

삼각형 스트립을 이용한 3차원 모델에 대한 연성 워터마킹 방법

이 상 광, 호 요 성, *문 경 애
광주과학기술원, *한국전자통신연구원
전화 : 062-970-2258 / 핸드폰 : 018-450-4054

A Fragile Watermarking Scheme for 3D Polygonal Models Using Triangle Strips

Sang-Kwang Lee, Yo-Sung Ho, *KyungAe Moon
Kwangju Institute of Science and Technology (K-JIST)
*Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI)
E-mail : {sklee, hoyo}@kjist.ac.kr, kmoon@etri.re.kr

Abstract

In this paper, we propose a new fragile watermarking scheme that can be used to verify 3D polygonal models by detecting unauthorized alterations. A binary random sequence generated by a user key is combined with a binary watermark sequence by the bit-wise exclusive OR operation. The watermark signal is embedded into 3D triangle strips by perturbing their vertex coordinates. Experimental results demonstrate that we can detect modifications of the original 3D model: translation, rotation, scaling, randomization of points, polygon simplification, and geometry compression.

I. 서론

멀티미디어 콘텐츠의 디지털 표현은 원본 콘텐츠와 동일한 여러 복사본을 쉽고 널리 배포할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 하지만, 원본과 동일한 형태의 수많은 복사본이 불법적으로 생산될 수 있다는 사실은 콘텐츠 소유권에 대한 심각한 위협이 된다. 워터마킹 기술은 지적 재산을 보호하기 위해 방송 감시, 소유권 증명, 거래 추적, 콘텐츠 인증, 복사 제어, 그리고 기기

제어와 같은 다양한 응용 분야에 적용될 수 있다 [1].

최근 오디오, 정지영상, 동영상과 같은 디지털 콘텐츠의 보호를 위해 다양한 종류의 워터마킹 알고리즘들이 제안되고 있다 [2]. 하지만, CAD (computer-aided design)나 VR (virtual reality)을 위해 사용되는 3차원 모델에 대한 워터마킹 방법은 그다지 큰 관심을 끌지 못하고 있다. 본 논문에서는 3차원 모델의 인증 (authentication)을 위한 연성 워터마킹 (fragile watermarking) 방법을 제안한다.

연성 워터마킹은 원본 데이터가 바뀌었을 지를 검출하기 위한 것으로 다양한 형태의 콘텐츠의 변형에 대한 인증 (authentication)을 가능하게 하며 모든 워터마킹 응용들 중에 가장 낮은 수준의 강인성 (robustness)을 요구한다 [3]. Yeo와 Yeung [4]이 제안한 3차원 모델에 대한 연성 워터마킹 방법은 각 꼭지점 좌표 (vertex coordinates)의 해쉬 함수 (hash function)가 이웃하는 꼭지점들의 중심 (centroid)에 적용되는 또다른 해쉬 함수와 결합하도록 꼭지점을 소량 변화시켜 워터마크를 삽입한다.

본 논문에서는 삼각형 스트립 (triangle strip)을 이용한 3차원 모델의 연성 워터마킹 방법을 제안한다. 3차원 모델 데이터의 인증을 위해 삼각형 스트립 상에 이웃하는 꼭지점 사이의 상관성을 이용하여 워터마크 신호를 삽입하였다. 이는 삼각형 스트립을 이용하는 다양한 응용에서 워터마킹을 효과적으로 적용할 수 있

으며, 이웃하는 꼭지점 사이의 관계를 이용할 수 있다는 두 가지 장점을 가지고 있다. 또한 워터마크 검출 과정에서는 원본 3차원 모델 데이터가 요구되지 않으므로 효과적인 연성 워터마킹 방법으로 적절하다.

II. 워터마크 삽입

그림 1은 제안한 방법의 워터마크 삽입 과정을 나타낸 것이다. 워터마크 삽입 알고리즘은 삼각형 스트립 생성, 그룹화, 워터마크 삽입의 세 단계로 구성되며, 입력은 3차원 모델 데이터, 이진 워터마크 영상, 워터마크 키 값이다.

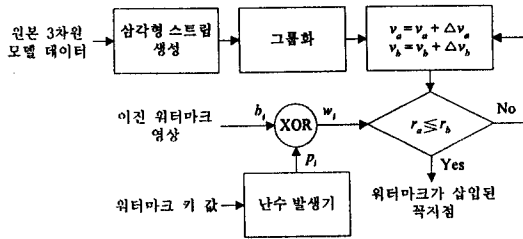


그림 1. 워터마크 삽입 알고리즘

삼각형 스트립은 삼각형 메쉬 (triangle mesh)의 효과적인 렌더링 (rendering)을 위해 이용된다. 즉, 삼각형 메쉬가 단순 명료한 형태로 저장되어 메모리 낭비를 줄일 수 있으며, 렌더링 API에 메쉬를 전송할 때 좀더 적은 대역폭을 사용할 수 있다는 장점을 갖는다.

