

論文2003-40CI-3-4

# DCT 영역에서 3차원 다각형 메쉬 모델의 디지털 워터마킹 방법

## (Digital Watermarking for Three-Dimensional Polygonal Mesh Models in the DCT Framework)

金正熙\*, 扈堯盛\*

(Jeong-Hee Jeon and Yo-Sung Ho)

## 요약

워터마킹 기술 중에 공간 영역을 주파수 영역으로 변환하여 워터마크 신호를 삽입하는 이유는 워터마크를 삭제하려는 악의적인 공격에 대해 살아 남을 수 있고 인간이 삽입되는 워터마크 신호를 쉽게 인지할 수 없는 주파수 대역을 고려할 수 있기 때문이다. 그러나 3차원 데이터의 비정규성(irregularity)으로 인하여 공간영역의 3차원 데이터를 주파수 영역으로 자연스럽게 변환한다는 것은 쉽지 않다. 본 논문에서는 3차원 메쉬(mesh) 데이터를 주파수 영역으로 변환하여 수행하는 새로운 워터마킹 방법을 제안한다. 이를 위해 우선 3차원 모델을 운행(traversing)하여 삼각형 스트립을 생성하고, 각 스트립에 속한 꼭지점 좌표들을 각 좌표축에 따라 독립적으로 1차원 DCT 변환한다. 그리고 쉽게 인지되지 않으면서도 불법적인 공격으로부터 워터마크 신호가 살아남기 위해 AC 계수의 중간 주파수 대역에 워터마크 신호를 삽입한다. 마지막으로, 컴퓨터 실험을 통해 제안한 3차원 데이터 워터마킹 방법은 무작위 잡음 첨가 공격이나 Affine 변환, 그리고 MPEG-4 SNHC의 표준 기하 압축에 강인하다는 것을 보였다.

## Abstract

Most watermarking techniques insert watermarks into transform coefficients in the frequency domain because we can consider robust or imperceptible frequency bands against malicious attacks to remove them. However, parameterization of 3-D data is not easy because of irregular attribution of connectivity information, while 1-D or 2-D data is regular. In this paper, we propose a new watermarking scheme for 3-D polygonal mesh models in the DCT domain. After we generate triangle strips by traversing the 3-D model and transform its vertex coordinates into the DCT domain, watermark signals are inserted into mid-frequency bands of AC coefficients for robustness and imperceptibility. We demonstrate that our scheme is robust against additive random noise, the affine transformation, and geometry compression by the MPEG-4 SNHC standard.

**Keywords**: 저작권보호, 워터마킹, DCT 변환, 3차원 모델, 삼각형 스트립(triangle strip)

## 1. 서론

근래에 들어, 디지털 멀티미디어 데이터 처리 기술은

양적으로나 질적인 면에서 비약적인 발전을 이루었다. 그러나 멀티미디어 데이터의 디지털 표현은 원본과 동일한 데이터의 복사본을 불법적으로 대량으로 유통시킬 수 있기 때문에 저작권 보호 차원에서 심각한 위협이 되고 있다.

\* 正會員, 光州科學技術院 情報通信工學科  
(Kwangju Institute of Science and Technology, Dept. of Information and Communications)

接受日字:2003年2月1日, 수정완료일:2003年4月22日

불법적인 저작권 침해 문제를 기술적으로 근절시킬

수 있는 방안으로 현재 가장 각광을 받고 있는 분야가 암호화(security)와 워터마킹(watermarking) 기술이다. 그러나 암호화 기술은 근본적으로 불법 복제된 저작물의 재생이 불가능하기 때문에 불법적인 복제 행위 자체를 억제시키는 역할을 하지만, 디지털 이미지 획득(capturing)이나 오디오 녹음 등에 의해 쉽게 해킹될 수 있기 때문에 완벽한 대비책이 되지 못한다. 이에 반해, 워터마킹 기술은 소유권자의 동의가 없는 불법복제를 방지하고 소유권을 효과적으로 보호할 수 있기 때문에 현재 많은 연구가 진행되고 있다.

워터마킹 기술의 응용분야는 소유권 증명이나 방송 감시, 콘텐츠 인증, 복사제어 또는 거래추적 등의 분야에 다양하게 응용될 수 있다. 그러나 가상현실(VR: Virtual Reality)과 CAD(Computer Aided Design)와 관련된 3차원 데이터에 대한 워터마킹 기술은 아직 초보적인 단계에 머물러 있다. 그 주된 이유 중에 하나는 규칙적인(regular) 음성이나 영상 데이터와 달리 3차원 데이터는 불규칙적인(irregular) 성질을 갖고 있기 때문에 주파수 영역으로 자연스러운 매개화(parameterization)가 쉽지 않다<sup>[1]</sup>.

