

RP 시스템 적용을 위한 3차원 메쉬 모델의 블라인드 워터마킹

정회원 최 기 철*

A Blind Watermarking Algorithm of 3D Mesh Model for Rapid Prototyping System Application

Cui Jizhe* *Regular Member*

요 약

본 논문에서는 쾌속조형시스템(Rapid Prototyping System)에 적용 가능한 블라인드 워터마킹 알고리즘을 제안한다. 3차원 메쉬 모델은 쾌속조형시스템의 시제품 제작 전 단계인 CAD 모델링 단계에서 사용된다. STL 형태의 메쉬 모델을 이용하여 제작할 시제품의 오류를 확인하고 수정하여 정밀도를 높이고 데이터의 오류를 줄인다. 모델링 단계의 메쉬 모델 오류는 시제품의 정밀도와 직접 연결되기 때문에 시제품 제작 전 단계에서는 이동, 회전과 같은 모델의 형태를 변형시키지 않는 변환은 사용하지만 데시메이션, 평활화 등의 변환은 사용되지 않는다. 기존의 대부분 워터마킹 알고리즘은 모델에 특정 노이즈를 추가하는 방법으로 워터마크 정보를 표현한다. 이런 알고리즘은 쾌속조형시스템에 사용할 경우 시제품의 정밀도를 저하시키기 때문에 사용이 극히 제한적이다. 제안한 알고리즘은 워터마크 삽입 전후 모델의 형태가 변하지 않으며 쾌속조형시스템과 같은 고정밀도를 요구하는 기계공학 분야에서 제작자 정보의 표현, 데이터의 무결성 인증 등 목적으로 사용할 수 있으며, 가상현실 등 다른 분야에서는 정보은닉 용도로도 사용할 수 있다.

Key Words : Rapid Prototyping, Watermarking, Mesh Model, Mesh Center, Triangle Mesh

ABSTRACT

In this paper, we proposed a blind watermarking algorithm to apply to the rapid prototyping system. The 3D mesh model is used in the step of the CAD modeling before the making of the prototype system of the rapid prototyping system. STL type mesh modeling which is used in this system reduces the error of the system and improves the accuracy of the system. In the step of the CAD modeling, some transformations which do not change the model accuracy are used, but some transformations which change the model accuracy are not used because the mesh model error is related to the accuracy of the prototype system.

Most watermarking algorithms embedded a specific random noise as the watermark information into the model. These kinds of the algorithms are not proper to the 3D model watermarking. The proposed algorithm can be used for the accurate prototyping system because it does not change the model after the watermark embedding. This means it can be used for the copyright marking and the data integrity.

1. 서 론

3차원 프린터 기술로 불리는 쾌속조형시스템은 이

미지처리, 전자제어, 고분자 재료, 광학 등 다양한 분야의 기술들이 융합되어 형성된 고부가가치 제조업이다.^[1] 3차원 메쉬 모델은 쾌속조형시스템의 CAD

* 상명대학교 디지털저작권보호연구소 연구원(cuijizhe@smu.ac.kr)

논문번호 : KICS2007-09-406, 접수일자 : 2007년 9월 11일, 최종논문접수일자 : 2007년 11월 27일

모델링 단계에서 적용되는데 여기서 사용되는 STL 파일은 제작된 시제품의 정밀도에 직접적인 영향을 미친다. 실제 생산 공정에서는 데이터의 오류를 줄이고 정밀도를 향상시키기 위하여 제작된 3차원 데이터를 확인, 검증, 수정하는 소프트웨어를 사용하고 있다.^[2] 다양한 분야가 융합된 쾌속조형산업의 특성상 공동 협업의 최종결과물로 주고받는 메쉬 모델에 대한 무결성 보장과 인증에 대한 요구가 갈수록 높아지고 있다.

데이터의 무결성 보장과 인증 분야에서는 암호화 기술과 워터마킹 기술이 많이 사용되고 있다. 하지만 쾌속조형산업의 특성상 암호화의 사용은 극히 제한적이다. 복호화 후 3차원 메쉬 모델을 시제품의 용도에 맞게 적용하는 과정이 필요하기 때문이다. 워터마킹 기술은 모델에 직접 정보를 삽입하기 때문에 이러한 약점을 극복할 수 있으며 메쉬 모델의 무결성 인증으로 사용하기 적합한 기술이다.^[3]

메쉬 모델과 관련된 워터마킹 관련 연구는 이미 지, 비디오 분야와 함께 다양하게 진행되었다. 3차원 메쉬 모델에서 워터마크를 삽입하기 위해 사용하는 정보에는 꼭지점의 좌표 값, 모서리의 길이, 다각형의 면적 혹은 유사도, 면적의 비, 면이나 꼭지점의 색상, 꼭지점의 법선 벡터 등이 있다.^[4]

