

쾌속조형 시스템의 무결성 인증을 위한 3차원 메쉬 모델의 Semi-fragile 워터마킹

최기철^{1*}, 김종원^{1*}, 최종욱^{2†}

¹상명대학교 디지털저작권보호연구소 (주)마크애니

A Semi-fragile Watermarking Algorithm of 3D Mesh Model for Rapid Prototyping System Application

Cui Jizhe^{1*}, Jong-Weon Kim^{1*}, Jong-Uk Choi^{2†}

¹Copyright Protection Research Institute, Sangmyung University, ²MarkAny Inc

요 약

본 연구에서는 쾌속조형시스템의 요구사항에 부합되는 Semi-fragile 워터마킹 알고리즘을 제안한다. 쾌속조형시스템은 높은 정밀도를 요구하기 때문에 원본에 시각적인 변화를 주거나 왜곡을 할 경우, 출력물인 시제품에 큰 영향을 미친다. 따라서 이동, 회전, 신축과 같은 기하학적 변환이나 메쉬의 순서를 변경하는 변환, 파일 포맷 변환은 모델의 기본 형태를 변화시키지 않기 때문에 많이 사용되지만, 모델의 기본 형태를 변환시키는 데시메이션, 평활화 등은 사용하지 않는다. 제안된 알고리즘은 쾌속조형시스템의 이러한 제약을 고려하여 기하학적인 변환이나 메쉬 순서정렬, 파일 포맷 변환에는 강인하지만 그 외 변환에는 취약한 Semi-fragile 워터마킹 알고리즘이다. 제안한 워터마킹 알고리즘은 워터마크 정보의 삽입 전후 모델의 형태가 변하지 않으며, 쾌속조형시스템과 같은 고정밀도를 요구하는 기계공학 분야에서 데이터의 무결성 인증목적으로 사용할 수 있으며, 정보은닉 용도로도 사용할 수 있다.

ABSTRACT

In this paper, semi-fragile watermarking algorithm was proposed for the application to RP(Rapid Prototyping) system. In the case of the perceptual change or distortion of the original one, the prototype product will be affected from the process because the RP system requires the high precision measure. Therefore, the geometrical transformations like translation, rotation and scaling, the mesh order change and the file format change are used in the RP system because they do not change the basic shapes of the 3D models, but, the decimation and the smoothing are not used because they change the models. The proposed algorithm which is called semi-fragile watermarking is robust against to these kinds of manipulations which preserve the original shapes because it considers the limitations of the RP system, but fragile against to the other manipulations which change the original shapes. This algorithm does not change the model shapes after embedding the watermark information, that is, there is no shape difference between the original model and the watermarked model. so, it will be useful to authenticate the data integrity and hide the information in the field of mechanical engineering which requires the high precision measure.

Keywords : Semi-fragile, 워터마킹, 쾌속조형시스템, 삼각 메쉬, Mesh Center, 무결성인증

접수일: 2007년 9월 14일; 채택일: 2007년 10월 10일

* 주저자, cuijizhe@smu.ac.kr

† 교신저자, jwkim@smu.ac.kr

juchoi@markany.com

I. 서론

폐속조형시스템은 광학기술, 이미지처리, 소프트웨어, 전자제어, 메카트로닉스, 고분자 재료기술 등 다양한 분야의 기술들이 융합되어 형성된 것으로서 미래 3차원 프린터 기술로 일컬어지는 고부가가치 제조업이다. 폐속조형산업의 시장규모는 약 7억520만 달러(2004년)에 달했다^[1]. 3차원 메쉬 모델은 RP 시스템의 CAD모델링 단계에서 적용되는데 여기서 사용되는 STL 인터페이스는 시제품 제작의 정밀도에 큰 영향을 미친다. 생산 공정에서는 Missing facet 및 데이터 처리 오류를 줄이고 정밀도를 향상시키기 위해서 전문적인 데이터의 확인, 검증, 수정용 소프트웨어를 의뢰/개발하고 있다^{[2][3]}. 다양한 분야가 융합된 폐속조형 산업의 특성상, 공동 협업의 최종 결과물로 사용되는 메쉬 모델(STL)에 대한 데이터 무결성 보장과 인증에 관한 요구가 갈수록 높아지고 있다.

네트워크 응용과 함께 데이터의 배포가 쉽게 이루어짐에 따라 데이터 불법유통 사례가 빈번해지면서 데이터를 제작하기 위한 저작자의 노력이 한 순간에 사라질 수 있는 위기도 공존한다^[4]. 때문에 고가의 3차원 모델의 무결성 인증 수단이 절실히 필요하다. 이러한 요구사항을 충족시키기 위한 방법으로 워터마킹 기술이 활발히 연구되고 있다^[5].

Ohbuchi^[6-7]는 공간영역에서 시각적으로 확인이 가능한 패턴을 기하학적(geometrical) 정보나 위상학적(topological) 정보에 삽입하는 방법을 제안하였다. 그 후, 꼭지점 좌표를 주파수 영역으로 변환시켜 신호를 삽입하는 방법도 제안하였다. Benedens는 메쉬의 법선 방향을 여러 개로 분할 한 후 법선 벡터의 방향을 워터마크 삽입 정보에 따라 선택하는 방법을 사용하였다^[8]. Kanai 등은 Mesh 모델에 웨이블릿 변환(wavelet transform)을 적용한 후 계수 값에 워터마크를 삽입함으로써 다양한 디지털 공격에 강인하다는 특징을 제시하였다^[9]. Chang 등은 모델을 4개의 삼각형 메쉬로 묶어서 특정한 거리의 비에 근거하여 꼭지점을 적합한 위치로 이동하는 방법으로 정보를 삽입하였다^[10]. 이와 같이, 3차원 메쉬 모델에서 워터마크 삽입으로 사용하는 정보에는 꼭지점의 좌표 값, 모서리(edge)의 길이, 다각형(polygon)의 면적 혹은 유사도, 면적 비율, 면이나 꼭지점의 색상, 꼭지점의 법선 벡터 등이 있다.