일반적으로 1차원 또는 2차원 데이터에 대한 워터마킹 기술은 대부분 주파수로 변환된 영역에서 워터마크를 삽입한다. 그 이유는 신호의 강인성과 비가시성을 공간영역의 워터마크 삽입보다 더 용이하게 고려할 수 있기 때문이다.

3차원 모델에 대한 워터마킹 기술을 개발하는데 두 번째 장애물은 3차원 모델에 삽입한 워터마크 신호를 고의적으로 혹은 무의식적으로 삭제하거나 조작하는 악의적인 공격, 특히, 3차원 데이터의 연결성 정보에 대한 공격에 매우 취약한 특징을 갖고 있다<sup>[1]</sup>. 연결성 정보는 3차원 그래픽 데이터를 표현하기 위해 꼭지점 좌표값들과 함께 반드시 필요하지만, 3차원 데이터의 연결성 정보를 단순화(simplification)하거나 변경하는 공격에 대해 매우 민감하게 반응한다.

본 논문에서는 연결성 정보에 대한 공격을 고려하지 않고, 단지, 변환 영역에서 3차원 메쉬 모델의 워터마킹 방법만을 고려한다. II장에서는 3차원 데이터 워터마킹 기술과 관련된 기존 논문들을 간략하게 살펴보고, III장에서 새로운 3차원 데이터 워터마킹 방법을 제안한다. 그리고 IV장에서 제안한 방법에 대한 성능을 컴퓨터 모의 실험을 통해 입증한 다음, V장에서 결론 및 향후 과제를 기술한다.

## II. 3차원 데이터 워터마킹의 기존연구

3차원 모델에 대한 워터마킹은 1차원이나 2차원 워터마킹 방법과 마찬가지로 워터마크 신호의 강인성(robustness)과 비가시성(imperceptibility) 그리고 수용량(capacity)을 고려해야 한다. 그러나 1차원이나 2차원 워터마킹 방법과 달리, 삽입하려는 워터마크 신호의 목표가 화소값이나 음성 신호가 아니라, 꼭지점의 좌표값, 법선 벡터, 또는 표면 색상 등과 같이 기하학적 요소(geometry components)가 된다.

일본 IBM 연구소의 Ohbuchi<sup>[2]</sup>는 이런 3차원 메쉬 모델에 대한 워터마킹 방법을 최초로 제안하였다. 그는 논문에서 기하요소나 위상(topology) 요소들을 변경하는 TSQ(Triangle Similarity Quadruple Embedding), TVR(Tetrahedral Volume Ratio Embedding), 그리고 MDP(Mesh Density Pattern Embedding)라는 방법을 사용하여 의미있는 문자열과 패턴을 공간영역에서 은닉하는 방식을 제안했다.

Kanai는 3차원 메쉬 모델을 다중해상도로 표현하기 위한 웨이블릿(wavelet) 계수에 워터마크 신호를 삽입하는 방법을 발표했다<sup>[3]</sup>. 이 논문이 변환 영역에서 워터마크 신호를 삽입한 최초의 논문이지만, 하나의 꼭지점과 연결된 이웃이 언제나 일정해야 한다는 한계를 갖고 있다. Yeung와 Yeo는 원본 데이터가 변경되었는지를 검출하기 위한 연성(fragile) 워터마킹 방법을 발표했다<sup>[4]</sup>, Praun은 기존 방법에서 흔히 사용되는 확산 스펙트럼(spread spectrum) 기술을 3차원 메쉬 모델에 적용한 삼각형 메쉬 워터마킹 방법을 제안했다<sup>[1]</sup>.

Benedens는 각 표면에 대한 정규 벡터(normal vector)를 단위 구(sphere)에 투영한 다음 비슷한 값들끼리 그룹화시켜 워터마킹했다<sup>[5]</sup>. 또한, Yin<sup>[6]</sup>은 Guskov<sup>[7]</sup>의 메쉬에 대한 다중해상도 신호처리 방법을 이용해 Burt-Adelson 피라미드를 만들어 적절한 성긴(coarse) 해상도에 워터마크 정보를 삽입하는 워터마킹 방법을 제안했다.

