

POCS 기반의 3D 메쉬 워터마킹

이석환¹, 김태수¹, 김승진¹, 권성근², 권기룡³, 이권일¹

¹경북대학교 전자전기공학부

²삼성전자 무선통신 R&D 그룹

³부산외국어대학교 전자컴퓨터공학과

3D Mesh Watermarking Based on POCS

Suk-Hwan Lee¹, Tae-Su Kim¹, Seung-Jin Kim¹, Seong-Geun Kwon², Ki-Ryong Kwon³, Kuhn-Il Lee¹

¹School of Electronic and Electrical Engineering, Kyungpook National University

²R&D Group 3, Mobile Communication Division, Samsung Electronics Co., LTD

³Department of Electronic and Computer Engineering, Pusan University of Foreign Studies

요 약

본 논문에서는 POCS 기반의 3D 메쉬 워터마킹 방법을 제안하였다. 제안한 방법에서는 3D 메쉬를 두 가지의 제약 조건 집합으로 수립 조건을 만족할 때까지 반복 투영한다. 이들 집합은 워터마크를 삽입하기 위한 강인성 집합 및 비가시성 집합으로 구성된다. 원 모델없이 워터마크를 추출하기 위하여 제안한 방법에서는 워터마크가 삽입되는 위치 정보 및 결정치를 이용한다. 실험 결과로부터 제안한 방법이 메쉬 간단화, 절단, 아핀 변환, 및 랜덤 잡음 첨가 등의 공격에 우수한 강인성을 가짐을 확인하였다.

1. 서론

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 VRML를 공인하고 있다. 그러나 VRML의 소스 자체가 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^[1].

Ohbuchi 등^[2]은 메쉬 분광 영역 (mesh spectral domain)에서 워터마크를 삽입하였다. 메쉬 분광은 꼭지점의 좌표값을 연결성 정보에 의하여 정의된 라플라스 행렬의 고유 벡터에 투영함으로써 얻어진다. 그러므로 이 방법에서는 메쉬 간단화 (mesh simplification) 및 리메쉬 (remesh) 등의 메쉬 연결성을 바꾸는 공격에 대하여 원 메쉬의 연결성 정보를 찾는 재표본화 (resampling) 과정이 필요하다. Kanai 등^[3]이 제안한 방법에서는 3D 메쉬 모델의 다해상도 웨이블릿 상에서 웨이블릿 계수 벡터에 워터마크를 삽입한다. 그러나 이 방법에서 적용된 웨이블릿 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. Praun 등^[4]은 점차적 메쉬 (progressive mesh) 상에서 각 꼭지점의 스칼라 기저 함수 (scalar basis function) 집합을 구한 후, 메쉬의 법선 벡터 방향에 따라 기저 함수의 가중치에 워터마크를 삽입하는 방법을 제안하였다. 그러나, 이 방법에서는 워터마크 검출시 원 모델의 동일한 기하학적 및 위상학적 특성을 가지는 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 없으므로 삽입된 워터마크 정보가 없어진다. 또한 회전 등과 아핀 변환에서는 원 메쉬의 동일한 EGI 분포를 가지기 위하여 재배열 (realignment) 과정이 필요하다. 이상과 같이 기존 방법들에서는 워터마크 검출시 원 모델이 필요한 재배열 및 재표본화 과정이 수행되는 단점을 가진다.

본 논문에서는 메쉬 간단화, 리메쉬, 및 절단과 같은 공격에 강하면서, 워터마크 검출시 원 모델이 필요 없는 POCS 기반의 메쉬 워터마킹 방법을 제안하였다. 제안한 방법에서는 각 꼭지점 거리를 등간격으로 나눈 후, 꼭지점 밀도가 높은 간격의 표본 평균값에

위터마크를 삽입한다. 이 때, 각 표본 평균값들은 강인성 및 비가시성의 조건을 만족하는 두 가지 제약 집합 상에 반복 투영됨으로써 위터마크 정보에 따라 이동된다. 삽입된 위터마크는 꼭지점 밀도가 높은 간격의 위치 정보 및 각 간격의 위터마크 결정치를 이용하여 원 모델 없이 검출된다.