본 논문에서 제안한 워터마킹 방법에서는, 삼각형 메쉬로 구성된 3차원 모델로부터 삼각형 스트립을 생성한 후 스트립 상에 이웃하는 꼭지점 사이의 상관성을 이용하여 워터마크 신호를 삽입하였다.

3차원 모델에서 서로 연결된 삼각형을 추적하여 스트립을 생성하기 위해서는 모든 면 (face)들 사이의 연결성 정보가 필요하며, 삼각형 스트립 생성의 알고리즘은 다음과 같다 [5].

- 1) 스트립 생성을 시작하기 위한 초기 삼각형 선택
- 2) 스트립을 따라 탐색 (traversing)할 에지 (edge) 방향 선택
- 3) 진행 방향으로 더 이상 연결 (connection)이 없는 삼각형에 도달할 때까지 스트립 확장
- 4) 모든 에지 방향에 대해 2)-3) 과정을 통해 스트립을 생성한 후 가장 길이가 긴 스트립을 선택
- 5) 모든 면을 방문할 때까지 1)-4) 단계를 수행

본 논문에서는 이러한 꼭지점 탐색 과정에서 워터마크를 삽입하여 이웃하는 꼭지점 사이의 상관성을 효과적으로 이용할 수 있도록 삼각형 스트립 상에서 워터마크를 삽입하였다. 이는 연결되어 있는 꼭지점들의 국부적인 특성을 이용할 수 있다는 점에서 분할 (partition) 방법이나 패치 (patch) 방법과 유사한 특성을 갖는다.

그룹화 과정에서는 앞서 생성된 삼각형 스트립에서 이웃하는 꼭지점들을 서로 다른 두 그룹으로 형성한다. 이렇게 나누어진 두 그룹의 꼭지점들은 삽입되는 비트값에 따라 대응하는 관계를 만족할 수 있도록 소량 변경된다.

그룹 A에 속한 꼭지점을 v_a 라 하고, 그와 쌍을 이루는 그룹 B에 속한 꼭지점을 v_b 라 하면, 다음과 같이 꼭지점 좌표 값을 초기값 (seed)으로 하는 난수 함수 (random function)를 이용하여 정보 비트를 삽입할 수 있다.

$$\begin{aligned} s_a &= \text{scal}(v_a); \text{srand}(s_a); r_a = \text{rand}(); \\ s_b &= \text{scal}(v_b); \text{srand}(s_b); r_b = \text{rand}(); \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $\text{scal}()$ 은 부동소수점형의 꼭지점 좌표 값을 부호없는 정수형으로 변환시켜주는 함수이며, $\text{srand}()$ 은 난수 함수인 $\text{rand}()$ 의 초기값을 설정해주는 함수이다. 삽입하고자 하는 비트값에 따라 다음의 조건을 만족하도록 꼭지점 좌표 값을 변경시킨다.

$$\begin{aligned} r_a > r_b &\leftarrow \text{bit '0'} \\ r_a \leq r_b &\leftarrow \text{bit '1'} \end{aligned} \quad (2)$$

삽입 과정은 각 좌표에 개별적으로 수행되며 x -좌표에 삽입될 경우 다음과 같은 순서로 x -좌표 값을 Δx 만큼 이동시켜 꼭지점 좌표 값을 변경하며 식(2)의 조건이 만족될 때까지 Δx 를 증가시키며 반복한다.

$$\begin{aligned} v_a(x, y, z) &\leftarrow (x + \Delta x, y, z) \\ v_a(x, y, z) &\leftarrow (x - \Delta x, y, z) \\ v_b(x, y, z) &\leftarrow (x + \Delta x, y, z) \\ v_b(x, y, z) &\leftarrow (x - \Delta x, y, z) \end{aligned} \quad (3)$$

삽입되는 비트 W 는 다음과 같이 워터마크 키 값에 의해 생성된 비트열 P 와 워터마크 영상 비트열 B 의 배타적 논리합 (exclusive OR) 연산을 통해 만들어지며 각 비트열의 크기는 B 의 크기에 해당되는 $M \times N$ 이 된다.

$$w_i = p_i \oplus b_i \text{ for } i=0, 1, \dots, M \times N - 1 \quad (4)$$

여기서 \oplus 는 배타적 논리합을 나타내며, w_i, p_i, b_i 는 각각 W, P, B 에 속해 있는 i -번째 성분을 나타낸다.

