

3차원 형상 모델의 디지털 워터마킹 구현

김 선 형[†] · 이 순 흠[†] · 김 기 석^{**} · 안 덕 상^{**}

요 약

워터마킹은 DRM(digital rights management)의 요소 기술로서 많은 연구가 진행되어 왔다. 하지만, 3D 신속 조형 기술(RP : rapid prototyping)에 적용된 연구는 찾아보기 어렵다. 대부분의 연구가 텍스트 문서, 2D 이미지, 동영상, 음악 등의 콘텐츠에 한정되어 있다. RP 시스템은 다품종 소량 생산에 적합하고, 시제품을 제작하여 제품개발 초기 단계에서 설계상의 오류나 부적합한 요인을 조기에 발견하는 것이 가능한 까닭에 산업 현장에 많이 사용되고 있다. 본 논문은 3D 형상 모델을 가지고 있는 STL(stereolithography) 파일에 워터마크를 삽입하는 방법에 관한 연구이다. 제안된 알고리즘은 3D 형상 데이터의 법선 영역과 페이스 뒷면 영역에 워터마크를 삽입한다. 이런 까닭에 3D 형상에는 어떠한 왜곡도 발생하지 않으며 워터마크의 비가시성(invisibility)을 충족한다. 제안된 알고리즘으로 3D 형상 데이터의 법선 영역과 페이스 뒷면 영역에 워터마크 데이터의 삽입과 추출이 가능함을 보여주었으며, 본 연구의 실험 결과는 fragile 워터마킹과 robust 워터마킹과의 이용가능성을 제시하였다.

The Implementation of the Digital watermarking for 3D Polygonal Model

Sunhyung Kim[†] · Sunheum Lee[†] · Geeseog Kim^{**} · Deogsang Ahn^{**}

ABSTRACT

This paper discusses techniques for embedding data into 3D polygonal models of geometry. Much researches of Watermarking had been gone as element technology of DRM (digital rights management). But, few research had gone to 3D polygonal model. Most research is limited at text document, 2D image, animation, music etc. RP system is suitable a few production in various goods species, and it is used much in industry to possible reason that produce prototype and find error or incongruent factor at early stage on design in product development childhood. This paper is research about method that insert watermark in STL (stereolithography) file that have 3D shape model. Proposed algorithm inserts watermark in normal vector region and facet's interior region of 3D shape data. For this reason, 3D shape does not produce some flexure and fulfill invisibility of watermark. Experiment results that insert and extract watermark in normal vector region and facet's interior region of 3D shape data by proposed algorithm do not influence entirely in 3D shape and show that insertion and extraction of watermark are possible.

키워드 : RP 시스템, STL 파일, 법선 영역

1. 서 론

최근에 통신망의 발달로 정보 교환이 신속하게 이루어지고 있고, 멀티미디어 자료의 사용이 증가되고 있다. 하지만, 디지털 자료는 복제가 용이하고 복제된 자료는 원본과 동일하며, 데이터 조작이 용이하다는 부작용이 따른다. 이런 까닭에 DRM의 한 요소기술로서 이미지나 영상, 음악 등과 같은 디지털 콘텐츠에 저작권 정보를 삽입하려는 연구가 진행되어 왔다. 하지만, 최근 산업 현장에서 많이 사용되고 있는 RP 시스템의 3D 형상 자료에 워터마크를 삽입하려는

연구는 미비한 실정이다.

RP는 절삭 도구(레이저, 칼 등)를 사용하여 재료를 절단하고 적층하여 시제품(prototype)을 제작하는 시스템이다. 일반적으로 RP 시스템은 STL 파일로 표현되는 3D CAD 모델을 사용한다. RP 시스템을 이용하여, 이러한 시제품(prototype)을 제작하는 목적은 제품개발 초기 단계에서 설계상의 오류나 부적합한 요인을 조기에 발견하는 것이다[1].

이러한 RP 시스템에서의 자료 교환 표준이 바로 STL 포맷이다. STL 파일로 표현되는 3D 형상 모델은 시제품 제작뿐만 아니라 SF 영화, 3D 애니메이션 등에 이용할 수도 있다. 이러한 응용을 위해, 실물을 3D 스캐닝 하거나 CAD 시스템으로 설계하여 STL 파일을 제작하는 데에는 부가적인 비용이 발생한다.

