

# 구면 파라미터기법을 이용한 3차원 메쉬 모델의 워터마킹 알고리즘

최기철<sup>1\*</sup>, 김종원<sup>1\*</sup>, 최종욱<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>상명대학교 디지털저작권보호연구소 <sup>2</sup>(주)마크애니

## A Watermarking Algorithm of 3D Mesh Model Using Spherical Parameterization

Cui Jizhe<sup>1\*</sup>, Jong-Weon Kim<sup>1\*</sup>, Jong-Uk Choi<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Copyright Protection Research Institute, Sangmyung University, <sup>2</sup>MarkAny Inc

### 요 약

본 논문에서는 구면 파라미터기법을 이용한 3차원 메쉬 모델의 워터마킹 알고리즘을 제안하였다. 구면 파라미터기법은 3차원 데이터 처리에서 광범위하게 응용되는 기법으로서 직교좌표계에서 판단이 불가능한 3차원 메쉬 모델의 꼭지점 좌표의 특성을 구면 파라미터기법을 적용한 후 효과적으로 분석하고 처리할 수 있다. 본 논문에서는 3차원 메쉬 모델의 질량 중심을 구면좌표의 원점으로 설정하여 직교좌표계에서 구면좌표계로 변환한 후 구면 파라미터기법을 적용하였다. 3차원 모델의 기하학적 정보와 위상정보의 특성을 구면 모델에서 분석하였으며 꼭지점의 추가와 위상정보의 수정을 통하여 워터마크를 삽입하였다.

제안된 알고리즘은 이동, 스케일링, 회전 등 전형적인 기하학적인 변환에 강인하며 메쉬 순서정렬, 파일 포맷 변환에서도 강인성을 유지하였고 메쉬 세분화에서는 워터마크 정보가 90~98%가량 유지됨을 확인하였으며 특히 평활화 공격에서 좋은 성능을 보여주었다.

### ABSTRACT

In this paper, we propose a blind watermarking algorithm of 3d mesh model using spherical parameterization. Spherical parameterization is a useful method which is applicable to 3D data processing. Especially, orthogonal coordinate can not analyse the feature of the vertex coordination of the 3D mesh model, but this is possible to analyse and process. In this paper, the centroid center of the 3D model was set to the origin of the spherical coordinate, the orthogonal coordinate system was transformed to the spherical coordinate system, and then the spherical parameterization was applied. The watermark was embedded via addition/modification of the vertex after the feature analysis of the geometrical information and topological information.

This algorithm is robust against to the typical geometrical attacks such as translation, scaling and rotation. It is also robust to the mesh reordering, file format change, mesh simplification, and smoothing. In this case, the this algorithm can extract the watermark information about 90~98% from the attacked model. This means it can be applicable to the game, virtual reality and rapid prototyping fields.

**Keywords** : Watermarking, Mesh Model, Spherical Parameterization, Subdivision, Simplification

접수일: 2007년 11월 13일; 채택일: 2007년 12월 5일

\* 주저자, cuijizhe@smu.ac.kr

† 교신저자, jwkim@smu.ac.kr juchoi@markany.com

## I. 서 론

인터넷의 발전과 함께 데이터의 복사와 편집, 저장과 배포가 더욱더 쉽게 이루어지고 있다. 이로 인하여 불법 유통 사례가 속출하고 있으며 저작권자 침해와 관련된 법적 분쟁이 끊임없이 발생하고 있다. 이러한 이유로 저작권 보호에 효율적인 수단을 제공하는 워터마킹 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 이미지 및 비디오 등의 멀티미디어에 대한 워터마킹 연구는 많은 발전을 가져왔다.<sup>[1-2][15-16]</sup> 최근에는 2차원 모델뿐만 아니라 3차원 그래픽 데이터도 광범위하게 사용되고 있으며 3차원 그래픽 모델의 저작권을 보호하기 위한 워터마킹 관련 연구가 가상현실, 기계공학, 3차원 게임 등의 분야를 중심으로 진행되고 있다.

3차원 모델 워터마킹에 관한 개념은 오부치가 처음으로 제안하였다.<sup>[3]</sup> 오부치는 메쉬 모델의 꼭지점의 좌표 혹은 꼭지점의 연결선을 수정하여 워터마크를 삽입하는 개념을 도입하였으며, Triangle Similarity Quadruple(TSQ)알고리즘을 제안하였다. TSQ 알고리즘에서는 삼각형의 두 변의 길이의 비와 삼각형의 밑변과 높이의 비 및 삼각형의 두 내각을 워터마크 삽입의 기준으로 정하였으며 특정한 비례 값이 되도록 꼭지점을 수정함으로써 워터마크를 삽입하였다. 알고리즘은 이동, 회전, 스케일링 공격에 강인하며, 워터마크의 중복 삽입으로 국부적 변형공격에도 일정한 강인성을 유지한다. 하지만 메쉬 세분화나 꼭지점 좌표 재 정렬과 같은 공격에 취약하다. Chang은 TSQ기법과 유사한 방법으로 새로운 워터마킹 알고리즘을 제안하였다.<sup>[4]</sup>

Benedens는 메쉬 모델에서 한 삼각형을 지정한 후 꼭지점으로부터 지정한 삼각형의 질량 중심까지의 거리로 꼭지점들을 부분 집합으로 나누고 꼭지점의 좌표 값을 수정하여 워터마크를 삽입하였다. 알고리즘은 메쉬 모델의 기하학적인 정보만을 변화시키며 모델의 유형에 대한 특별한 요구사항이 없고 삽입할 수 있는 정보의 양이 많으며 워터마크 정보의 삽입/추출 속도가 빠르며 추출 시 원본을 필요로 하지 않는다. 회전, 이동, 균일한 스케일링 변환에 강인하지만 Affine 변환에는 취약하다.<sup>[5]</sup> Benedens는 법선 벡터를 이용하여 워터마크를 삽입하는 알고리즘도 제안하였다.<sup>[6]</sup> 이 알고리즘은 입력되는 원본 메쉬 데이터는 삼각형이어야 하며, 삼각형의 면을 워터마크 삽입의 기본원소로 하여 각 삼각 메쉬의 법선 벡터 분포를 변화시켜서 워터마크를 삽입하였다.

