익명 Buyer-Seller 워터마킹 프로토콜 기반의 모바일 3D 콘텐츠 워터마킹 기법

성택영*, 이석환**, 박승섭*, 권기룡*
*부경대학교 컴퓨터공학과
**동명대학교 정보보호학과
e-mail: sty76@hanmail.net, skylee@tu.ac.kr, krkwon@pknu.ac.kr

Mobile 3D Content Watermarking Scheme Based on Anonymous Buyer-Seller Watermarking Protocol

Teak-Young Seung*, Suk-Hwan Lee**, Ki-Ryong Kwon*
*Department of Computer Engineering, Pukyong National University
**Department of Information Security, TongMyongUniversity

요 약

최근 모바일 단말 기술과 정보통신 기술의 급격한 발달로 국내외 이동통신사들은 새로운 킬러 콘텐츠로 주목받고 있는 모바일 3D 게임을 앞 다투어 제작 및 서비스하고 있다. 모바일 3D 게임의 경우, 용량 증가로 인한 데이터 통신비 부담을 줄이기 위하여 PC 다운로드 S/W을 통한 다운로드 방법이 제공되면서 불법 복제 우려에 대한 관심이 높아지고 있다. 현재 불법 복제 방지와 관련하여 GVM/GNEX 인증 모듈이 적용되고 있으나, 모바일 3D 콘텐츠에 대한 저작권 보호 기술 및 워터마킹 기술을 적용함으로써 콘텐츠 접근제어 및 불법배포 추적을 동시에 달성할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 모바일 3D 콘텐츠의 저작권 보호를 위하여 익명 Buyer-Seller 워터마킹 프로토콜 상에서 3D 콘텐츠 내의 공간 영역 및 암호화 영역 내에 다중 워터마크를 삽입하는 방법을 제안한다. 성능평가를 위한 비가시성 및 강인성 실험을 통하여 본 제안 기법의 콘텐츠 접근제어가 가능하며 비가시성, 강인성 면에서 우수함을 확인하였다.

1. 서론

최근 대규모 집적화 및 저전력 기술의 발전으로 인해 괄목할만한 진보를 보이는 임베디드 CPU 및 무선통신기술의 발달을 통해 모바일 3D, DMB (Digital Multimedia Broadcasting) 그리고 Wibro (Wireless Broadband Internet) 등의 다양한 콘텐츠 서비스들을 창출 가능하게 한다. 이를 통해 모바일 단말 제조사들은 시장 내 비교우를 점유를 위해 일반 모바일 폰보다 게임 및 그래픽스 성능이 향상된 폰을 출시하고 있다. 이에 발맞추어 국내외 이동통신사들 또한 새로운 킬러 콘텐츠로 주목받고 있는 모바일 3D 게임을 앞다투어 제작 및 서비스하고 있다. 모바일 3D 게임은 크게 임베디드 방식, WAP (Wireless application protocol) 방식, 다운로드형 및 네트워크형 VM (Virtual Machine) [1]-[3] 방식으로 나누어지며 모바일 플랫폼 기반으로 많이 제작되어지고 있다.

그러나 모바일 3D 게임의 용량 증가로 인한 데이터 통신비에 대한 사용자 부담을 줄이기 위하여 PC 다운로드 S/W을 통한 다운로드 방법이 제공되면서 불법 복제 우려에 대한 관심이 높아지고 있다. 현재 불법 복제 방지와 관련하여 GVM/GNEX 인증 모듈이 적용되어 1차적 접근제어는 가능한 상태이나, PC 다운로드 및 리버스 엔지니어링 기술을 통한 콘텐츠 추출 및 불법 배포에는 기술적으로 대응하지 못하고 있다. 따라서 모바일 3D 콘텐츠에 대한 저작권 보호 기술로서 3D 콘텐츠의 특성을 감안한 워터마킹 기술 및 사용자 접근제어 및 익명성 확보를 위한 암호화 프로토콜을 결합한 익명성 기반 Buyer-Seller 워터마킹 프로토콜 [4]이 각광을 받고 있다.