[†] 정 회 원 : 순천향대학교 정보기술공학부 교수

^{**} 준 회 원 : 순천향대학교 대학원 정보기술공학부
논문접수 : 2002년 4월 18일, 심사완료 : 2002년 8월 19일

STL 3D 모델에 워터마크를 삽입하는 기존의 연구들은 3D 모델 데이터를 변형함으로써 원래의 형상이 왜곡되는 문제가 있다. Xiaoyang이 제안한 알고리즘의 경우에는 3D 모델을 변형시키지 않고 워터마크를 삽입하는 방법이지만, STL 표준에 위배되는 까닭에 RP 시스템에서 정상적으로 동작하지 않을 수 있다[2]. Francois가 제안한 알고리즘은 양자화하는 과정에서 3D 모델 데이터 값을 변경 하므로 원래의 형상이 왜곡되는 문제점을 가지고 있다[3].

본 논문에서의 많은 비용을 들여 제작된 3D 형상 데이터에 워터마크를 삽입하여 저작권을 보호하는 방법에 대하여 연구하였다. 본 연구는 공간 영역(spatial domain)의 하나인 법선 벡터 영역과 패킷의 뒷면 영역에 워터마크를 삽입한다. 구현된 시스템은 워터마크의 비트에 맞추어 법선 벡터의 값을 변경함과 동시에 패킷의 뒷면에 새로운 패킷을 추가하면서 워터마크를 삽입한다. 패킷의 법선과 패킷의 뒷면에 워터마크를 삽입할 경우, 3D 형상 모델에 영향을 전혀 없으며 워터마크의 비가시성을 충족시킨다.

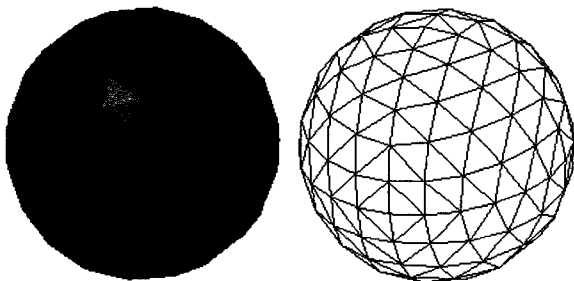
본 논문은 제2장에서 STL 파일의 구조에 대해 설명 할 것이다. 제3장에서 워터마크 삽입, 제4장에서는 워터마크 추출에 대해 기술하였고, 제5장에서 구현 및 실험 결과를 보였으며, 제6장에 결론을 기술하였다.

2. STL 파일의 구조

STL 3D 형상에 워터마크를 삽입하기 위해서는 STL의 형식을 알아야한다. 본 장에서는 STL의 구조에 대하여 알아본다.

2.1 STL 파일의 구조

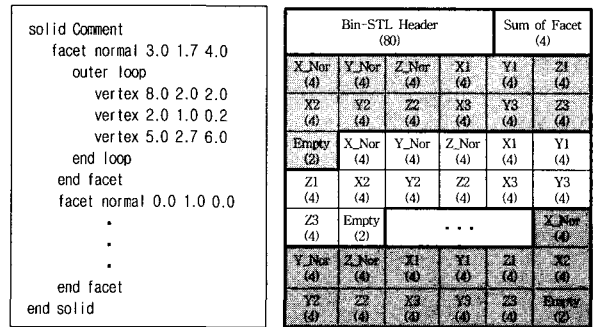
STL 파일로 구성된 3D 형상 모델은 (그림 1)과 같이 패킷이라 불리는 삼각형들로 구성되어 있다.



(a) solid mode (b) wire frame mode
(그림 1) STL 3D 형상

(그림 1)에서와 같이 STL 파일은 패킷이라 불리는 삼각형들로 구성되어 있으며, STL 파일은 두 가지 형식, 텍스트(text, ascii) 파일과 이진(binary) 파일이 있다. (그림 2)는 STL의 두 가지 파일 형식을 나타낸 것이다.

(그림 2)에서와 같이 STL 파일은 3D 형상을 구성하는 수많은 패킷들에 대한 정보를 가지고 있음을 알 수 있다.