Ohbuchi가 처음으로 3차원 모델 워터마킹에 관한 개념과 함께 TSQ, TVR 알고리즘을 제안하였다.^[5] TSQ 알고리즘에서는 삼각형의 두 변의 길이의 비와 삼각형의 밑변과 높이의 비를 이용하여 워터마크를 삽입하였다. 특정한 비례 값을 갖도록 꼭지점 위치를 수정, 변형시킴으로써 워터마크를 삽입하였다. TVR 알고리즘에서는 사면체의 부피의 비를 사용하였다. 특정 꼭지점의 좌표변경방법으로 사면체의 부피의 비를 수정하여 워터마크 정보를 표현하였다. Chang은 유사한 방법으로 네 개의 삼각형을 기본 인자로 하여 모서리 길이의 비를 변형시키는 방법으로 워터마크를 삽입하였다.^[6] Benedens는 VFA, TFA 등 두 가지 대용량 정보 삽입이 가능한 워터마킹 알고리즘을 제안하였다.^[7] VFA 알고리즘에서는 한 삼각형을 지정한 후 꼭지점으로부터 지정한 삼각형의 질량 중심까지의 거리로 꼭지점들을 여러 개의 집합으로 나눴으며 집합 내의 꼭지점의 좌표 값을 수정하여 워터마크를 삽입하였다. TFA 알고리즘에서는 한 삼각형을 지정한 후, 지정한 삼각형과 모서리를 공유하는 모든 삼각형을 찾아내고 공유하지 않는 꼭지점으로부터 공유하는 삼각형의 모서리까지의 거리를 크기에 따라 정렬한 후, 각 삼각형의 높이의

값을 수정하여 워터마크를 삽입하였다.

Benedens는 법선 벡터를 이용하여 워터마크를 삽입하는 알고리즘도 제안하였다.^[8] 원본을 필요로 하는 알고리즘으로서 삼각메쉬의 법선 벡터 분포를 변화시켜서 워터마크를 삽입하였다. Toub는 효과적으로 저작권 정보를 삽입하는 워터마킹 알고리즘을 제안하였다.^[9] 위상 정보를 변화시키지 않는 조건하에서 원본 모델의 꼭지점을 반대방향으로 이동시켜서 두 개의 모델 A와 B를 얻는다. 그다음 삽입하려는 워터마크 정보에 근거하여 비트 정보 1을 삽입할 경우, 모델 A의 좌표 값을 사용하고 비트 정보 0을 삽입할 경우 모델 B의 좌표 값을 사용하였다. 알고리즘은 이동, 회전, 스케일링, 크로핑, 꼭지점 재정렬 등의 공격에 일정한 강인성을 유지하지만 워터마크 추출 과정에서는 삽입 시 사용한 A모델, B모델의 정보와 원본이 필요하다는 약점이 있다. Praun은 전형적인 공격에 비교적 강인한 워터마크 알고리즘을 소개하였다.^[10] 메쉬 모델의 꼭지점 좌표를 입력으로 하여 스칼라 기저 함수를 만들었으며 이를 이용하여 삽입 강도를 설정한 후 각 꼭지점 좌표를 변형시켰다. 테스트 결과에 의하면 기하학적 변환을 포함한 대부분 공격에 강인하다.

기존의 연구^[4-10]들은 대부분 알고리즘의 강인성과 정보의 삽입량을 기조로 하였으며 가상현실, 게임 등 분야의 저작권 보호용으로 많이 사용된다. 이러한 알고리즘들은 쾌속조형과 같은 고정밀도가 필요한 시스템의 특성을 고려하지 않았기 때문에 산업현장에서의 용도는 극히 제한적이다.^[11] 꼭지점에 대한 위치변화는 3차원 형상을 왜곡시키며 쾌속조형시스템에서는 시제품의 정밀도 하락으로 표현된다.^[12]

본 논문에서는 쾌속조형시스템의 고정밀도 요구 사항을 고려하여 메쉬 모델에 사용되는 데이터 처리기법을 형태변형공격과 형태불변공격으로 나눠서 분석한다. 제안하는 알고리즘은 메쉬 모델의 무결성 인증에 사용 가능한 블라인드 워터마킹 알고리즘으로서 쾌속조형시스템에서 데이터의 무결성 인증용으로 사용 가능하다. 제II장에서는 쾌속조형시스템과 메쉬 모델에 대하여 간단히 설명한다. 제III장에서는 워터마크 삽입/추출 알고리즘을 설명한다. 제IV장에서는 제안한 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 실험결과를 분석하고 제V장에서는 결론을 맺는다.

II. 쾌속조형시스템과 메쉬 모델

쾌속조형시스템은 페놀수지와 같은 쾌속응고 재

료를 균일한 두께로 적층(積層)하는 방식으로 물리적 모델을 제작하는 시스템이다.^[13]

쾌속조형시스템을 적용함으로써 기존의 신제품 개발 시간을 단축하여 효율성을 높이며, 복잡한 기하학적 형상도 조형이 가능하기 때문에 설계자가 실제 모델을 직접 조립 또는 해석할 수 있다는 장점이 있다. 시제품의 성능을 위해서는 CAD 모델링 단계에서 3차원 모델의 정밀도를 보장해야 한다.^[14]

메쉬 모델은 꼭지점의 좌표 값으로 구성된 테이블, 모서리 테이블, 꼭지점의 인덱스로 표현된 삼각 메쉬 등 세 개의 테이블 목록으로 구성된다.

쾌속조형시스템에서 많이 사용되는 파일 형식은 삼각메쉬 기반의 STL^[15]이며 PLY, OFF, 3DS 등의 외부 파일 형식으로부터 변환 할 수 있다.

