

# PEGI를 이용한 3D 메쉬 워터마킹

이석환,\* 김태수,\* 김병주,\* 권기룡,\*\* 이건일\*

\*경북대학교 전자전기컴퓨터학부

\*\*부산의국어대학교 전자공학과

## 3D Mesh Watermarking Using PEGI

Suk-Hwan Lee,\* Tae-Su Kim,\* Byung-Ju Kim,\* Ki-Ryong Kwon,\*\* and Kuhn-Il Lee\*

\*School of Electrical Engineering & Computer Science, Kyungpook National University

\*\*Department of Electronic Engineering, Pusan University of Foreign Studies

### 요 약

본 논문에서는 패치별 EGI 분포를 이용한 3D 다각형 메쉬 모델 (polygonal mesh model) 워터마킹 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘에서는 기하학적 변형에 견고하기 위하여 3D 메쉬 모델을 6개 패치로 분할한다. 그리고 위상학적 변형에 견실한 특성을 가지는 EGI 분포를 각 패치별로 구한다. 그리고 동일한 워터마크 비트열을 각 패치의 EGI 분포 중에서 길이가 큰 면체에 투영된 메쉬 법선 벡터들에 각각 삽입한다. 본 논문에서 제안한 워터마킹 알고리즘의 성능 평가를 위한 모의 실험에서 워터마크가 삽입된 모델의 비가시성 및 다양한 공격에 대한 견고성이 우수함을 확인하였다.

### 1. 서론

최근에 정지 영상, 오디오, 및 비디오 등의 디지털 미디어에 대한 워터마킹의 연구가 많이 진행되어지고 있다. 그러나 Web 3D, MPEG4, VRML, 및 3D 기하학적 CAD 데이터 등의 3D 데이터들은 웹 기반 하에서 많이 이용되어지고 있는 반면, 저작권 보호에 대한 효과적인 방법이 거의 없다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 최근에 3D 다각형 모델에 대하여 워터마크를 삽입하는 연구가 시작되어지고 있다.

Ohbuchi 등<sup>[2]</sup>은 3D 다각형 메쉬 모델의 메쉬 분광영역 (mesh spectral domain)에서 워터마크를 삽입하는 알고리즘을 제안하였다. 그러나 이 알고리즘은 메쉬 간단화 (mesh simplification) 및 리메쉬 (remesh) 와 같이 메쉬 연결성을 바꾸는 공격에 대하여 견고하지 못하는 단점을 갖는다. Beneden<sup>[3]</sup>은 3D 다각형 메쉬 모델의 법선 벡터 분포에 워터마크를 삽입하는 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘은 절단과 같이 꼭지점들의 일부분이 제거되는 공격에서는 법선 벡터 분포들이 바뀌어지므로 워터마크를 검출할 수 없는 단점이 있다.

본 논문에서는 3D 다각형 메쉬 모델에서 6개로 분할된 패치의 EGI 분포를 이용하여 워터마크를 삽입하는 알고리즘을 제안하였다. EGI (Extended Gaussian

Image)는 메쉬 법선 벡터들의 방향에 따른 분포를 알 수 있으며, 메쉬 간단화 및 리메쉬 등의 위상학적 변형에 변하지 않는다. 제안한 알고리즘에서는 3D 메쉬 모델을 6개의 패치로 분할한다. 그리고 각 패치별로 EGI 분포를 구한 후, EGI 분포에서 길이가 큰 면체에 투영된 메쉬 법선 벡터들에 워터마크를 삽입한다. 즉, 꼭지점에 연결된 모든 메쉬 법선 벡터들이 각각의 워터마크 정보를 만족하는 최적의 꼭지점을 구한 후, 이 꼭지점으로 이동시킨다. 본 논문에서 제안한 알고리즘의 성능을 평가하기 위한 실험 결과에서, 제안한 알고리즘이 메쉬 간단화 및 리메쉬 등의 위상학적 공격과 절단 등의 기하학적 공격에 대하여 우수한 견고성을 가짐을 확인할 수 있었다. 또한 워터마크 삽입시 단계적 탐색 방법을 이용하여 최적의 꼭지점을 구하므로 우수한 비가시성을 확인할 수 있었다.