III. 워터마크 검출

그림 2는 워터마크 검출 방법을 보여준다. 입력은 워터마크가 삽입된 3차원 모델 데이터, 워터마크 키 값이며, 앞서 설명한 삽입 알고리즘과 유사한 과정을 포함한다.

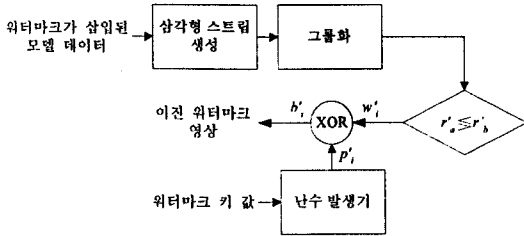


그림 2. 워터마크 검출 알고리즘

이진 워터마크 영상을 복원하기 위해 먼저 워터마크가 삽입된 모델로부터 삼각형 스트립을 생성한다. 워터마크 삽입 과정에서는 원본 모델 데이터의 꼭지점 좌표값만이 변경되고 연결성 정보는 그대로 유지되기 때문에 워터마크가 삽입된 모델로부터 원본 모델과 동일한 삼각형 스트립을 생성할 수 있다. 삼각형 스트립의 꼭지점들은 워터마크 삽입 과정에서의 동일한 방법으로 그룹화되며, 그룹간에 쌍을 이루는 각각의 꼭지점 좌표값을 초기값으로 하는 난수 함수값 r'_a 와 r'_b 에 따라 다음과 같은 방법으로 삽입된 비트를 검출하게 된다.

$$\begin{aligned} \text{bit '0'} &\leftarrow r'_a > r'_b \\ \text{bit '1'} &\leftarrow r'_a \leq r'_b \end{aligned} \quad (5)$$

이진 워터마크 영상 B 를 복원하기 위해 검출된 비트열 W 과 워터마크 키 값에 의해 생성된 비트열 P 와의 배타적 논리합 연산을 수행한다.

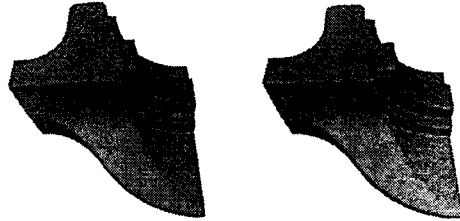
$$b_i = p_i \oplus w_i \text{ for } i=0, 1, \dots, M \times N - 1 \quad (6)$$

여기서 b_i 와 w_i 는 각각 B 와 W 에 속해 있는 i -번째 성분을 나타낸다.

IV. 실험 결과

본 논문에서 제안한 연성 워터마킹 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 6475 개의 꼭지점과 12946 개의 면을 갖는 Fandisk 모델에 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 3은 Fandisk 모델과 워터마크 삽입 과정에서 사용되는 Δx 를 0.00001로 설정하여 그림 4의

64×32 크기의 이진 워터마크 영상을 삽입한 결과를 보여주고 있다. 그림 3에서 보듯이 워터마크 삽입 과정에서 꼭지점 좌표값의 변동이 적어 원본 모델과 결과 모델을 시각적으로 구별하기 어렵다.



(a) Fandisk 모델 (b) 삽입 결과 모델

그림 3. 워터마크가 삽입된 결과 ($\Delta x=0.00001$)



그림 4. 64×32 크기의 이진 워터마크 영상

원본 모델과 워터마크가 삽입된 모델의 차이를 정량적으로 측정하기 위해 MESH (measuring error between surfaces using the Hausdorff distance) [6]를 사용하였다. MESH는 Hausdorff 거리를 이용하여 최대 오류, 평균 오류, 평균제곱근 (root mean square, RMS) 오류를 계산하기 위해 삼각형들을 정규격자 (regular grid) 구조로 만들기 위해 표본화 과정을 수행한다. 표본화 간격은 측정 거리의 정확도에 중요한 역할을 하며 바운딩 박스 (bounding box)의 대각선 길이에 0.5%나 0.4% 아래의 값이 적절하다.

