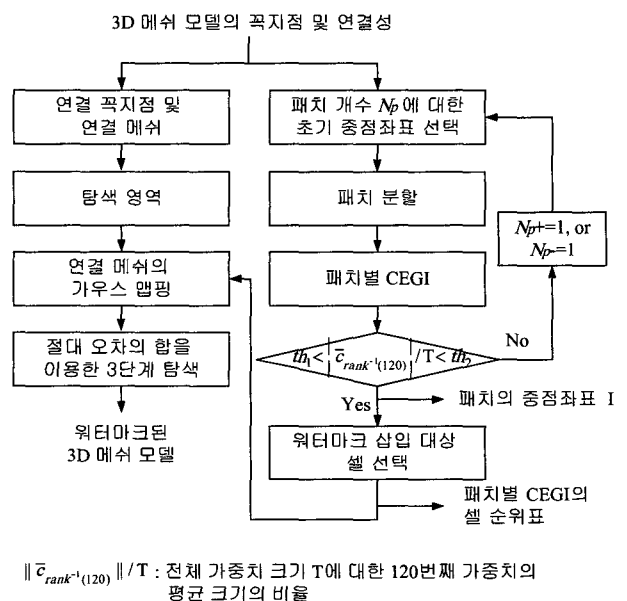
본 논문에서 제안한 3D 메쉬 모델의 워터마크 삽입 알고리즘은 그림 2에서와 같이 워터마크 삽입 대상 선택 및 워터마크 삽입 과정으로 나누어진다.

2.1 워터마크 삽입 대상 선택

가. 3D 메쉬 모델의 패치 분할

3D 메쉬 모델에서는 모델의 형상 및 패치의 개수에 따라 CEGI 상의 셀 크기 분포가 다르게 나타난다. 그러므로 제안한 방법에서는 이 크기 분포에 따라 워터마크의 견고성 및 비가시성을 고려하여 분할되는 패치의 개수를 적절하게 선택한다.

Stanford bunny 모델에 대하여 여러 개의 개수로 분할된 패치 CEGI 상에서 각 셀의 평균 가중치 크기



$\| \bar{c}_{rank^{-1}(120)} \| / T$: 전체 가중치 크기 T에 대한 120번째 가중치의 평균 크기의 비율

그림 2. 제안한 워터마크 삽입 알고리즘
Fig. 2. The proposed algorithm of the watermark embedding.

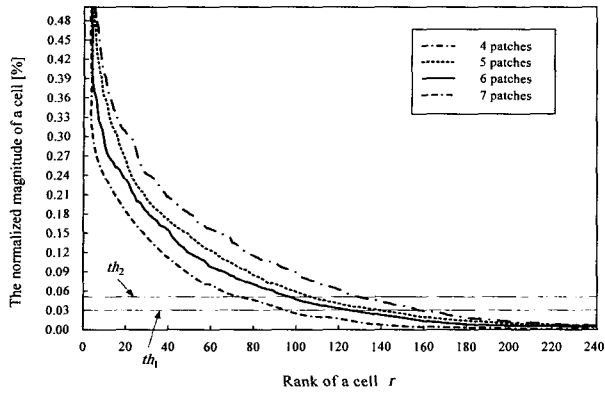


그림 3. Stanford bunny 모델의 패치 CEGI 상에서 전체 가중치 크기에 대한 각 셀의 평균 가중치 크기의 비율

Fig. 3. The ratio of the average magnitude weight of each cell to the total magnitude weight in patch CEGI of Stanford bunny model.

$\|\bar{c}_{rank^{-1}(r)}\| = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} \|c_{i,rank^{-1}(r)}\|}{N_p}$ 를 전체 가중치 크기 $\sum_{i=1}^{N_p} \sum_{r=1}^{240} \|c_{i,rank^{-1}(r)}\|$ 로 정규화하여 그림 3에서와 같이 크기 순으로 나타내었다. 여기서 N_p 은 패치의 개수이며, $rank^{-1}(r)$ 는 r 번째 가중치 크기를 가지는 셀의 주소를 나타낸다. 이 그림에서 워터마크가 삽입될 수 있는 셀의 가중치 크기는 전체 가중치 크기의 0.03%이며, 이 셀의 순위는 120번째로 이는 실험적으로 구한 값이다. 그림 3에서 살펴보면 패치의 개수가 작을수록 셀의 가중치 크기 분포가 넓어짐을 알 수 있다. 그러나 워터마크가 패치의 개수가 클 때보다 견고하지 못하다. 그러므로 제안한 방법에서는 이들 개수 중 초기 패치의 개수를 6개로 선택하여, 이 개수로 3D 메쉬 모델을 분할한다. 그리고 각 패치의 CEGI 상에서 셀 가중치 크기 분포가 이 개수의 분포와 유사한 분포를 가지도록 패치의 개수를 조정한다.

패치 분할 방법에서는 먼저 3D 메쉬 모델의 꼭지점 좌표 중 임의의 6개 좌표를 랜덤하게 선택하여, 이 좌표를 패치의 초기 중점 좌표 $I_{i \in [1,6]}$ 로 한다. 그리고 모든 꼭지점 v 를 $I_{i \in [1,6]}$ 와의 거리가 최소인 패치 $P_{i \in [1,6]}$

$$P_i = \{v: d(v, I_i) < d(v, I_j), \text{ all } j \neq i, 1 \leq j \leq 6\} \quad (5)$$

와 같이 군집한다. 여기서 $d(v, I)$ 는 $\|v - I\|$ 이다. 각 패치 $P_{i \in [1,6]}$ 에 속해 있는 꼭지점들의 무게중심인 평균 좌표를 구한 후, 이를 $I_{i \in [1,6]}$ 에 $E[v|v \in P_i]$ 와 같이 대입한다. 그리고 각 꼭지점들을 $I_{i \in [1,6]}$ 에 대하

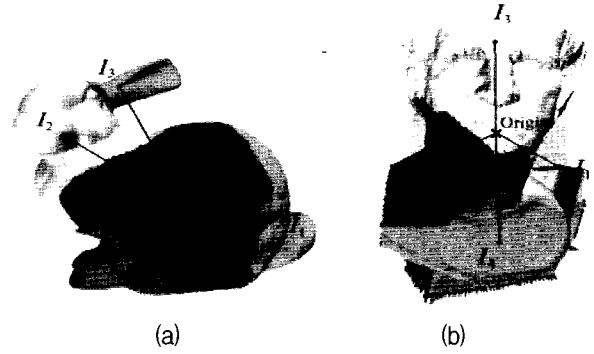


그림 4. (a) 6개 패치로 분할된 Stanford bunny 모델 및 (b) 4개의 패치로 분할된 Agrippa bust 모델에서 각 패치의 중점 좌표 I

Fig. 4. The patch center coordinate I of (a) Stanford bunny model subdivided into 6 patches and (b) Agrippa bust model subdivided into 4 patches.