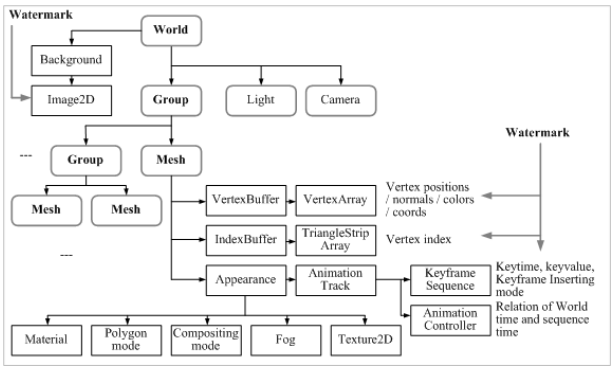
2. 관련연구

2.1 모바일 3D 콘텐츠

일반적인 모바일 3D 콘텐츠 데이터의 구조를 그림 1에서와 같이 살펴보면, 각 오브젝트 단위의 3D Scene으로 구성되어 있다. 여기서 Scene 노드를 여러 개로 묶은 것을 Group이라 하며, 전체 Scene을 포함하고 있는 Super Group을 World라 한다. 즉, World는 3D 오브젝트 계층구조의 최상위 그룹으로 활성화된 카메라와 배경정보를 저장하고 있다. Mesh는 기본적인 형상 오브젝트로 꼭지점 버퍼 (vertex buffer), 인덱스 버퍼 (index buffer) 및 형상 정보 (appearance)를 가진다. 꼭지점 버퍼에는 꼭지점의 좌표, 법선 및 색상에 대한 배열 정보가 있으며, 인덱스 버퍼에는 삼각형 스트립 (triangle strip)을 나타내기 위한 꼭지점들의 인덱스 정보가 있다. 그리고 형상 정보에는 키프레임 시퀀스 및 애니메이션 조정기로 구성된 애니메이션 트랙과 표면정보를 나타내는 재질 (material) 정보, 폴리곤 노드, 텍스쳐 등이 있다.

모바일 3D 콘텐츠 데이터 내에 꼭지점 버퍼 내의 꼭지점 좌표값, 인덱스 버퍼 내의 삼각형 스트립 배열, 애니메이션 트랙의 키프레임 시퀀스 내에 키타임과 키값들이 워터마크 삽입 대상체로 선택될 수 있다. 또한 3D 오브젝트

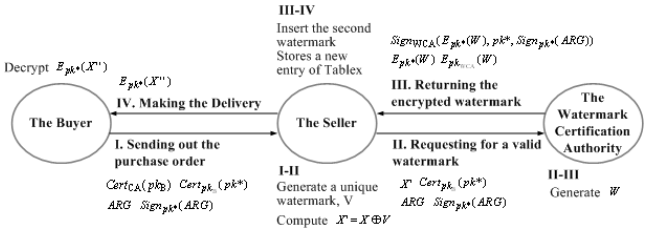
렌더링 시에 정의되는 배경 이미지 (Background image)도 삽입 대상체로 선택될 수 있다. 그 이외의 형상 정보 (Appearance) 내의 값들은 외부 환경 요소에 따라 쉽게 변하므로 워터마크 삽입 대상체로 적절하지 못하다. 제안한 방법에서는 공간 영역 및 암호화 영역 상에서 다중 워터마크를 꼭지점 좌표값 및 삼각형 스트립 배열 내에 삽입한다.



(그림 1) 일반적인 모바일 3D 콘텐츠 데이터 구조

2.2 익명 Buyer-Seller 워터마킹 프로토콜

Lei 등 [5]은 고객 권리 문제 (customer's right problem)와 비결합 문제 (unbinding problem)를 해결하기 위하여 PKI (Public-Key Infrastructure) 기반의 익명 Buyer-Seller 워터마킹 프로토콜을 제안하였다. 고객 권리 문제는 악의적인 판매자가 임의의 구매자를 모함하기 위하여 저작권 침해를 위조하는 것이다. 비결합 문제는 선택된 하나의 워터마크가 특정 거래 또는 콘텐츠와 결합되지 못하는 것이다. 즉, 판매자가 저작권 침해를 위조하기 위하여 복제된 콘텐츠에 삽입되어 있는 워터마크를 다른 콘텐츠에 삽입이 가능하다는 것이다. 본 논문에서는 모바일 3D 콘텐츠의 저작권 보호를 위하여 Lei 등이 제안한 익명 Buyer-Seller 워터마킹 프로토콜 기반의 다중 워터마크 삽입 방법을 제안한다.