원본을 필요로 하는 방법이며 메쉬 단순화에 일정한 강인성을 유지한다. Toubs는 효과적으로 저작권 정보를 삽입하는 워터마킹 알고리즘을 제안하였다.<sup>[7]</sup> 위상정보를 변화시키지 않는 조건하에서 원본 모델의 꼭지점을 반대방향으로 이동시켜서 두 개의 모델 A와 B를 얻은 다음 삽입하려는 워터마크 정보에 근거하여 꼭지점 좌표들을 여러 개의 집합으로 나눈다. 비트 정보 1을 삽입할 경우 모델 A의 좌표 값을 사용하고 비트 정보 0을 삽입할 경우 모델 B의 좌표 값을 사용한다. 알고리즘은 이동, 회전, 스케일링, 크로핑, 꼭지점 재정렬 등의 공격에 강인성을 유지하지만, 워터마크 추출하는 과정에서 삽입 시 사용한 A모델, B모델의 정보와 원본이 필요하다는 약점이 있다. Praun은 전형적인 공격에 비교적 강인한 워터마크 알고리즘을 소개하였다.<sup>[8]</sup> 메쉬 모델의 꼭지점 좌표를 입력으로 하여 스칼라 기저함수를 만들었으며, 기저함수를 이용하여 삽입 강도를 설정한 후 각 꼭지점 좌표를 변형시켰다. 테스트 결과에 의하면 기하학적 변환을 포함한 공격에 강인하다. 하지만 계산량이 많고 기타 메쉬 모델에 적용되는 데이터 처리기법에 독립적이다. 워터마크 삽입에는 비트정보가 아닌 실수 열을 사용한다.

본 논문에서는 새로운 접근 방법으로 3차원 워터마킹 알고리즘을 구현하였다. 우선 3차원 메쉬 모델의 위상학적인 특성과 주로 사용되는 기하학적인 변환을 고려하여 부분적인 꼭지점을 선택하여 질량 중심을 구한 후, 구면좌표계로 변환하였으며 구면 파라미터기법을 적용하여 워터마크를 삽입하였다. 제2장에서는 메쉬 모델에서 사용되는 수학적 개념들을 정의한다. 제3장에서는 구면 좌표계에서의 3차원 메쉬 모델의 특성을 분석하고 본 논문에서 제안하는 워터마크 삽입/추출 알고리즘을 설명한다. 제4장에서는 제안한 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 실험결과를 분석하고 제5장에서는 결론을 맺는다.

## II. 3D 메쉬 모델 개념

메쉬 모델은  $M=(V_M, K_M, P_M)$ 로 표시할 수 있다. 여기서  $V_M=\{1, 2, \dots, |M|\}$ 은 꼭지점의 집합( $|M|$ 은 꼭지점의 개수)을 나타내며  $K_M$ 은 위상정보 즉 각 꼭지점들의 연결 상태 정보를 나타내고  $P_M$ 은  $V_M$  상의  $n$ 차원 벡터를 나타내며  $P_M=\{\vartheta_M(i) | i \in V_M\}$ 로 표시한다.  $\vartheta_M(i)=\{f_1(i), f_2(i), \dots, f_n(i)\}$ 는 꼭지점  $\{i\}$ 와 관련된 위치 좌표,

법선 벡터, 칼라정보 등의 속성을 나타내는 벡터이다.

$K_M$ 에는 꼭지점  $v=\{i\} \in K_M$ , 변  $e=\{i,j\} \in K_M$ , 면  $f=\{i,j,k\} \in K_M$  등 세 개의 기본 정보가 포함되어 있다. 만약  $\{i,j\} \in K_M$ 이면  $\{i\}$ 와  $\{j\}$ 는 인접한 꼭지점이다.

꼭지점  $v=\{i\}$ 와 인접한 꼭지점의 집합을  $v=\{i\}$ 의 1-ring이라 하며  $N(v)$ 로 표시하고  $v$ 의 인접 꼭지점의 개수를 1-ring 값이라고 하며  $|N(v)|$ 로 표시한다.

제안한 워터마킹 방법은 다양한 메쉬 모델에 적용 가능하다. 폴리곤 메쉬 모델은 모두 삼각 메쉬 모델로 전환할 수 있기 때문에 특별한 설명이 없을 경우 본 논문에서 설명하는 메쉬 모델은 모두 삼각 메쉬 모델을 말한다.

### Ⅲ. 3차원 메쉬 모델 워터마킹

제안하는 워터마크 알고리즘은 꼭지점의 1-ring 탐색에 의한 기준 꼭지점 설정과정, 메쉬 모델  $M$ 에서 선택한 기준 꼭지점의 질량중심을 구하고 모델을 질량중심으로 옮기는 과정, 구면 파라미터기법 적용과정, 구면 변환 후 변수  $(\theta, \psi)$ 에 근거한 부분집합으로의 분할과정, 워터마크 정보의 생성 및 워터마크 삽입과정, 워터마크 추출과정으로 구성된다.

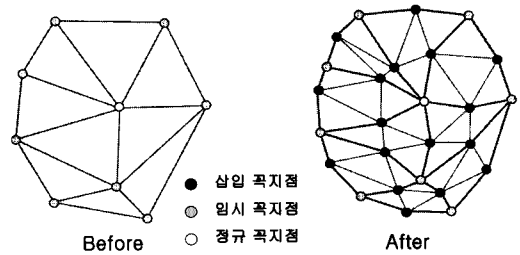
#### 3.1. 기준 꼭지점 및 질량 중심

기준 꼭지점 선정은 일반적인 공격에 영향을 받지 않는 구면의 중심점을 찾는 데 그 목적이 있다. 본 논문에서는 3차원 메쉬 모델에서 흔히 사용되는 메쉬 세분화 공격에서 변하지 않는 중심점을 찾는 데 초점을 두었다.

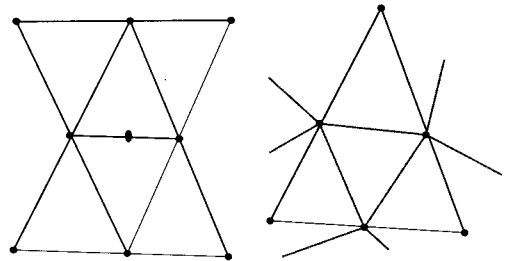
메쉬 세분화 알고리즘은 크게 근사에 의한 세분화와 보간에 의한 세분화로 나눌 수 있다.<sup>[13]</sup> 근사에 의한 세분화에는 루프분할면(Loop Subdivision Surface) 방법이 대표적이며 개념도는 [그림 1]과 같다. 보간에 의한 메쉬 세분화에는 나비분할면(Butterfly Subdivision Surface) 방법이 대표적이며 개념도는 [그림 2]와 같다.