여 다시 군집한다. 이와 같은 과정을 이전 패치 중점 좌표 I_i 와 현재 패치 중점 좌표 I_j 의 차이가 $\sum_{i=1}^6 \|I_i - I_j\| < 10^{-4}$ 일 때까지 반복 수행한다. 그리고 분할된 패치별로 CEGI 상에서의 셀 크기를 구하여, 120번째 가중치의 평균 크기 $\|\bar{c}_{rank^{-1}(120)}\|$ 가 전체 가중치 크기 T 에 대한 비율 $\|\bar{c}_{rank^{-1}(120)}\|/T$

$$th_1 < \|\bar{c}_{rank^{-1}(120)}\|/T \times 100 < th_2 \quad (6)$$

$$\text{where } \|\bar{c}_{rank^{-1}(120)}\|/T = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} \|c_{i,rank^{-1}(120)}\|/N_p}{\sum_{i=1}^{N_p} \sum_{r=1}^{240} \|c_{i,rank^{-1}(r)}\|}$$

일 때까지 패치의 개수 N_p 을 변경하여 위의 과정을 반복한다. 여기서 $rank^{-1}(r)$ 는 r 번째 가중치 크기를 가지는 셀의 주소를 나타내며, th_1 및 th_2 는 각각 0.03 및 0.05%로 실험적으로 구한 값이다. Stanford bunny 및 Agrippa bust 모델에 대하여 그림 4에서와 같이 각각 6개 및 4개의 패치로 분할된다. 여기서 Agrippa bust 모델은 $-z$ 축 방향이 없는 흉상 모델이며 제안한 분할 방법에 의하여 4개의 패치로 분할된다.

나. 패치별 CEGI

각 패치별로 이에 속하는 모든 메쉬들의 법선 벡터, 면적, 및 거리를 구한다. 이 때, 3D 메쉬 모델의 원점이 아닌 패치의 중점 좌표를 기준점으로 사용한다. 예를 들어 i 번째 패치 P_i 에 속하는 j 번째 메쉬 m_{ij} 의 법선 벡터 \vec{n}_{ij} , 면적 A_{ij} , 및 거리 d_{ij} 는

$$\vec{n}_{ij} = (\vec{I}_i v_1 - \vec{I}_i v_2) \times (\vec{I}_i v_1 - \vec{I}_i v_3) / \|\vec{n}_{ij}\|$$

$$A_{ij} = \|(\vec{I}_i v_1 - \vec{I}_i v_2) \times (\vec{I}_i v_1 - \vec{I}_i v_3)\| / 2$$

$$d_{ij} = (\|\vec{I}_i m_j\| / \max(\|\vec{I}_i m_k\|)_{m_k \in P_i}) \times \pi$$
(7)

이다. 여기서 $\vec{I}_i m_{ij}$ 은 패치의 중점 좌표 I_i 에서 이 메쉬의 중점을 잇는 벡터이다. 거리 d_{ij} 는 P_i 에 속해 있는 메쉬 중 I_i 에서의 거리가 최대인 $\max(\|\vec{I}_i m_{ik}\|)$, ($m_{ik} \in P_i$)에 대하여 $[-\pi, \pi]$ 로 정규화된다. 이 메쉬의 복소 가중치는 $A_{ij} e^{jd_v}$ 이다. 메쉬 m_{ij} 은 PE_i 의 240개 셀 C_{ik} ($i \in [1, N_p], k \in [1, 240]$) 중에서 이 메쉬의 법선 벡터 \vec{n}_{ij} 방향과 가장 가까운 방향의 셀로 투영된다. 그러므로 PE_i 에서 임의의 k 번째 방향에 대한 셀 C_{ik} 상에서는 이 셀로 투영되는 메쉬의 법선 벡터들의 집합 M_{ik}

$$M_{ik} = \{ \vec{n} : \cos^{-1}(\vec{n}_{ij} \cdot \vec{BC}_{ik}) < \cos^{-1}(\vec{BC}_{ik} \cdot \vec{BC}_{ik+1})/2, 0 < i < n_{iw} \}$$
(8)

으로 구성된다. 여기서 n_{iw} 은 i 번째 패치에 속하는 메쉬의 개수이다. 그리고 \vec{BC}_{ik} 는 셀 C_{ik} 의 중점 벡터이며, \vec{BC}_{ik+1} 는 인접한 셀 C_{ik+1} 의 중점 벡터이다. 이 셀의 가중치 크기는 $\|c_{ik}\|$ 는

$$\|c_{ik}\| = \left\| \sum_{\vec{n}_{ij} \in M_{ik}} (A_{ij} \vec{n}_{ij} e^{jd_v}) \right\|$$

$$= \sqrt{\sum_{\vec{n}_{ij} \in M_{ik}} (A_{ij} \cos(d_{ij}))^2 + \sum_{\vec{n}_{ij} \in M_{ik}} (A_{ij} \sin(d_{ij}))^2}$$
(9)

와 같이 집합 M_{ik} 에 속하는 메쉬 법선 벡터들의 복소 가중치 합에 대한 크기이다. 여기서 셀의 경계 영역에 있는 \vec{n}_{ij} 은 공격시 다른 셀로 투영될 수 있으므로, 제안한 방법에서는 θ 의 범위

$$0 \leq \cos^{-1}(\vec{n}_{ij} \cdot \vec{BC}_{ik}) \leq \theta_m,$$

$$\theta_m < \cos^{-1}(\vec{BC}_{ik} \cdot \vec{BC}_{ik+1})/2$$
(10)

내에 있는 메쉬의 법선 벡터들을 집합 M_{ik} 의 원소로 사용한다. $\cos^{-1}(\vec{BC}_{ik} \cdot \vec{BC}_{ik+1})/2$ 는 10.2° 이며, θ_m 은 8.6° 로 이는 실험적으로 구한 값이다.

다. CEGI 상에서 워터마크 삽입 위치

각 패치별 CEGI 상에서 복소 가중치 크기에 따라 셀의 순위를 정한 후에 이의 순위표를 120번째까지의 순위

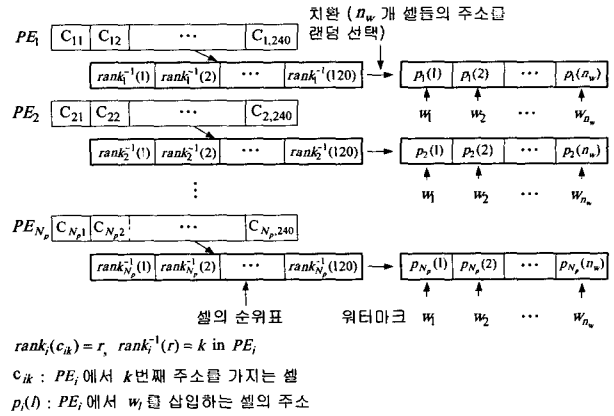


그림 5. 패치별 CEGI의 셀 순위표 상에서 치환된 셀 주소에 워터마크 삽입 위치 선택

Fig. 5. Selection of the permuted cell address in the rank table of cells of patch CEGI for watermark embedding.