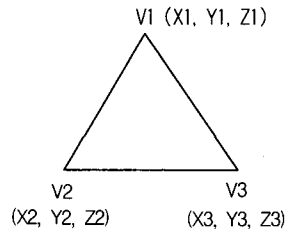
(a) 텍스트 STL 파일구조 (b) 이진 STL 파일 형식

(그림 2) STL 파일의 구조

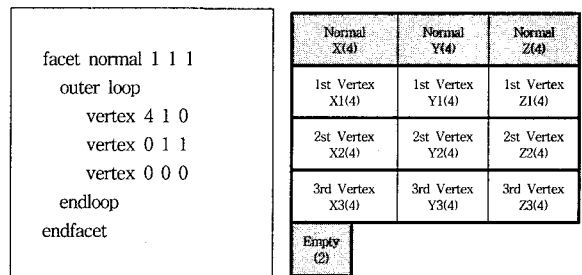
2.2 패킷의 구조

본 절에서는 STL 파일에서 3D 형상을 구성하는 패킷의 구조에 대하여 알아본다.

V : Vertex
X, Y, Z : coordinate



(그림 3) 패킷



(a) 텍스트 형식 (b) 이진 형식

(그림 4) STL 파일에 저장된 패킷 정보

(그림 2), (그림 3), (그림 4)와 같이 하나의 패킷에는 패킷의 앞·뒷면을 표시하는 법선벡터(normal vector)좌표와 세 꼭지점(V₁, V₂, V₃)의 좌표가 필요하며, 각 좌표당 x, y, z의 값을 저장해야 하므로 총 12개의 데이터 값이 필요하며, 이 값들은 모두 실수이다. 이 데이터를 이용하여 STL 파일 형상을 화면 표시 할때 패킷의 꼭지점 순서와 법선벡터 좌표가 패킷의 앞면과 뒷면을 판별한다. 꼭지점 순서가

CCW(Counter Clockwise Winding)이면 패시의 앞면을, CW(Clockwise Winding)이면 패시의 뒷면을 표시한다. 또한 패시 평면에서 법선벡터 좌표가 존재하는 방향이 앞면을 표시하고, 그렇지 않은 면이 뒷면이 된다. 그러므로 패시의 앞면과 뒷면이 바뀌지 않도록 패시 꼭지점의 순서와 법선벡터 좌표값이 변경되지 않도록 주의해야 한다.

2.3 패시에 워터마크를 삽입할 경우의 제약점

본 연구는 3D 형상 모델에 워터마크를 삽입하는 경우이므로 주파수 영역(frequency domain)은 배제하였다. 2D 영상의 경우 변형된 한 픽셀이 전체 영상에 미치는 영향이 작지만, 3D 형상의 경우에는 꼭지점의 좌표가 변경될 경우, 원래의 3D 형상에 왜곡을 가져와 RP 시스템에 사용하지 못할 수도 있다.

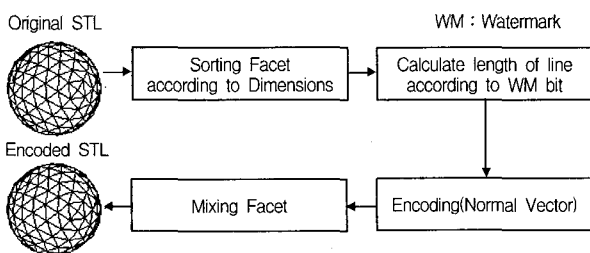
하나의 패시에는 워터마크 삽입 영역으로 사용 가능한 여러 곳의 공간 영역(spatial domain)이 있다. 첫 번째는 꼭지점 좌표를 저장하는 영역, 두 번째는 법선 벡터를 저장하는 영역, 세 번째는 패시의 내부 영역이다. 첫 번째 꼭지점 저장 영역은 3D 모델의 왜곡을 가져오므로 워터마크 삽입 영역으로 적당하지 않다. 꼭지점 좌표 값의 LSB(least significant bit)에 삽입하는 것도 생각해 볼 수 있지만, 좌표값이 실수 형이므로 워터마크 데이터 값에서 LSB를 찾는 데 모호성 문제가 발생한다.

본 논문에서는 법선 벡터 영역과 패시 내부 영역을 워터마크 삽입 공간으로 사용하였다.

