

# 꼭지점 좌표 벡터 크기값의 시간축 웨이블릿 변환을 이용한 3차원 메쉬 시퀀스의 블라인드 워터마킹

정회원 김민수<sup>\*\*\*</sup>, 조재원<sup>\*\*\*</sup>, Rémy Prost<sup>\*\*</sup>, 정호열<sup>\*o</sup>

## A Blind Watermarking for 3-D Mesh Sequence Using Temporal Wavelet Transform of Vertex Norms

Min-Su Kim<sup>\*\*\*</sup>, Jae-Won Cho<sup>\*\*\*</sup>, Rémy Prost<sup>\*\*</sup>, Ho-Youl Jung<sup>\*o</sup> *Regular Members*

### 요 약

본 논문에서는 3차원 메쉬 시퀀스의 워터마킹 기법을 제안한다. 제안된 방법은 연결성 정보가 일정한 동형 메쉬 시퀀스의 각 꼭지점 좌표 벡터 크기 값을 시간축 웨이블릿 변환하고 삽입하고자 하는 워터마크에 따라 고주파수(혹은 중간 주파수) 대역의 웨이블릿 계수의 확률 분포를 수정한다. 이 때, 저주파수 대역의 계수값을 참조하여 고주파수(혹은 중간 주파수) 대역의 계수값을 복수개의 그룹(bin)으로 분할하고, 각 bin의 2차 모멘트를 변화시키는 방법으로 한 비트의 워터마크를 삽입한다. 동형 메쉬 시퀀스의 경우 한 그룹에 속한 꼭지점 좌표 크기의 웨이블릿 계수값 또한 같은 그룹에 할당되며, 워터마크는 이 웨이블릿 계수에 삽입된다. 제안된 방법은 신호의 확률 분포를 이용하기 때문에 일반적인 신호처리 변형에 강인할 뿐만 아니라, 워터마크 검출 시 원본이 없이도 삽입된 워터마크를 검출할 수 있다. 다양한 신호처리 공격 실험을 통해 제안된 방법의 유효성을 확인한다.

**Key Words** : 3-D mesh sequences, Digital watermarking, Temporal wavelet transform, Blind detection, Distribution

### ABSTRACT

In this paper, we present a watermarking method for 3-D mesh sequences. The main idea is to transform vertex norm with the identical connectivity index along temporal axis using wavelet transform and modify the distribution of wavelet coefficients in temporally high (or middle) frequency frames according to watermark bit to be embedded. All vertices are divided into groups, namely bins, using the distribution of coefficients in low frequency frames. As the vertices with the identical connectivity index over whole frames belong to one bin, their wavelet coefficients are also assigned into the same bin. Then, the watermark is embedded into the wavelet coefficients of vertex norm. Due to the use of the distribution, our method can retrieve the hidden watermark without any information about original mesh sequences in the process of watermark detection. Through simulations, we show that the proposed is fairly robust against various attacks that are probably concerned in copyright protection of 3-D mesh sequences.

※ 본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITA-2006-(C1090-0603-0002)).

\* 영남대학교 정보통신공학과 대학원 멀티미디어 신호처리 연구실 (hoyoul@yu.ac.kr) (° : 교신저자)

\*\* 프랑스 리옹국립응용과학원(INSA de Lyon) 전자공학과 CREATIS 연구소 ({kim, cho, prost}@creatis.insa-lyon.fr)

논문번호 : KICS2006-10-404, 접수일자 : 2006년 10월 3일, 최종논문접수일자 : 2007년 1월 8일

## I. 서론

최근, 네트워크(network) 기술의 발전과 함께 디지털 미디어(digital media)는 복사와 편집, 저장 그리고 배포를 별다른 어려움 없이 가능하게 하였다. 이로 인해, 악의적인 의도를 가진 사용자가 막대한 비용을 투자하여 제작한 저작물을 불법 유통시킴으로써 원본 저작권자의 재산상의 손해를 야기하는 등의 법적 분쟁이 속출하고 있으며, 이러한 이유로 저작권 보호를 위한 기술 개발이 주목 받고 있다. 전통적인 데이터 보호 기술인 암호화(encryption) 기법은 복호화(decryption)가 이루어진 이후에는 해당 데이터의 보호를 보장할 수 없기 때문에 저작권 보호를 위한 수단으로는 부족하다. 이에 반해 디지털 워터마킹(digital watermarking) 기법은 해당 데이터에 대한 접근은 허용하면서도 워터마크(watermark)라고 하는 저작권자의 정보를 은닉함으로써 저작권 보호(copyright protection) 수단을 제공한다<sup>[1]</sup>. 물론 연성(fragile) 및 반연성(semi-fragile) 워터마킹 기법이 콘텐츠 인증(content authentication)이나 해독 방지(temper proofing)를 위해 널리 사용되고 있으나<sup>[3,4]</sup>, 본 논문에서는 저작권 보호를 위한 강성(robust) 워터마킹 기법만을 다루기로 한다.