에 대하여 그림 5에서와 같이 작성한다. 이 순위표에서 살펴보면 i 번째 패치의 PE_i 에서 k 번째 주소를 가지는 셀 C_{ik} 의 순위 $rank_i(c_{ik})$ 는 r 번째이다. 순위 $rank_i(c_{ik})$ 의 역은 $rank_i^{-1}(r)$ 이며, 이의 값은 PE_i 에서 r 번째 순위를 가지는 셀의 주소 k 를 나타낸다. 각 패치별 CEGI 상에서 워터마크를 삽입할 수 있는 최대 길이는 120이다. n_w 개의 길이를 가지는 워터마크 삽입시 셀 순위표에서 이 개수만큼 랜덤하게 선택한 후에 이를 치환 (permutation)한다. 여기서 l 번째 워터마크 비트 w_l 는 각 패치별로 치환한 주소인 $p_1(l), \dots, p_{N_p}(l)$ 의 셀 $C_{1,p_1(l)}, \dots, C_{N_p,p_{N_p}(l)}$ 에 삽입된다. 이와 같이 각 패치별 CEGI 상에서의 셀 순위표 및 이들의 치환된 셀 주소 정보들은 워터마크 추출시 필요한 정보이다.

2.2 워터마크 삽입

제안한 방법에서는 셀에 투영되는 모든 메쉬들의 법선 벡터 방향을 워터마크 비트에 의하여 이동한다. 즉, i 번째 패치의 치환 나열된 셀 주소 정보에서 l 번째 셀 $C_{i,p_l(l)}$ 로 투영하는 모든 메쉬 법선 벡터들과 이 셀의 중점 벡터 $\vec{BC}_{i,p_l(l)}$ 와의 평균 사이각 $\bar{\theta}_{il}$

$$\bar{\theta}_{il} = 1/N_{p_l(l)} \sum_{\vec{n}_{ij} \in M_{i,p_l(l)}} \cos^{-1}(\vec{n}_{ij} \cdot \vec{BC}_{i,p_l(l)})$$
(11)

을 워터마크 비트 w_l 가 1일 경우에는 그림 6에서와 같이 $\bar{\theta}_{il}$ 를 0° 의 방향으로 이동시키고, w_l 가 0일 경우에

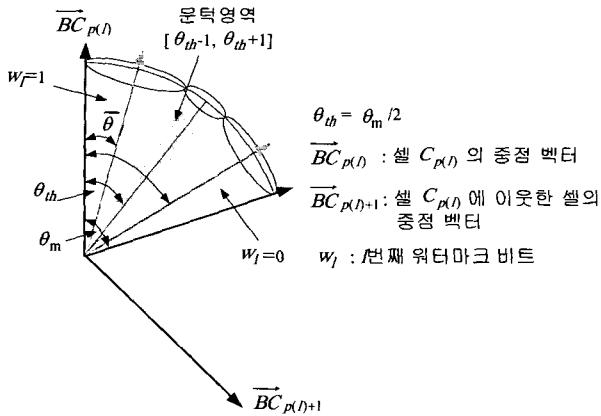


그림 6. 셀의 평균 사이각 $\bar{\theta}_i$ 의 워터마크 비트 w_i 에 따른 이동

Fig. 6. Moving the average angle $\bar{\theta}_i$ of a cell according to the bit w_i of the watermark.

는 $\bar{\theta}_{ii}$ 를 θ_m 의 방향으로 이동시킨다. 여기서 $N_{p,(i)}$ 는 셀 $C_{i,p,(i)}$ 에 투영된 메쉬들의 개수이다.

각 메쉬의 법선 방향을 바꾸기 위해서는 이 메쉬에 연결된 꼭지점의 좌표를 바꾸어야 한다. 그러나 하나의 꼭지점에는 여러 개의 메쉬가 연결되어 있고, 이들 메쉬의 법선 벡터들이 다른 셀로 투영할 수 있다. 그러므로 각 꼭지점에 연결된 메쉬의 법선 벡터들이 워터마크 정보를 모두 만족하는 꼭지점의 위치를 찾아야 한다. 제한한 방법에서는 각 꼭지점의 탐색 범위 내에서 최적의 위치를 단계적으로 탐색한다. 이 때 최적의 위치를 구하는 척도로는 꼭지점에 연결된 메쉬들의 법선 방향과 기준점에 대한 절대 오차의 합 (Summation Absolute Error, SAE)이다.

제한한 방법에서는 견고 및 비가시성 우수한 워터마크를 삽입하기 위하여 두 가지 조건을 고려하였다. n_w 개의 길이를 가지는 이진 워터마크는 이들 셀의 평균 사이각 $\bar{\theta}$ 에 삽입된다. 각 워터마크 비트의 0과 1을 나누는 문턱값 θ_{th} 는

$$\theta_{th} = \frac{1}{6 \times 120} \sum_{i=1}^6 \sum_{r=1}^{120} \bar{\theta}_{ir} \quad (12)$$

와 같이 각 패치별 CEGI 상에서 120번째 순위를 가지는 셀의 평균 사이각을 이용하여 결정된다. 여기서 워터마크가 삽입된 셀의 평균 사이각 $\bar{\theta}$ 이 그림 6에서와 같이 문턱 영역 [$\theta_{th} - \Delta\theta_{max}, \theta_{th} + \Delta\theta_{max}$] 범위 내에 있을 경우 공격에 의하여 워터마크 비트 오류가 발생할 수 있다. 그러므로 첫 번째 조건으로는 평균 사이각이 이 문턱 영역을 벗어나도록 각 꼭지점의 위치를 탐색하는 것

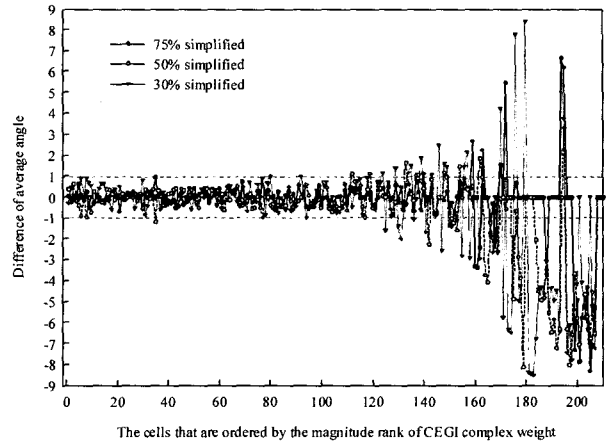


그림 7. Stanford bunny 모델에서 각 셀에 투영되는 메쉬 법선 벡터 및 이 셀의 중점 벡터와의 평균 사이각 $\bar{\theta}$ 와 메쉬 간단화된 모델에서 평균 사이각 $\bar{\theta}'$ 의 차이 $\Delta\bar{\theta}$

Fig. 7. The difference $\Delta\bar{\theta} = \bar{\theta} - \bar{\theta}'$ between average angle $\bar{\theta}$ of cell that are ordered by the magnitude rank of CEGI complex weight in Stanford bunny model and average angle $\bar{\theta}'$ in simplified mesh model.

이다. 그리고 하나의 꼭지점 v 에 연결된 각 메쉬의 법선 벡터들은 각각 다른 셀로 투영될 수 있다. 그러므로 두 번째 조건에는 워터마크 삽입 대상에서 제외되는 셀로 투영되는 메쉬들은 최적의 꼭지점 위치를 찾기 위한 절대 오차의 합에서 제외된다.