3. 워터마크 삽입

일반적인 3D STL 워터마킹의 가장 큰 단점은 패시의 저장 순서에 종속적이라는 점이다. 패시당 한 비트의 정보를 저장하게 되는데, 패시의 순서가 뒤바뀌는 경우, 워터마크가 제거되는 효과가 나타나게 된다. 본 연구에서 제안하는 워터마크 인코딩 알고리즘은 패시 순서를 변경하는 공격에 강인성을 갖는다.

패시 순서를 변경하는 공격에 대하여 강인성을 갖도록 하기 위하여 전체 패시를 패시의 크기(면적)순으로 정렬한다. (그림 5)는 본 논문에서 제안하는 인코딩 알고리즘의 다이어그램(diagram)이다.



(그림 5) 인코딩 다이어그램

RP 시스템에서 패시의 법선은 앞면과 뒷면을 구분하는데 사용된다. 제안된 알고리즘으로 구현된 시스템은 워터마크를 패시의 법선벡터 영역에 삽입하며, 법선 벡터에 워터마크를 삽입할 경우, 3D 형상 모델에 전혀 영향을 주지 않고 워터마크 삽입이 가능하다. 즉, 워터마크에 의한 3D 형상의 왜곡이 전혀 없게 되며, 워터마크의 비가시성을 만족하게 된다. 그러나 법선 벡터를 모두 지우면 인증용 워터마크 데이터가 손실되므로 fragile 워터마킹으로서의 가치는 충분하다. 또한, robust 워터마킹을 위해서 패시의 내부에 새로운 패시를 추가하는 방법을 보여주었다. 이 방법도 3D 형상 모델에 전혀 영향을 주지 않고 워터마크 삽입이 가능하다.

제안된 알고리즘은 한 패시에 하나의 비트 정보를 저장한다. 따라서 워터마크 데이터는 텍스트 문자를 비트 스트림으로 생성하여 사용함으로써 blind 워터마킹 기법으로 사용할 수도 있다.

3.1 법선 벡터에 워터마크 삽입

3.1.1 샘플링(Sampling)

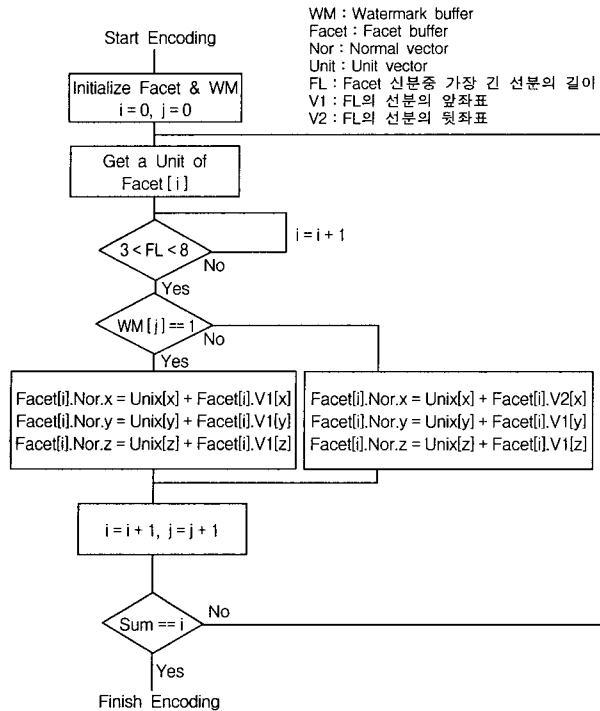
본 논문에서는 워터마크 시그널로서 “SCH university” 라는 아스키 문자열(공백을 포함하여 14바이트)을 사용하였다. 이 문자열로 생성되는 비트 스트림은 ‘8×14=112’개 이다. 즉, 112개의 패시만으로 워터마크 스트림을 모두 삽입 가능하다. 보통 STL 3D 형상 모델은 패시가 수백 개에서 수만 개로 구성된다. 모든 패시에 반복적으로 워터마크를 삽입할 수도 있지만, 구현된 논문에서는 패시의 선분의 길이를 고려하였다. 패시의 순서가 뒤바뀌는 경우, 워터마크가 제거되는 효과가 나타나게 된다. 그러므로 패시의 선분을 고려하기 전에 패시를 패시의 크기(면적)순으로 정렬한다. 그리고 패시에서 3개의 선분의 길이를 구하여 가장 긴 선분의 길이가 정해진 범위 안에 포함되었을 경우에만 워터마크를 삽입한다. 문자열을 이루는 비트 스트림을 순차적으로 모든 패시에 삽입하는 것을 고려할 수도 있으나, 법선을 얻는 작업에 많은 시간 비용이 발생하는 까닭에 워터마크가 삽입될 패시를 샘플링한 후, 워터마크를 삽입함으로써 순차적으로 저장된 비트 스트림에서 패시의 순서를 바꾸는 공격에도 변형되지 않게 하였다.