3차원 표면메쉬(3-D surface mesh)는 영화와 비디오 게임의 3차원 캐릭터 애니메이션에서 주로 사용되고 있으며, 최근에는 데이터의 현실감 있는 시각화를 필요로 하는 산업의 전반에서 요구가 증가하고 있다<sup>[2]</sup>. 3차원 표면 메쉬 시퀀스(3-D surface mesh sequence)는 결과물의 데이터 크기가 매우 방대한 특징으로 인하여, 주로 데이터의 효율적인 시각화 기법 및 압축 기법들에 관한 연구<sup>[8-11,26,27]</sup>가 진행되고 있다. 방대한 크기의 데이터를 제작하기

위해 매우 많은 시간과 비용 및 저작자의 노력을 필요로 하기 때문에 저작권 보호 수단 또한 절실히 요구되지만, 현재까지 이와 관련한 연구는 매우 미비한 실정이다<sup>[24]</sup>.

본 논문에서는 3차원 표면 메쉬 시퀀스를 위한 워터마킹 기법을 제안한다. 균일 격자(regular grid) 위에 화소의 밝기 값으로 표현되는 2차원 영상 및 비디오 데이터와는 달리, 3차원 메쉬 데이터는 일반적으로 그림 1(a)와 같이 직각 좌표계(Cartesian coordinate system)의 꼭지점(vertex)을 표현하는 기하정보(geometrical information)와 삼각형 메쉬(triangular mesh)의 형태로 표현되는 연결성 정보(connectivity information)로 이루어져 있다<sup>[25]</sup>. 기하정보와 연결성 정보가 외에도 3차원 영상을 더욱 실감나게 표현하기 위해 꼭지점 및 표면메쉬(surface meshes)의 색상 정보, 법선 벡터(normal vector), 텍스처(texture) 정보 및 셰이딩(shading) 등의 속성(attribute)들이 사용된다. 이 중 색상 및 텍스처 정보는 매우 손쉽게 편집 및 제거될 수 있기 때문에 워터마크 정보를 삽입할 대상(primitive)으로는 적합하지 않다. 이러한 이유로 저작권 보호를 위한 강성 워터마킹 기법에는 주로 꼭지점의 위치정보에 워터마크를 삽입하는 방법이 자주 사용된다<sup>[3]</sup>. 3차원 표면 메쉬 시퀀스는 시퀀스를 구성하는 모든 정지(static) 메쉬 프레임(frame) 간의 연결성 정보의 변화에 따라, 동형(isomorphic) 메쉬 시퀀스와 비동형(non-isomorphic) 메쉬 시퀀스로 구분된다. 본 논문에서 사용되는 3차원 동형 메쉬 시퀀스는 그림 1(b)-(c)와 같이 모든 프레임의 연결성 정보는 동일하되, 각 정지 메쉬 프레임의 기하정보를 변형함으로써 움직이는 객체(object)를 표현한다. 동영상 신호가 2차원 정지(still) 영상의 연속적인 프레임으

```
# vtk DataFile Version 3.0
vtk output
ASCII
DATASET POLYDATA
POINTS 2904 float // Geometry
0.0468 19 0.089 139 -0.000126
0.051767 0.062937 -0.000294
0.041727 0.088570 -0.000141
...
POLYGONS 5804 23216 // Connectivity
3 18 10 88
3 148 168 169
3 244 193 194
3 35 42 41
3 185 160 159
3 129 364 134
3 296 295 288
...
3 319 510 505
CELL_DATA 5804
POINT_DATA 2904
```

(a) 정지 메쉬 Cow

```
# vtk DataFile Version 3.0
vtk output
ASCII
DATASET POLYDATA
POINTS 2904 float // Geometry
-0.296 -2.413 4.978
...
0 -2 -2.995
...
POLYGONS 5804 23216 // Connectivity
3 18 10 88
3 148 168 169
3 244 193 194
3 35 42 41
3 185 160 159
3 129 364 134
3 296 295 288
...
3 319 510 505
CELL_DATA 5804
POINT_DATA 2904
```