본 연구에서는 쾌속조형시스템에서 사용되는 3차원 메쉬 모델을 연구의 대상으로 하기 때문에, 모델은 삼각메쉬 모델로 한정하며 파일 형식은 흔히 사용되는 PLY, DAE, OBJ, OFF, STL, 3DS 등으로 제한한다.

III. 제안한 알고리즘

3차원 메쉬 모델에서 사용되는 이동, 회전, 스케일링 등 기하학적인 변환 및 꼭지점 재정렬, 파일 포맷 변환 등은 모델의 형태 보존 변환이며 메쉬 단순화, 평활화, 리메싱 등은 모델의 형태를 변형시키는 변환이다. 쾌속조형시스템에서 사용되는 메쉬 모델의 무결성을 입증하기 위해서는 워터마킹 알고리즘이 형태 보존 변환에서 강인성을 유지해야 한다.

기존의 연구^[5-12]에서 보는 바와 같이 워터마크 삽입을 위해서는 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

1. 알고리즘은 꼭지점 좌표 값에 의존하지 말아야 한다. 꼭지점 좌표 값은 평행이동, 스케일링과 같은 변환에도 쉽게 사라진다.
2. 삽입된 워터마크 정보는 기본적인 기하학적 변환인 이동, 스케일링, 회전변환에 강인성을 유지해야 한다.
3. 꼭지점의 좌표 값과 면 정보를 기본으로 하여 워터마크를 삽입해야 한다. 단순히 법선 벡터 정보만 사용하거나 색상 정보만 사용할 경우 파일 포맷 변환 시 제거된다.
4. 쾌속조형시스템의 정밀도를 고려하여 워터마크 정보를 삽입한 후, 원본 모델과 워터마크된 모델의 형태에 변화가 없어야 한다.

제안하는 알고리즘은 기준 좌표계 설정 과정, 꼭지점 정렬 과정, 워터마크 정보의 생성 및 워터마크 삽입/추출 과정으로 구성된다.

3.1 기준 좌표계 설정

3차원 메쉬 모델에서는 다음과 같은 두 개의 중심점을 기준으로 사용한다. 경계박스의 중심인 메쉬 센터와 좌표계 원점(0, 0, 0)이다. 회전변환을 실행할 경우, 경계박스의 모양이 변하기 때문에 모델과 메쉬 센터의 상대적인 위치도 변한다. 원점도 이동/스케일링/회전 변환을 실행할 경우, 메쉬 모델과의 상대적 위치가 변한다. 그렇기 때문에 워터마크 정보의 삽입 및 추출의 기준으로 사용할 수 없다.

제안한 알고리즘의 기준 좌표계 설정은 꼭지점들의 1-ring 값을 이용한다[그림1].

꼭지점 v_i 와 인접한 꼭지점들의 집합을 1-ring이라 하며 1-ring 집합의 크기를 꼭지점의 1-ring값이라고 한다.

우선 메쉬 모델의 모든 꼭지점들의 1-ring 값을 구하고 그 값에 따라 꼭지점들을 내림차순으로 정렬하며 세 개의 꼭지점 선택이 완료되면 정렬을 끝낸다. 만약 1-ring 값이 같은 꼭지점이 존재하면 다음과 같은 규칙을 적용하여 정렬한다.

- 규칙1: 꼭지점의 2-ring 값을 구하여 값이 큰 꼭지점을 앞에 둔다.
- 규칙2: 2-ring 값도 같을 경우, 인접한 꼭지점들 중 최대 길이를 갖는 모서리 중심점에 [그림 2]와 같이 꼭지점을 추가한다.
- 규칙3: 1-ring 및 2-ring 값이 같은 여러 개의 꼭지점이 존재할 경우, 같은 1-ring에 속하지 않는 세 개의 꼭지점을 선택하여 규칙 2를 반복한다.

내림차순으로 정렬된 꼭지점 집합에서 처음 세 개의 꼭지점을 선택한 후 다음과 같은 방법으로 기준 좌표계를 설정한다.

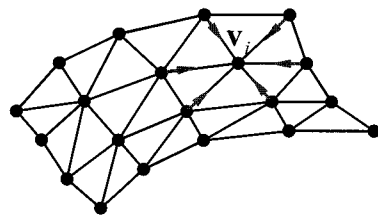


그림 1. 꼭지점의 1-ring 값(6)