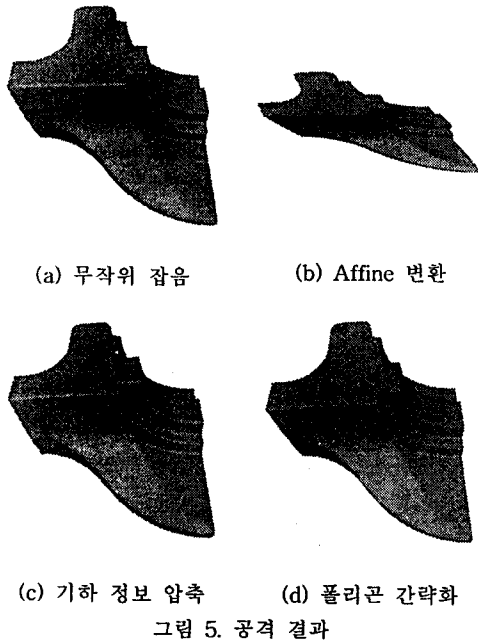
표 1은 표본화 간격에 따른 그림 3(a)의 원본 모델에서 그림 3(b)의 워터마크가 삽입된 모델로의 RMS 오류값을 보여주고 있다.

표 1. MESH를 통해 계산된 RMS 오류값 ($\times 10^{-3}$)

표본화 간격 (%)	0.002	0.05	0.1	0.5	1
RMS 오류값	2.8065	2.6824	2.6823	3.0873	3.1184

다양한 공격에 대한 결과를 살펴보기 위해 워터마크가 삽입된 모델에 그림 5와 같이 무작위 잡음 첨가 (additive random noise), affine 변환, 기하정보 압축 (geometry compression), 폴리곤 간략화 (polygon

simplification)를 고려하여 실험하였다. 무작위 잡음 첨가는 좌표값들의 바운딩 박스를 구한 후, 그 최대값과 변위값의 비율을 0.2 %로 하여 수행하였다. Affine 변환은 3차원 모델의 일부 축의 좌표값들을 축소, 확대, 쉬어링 (shearing)하였다. 기하정보 압축은 MPEG-4 SNHC 표준의 기하정보 부호화 [7]를 이용했으며, geometry.quant는 9로, color.quant, normal.quant, texture.quant는 각각 1로 설정하여 압축하였다. 마지막으로 폴리곤 간략화는 12956 개의 면을 10000 개로 간략화하였다.



실험 결과는 제안한 워터마킹 알고리즘이 키 값이 잘못되었는지, 워터마크가 삽입되어 있는지, 또는 3차원 모델 데이터가 공격받았는지를 검출할 수 있다는 것을 보여준다. 그림 6(b)에서 볼 수 있듯이, 잘못된 워터마크 키를 사용하거나 그림 5의 공격들에 대해서는 잡음과 같은 형태의 워터마크가 검출되며 공격받지 않았을 때는 그림 6(a)와 같이 올바른 이진 워터마크 영상이 검출된다.



V. 결론

본 논문에서는 3차원 모델 데이터의 불법적인 변조를 검출할 수 있는 새로운 방법의 연성 워터마킹 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 워터마크 삽입과 검출이 삼각형 스트립 생성 과정에서 수행되기 때문에 삼각형 스트립을 이용한 여러 가지 응용들에 효과적이며, 서로 연결된 꼭지점들의 국부적인 특성을 이용할 수 있다는 장점을 갖는다. 또한 워터마크 삽입 과정에서 꼭지점 좌표값의 변동이 적어 원본 모델과 결과 모델을 시각적으로 구별하기 어렵다. 컴퓨터 모의 실험을 통해, 제안한 워터마킹 방법이 다양한 공격을 검출할 수 있다는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 광주과학기술원 (K-JIST) 초고속광네트워크 연구센터 (UFON)를 통한 한국과학재단 우수연구센터 (ERC)와 교육부 두뇌한국21 (BK21) 정보기술사업단의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- [1] I. Cox, M. Miller and J. Bloom, Digital watermarking, Morgan Kaufmann Pub., 2001.
- [2] C. Podilchuk and E. Delp, "Digital watermarking: algorithms and applications," IEEE Signal Processing Magazine, vol. 18, pp. 33-46, 2001.
- [3] S. Katzenbeisser and F. Petitcolas, Information hiding techniques for steganography and digital watermarking, Artech House, 2000.
- [4] M. Yeung and B. Yeo, "Fagile watermarking of three-dimensional object," Proc. ICIP, vol. 2, pp. 442-446, 1998.
- [5] P. Terdiman, "Creating efficient triangle strips," <http://codercorner.com/Strips.htm>.
- [6] N. Aspert, D. Santa-Cruz and T. Ebrahimi, "MESH: Measuring Error between Surfaces using the Hausdorff distance," <http://mesh.epfl.ch>.
- [7] ISO/IEC 14496-2, Coding of Audio-Visual Objects: Visual (MPEG-4 video), Committee Draft, Oct. 1997.