(b) Face 시퀀스의 첫번째 프레임

```
# vtk DataFile Version 3.0
vtk output
ASCII
DATASET POLYDATA
POINTS 2904 float // Geometry
-0.161 -2.736 4.716
...
0 -2 -2.995
...
POLYGONS 5804 23216 // Connectivity
3 18 10 88
3 148 168 169
3 244 193 194
3 35 42 41
3 185 160 159
3 129 364 134
3 296 295 288
...
3 319 510 505
CELL_DATA 5804
POINT_DATA 2904
```

(c) Face 시퀀스의 다섯번째 프레임

그림 1. 정지 메쉬 Cow 및 동형 메쉬 시퀀스 Face의 vtk 파일 포맷  
Fig. 1. vtk file format of static mesh Cow and isomorphic mesh sequence Face

로 구성되는 것과 같이, 3차원 동형 메쉬 시퀀스도 3차원 정지 메쉬 프레임의 연속된 형태로 구성된다.

앞서 언급한 바와 같이 3차원 데이터에 대한 워터마킹 연구는 주로 3차원 정지 메쉬 데이터를 대상으로 이루어져 왔다. R. Ohbuchi<sup>[3]</sup>에 의해 소개된 워터마킹 기법들을 시발점으로 하여, 현재까지 제안된 3차원 메쉬 데이터의 워터마킹 기법은 크게 공간영역에 삽입하는 방법과 주파수 영역에 삽입하는 방법으로 나눌 수 있다. 공간영역에 삽입하는 방법의 경우<sup>[12-16]</sup>, 꼭지점 좌표의 벡터 크기 값(vertex norm)이나 방향성분(vertex direction)에 삽입하는 방법을 주로 사용한다. 주파수 영역에 삽입하는 방법<sup>[17-20]</sup>의 경우 3차원 메쉬 데이터를 다해상도 분해 기법을 이용하여 여러 부대역으로 분해한 후, 비지각성 및 강인성을 고려하여 적당한 주파수 대역 신호에 워터마크를 삽입한다. 또한, 워터마크를 검출하는 단계에서 원본 영상을 사용하는 방법(non-blind detection)과 원본 영상을 사용하지 않는 블라인드 검출 방법(blind detection)으로 나눌 수 있는데, 전자의 경우 각종 공격에 대한 강인성은 후자보다 우수하지만<sup>3,6,12-15,17,18]</sup>, 원본 영상에 접근하기가 쉽지 않은 실제 응용 분야에는 원본 영상을 사용하지 않는 방법<sup>[4,5,16,19,20]</sup>이 더욱 효율적이다. 3차원 애니메이션을 위한 워터마킹 기법으로는 움직임 신호(motion signal)를 이용하는 애니메이션 기법에 적합한 워터마킹 기법이 T. Kim<sup>[21]</sup>과 S. Yamazaki<sup>[22]</sup>에 의해 소개된 바 있다. 제안된 방법들은 움직임 신호를 시간 축으로 다해상도 분해한 후 중간 주파수 대역 및 고주파 대역 신호에 대역 확산 기법<sup>[11]</sup>을 사용하여 워터마크를 삽입한다. 또한 워터마크 검출과정에서 원본 움직임 신호를 참조하는 난-블라인드(non-blind) 기법이다. 이 방법<sup>[21,22]</sup>은 주어진 물체의 주요 관절의 각도(angle)와 마커(marker)의 위치로 표현된 움직임 신호에 워터마크를 삽입하는 방법으로, 3차원 표면 메쉬 시퀀스에는 워터마킹이 적용되지 않았다. 본 논문에서는 3차원 메쉬 시퀀스를 이용한 애니메이션 기법에 적합한 워터마킹 기법을 위한 제안한다.