(그림 2) 익명 Buyer-Seller 워터마킹 프로토콜

위 그림에서와 같이 익명 Buyer-Seller 워터마킹 프로토콜 상에서 판매자는 단일 워터마크 W^1를 콘텐츠 X 내에 삽입하고, WCA에서 전달받은 암호화된 워터마크 $E_{pk^*}(W^2)$를 암호화 영역에서 삽입하여 이를 구매자에게 전달한다. 여기서 단일 워터마크 W^1의 삽입 방법은 콘텐츠의 종류, 공격 유무 등에 따라 결정되고, 암호화 영역에서의 $E_{pk^*}(W^2)$ 삽입 방법은 암호 연산자 성질에 따라 결정된다.

3. 제안한 모바일 3D 콘텐츠 워터마킹

3.1 공간영역 상에서의 1차 워터마크 삽입

제안한 공간영역 상에서의 워터마킹에서는 기하학적 공격 및 연결정보 공격에 강인하게 워터마크를 각 객체에 삽입한다. 즉, 스케일링, 회전, 이동 및 연결성 정보 공격에 강인하기 위하여 각 객체의 꼭지점 좌표를 정규화한 다음, 중점 벡터와 꼭지점 벡터와의 사이각 분포에 따라 워터마크 삽입 대상을 선택한다. 그리고 선택된 분포 내에 속하는 꼭지점 데이터의 거리에 워터마크를 삽입한다.

Step 1. 꼭지점 좌표 정규화

임의의 객체 $\mathbf{O}_i$ 내의 꼭지점 데이터 좌표들은 객체 중점 좌표 $\mathbf{c}_i$과 각 꼭지점과의 평균 거리 $\bar{r}_i = \sum_{k=1}^{N_i} \|\overrightarrow{\mathbf{c}_i \mathbf{v}_k}\| / N_i$가 1이 되도록

$$\bar{\hat{r}}_i = \sum_{k=1}^{N_i} \|\overrightarrow{\mathbf{c}_i \hat{\mathbf{v}}_k}\| / N_i = \sum_{k=1}^{N_i} \|\overrightarrow{\mathbf{c}_i \mathbf{v}_k}\| / (\bar{r}_i N_i) = 1 \quad (1)$$

와 같이 정규화한다. 식 (1)를 만족하기 위하여 정규화된 꼭지점 좌표 $\hat{\boldsymbol{v}}_k$는 $\|\overrightarrow{\mathbf{c}_i \hat{\mathbf{v}}_k}\| = \|\overrightarrow{\mathbf{c}_i \mathbf{v}_k}\| / \bar{r}_i$를 만족하여야 한다. 를 만족하여야 한다. 이를 간단히 풀기 위하여 제안한 방법에서는 다음과 같이 결정하였다.

$$\hat{x}_k - cx_i = \frac{1}{\bar{r}_i}(x_k - cx_i) \quad (2)$$

$$\hat{y}_k - cy_i = \frac{1}{\bar{r}_i}(y_k - cy_i) \quad (3)$$

$$\hat{z}_k - cz_i = \frac{1}{\bar{r}_i}(z_k - cz_i) \quad (4)$$

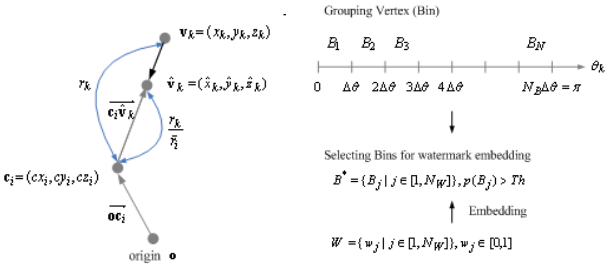
워터마크 삽입 과정을 수행한 후, 다음과 같이 역 정규화 과정을 수행함으로써