3.1.2 법선 벡터의 양자화(quantization)

워터마크 비트를 법선 벡터 값에 삽입하기 위해 본 논문에서는 (그림 6)과 같은 양자화 방법을 사용한다.

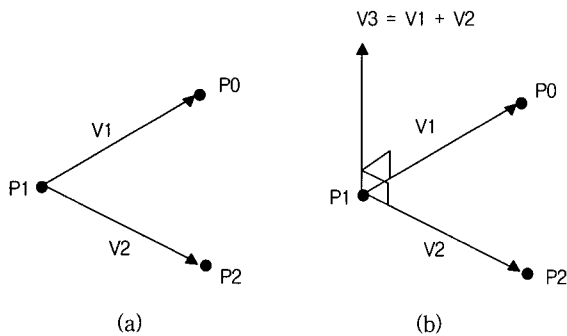
- ① 삽입할 워터마크 비트가 '1'인 경우
: 긴 선분의 시작 꼭지점에서 구한 값을 패시의 법선으로 설정
- ② 삽입할 워터마크 비트가 '0'인 경우
: 긴 선분의 끝 꼭지점에서 구한 값을 패시의 법선으로 설정

(그림 6) 워터마크의 양자화 방법



(그림 7) 워터마크의 양자화 순서도

(그림 7)과 같은 양자화 방법을 사용하기 위해서 패킷 평면에서의 법선 벡터 좌표를 구해 사용한다. 본 연구에서는 법선 벡터 좌표를 얻기 위해 (그림 9)과 같은 방법을 사용한다.



(그림 8) 세 점으로 법선 벡터 생성

(그림 8)의 (a)에서, 세점 P0, P1, P2는 패킷의 세점을 나타내며 (b)에서 V3는 P1을 중심으로 P2, P0로 그려지는 패킷에서 생성되는 법선 벡터를 나타낸다. V3로 구해지는 법선 벡터의 좌표를 얻기 위해서는 벡터 V1(P1 P0)과 V2(P1 P2)를 얻어야 한다. 여기에서 벡터 V1, V2는

$$\begin{aligned} V1[x] &= P0[x] - P1[x] & V2[x] &= P1[x] - P2[x] \\ V1[y] &= P0[y] - P1[y] & V2[y] &= P1[y] - P2[y] \\ V1[z] &= P0[z] - P1[z] & V2[z] &= P1[z] - P2[z] \end{aligned}$$

으로 구할 수 있고, 이 두 벡터 값을 이용하여 법선 벡터

V3의 좌표 값을 아래의 식으로 구한다.

$$\begin{aligned} V3[x] &= V1[y] \times V2[z] - V1[z] \times V2[y] \\ V3[y] &= V1[z] \times V2[x] - V1[x] \times V2[z] \\ V3[z] &= V1[x] \times V2[y] - V1[y] \times V2[x] \end{aligned}$$

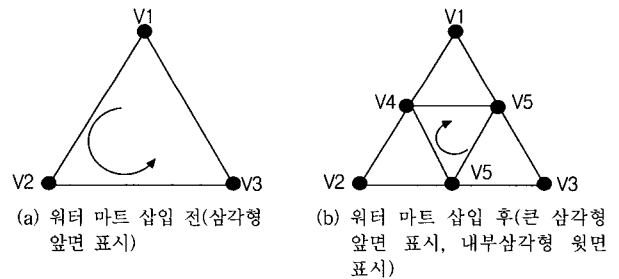
위식으로 구해진 법선 벡터는 단위 벡터이므로 워터마크가 '1'인 경우에는 패킷안에서 긴 선분의 시작 꼭지점으로, '0'인 경우에는 선분의 끝꼭지점으로 평행 이동하여 양자화한다.