2차원 영상의 워터마킹 기법과 유사하게 삽입된 워터마크의 비지각성(transparency), 각종 공격에 대한 강인성(robustness), 용적성(capacity) 등은 3차원 메쉬 데이터 워터마킹 기법의 공통된 요구사항이다. 삽입한 워터마크의 검출을 방해하는 각종 공격으로는 유사변환(similarity transform)/어파인 변환(affine transform), 메쉬 평활화(mesh smoothing),

부가 잡음 (additive noise), 양자화(vertex coordinate quantization), 손실 압축(lossy compression) 등과 같은 기하학적 신호처리 공격(geometrical attacks)과 더불어 메쉬 간략화(polygon simplification), 재메쉬화(re-meshing), 좌표 재배열(random vertex re-ordering), 자르기(cropping) 등과 같은 위상학적 공격 (topological attacks)이 있다. 3차원 메쉬 시퀀스의 워터마킹 기법의 경우, 3차원 메쉬 워터마킹의 기하학적/위상학적 공격과 더불어 2차원 동영상의 워터마킹 기법<sup>[23]</sup>에서와 같이 프레임 평균화(frame averaging), 프레임간 위치교환(frame swapping), 프레임 제거(frame dropping)등과 같이 인접한 두 프레임간의 유사성(temporal coherence)을 이용한 공격 또한 고려되어야 할 것이다.

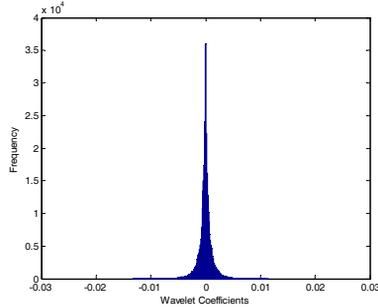
본 논문에서는 3차원 동형 메쉬 시퀀스에 워터마크를 삽입하는 방법을 제안한다. 제안된 방법은 공간 및 시간 영역에서 다양한 신호처리 공격에 강인하도록 하기 위해서, 시간 축 웨이블릿 변환(temporal wavelet transform) 후 삽입하고자 하는 워터마크에 따라 고주파수(high frequency) 혹은 중간 주파수(middle frequency) 대역 신호의 확률 분포(probability distribution)를 수정한다. 본 논문의 이전 연구<sup>[24]</sup>에서는 꼭지점 좌표값을 각 축 방향으로 독립적으로 웨이블릿 변환을 적용하고, 각 축별로 독립적인 워터마크를 삽입하는 방법을 사용하였다. 본 논문에서는 꼭지점의 좌표 벡터 크기를 시간 축 웨이블릿 변환을 적용한 후, 삽입할 대역의 계수값의 분포를 수정한다. 제안된 방법은 기존 방법에 비하여 삽입 가능한 비트수가 줄어들기는 하지만, 꼭지점의 좌표 벡터 크기를 수정함으로써 인해서 일반적인 신호처리 공격, 특히 회전 공격에 대하여 더욱 강인함을 나타내며, 삽입된 워터마크의 비가시성 또한 이전 방법보다 우수하다. 또한, 제안된 방법은 워터마크 검출 시 원본 데이터를 사용하지 않는 블라인드 기법이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 제2장에서 제안된 3차원 동형 메쉬 시퀀스의 저작권 보호를 위한 워터마크 삽입 및 검출 기법을 상세히 기술한다. 제3장에서는 다양한 신호처리 공격에 대한 실험 결과를 분석함으로써 제안된 방법의 효율성을 보이고, 제4장에서 결론을 맺는다.

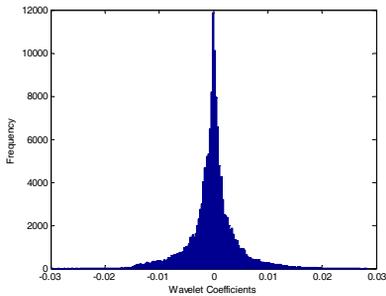
## II. 제안된 방법

3차원 정지 메쉬 워터마킹에 관한 이전 연구<sup>[16, 19]</sup>

에서 공간영역의 꼭지점의 좌표 벡터 크기가 구간  $[0,1]$  (혹은  $[-1,1]$ ) 에서 균일분포를 따른다고 가정하여, 이 확률 분포를 히스토그램 사상 함수 (histogram mapping function)를 이용하여 삽입하고



(a) 고 주파수 대역 계수



(b) 중간 주파수 대역 계수

그림 2. Cow 메시 시퀀스의 시간 축 웨이블릿 변환 후 고주파수 영역 계수 벡터 크기 값의 히스토그램 분포

Fig. 2. Histogram of vector norm of wavelet coefficients after temporal wavelet transform for Cow mesh sequences

자 하는 워터마크 비트에 따라 참조 평균값(1/2) (혹은 참조 분산값(1/3)) 보다 크거나 작도록 수정하는 방법을 제안한 바 있다.