각 셀에 투영되는 메쉬들의 평균 법선 벡터 방향은 여러 가지 공격에 의하여 바뀐다. 본 논문에서는 원 모델에서 각 셀에 투영되는 메쉬들의 법선 벡터와 이 셀의 중점 벡터와의 평균 사이각 $\bar{\theta}$ 와 공격당한 모델에서의 평균 사이각 $\bar{\theta}'$ 와의 차이 $\Delta\bar{\theta}$ 를 그림 7에 나타내었다. 이 실험에서는 6개 패치로 분할된 Stanford bunny 모델에 메쉬 간단화를 수행하였다. 이 그림에서 r 번째 순위를 가지는 셀의 평균 사이각의 차이 $\Delta\bar{\theta}_j$ 은

$$\Delta\bar{\theta}_j = 1/6 \sum_{i=1}^6 (\bar{\theta}_{ir} - \bar{\theta}'_{ir}) \quad (13)$$

$$\text{where } \bar{\theta}_{ir} = 1/N_{ir} \sum_{\vec{n}_{ij} \in M_{ir}} \cos^{-1}(\vec{n}_{ij} \cdot \vec{BC}_{i,rank_i^{-1}(r)}),$$

$$\bar{\theta}'_{ir} = 1/N'_{ir} \sum_{\vec{n}'_{ij} \in M'_{ir}} \cos^{-1}(\vec{n}'_{ij} \cdot \vec{BC}_{i,rank_i^{-1}(r)})$$

이다. 여기서 $\bar{\theta}_{ir}$ 는 원 모델에서 i 번째 패치 P_i 의 r 번째 순위를 가지는 셀 $C_{i,rank_i^{-1}(r)}$ 상의 집합 M_{ir} 에 속하는 모든 메쉬 법선 벡터와 $C_{i,rank_i^{-1}(r)}$ 의 중점 벡

터 $\overline{BC}_{i,rank_i,1(r)}$ 와의 평균 사이각이다. N_{ir} 은 집합 M_{ir} 의 원소 개수이다. 그리고 $\overline{\theta}_{ir}$ 는 메쉬 간단화된 모델에서 원 모델과 같은 크기 순위를 가지는 셀 $C_{i,rank_i,1(r)}$ 상에서의 평균 사이각이며, N'_{ir} 은 이 셀 상의 집합 M'_{ir} 의 원소 개수이다. 이 그림에서 살펴보면 순위가 높을수록 $\Delta\overline{\theta}$ 가 작아지고, 120번째 셀까지의 $\Delta\overline{\theta}$ 가 최대 1° 를 벗어나지 않음을 알 수 있다. 제안한 방법에서는 n_w 개의 길이를 가지는 이진 워터마크를 이들 셀의 평균 사이각 $\overline{\theta}$ 에 삽입하며, 위의 첫 번째 조건에서 $\Delta\theta_{max}$ 는 이 실험을 통하여 1° 로 결정된다.

가. 꼭지점 위치 탐색

3D 메쉬 모델의 모든 꼭지점들을 탐색 범위 내에 워터마크 조건을 만족하는 최적의 꼭지점으로 이동하므로써 워터마크를 삽입한다. 여기서 탐색 범위는 워터마크의 비가시를 고려하기 위하여 현재 꼭지점 v 에 연결된 모든 꼭지점들 중 각 좌표축 상의 값을 넘지 않도록 한다. 즉 꼭지점 v 의 좌표가 (x, y, z) 일 때, 각 좌표축에 대한 탐색 범위는 $x \pm \Delta x$, $y \pm \Delta y$, 및 $z \pm \Delta z$ 이며, Δx , Δy , 및 Δz 는 각각

$$\begin{aligned} \Delta x &= 0.5 \times \min |x - v_i(x)|_{v_i \in vp(v)}, \\ \Delta y &= 0.5 \times \min |y - v_i(y)|_{v_i \in vp(v)}, \\ \Delta z &= 0.5 \times \min |z - v_i(z)|_{v_i \in vp(v)} \end{aligned} \tag{14}$$

이다. $vp(v)$ 는 꼭지점 v 에 연결된 꼭지점들을 나타내며, $v_i(x)$, $v_i(y)$, 및 $v_i(z)$ 는 $v_i \in vp(v)$ 의 세 좌표축에 대한 값이다. 여기서 꼭지점의 좌표가 소수 6자리의 실수로 구성되어 있는 VRML 데이터에서는 탐색 범위 내에서 무수히 많은 꼭지점의 위치가 존재한다. 그러므로 제안한 방법에서는 단계적 탐색 방법 및 SAE를 이용하여 최적의 꼭지점 위치를 찾는다. 첫 번째 단계에서는 현재 꼭지점 v 에서 탐색 범위의 중간 위치에 있는 27개의 꼭지점 v'

$$v' = \{(x', y', z') \mid \begin{aligned} x' &\in \{x - \Delta x/2, x, x + \Delta x/2\}, \\ y' &\in \{y - \Delta y/2, y, y + \Delta y/2\}, \\ z' &\in \{z - \Delta z/2, z, z + \Delta z/2\} \end{aligned} \} \tag{15}$$

들의 절대 오차의 합을 각각 구한다. 그리고 꼭지점 v 를 절대 오차의 합이 최소가 되는 v^*

$$v^* = \arg \{ \min \{ SAE(v') \} \} \tag{16}$$

의 위치로 이동시킨 후, Δx , Δy , 및 Δz 를 각각

$\Delta x/2$, $\Delta y/2$, 및 $\Delta z/2$ 으로 줄인다. 두 번째 단계에서는 v^* 를 기준으로 좁혀진 탐색 범위 내에 27개 꼭지점 위치 중 절대 오차의 합이 최소인 위치로 다시 이동시킨다. 위와 같은 과정을 모든 꼭지점들에 대하여 세 단계까지 반복 수행한다. 여기서 각 단계별 27개 위치 중에서 원래의 셀이 다른 셀로 투영되는 메쉬가 존재하면 이 위치를 탐색에서 제외시킨다. 각 위치에 대한 절대 오차의 합은

$$SAE(v) = \sum_{m_i \in vm(v)} a_{m_i} |\theta_{m_i} - \theta_m| \tag{17}$$

와 같이 정의된다. 여기서 $vm(v)$ 은 v 에 연결된 모든 메쉬들을 나타내며, θ_{m_i} 는 $vm(v)$ 에서 i 번째 메쉬 m_i 의 법선 벡터 \vec{n}_i 와 m_i 이 속하는 패치의 CEGI 상에서 이 벡터가 투영되는 셀의 중점 벡터와의 사이각을 나타낸다. \vec{n}_i 가 투영된 셀이 워터마크가 삽입되는 셀이면 a_{m_i} 는 1이고, 워터마크 삽입 대상 셀이 아니면 a_{m_i} 는 0이다. 그리고 \vec{n}_i 이 투영된 셀에 삽입될 워터마크 비트가 1이면 θ_{m_i} 가 0이고, 워터마크 비트가 0이면 θ_{m_i} 가 θ_m 이다. 즉, θ_{m_i} 는 절대 오차의 합에서 워터마크 비트에 따른 기준점이다. 이상에서와 같이 제안한 방법에서는 각 패치별로 이에 속하는 모든 꼭지점들을 식 (15)에 의하여 최적의 위치로 이동시킨다. 그리고 워터마크를 삽입한 셀의 평균 사이각을 구한 후, 이 값이 문턱 영역 내에 있으면 이들 셀에 투영되는 메쉬들의 꼭지점들을 위와 같은 방법으로 다시 최적의 위치로 이동시킨다. 이때 이 꼭지점에 대한 탐색 범위를 확장하여 이 범위 내에 절대 오차의 합을 구한다.