### 2. 제안한 3D 워터마킹 알고리즘

본 논문에서 제안한 3D 다면체 메쉬 모델의 워터마크 삽입 알고리즘의 블록도는 그림 1에서와 같다. 3D VRML 데이터의 꼭지점 (vertex) 및 메쉬의 연결성 (mesh connectivity)을 입력으로 하여, 각 꼭지점의 좌표를 워터마크 정보에 따라 이동시킨다.

#### 1. 3D 메쉬 모델의 패치 분할

본 과제는 정보통신부의 정보통신학술기초연구지원 사업(정보통신연구진흥원)으로 수행한 연구결과입니다.

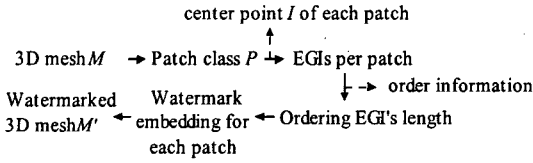


그림 1. 제안한 3D 워터마크 삽입 알고리즘 블록도.

제안한 알고리즘에서는 3D 메쉬 모델을 6개 패치들로 분할한 후, 동일한 정보의 워터마크를 각 패치별로 삽입하므로써, 기하학적 변형과 같은 공격에도 견고성을 가지게 된다. 먼저 패치  $P$ 의 중점  $I$ 을 구하기 위하여 6개의 단위 벡터 방향  $\pm \hat{x}, \pm \hat{y}, \pm \hat{z}$ 에 인접한 꼭지점 중 원점에서 거리가 가장 먼 위치에 있는 6개의 꼭지점을  $I$ 의 초기 위치로 설정한다. 그리고 각 꼭지점  $v$ 을 6개 패치의 중점  $I$ 와의 거리가

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

와 같이 최소가 되는 패치  $P_i$ 로 분류한다. 여기서,  $d(v, I)$ 는  $\|v - I\|^2$ 이다. 각 패치  $P_{i \in \{1, 6\}}$ 에 속해 있는 꼭지점들의 무게중심을 구한 후, 이를  $I_i$ 에 대입한다. 그리고  $I_i$ 에 대하여 (1) 식을 이용하여 각 꼭지점을 다시 분류한다. 이러한 과정을 거리 감소 비율  $(D_m - D_{m+1})/D_m$ 이 문턱값보다 작을 때까지 반복 수행한다. 여기서  $D_m$ 은  $\sum_{i=1}^6 \sum_{v \in P_i} \|I_i - v\|^2$ 이며,  $m$ 은 반복 횟수를 나타낸다.

## 2. 각 패치별 EGI 분포

3차원 공간상에서의 법선 벡터 분포는 방향 히스토그램 (orientation histogram)인 EGI 분포에서 알 수 있다. 먼저 각 패치별 모든 메쉬의 법선 벡터  $\vec{n}_{ij}$  및 면적  $A_{ij}$ 를 구한 후, 이 벡터를 240면체 중 가장 가까운 방향에 있는 면체로 투영시킨다. 즉,  $\vec{n}$ 과 240면체  $B$ 의 단위 법선 벡터  $\vec{BC}$ 와의 내적이 최소가 되는 면체  $B_i$ 로 투영시킨 후, 이 벡터의 면적을 투영된  $B_i$ 의 길이에 더한다. 여기서  $B_i$ 의 길이는  $B_i$ 에 투영된 모든 법선 벡터의 면적의 합을 나타낸다. 제안한 방법에서는 이러한  $B_i$ 에 속하는 모든 법선 벡터들의 평균 사이각을 이용하여 워터마크를 삽입한다.  $B_i$ 에 투영된 모든 메쉬 법선 벡터  $\vec{n}$ 와  $B_i$ 의 중점 벡터