최초의 제안자인 Ohbuchi는 메쉬의 연결성 정보를 이용해 Kirchhoff 행렬을 만든 다음, 고유벡터(eigen-vector)와 고유치(eigenvalue)를 계산했다. 그리고 각 꼭지점 좌표를 정규화된 고유벡터 집합으로 투영시켜 주파수 영역(spectral domain)으로 변환시킨 후 워터마크 신호를 삽입하는 새로운 알고리즘을 제안했으며, 최

근에 이를 다시 개선시킨 방법을 발표했다<sup>[8]</sup>. 그러나 위 방법들은 JPEG이나 MPEG 영상압축 방식에서 흔히 이용되는 DCT(Discrete Cosine Transform) 영역과는 다른 변환영역을 사용하거나 공간영역에서의 워터마킹 기법들이다. 본 논문에서는 기존의 DCT 변환을 3차원 모델에 적용시킨 새로운 3차원 모델 워터마킹 방법을 제안한다<sup>[13]</sup>.

### III. 3차원 다각형 메쉬 모델의 워터마킹

본 논문에서 제안하는 워터마킹 방법은, 크게 삼각형 스트립 생성과 DCT 및 IDCT(Inverse DCT) 변환, 그리고 워터마크의 삽입 및 추출 부분으로 나뉘어진다. <그림 1>은 이에 대한 간략한 도해이다.

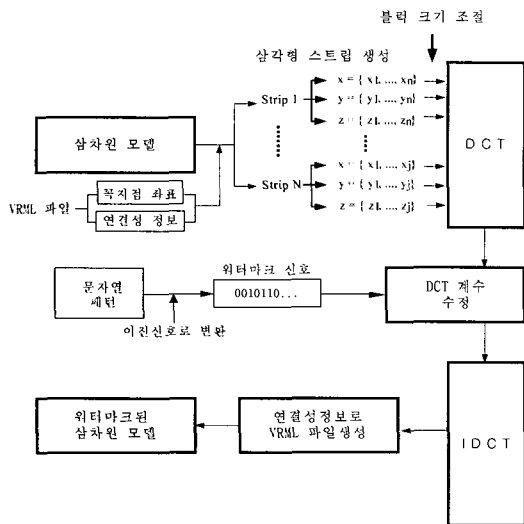


그림 1. 3차원 다각형 메쉬 모델 워터마킹 방법  
Fig. 1. Watermarking scheme for three-dimensional mesh models.

따라서 3차원 메쉬 모델에 워터마크 신호를 삽입하기 위해 우선 3차원 모델의 꼭지점과 연결성 정보를 이용해 모델을 표현하고, 그 모델로부터 삼각형 스트립을 만들어, 각 스트립에 포함된 꼭지점의 집합을 각 좌표축에 대해 독립적으로 DCT 변환한다. 이렇게 변환된 DCT 계수의 일부 주파수 대역에 워터마크를 삽입한 후, IDCT 변환해 워터마크가 삽입된 모델을 생성한다.

#### 1. 삼각형 스트립(triangle strips) 생성

일반적으로 대량의 데이터를 갖는 3차원 메쉬 모델을 삼각형 스트립으로 만들어 렌더링(rendering)하게

되면, 보다 빠르고 명료한 형태로 데이터를 처리하고 저장할 수 있기 때문에 삼각형 스트립 기술을 렌더링 하는데 많이 이용한다. 여기서 삼각형 스트립이란, <그림 2>에 보인 것과 같이, 공유된 꼭지점의 인덱스(index) 목록을 말한다.

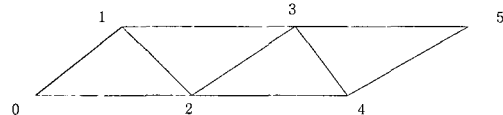


그림 2. 단순한 삼각형 메쉬  
Fig. 2. Simple triangle mesh.

<그림 2>에서 삼각형 012, 123, 234, 345로 이루어진 삼각형 메쉬를 따로따로 처리하게 되면 시간과 저장공간 측면에서 효율성이 떨어지기 때문에 012345라는 삼각형 스트립을 만들어 데이터를 처리한다. 그러나 임의의 삼각형 메쉬로부터 삼각형 스트립을 만들기 위한 방법은 유일하지 않다<sup>[9]</sup>.

따라서 본 논문에서는 Terdiman이 고안한 삼각형 스트립 생성 방법을 이용한다<sup>[10]</sup>. 그의 방법은 삼각형 스트립을 만들기 위해 이웃하는 다른 삼각형들과 가장 적게 연결된 삼각형을 초기 삼각형으로 선택하여 세계의 에지 방향으로 각각의 스트립을 구성한다. 만일, 출발했던 면으로 다시 연결되거나 메쉬의 경계 부분에 이르러 더 이상 진행할 수 없는 경우에는 스트립 생성을 멈추고 만들어진 세 개의 스트립 중 가장 긴 인덱스를 갖고 있는 스트립을 선택한다. 그리고 가능한 모든 스트립을 생성하기 위해 스트립을 뒤집어 반대 방향에서도 확장시켜 본다. 따라서 한쪽 방향으로 스트립을 연결해 가다가 더 이상 연결할 수 없는 면에 도달하더라도 진행했던 스트립을 따라 다시 돌아와 연결성이 존재하는 다른 면으로 스트립을 만든다.