기존의 연구들은 대부분 알고리즘의 강인성과 정보

의 삽입량을 기초로 하였다. 이러한 알고리즘^[4-10]은 설계/해석/제조 등 기계공학적인 분야에서의 높은 정밀도를 고려하지 않았기 때문에 게임이나 애니메이션 분야 외, 실제 산업현장에서는 용도가 제한적이다. 예를 들면 기존의 워터마킹 알고리즘이 3차원 형상을 왜곡시키기 때문에 높은 정밀도를 요구하는 폐속조형시스템에서는 적용하기 어렵다는 한계가 있다.

본 연구에서는 3차원 메쉬 모델의 위상학적인 특성과 보편적으로 사용되는 기하학적인 변환을 고려하여 위상정보에 기반한 중심점 설정 방법을 제안하고 이를 이용한 Semi-fragile 워터마킹 알고리즘을 제안한다. 제2장에서는 3차원 메쉬 모델의 분류에 대하여 분석하고 제3장에서는 워터마크를 삽입하기 위한 모델의 불변량 설정방법을 설명하며, 워터마크 삽입/추출 알고리즘을 설명한다. 제4장과 제5장에서는 제안한 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 실험결과를 분석하고 결론을 맺는다.

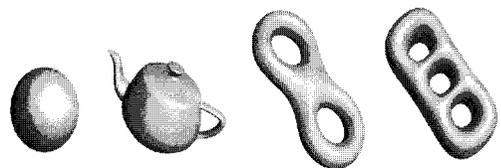
II. 3D 메쉬 모델의 분류

3차원 모델은 폐곡면(closed surface) 여부에 근거하여 열린 모델(opened model)과 닫힌 모델(closed model)로 분류되며, 또한 닫힌 모델은 위상학적 분류에 의하여 다음과 같이 정의된다.

정의 2.1: 2차곡면 상의 Handle의 개수 혹은 원환(Ring)의 개수를 수학적으로 곡선의 Genus라고 한다. [그림 1]에서 왼쪽으로부터 오른쪽으로 각 곡면은 Genus=0, 1, 2, 3인 값을 가진다.

정의 2.2: 연결합(Connected Sum)은 기호#로 표기하며, $S_1 \# S_2$ 는 두 개의 곡면(two surface)에서 두 개의 원판(two disk) D_i 를 제거한 후, $h: \partial D_1 \rightarrow \partial D_2$ (미분동배(同胚))과정을 통하여 붙이는 것을 말한다.

정리 2.1: 임의의 정향 곡면(Surface model)은 구면, 원환 혹은 유한 개 원환의 연통합과 같다. 이를 곡면분류정리라고 한다.



(그림 1) Genus=0, 1, 2, 3인 3D Model

단한 곡면 모델은 정의 2.1, 2.2와 정리 2.1에 근거하여 Genus 값으로 분류된다.

본 연구의 대상인 RP 시스템은 폐놀수지와 같은 폐속응고 재료를 균일한 두께로 적층하는 방식으로 물리적 모델을 제작하는 시스템이다. 기존의 신제품 개발 시간을 단축하고 복잡한 기하학적 형상도 조형이 가능하며 설계자가 실제 모델을 직접 조립 또는 해석할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 3차원 CAD 모델에 대한 높은 정밀도를 보존해야 한다. 기존의 좌표 값 혹은 좌표 값의 위치를 변환시키는 방법 및 데이터를 주파수공간으로 변환하여 삽입하는 방법 등은 3차원 형상을 일정하게 왜곡시키거나 또는 정밀도를 크게 저하시킬 가능성이 높다. 폐속조형 시스템에서 많이 사용되는 파일 형식은 STL(Stereo Lithography)이고 STL 파일형식은 PLY(stanford polygon file format), DAE(collada file format), OBJ(Alias Wavefront Object), OFF(Object File Format) 등 외부 파일 형식으로부터 전환하여 얻을 수 있다.

본 연구에서 제안한 워터마킹 방법은 기하학적 및 위상학적인 형상에 제한을 받지 않고 Opened Model, Closed Model 및 다양한 Genus 모델에 적용이 가능하다. 단, 폐속조형 시스템에 대한 적용을 고려하여 3차원 모델 표현은 다각형 메쉬 모델로써 삼각형 기반의 메쉬로 제한하며 파일 형식은 본 연구의 핵심인 PLY, DAE, OBJ, OFF, STL 등으로 제한한다.

III. 3D 메쉬 모델 워터마킹

다각형 면에 의한 3차원 모델은 둘러싸는 다각형 면들의 집합으로 표현한다. 데이터의 구성은 점의 직교 좌표 값으로 표현된 꼭지점 테이블, 꼭지점의 좌표 값 혹은 그 인덱스로 표현된 모서리 테이블, 모서리 혹은 좌표 값 인덱스로 표현된 다각형 면 테이블 등 세 개의 테이블 목록을 가진다. PLY, DAE, OBJ, OFF파일과 달리 STL 파일 형식에는 상기 정보 외에 RP시스템을 고려하여 면(face)의 방향을 표시하기 위한 법선(normal vector) 정보가 추가된다.

3.1. 워터마킹을 위한 불변량 조건

특정된 공격에 강인한 워터마킹 알고리즘을 위해서는 해당 변환에 강인한 불변량을 구성해야 한다.