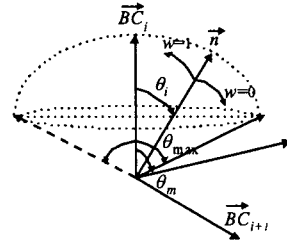


그림 2.  $B_i$ 에 투영된 메쉬 법선 벡터  $\vec{n}$ 와  $B_i$ 의 중점 벡터  $\vec{BC}_i$ 와의 사이각.

|              |              |              |              |     |              |
|--------------|--------------|--------------|--------------|-----|--------------|
| Watermark    | $w_1$        | $w_2$        | $w_3$        | ... | $w_N$        |
| Embedding    | $\downarrow$ | $\downarrow$ | $\downarrow$ |     | $\downarrow$ |
| PE1 of $P_1$ | $B_{11}$     | $B_{12}$     | $B_{13}$     | ... | $B_{1N}$     |
| PE2 of $P_2$ | $B_{21}$     | $B_{22}$     | $B_{23}$     | ... | $B_{2N}$     |
| PE3 of $P_3$ | $B_{31}$     | $B_{32}$     | $B_{33}$     | ... | $B_{3N}$     |
| ⋮            | ⋮            | ⋮            | ⋮            | ⋮   | ⋮            |
| PE6 of $P_6$ | $B_{61}$     | $B_{62}$     | $B_{63}$     | ... | $B_{6N}$     |

그림 3. 6개 패치별 EGI 분포에서 길이순으로 정렬된  $B$ 에 동일한 워터마크 삽입.

$\vec{BC}_i$ 와의 사이각  $\theta = \cos^{-1}(\vec{n} \cdot \vec{BC}_i)$ 은  $0 \leq \theta \leq \theta_m$ 의 범위를 갖는다. 여기서  $\theta_m$ 은 서로 인접한  $B_i$  및  $B_{i+1}$ 들의 중점 벡터  $\vec{BC}_i$  및  $\vec{BC}_{i+1}$ 와의 사이각의 0.5배이다.  $\theta_m$  근처에 있는  $\vec{n}$ 는 공격 시 다른  $B$ 으로 투영될 수 있으므로, 제안한 알고리즘에서는 실험적으로 구한  $\theta$  범위  $0 \leq \cos^{-1}(\vec{n} \cdot \vec{BC}_i) \leq \theta_{\max}$  안에 있는  $\vec{n}$ 만을  $B$ 로 투영시킨다. 여기서  $\theta_{\max}$ 은 8.6이다.

## 3. EGI 분포에 따른 워터마크 위치 결정

각 패치별 EGI 분포에서  $B$ 의 길이의 크기에 따라 순위를 정한 후, 워터마크 길이만큼  $B$ 를 선택한다. 즉,  $n$ 개의 워터마크 삽입시 각 패치별  $n$ 개의 순위 정보가 필요하며, 총  $n \times B$ 개의 면체에 투영된 모든 법선 벡터들이 워터마크에 의하여 이동하게 된다. 제안한 방법에서는 1 비트의 워터마크를 6개 패치별 EGI 분포 중 동일한 순위에 있는 6개의  $B$ 에 삽입한다. 즉,  $j$  번째 워터마크  $w_j$ 를 그림 3에서와 같이  $i$  번째 패치의 EGI 분포에서  $j$  번째 길이 크기 순위를

가지는  $B_{ij}$ 에 삽입한다.

#### 4. 워터마크 삽입

제안한 알고리즘에서는  $B$ 에 투영된 모든 메쉬 법선 벡터들을 1비트의 랜덤 시퀀스로 이루어진 워터마크 정보에 의하여 이동시킨다. 워터마크 비트가 1일 경우, 그림 2에서와 같이  $\theta$ 을 0으로 이동시키고, 워터마크 비트가 0일 경우  $\theta$ 을  $\theta_{max}$ 으로 이동시킨다. 그러나 꼭지점의 좌표가 바뀌어지면 꼭지점에 연결된 모든 메쉬들의 법선 벡터들까지도 바뀌어진다. 모든 꼭지점에 연결된 메쉬들의 법선 벡터들이 워터마크 정보에 따라 바꾸기 위하여 가장 최적의 꼭지점  $v'$ 의 좌표를 얻어야 한다.