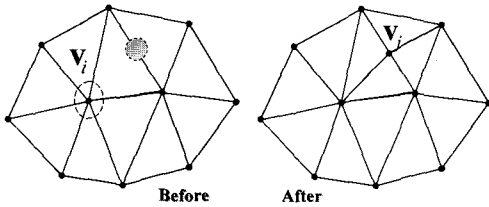


그림 2. 꼭지점 추가

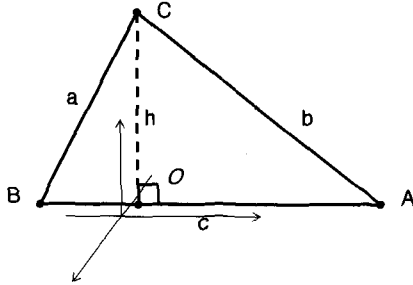


그림 3. 기준 좌표계 설정

- Step 1: [그림 3]과 같이 선택한 세 개의 꼭지점을 A, B, C 라하며 a, b, c의 길이를 구한다.
- Step 2: a, b, c 중 가장 긴 변에 수직선을 긋고 교점을 기준 좌표계 원점으로 한다.
- Step 3: 원점에서 {A, B} 중, 길이가 긴 점의 방향(\$\overline{OA}\$)을 기준 좌표계의 X축으로 설정한다.
- Step 4: 수직선(\$\overline{OC}\$)을 Z축으로 하고 벡터 \$\overline{OC}\$ 방향을 정의방향으로 한다.
- Step 5: 두 벡터 \$\overline{OA}\$, \$\overline{OC}\$의 외적벡터의 방향을 Y축으로 설정한다.

설정된 기준 좌표계는 기하학적 변환 시, 메쉬 모델과 함께 변하며 쉽게 중심점을 찾을 수 있다. 이는 워터마크 삽입을 위한 기준 설정 요구를 만족시킨다.

3.2 꼭지점 정렬

설정된 기준 좌표계의 원점을 \$v_0\$라고 하며 \$v_0\$을 기준으로 메쉬 모델의 모든 꼭지점을 정렬한다. 메쉬 모델의 꼭지점을 \$v_i\$, 꼭지점의 개수를 c, 꼭지점 집합을 V라고 하면 다음식이 성립된다.

$$\{v_i | v_i \in V, 0 < i \leq c\} \quad (1)$$

꼭지점 \$v_i \in V\$에서 \$v_0\$까지의 거리를 구하고 크기

에 따라 \$v_i\$를 오름차순으로 정렬한다. 정렬된 꼭지점들의 집합을 \$V_R\$이라 한다. 거리가 같을 경우, 다음과 같이 정렬한다.

- Step 1: 만약 \$i \neq j\$일 때, \$|v_i v_0| = |v_j v_0|\$이면 기준 좌표계의 X축까지의 거리를 비교하여 작은 값을 갖는 꼭지점을 앞에 둔다.
- Step 2: Step 1에 의하여 순위가 정해지지 않으면, 기준 좌표계의 Y축까지의 거리를 비교하며 작은 값을 갖는 꼭지점을 앞에 둔다.
- Step 3: Step 2에 의하여 순위가 정해지지 않으면, Z축까지의 거리를 비교하며 작은 값을 갖는 꼭지점을 앞에 둔다.

위의 단계를 통하여 서로 다른 순위를 가지는 메쉬 모델의 모든 꼭지점들의 집합 \$V_R\$를 구성한다.

3.3 삽입 알고리즘

정렬된 모든 꼭지점을 기준으로 워터마크를 삽입한다. 삼각메쉬로 이루어진 집합을 F라하고, F의 원소인 삼각메쉬를 \$m_s\$라 하며, 삼각메쉬의 개수를 e라고 하면 다음 식이 성립됨을 알 수 있다.

$$R_x \quad \begin{cases} \{m_s | m_s \in F, 0 < s \leq e\} \\ m_s = (i, j, k) \end{cases} \quad (2)$$

여기서 \$(i, j, k)\$는 삼각메쉬를 구성하는 세 꼭지점의 인덱스이다.

삽입하는 워터마크 정보는 비트열 \$(w_1, w_2, \dots, w_k)\$로 표현한다. 워터마크 정보의 강인성을 고려하여 반복 횟수 d를 설정하여 삽입한다. 삽입되는 정보를 mark(i)라고 하면 \$k \leq i \leq d \cdot k \leq e\$이다.

워터마크 정보는 \$m_s\$를 구성하는 꼭지점의 순서 변경 방식으로 삽입된다. 처음 선택한 꼭지점 \$v_i\$를 포함하는 삼각메쉬를 집합 F에서 찾고 \$m_s = (i, j, k)\$라고 한다.

만약 삽입하려는 워터마크 정보가 1이면, 집합 \$V_R\$의 원소를 비교해 보고 대응되는 인덱스 값이 오름차순으로 정렬되도록 한다.

$$\begin{aligned} & \text{if } j < k \\ & \quad m_s = (i, j, k) \\ & \text{else if } j > k \\ & \quad m_s = (i, k, j) \\ & \quad (i, k, j) \rightarrow (j, i, k) \\ & \text{end} \end{aligned} \quad (4)$$

만약 삼입하려는 워터마크 정보가 0이면, 집합 V_R 의 원소를 비교해보고 대응되는 인덱스 값이 내림차순으로 정렬되도록 한다.

```

if  $j < k$ 
     $m_s = (i, k, j)$ 
     $(i, k, j) \rightarrow (j, i, k)$ 
else if  $j > k$ 
     $m_s = (i, j, k)$ 
end
    
```

STL 포맷에서는 facet을 단위로 삼각메쉬를 표현하는데 facet에서는 법선 벡터를 이용하여 면의 방향을 지정한다. OFF, PLY 등의 포맷에서는 삼각메쉬를 표현하는 꼭지점 순서에 의해 면의 방향을 지정한다. 따라서 워터마크 정보를 삽입한 후 수식 (4)에 대한 처리 과정이 필요하다.