본 논문에서는 꼭지점의 좌표 벡터 크기를 시간축(temporal axis)을 따라 웨이블릿 변환한 후, 삽입하고자 하는 워터마크 비트에 따라 고주파수 대역 (또는 중간주파수 대역)의 계수 값의 분포를 수정한다. 이때, 한 꼭지점의 좌표 벡터 크기는 각 정지 메시 프레임의 좌표 점들의 무게중심으로부터 해당 좌표 점까지의 거리를 의미한다. 고주파수(또는 중간주파수) 대역 계수의 확률분포는 그림 2과 같이 좌우대칭인 라플라시안 분포(Laplacian distribution)로 근사화된<sup>10,24)</sup>, 이러한 대칭성을 이용하여 워터마크를 삽입하면 블라인드 검출을 위한 참조 값을 구하기가 용이하다.

그림 3은 다음 절에서 자세히 기술할 워터마크

삽입 과정을 보여준다. 이해를 돕기 위해 워터마크 삽입 과정은 웨이블릿 분해 레벨(wavelet decomposition level)이 1일 경우로 한정하여 설명한다. 먼저 각 정지 메시 프레임의 무게 중심을 원점으로 이동한 후, 모든 꼭지점의 좌표 벡터 크기를 계산하고 이를 시간 축을 따라 웨이블릿 변환한다. 제안된 방법은 고주파수 대역 계수의 확률분포를 수정하는 방식으로, 워터마크의 용적성을 높이기 위해서 다수 개의 구간(빈, bin)으로 나누고 하나의 빈에 한 비트의 워터마크를 삽입한다. 구간을 나누는 방법론으로 먼저 워터마크를 삽입하고자 하는 고주파수 대역의 확률분포를 동일한 간격으로 나누는 방법을 고려할 수 있다. 그러나 고주파수 대역의 확률 분포는 일부 구간(0 근처)에 집중적으로 분포되어 있고, 일반적인 신호처리 공격에 의해 쉽게 변형이 되기 때문에 워터마크 검출 시 나누어진 구간을 다시 찾기가 어려울 수 있다. 본 논문에서는 고주파수 대역에 비해 상대적으로 변형이 적고, 확률분포가 특정한 값에 집중되어 있지 않은 저주파수 대역의 계수를 참조하여 고주파수 대역의 계수를 다수개의 구간으로 나누는 방법을 제안한다.

동형 메시 시퀀스인 경우 시퀀스를 구성하는 모든 프레임이 동일한 연결성 정보를 가지기 때문에, 저주파수 대역 계수에 대응하는 고주파수 대역 계수를 쉽게 구할 수 있다. 이때, 워터마크는 그림 4과 같이, 각 빈에 속하는 고주파수 대역 계수의 부호(sign)에 따라 양의 분포와 음의 분포로 나눈 다음, 삽입할 워터마크의 부호에 따라 한쪽의 2차 모멘트를 다른 한쪽의 2차 모멘트에 비해 상대적으로 크거나 혹은 작게 수정한다. 기존 방법<sup>24)</sup>에서는,  $x, y, z$  의 세 축에 독립적으로 시간 축 웨이블릿 변환을 적용한 후 고주파수(또는 중간주파수) 대역 계수의 확률 분포를 수정하는 방법을 제안하였으나, 움직임이 급격히 많은 프레임에 삽입된 워터마크의 경우 메시 시퀀스에 심각한 시각적 왜곡을 발생시키는 문제가 있었다. 본 논문에서는 꼭지점의 좌표 벡터 크기를 시간 축으로 웨이블릿 변환 후, 고주파수 (또는 중간 주파수) 대역 계수의 확률분포를 수정한다. 이로 인해, 삽입할 수 있는 비트수가 줄어들기는 하지만, 기존 방법<sup>24)</sup>에서 발생하는 왜곡을 최소화 할 수 있다. 또한, 제안된 방법은 회전 공격에 변화되지 않는 벡터 크기 값을 수정하기 때문에, 회전 공격에도 매우 강인하다.