1) 꼭지점 좌표 값의 변환에 따라 변하지 말아야 한다. 좌표 값은 평행이동과 같은 변환에도 쉽게 변하기 때문에 좌표 값을 이용하더라도 Chou^[10]의 연구에서와 같은 기준을 구성해야 한다.

2) 기하학적인 변환에 강인하기 위해서는 가장 기본적인 이동, 신축, 회전에 관해 불변이어야 한다.

3) 꼭지점의 좌표 값과 면 정보를 기본으로 구성해야 된다. 천^[11], 김^[12] 등은 법선 벡터의 정보를 이용하여 디지털 워터마킹 정보를 삽입하였다. STL 파일형식 외의 PLY 등 파일형식에서는 법선 벡터 정보를 사용하지 않기 때문에 파일 전환 삽입한 워터마크 정보가 사라진다. 마찬가지로 색상(color)정보도 파일 포맷을 변환시키면 사라진다.

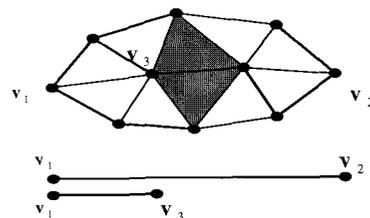
4) RP 시스템의 정밀도를 고려해야 되기 때문에 워터마킹 정보를 삽입한 후, 원본과 워터마킹 된 모델의 형태에 변화가 없어야 한다.

3.2. 축도 불변량

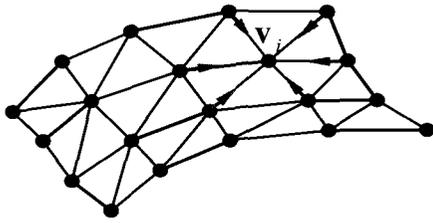
이동, 신축, 회전 등 기하학적인 변환은 이미지의 벡터성에 기초하여 표현된다. 본 연구에서는 벡터가 아닌 스칼라 요소에 근거하여 불변량을 구성하였다.

[그림 2]에서 꼭지점을 각각 v_1, v_2, v_3 이라 하고 꼭지점 사이의 거리를 각각 $|v_1v_2|, |v_1v_3|$ 라고 한다. 두 점 사이의 거리 즉, $|v_1v_2|$ 만을 고려할 경우 이동, 회전 변환에서는 불변성을 유지하지만 신축변환에서는 변하기 때문에 그대로 사용할 수 없다. 본 연구에서는 거리의 비 $\bar{D} = |v_1v_3|/|v_1v_2|$ 를 불변량으로 설정하였다. 거리의 비 \bar{D} 는 이동, 회전, 신축 등 기하학적 변환의 불변량이다.

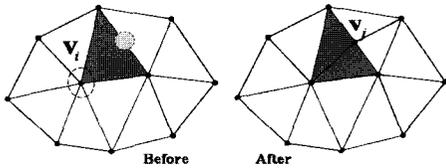
3.3. 그래프적 불변량



(그림 2) 스칼라 기반의 불변량



(그림 3) 꼭지점 Valence



(그림 4) 꼭지점 추가

메쉬 모델의 위상 정보는 꼭지점의 좌표 값과 면을 표현하는 꼭지점의 연결정보와 연관된다. 한 꼭지점에 연결된 주위 꼭지점들의 개수(valence)는 꼭지점좌표와 삼각형 면을 구성하는 테이블에서 얻을 수 있는 정보이다. [그림 3]은 꼭지점 v_i 와 직접 연결된 꼭지점들을 보여준다.

정의 3.1: 메쉬 모델의 한 꼭지점과 직접 연결된 꼭지점의 개수를 valence이라고 하며, 그 중 최대 valence 값을 갖는 꼭지점을 max valence vertex라고 한다. 꼭지점의 valence는 이동, 신축, 회전 등 기하학적인 변환의 불변량이다. 본 연구에서는 꼭지점 valence 정보를 이용하여 기준 좌표계를 설정한다.

3.4. 워터마크 삽입/추출 알고리즘

3.4.1. 기준 좌표계 설정

3차원 메쉬 모델에서 다음과 같은 두 개의 중심점을 좌표계 원점으로 사용한다. 하나는 경계박스(bounding box)의 중심점에 기반한 Mesh Center이며, 다른 하나는 메쉬 모델의 모든 꼭지점들의 원점(0, 0, 0)이다. Mesh Center의 좌표 값은 다음과 같다.

$$\left(\frac{x_{min} + x_{max}}{2}, \frac{y_{min} + y_{max}}{2}, \frac{z_{min} + z_{max}}{2} \right)$$

보는 바와 같이 꼭지점 좌표 값 중 각 좌표축에 대응하는 최소값과 최대값의 중심을 취한 것이다.

회전변환을 실행할 경우, Bounding Box의 모양이

변하기 때문에 꼭지점에 대응하는 Mesh Center도 변한다. 직각 좌표의 원점(Origin)도 이동/신축/회전 변환을 실행할 경우, 메쉬 모델과의 상대적 위치가 변환된다. 이러한 이유로 Mesh Center나 원점의 좌표는 워터마크 정보의 삽입 및 추출의 기준설정 표준으로 사용할 수 없다.

본 연구에서는 vertex valence에 기초하여 중심점을 설정하며, 이렇게 설정한 중심점을 vertex valence center라고 한다. 메쉬 모델의 vertex valence값에 따라서 모든 꼭지점을 내림차순으로 정렬하며 3개의 꼭지점 선택이 완료되면 정렬을 끝낸다. vertex valence값이 같으면 다음과 같은 세 개의 규칙을 적용하여 정렬한다.

규칙1: 직접 연결된 점들의 vertex valence값을 구하여 큰 값을 가지는 꼭지점을 앞에 둔다.