3. 워터마크 추출

제안한 방법에 의하여 워터마크를 삽입한 모델에서 이를 추출하는 방법은 그림 8에서와 같다. 이 그림에서와 같이 워터마크 삽입 과정에서 저장된 워터마크 키를 이용하여 원 메쉬 모델없이 워터마크를 추출한다. 여기서 워터마크 키로는 원 메쉬 모델에서 분할된 각 패치의 중점 좌표와 각 패치 CEGI에서 셀의 순위표 및 치환된 셀 주소 정보이다. 회전과 같은 아핀 변환된 모델에서는 원 메쉬 모델과 동일한 조건으로 패치를 분할할 수 없다. 그러므로 이러한 모델에서는 워터마크를 검출하기 전에 원 메쉬 모델의 방향으로 이동하는 재배열 과정이 필요하다. 제안한 방법에서는 두 개의 워터마크 키를 이용하여 아핀 변형된 모델이 원 메쉬 모델과 동일한 축 상에 있

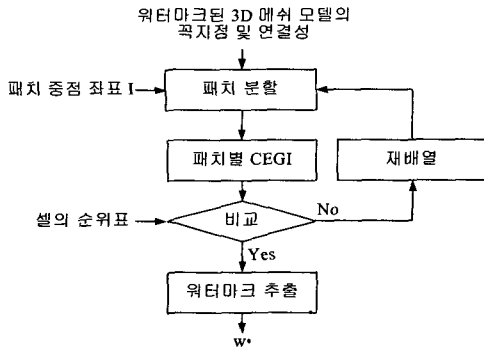


그림 8. 제안한 워터마크 추출 알고리즘
Fig. 8. The proposed algorithm of the watermark extraction.

도록 재배열한다. 즉, 아핀 변형된 모델에서 패치 중점 좌표 $I = \{I_1, I_2, \dots, I_{N_p}\}$ 를 ZYX 형태의 오일러 (Euler) 각도 (α, β, γ) 에 따라

$$I = R_z(\gamma) R_y(\beta) R_x(\alpha) I \quad (18)$$

where $0 \leq \alpha \leq 2\pi$, $0 \leq \beta \leq \pi$, and $0 \leq \gamma \leq 2\pi$

$$R_z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}$$

와 같이 변환시킨 후에 이 중점 좌표 I 에 대하여 모델을 패치 분할한다. 그리고 분할 패치의 CEG $\widehat{PE}_{i \in [1, N_p]}$ 상에서 각 셀에 대한 순위표를 구하여 이를 워터마크 키의 순위표와 비교한다. 즉, 워터마크 키의 순위표 상에 셀 순위와 $\widehat{PE}_{i \in [1, N_p]}$ 상에서 이 순위에 해당하는 셀의 순위가 가장 유사한 각 $(\alpha^*, \beta^*, \gamma^*)$ 를

$$(\alpha^*, \beta^*, \gamma^*) = \arg \min_{(\alpha, \beta, \gamma)} \left[\sum_{i=1}^{N_p} \sum_{r=1}^{120} a_{ir} |r - \text{rank}_i(\hat{c}_{i, \text{rank}_i^{-1}(r)})| \right] \quad (19)$$

와 같이 찾는다. 여기서 $\hat{c}_{i, \text{rank}_i^{-1}(r)}$ 는 i 번째 \widehat{PE}_i 상에서 r 번째 순위를 가지는 셀의 가중치이며, $\text{rank}_i(\hat{c}_{i, \text{rank}_i^{-1}(r)})$ 는 이 셀의 순위를 나타낸다. 절단에 의하여 이 셀로 투영되는 메쉬가 없는 경우에는 a_{ir} 은 0이며, 그렇지 않을 경우에는 1이다.

$\widehat{PE}_{i \in [1, N_p]}$ 상에 워터마크 키인 치환된 셀 주소 정보에 있는 셀 상에서 워터마크를 추출한다. 예를 들어 l 번째 워터마크 비트 w_l 은 각 패치별 CEGI 분포에서 l 번째 치환 나열된 셀 $C_{i, p, (l)}$ 에서의 평균 사이각 θ_{il}

들의 전체 평균값 $\bar{\theta}_l = 1/N_p \sum_{i=1}^{N_p} \theta_{il}$ 이 θ_{th} 보다 작으면 1이고, θ_{th} 보다 크면 0이다. 여기서 i 번째 패치의 셀 $C_{i, p, (l)}$ 에서 이에 투영되는 메쉬의 법선 벡터들과 이 셀의 중점 벡터 $\overrightarrow{BC}_{i, p, (l)}$ 와의 평균 사이각 θ_{il} 은 $1/N_{il} \sum_{n_{ij} \in M_{i, p, (l)}} \cos^{-1}(\vec{n}_{ij} \cdot \overrightarrow{BC}_{i, p, (l)})$ 이다. 여기서 N_{il} 은 집합 $M_{i, p, (l)}$ 의 원소 개수이며, θ_{th} 는 식 (12)에 의하여 실험적으로 구한 값이다. 절단과 같은 국부 변형된 모델에서는 특정 부분의 꼭지점들이 없다. 이 모델에서는 각 패치별 CEGI 상에서 워터마크 삽입에 선택된 셀의 가중치 크기를 확인하여 이 크기가 총 셀의 가중치 크기의 0.03%보다 작으면 θ_{il} 에서 제외시킨다.

여기서 Benedens의 재배열 과정에서는 원 메쉬 모델의 법선 벡터 분포와 공격된 모델의 법선 벡터 분포를 비교하므로써, 원 메쉬 모델의 방향으로 재배열한다. 그러므로 각 메쉬에 대한 법선 벡터가 필요하다. 제안한 방법의 재배열 과정에서는 각 셀의 순위표 및 패치 중점 좌표가 필요하므로, Benedens의 방법보다 데이터량이 작다. 두 가지 방법에서는 모든 3차원 방향에 대하여 탐색하여야 하므로, Intel Celeron 800MHz인 환경하에서 10분~12분 정도 시간이 걸린다.