워터마크 검출은 시간 축 웨이블릿 변환 후 워터마크 삽입의 경우와 마찬가지로 저주파수 계수를

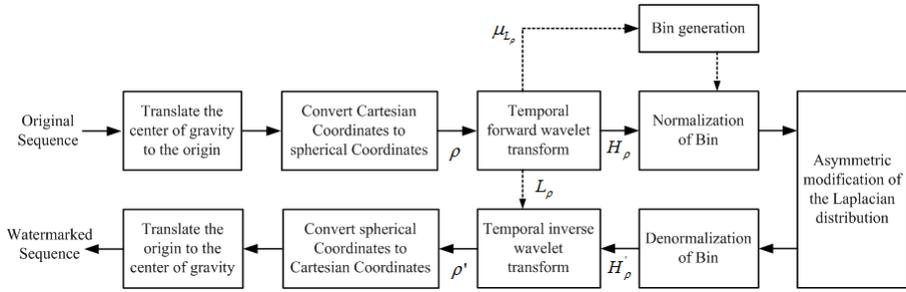


그림 3. 워터마크 삽입 과정  
Fig. 3. Block diagram of the watermark embedding procedures

참조하여 bin으로 나눈 후, 각 bin에 속하는 고주파수 계수를 양의 계수의 2차 모멘트와 음의 계수의 2차 모멘트를 비교함으로써 삽입된 워터마크를 쉽게 검

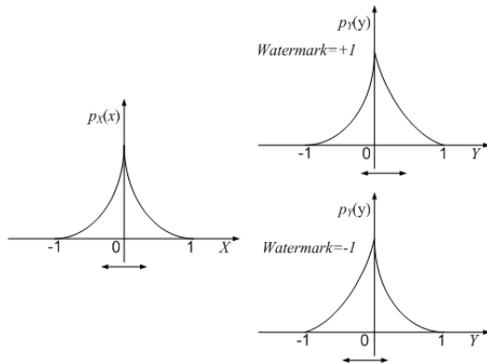


그림 4. 워터마크 비트에 따른 라플라시안 분포의 비대칭적 수정  
Fig. 4. Asymmetric modification of Laplacian distribution according to the watermark bit

출할 수 있다. 즉, 제안된 방법은 원본 메쉬 시퀀스를 사용하지 않는 블라인드 검출 기법이다.

### 2.1 워터마크 삽입

먼저  $N$ 개의 동형 메쉬 프레임으로 구성된 3차원 메쉬 시퀀스  $S(s_n \in S, 0 \leq n < N)$ 로부터, 각 메쉬 프레임  $s_n$ 의 무게중심(center of gravity)을 원점으로 이동한 다음, 각 프레임  $s_n$ 의  $n$ 번째 프레임 메쉬의  $i$ 번째 꼭지점 직각 좌표(Cartesian coordinate)  $v_n(i) = (x_n(i), y_n(i), z_n(i))$ 를 구좌표(spherical coordinate),  $v_n(i) = (\rho_n(i), \theta_n(i), \phi_n(i))$ 로 변환한다.

$$\begin{aligned} \rho_n(i) &= \sqrt{(x_n(i) - \mu_{x_n})^2 + (y_n(i) - \mu_{y_n})^2 + (z_n(i) - \mu_{z_n})^2} \\ \theta_n(i) &= \tan^{-1} \frac{(y_n(i) - \mu_{y_n})}{(x_n(i) - \mu_{x_n})} \\ \phi_n(i) &= \cos^{-1} \frac{(z_n(i) - \mu_{z_n})}{\sqrt{(x_n(i) - \mu_{x_n})^2 + (y_n(i) - \mu_{y_n})^2 + (z_n(i) - \mu_{z_n})^2}} \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서  $0 \leq n < N, 0 \leq i < |v|$ ,  $|v|$ 는  $s_n$ 의 꼭지점의 개수이고,  $(\mu_{x_n}; \mu_{y_n}; \mu_{z_n})$ 는  $s_n$ 의 무게중심이다.

동일한 인덱스  $i$ 를 가지는 꼭지점의 벡터 크기  $\rho_n(i)$ 는 시간축  $n$ 을 따라 변화하는 1차원 신호로 간주할 수 있으며,  $\rho_n(i)$ 를 시간 축을 따라 웨이블릿 변환하면, 저주파수 대역 계수  $l_n(i)$  ( $0 \leq n < N/2$ )과 고주파수 대역 계수  $h_n(i)$  ( $0 \leq n < N/2$ )로 분해된다<sup>[10]</sup>.