집합 V_R 의 꼭지점의 순서에 따라 모든 삼각메쉬에 대하여 삽입과정을 반복하면 워터마크 삽입이 완료된다. 완료된 후, 원본과 같은 꼭지점 리스트를 가지도록 재 정렬한다.

[그림 4]에서는 “man” 모델(꼭지점 : 428, 면 / 839) 및 그의 꼭지점의 분포를 보여주었다. [그림 5]에서는 “man” 모델의 꼭지점의 1-ring 값을 나타내고 있으며 기준 좌표계에 사용되는 세 개의 꼭지점을 점으로 보여주었다.

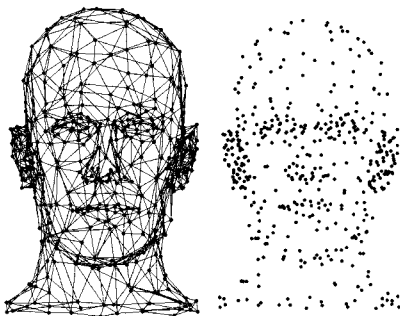


그림 4. “man” 모델 및 꼭지점 분포

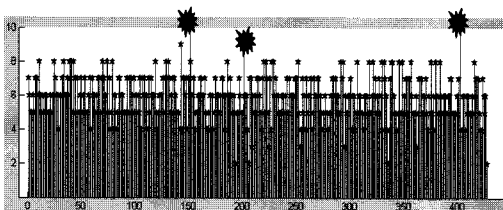


그림 5. “man” 모델의 1-ring 값

3.4 워터마크 추출 알고리즘

워터마크 추출은 워터마크 삽입 알고리즘의 역과정으로서 다음과 같은 순서로 진행된다.

- Step 1: 3차원 모델에서 꼭지점의 1-ring값을 구하고 기준 좌표계 설정에 사용된 세 개의 꼭지점을 찾은 후 원점 v_0 를 구한다.
- Step 2: v_0 의 좌표 값에 근거하여 모든 꼭지점을 오름차순으로 정렬하여 집합 V_R 를 구성한다.
- Step 3: 집합 F 의 모든 삼각메쉬에 대하여 순차적으로 워터마크 정보를 읽어 들인다.

```

 $m_s = (i, j, k)$ 에서
if  $j < k$ 
     $mark(i) = 0$ 
else if  $j > k$ 
     $mark(i) = 1$ 
end
    
```

집합 V_R 를 기준으로 모든 삼각메쉬를 읽어 들이면 워터마크 정보 추출이 완료된다.

IV. 알고리즘 평가

기존의 연구^[3-10]들은 대부분 알고리즘의 강인성과 정보의 삼입량에 초점을 맞췄으며 가상현실, 게임 등 분야의 저작권 보호용으로 많이 사용된다. 쾌속조형 시스템에서 이런 알고리즘을 사용할 경우, 메쉬 모델이 왜곡되어 시제품의 정밀도 하락으로 이어진다. 제안한 알고리즘은 워터마크 정보를 삽입한 후 메쉬 모델의 형태가 변하지 않기 때문에 쾌속조형시스템에서 메쉬 모델의 무결성 인증용으로 사용할 수 있다.

실험에서는 [그림 6]과 같이 네 개의 메쉬 모델을 사용하였으며 관련 파라미터는 [표 1]과 같다. [그림 7]에서는 제안한 알고리즘으로 워터마크를 삽입한 후, “0”이 삽입된 부분을 흰색으로 “1”이 삽입된 부분을 검은색으로 표현하였다. [표 2]에서는 워터마크 삽입 전/후의 파라미터 값들을 비교하여 보여주었다. 그리고 $d=2$, $d=3$ 일 때의 워터마크 삼입량을 [표 2]에서 보여주었다. [표 2]에서 보는 바와 같이 모델 “hand”에서는 1-ring 값에 의한 기준 좌표계 설정 시 꼭지점을 추가하기 위한 연산이 필요하였다.

4.1 형태 보존 변환 공격

형태 보존 변환에는 이동, 스케일링, 회전 등 기하학적인 변환과 꼭지점의 저장 순서, 파일 포맷 변

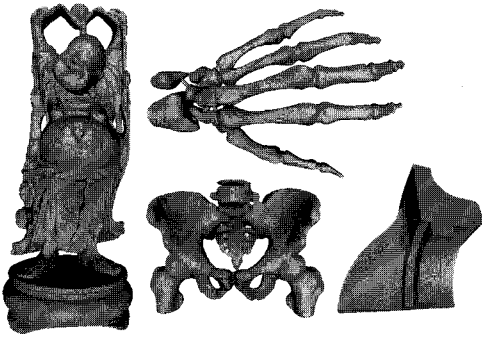


그림 6. 실험용 메쉬 모델

표 1. 실험용 메쉬 모델 파라미터

모델	happy	hand	FAN	Pelvis
꼭지점	49794	55085	6475	31438
면	100000	110164	12946	63012
genus	5	4	0	10