III. 실험 결과 및 고찰

제안한 3D 메쉬 워터마킹 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 컴퓨터 모의 실험을 수행하였다. 본 실험에서 사용된 데이터로는 Stanford bunny, Knots, Venus, 및 Agrippa bust 모델이며, 이들 데이터들의 정보는 표 1에서와 같다. 제안한 방법에서 사용된 워터마크는 길이가 50인 가우시안 랜덤 시퀀스를 1비트로 변환한 비트열 (bit stream)이다. 그러므로 각 패치별 CEGI 상에서 120번째 순위까지의 셀 중 50개 셀을 랜덤하게 선택하여 이를 나열한다. 그리고 나열된 셀에 워터마크를 각각 삽입시킨다. 닫힌 형상인 Stanford bunny, Knots, 및 Venus 모델에서는 6개 패치로 분할되므로 총 300개의 셀에 워터마크가 삽입되며, 열린 형상인 Agrippa bust 모델에서는 4개의 패치로 분할되므로, 총 200개의 셀에 워터마크가 삽입된다. 제안한 방법에 의하여 워터마크가 삽입된 모델들은 그림 9와 같다. 이와 같이 제안한 방법은 삽입할 수 있는 데이터 양은 제한되지만, 특정 공격에 대하여 강인하며 원 메쉬 모델 대신, 워터마크 삽입 과정에서 획득

표 1. 본 실험에 사용된 모델들
Table 1. Models used in the experiment.

Model	Number of vertices	Number of meshes	File size [KB]
Stanford bunny	35,947	69,451	3,626
Knots	23,232	46,464	2,364
Venus	33,591	67,178	3,009
Agrippa bust	38,000	75,394	3,335

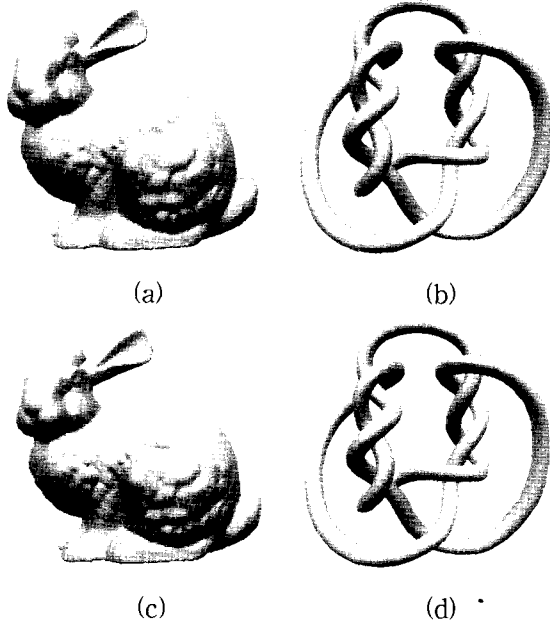


그림 9. (a),(b) 제안한 방법 및 (c),(d) Benedens의 방법으로 워터마크를 삽입한 Stanford bunny 및 Knots 모델

Fig. 9. Watermarked Stanford bunny and Knots model by (a), (b) the proposed method and (c), (d) Benedens' method.

표 2. 제안한 방법과 기존의 방법에 의하여 워터마크가 삽입된 모델의 꼭지점에 대한 SNR

Table 2. SNR for vertices of the watermarked models by the proposed method and the conventional method.

Model	Method	SNR [dB]		Percentage of number of the embedding meshes [%]	
		Proposed	Benedens	Proposed	Benedens
Stanford bunny		42.69	42.77	62	22
Knots		39.87	40.77	40	19
Venus		39.12	39.12	60	20
Agrippa bust		41.88	-	58	-

득된 몇 가지 정보를 가지고 워터마크를 추출하는 방법이다. 따라서 본 실험에서는 이와 가장 유사한 방법인 Bendens^[8]의 방법과 성능 비교를 수행하였다. 이외의 기존 방법들^{[4] [7],[9]}은 삽입되는 워터마크의 성질 및 데이터 양 등이 다르므로 성능 비교가 적절하지 못하므로 본 실험

에서는 배제하였다.

1. 비가시 성능 평가

본 실험에서는 비가시에 대한 객관적 화질 및 주관적 화질의 성능을 평가하였다. 객관적 화질 척도로는 꼭지점에 대한 SNR을 사용하였다. 이 때 꼭지점에 대한 SNR은 $10 \log_{10} \frac{var(\|v - M\|)}{var(\|v - v'\|)}$ 와 같이 정의된다. 여기서 $var(\cdot)$ 는 분산을 나타내며, M 은 원 모델의 중점 좌표값을 나타낸다. 그리고 v 는 원 모델에서의 꼭지점 좌표값이고, v' 는 워터마크가 삽입된 모델에서의 꼭지점 좌표값이다. 꼭지점에 대한 SNR은 꼭지점의 정렬 순서와 메쉬의 연결성이 동일한 조건 하에서만 사용될 수 있다. 최근에는 3D 메쉬 모델의 화질 척도에 대한 연구가 진행 중에 있다.^[13]

원 모델과 워터마크가 삽입된 모델과의 SNR은 표 2와 같다. 이 표를 살펴보면 제안한 방법이 기존의 방법과 거의 유사함을 알 수 있다. 제안한 방법에서는 견고의 성능을 향상시키기 위하여 각 패치별로 워터마크를 삽입하므로 기존의 Benedens 방법에서보다 삽입되는 꼭지점의 개수가 2~3 배 정도 많으므로 비가시가 떨어질 수 있다. 그러나 제안한 방법에서는 각 꼭지점의 탐색 영역 조건에 따라 워터마크를 삽입하므로 기존의 방법과 유사한 비가시를 획득할 수 있었다. 본 논문에서 제안한 방법과 기존의 방법에 의하여 워터마크가 삽입된 모델은 그림 9와 같다. 여기서 Agrippa bust 모델은 한 방향에 대한 형상을 가지는 열린 모델이다. Benedens의 방법에서는 3D 메쉬 모델의 기준점에 대한 메쉬 법선 방향을 임의로 선택하므로 빈 공간이 있는 열린 형상을 가지는 모델에서는 적용되지 못한다. 특히 Agrippa bust 모델에서는 3차원 공간 상에서 40% 정도가 열려있으므로 Benedens의 방법으로 워터마크를 삽입시킬 수 없다. 그러므로 Agrippa bust 모델에서는 제안한 방법의 결과만 제시하였다.

2. 견고 성능 평가

제안한 워터마크 알고리즘의 견고 성능을 평가하기 위하여 본 실험에서는 워터마크를 삽입시킨 모델에 대하여 메쉬 간단화의 위상학적 공격과 절단, 잡음 첨가, 및 아핀 변환 등의 기하학적 공격을 행하였다. 견고 성능에 대한 척도로는 워터마크의 비트 에러율 (bit error rate, BER)을 사용하였다. 이는 삽입되는 워터마크 총 비트수에서 에러가 발생한 비트의 수를 퍼센트로 나타낸 것이다.