[그림 1]에서 보는 바와 같이 삽입되는 꼭지점(검은색)의 1-ring 값은 경계 꼭지점일 경우  $|N(v)|=4$ 이고 내부 꼭지점일 경우  $|N(v)|=6$ 이다.

나비분할면방법은 4-점 보간 기법(four-point interpolating scheme)의 일반화이다. 꼭지점의 삽입방법은 주변의 여덟 개의 꼭지점을 사용하는 나비기법(Butterfly scheme)이다.<sup>[13]</sup> 나비분할면은 대칭적인 형



(그림 1). 루프분할면 방법<sup>[14]</sup>



(그림 2). 나비분할마스크 및 추가되는 꼭지점<sup>[13]</sup>

태의 에지에 새로운 점을 삽입하는 법칙이다. 주변의 4개의 에지에 대해서 새로 삽입될 점을 구하게 되면 하나의 삼각형은 4개의 새로운 삼각형으로 대체되며 생성된 면은 1차 미분이 가능한 면( $C^1$  Surface)이 된다.<sup>[13]</sup> 나비분할면 알고리즘도 루프분할면과 마찬가지로 삽입되는 꼭지점의 1-ring 값은 경계에 위치한 꼭지점일 경우  $|N(v)|=4$ 이고 내부 꼭지점일 경우  $|N(v)|=6$ 이다.

본 논문에서는 메쉬 세분화특성을 고려하여 다음과 같은 방법으로 기준 꼭지점을 선택하였다.

1) 메쉬 모델의  $|M|$ 개의 꼭지점을 두 개의 집합으로 분류한다.

$\forall i,j \in K_M, e=\{i,j\} \in K_M$  일 때, 적어도 두 개의 꼭지점  $k_1, k_2$ 가 존재하여  $\{i,j,k_1\} \in K_M, \{i,j,k_2\} \in K_M$ 이면 이와 같은 꼭지점  $i, j$ 의 집합을 내부 꼭지점이라고 하며  $\overline{K_B}$ 로 표시한다.

$\forall i,j \in K_M, e=\{i,j\} \in K_M$  일 때,  $k_1$ 가 존재하여  $\{i,j,k_1\} \in K_M$ 이 성립되며,  $K_M$ 에서  $k_1$ 와 같은 다른 꼭지점이 존재하지 않으면 이런 꼭지점의 집합을 경계 꼭지점 집합이라고 하며  $K_B$ 로 표시한다. 따라서 메쉬 모델의 꼭지점은  $K_M = K_B \cup \overline{K_B}$ 와 같이 표시할 수 있다.

2) 꼭지점의 집합  $\overline{K_B}$ 에서 1-ring 값이  $|N(v)|=6, |N(v)|=3$ 인 꼭지점을 제거하고 그 집합을  $\overline{\overline{K_{B-6-3}}}$ 라 하며  $K_B$ 에서 1-ring 값이  $|N(v)|=4$ 인 꼭지점을 제거하

고 그 집합을  $K_{B-4}$ 라고 한다. 집합  $\overline{K_{B-6-3}} \cup K_{B-4}$ 의 원소 개수(꼭지점의 개수)를  $m_0$ 라고 한다.

3)  $\overline{K_{B-6-3}} \cup K_{B-4}$ 에 속하는 꼭지점들의 질량 중심을 구면좌표계의 원점으로 설정한다. 설정된 구면좌표계의 중심점을  $(\bar{v}_x, \bar{v}_y, \bar{v}_z)$ 라고 하면,  $\bar{v}_x, \bar{v}_y, \bar{v}_z$ 는 수식 (1)과 같이 표현된다.

$$\bar{v}_x = \frac{1}{m_0} \sum_{i=1}^{m_0} v_{ix}, \quad \bar{v}_y = \frac{1}{m_0} \sum_{i=1}^{m_0} v_{iy}, \quad (1)$$

$$\bar{v}_z = \frac{1}{m_0} \sum_{i=1}^{m_0} v_{iz}$$

### 3.2. 구면파라미터기법

구면 파라미터기법은 모델로부터 구면으로의 1:1 사상  $f: M \rightarrow S^2$ 을 찾는 것이다. 2003년 Gotsman이 직교좌표계하에서 Genus=0인 모델에 구면 파라미터기법을 적용하였다. 1-ring의 중심 꼭지점, 1-ring의 경계의 볼록 조합 점 및 구의 중심이 직선위에 놓인다는 성질을 이용하여 구면상의 일부 꼭지점을 고정한 후 타 꼭지점에 관한 연립방정식을 설립하고 해를 구하는 방법을 이용하였다.<sup>[10]</sup> 간단하고 직관적인 방법이지만 비선형연립방정식이어서 해를 구하기 어렵고 계산량이 많다는 단점이 있다. 그리고 부분적인 점이 구면이 아닌 원으로 퇴화되는 현상이 존재한다.<sup>[11]</sup> 구면은 3차원 공간에 존재하는 특수한 2차원 곡면이다. 구면 좌표계를 적용할 경우 구면 중심으로부터의 거리는 모두 상수로 대체되기 때문에 구면 좌표계의 변수  $\theta, \psi$ 만 처리하면 된다. 본 논문에서는 직교좌표계에서 구면좌표계로의 변환을 “cart2sph”, 구면좌표계에서 직교좌표계로의 변환을 “sph2cart”라고 표시한다.

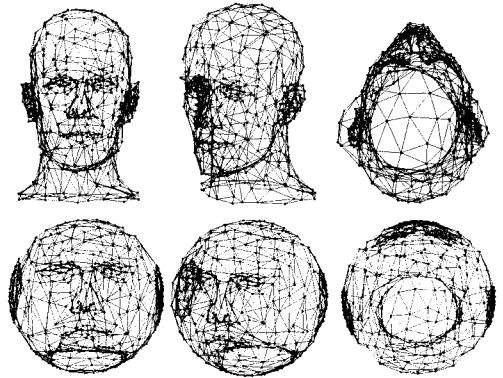
본 논문에서는 다음과 같은 방법으로 구면파라미터기법을 적용한다.