워터마크 삽입시 비가시성을 고려하기 위하여 현재 꼭지점  $v$ 의 탐색 범위 내에서 최적의 꼭지점  $v'$ 을 찾는다. 여기서 탐색 범위는 현재 꼭지점  $v$ 에 연결된 모든 꼭지점들 중 각 축의 최소값을 넘지 않도록 설정된다. 현재 꼭지점  $v$ 의 좌표가  $(x, y, z)$  일 때, 각 축에 대한 탐색 범위는  $x \pm \Delta x$ ,  $y \pm \Delta y$ , 및  $z \pm \Delta z$ 이다. 현재 꼭지점  $v$ 에 대한 탐색 범위 내에서  $v$ 에 연결된 모든 메쉬 법선 벡터들이 각각의 워터마크 정보를 만족하는 최적의 꼭지점  $v'$ 을 구한 후, 이 꼭지점으로 이동시킨다. 즉, 탐색 범위 내에서의 꼭지점  $v$ 들 중, 비용 함수  $\cos(\theta) = \sum_{v_i \in S(v)} a_{v_i} |\theta_{v_i} - \theta_v|$ 가 최소가 되는 최적의 꼭지점  $v'$ 을 구한다. 여기서  $S(v)$ 는  $v$ 에 연결된 메쉬들을 나타내며,  $\theta_{v_i}$ 는  $i$ 번째 메쉬의 법선 벡터  $\vec{n}_i$ 와 이 벡터가 투영된  $B_i$ 의  $\vec{BC}_i$ 와의 사이각을 나타낸다.  $a_{v_i}$ 는  $\vec{n}_i$ 가 투영된  $B_i$ 이 워터마크를 삽입하려는 면체이면 1이고, 워터마크 삽입 면체에서 제외되면 0이다. 그리고  $\vec{n}_i$ 이 투영된  $B_i$ 에 삽입될 워터마크 비트가 1이면  $\theta_{v_i}$ 는 0이고, 워터마크 비트가 0이면  $\theta_{v_i}$ 는  $\theta_{max}$ 이다.

탐색 범위 내에서 모든 꼭지점들에 대한 비용 함수를 구하려면 처리 시간이 길어진다. 그러므로 제안한 방법에서는 단계적 검색 방법을 이용하여 최적의 꼭지점을 구한다. 첫 번째 단계에서는 현재 꼭지점  $v = (x, y, z)$ 에서 탐색 범위의 최중 위치에 있는 27개의 꼭지점  $v' = \{(x', y', z') | x' \in (x - \Delta x, x, x + \Delta x), y' \in (y - \Delta y, y, y + \Delta y), z' \in (z - \Delta z, z, z + \Delta z)\}$ 들의 비용 함수를 구한다. 그리고 현재 꼭지점  $v$ 를 최소의 비용 함수를 가지는 꼭지점으로 이동시킨 후,  $\Delta x$ ,

$\Delta y$ , 및  $\Delta z$ 를 각각  $\Delta x/2$ ,  $\Delta y/2$ , 및  $\Delta z/2$ 으로 줄인다. 두 번째 단계에서는 줄어진 범위 내에서의 27개 꼭지점 중 최소의 비용 함수를 가지는 꼭지점으로 이동시킨다. 이러한 과정을 모든 꼭지점들에 대하여 세 단계까지 반복적으로 처리한다.

#### 5. 워터마크 추출

제안한 알고리즘에 의하여 삽입된 워터마크의 검출 과정은 삽입 과정과 유사하며, 기존의 알고리즘과는 달리 원 모델이 필요 없다. 워터마크가 삽입되었다고 추정되는 모델에 대하여 워터마크 삽입 과정에서 얻은 각 패치의 중점  $I$ 을 이용하여 6개 패치로 분류한다. 그리고 각 패치별 메쉬의 법선 벡터 및 EGI 분포를 구한다. 각 패치별 워터마크가 삽입된  $B$ 의 정렬 순서를 이용하여  $B$ 에 투영되는 모든 메쉬 법선 벡터들과  $B$ 의 중점 벡터와의 평균 사이각에 의하여 워터마크를 검출한다.