<그림 1>에 나타난 것과 같이, 3차원 메쉬 모델을 표현하기 위해 VRML 파일의 연결성 정보와 꼭지점 좌표들을 이용한다. 이런 방식으로 표현되는 3차원 모델을 앞에서 설명한 방식대로 운행(traversing)하여 삼각형 스트립들을 생성한다. 이때 생성되는 각 스트립에 포함되는 꼭지점들의 개수는 각기 다를 수 있으며, 또한 모델에 따라 스트립의 개수도 다를 수 있다. 따라서 한 개의 3차원 모델에 대해 다양한 형태와 크기를 갖는 스트립들이 생성되므로 워터마킹 측면에서 볼 때 몇 가지 중요한 특징을 갖는다. 첫째, 삼각형 스트립이

만들어지는 시작면이 모델의 연결 정보에 따라 결정되므로 스트립 생성과정을 모르는 사용자는 인덱스 목록을 추정하기가 힘들다. 이것은 정보은닉(information hiding)이라는 워터마킹의 개념과 잘 부합된다. 둘째, 삼각형 스트립들이 모여 한 개의 모델을 구성하므로 각 스트립은 일부 3차원 워터마킹 알고리즘에서 워터마크 신호의 강인성을 높이기 위해 사용하는 지역분할(partition)이나 지역패치(patch)<sup>[8]</sup>의 개념과 유사한 의미를 갖게 되어 보다 강건한 워터마킹이 가능하게 된다. 셋째, 여러 개의 삼각형 스트립들에 워터마크를 독립적으로 삽입하게 되면 확산 스펙트럼을 이용한 워터마킹 방법과 같이 워터마크 신호를 반복해서 삽입하는 효과가 발생된다. 이런 세 가지 이유 때문에 우리는 위와 같은 형태의 삼각형 스트립을 이용한다.

2. DCT 및 IDCT 변환

삼각형 스트립을 이용해 DCT 변환을 하는 기본 개념은 메쉬 압축 분야에서 먼저 제안되었다<sup>[11]</sup>. 초기 삼각형을 무작위로 선택한 뒤, 시계방향으로 이웃하는 꼭지점을 따라 메쉬를 운행하여 3차원 모델을 길게 연결된 한 개의 삼각형 스트립으로 만든다. 그리고 스트립을 적절한 크기의 블록(block)으로 분할하여 DCT 변환을 수행한 다음, 고주파 영역을 제거하는 방식으로 3차원 메쉬를 압축하였다. 그러나 본 논문의 삼각형 스트립은 이와는 달리 임의의 3차원 모델을 통해 만들어지는 스트립의 개수가 여러 개가 될 수 있다.

<그림 3>과 같이, DCT 변환을 위한 블록의 크기(block size)를 패딩(padding)을 통해 조절한 후에 DCT 변환을 수행한다. 즉, 스트립의 마지막 AC 계수를 덧붙이는 방식으로 블록크기를 조절한 후, 아래의 DCT 및 IDCT 변환식 (1)과 식 (2)를 이용해 각 좌표축마다 독립적으로 DCT 계수를 계산한다.

$$DCT: X(k) = \sqrt{\frac{2}{N}} C_k \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cos\left[\frac{(2n+1)k\pi}{2N}\right] \quad (1)$$

$$IDCT: x(n) = \sqrt{\frac{2}{N}} C_k \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \cos\left[\frac{(2n+1)k\pi}{2N}\right] \quad (2)$$

여기서

$$C_k = \begin{cases} 1/\sqrt{2}, & k=0 \\ 1, & k \neq 0 \end{cases}$$

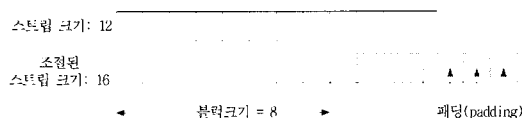


그림 3. 스트립의 블록 크기 조절

Fig. 3. Adjustment of block size for triangle strips.

이고,  $k=0, \dots, N-1$  이고  $n=0, \dots, N-1$  이다. 식 (1)과 식 (2)를 각 x, y, z축에 적용하여 변환한다.