Step 1: 메쉬 모델을 수식 (1)에 의하여 설정한 중심점  $(\bar{v}_x, \bar{v}_y, \bar{v}_z)$ 로 이동한다. 새로운 꼭지점들의 좌표 값  $(v'_{ix}, v'_{iy}, v'_{iz})$ 은 다음과 같다.

$$(v'_{ix}, v'_{iy}, v'_{iz}) = (v_{ix} - \bar{v}_x, v_{iy} - \bar{v}_y, v_{iz} - \bar{v}_z) \quad (2)$$

Step 2: 수식 (2)에 의하여 구한 메쉬 모델  $M$ 의 꼭지점 좌표 값을 구면좌표계로 변환시킨다.

$$(r_i, \theta_i, \psi_i) = \text{cart2sph}(v'_{ix}, v'_{iy}, v'_{iz}), \quad i \in V_M \quad (3)$$



(그림 3). 구면파라미터기법 전/후 모델의 비교

Step 3: 수식 (3)에서 구한 구면좌표 값에서  $r_i = 1$ 로 설정하고, 직교좌표계로 변환한다. 메쉬 모델  $M$ 의  $P_M = \{\vartheta_M(i) | i \in V_M\}$ 은 그대로 적용한다.

[그림 3]은 구면파라미터기법 적용 전의 “man” 모델과 적용 후의 “man”을 비교한 것이다.

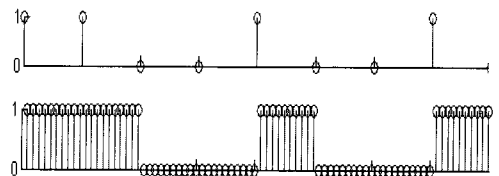
### 3.3. 워터마크 삽입

구면파라미터기법을 적용한 모델은 워터마크 정보의 양에 근거하여 여러 개의 집합으로 분할한 후, 분할된 집합에 워터마크 정보를 삽입한다.

#### 3.3.1. 워터마크 정보의 생성

본 논문에서는 2의 배수 길이를 가지는 랜덤 비트열을 생성하여 워터마크 정보로 사용한다. 삽입 시 워터마크 정보를 [그림 4]와 같이 Over Sampling 하여 분할된 메쉬 모델 각 부분에 삽입한다. 워터마크 정보를  $W_n$ 라고 하면 다음과 같다. 삽입강도를 위하여 삽입 정보의 최대 길이는 64bit로 한정한다.

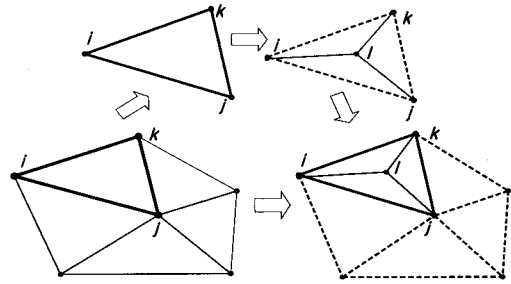
$$W_n = \{w_1, w_2, \dots, w_i\}, \quad \text{여기서 } w_i \in \{0, 1\}, \quad i = 2^n$$



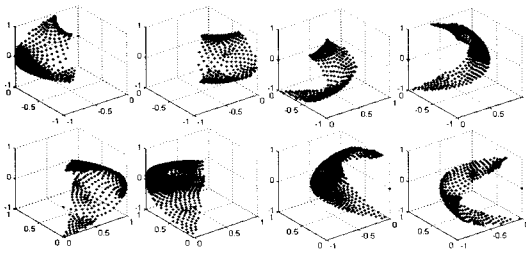
(그림 4). 워터마크 정보의 Over sampling(n=3)

(표 1). 메쉬 모델의 분할

$W_n$	분할단위( $\psi$ )	분할단위( $\theta$ )	분할개수
n=1	$\pi$	-	2
n=2	$\pi/2$	-	4
n=3	$\pi/4$	-	8
n=4	$\pi/4$	$\pi/2$	16
n=5	$\pi/4$	$\pi/4$	32
n=6	$\pi/8$	$\pi/4$	64



(그림 6). 꼭지점 추가 방법



(그림 5). 분할된 메쉬 모델의 꼭지점 분포(n=3)

3.3.2. 메쉬 모델의 분할

파라미터화된 메쉬 모델을  $\theta$ (위도)와  $\psi$ (경도)의 값에 따라 부분집합으로 분할한다. 부분집합의 인덱스는  $\psi$ 의 분할개수와  $\theta$ 의 분할개수를 인덱스로 사용하여  $M_{mn}$ 으로 표시한다. 분할 방법은 [표 1]과 같다.

n=3인 경우, “man” 모델을 파라미터화한 후 8개의 부분 집합으로 분할하면 [그림 5]와 같은 꼭지점의 분포를 볼 수 있다.

n=3일 경우, 삽입하려는 워터마크 정보는  $W_3 = \{w_1, w_2, \dots, w_8\}$ 이며, 분할된 메쉬 모델의 부분집합  $M_{11}, M_{12}, M_{13}, M_{14}, M_{15}, M_{16}, M_{17}, M_{18}$ 에 각각 삽입된다. 각 부분집합에는 Over Sampling 된 후의 워터마크 정보가 삽입된다.

3.3.3. 워터마크 삽입 알고리즘

워터마크 삽입은 구면파라미터기법을 적용한 모델에서 [그림 6]과 같은 꼭지점 추가방법을 통하여 진행된다. 원래의 삼각면을  $\{i, j, k\} \in K_M$ , 삽입되는 꼭지점을

$l \in K_M$ 라고 하면, [그림 6]에서 보는 바와 같이, 새로운 세 개의 면으로 구성된다.

$$\{i, j, k\} \in K_M \Rightarrow \{i, j, l\}, \{j, k, l\}, \{i, k, l\} \in K_M$$

새롭게 추가되는 면  $\{i, l\}, \{j, l\}, \{k, l\} \in K_M$ 은 공유하는 면이 적어도 두 개 존재하기 때문에 추가되는 점은 메쉬 모델의 내부 꼭지점임을 알 수 있다.