$$x'_k = \bar{r}_i \hat{x}_k - (\bar{r}_i - 1) cx_i \quad (5)$$

$$y'_k = \bar{r}_i \hat{y}_k - (\bar{r}_i - 1) cy_i \quad (6)$$

$$z'_k = \bar{r}_i \hat{z}_k - (\bar{r}_i - 1) cz_i \quad (7)$$

워터마크가 삽입된 객체를 얻는다.



(a) (b)

(그림 3) (a) 꼭지점 좌표 $\boldsymbol{v}_k$의 정규화 및 (b) 중점 좌표와 꼭지점 좌표와의 사이각 분포에 따른 워터마크 삽입 구간

Step 2. 워터마크 비트 삽입 위치 결정

워터마크 삽입 대상체는 꼭지점 순서 정렬, 메쉬 연결성 정보 치환, 절단 등에 강인한 속성을 가져야 한다. 제안한 방법에서는 각 꼭지점과 객체 중점와의 사이각 분포를 이용하여 워터마크 삽입 위치 영역을 선택한 다음, 선택된 영역 내에 속하는 꼭지점들의 거리 분포에 워터마크를 삽입한다. 그림 3의 (a)와 같이 기준 벡터 $\overrightarrow{\mathbf{oc}_i}$와 중점에 대한 정규화된 꼭지점 벡터 $\overrightarrow{\mathbf{c}_i\hat{\mathbf{v}}_k}$와의 사이각 θ_k

$$\theta_k = \cos^{-1}\left(\frac{\overrightarrow{\mathbf{oc}_i}\cdot\overrightarrow{\mathbf{c}_i\mathbf{v}_k}}{\|\overrightarrow{\mathbf{oc}_i}\|\,\|\overrightarrow{\mathbf{c}_i\mathbf{v}_k}\|}\right),\ 0\le\theta_k\le\pi \tag{8}$$

를 구한 다음, θ_k를 구간 $\triangle\theta=\pi/N_B$에 따라 N_B개의 영역으로 구분한다. 그리고 각 꼭지점들 $\hat{\boldsymbol{v}}_{k\in[1,N_i]}$을 θ_k가 속해 있는 영역별로 그룹화한다. 즉, N_B개의 그룹 **B**은

$$\mathbf{B}=\{B_l|l\in[1,N_B]\},B_l=\left\{\hat{\boldsymbol{v}}_k|\theta_k\in[(l-1)\triangle\theta,l\triangle\theta],\ k\in[1,N_{B_l}]\right\} \tag{9}$$

으로, 각 그룹 B_l은 사이각이 $\theta_k\in[(l-1)\triangle\theta,l\triangle\theta]$을 만족하는 꼭지점들로 구성된다. 여기서 N_{B_l}은 그룹 B_l에 속한 꼭지점들의 개수이다. $\triangle\theta$는 영역을 구분하는 변수이다.

워터마크 삽입 대상 영역은 영역 B_l에 속하는 꼭지점들의 확률밀도 $p(B_l)$가 $p(B_l)=\frac{N_{B_l}}{N_i}>Th$를 만족하는 범위 내에서 선택된다.

Step 3. 워터마크 비트 삽입

제안한 방법에서는 $B_j=\left\{\hat{\boldsymbol{v}}_{j,k}|\theta_{j,k}\in[(l-1)\triangle\theta,l\triangle\theta],\ k\in[1,N_{B_j}]\right\}$ 내에 속하는 모든 정규화된 꼭지점들의 객체 중점와의 거리 $\hat{r}_{j,k}=\|\overrightarrow{\mathbf{c}_i\hat{\boldsymbol{v}}_{j,k}}\|$를 구한 후, 이를 임의의 인자 $\triangle r$로 양자화된 거리값 $q_{j,k}=INT(\hat{r}_{j,k}/\triangle r+0.5)$에 임의의 워터마크 비트 w_j^1가 다음과 같이 삽입된다.