$j$ 번째 비트의 워터마크  $w_j$ 은 각 패치별 EGI 분포에서  $j$ 번째 순위를 가지는  $B_{ij}$ 에서의 평균 사이각  $\theta_{ij}$ 들의 전체 평균값  $\bar{\theta}_j = 1/6 \sum_{i=0}^5 \theta_{ij}$ 이 특정 문턱값  $\theta_{th}$ 보다 작으면,  $w_j$ 은 1이고,  $\theta_{th}$ 보다 크면  $w_j$ 은 0으로 검출된다. 여기서  $i$ 번째 패치의  $j$ 번째 순위를 가지는  $B_{ij}$ 에서  $B_{ij}$ 에 투영된 메쉬의 법선 벡터들과  $B_{ij}$ 의 중점 벡터  $\vec{BC}_{ij}$ 와의 평균 사이각  $\theta_{ij} = 1/N \sum_{k=0}^N \cos^{-1}(\vec{BC}_{ij} \cdot \vec{n}_k)$ 이며,  $N$ 은  $B_{ij}$ 에 투영되는 메쉬 법선 벡터들의 수를 나타낸다.

#### 3. 실험 결과 및 고찰

제안한 3D 워터마킹 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 컴퓨터 모의 실험을 행하였다. 본 실험에서는 35,947개의 꼭지점 및 69,451개의 메쉬를 가지는 Stanford Bunny 모델의 VRML 데이터를 사용하였다. 그리고 제안한 알고리즘에서 사용되는 워터마크는 길이가 50인 가우시안 랜덤 시퀀스를 1비트로 변환하여 사용하였다. Stanford Bunny 모델 및 제안한 알고리즘에 의하여 워터마크가 삽입된 모델을 그림 4에 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 시각적으로 워터마크의 삽입 여부를 구분하기 어렵다. 제안한 워터마킹 알고리즘의 견고성을 평가하기 위하여 워터마크가 삽입된 모델에 표면 간단화 (simplification), 절단 (cropping), 및 랜덤 잡음 첨가 등을 적용하였다. 다양

한 공격에 대한 실험 결과는 표 I 에서와 같다. 제안한 알고리즘에서는 패치별로 워터마크를 삽입하므로, 여러 면체에 대한 bit 손실이 발생하더라도 워터마크 bit 손실은 거의 발생되지 않음을 표에서 알 수 있다.

표면 간단화에 대한 실험에서는 MeshToSS<sup>[8]</sup>을 이용하여 워터마크가 삽입된 모델의 꼭지점의 개수를 다양한 비율로 줄였다. 표에서 살펴보면, 30 %까지 간단화된 모델에서는 워터마크 bit 손실이 거의 없음을 알 수 있다. 랜덤 잡음 첨가에 대한 실험에서는 랜덤하게 표본화된 꼭지점  $v$ 를  $v \times (1 + \alpha \times \text{uniform}())$ 으로 바꾸었다. 여기서 변조도  $\alpha$ 는 0.008이며,  $\text{uniform}()$ 는 [-0.5 0.5]의 범위를 가지는 균등한 랜덤 함수이다. 전체 꼭지점에 대하여 50 % 및 100 %으로 랜덤하게 표본화된 꼭지점에 랜덤 잡음을 첨가한 모델에서는 워터마크가 완벽하게 검출됨을 표에서 알 수 있다. 절단에 대한 실험에서는 워터마크가 삽입된 모델의 임의의 일정 부분을 제거하였다. 제안한 알고리즘에서는 패치별로 워터마크를 삽입하므로, 남아 있는 부분에 속하는 패치에서는 워터마크가 여전히 남아 있다. 그러므로, 절단된 모델에서는 워터마크가 손실없이 검출됨을 표에서 알 수 있다. 이 결과로부터 제안한 3D 워터마킹 알고리즘이 삽입한 워터마크에 대한 비가시성 및 다양한 공격에 대한 우수한 견고성을 가짐을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 패치별 EGI 분포를 이용한 3D 다각형 메쉬 모델의 워터마킹 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘에서는 기하학적 및 위상학적 변형에 대한 우수한 견고성을 가지기 위하여 동일한 워터마크 비트열을 6개로 분할된 패치의 EGI 분포에 각각 삽입한다. 그리고 워터마크 삽입에서는 인접한 꼭지점들 간의 최소 거리 내에 단계적 탐색 방법을 이용하여 최적의 꼭지점을 찾으므로써 비가시성을 향상시킨다. 또한 워터마크 추출시 복잡한 재표본화 과정 및 원 모델이 필요 없다.