삼각 면  $\{i, j, k\} \in K_M$ 에 추가되는 꼭지점  $l \in K_M$ 은 세 꼭지점  $\{i, \{j, \{k\} \in K_M$ 의 질량 중심으로 설정하며 좌표 값은 다음과 같다.

1) 삼각 면  $\{i, j, k\} \in K_M$ 의 구면파라미터기법 적용 후 값을 각각  $(1, \theta_i, \psi_i), (1, \theta_j, \psi_j), (1, \theta_k, \psi_k)$ 라고 할 경우, 추가되는 꼭지점의 좌표  $(r'_l, \theta_l, \psi_l)$ 는 수식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} (v'_{ix}, v'_{iy}, v'_{iz}) &= sph2cart(1, \theta_i, \psi_i) \\ (v'_{jx}, v'_{jy}, v'_{jz}) &= sph2cart(1, \theta_j, \psi_j) \\ (v'_{kx}, v'_{ky}, v'_{kz}) &= sph2cart(1, \theta_k, \psi_k) \\ (r'_l, \theta_l, \psi_l) &= cart2sph\left(\frac{v'_{ix} + v'_{jx} + v'_{kx}}{3}, \frac{v'_{iy} + v'_{jy} + v'_{ky}}{3}, \frac{v'_{iz} + v'_{jz} + v'_{kz}}{3}\right) \end{aligned}$$

2) 추가된 꼭지점의 좌표  $(r'_l, \theta_l, \psi_l)$ 를 다음과 같이 변경하여 워터마크를 삽입한다. 삽입강도는  $\alpha \in [0, 1]$  값에 의하여 결정된다.

Step 1: 원 메쉬 모델의 세 꼭지점  $\{i, j, k\} \in K_M$ 의 구면좌표  $(r_i, \theta_i, \psi_i), (r_j, \theta_j, \psi_j), (r_k, \theta_k, \psi_k)$ 에서  $\tilde{r}_l = (r_i + r_j + r_k)/3$ 로 구한다.

Step 2: 만약 삽입하려는 정보가 “1”이면

$$\begin{aligned} r_l &= \tilde{r}_l + \alpha \cdot \tilde{r}_l \\ (r'_l, \theta_l, \psi_l) &\rightarrow (r_l, \theta_l, \psi_l) \end{aligned}$$

만약 삼입하려는 정보가 “0”이면

$$r'_i = \tilde{r}_i - \alpha \cdot \tilde{r}_i$$

$$(r'_i, \theta_i, \psi_i) \rightarrow (r_i, \theta_i, \psi_i)$$

Step 3: 꼭지점을 메쉬 모델에 추가한 후, 면의 정보를 다음과 같이 수정한다.

$$\{i, j, k\} \in K_M \Rightarrow \{i, j, l\}, \{j, k, l\}, \{i, k, l\} \in K_M$$

Step 4: 메쉬 모델의 부분집합 모두에서 Step 1~3 과정을 반복하여 실행한다.

Step 5: 분할된 부분집합을 재구성하여 워터마킹된 메쉬 모델을 얻는다.

### 3.3.4. 워터마크 추출 알고리즘

워터마크 추출은 워터마크 삼입 알고리즘의 역 과정으로 다음과 같은 순서로 진행된다. 본 논문에서는 질량 중심을 사용하였기 때문에 다양한 방법으로 워터마크를 검출할 수 있다.

Step 1: 메쉬 모델에서 각 꼭지점들의 1-ring 값을 구하고, 그 값에 근거하여  $\forall i \in \overline{K_{B-12-6}} \cup K_{B-7}$  인 꼭지점들을 선택한다.

Step 2: 선택한 꼭지점들의 질량 중심을 구하고 구면 좌표계의 중심점으로 한다.

Step 3: 메쉬 모델을 질량 중심으로 이동한 후, 구면 파라미터기법을 적용한다.

Step 4:  $N(v)=3$ 인 꼭지점을 선택하고, 다음과 같은 방법으로 워터마크 삼입여부를 판단한다.

$N(v)=3$ 인 꼭지점을  $l$ 이라 하면, 삼각 면  $\{i, j, l\}, \{j, k, l\}, \{i, k, l\} \in K_M$ 의 면적을 구하고 같으면 워터마크가 삼입되었다고 판단하고 Step 5로 넘어간다. 다르면  $N(v)=3$ 인 다른 꼭지점을 선택하여 Step 4를 반복한다.

Step 5: 세 꼭지점  $\{i, j, k\} \in K_M$ 에서

$$\tilde{r}_i = (r_i + r_j + r_k) / 3 \text{를 구한다.}$$

만약  $r_i > \tilde{r}_i$  이면

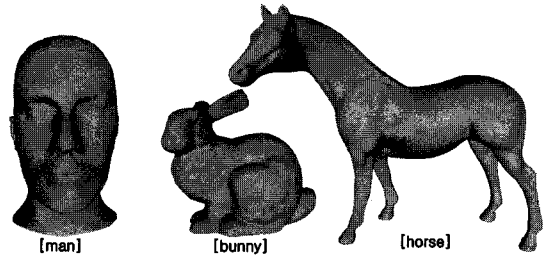
$$w_i = 1$$

만약  $r_i < \tilde{r}_i$  이면

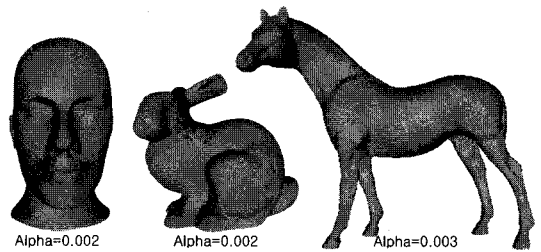
$$w_i = 0$$

Step 5를 완료하면 Step 4로 넘어간다.

Step 6: 모든 부분집합에 대하여 상기 과정을 반복하여  $W_N = \{w_1, w_2, \dots, w_i\}$ , 여기서  $w_i \in \{0, 1\}$ ,  $i = 2^n$ 를 구성하면 추출이 완료된다.