$$q'_{j,k}=\begin{cases}\lfloor q_{j,k}\rfloor+w_j^1, & \text{if } \lfloor q_{j,k}\rfloor\%2==0\\ \lfloor q_{j,k}\rfloor+1-w_j^1, & \text{if } \lfloor q_{j,k}\rfloor\%2==1\end{cases},w_j^1\in[0,1] \tag{10}$$

3.2 암호화영역 상에서의 워터마크 삽입

WCA에서 전달받은 암호화된 2차 워터마크 $E_{pk^*}(\mathbf{W}^2)=\left\{E_{pk^*}(w_j^2)|j\in[1,N_{W^2}]\right\}$는 암호화 영역 상에서 준동형 특성을 만족하는 연산자 $\oplus$에 의하여 삽입되어져야 한다. 암호화 영역 상에서 워터마크 삽입 연산자 $\oplus$는 준동형 특성을 만족하여야 하며, 원본이 필요 없는 블라인드 특성을 가져야 한다. 따라서 제안한 방법에서는 암호화 영역 상에서 합과 곱으로 이루어진 비트 치환 방법에 의하여 2차 워터마크를 삽입한다.

먼저 2차 워터마크 삽입 대상인 꼭지점 데이터들을 임의의 객체 $\mathbf{O}'_i$내에서 워터마크 길이 N_{w^2}의 m배 만큼 선택한다. 즉, 임의의 꼭지점 데이터 인덱스를 m개 선택하여 이를 $\mathbf{I}=\{I_k|k\in[1,m]\}$로 저장한다. 이 때 각 인덱스간의 거리는 $|I_{k1}-I_{k2}|>N_{w^2}$이어야 한다. 2차 워터마크 삽입 대상 꼭지점 데이터 집합 **D**은

$$\mathbf{D}=\{D_k|k\in[1,m]\},D_k=\left\{\mathbf{v}'_j=(x'_j,y'_j,z'_j)\mid j\in[I_k,I_k+N_{w^2}]\right\} \tag{11}$$

와 같이 선택된 인덱스 I_k를 기준으로 N_{w^2}개 만큼 꼭지점 데이터 원소들을 가지는 집합 D_k ($k\in[1,m]$)들로 구성된다. N_{w^2} 길이의 2차 워터마크는 m번 반복하여 집합 **D**에 삽입된다. 여기서 꼭지점 데이터들은 32비트(sign 1bit, Base 15bit, fraction 16bit)의 고정소수점들로 표현된다. 꼭지점 데이터 집합 D_k 내의 모든 데이터들은 소수점 영역의 임의의 t번째를 0으로 초기화된다. 그런 다음 1차 워터마크가 삽입된 콘텐츠 $\mathbf{X}'=\{\mathbf{O}'_i,\mathbf{O}_k|i,k\in[1,N_F],i\neq k\}$를 pk^*에 의하여 암호화된 콘텐츠 $E_{pk^*}(\mathbf{X}')=\left\{E_{pk^*}(\mathbf{O}'_i)|i\in[1,N_F]\right\}$가 생성된다. 암호화된 2차 워터마크 $E_{pk^*}(\mathbf{W}^2)=\left\{E_{pk^*}(w_j^2)|j\in[1,N_{W^2}]\right\}$를 암호화된 객체 $E_{pk^*}(\mathbf{O}'_i)$의 데이터 집합 $E_{pk^*}(D_k)=\left\{E_{pk^*}(\mathbf{v}'_j)=(E_{pk^*}(x'_j),E_{pk^*}(y'_j),E_{pk^*}(z'_j))\mid j\in[I_k,I_k+N_{w^2}]\right\}$ 내에 연산자 $\oplus$에 의하여 m번 반복하여 삽입한다. 예를 들어, j번째 워터마크 $E_{pk^*}(w_j^2)$는 임의의 데이터 집합 내의 j번째 꼭지점 데이터 $E_{pk^*}(\mathbf{v}'_j)$ 내에

$$\begin{aligned}E_{pk^*}(\mathbf{v}''_j)&=E_{pk^*}(\mathbf{v}'_j)\oplus E_{pk^*}(w_j^2)\\&=E_{pk^*}(\mathbf{v}'_j)+E_{pk^*}(2^t)\times E_{pk^*}(w_j^2)\end{aligned} \tag{12}$$