3. 워터마크의 삽입 및 추출

대부분의 워터마킹 기법들이 변환영역에서 워터마크 신호를 삽입하거나 추출하는 주된 이유는 워터마크 신호의 강인성과 비지각성을 고려하기가 공간영역보다 더 용이하기 때문이다. 따라서 제안하는 워터마킹 방법은 메쉬 기하 압축 등과 같은 공격에 강인하면서도 모델의 외형적인 변화가 눈에 거의 띄지 않은 AC 계수의 중간 주파수 대역을 선정하여 워터마크 신호를 삽입한다. 일반적으로 AC 계수의 고주파 대역은 압축 공격에 매우 취약하고, 저주파 대역은 3차원 모델의 기본적인 외관에 심대한 영향을 줄 수 있는 대역이다.

본 논문에서 제안하는 3차원 메쉬 모델 워터마킹 방법은 기본적으로 Hartung의 확산 스펙트럼 방식과 비슷하다<sup>[12]</sup>. 일반적으로 워터마킹 기술에서 삽입할 워터마크는 회사의 로고나 심볼 영상, 문자열, 난수 등을 이용한다. 본 논문에서는 사용자가 만든 임의의 의미있는 문자열을 최대 5글자까지 사용자로부터 입력받아 7비트의 이진 ASCII 코드로 변환시킨 후, 그 이진 신호를 워터마크 신호로 이용한다. 이런 워터마크 신호를  $a$ 라고 하면,

$$a = (a_1, \dots, a_m) \quad a_j \in \{0, 1\} \quad (3)$$

식 (3)에 있는 원 신호를 식 (4)와 같이 전 지역에 골고루 퍼지도록 넓은 대역으로 확산시킨다.

$$b_i = a_j, \quad j \cdot c \leq i < (j+1) \cdot c \quad (4)$$

여기서  $c$ 는 반복계수(chip rate)다. 신호  $b_i$ 는 0 또는 1이므로 식 (5)를 이용하여 부호(sign), 즉, -1 또는 1의 값을 가지는  $b_i'$ 로 바꾼다.

$$b_i' = 2b_i - 1 \quad (5)$$

이렇게 만들어진 워터마크 신호  $b_i'$ 를 DCT 변환에 의해 산출된 DC 계수와 AC 계수들 중에 우리는 AC 계수의 중간 주파수 대역에 x, y, z축을 따라 각각 독립적으로 식 (6)과 같이 워터마크 신호를 삽입한다.

$$\overline{W}_{x,j} = W_{x,i} + b_i' \cdot p_i \cdot \alpha \quad (6)$$

여기서  $W_{x,i}$ 는 x좌표 중에  $i$  번째 DCT 계수로서 워터마크 신호가 아직 삽입되지 않는 원래의 계수이고,  $W_{x,i}$ 는 워터마크가 삽입된 계수를 말한다. 그리고  $p_i$ 는 시작값(seed)에 의해 생성된 의사잡음시퀀스 PRNS (Pseudo-Random Number Sequence)이고,  $\alpha$ 는 워터마크 신호의 변조강도(modulation amplitude)이다. 이때, AC 계수들 중에 중간주파수(midrange frequency) 성분은 아래 식 (7)에 의해 결정된다.

$$midrange = [Min, Max] \quad (7)$$

여기서  $Min$ 과  $Max$ 는 각각 식 (8)과 식 (9)와 같다.

$$Min = \left( \frac{BlockSize}{2} \right) / 2 \quad (8)$$

$$Max = Min + \left( \frac{BlockSize}{2} \right) \quad (9)$$

그러므로 식 (7)을 이용하여 워터마크 신호가 삽입될 중간 주파수 대역의 계수들을 결정한 다음, 식 (6)으로 원래의 계수 값을 약간 변경하는 방식으로 워터마크가 삽입된다. y축이나 z축 좌표의 AC 계수 값에 대해서도 역시 동일한 방식으로 워터마크를 삽입한다. 결국,  $W_{x,i}$ 는 식 (2)에 의해 역 DCT 변환하여 표현하면, 워터마크가 삽입된 모델이 된다.

워터마크 신호의 추출과정은 지금까지 살펴봤던 워터마크 신호의 삽입과정과 매우 비슷하다. 본 논문의 워터마크 추출 방법은 워터마크 신호가 삽입되지 않는 원래의 모델을 필요로 한다. 즉, 원 모델과 워터마크가 삽입된 모델 또는 악의적인 공격을 받은 모델을 각각 DCT 변환하여 식 (10)과 같이 중간 주파수 대역의 계수를 서로 비교해 워터마크 신호를 추출함으로써 삽입한 워터마크 신호를 확인하는 방식이다.

$$b_i' = (\overline{W}_{x,i} - W_{x,i}) \cdot p_i \quad (10)$$

여기서 추출한 신호  $b_i'$ 는 식 (5)를 이용해  $b_i$ 로 바꾸고 식 (4)를 통해  $a_j$  신호로 변환한다.  $a_j$ 는 이진 비트 집합으로써 ASCII 코드를 이용하여 문자열로 표현하면 사용자가 삽입한 워터마크 신호를 위해 만든 문자열인지 확인할 수 있다.