규칙2: 규칙 1에 의하여 같은 vertex valence 값일 경우, 꼭지점과 연결된 인접한 꼭지점들 사이의 모서리의 길이를 계산하며 최대 길이를 갖는 모서리의 2등분점을 선택하여 [그림 4]와 같이 새로운 꼭지점을 추가한다.

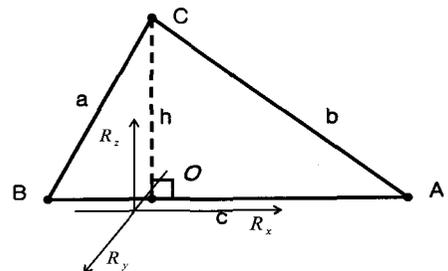
규칙3: vertex valence값이 같은 여러 개의 꼭지점이 존재할 경우, 꼭지점 테이블 리스트에서 순차적으로 3개의 점을 선택하여 규칙 2를 반복한다.

상기 방법에 의하여 내림차순으로 정렬된 꼭지점 집합에서 처음 3개의 꼭지점을 이용하여 그림 5와 같이 기준 좌표계를 설정한다.

Step 1: [그림 5]와 같이 선택한 3개의 꼭지점을 A, B, C 라 하고 이 세 점의 맞은변을 각각 a, b, c 라고 하며 a, b, c의 길이를 구한다.

Step 2: a, b, c 에서 가장 긴 변 c를 선택하고, 그 변에 수직선을 긋고 사귀는 점을 기준좌표계 원점 O로 한다.

Step 3: O에서 점{A, B}까지 길이를 계산하여 긴 점의 방향(\vec{OA})을 정의 방향으로 하여 $X(R_x)$ 축으로 설



(그림 5) 기준 좌표계 설정

정한다.

Step 4: 원점에 그어진 수직선을 $Z(R_z)$ 축으로 하고 벡터 \vec{OC} 를 정의의 방향으로 한다.

Step 5: 두 벡터 \vec{OA}, \vec{OC} 의 외적 벡터의 방향을 $Y(R_y)$ 축으로 설정한다.

설정된 원점과 좌표축은 이동, 신축, 회전 등 변환 시, 꼭지점의 그래프적 불변량(valence)에 의존하며 메쉬 모델과 같이, 이동, 신축, 회전된다. 변환 후에도 쉽게 중심점을 찾을 수 있다. 이는 워터마크 삽입을 위한 기준 설정 요구를 만족시킨다. [그림 6]의(a)는 36개의 점으로 구성된 영문자 "C"의 메쉬 모델이다. [그림 6]의(c)에서는 각 꼭지점의 valence값을 보여줬으며, [그림 6]의(b)에서는 선택된 3개의 꼭지점의 Z축 좌표 값을 2배로 설정하여 보여 줬다.

3.4.2. 워터마크 삽입알고리즘

제안하는 워터마크 삽입 알고리즘은 기준 좌표계 설정 과정, 꼭지점 정렬 과정, 워터마크 정보의 생성 및 워터마크 삽입 과정으로 구성된다. 우선, 4.1에서 설명한 기준 좌표계 설정방법에 근거하여 본 연구의 기본이 되는 좌표계를 설정하며 좌표계 원점을 O라고 한다. 다음, 메쉬 모델의 모든 꼭지점을 O를 기준점으로 정렬한다.

메쉬 모델의 꼭지점들을 v_i 라고 하고 꼭지점의 개수를 c 라고 하며 이 꼭지점들로 이루어진 집합을 V 라고 한다. 다음 식이 성립됨을 알 수 있다.

$$\{v_i | v_i \in V, 0 < i \leq c\} \tag{1}$$

$v_i \in V$ 인 점 v_i 를 선택하고 원점 O까지의 거리를 구하여 크기에 따라 v_i 를 오름차순으로 정렬한다. 정렬된 꼭지점들의 집합을 V_R 이라 하고 집합 내의 순서를 기호 " $<, >$ "로 표기한다.

정렬 순서:

Step 1: 위에서 산출한 모든 꼭지점의 원점 대한 거리의 크기를 정렬하기 위하여 $i \neq j$ 일 때, $|v_i R_c| = |v_j R_c|$ 이면, $|v_{ix} R_{cx}|$ 와 $|v_{jx} R_{cx}|$ 값을 비교하여 작은 값을 갖는 꼭지점을 앞에 둔다.

Step 2: Step 1에 의하여 순위가 정해지지 않으면, 즉, $|v_{ix} R_{cx}| = |v_{jx} R_{cx}|$ 이면, $|v_{iy} R_{cy}|$ 와 $|v_{jy} R_{cy}|$ 의 값을 비교하여 step 1과 같은 방법으로 우선순위를 정한다.

Step 3: Step 2에 의하여 순위가 정해지지 않으면, 즉 $|v_{iy} R_{cy}| = |v_{jy} R_{cy}|$ 이면, $|v_{iz} R_{cz}|$ 와 $|v_{jz} R_{cz}|$ 의 값을 비교한다. $i \neq j$ 이므로 $|v_{iz} R_{cz}| \neq |v_{jz} R_{cz}|$ 이다.

위의 단계를 통하여 서로 다른 순위를 가지는 메쉬 모델의 모든 꼭지점들의 집합 V_R 를 정할 수 있다.

다음 정렬된 모든 꼭지점을 기준으로 워터마크를 삽입한다.