와 같이 삽입된다. 연산자 $\oplus$는 합과 곱에 대하여 준동형 특성을 만족하므로 위 식은 $E_{pk^*}(\mathbf{v}''_j)=E_{pk^*}(\mathbf{v}'_j+2^t\times w_j^2)$와 같으며 이를 공간영역 상에서 살펴보면, 워터마크 비트 w_j^2를 2^t배하여 데이터 집합의 각 원소 d_i에 더함으로써 워터마크가 삽입된 데이터 집합

$$D_k=\left\{\mathbf{v}''_j=\mathbf{v}'_j+2^t\times w_j^2\mid j\in[I_k,I_k+N_{w^2}]\right\} \tag{13}$$

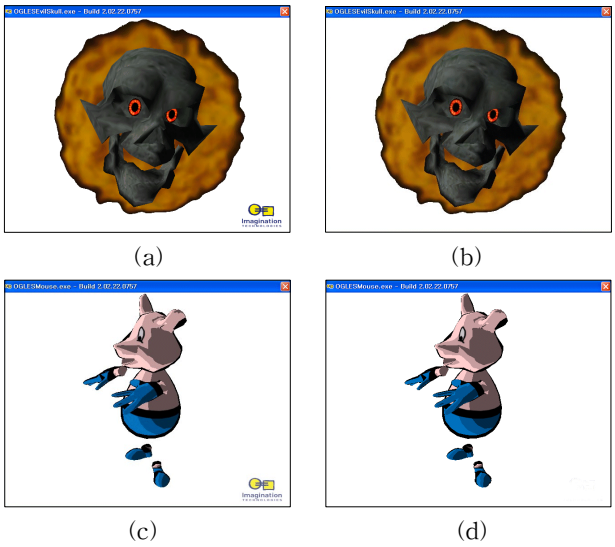
을 구하는 것과 같다. 이와 같은 방법으로 판매자는 암호화된 객체 데이터 집합 내에 2차 워터마크를 삽입함으로써, 최종 워터마크된 암호 콘텐츠 $E_{pk^*}(\mathbf{X}'')$를 구매자에게 전달한다. 구매자는 비밀키 sk^*에 의하여 $E_{pk^*}(\mathbf{X}'')$를 복호하여 다중 워터마크된 콘텐츠 $\mathbf{X}''$를 얻는다.

4. 실험 결과

본 실험에서는 제안한 방법의 구현을 위하여 PowerVR OpenGL ES SDK [6] 기반의 EvilSkull, Mouse, PolybumpHead, Vase 모델을 이용하였다. 각 모델의 객체, 폴리곤수, 꼭지점수 및 워터마크 비트수는 표 1에서와 같으며, 표 1를 살펴보면 PolybumpHead를 제외한 나머지 모델에서는 다중 워터마크를 각기 다른 객체에 삽입됨을 볼 수 있다.

<표 1> 본 실험에 사용된 모델의 객체, 폴리곤수, 꼭지점 수 및 삽입된 워터마크 비트수

모델명	객체 (Object)	폴리곤 수	꼭지점 수	단일 워터마크 비트수	WCA 워터마크 비트수	꼭지점 SNR비 [dB]
Evil Skull	Skull	838	583	66	-	40.50
	Jaw	346	175	-	100	68.86
Mouse	Head	1078	605	62	-	38.42
	Hand Left	362	210	-	100	71.04
	Hand Right	362	212	-	100	72.19
	Body	332	189	-	100	73.75
	Object	760	410	39	-	26.37



(a) (b) (c) (d)