#### IV. 모의 실험 및 고찰

본 논문에서 제안한 워터마킹 방법의 강인성을 평가하기 위해서 워터마크가 삽입된 3차원 다각형 메쉬 모델에 세 가지 형태의 공격을 가한 후 삽입한 워터마크가 여전히 살아남을 수 있는지를 모의 실험했다. 즉, 워터마크가 삽입된 메쉬 모델을 무작위 잡음첨가, Affine 변환, 그리고 MPEG-4 표준 기하압축(geometry compression) 처리를 이용해 공격하였다.

본 모의 실험을 위해 2521개의 꼭지점과 5030개의 면(face)으로 이루어진 베토벤 모델을 사용하였다. DCT 변환을 위해 사용한 블록의 크기는 8이고, 반복계수는 1이며, 워터마크 신호는 소유권을 주장할 수 있는 의미 있는 문자열인 "K-JIST"를 3차원 모델에 반복해서 삽입하였다.

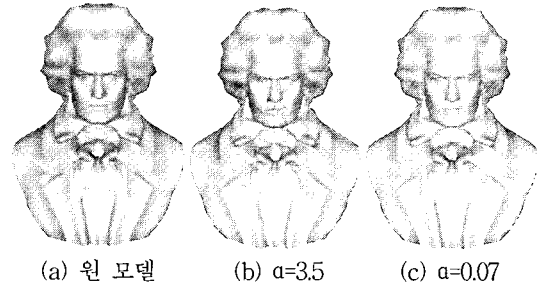


그림 4. 베토벤 모델의 워터마킹  
Fig. 4. The watermarked models.

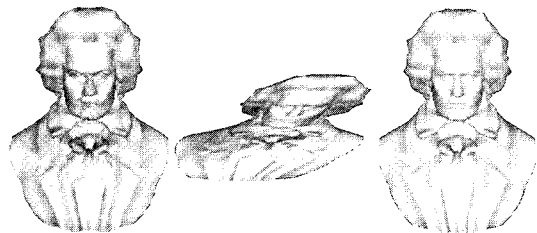


그림 5. 다양한 공격  
Fig. 5. Attacks of the watermarked model.

<그림 4>는 원래의 베토벤 모델과  $\alpha$ 에 따라 변화된 3차원 모델의 외관을 볼 수 있다.  $\alpha$ 를 크게 하면 삽입한 워터마크 신호를 추출하기가 용이하지만, <그림 4(b)>와 같이 모델의 외관 특히, 입과 코 주변이 변형된다. 그러나 <그림 4(c)>와 같이  $\alpha$ 를 작게 하면, 비직각성이 좋아지지만 삽입한 워터마크 신호를 추출하기 어려워진다. <그림 5>는 워터마크 신호가 첨가된 베토벤 모델에 Affine 변환과 무작위 잡음첨가, 그리고 MPEG-4 SNHC 압축 공격을 한 결과이다.

무작위로 잡음을 첨가하는 방법은 먼저 모델의 외곽 박스(bounding box)를 찾고, 가장 큰 변위(displacement) 값과 외곽 박스의 최대 값과의 비율(%)을 계산한다. 그리고 계산된 범위 내에서 의사잡음 시퀀스, PRNS를 좌표 값에 첨가시킨다.

<그림 5(a)>는 0.85% 정도 잡음을 첨가한 결과 모델이다. Affine 변환 공격은 임의의 한 축에 대한 좌표 값들을 확대시키고, 다른 축의 좌표 값들은 축소시켰으며, 또한 쉬어링(shearing)을 적용했다. 마지막으로, <그림 5(c)>와 같이 MPEG-4 기하압축 기술을 워터마크가 삽입된 베토벤 모델을 공격하는데 이용했다. 이와 같은 다양한 공격을 받은 베토벤 모델로부터 워터마크를 추출한 모의 실험결과를 <표 1>에 정리했다.

<표 1>에서 삽입 또는 추출된 문자열의 개수란 "K-JIST"라는 문자열을 완벽하게 베토벤 모델에 삽입하고 추출한 회수를 말한다. 기본적으로 모델의 외관이

손상되지 않는 범위 내에서 잡음을 첨가시켰다.

<표 1>의 실험 결과에서 무작위 잡음 첨가 공격에 의한 워터마크 신호의 강인성 여부를 살펴보면, 먼저 삽입 강도  $\alpha$  값에 많은 영향을 받고 있음을 알 수 있다.  $\alpha=0.07$ 이고 잡음 첨가률이 0.20%인 경우에 우리가 삽입한 워터마크 신호의 생존율이 14%에 불과하지만, 삽입강도를 1.3으로 높이면 비슷한 잡음 첨가률에서 생존율이 33%로 두 배 이상 높아지는 것을 알 수 있다.