제안된 방법은 하나의 bin이 하나의 워터마크 비트를 삽입하기 위한 단위로 사용된다. 각 bin에 속하는 꼭지점 인덱스는 저주파수 대역 프레임의 평균 프레임  $\mu_l(i)$  ( $0 \leq i < |v|$ )을 참조하여 얻는다.

$$\mu_l(i) = \frac{1}{N/2} \sum_{n=0}^{N/2-1} l_n(i) \quad (2)$$

저주파수 대역의 평균 프레임  $\mu_l(i)$ 은 계수 값의 크기에 따라 균일한 간격을 가지는  $M$ 개의 구간으로 나뉜다.  $m$ 번째 구간에 속하는  $\mu_l(i)$ 의  $i$ 번째 계수  $\mu_{l_m(i)}$ 를 참조하여, 이에 대응되는  $i$ 번째 꼭지점 인덱스에 대한 모든 고주파수 대역 계수  $h_n(i)$ 를  $m$ 번째 bin으로 할당한다. 이제  $m$ 번째 bin은  $i$ 번째 계수의  $n$ 번째 프레임의 고주파수 대역 계수  $h_{n,m}(i)$ 만을 가진다.

다음으로,  $m$ 번째 bin에 속하는 모든 고주파수 대역 계수  $h_{n,m}(i)$ 는  $[-1, 1]$  사이의 값으로 정규화 된다.

$$\tilde{h}_{n,m}(i) = \frac{h_{n,m}(i)}{\max_i |h_{n,m}(i)|} \quad (3)$$

이로써  $\tilde{h}_{n,m}(i)$ 은  $[-1, 1]$  구간에서 좌우대칭인 라플라시안 분포를 가지며,  $\tilde{h}_{n,m}(i)$ 의 부호에 따라 양의 방향의 확률분포와 음의 방향의 확률분포로 나눌

수 있다.  $m$ 번째 워터마크 비트  $\omega_m \in \{1, -1\}$ 을 삽입하기 위해,  $\widetilde{h_{n,m}}(i)$ 의 확률분포의 2차 모멘트는 다음과 같이 수정된다.

$$\begin{aligned} E[Y_{m,+}^2] &> E[Y_m^2](1+\Delta), \text{ if } \omega_m = +1 \\ E[Y_{m,+}^2] &< E[Y_m^2](1-\Delta), \text{ if } \omega_m = -1 \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서,  $\Delta$ 는 워터마크의 강인성 및 비지각성을 결정하는 워터마크 삽입 강도(strength factor)로 사용된다.  $\omega_m = +1$ 을 삽입하기 위해서는  $\widetilde{h_{n,m}}(i)$ 의 확률분포의 2차 모멘트  $E[Y_m^2]$ 를 기준으로,  $\widetilde{h_{n,m}}(i)$ 의 양의 방향 계수의 2차 모멘트  $E[Y_{m,+}^2]$ 를  $+\Delta$ 만큼 수정한다. 반대로  $\omega_m = -1$ 을 삽입하기 위해서는  $E[Y_m^2]$ 를 기준으로,  $E[Y_{m,+}^2]$ 를  $-\Delta$ 만큼 수정한다. 두 가지 그룹의 2차 모멘트를 원하는 값으로 수정하기 위해  $\widetilde{h_{n,m}}(i)$ 는 식 (5)와 같은 히스토그램 사상 함수에 의해 각각 반복적인(iterative) 방법으로 변환된다.

$$\widetilde{h_{n,m}}(i) = \text{sign}(\widetilde{h_{n,m}}(i)) \cdot |\widetilde{h_{n,m}}(i)|^{k_m}, \text{ for } 0 < k_m < \infty, k_m \in R \quad (5)$$

만약  $k_m$ 이  $(1, \infty)$  구간에서 선택되었을 때,  $\widetilde{h_{n,m}}(i)$ 는 기존 부호를 유지하면서  $\widetilde{h_{n,m}}(i)$ 로 변환된다. 또한 변환된 계수의 절대 값은  $k_m$ 을 증가시킴으로써 작게 만들 수 있다. 이는 2차 모멘트를 감소시킬 수 있음을 의미한다. 반대로  $(0, 1)$  구간에서  $k_m$ 을 감소시킴으로써 2차 모멘트를 증가시킬 수 있다. 양의 방향 계수의 경우, 파라미터  $k$ 에 따라 2차 모멘트가 수정된다는 것을 Appendix에서 유도하였다. 동일한 방법으로 음의 구간 2차 모멘트도 수정할 수 있다.