(그림 4) (a) EvilSkull (b) 워터마크된 EvilSkull, (c) Mouse (d) 워터마크된 Mouse

본 실험에서는 워터마크의 비가시성을 확인하기 위하여 각 모델 객체 $\mathbf{O}_i$의 꼭지점 $\mathbf{V}_i$에 대한 SNR 비를

$$\mathrm{SNR}_i = 10\log_{10}[\mathrm{Var}(\boldsymbol{V}_i)/\mathrm{Var}(\boldsymbol{N}_i)] \qquad (14)$$

와 같이 사용하였다. 여기서 $\mathrm{Var}(\boldsymbol{V}_i)$는 꼭지점 $\mathbf{V}_i$에 대한 분산이며, $\mathrm{Var}(\boldsymbol{N}_i)$는 워터마크에 의한 잡음 $|\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_i'|$에 대한 분산을 나타낸다. 표 1를 살펴보면, 단일 워터마크가 삽입된 객체의 꼭지점 SNR비는 36.37-40.76dB 정도이며, WCA 워터마크가 삽입된 객체의 꼭지점 SNR비는 68.86-73.75dB 정도이다. 제안한 방법에서는 단일 워터마크 비트수가 WCA 워터마크 비트수에 비하여 작으나, 단일 워터마크를 꼭지점 분포에 삽입하므로, 삽입 대상 꼭지점 수가 WCA 워터마크 삽입 방법에 비하여 5배 정도 많다.

<표 2> 공격에 대한 워터마크 검출 여부

모델 \ 공격		랜덤 잡음 (a=0)	데이터 정밀도 가변(±3)	데이터 삭제	회전	스케일링	이동
EvilSkull	W^1	○	○	○	○	○	○
	W^2	○	○	○	×	×	×
Mouse	W^1	○	○	○	○	○	○
	W^2	○	○	○	×	×	○

견고성 실험에서는 각 객체의 꼭지점 데이터에 랜덤 잡음, 데이터 정밀도 가변, 데이터 삭제, 확대, 축소 등을 수행하였다. 실험 결과로는 표 2에서와 같으며, 추출된 데이터의 비트 오류가 없는 경우에서만 검출됨을 확인하였다. 1차 워터마크 삽입 방법은 데이터 분포 상에 삽입되므로 확대 및 축소에는 강인하다. 그러나 2차 워터마크는 임의의 특정 비트에 삽입되므로 원 데이터에 비하여 확대 및 축소된 비율을 알지 못하면 검출되지 못함을 알 수 있다. 이는 원 데이터 비율로 스케일링 과정을 수행하면 확대 및 축소에서 비트 오류가 발생되지 않을 것이다.

4. 결론

본 논문에서는 모바일 3D 콘텐츠의 저작권 보호를 위하여 익명 Buyer-Seller 워터마킹 프로토콜 상에서 3D 콘텐츠 내의 공간 영역 및 암호화 영역 내에 다중 워터마크를 삽입하는 방법을 제안하였다. 각 객체의 꼭지점 좌표에 대한 정규화 정보를 이용하여 워터마킹을 수행하므로 스케일링, 회전, 이동 및 연결성 정보 공격에 강인하다. 성능평가를 위한 비가시성 및 강인성 실험을 통하여 본 제안 기법의 콘텐츠 접근제어에 대한 우수성 및 워터마킹 본연의 비가시성, 강인성 또한 우수함을 확인하였다.

Acknowledgement

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과 및 산학공동기술개발지원사업(산학협력실지원사업)을 통해 개발된 결과물입니다.

참고문헌

[1] Roger S. Pressman “Software Engineering A Practitioners’ Approach” 3rd Ed. McGraw Hill

[2] X-Forge Engine, Fathammer, http://www.fathammer.com

[3] Mascot Capsule Engine, HI CORP., http://www.hicorp.co.jp

[4] N. Memon and P. W. Wong, "A buyer-seller watermarking protocol," *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 10, Issue 4, pp. 643-649, April 2001.

[5] C.-L. Lei, P.-L. Yu, P.-L. Tasi, M.-W. Chan, "An efficient and anonymous buyer-seller watermarking protocol," *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 13, Issue 12, pp. 1618-1626, Dec. 2004.

[6] PowerVR OpenGL ES 1.x, Imagination Technology, http://www.imgtec.com/.·