마찬가지로, 다른 무작위 잡음 첨가률에 대해서도 동일한 현상이 발생되고 있다. 이때 생존율이란 제안하는 워터마크 추출 방법으로 추출한 문자열의 개수를 삽입된 총 문자열의 개수로 나눈 값을 말한다. 만일, 워터마크 신호의 생존율을 높이려고 삽입강도 값을 크게 하면, 이는 3차원 모델의 외관을 손상시키는 요소로 작용한다. 그러므로 생존율과 삽입강도 사이의 적절한 조절이 필요하다.

일반적으로 영상이나 비디오 분야에서의 워터마킹은 이런 문제를 인간의 시각 시스템(human visual system) 특징을 고려해 워터마크 삽입 강도와 삽입 위치를 결정한다. 그러나 3차원 모델에 대한 인간 시각 시스템의 성질을 연구한 구체적인 실험 결과나 연구 자료가 아직 미미한 실정이므로 본 논문에서 제안한 3차원 모델 워터마킹 방법은 인간의 시각 시스템의 특징을 충분히 고려하지 못했음을 밝혀둔다.

제안한 워터마킹 방법으로 삽입한 3차원 모델을 Affine 변환에 의해 공격한 결과는 <그림 5(b)>와 같이 외관이 심각하게 변형되었지만, 삽입강도에 상관없이 생존율이 33%를 나타냈다. 이렇게 Affine 변환에 강인한 이유는 제안한 방법이 각 스트림을 따라 반복해서 삽입하고 특히, 각각 x, y, z축에 독립적으로 신호를 삽입하기 때문이다.

마지막으로, MPEG-4 SNHC 기하 압축에 의한 공격에 삽입한 워터마크가 생존할 수 있는지를 실험하였다. 워터마크가 삽입된 3차원 모델의 좌표 값을 일반적인 메쉬의 꼭지점 좌표 저장 공간 96비트에 대해 <표 1>과 같이 각각 압축하였다. MPEG-4 압축 방법은 고주파수 대역의 신호를 삭제하는 방식으로 압축 연산을 하기 때문에 압축률이 높아질수록 모델의 외관이 단순화되는 경향이 있다. 제안한 워터마킹 방법은 DCT 계수의 중간 주파수 대역에 워터마크 신호를 삽입하였기 때문에  $\alpha=0.9$ 인 경우에는 15.8 비트까지 압축했음에도 불구하고 생존율이 14%나 된다는 것을 알 수 있다. 따

표 1. 제안한 워터마킹 방법의 강인성 실험  
Table 1. Experimental results of the water-marking scheme against attacks.

삽입강도 (modulation amplitude)	공격형태 (attack types)	삽입된 문자열의 개수	추출된 문자열의 개수	생존율(%)	
$\alpha=0.07$	Affine 변환	21	7	33	
$\alpha=0.07$	무작위 잡음 첨가	0.20%	21	3	14
		0.15%	21	13	62
		0.10%	21	16	76
$\alpha=0.07$	MPEG-4 SNHC 기하압축 (96bits)	24.8 bits	21	12	57
		30.8 bits	21	18	86
		33.8 bits	21	21	100
$\alpha=0.9$	Affine 변환	21	7	33	
$\alpha=1.3$	무작위 잡음 첨가	0.26%	21	1	5
		0.21%	21	7	33
		0.16%	21	14	67
$\alpha=0.9$	MPEG-4 SNHC 기하압축 (96bits)	15.8 bits	21	3	14
		21.8 bits	21	17	81
		27.8 bits	21	21	100

라서 제안한 DCT 영역에서의 3차원 워터마킹 방법이 Affine 변환, 무작위 잡음첨가, 그리고 MPEG-4 SNHC 표준 기하압축에 강인함을 실험결과로부터 알 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 영상처리 분야에서 흔히 사용되는 DCT 변환을 3차원 메쉬모델에 적용하여 새로운 3차원 모델 워터마킹 방법을 제안했다. 특히, 삼각형 메쉬 모델을 다루는데 사용되는 삼각형 스트립 생성방법을 3차원 워터마킹 기법에 응용하였다. 제안한 방법에서는 이런 삼각형 스트립의 좌표 집합을 각 좌표축마다 1차원 DCT 변환하여 독립적으로 중간 주파수 대역에 워터마크 신호를 삽입하였다. 이와 같이 중간 주파수 대역을 선택함으로써 삽입한 워터마크 신호의 강인성을 높일 수 있었으며, 또한 3차원 모델의 외관이 변형되는 것을 줄일 수 있었다. 그리고 삽입한 워터마크 신호의 강인성을 높이기 위해서 워터마크 신호를 3차원 모델에 반복적으로 삽입하는 방식을 이용하였다. 컴퓨터 모의실험을 통해 제안한 3차원 워터마킹 기법이 무작위 잡음 첨가 연산, Affine 변환, 그리고 MPEG-4 SNHC 표준 기하 압축 공격 등에 강인하다는 것을 보였다.