3.2 robust 워터마킹

법선벡터에 워터마크 데이터 삽입은 법선벡터를 변경하므로 인중용 워터마크 데이터를 모두 삭제할 수 있다. 이런 문제점을 보완한 robust 워터마킹을 만들기 위해 새로운 방법을 아래에 제안하였다.

3.2.1 양자화

로버스트 워터마킹(robust watermark)을 만들기 위해, 다른 공간 영역인 데이터 속에 새로운 패킷을 만들어 추가한다. 패킷의 면적 순으로 sorting된 파일에 그 패킷의 반대 방향을 가지고 있는 패킷을 삽입한다. 워터마크가 '1'인 경우는 패킷안에 새로운 워터 마크를 삽입하고, 워터 마크가 '0'인 경우에는 삽입하지 않는다. 워터마크 데이터가 삽입된 패킷은 순서가 반대이므로 겹에서는 볼 수가 없다. (그림 9)는 robust 워터마킹을 위한 양자화를 보여주고 있다.



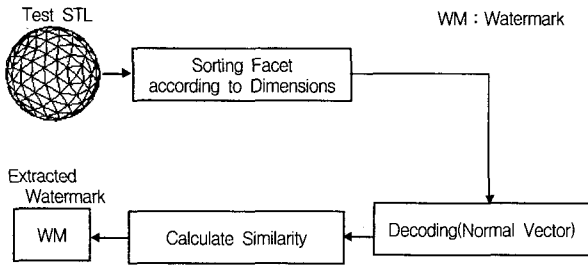
(그림 9) robust 워터마킹을 위한 양자와

3.2.2 샘플링

robust 워터마킹을 삽입하는 방법도 vector를 이용하여 샘플링하는 방법과 같다. 하지만 같은 패킷에 똑같은 워터마크 데이터의 삽입을 막기 위해 vector를 이용하여 할때 보다 패킷의 가장 긴 선분의 길이의 범위를 줄였다.

4. 워터마크 추출

3.1에서 워터마크를 삽입할 패킷을 샘플링 하였으므로 빠른 추출을 위해서 워터마크가 삽입된 패킷을 먼저 선별해 내야 한다. (그림 10)은 본 논문에서 제안하는 디코딩 알고리즘의 다이어그램(diagram)이다.

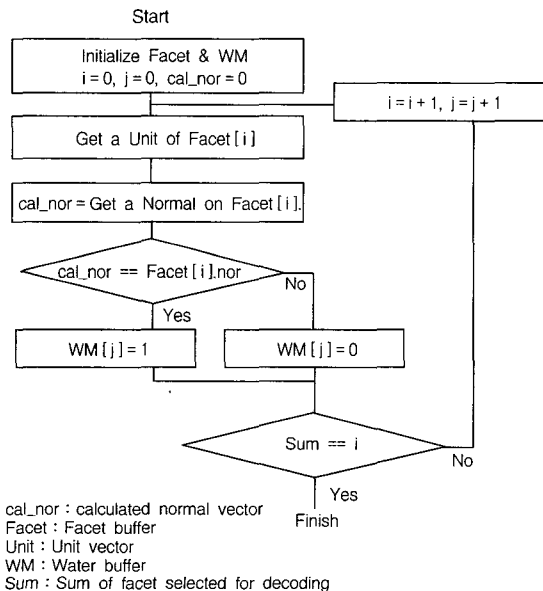


(그림 10) 디코딩 다이어그램

워터마크가 삽입된 패시를 선별하기 전에 먼저 패시를 크기(면적)순으로 정렬한다. 그리고 선별해 내기 위해 워터마크의 비트 크기를 알아낸다. 실험에 사용한 워터마크 비트의 크기는 112비트이므로 각 패시의 선분의 길이를 구한 다음 구한 길이가 기준값 사이에 있으면 순차적으로 (그림 7)의 역순으로 워터마크 비트를 추출한다.