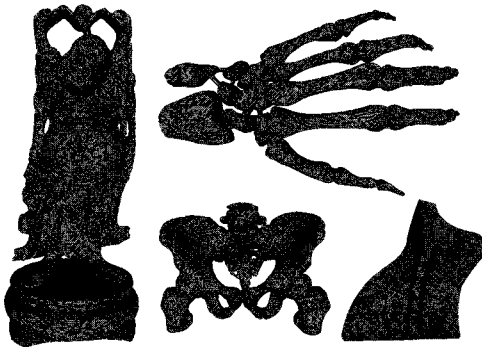


그림 7. 워터마크가 삽입된 메쉬 모델

표 2. 워터마크 삽입 전/후 파라미터 비교

메쉬 모델명		happy	hand	Fan	pelvis
원본	꼭지점	49794	55085	6475	31438
	면	100000	110164	12946	63012
삽입후	꼭지점	49794	55086	6475	31438
	면	100000	110166	12946	63012
삽입량	d=2	50000	55083	6473	31506
	d=3	33333	36722	4315	21004

환 등이 있다.

제한한 1-ring 값에 의한 기준 좌표계 설정, 기준 좌표계의 중심점에 의한 꼭지점의 정렬방법은 기하학적인 공격의 영향을 받지 않는다. [그림 8]에서는 이동, 회전, 스케일링 및 조합으로 실행한 기하학적 변환을 보여주었다. [표 3]에서는 기하학적인 변환을 실행하였을 때의 제안한 알고리즘과 관련된 변수들을 불변량과 변량(No/Yes)로 분류하여 보여주었다.

[표 3]에서 보는 바와 같이 기하학적 변환은 꼭지점

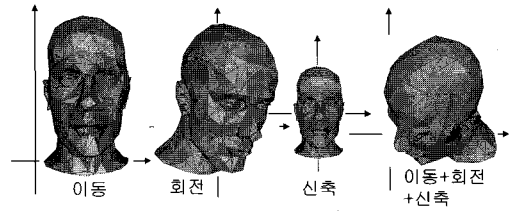


그림 8. 기하학적인 변환

표 3. 기하학적 변환의 변량과 불변량

변수\변환	이동	회전	신축	조합
위상정보	No	No	No	No
1-ring 값	No	No	No	No
V_R 순서	No	No	No	No
꼭지점 수	No	No	No	No
면의 개수	No	No	No	No
좌표 값	Yes	Yes	Yes	Yes

표 4. 파일 포맷 설명

포맷	유형	설명	기타
STL	ascii	stereo Lithography	meshlab version 1.0
	binary		
PLY	ascii	stanford polygon file format	meshlab version 1.0
	binary		
DAE	ascii	collada file format(v1.4.1)	meshlab version 1.0
OBJ	ascii	Alias wavefront Object	meshlab version 1.0
OFF	ascii	Object file format	meshlab version 1.0
3DS	binary	3D Studio Format	meshlab version 1.0

의 좌표 값만 변화시키는 것으로 확인되었으며, 제한한 알고리즘과 관련된 꼭지점의 1-ring 값, 집합 V_R 의 원소순서는 불변량인 것으로 확인됐으며 기하학적인 변환 후 워터마크 정보를 정확히 추출 할 수 있었다.

메쉬 모델에는 꼭지점의 저장 순서를 변경하는 공격이 존재한다. 하지만 꼭지점의 저장순서를 변경하더라도 꼭지점들의 1-ring 값에는 영향을 미치지 않으며 집합 V_R 에서의 꼭지점 순서에도 영향을 미치지 않기 때문에 본 알고리즘은 꼭지점 저장 순서를 변경하는 공격에서도 워터마크 정보를 추출할 수 있었다. 마찬가지로 STL 파일에서의 facet의 순서를 변경하는 공격에도 영향을 받지 않는다.

파일 포맷 변환 테스트에서 사용한 포맷을 [표 4]

에서 보여주었다. PLY 파일 포맷과 STL 파일 포맷에는 ASCII형식과 Binary 형식이 존재한다. 본 논문에서는 Binary 포맷을 ASCII 포맷으로 전환하여 테스트 하였다. DAE 파일은 Collada version 1.4.1을 사용하였고 OBJ, OFF 파일은 2007년 3월 배포된 meshlab 프로그램^[15]을 이용하여 테스트 하였다.

테스트에 사용한 모든 모델에서 파일 포맷 변환 후 워터마크 정보를 추출할 수 있었다.

4.2 형태 변형공격

형태변형 공격에서 많이 사용되는 기법에는 리메싱 (Remeshing, RM), 데시메이션 (Decimation, D), 평활화 (Smoothing, S), 단순화 (Simplification), 면의 재구성 (Re Build Surface, R) 등이 있다.

리메싱 공격에는 Loop Subdivision Surface (L), Butterfly Subdivision Surface (B), Midpoint Subdivision Surface (M)가 있다. 제안한 알고리즘은 Midpoint Subdivision Surface 기법에서 기준좌표계의 원점을 찾을 수 있었으나 꼭지점과 삼각메쉬의 개수가 대폭 증가하여 삽입 시 사용한 꼭지점 정렬기법을 더 이상 적용할 수 없으며 동시에 워터마크 정보도 사라진다. Loop subdivision Surface와 Butterfly subdivision Surface에서는 기준좌표계의 원점의 위치가 변경됨과 동시에 워터마크 정보가 제거된다.