본 논문에서 제안한 방법의 성능을 평가하기 위한 실험에서 제안한 방법이 매우 간단화, 랜덤 잡음 첨가 및 절단 등의 공격에 대하여 우수한 견고성 및 비가시성을 가짐을 확인할 수 있었다.

2. 제안한 3D 메쉬 위터마크

2.1 위터마크 삽입 개요

본 논문에서는 N 개 꼭지점을 가지는 메쉬가 $N \times 1$ 길이의 벡터라 가정한다. 제안한 방법에서는 먼저 메쉬의 무게 중심을 원점으로 이동하기 위하여 각 꼭지점의 좌표값을 바꾼다. 이는 좌표축 변환 이동된 메쉬에서 기준 원점을 찾은 후에 위터마크를 추출하기 위한 것이다.

변환 이동된 모델의 직각 좌표계를 구 좌표계 (r, θ, ρ) 로 바꾼다. 그리고 모든 r 의 값들은 동일 거리를 가지는 K 개의 구간으로

$$Q(r_j) = \left(\frac{r_j - r_{\min}}{r_{\max} - r_{\min}} \times K + 0.5 \right), \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

와 같이 나누어진다. 여기서 r_{\max} 및 r_{\min} 는 각각 r 의 값들 중 최대값 및 최소값을 나타낸다. 구간의 개수 K 는 삽입되는 위터마크의 길이를 고려하여 결정된다. 각 구간에 표본화된 r 의 평균값 $E_k[r]$, ($r = Q^{-1}(k)$, $0 \leq k < K$)을 구한 후, 꼭지점 밀도가 높은 순으로 각 구간의 순위를 정한다. 제안한 방법에서는 높은 순위를 가지는 구간의 표본 평균값에 N_w 길이의 이진 위터마크를 삽입한다. 즉, k ($0 \leq k < N_w \leq K-1$) 번째 위터마크 w_k 는 k 번째 순위를 가지는 구간의 표본 평균값 $E_k[r]$ 에

$$E'_k[r] = (1 + \alpha R_k) \times E_k[r] \quad (2)$$

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

와 같이 삽입된다. α 는 삽입 강도를 나타낸다.

원 모델 없이 위터마크를 추출하기 위하여 제안한 방법에서는 두 가지의 위터마크 키 정보가 필요하다. 즉, 위터마크가 삽입된 구간의 순위 정보 및 각 구간의 표본 평균값 $E_k[r]$ 이다. 본 논문에서는 $E_k[r]$ 를

간단히 E_k 로 표시하며, 이는 위터마크 삽입시 기준

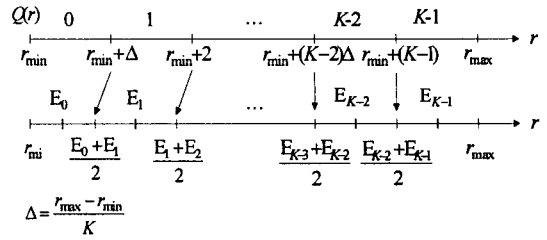


그림 1. 모든 r 이 나누어지는 일정 거리를 가지는 K 개의 구간 및 각 구간의 표본 평균값

값이며, 또한 위터마크 검출을 위한 결정값이다. 그리고 다음 절에 표기되는 $E_k[r]$ 는 블록 집합으로 반복 투영시키기 위하여 매회 계산되는 표본 평균값이다. 각 구간에서의 표본 평균값 E_k 이 그 구간의 중간값이 되도록 그림 1에서와 같이 구간의 크기를 재조정한다.