본 논문에서 제안한 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 VRML 3D 데이터의 Stanford Bunny 모델에 대하여 컴퓨터 모의 실험을 행하였다. 이 실험에서 제안한 워터마킹 알고리즘이 비가시성 및 견고성 면에서 우수함을 확인할 수 있었다.

참고문헌

[1] R. Ohbuchi, H. Masuda, and M. Aono,

“Watermarking Three-Dimensional Polygonal Models Through Geometric and Topological Modification,” *IEEE JSAC*, pp. 551-560, 1998.

[2] 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.

[3] O. Benedens, “Geometry-Based Watermarking of 3D Models,” *IEEE CG&A*, pp. 46-55, Jan./Feb. 1999.

[8] T. Kanai, MeshToSS Version 1.0.1, <http://graphics.sfc.keio.ac.jp/MeshToSS/indexE.html>.

표 I. 다양한 공격에 대한 견고성 실험 결과.

| Attacks                     | Number of bin bit error | BEP of bin bit | Number of watermark bit error | BEP of watermark bit |
|-----------------------------|-------------------------|----------------|-------------------------------|----------------------|
| Simplify                    | 28237vertex (78.5%)     | 11             | 0                             | 0%                   |
|                             | 18769vertex (52.2%)     | 23             | 0                             | 0%                   |
|                             | 12157vertex (33.8%)     | 44             | 1                             | 2%                   |
|                             | 6218vertex (17.3%)      | 87             | 8                             | 16%                  |
| Random noise 50%            | 20                      | 6.6%           | 0                             | 0%                   |
| Random noise 100%           | 56                      | 18.67%         | 0                             | 0%                   |
| Cropping                    | 13                      | 5.2%           | 0                             | 0%                   |
| Simplify (52.2%) + Cropping | 38                      | 15.2%          | 1                             | 1%                   |

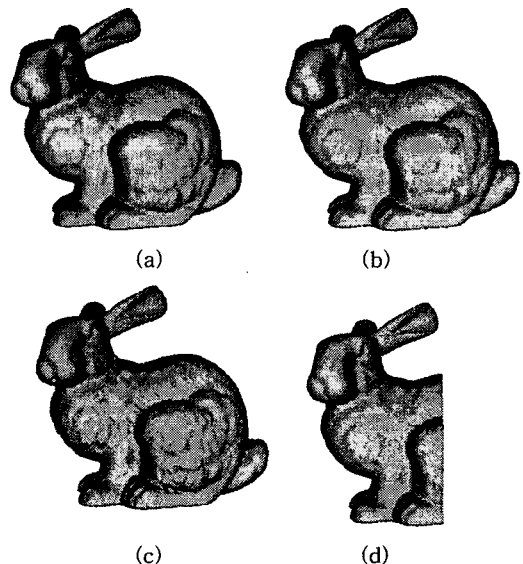


그림 4. 모의 실험에 사용된 (a) Stanford Bunny 모델 및 (b) 제안한 알고리즘에 의하여 워터마크가 삽입된 Stanford Bunny 모델 (c) 꼭지점의 개수를 33.8 %으로 간단화된 모델, (d) 절단된 모델,