4.1 법선 벡터에 삽입된 워터마크 추출

STL 파일에 있는 모든 패시에 대하여 패시 선분의 길이를 구한 다음, 워터마크 삽입 패시를 선별해 낸다. 그 다음 법선벡터 영역에서 워터마크를 추출하기 위해 우선 단위 벡터를 구한다. 이 값을 선별된 패시의 가장 긴 선분의 시작 꼭지점으로 공간 이동 시킨 값을 얻는다. 이동시킨 좌표 값이 실제 STL 파일에 저장되어 있는 법선벡터 좌표와 일치하면 워터마크 비트는 '1'이고, 그렇지 않으면 '0'이다. 전체 패시 중에서 워터마크 삽입 패시를 선별해 내고 선별된 패시의 벡터 값을 조사하여 순차적으로 112개의 비트를 모은다. 모아진 112개의 비트를 8비트씩 모아 아스키 코드로 화면 표시한다. (그림 11)은 워터마크 추출 과정이다.



(그림 11) 워터마크 추출 과정

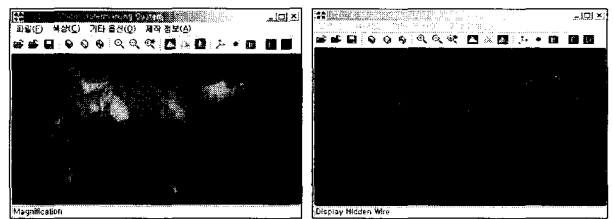
4.2 robust 워터마크 데이터 추출

방법은 4.1의 법선 벡터에 삽입된 워터마크 추출 알고리즘은 비슷하다. 먼저 패시의 크기 순으로 소팅한 후, 그 패시의 선분상의 점들로 구성되어 있는 다른 패시가 있는지 없는지를 확인하여 워터마크 데이터를 추출할 수 있다.

5. 실험 및 고찰

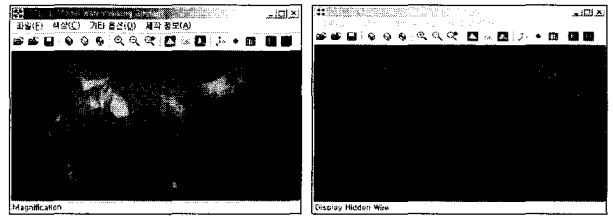
5.1 법선벡터를 이용한 워터마크 실험 결과

(그림 12)는 워터마크 삽입 전·후에 STL 3D 영상의 비교를 보여주고 있다. 두 그림에서 표면상의 왜곡이 전혀 일어나지 않는다는 것을 볼 수 있다.



(a) solid mode (b) wire frame mode

(a) 워터마크 삽입 전

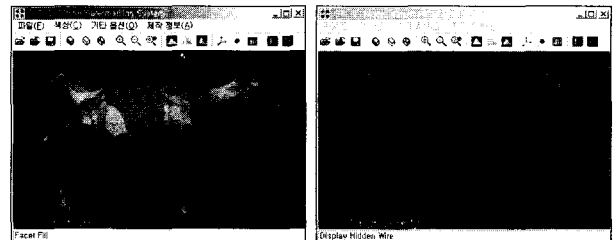


(a) solid mode (b) wire frame mode

(b) 워터마크 삽입 후

(그림 12) 워터마크 삽입 전·후 STL 3D 영상

(그림 13)은 워터마크의 삽입된 STL 3D 영상으로부터 삽입된 워터마크를 정확하게 추출한 그림이다.



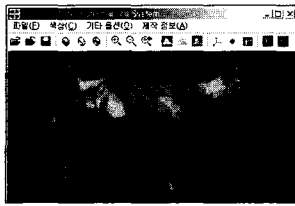
(a) solid mode (b) wire frame mode

(그림 13) 추출된 워터마크 문자 표시

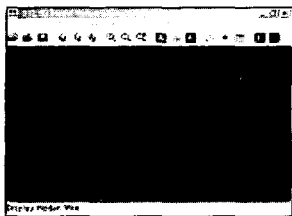
5.2 robust 워터마킹 실험결과

(그림 14)에서 보여주는 것처럼 패시의 뒷면에 패시를 추가하였기 때문에 solid mode 에서는 추가된 패시를 볼 수 없으며, wire frame mode 에서는 그 모습을 볼 수 있으나

어떤 것이 워터마크 데이터로 표시되었는지를 알 수가 없다.