메쉬 모델을 이루는 삼각형 면의 정보로 이루어진 집합을 F라하고, F의 원소인 각 삼각형을 m_i 라 하며, 삼각형의 개수를 e 라고 한다. 다음 식이 성립됨을 알 수 있다.

$$\{m_i | m_i \in F, 0 < i \leq e\} \tag{2}$$

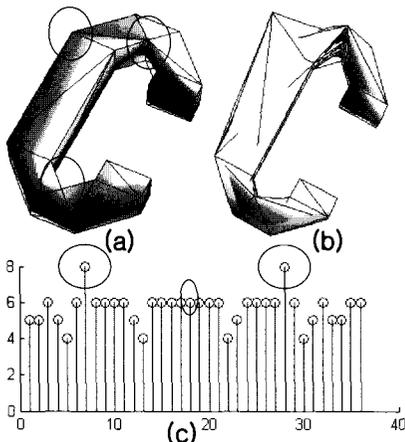
여기서 $m_i = (n_s, n_r, n_t)$

(n_s, n_r, n_t) 는 각각 3개의 꼭지점의 인덱스를 나타내며 정수(integer) 값을 갖는다. 꼭지점의 인덱스 값은 집합 V_R 의 원소 v_i 와 1:1로 대응된다.

본 연구에서는 삽입하는 워터마크 데이터는 k 차원의 비트열 $A_k = (a_1, a_2, \dots, a_k)$ 로 구성된다. 워터마크 정보의 강인성을 고려하여 반복 횟수 c 를 설정하여 삽입한다. 삽입되는 정보를 $mark(i)$ 라고 하면, $k \leq i \leq c \cdot k$ 이다. 삽입할 수 있는 워터마크 정보의 양은 삼각형 면의 개수인 e 와 동일하다.

$$\{mark(i), 0 < i \leq e\} \tag{3}$$

워터마크 정보는 m_i 의 원소 값의 순서 변경 방식으로 삽입된다. 처음으로 선택한 꼭지점(v_i)을 포함하는 삼



[그림 6] 기준 좌표계의 꼭지점 설정

각형을 집합 F에서 찾는다.

만약 m_i 라고 하면, $m_i = (n_s, n_r, n_t)$ 이다.
 삽입하려는 워터마크 정보가 1이면, 집합 V_R 의 원소를 비교해 보고 대응하는 인덱스 값이 오름차순으로 정렬 되도록 한다.

```
If  $m_i = (n_s, n_r, n_t)$  에서  $n_r < n_t$ 이면
 $m_i = (n_s, n_r, n_t)$ 
else if  $m_i = (n_s, n_r, n_t)$ 에서  $n_r > n_t$ 이면
 $m_i = (n_s, n_t, n_r)$ 
end
```

삽입하려는 워터마크 정보가 0이면, 집합 V_R 의 원소를 비교해 보고 대응하는 인덱스 값이 내림차순으로 정렬 되도록 한다.

```
If  $m_i = (n_s, n_r, n_t)$  에서  $n_r < n_t$ 이면
 $m_i = (n_s, n_t, n_r)$ 
else if  $m_i = (n_s, n_r, n_t)$ 에서  $n_r > n_t$ 이면
 $m_i = (n_s, n_r, n_t)$ 
end
```

기준 좌표계의 원점(O)을 기준 점으로 정렬한 집합 V_R 내의 꼭지점의 순서에 따라 모든 삼각형에 대하여 워터마크 삽입 절차를 진행하면 워터마크 삽입이 완료 된다.

정보의 삽입은 모델의 삼각 메쉬의 개수와 연관되며 삽입량은 e 를 초과할 수 없다.

즉 $\{mark(i), 0 < i \leq e\}$ 이다.
 삽입과정이 완료되면 원본 데이터와 같은 꼭지점 리스트를 가지도록 재 정렬한다.

3.4.3. 워터마크 추출 알고리즘

워터마크 추출은 워터마크 삽입 알고리즘의 역 과정으로서 다음과 같은 순서로 진행된다.

Step 1: 3차원 모델에서 꼭지점 valence값을 구하고 기준 좌표계 설정 시 사용한 3개의 꼭지점을 찾은 후 기준 좌표계 원점(O)을 구한다.

Step 2: 기준 좌표계 원점의 좌표 값에 근거하여 모든 꼭지점을 오름차순으로 정렬하고 꼭지점들의 집합을 V_R 라고 한다.

Step 3: 집합 F의 모든 삼각 메쉬에 대하여 순차적으로 워터마크 정보를 읽어 들인다. $n_r < n_t$ or $n_r > n_t$ 를 판단하여, 워터마크 정보를 읽어 들인다. 즉,

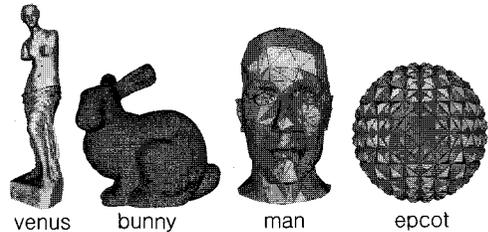
```
If  $m_i = (n_s, n_r, n_t)$ 에서  $n_r < n_t$ 이면,
 $mark(i) = 0$ ;
else If  $m_i = (n_s, n_r, n_t)$ 에서  $n_r > n_t$  이면,
 $mark(i) = 1$ ;
end
```

집합 V_R 를 기준으로 마지막까지 읽어 들여 정보를 구성하면 삽입된 워터마크 정보인 $mark(i)$ 를 추출할 수 있다.

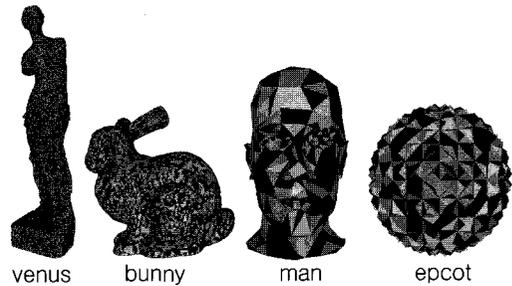
즉, $mark(i)$ 는 $\{mark(i), 0 < i \leq e\}$ 삽입한 워터마크정보는 필요에 따라 난수열 혹은 정보 은닉을 목적으로 한 데이터일 수도 있다.