(그림 7). 실험용 메쉬 모델



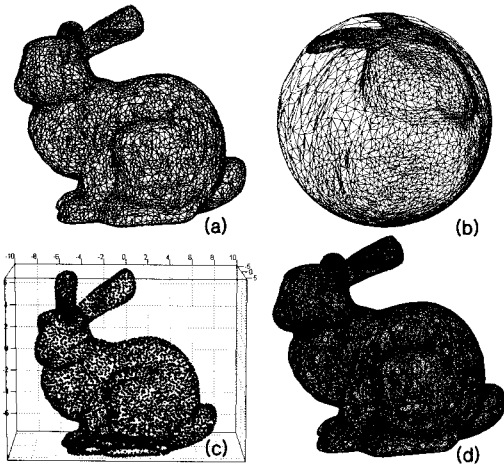
(그림 8). 워터마크가 삼입된 메쉬 모델

## IV. 알고리즘 평가

본 장에서는 제안된 워터마킹 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 다양한 실험을 수행하고 실험결과를 분석하였다. 실험에서는 세 개의 메쉬 모델[그림 7]을 사용하였다. 그 중, “man” 모델은 열린 모델이고, “bunny” 모델과 “horse”는 닫힌 모델이다. 실험에 사용된 모델의 정보는 [표 2]와 같다. [그림 8]에서는 워터마크가 삼입된 메쉬 모델을 보여주었다. [표 3]에서는 삼입 전후 메쉬 모델의 파라미터 값들을 비교하여 나타내었다.

(표 2). 실험에 사용된 모델 정보

모델	man	bunny	horse
꼭지점	5950	7502	12122
삼각 면	11838	15000	24240
유형	opened	closed	closed
genus	-	0	0
holes	1	없음	없음

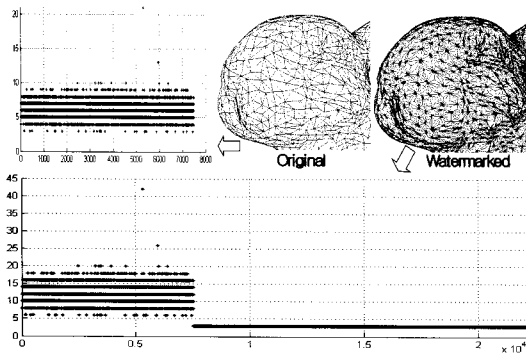


[그림 9]. "bunny"모델의 워터마크 삽입과정

[그림 9]는 "bunny" 모델의 구면파라미터화 과정을 이미지로 보여준 것이다. (a)는 "bunny" 원본 모델을 메쉬 구조로 보여준 것이고, (c)는 꼭지점의 분포를 3차원으로 보여준 것이며, (b)는 구면파라미터화 결과를 보여준 것이며, (d)는 워터마크가 삽입된 "bunny" 모델이다.

[그림 10]에서는 원본과 워터마크된 모델의 1-ring 값의 변화를 그래프로 나타내고 있다.

제안하는 알고리즘에서 사용한 워터마크 비트열은 최대 64비트로 한정하였으며 seed 값을 갖는 난수발생기를 이용하여 생성하였다. 워터마크 정보는 분할된 메쉬 모델에 독립적으로 삽입되었으며 대량의 중복삽입이 가능하였다.



[그림 10]. 삽입 전후 "bunny"모델의 1-ring 값 비교

[표 3]. 워터마크 삽입 전/후 파라미터 비교

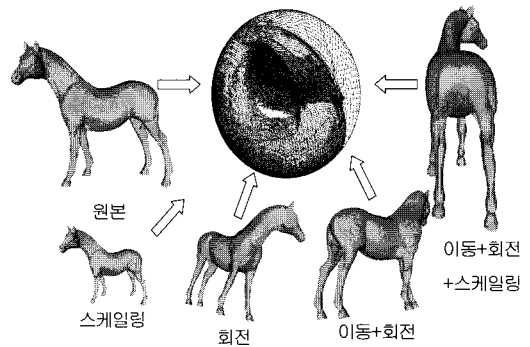
모델		man	bunny	horse
원본	꼭지점	5950	7502	12122
	면	11838	15000	24240
삽입	꼭지점	17788	22502	36362
	면	35514	45000	72720
삽입량	n=4	16	16	16
	중복삽입(평균)	739.8	937.5	1515
	n=6	64	64	64
	중복삽입(평균)	184.9	234.4	378.8

#### 4.1. 형태보존 공격에 대한 강인성

형태보존 공격에는 이동, 스케일링, 회전 등 기하학적인 변환과 꼭지점의 저장순서변경, 파일포맷변환 등이 있다. 기하학적인 변환은 꼭지점의 좌표 값만 변화시키며, 꼭지점의 1-ring 값 및 선택한 구면좌표계의 중심, 꼭지점의 연결 정보는 영향을 받지 않는다.

실험 결과 제안한 알고리즘은 이동, 회전, 스케일링 등의 변환을 실행한 후에도 같은 구면파라미터화 결과를 얻었으며, 삽입한 워터마크정보를 추출할 수 있었다. [그림 11]은 "horse" 모델에 대한 기하학적인 변환 공격과 구면파라미터화 결과이다.

메쉬 모델에는 꼭지점의 저장순서를 변경하는 공격이 존재한다. 제안한 알고리즘은 꼭지점의 저장순서를 변경하더라도 꼭지점의 1-ring 값과 선택한 구면좌표



[그림 11]. 기하학적인 변환공격

[표 4]. 파일 포맷 관련 설명

포맷	유형	설명	기타
STL	ascii binary	Stereo Lithography	meshlab
PLY	ascii binary	stanford polygon file format	meshlab
DAE	ascii	collada file format(V1.4.1)	collada
OBJ	ascii	Alias wavefront Object	meshlab 1.0
OFF	ascii	Object File Format	meshlab 1.0
3DS	binary	3D studio format	3d studio

중심은 변하지 않기 때문에 워터마크 정보를 추출할 수 있었다. “Invert faces” 공격은 면의 방향만 변환시키는 변환이고, “close holes”<sup>[12]</sup> 공격은 삼각메쉬를 추가하는 공격기법인데 제안한 알고리즘은 영향을 받지 않았다.

파일포맷 변환 실험에서 사용한 포맷을 [표 4]에서 보여주었다. PLY 파일포맷과 STL파일 포맷에는 ASCII 형식과 Binary 형식이 존재한다. 본 논문에서는 모두 ASCII포맷으로 변환하여 실험하였다. DAE 파일은 Collada version 1.4.1을 사용하였고, OBJ, OFF파일은 2007년 3월 배포된 meshlab 프로그램을 이용하여 실험하였다. 실험에 사용한 모든 모델에서 워터마크 정보를 추출할 수 있었다.