2.2 블록 집합 및 투영기

2.1 절의 위터마크 삽입 개요에 의하여 두 가지의 닫힌 블록 집합이 정의된다. 첫 번째로는 식 (2)에 의하여 정의된 강인성 블록 집합으로, 이는 전체적 제약 집합이다. 두 번째로는 비가시성 블록 집합으로, 이는 국부적 제약 집합이다. 제안한 방법에서는 메쉬 \mathbf{M} 를 강인성 블록 집합 및 비가시성 블록 집합으로 교대로 반복 투영함으로써, 이들 교집합의 원소인 \mathbf{M}' 을 얻는다. 그러므로 위터마크가 삽입된 메쉬 \mathbf{M}' 은 공격에 강인한 특성을 가지며, 또한 우수한 비가시성을 가진다.

k 번째 순위를 가지는 구간에서의 표본 평균값 $E_k[r]$ 은 k 번째 위터마크 w_k 에 의하여 그림 2에서와

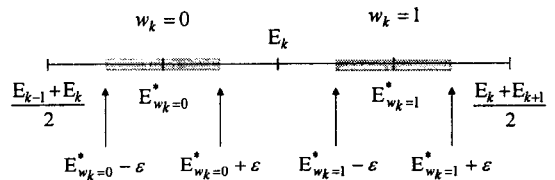


그림 2. k 번째 순위를 가지는 구간에서의 위터마크 삽입

같이 이동된다. w_k 가 1이면, $E_k[r]$ 는 $[E_k, \frac{E_k + E_{k+1}}{2}]$ 의 범위 내에, 그리고 w_k 가 0이면, $E_k[r]$ 는 $[\frac{E_{k-1} + E_k}{2}, E_k]$ 내에 있다. 여기서 $E_k[r]$ 는 공격에 대한 강인성을 갖는 위치에 있어야 한다. 이 위치는 기준되는 평균값 E_k 및 인접한 구

간의 경계의 중간값 $E^*_{w_r}$ 에 근접한 위치이다.

2.3 POCS 기반 워터마크 삽입

메쉬 M 를 본 논문에서 정의된 블록 집합 C_r 및 C_v 집합으로 투영되는 과정은 다음과 같다.

- 1) 초기 벡터 M_0 는 원 메쉬 M 으로 가정한다.
- 2) 매 회 투영되는 벡터 M_n 를 계산한다.

$$M_n = P_v P_r M_{n-1}, n \geq 1$$

3) 제약 조건 $\sum_{k=0}^r \|E'_{k,n} - E'_{k,n-1}\|^2 \approx 0$ 을 만족할 때까지 2) 번을 반복 수행한다. 여기서 $E'_{k,n}$ 및 $E'_{k,n-1}$ 은 각각 M_n 및 M_{n-1} 에서 k 번째 구간에서의 표본 평균값이다. 초기 벡터 M_0 에서 각 구간의 표본 평균값 E_k ($k=1, 2, \dots, N_w$), r_{max} , r_{min} 그리고 워터마크가 삽입된 구간의 위치 정보들은 워터마크 키로서 이용되며, 이들은 워터마크 추출에 필요한 정보이다.

2.4 워터마크추출

좌표축 이동에서는 메쉬의 무게 중심을 기준 원점으로 이동한 후, 워터마크를 추출한다. 스케일링에서는 원 메쉬의 r_{max} 및 r_{min} 을 이용하여 모든 꼭지점들을 이들 다이내믹 영역 $r_{max} - r_{min}$ 으로 r 의 비율을 조정한다. 그리고 제안한 방법에서는 r 의 표본 평균값에 워터마크를 삽입하므로 회전과는 무관하다. 제안한 방법에서는 워터마크 추출시 필요한 정보인 워터마크 삽입된 구간의 위치 정보를 이용하여 기준 원점을 찾는다. 이 정보는 각 구간의 꼭지점 밀도에 따라 순위가 매겨진 정보이다. 먼저, 공격당한 모델의 무게 중심을 기준 원점으로 가정하고, 이 기준 원점에서부터 각 꼭지점의 r' 을 구한다. 그리고 r' 을 $r_{max} - r_{min}$ 으로 비율을 조정한 후에 각 구간으로 표본화한다. 각 구간을 꼭지점 밀도에 따라 순위를 정한 후, 이 순위와 저장된 워터마크 삽입된 구간의 위치 정보의 순위와 비교한다. 이들 순위가 같을 때까지 기준 원점을 이동한다.