IV. 알고리즘 평가

기존의 대부분 연구⁴⁻¹⁰⁾들은 애니메이션, 시뮬레이션, 게임 등과 같은 분야의 저작권 보호를 위해 개발되었다. 본 연구에서 제안한 알고리즘은 애니메이션이나 게임이



(그림 7) 실험용 메쉬 모델



(그림 8) 워터마크가 삽입된 메쉬 모델

(표 1) 실험용 메쉬 모델 파라미터

모델	venus	bunny	man	epcot
꼭지점	238965	8171	428	770
면	476159	16338	839	1536
유형	closed	closed	Opened	closed
정밀도	10^{-5}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-3}
valence	15(max)	11(max)	12(max)	13(max)

[표 2] 워터마크 삽입 전/후 파라미터 비교

메쉬 모델명		venus	bunny	man	epcot
원본	꼭지점	238965	8171	428	770
	면	476159	16338	839	1536
삽입 후	꼭지점	238966	8171	429	773
	면	476161	16338	841	1542
삽입량	c=2	238080	8169	420	771
	c=3	158720	5446	280	515

아닌 RP 시스템처럼 고 정밀도가 요구되는 시스템을 대상으로 한 알고리즘으로서 데이터의 무결성 인증을 목적으로 하였다.

실험에 사용된 모델은 모두 5개로 [그림 7]과 같으며 [그림 7]의 메쉬 모델의 관련 파라미터는 [표 1]과 같다.

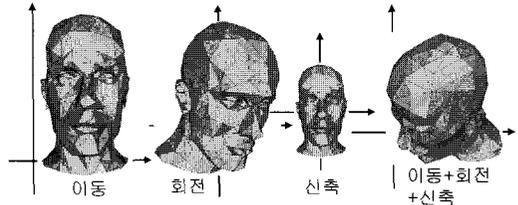
[표 1]에서 Valence는 기준 좌표계 설정에 사용되는 max valence vertex를 나타낸다. [표 2]에서는 워터마크 삽입 전 후, 3차원 메쉬 모델의 변화를 나타내기 위하여 꼭지점 좌표의 개수와 면의 개수를 표로 보여줬다. [그림 8]은 본 연구의 알고리즘으로 워터마크를 삽입한 후, "0"이 삽입된 부분을 흰색으로, "1"이 삽입된 부분을 검은 색으로 보여준 것이다. 모델 "epcot"에서 보는 바와 같이, 규칙적인 기하학적 모델일 경우 기준좌표계 설정 시에 Valence 값의 순서를 결정하기 위한 꼭지점 추가 연산이 필요하다. 그리고 반복횟수에 근거한 c=2, c=3일 때의 워터마크 삽입량을 [표 2]에서 보여줬다.

4.1. 기하학적인 변환 공격

3차원 모델에서의 기하학적인 변환은 이동, 신축, 회전 등 3개의 기본 선형 오퍼레이터(Basic Linear Operator)의 선형 조합에 근거하여 실행된다. 변환 전후의 꼭지점 좌표 값을 각각,

$$P = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}, P' = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} \text{라고 하면}$$

기하학적 변환의 기본 오퍼레이터(T는 이동, R은 회전, S는 신축)는 다음과 같다^[13].



(그림 9) 기하학적 변환

[표 3] 기하학적 변환에서의 변량과 불변량

변수\변환	이동	회전	신축	조합
$R_x/R_y/R_z$	No	No	No	No
face 연결	No	No	No	No
valence	No	No	No	No
좌표 값	Yes	Yes	Yes	Yes
집합 V_R 순서	No	No	No	No
꼭지점 개수	No	No	No	No
면의 개수	No	No	No	No

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, R_z(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R_x(\theta), R_y(\theta), S = \begin{pmatrix} S_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

본 연구에서 제안한 측도불변량(\bar{D})과 그래프적 불변량은 이러한 기본 오퍼레이터에서 불변성이 유지된다. [그림 9]는 이동, 회전, 신축 및 조합으로 실행한 기하학적 변환의 결과이다.

[표 3]에서는 워터마크 알고리즘과 관련된 변수들을 기하학적인 변환(Uniform)의 불변량과 변량(표 3의 No/Yes)으로 분류하여 보여줬다.

Bunny 모델에서는 워터마크 삽입과정에서 꼭지점이 추가되지 않았으며, 그 외의 모델 Venus, man, epcot에서는 각각 1, 1, 3개의 꼭지점이 추가되었다. 이동, 신축, 회전 변환은 추가된 꼭지점의 좌표 값만 변화시키는 것으로 확인되었으며, 꼭지점의 Valence 에는 영향이 없는 것으로 확인되었다. 테스트한 모델 모두 각 꼭지점의 연결정보인 face의 연결 상태가 변하지 않았으며, 삼

입된 워터마크 정보도 추출할 수 있었다. 본 연구에서 제안한 워터마킹 알고리즘은 기하학적인 변환에 강인성을 보존하였다.