4.2. 형태변형 공격에 대한 강인성

형태변형에는 다양한 공격이 존재한다. 본 논문에서는 메쉬 세분화, 메쉬 단순화, 메쉬 평활화 등의 공격에 대하여 중점적으로 실험하였다.

4.2.1. 메쉬 세분화 공격 실험

많이 사용하는 메쉬 세분화에는 루프분할면, 나비분할면, 중심점분할면(Midpoint subdivision surface) 등의 기법이 존재한다. 실험 시, 세분화할 모델의 꼭지점은 모델 전체에서 선택하였으며 실험결과를 [표 5]에 나타내었다. [표 5]의 “워터마크(%)”에서는 워터마크 삽입 시 추가된 꼭지점 수와 공격 후 추출한 꼭지점 수를 백분율로 나타낸 것이다. “삽입/추출”은 3차 세분화

[표 5]. 메쉬 세분화 공격 테스트

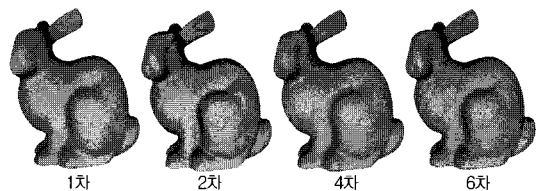
공격	모델	Thres hold	$\alpha$	워터마크(%)			삽입/ 추출
				1차	2차	3차	
루프 분할 면	man	0.041	0.002	98	85	74	64/61
	bunny	0.042	0.002	98	83	73	64/64
	horse	0.003	0.003	99	83	76	64/64
나비 분할 면	man	0.041	0.002	98	81	71	64/59
	bunny	0.042	0.002	98	78	71	64/64
	horse	0.003	0.003	99	80	70	64/63
중심 점 분할 면	man	0.041	0.002	100	-	-	64/64
	bunny	0.042	0.002	100	-	-	64/64
	horse	0.003	0.003	100	-	-	64/64

후 추출한 비트 수를 나타낸다. “man” 모델에서는 구면 파라미터기법을 적용한 후, 상대적으로 꼭지점이 적은 부분에서는 일부 워터마크 정보를 추출할 수 없었다. 제안한 알고리즘은 중심점분할면 공격에 대하여 특히 높은 강인성을 보여주었다.

4.2.2. 메쉬 평활화 공격 실험

평활화에서는 라플라시안 평활화가 많이 사용되고 있다. [그림 12]는 “bunny” 모델에 삽입강도를  $\alpha = 0.002$ 로 설정하여 워터마크를 삽입한 후 6차례 라플라시안 평활화를 실행하였을 때 모델의 변화를 나타낸 것이다. 제안한 알고리즘은 라플라시안 평활화를 6차례 실행하여도 워터마크 정보를 추출할 수 있었다.

HC 라플라시안 평활화도 메쉬 모델에서 많이 사용되는 공격기법이다. 실험에 사용한 모델 모두 6차의 HC 라플라시안 평활화 후에도 워터마크 추출이 가능하였다.



(그림 12). 라플라시안 평활화



(표 6). 메쉬 단순화 공격테스트

모델		man	bunny	horse
1차	꼭지점(전)	17788	22502	36362
	꼭지점(후)	8908	11252	18182
	위터마크(%)	65%	62%	62%
	삽입/추출	64/62	64/61	64/61
2차	꼭지점(전)	8908	11252	18182
	꼭지점(후)	4465	5627	9092
	위터마크(%)	37%	43%	38%
	삽입/추출	64/36	64/53	64/37

4.2.3. 메쉬 단순화 공격 실험

메쉬 모델의 단순화에는 클러스터링(Clustering Decimation)과 QECD(Quadric Edge Collapse Decimation) 등의 기법이 있다. 본 논문에서는 QECD 기법으로 실험하였으며 그 결과를 [표 6]에서 보여주었다.

제안한 알고리즘은 QECD 공격에는 상대적으로 취약한 것으로 나타났다. [표 6]에서 보는 바와 같이, 2차 메쉬 단순화 공격 후, “bunny” 모델에서만 80%([표 6]의 “삽입/추출(2차)”)이상의 위터마크 정보를 추출할 수 있었고 나머지 두 개의 모델에서는 추출율이 모두 60% 미만이었다.

4.3. 기존 알고리즘과의 비교

제안한 알고리즘은 균일한 기하학적인 변환을 포함한 꼭지점 재정렬, 파일 포맷 변환 등의 형태 보존 공격에 강인성을 유지하였으며, 형태변형공격에서 많이 사용하는 메쉬 세분화와 평활화 등 공격에서 대부분의 위터마크 정보를 추출할 수 있었다. [표 7]에서는 제안한 알고리즘을 오부치의 알고리즘 및 Kanai의 알고리즘과 비교하였다. Kanai 알고리즘은 1to4로 분해 가능한 모델에서만 적용이 가능하지만 제안한 알고리즘은 이러한 제한이 없다. 제안한 알고리즘의 삽입과 추출의 복잡도는  $O(n \log_2 n)$ 이며 오부치의 알고리즘보다는 속도가 빠르지만 Kanai의 알고리즘보다는 계산량이 많다.

(표 7). 기존 알고리즘과의 비교(“horse”모델)

알고리즘	오부치[17]	Kanai[18]	Proposed
원본	필요함	필요함	불필요
사전처리	필요함	불필요	필요함
가능모델	폴리곤 메쉬	1to4분할 가능모델	삼각메쉬
위터마크	32bit	70*7의 이진영상	64bit
삽입시간	836초 이상	35초 이상	300초 이상