메쉬 간단화에 대한 실험에서는 MeshToSS^[15]를 이용

표 3. 메쉬 간단화에 대한 실험 결과
Table 3. The experimental results for mesh simplification

Model	Percentage of number of vertices [%]	Proposed BER [%]	Benedens BER [%]
Stanford bunny	51.2	0	6
	24.9	2	22
	14.8	8	28
Knots	9.9	20	34
	39.4	0	2
	29.6	0	4
Venus	24.3	2	8
	42.5	0	14
	33.0	0	16
Agrippa bust	27.0	8	18
	45.5	0	-
	33.2	4	-
	20.4	8	-

표 4. 잡음 첨가에 대한 실험 결과
Table 4. The experimental results random noise addition.

Model	Percentage of number of sampled vertices [%]	Proposed BER [%]	Benedens BER [%]
Stanford bunny	50	0	6
	100	4	16
Knots	50	0	0
	100	2	2
Venus	50	0	4
	100	6	16
Agrippa bust	50	0	-
	100	2	-

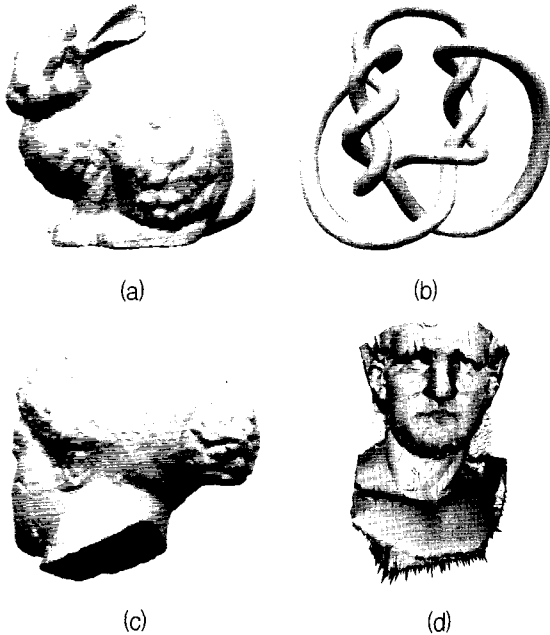


그림 10. 꼭지점의 개수가 (a) 24.9%으로 줄여진 Stanford bunny 모델, (b)24.29%으로 줄여진 Knots 모델, (c)42.5%으로 줄여진 Venus 모델, 그리고 (d)45.5%으로 줄여진 Agrippa bust 모델

Fig. 10. (a) Stanford bunny model simplified to 24.9%, (b) Knots model simplified to 24.29%, (c) Venus model simplified to 39.35%, and (d) Agrippa bust model simplified to 24.29% of vertices by using mesh simplification.

하여 워터마크가 삽입된 모델의 꼭지점의 개수를 다양한 비율로 줄였다. 이에 대한 결과로는 표 3과 같다. 여기서 꼭지점 개수 비율은 원 메쉬 모델의 꼭지점 개수에 대한 메쉬 간단화된 모델의 꼭지점 개수의 비율을 나타낸다. 이 표에서 살펴보면 제안한 방법이 기존의 방법보다 최대 20%정도 BER이 작음을 알 수 있다. 또한 제안한 방법에

서는 꼭지점의 개수가 30%까지 간단화된 모델에 대하여 워터마크 비트 손실이 거의 없음을 알 수 있다. 그리고 14%까지 매우 많이 간단화된 모델에서도 워터마크의 92%를 손실없이 검출함을 알 수 있다. 메쉬 간단화된 모델들은 그림 10과 같다. 이 그림을 살펴보면 원 모델에 비하여 메쉬와 메쉬 간에 불연속적으로 나타남을 알 수 있다. 특히 꼭지점의 개수가 많이 줄여진 모델에서는 매우 불연속하게 나타나지만, 원 모델의 형상을 그대로 유지함을 알 수 있다. 메쉬 간단화 실험 결과에서 제안한 방법이 여러 패치의 CEGI 상에서 가중치가 큰 셀에 워터마크를 삽입하므로, 기존의 방법보다 우수한 견고 성능을 가짐을 확인할 수 있었다. 그리고 공격에 의하여 모델이 변형되더라도 워터마크를 손실없이 검출함을 확인할 수 있었다.

랜덤 잡음 첨가에 대한 실험에서는 전체 꼭지점에 대하여 50% 및 100%로 랜덤하게 표본화된 꼭지점의 각 좌표에 $v' = v \times (1 + \alpha \times \text{uniform}())$ 와 같이 잡음을 첨가하였다. 여기서 변조도 α 는 0.01이며, $\text{uniform}()$ 은 [-0.5 0.5]의 범위를 가지는 균등한 랜덤 함수 (uniform random function)이다. 이에 대한 결과로는 표 4와 같다. 이 표에서 제안한 방법이 기존의 방법보다 BER이 4~12% 정도 작음을 확인할 수 있다. 제안한 방법에서는 복소 가중치 크기 분포에 의하여 선택한 셀 상에서 이에 투영되는 메쉬들의 법선 방향 분포에 워터마크를 삽입하였다. 이는 꼭지점의 좌표가 소수 3자리수까지 가변되더라도 이들 방향 분포는 바뀌지 않기 때문이다. 그리고 워터마크를 여러 패치에 삽입하였으므로, 기존의 방법보다 우수한 견고 성능을 가짐을 확인할 수 있었다. 절단은 워터마크가 삽입된 모델의 일정 부분을 제거하는 공격이다. 본 실험에서는 그림 11과 같이 모델의 오른쪽 및 왼쪽 부분의 꼭지점 개수를 40% 정도로 절단하였다. 이에 대한 결과인 표 V에서 살펴보면 기존의 방법에서는 20% 정도의 BER이 발생하였는데, 이는 20% 정도의 워터마크 정

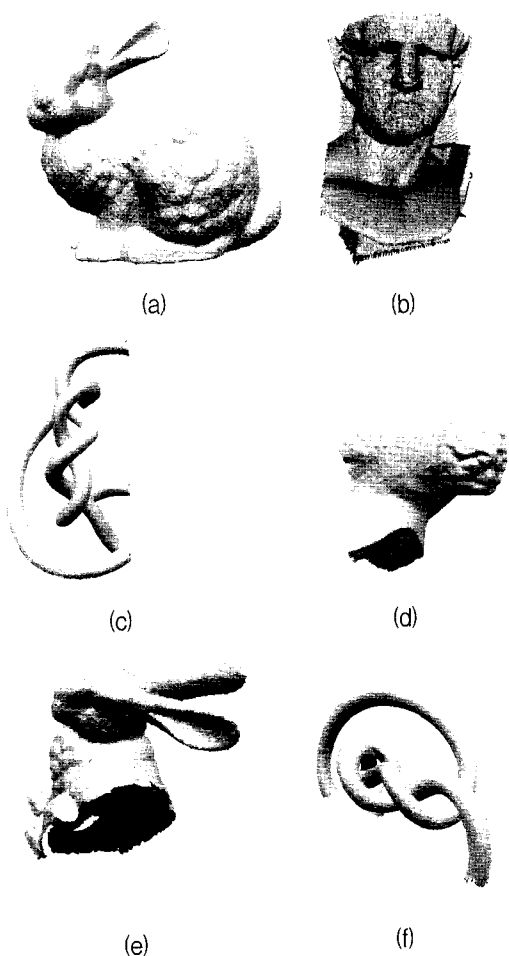


그림 11. 랜덤 잡음을 첨가한 (a) Stanford bunny, (b) Agrippa bust 모델, 꼭지점 개수가 40%로 절단된 (c) Knots 및 (d) Venus 모델, (e) 절단, 메쉬 간단화, 및 (45°, 45°, 0°)로 회전한 Stanford bunny 모델 및 (f) 절단, 메쉬 간단화, 및 (90°, 45°, 25°)로 회전한 Knots 모델

Fig. 11. (a) Stanford bunny, (b) Agrippa bust model with the additive uniform random noise (c) Knots and (d) Venus model cropped to 40% of vertices, (e) Stanford bunny model rotated to (45°, 45°, 0°), simplified to 24.9%, and cropped (b) Knots model rotated to (90°, 45°, 25°), simplified to 29.6%, and cropped.