데시메이션에는 Clustering Decimation, Quadric Edge Collapse Decimation(Q) 등의 기법이 있다. [그림 9]는 “Fan” 모델 (꼭지점 : 6475, 면 : 12946)을 Quadric Edge Collapse Decimation 기법을 이용하여 꼭지점 : 881, 면 : 1681로 데시메이션 한 결과를 원본과 비교하여 보여준 것이다. 데시메이션 기법은 꼭지점 제거 후, 연결정보를 새롭게 설정한다. 즉, 3D 모델의 위상정보가 모두 변한다. 제안한 알고리즘은 데시메이션 공격 시 워터마크 정보가 제거된다.

평활화에는 Laplacian Smooth(L), HC Laplacian Smooth, Two Step Smooth(T) 등이 있다. [그림 10]은 Laplacian smoothing 결과를 원본과 함께 보여

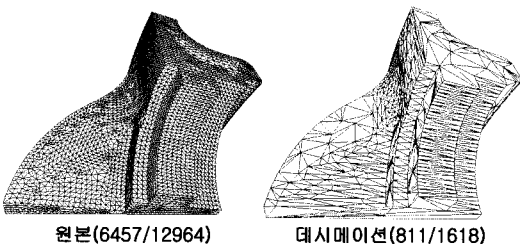


그림 9. 원본 모델과 데시메이션 결과 비교

준 것이다. 보는 바와 같이 평활화는 원본 메쉬 모델의 형태에 많은 변화를 주며, 시제품에 사용될 메쉬모델에 적용할 경우, 정밀도 하락으로 이어진다. 평활화에서도 제안한 알고리즘은 워터마크 정보가 사라짐을 확인할 수 있었다.

그 외, 메쉬의 단순화, 파라미터화, 면의 재구성 등 꼭지점의 연결정보를 변형하는 공격에서도 제안한 알고리즘은 워터마크 정보가 제거된다.

[표 5]는 워터마크 정보를 삽입한 “Fan” 모델에 형태 변형 공격을 가한 후, 워터마크 정보 추출 가능여부와 모델의 변화를 테스트 결과로 보여주었다.

[표 6]에서는 Chang^[6]의 알고리즘, Chun^[11]의 알고리즘, Kim^[12]의 알고리즘을 본 논문에서 제안한 알고리즘과 비교 분석하였다. 제안한 알고리즘은 삽입할 수 있는 정보의 양이 기존의 알고리즘^[3-6, 8-10]보다 많으며 Chun과 Kim의 알고리즘^[11,12]과는 비슷하다. Chun과 Kim의 알고리즘은 STL 파일에 특화된 알고리즘^[11,12]이며, 파일 변환 시 워터마크가 사라진다.

제안한 알고리즘은 파일 포맷 변환에 강인하며, 이동, 신축, 회전 등 기하학적인 변환에도 강인한

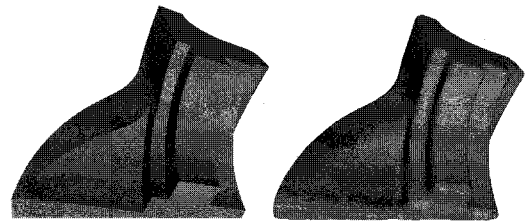


그림 10. 원본 모델과 평활화 결과 비교

표 5. 모델 “Fan”에 대한 변형공격 테스트

유형	분류	threshold (abs/%)	From V/F	To V/F	정밀도	워터마크
RM	L	0.076	6475	24713	손상	X
		1.00	12946	49422		
	M	0.076	6475	24713	손상	X
S	L(1)	1차	6475	6475	손상	X
			12946	12946		
	T	-/-	6475	6475	손상	X
D	Q(1)	6473/0.3	6475	3238	손상	X
			12946	6472		
R	FP	invert faces	6475	6475	손상	X
			12946	12946		

표 6. 기존 알고리즘과의 비교

알고리즘	Chun	Kim	Chang	Proposed
이동	X	X	O	O
신축	X	X	O	O
회전	X	X	O	O
패킷저장 순서	O	O	O	O
꼭지점저장순서	O	O	O	O
파일변환	X	X	O	O
정밀도	불변	불변	손상	불변
RP적용가능성	가능	가능	불가	가능

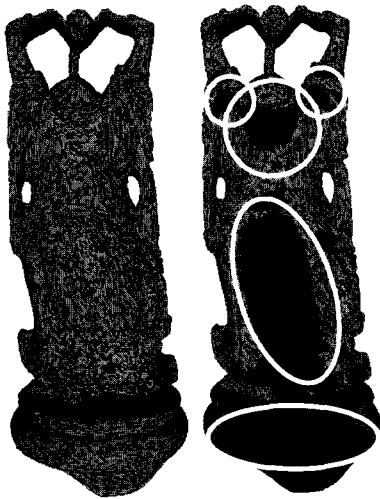


그림 11. 데이터 무결성 검증

것으로 나타났다. Chang^[6]이 제안한 알고리즘은 이동, 신축, 회전, 패킷 저장순서 변경, 꼭지점 저장순서변경, 파일 변환 등에 강인하며 부분적인 형태 변형공격에도 일정한 강인성을 유지한다. 하지만 원본에 노이즈를 추가하는 방식으로 워터마크를 삽입하였기 때문에 Benedens^[7,8], E.Praun^[10], Ohbuchi^[5] 등이 제안한 알고리즘과 마찬가지로 요구하는 정밀도를 만족시킬 수 없으며 쾌속조형시스템에서 사용할 수 없다. 본 알고리즘은 Cui^[16]가 제안한 알고리즘에서 발생하는 facet의 삼각메쉬의 방향설정 문제를 해결하였다.