이와 같이 재배열 과정이 수행된 후에 공격당한 메쉬에서 워터마크 삽입된 구간의 표본 평균값 E_k 과 저장된 워터마크 결정치 E_k 를

$$w_k = 1, \text{ if } E_k - E_k < 0$$

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

와 같이 비교하여 워터마크를 검출한다.

3. 실험결과

본 실험에서는 Stanford bunny 및 knots 모델의 VRML 데이터^[6]를 사용하였고, 삽입된 워터마크로는 길이가 50인 이진 부호화된 가우시안 랜덤 시퀀스를 사용하였다. 그리고 r 의 표본화 구간을 100개의 구간으로 나뉘었으며, 이들 구간 중 꼭지점 밀도가 높은 50개 구간의 표본 평균값에 워터마크를 삽입하였다. 본 논문에서 제안한 방법에 의하여 워터마크가 삽입된 모델 및 원 모델을 그림 3에서 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 시각적으로는 워터마크의 삽입 여부를 구분하기 어렵다.

제안한 방법의 견고성을 평가하기 위하여 본 실험에서는 워터마크가 삽입된 모델에 메쉬 간단화, 절단, 랜덤 잡음 첨가, 및 아핀 변환 등의 공격을 행하였다. 이에 대한 결과로는 표 1에서와 같이 공격당한 모델에서 검출된 워터마크의 비트 에러율 (Bit error rate, BER)로써 나타내었다.

메쉬 간단화에 대한 실험에서는 MeshToSS^[16]을 이용하여 워터마크 삽입된 모델의 꼭지점 개수를 다양한 비율로 줄였다. 메쉬 간단화에서 %는 원 메쉬의 꼭지점 개수와 간단화된 메쉬의 꼭지점 개수의 비율을 나타낸다.

절단에 대한 실험에서는 직각 좌표계 x 축의 값이 $\max_x/8$ 보다 큰 값을 가지는 모든 꼭지점들을 제거하였다. 이와 같이 절단된 모델들은 그림 4의 (c) 및 (d)와 같으며, 이 모델에서는 55 % 정도의 꼭지점들이 제거되었다.

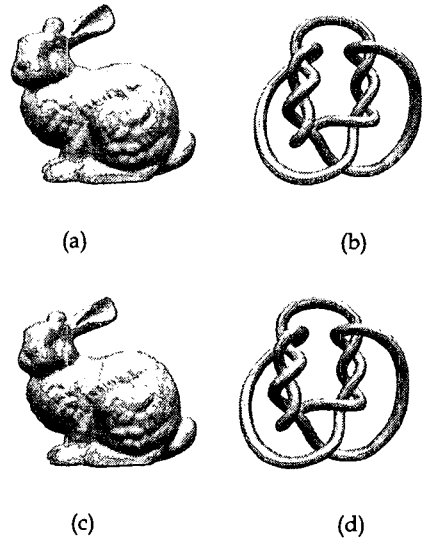


그림 3. 모의 실험에 사용된 (a) Stanford bunny 및 (b) Knots의 모델 그리고 제안한 방법으로 워터마크가 삽입된 (a) Stanford bunny 및 (b) Knots의 모델

랜덤 잡음 첨가에 대한 실험에서는 모든 꼭지점 v 의 각 좌표값을 $v \times (1 + \alpha \times \text{uniform}())$ 로 바꾸었다. 여기서

α 는 변조도이며, *uniform*()는 [-0.5 0.5]의 범위를 가지는 균등한 랜덤 함수이다. 그림 4의 (c) 및 (d)에서와 같이 랜덤 잡음 첨가에서는 메쉬의 연결성이 보존되지만, 꼭지점의 좌표값이 모두 바뀌어지므로 원형상이 변질됨을 볼 수 있다. 이 결과로부터 제안한 방법이 다양한 공격에 대한 우수한 견고성을 가짐을 확인할 수 있었다.

한 비가시성이 우수함을 확인할 수 있었다.