보가절단에 의하여 제거됨을 나타낸다. 그러나 제안한 방법에서는 여러 개의 패치별로 워터마크를 삽입하므로 일정 부분의 꼭지점이 제거되더라도 나머지 부분에 삽입시킨 워터마크를 손실없이 추출함을 확인할 수 있었다.

혼합 공격으로는 메쉬 간단화의 위상학적 공격과 절단의 기하학적 공격이 동시에 가해진 공격을 사용되었다. 이들에 대한 결과인 표 5에서 살펴보면 제안한 방법이 기존의 방법에서보다 24% 정도의 BER이 작음을 확인할 수 있다. 기존의 방법에서는 절단에 의하여 20%

표 5. 절단 및 혼합 공격에 대한 실험 결과
Table 5. The experimental results for cropping and multiple attacks.

Model	Attack	Proposed BER [%]	Benedens BER [%]
Stanford bunny	Crop	0	18
	Crop+Simplify	2	26
Knots	Crop	0	18
	Crop+Simplify	6	32
Venus	Crop	0	20
	Crop+Simplify	6	32
Agrippa bust	Crop	0	-
	Crop+Simplify	4	-

정도의 BER과 메쉬 간단화에 의하여 10% 정도의 BER이 발생하였다. 그러나 제안한 방법에서는 절단의 공격보다는 메쉬 간단화에 의하여 2~6% 정도의 BER이 발생함을 알 수 있었다. 또한 이들 회전된 모델에 대해서는 제안한 재배열 과정을 수행한 후에 워터마크를 추출하였다. 그리고 어떤 변환이 없는 모델의 결과와 동일하였음을 확인할 수 있었다. 이상의 결과로부터 제안한 3D 메쉬 모델의 워터마킹 알고리즘이 워터마크의 비가시 및 견고 성능이 우수함을 확인할 수 있었다.

IV 결 론

본 논문에서는 패치별 CEGI를 이용한 3D 메쉬 모델의 블라인드 워터마킹을 제안하였다. 제안한 방법에서는 3D 메쉬 모델을 여러 개의 패치 분할하여, 패치별로 CEGI를 구한다. 각 패치 CEGI 상에서 복소 가중치 크기가 큰 셀을 선택하여 이를 치환 나열한다. 이 때 이진 워터마크 비트를 각 패치별로 동일 순으로 나열된 셀에 절대 오차의 합을 이용한 단계적 검색 방법에 의하여 각각 삽입한다. 실험 결과 제안한 방법이 기존의 방법보다 유사한 워터마크의 비가시성을 나타내었지만, 다양한 공격에 대하여 4-20% 정도 BER이 작음을 확인하였다.

본 연구에서는 고정된 6개 패치의 EGI (Extended gaussian image) 분포 상에서 이진 워터마크를 삽입하는 방법을 발표하였다.^{[10],[11]} 본 논문에서는 위의 방법을 복소 형태로 확장된 CEGI 상에서 워터마크 삽입 및 원 모델이 필요없는 재배열 과정으로 수정하였다. 본 논문에서 제안한 방법이 이전에 발표했던 방법보다 성능이 더욱 우수함을 다양한 모델에 대한 실험을 통하여 확인하였다.

참고 문헌

- [1] J. Cox, J. Kilian, T. Leighton, and T. Shamon, "Secure spread spectrum watermarking for multimedia," *IEEE Trans. on Image Processing*, vol. 6, no. 12, pp. 1673-1687, Dec. 1997.
- [2] W. Zhu, Z. Xiong, and Y.-Q. Zhang, "Multiresolution watermarking for image and video," *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 9, no. 4, pp. 545-550, June 1999.
- [3] ISO/IEC 14772-1, "The virtual reality modeling language."
- [4] R. Ohbuchi, H. Masuda, and M. Aono, "Watermarking three-dimensional polygonal models through geometric and topological modification," *IEEE JSAC*, pp. 551-560, 1998.
- [5] R. Ohbuchi, A. Mukaiyama, and S. Takahashi, "A frequency-domain approach to watermarking 3D shapes," *Proc. of EUROGRAPHICS*, pp. 373-382, 2002.
- [6] S. Kanai, H. Date, and T. Kishinami, "Digital watermarking for 3D polygons using multiresolution wavelet decomposition," *Proc. of Sixth IFIP WG 5.2 GEO-6*, pp. 296-307, Dec. 1998.
- [7] E. Praun, H. Hoppe, and A. Finkelstein, "Robust mesh watermarking," *ACM SIGGRAPH*, pp. 49-56, Aug. 1999.
- [8] O. Benedens, "Geometry-based watermarking of 3D models," *IEEE CG&A*, pp. 46-55, Jan./Feb. 1999.
- [9] F. Cayre and B. Macq, "Data hiding on 3D triangle meshes," *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 51, no. 4, pp. 939-949, April 2003.
- [10] S.-H. Lee, T.-S. Kim, B.-J. Kim, S.-G. Kwon, K.-R. Kwon, and K.-I. Lee, "3D polygonal meshes watermarking using normal vector distributions," *IEEE International Conference on Multimedia & Expo.*, vol. III, pp. 105-108, July 2003.
- [11] K.-R. Kwon, S.-G. Kwon, S.-H. Lee, T.-S. Kim, and K.-I. Lee, "Watermarking for 3D polygonal meshes using normal vector distributions of patch," *IEEE International conference on Image Processing*, vol. 2, 499-502, Sep. 2003.
- [12] S.B. Kang and K. Ikeuchi, "The Complex EGI: A new representation for 3-D pose determination," *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 15, no. 7, July 1993.
- [13] N. Aspert, D. Santa-Cruz, and T. Ebrahimi, "MESH: Measuring errors between surfaces using the Hausdorff distance," *Proc. of the IEEE International Conference in Multimedia and Expo.*, vol. 1, pp. 705-708, Aug. 2002.
- [14] <http://www.physics.orst.edu/~bulatov/polyhedra/dual/ud30.html>.
- [15] T. Kanai, MeshToSS Version 1.0.1, <http://graphics.sfc.keio.ac.jp/MeshToSS/indexE.html>.

저자 소개

이 석 환(정회원)
제41권 SP편 제6호 참조

권 기 룡(정회원)
제37권 SP편 제9호 참조