4.3 무결성 인증

[그림 11]은 “happy”모델의 10000개의 삼각메쉬를 부분적으로 선택하여 재구성(Re Build Surface)한 후 워터마크가 삽입된 모델과 비교하여 보여준 것이다. 수정된 부분을 보여주기 위하여 “1”이 삽입된 부분 및 워터마크 정보가 일치하지 않은 부분은

모두 검은색으로 보여주었다. [그림 11]에서 보는 바와 같이 워터마크 정보를 추출하여 모델이 수정되었음을 확인할 수 있으며, 수정된 부분도 확인할 수 있다.

하지만 부분적인 꼭지점 선택 공격 시, 기준 좌표계 설정에 사용된 꼭지점을 수정하면 워터마크 검출이 불가능하며, 메쉬 모델이 수정되었다는 사항만 확인할 수 있다.

보는 바와 같이 제한한 알고리즘을 이용하여 메쉬 모델의 무결성을 인증할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 쾌속조형시스템 응용을 위한 메쉬 모델 블라인드 워터마킹 알고리즘을 제안하였다. 대부분의 기존 알고리즘은 정보의 삽입을 위하여 모델의 형태를 변형시켰으며 모델 변형이 쾌속조형시스템의 정밀도를 저하시키기 때문에 사용할 수 없는 문제를 해결하였다. 제안한 알고리즘은 모델의 형태를 변형시키지 않기 때문에 쾌속조형시스템의 요구사항을 만족시키며 고정밀도를 필요로 하는 유사한 분야에서 메쉬 모델의 무결성 인증용으로 사용할 수 있다. 고정밀도 시작품 제작이 필요한 기계, 자동차, 항공우주 및 조선 등의 분야에서 다양한 응용이 기대된다. 가상현실, 게임, 애니메이션 등 분야에서는 본 논문에서 제안하는 알고리즘을 이중으로 삽입함으로써 저작권 보호용으로 사용하는 동시에 모델의 무결성도 인증할 수 있다. 그 외, 제안한 알고리즘은 상당히 많은 정보를 삽입할 수 있기 때문에 정보은닉(Information Hiding)용으로도 사용 가능하다.

참 고 문 헌

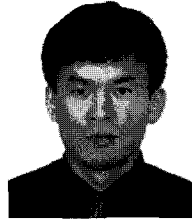
- [1] 이공래, 황정태, STEPI 한국기술정책연구원, “다분야 기술융합의 혁신시스템 특성분석,” 정책연구 2005-7. pp. 88-114
- [2] 정두수, 피혁연구소 생산자동화팀, PR Service Bureau “RP 기술의 도입절차와 활용” pp. 15-20.
- [3] Min-Su Kim, Jae-Won Cho, Remy Prost, Ho-Youl Jung, “A Blind Watermarking for 3D Mesh Sequence Using Temporal Wavelet Transform of Vertex Norm”, *The Journal of The Korean Institute of Communication sciences*, 2007. 1. 8, pp. 256-257.
- [4] Zhou Xun, MasterThesis, department of Mathematical

Zhejiang University, china, “三緯幾何模型數字
水印技術&算法研究,” 2002.2.

- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] S. Toub, A. Healy, “Efficient Mesh Licensing,” *Computer Science 276r*, Havard University, May 2001.
- [10] E. Praun, H. Hoppe and A. Finkelstein, “Robust Mesh Watermarking,” *SIGGRAPH Proceeding*, 1999, pp. 69-76.
- [11] 천인국, 김기석, “3차원 기하학적 형상인 STL 의 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] 양동열, 안동규, 신보성, 이상호, “선형 열절단 시스템을 이용한 가변 적층 쾌속조형방법 및 쾌속조형장치,” 출원번호:2001-72938, 등록 10-0384135 일본 Patent-2005-Vol.003-0017.
- [14] <http://www.3dsystems.com>.
- [15] <http://meshlab.sourceforge.net>.
- [16] Cui Jizhe, CPRI, Sangmyung University, “A Semi-fragile Watermarking Algorithm of 3D Mesh Model for Rapid Prototyping System Application,” *Korea Institute of Information Security & Cryptology*, 2007.

최 기 철 (Cui Jizhe)

정회원



1996년 (중국)동북사범대학 수
학학부 졸업(이학박사)
2001년 상명대학교 컴퓨터과학
과(이학석사)
2007년 상명대학교 컴퓨터과학
과(이학박사)
<관심분야> 저작권관리기술,
디지털신호처리, 암호학, 컴퓨터그래픽스