4.2. 기타 형태보존 변환 공격

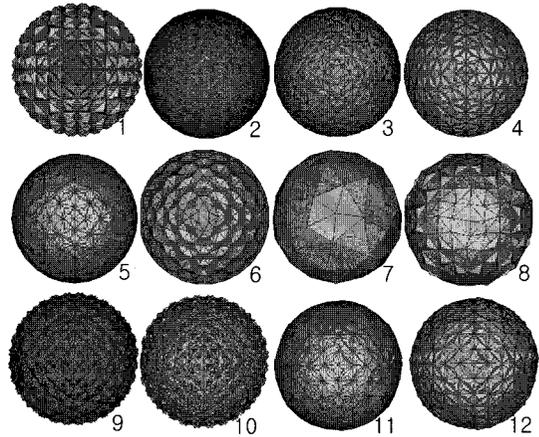
본 연구에서 제안한 기준 좌표계 설정방식은 꼭지점 저장순서를 변경하더라도, 축도 불변량(\bar{D})을 이용하여 꼭지점 순서를 재정렬하기 때문에 꼭지점의 저장순서 변경에 독립적이다. 따라서 꼭지점 저장 순서를 변경하는 공격에 강인하다. 마찬가지로 STL 파일에서 사용되는 facet 저장순서를 변경하는 공격에도 강인하다.

STL 및 PLY 파일은 ASCII 및 Binary 두 가지 표준 포맷이 존재하며, 본 연구에서는 Binary 포맷을 ASCII로 전환하여 테스트하였다. DAE 파일은 COLLADA version=1.4.1로 테스트 하였으며, OBJ, OFF 파일은 2007년 3월 배포된 Meshlab 1.0⁽¹⁴⁾ 프로그램으로 변환한 후 테스트 하였다. STL 파일은 Import시, 프로그램에 따라 선택사항으로 복사본 사용여부에 관한 선택사항이 존재한다. 복사본을 사용하지 않을 경우, 원본 그대로 불러들이며, 복사본을 사용할 경우, 파일 내에 중복된 꼭지점이 생성된다. 중복된 점은 집합 V_R 에서 원소 정렬 시 고려하지 않았으며 복사본 사용 여부에 상관없이 테스트에 사용한 모델 모두 워터마크를 추출할 수 있었다.

4.3. 형태 변형 공격

[표 4] 파일 포맷 관련 설명

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



[그림 10] 형태 변경 공격기법

3차원 그래픽 분야에는 다양한 공격기법이 존재한다. 그 중 많이 사용되는 공격기법들을 원본 모델 [그림 10의 1]과 함께 보여줬다. 기본적으로 Remeshing [그림 10의 2, 3, 9, 10], 평활화공격 [그림 10의 4, 5, 11, 12], decimation [그림 10의 7, 8], Simplification, Re build Surface [그림 10의 6] 등이 있다. [그림 10]에서 보는 바와 같이 이런 공격기법들은 3D 메쉬 모델의 형태를 변형시킨다.

Remeshing 공격에서는 본 알고리즘에서 설정한 기준 좌표계가 변환되어 워터마크 삽입 시에 설정한 기준 좌표계를 복구할 수 없었다. 추가된 꼭지점의 수 [표 5]와 함께 그래프적 불변량도 변하였으며, 축도 불변량 \bar{D} 에 의하여 구한 집합 V_R 의 원소들이 오름차순 정렬 순서도 꼭지점의 증가와 함께 증가되었다.

평활화 공격에서는 본 알고리즘에서 사용한 그래프적 불변량인 꼭지점의 valence는 변하지 않지만 꼭지점의 상대적 위치가 변경되었다. [그림 10]의 4, 5, 11, 12에서 변형 결과를 원본 모델 [그림 10의 1]과 함께 나타내었다. 평활화 공격은 축도 불변량(\bar{D})의 기초인 V_R 의 정렬 순서를 변환시킨다.

Decimation 공격에서는 꼭지점을 제거한 후, 면 (faces)을 구성하기 위하여 새롭게 연결정보를 구성해야 한다. 3D 메쉬 모델의 기하학적 정보가 모두 변한다. 실제 쾌속조형 파일은 평활화와 같은 공격을 진행하지 않는다. 이런 공격을 진행할 경우, [표 5], [표 6], [표 7], [표 8]과 같이 워터마크가 제거된다.

[표 5, 6, 7, 8]에 대한 설명[14]:

RM: Remeshing

- L: Loop Subdivision Surface

- B: Butterfly Subdivision Surface

- M: Midpoint Subdivision Surface

S: Smoothing

- L(1): Laplacian Smooth 1차

- L(2): Laplacian Smooth 2차

- T: Two Step Smooth

D: Decimation

- Q(1): Quadric Edge Collapse Method 1차

- Q(2): Quadric Edge Collapse Method 2차

R: Re build

- FP: from Point

V/F: vertices/faces

abs and %: Threshold(abs and %)^[14]

정밀도: 모델형태 변형여부

워터마크: 워터마크 추출여부

비교[표 5]: [그림 10]에서 대응하는 결과 이미지 순서

그 외, 메쉬의 간단화, 파라미터화 등 꼭지점의 접속 관계를 변형하는 공격에서도 삽입된 워터마크를 추출할 수 없었다. [표 5], [표 6], [표 7], [표 8]에서는 4개의 모델에 대하여 변형 공격 한 후의 데이터 변화를 나타냈다. [표 9]에서는 기존의 알고리즘과 제안한 알고리즘의 강인성을 비교했다.

제안한 알고리즘은 삽입되는 정보의 양이 기존 알고리즘^[4-10]보다 많으며, STL에 적용 가능한 알고리즘^{[12][13]}과는 비슷하다. 천과 김^{[12][13]}의 알고리즘은 STL 파일에 특화된 알고리즘이며, 파일 변환을 실행할 경우 워터마크 정보가 사라지지만 제안한 알고리즘은 파일 변환에 강인하며, 이동, 신축, 회전 등 기하학적인 변환에도 강인한 것으로 나타났다. Chang^[10]이 제안한 알고리즘은 이동, 신축, 회전, 패킷 저장순서 변경, 꼭지점 저장순서 변경, 파일 변환 등에 강인하며, 부분적인 형태 변형공격에도 강인성을 유지한다. 하지만 꼭지점 위치변경으로 워터마크를 삽입하였기 때문에 요구하는 정밀도를 만족시킬 수 없었으며 쾌속조형시스템에서는 사용할 수 없다. 그 외 Obuchi^{[6][7]}의 알고리즘도 워터마크 삽입에 의한 메쉬모델의 형태 변형 때문에 쾌속조형시스템에서 사용할 수 없다는 약점이 있다.