(a) solid mode



Data extract from watermark region

(b) wire frame mode

(그림 14) robust 워터마크 결과

6. 결 론

STL 3D 형상 데이터에 어떠한 변형 처리도 하지 않고 워터마크를 삽입하는 알고리즘을 보였다. 제안된 알고리즘을 사용하여 실험한 결과, 3D 형상에 어떠한 왜곡이나 변형 없이 시각적으로 전혀 인지할 수 없는 워터마크를 삽입할 수 있었다.

STL 파일에는 많은 오류가 있음에도 불구하고 제안된 알고리즘은 정확히 동작하였다. 또, 제안된 알고리즘은 패시의 법선벡터 영역에 워터마크를 삽입함으로써 워터마크의 비가시성을 충족하였다.

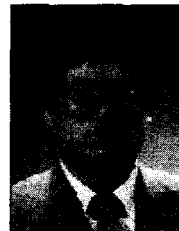
법선벡터의 좌표 값을 일방적으로 변형하는 공격을 받게 되면 3D 형상 데이터의 앞면과 뒷면이 바뀌게 되어 3D 형상이 변형된다. 이런 까닭에 법선벡터 값을 무작위로 변경하는 외부 공격에 대하여 어느 정도 강인성이 가질 수도 있으나, 순차적으로 저장된 비트 스트림에서 패시의 순서를 바꾸는 공격에서 원래의 워터마크를 추출할 수 있었다. 그러나 새로운 법선 벡터 값을 구하여 변경하는 공격에는 제안된 알고리즘이 무력해진다. 이를 보완하기 위해 패시의 뒷면 영역에 새로운 패시를 반대방향으로 삽입함으로써 강인성을 부여 할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] J. D. Cawley, A. H. Heuer, W. S. Newman, and B. B. Mathewson, "Computer-Aided Manufacturing of Laminated Engineering Materials," American Ceramic Society Bulletin, Vol.75, No.5, 1996.
 [2] Xiaoyang Mao, Makoto Shiba, and Atsumi Imamiya, "Watermarking 3D Geometric Models Through Triangle Sub-

division," Proceedings of SPIE, Vol.4314, pp.253-260, 2001.

[3] Francois Cayre, Benoit Macq, "Spatial watermarking of 3D triangle meshes," Proceedings of SPIE, Vol.4472, pp.155-166, 2001.
 [4] E. A. Griffin, D. R. Mumm, and D. B. Marshall, "Rapid Prototyping of Functional Ceramic Composites," American Ceramic Society Bulletin, Vol.75, No.7, p.65, 1996.
 [5] Ryutarou Ohbuchi, Hiroshi Masuda, and Masaki Aono, "Watermarking Three-Dimensional Polygonal Models Through Geometric and Topological Modifications," IEEE journal on selected areas in communications, Vol.16, No.4, pp.551-560, May, 1998.
 [6] 3D Systems. Inc., "StereoLithography Interface Specification," Oct., 1988.
 [7] Yong Zheng, "Enabling Computational Techniques For Tangential-Building Solid Freeform Fabrication," Doctoral Dissertation, Dept. of Electrical Engineering and Applied Physics, Case Western Reserve Univ., 1997.



김 선 형

e-mail : shkim@sch.ac.kr
 1987년 성균관대학교 공학박사
 현재 순천향대학교 정보기술공학부
 정교수
 관심분야 : 워터마크, 멀티미디어,
 전자상거래



이 순 흠

e-mail : shlee@sch.ac.kr
 1987년 고려대학교 공학박사
 현재 순천향대학교 정보기술공학부
 부교수
 관심분야 : 컴퓨터 구조, 멀티미디어,
 네트워크 관리



김 기 석

e-mail : paperlion@dreamwiz.com
 1987년 청운대학교 공학석사
 2002년 순천향대학교 공학박사 수료
 관심분야 : 워터마크, 컴퓨터 그래픽스,
 인공지능



안 덕 상

e-mail : ads29@bclinc.com
 2001년 순천향대학교 공학사
 현재 순천향대학교 공학석사 과정
 관심분야 : 워터마크, 네트워크 관리,
 멀티미디어