## 참 고 문 헌

- [1] E. Praun, H. Hoppe, and A. Finkelstein, "Robust Mesh Watermarking," Proceedings of SIGGRAPH, pp. 45~56, Aug. 1999.
- [2] R. Obuchi, H. Masuda, and M. Aono, "Watermarking 3D Polygon Models," Proceedings of ACM Multimedia, pp. 261~272, Nov. 1997.
- [3] S. Kanai, H. Date, and T. Kishinami, "Digital Watermarking for 3-D Polygons Using Multi-resolution Wavelet Decomposition," Proceedings sixth IFIP WG 5.2 GEO-6, pp. 296~306, Dec. 1998.
- [4] M. Yeung and B. Yeo, "Fragile Watermarking of Three-Dimensional Objects," Proceedings of ICIP, Vol. 2, pp. 442~446, 1998.
- [5] O. Benedens, "Geometry-Based Watermarking of 3D Models," IEEE Computer Graphics and Applications, pp. 46~55, Jan. 1999.
- [6] K. Yin, Z. Pan, J. Shi, and D. Zhang, "Robust Mesh Watermarking Based on Multiresolution Processing," Computer and Graphics Vol. 25, pp. 409~420, 2001.
- [7] I. Goskov, W. Sweldensy, and P. Schroder, "Multiresolution Signal Processing for Meshes," Proceedings of SIGGRAPH, pp. 325~334, 1999.
- [8] R. Obuchi, A. Mukaiyama and S. Takahashi, "A Frequency-Domain Approach to Watermarking 3-D Shapes," Computer Graphics Forum 21(3), pp. 373~382, Sept. 2002.
- [9] F. Evans, S. S. Skiena and A. Varshney, "Optimizing Triangle Strips for Fast Rendering," IEEE Visualization'96, pp. 319~326, Oct. 1996.
- [10] P. Terdiman, "Creating Efficient Triangle Strips," <http://codercorner.com/Strips.htm>
- [11] J. H. Ahn, C. S. Kim, C.-C. Jay Kuo and Y. S. Ho, "Motion Compensated Compression of 3-D Animation Models," SPIE Visual Communications and Image Processing, pp. 593~602, Jan. 2002.
- [12] F. Hartung, P. Eisert and B. Girod, "Digital Watermarking of MPEG-4 Facial Animation Parameters," Computer and Graphics, Vol. 22, No. 4, pp. 425~435, 1998.
- [13] 전정희, 호요성, 서영호, "DCT 영역에서의 삼차원 모델 워터마킹 방법," 대한전자공학회 컴퓨터/반도체 소사이어터 추계학술대회 논문집, 제26권2호, pp. 245~248, 2002. 11

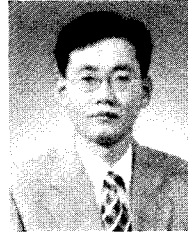
저 자 소 개



손 정 희(正會員)

1993년 2월 : 조선대학교 컴퓨터공학과 졸업(학사). 1997년 8월 : 조선대학교 컴퓨터공학과 졸업(석사). 2001년 2월 : 조선대학교 컴퓨터공학과 졸업(공학박사). 2001년 2월~현재 : 광주과학기술원 정보통신공학과 박사후과정(Post Doctor)

<주관심분야: 3차원 컴퓨터 비전, 그래픽 데이터 및 볼륨 데이터 신호처리, 3차원 모델 워터마킹>



扈 堯 盛(正會員)

1981년 2월 : 서울대학교 전자공학과 졸업(학사). 1983년 2월 : 서울대학교 전자공학과 졸업(석사). 1983년 3월~1995년 9월 : 한국전자통신연구소 선임연구원. 1989년 12월 : 미국 University of California, Santa Barbara Department of Electrical and Computer Engineering(박사), 1990년 1월~1993년 5월 : 미국 Philips 연구소 Senior Research Member. 1995년 9월~현재 : 광주과학기술원 정보통신공학과 교수

<주관심분야: 디지털 신호처리, 영상신호 처리 및 압축, 초저속 영상통신, 디지털 TV와 고선명 TV 방식, 멀티미디어 통신>