V. 결 론

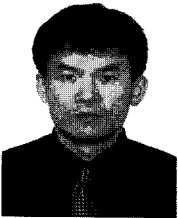
본 논문에서는 구면 파라미터기법을 이용한 3차원 메쉬 모델의 위터마킹 알고리즘을 제안하였다. 구면 파라미터기법을 이용하여 직교좌표계에서 판단이 불가능한 꼭지점 좌표의 특성을 효과적으로 이용하여 원본이 필요 없이 위터마크 정보를 추출할 수 있도록 하였다. 모델의 부분적인 꼭지점으로부터 질량 중심을 구하여 구면좌표계의 원점으로 사용하였으며 모델의 기하학적 정보와 위상정보의 특성을 구면 모델에서 분석한 후, 꼭지점의 추가/변경을 통하여 삽입하였다. 제안된 알고리즘은 이동, 스케일링, 회전 등 전형적인 기하학적인 변환에 강인하며 메쉬 순서정렬, 파일 포맷 변환에서도 강인성을 유지하였으며 평활화 등의 공격에서 좋은 성능을 보여주었다. 메쉬 세분화에서는 위터마크 정보가 90~98%가량 유지됨을 확인하였다. 이는 ECC(Error Correction Code)의 삽입에 의해서 충분히 보상 가능한 오류이다. 향후 메쉬 모델의 꼭지점의 분포에 적응적인 모델 분할 방법을 강구하여 알고리즘의 성능을 향상시키고 메쉬 단순화에도 강인하도록 하는 연구가 필요하다.

참고문헌

[1] J.Cox, J Kihan, T. Leighton, and T. Shamoon, “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 System for Video Technology, Vol 9, no 4, pp. 545-550, June 1999
- [3] R. Ohbuchi, H. Masuda, and M. Aono, Watermarking Three Dimensional Polygonal Models, Proceedings of the ACM Multimedia '97, Seattle, Washington, USA, November 1997, pp. 261-272
- [4] Chang min Chou, and Din Chang Tseng. "Technologies for 3D Model Watermarking: A Survey", International Journal of computer Science and Network Security, Vol.7 No.2. February 2007
- [5] O. Benedens, "Two High Capacity Methods for Embedding Public Watermarks into 3D Polygonal Models" Proceedings of the Multimedia and Security-Workshop at ACM Multimedia 99, Orlando. Florida, 1999. pp 95-99.
- [6] O. Benedens, Watermarking of 3D Polygon Based Models with Robustness against Mesh Simplification. Proceedings of SPIE: Security and Watermarking of Multimedia Contents, 1999, Vol. 3657, pp. 329-340.
- [7] S. Toub, A. Healy, "Efficient Mesh Licensing", Computer Science 276r, Havard University, May 2001.
- [8] E. Praun, H. Hoppe and A. Finkelstein, "Robust Mesh Watermarking", SIGGRAPH Proceeding, 1999, 69-76.
- [9] Cui Jizhe, Jong-Weon Kim, Jong-Uk Choi, "A Semi-fragile Watermarking Algorithm of 3D Mesh Model for Rapid Prototyping System Application", Korea Institute of Information Security & Cryptology, 2007.
- [10] Gotsman C, Gu X, Sheffer A. Fundamentals of spherical parameterization for 3D meshes. Siggraph2003, pp. 358-363.
- [11] Han-Bing Yan, Shi-Min Hu, "Convex Combination Spherical Parameterization Using Spherical Coordinates", 中國科技論文在線, <http://www.paper.edu.cn>
- [12] <http://meshlab.sourceforge.net/>
- [13] Jong-hee Park, Tai-yun Kim, Korea university, "Subdivision by Edge Selection based on Curvature", Korea Information Science Journal, (1999.8), 863-874
- [14] Zorin, D. Subdivision Surfaces, ibid, Chapter 3, (1998)
- [15] 박현, 이성현, 문영식, 한양대학교 컴퓨터공학과, "영상 특성을 이용한 3D-DCT기반의 적응적인 비디오 워터마킹", 정보보호학회논문지, 2006. 4
- [16] 김구영, 김현태, 이재진, 원치선, 동국대학교 전자공학과, "공간 마스킹을 이용한 적응적 디지털 워터마크", 정보보호학회논문지, 1999.09
- [17] 大淵 龍太郎, 高橋 成雄, 宮澤 貴彦, 向山 明夫, "スペクトル分解を用いた3次元メッシュへの電子透かしの埋め込み" (日本)情報処理學會研究報告
- [18] S. Kanai, H. Date, and T. Kishinami, Digital Watermarking for 3D Polygons using Multi-resolution Wavelet Decomposition, Proc. of the Sixth IFID WG 5.2 International Workshop on Geometric Modeling: Fundamentals and Applications(GEO-6), pp. 296-307, Tokyo, japan, December 1998

〈著者紹介〉



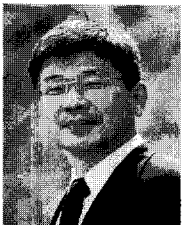
**최기철(CUI JIZHE) 정회원**

1996년 : (中)동북사범대학 수학과부 졸업(이학학사)  
 1996년~1999년 : (中)연변대학교 사법학원 강사  
 2001년 : 상명대학교 컴퓨터학과(이학석사)  
 2007년 : 상명대학교 컴퓨터학과(이학박사)  
 2004년~현재 : 상명대학교 디지털저작권보호연구소 연구원  
 <관심분야> 디지털워터마킹, 저작권관리기술, 디지털신호처리, 암호학, 컴퓨터그래픽스



**김종원(Jong-Weon Kim)정회원**

1989년 : 서울시립대학교 전자공학과(공학학사)  
 1991년 : 서울시립대학교 전자공학과(공학석사)  
 1995년 : 서울시립대학교 전자공학과(공학박사)  
 1996~2000년 : 주성대학 정보통신학과 조교수  
 2000~2004년 : (주)마크애니 부설연구소장  
 2004~2005년 : 상명대학교 소프트웨어대학 초빙교수  
 2005~2006년 : 상명대학교 디지털저작권보호연구소 책임연구원  
 2006~현재; : 상명대학교 소프트웨어대학 연구교수  
 <관심분야> 디지털워터마킹, 저작권보호 및 관리기술, 디지털신호처리



**최종욱(Jong-Uk Choi) 정회원**

1982년 : 아주대학교 산업공학과 (공학학사)  
 1982년 : 서울대학교 경영학과(석사과정)  
 1988년 : University of South Carolina(MIS. Ph.D)  
 1988년~1991년 : 한국과학기술연구원 시스템공학연구소 선임연구원, 실장  
 1991년~현재 : 상명대학교 소프트웨어대학 교수  
 2000년~현재 : (주)마크애니 대표이사  
 <관심분야> 디지털워터마킹, DRM, 전자정부출루션, 저작권보호 및 관리기술, 정보보호응용기술