표 I. 다양한 공격에 대한 워터마크의 BER

Test model	Attacks		BER
Stanford bunny (35,947 vertices, 69,451 connectivities)	Mesh simplification	35.28 % (12,684 vertices)	2 %
		21.00 % (7,582 vertices)	10 %
	Vertex randomization ($\alpha=0.02$)		4 %
	Cropping (14,284 vertices)		2 %
	35.28 % mesh simplification + cropping (4,979 vertices)		14 %
35.28 % mesh simplification + cropping + rotation (4,979 vertices)		14 %	
Knots (23,232 vertices, 46,464 connectivities)	Mesh simplification	56.50 % (13,136 vertices)	4 %
		40.00 % (9,316 vertices)	8 %
	Vertex randomization ($\alpha=0.02$)		12 %
	Cropping (10,455 vertices)		0 %
	56.50 % mesh simplification + cropping (6,050 vertices)		10 %
56.50 % mesh simplification + cropping + rotation (6,050 vertices)		10 %	

4. 결론

본 논문에서는 POCS 기반의 3D 메쉬 워터마킹을 제안하였다. 제안한 방법에서는 꼭지점의 거리를 동일 간격의 구간으로 나눈 후에 각 구간을 꼭지점 밀도에 따라 순위를 매긴다. 그리고 이진 워터마크를 순위가 높은 구간의 표본 평균값에 삽입한다. 여기서, 각 표본 평균값들은 강인성 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 검출된다. 본 논문에서 제안한 방법의 성능을 평가하기 위한 실험에서 제안한 방법이 메쉬 간단화, 랜덤 잡음 첨가 및 절단 등의 공격에 대하여 우수한 견고성을 가지며, 또

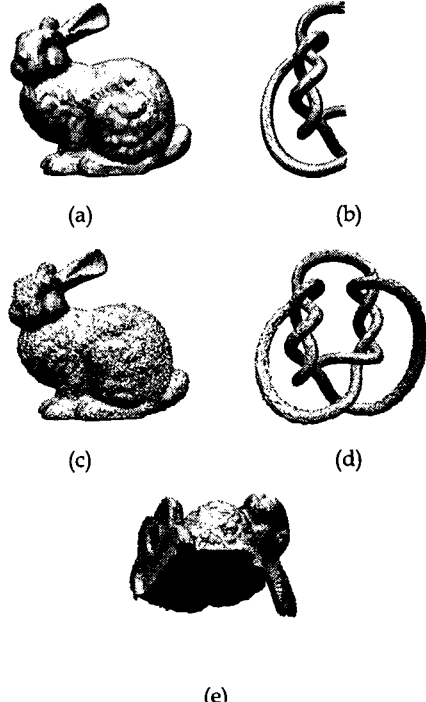


그림 4. (a) 메쉬 간단화에 의하여 35.28 % 간단화된 Stanford bunny, (b) 부분 절단된 Knots 모델, 모든 꼭지점에 랜덤 잡음을 첨가한 (c) Stanford bunny 및 (d) Knots 모델, 그리고 (e) 절단, 35.28 % 간단화, 및 (45°, 45°, 45°)로 회전된 Stanford bunny

Acknowledgment : This work was supported by the Brain Busan 21 Project in 2003.

[참고문헌]

[1] K. Kwon, S. Kwon, S. Lee, T. Kim, and K. Lee, "Watermarking for 3D Polygonal Meshes Using Normal Vector Distributions of Each Patch," IEEE International Conference on Image Processing, Sep, 2003.
 [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] 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.
 [4] E. Praun, H. Hoppe, A. Finkelstein, "Robust Mesh Watermarking," Proc. SIGGRAPH 99, pp. 49-56, 1999.
 [5] O. Benedens, "Geometry-Based Watermarking of 3D Models," IEEE CG&A, pp. 46-55, Jan./Feb. 1999.
 [6] T. Kanai, MeshToSS Version 1.0.1, <http://graphics.sfc.keio.ac.jp/MeshToSS/indexE.html>.