4.4. 워변조 검출

[그림 11]은 bunny 모델의 부분적인 꼭지점을 선택하여 평활화를 실행한 후, 워터마크 추출 이미지와 비교하여 보여준 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 “워변조”된 부분에서는 삽입된 워터마크 정보와 추출한 정보가 일치하지 않다. 따라서 삽입된 워터마크 정보를 이용하여 공격을 가한 부분을 탐지할 수 있으며, 워변조 여부를 검출할 수 있다. 제안한 알고리즘의 강인성은 기준 좌표계 설정 시 사용된 3개의 꼭지점을 기초로 한다. 만약 [그림 11]과 같은 부분 평활화 등 공격방법으로 그래픽 불변량에 기초하여 선택한 3개의 점 중 임의의 한 점을 변화시킬 경우, 워터마크 추출이 불가능하며 따라서 워변조 검출도 불가능하다는 제한성이 있다.

V. 결론

본 연구에서는 쾌속조형 시스템의 고정밀도 요구사항을 만족시키는 Semi-fragile 워터마킹 알고리즘을 제안하였다. 기존의 대부분 알고리즘은 워터마크 정보의 삽입을 위하여 원본 모델의 형태를 변형시켰다. 이런 알고리즘은 쾌속조형 시스템의 정밀도를 저하시키기 때문에 적용에 한계가 있다. 제안한 알고리즘은 이 점을 극복하였으며, 정보 삽입 전/후, 모델의 형태에 변화가 없다. 제안한 알고리즘은 이동, 신축, 회전, 파일 포맷 변환, 꼭지점 저장순서 변경과 같은 형태 보존 변환에 강인하며 일반적인 형태변형 공격에는 취약하다. 본 알고리즘은 데이터 무결성 인증에 사용할 수 있으며, 고정밀도 시제품 제작이 필요한 기계, 자동차, 항공우주 및 조선 등 분야에서 다양한 응용이 기대된다. 게임, 애니메이션 등 분야에서는 제안한 알고리즘을 이중 삽입함으로써 데이터의 무결성을 인증할 수 있다. 그 외 제안한 알고리즘은 많은 정보를 삽입할 수 있기 때문에 정보은닉 알고리즘으로도 사용될 수 있다.

참고문헌

- [1] 이공래, 황정태, STEPI 한국기술정책연구원, “다 분야 기술융합의 혁신시스템 특성분석”, 정책연구 2005-7. pp. 88-114
- [2] 정두수, 피혁연구소 생산자동화팀, PR Service Bureau “RP 기술의 도입절차와 활용” pp. 15-20.
- [3] <http://www.3dsystems.com>
- [4] 김민수, 조재원, Remy Prost, 정호열, “꼭지점 좌표 벡터 크기 값의 시간축 웨이블릿 변환을 이용한 3차원 메쉬 시퀀스의 블라인드 워터마킹”, 한국통신학회논문지, 2007. 3
- [5] M.S Kim, R. Prost, H.Y.Chung, H.Y.Jung, “A Blind Watermarking for 3 D Dynamic Mesh Model Using Distribution of Temporal Wavelet Coefficients”, International Workshop on Multimedia Content Representation, Classification and Security 2006, Sept, 2006
- [6] R. Ohbuchi, H. Masuda, and M. Aono, “Watermarking Three Dimensional Polygon Models” Proceeding of ACM Multi media, pp. 261-272, Nov. 1997
- [7] R. Ohbuchi, S. Takahashi, T.Miyazawa, and A. Mukaiyama, “Watermarking 3D Polygonal Meshes in the Mesh Spectral Domain” Proceeding of Graphics Interface, pp. 9-17, 2001
- [8] O Benedens, “Geometry based watermarking of 3D models,” IEEE CG&A, pp. 46-55, Jan/Feb. 1999
- [9] S. Kanai, H. Date, and T. Kishinami, “Digital Watermarking for 3D Polygons Using Multiresolution Wavelet Decomposition,” Proceedings sixth IFIPWG 5.2 GEO 6, pp. 296-306, Dec. 1998
- [10] 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.
- [11] 천인국, 김기석, “3차원 기하학적 형상인 STL의 디지털 워터마킹 방법” 대한민국특허청 공개특허 10-2004-0002250, 공개일자 2004. 1. 7
- [12] 김선형, “3차원형상 워터마킹의 삽입 및 추출”, 대한민국특허청 공개특허 10-2004-0003185, 공개일자 2004. 1. 13
- [13] Simon & Schuster/A Viacom Company “Computer Graphics”, 1997 by Donald Hearn and M. Pauline Baker Published by Prentice Hall Inc
- [14] <http://meshlab.sourceforge.net/>

 〈著者紹介〉

**최기철(CUI JIZHE) 정회원**

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

**김종원(Jong-Weon Kim) 정회원**

1989년 : 서울시립대학교 전자공학과(공학학사)
 1991년 : 서울시립대학교 전자공학과(공학석사)
 1995년 : 서울시립대학교 전자공학과(공학박사)
 2005년~현재 : 상명대학교 디지털저작권보호연구센터 선임연구원
 1996년~2000년 : 주성대학 정보통신학과 조교수
 2000년~2004년 : (주)마크애니 부설연구소장
 2005년~현재 : 상명대학교 디지털저작권보호연구센터 책임연구원
 <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, 전자정부솔루션, 저작권보호 및 관리기술, 정보보호응용기술