워터마크를 삽입한 다음 모든 고주파수 대역 신호는 원래의 크기 구간으로 복원되고, 시간 축 방향으로 역 웨이블릿 변환(Inverse Wavelet Transform)이 적용된다. 모든 좌표들은 원래의 무게중심  $(\mu_x, \mu_y, \mu_z)$ 으로 이동됨으로써 워터마크가 삽입된 메쉬 시퀀스  $s'(\ni s'_n)$ 를 얻을 수 있다.

### 2.2 워터마크 검출

그림 5에서와 같이 제안된 워터마크검출 과정은 매우 간단하다. 워터마크 검출 대상 메쉬 시퀀스  $s'(\ni s'_n)$ 은 워터마크 삽입 과정과 유사하게, 저주

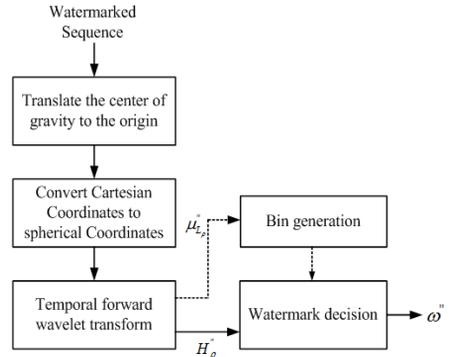


그림 5. 워터마크 검출 과정  
Fig. 5. Block diagram of the watermark extraction procedures

파수 대역 계수 값의 크기를 이용하여 고주파수 대역 계수를 빈을 할당하고, 각 빈에 대하여 양의 방향의 계수  $Y_{m,+}$ 의 2차 모멘트  $E[Y_{m,+}^2]$ 와 음의 방향 계수  $Y_{m,-}$ 의 2차 모멘트  $E[Y_{m,-}^2]$ 를 계산하여 그 크기를 비교함으로써, 삽입된  $m$ 번째 워터마크를 검출할 수 있다.

$$\omega_m = \begin{cases} +1, & \text{if } E[Y_{m,+}^2] > E[Y_{m,-}^2] \\ -1, & \text{if } E[Y_{m,+}^2] < E[Y_{m,-}^2] \end{cases} \quad (6)$$

이때, 워터마크 삽입 과정에서처럼 고주파수 대역계수로 구성된 각 빈의 정규화 과정은 생략된다. 또한, 식 (6)에서 알 수 있듯이 제안된 워터마크 검출 과정은 원본 데이터가 없이도 삽입된 워터마크 검출이 가능한 블라인드 방식이다.

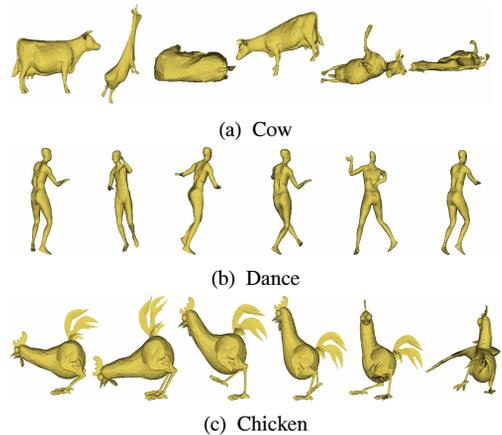


그림 6. 실험에 사용된 메쉬 시퀀스  
Fig. 6. Test mesh sequences

### III. 모의 실험 결과 및 고찰

본 장에서는 제안된 워터마킹 기법의 성능을 평가하기 위하여 다양한 실험을 수행하고, 실험 결과를 분석하였다. 본 실험에서는 그림 6과 같은 세 가지 메쉬 시퀀스, Cow (2904 vertices, 5804 faces, 204 frames), Dance (7061 vertices, 14118 faces, 200 frames), Chicken (2916 vertices, 5454 faces, 396 frames)을 사용하였다.

웨이블릿 분해를 위해 다이아딕(dyadic) 5/3 탭 쌍직교(bi-orthogonal) 완전 복원 필터군(perfect reconstruction filter-banks)을 시간 축으로 좌표 벡터의 크기에 적용하였다. 웨이블릿 분해 레벨은 2레벨로 적용하여, 총 3개의 부대역이 얻어진다. 이 중 저주파수 대역의 계수를 참조하여 고주파수(혹은 중간 주파수) 대역의 계수값을  $M$ 개의 bin으로 나누고, 각 bin의 2차 모멘트를 변화시키는 방법으로 워터마크를 삽입하였다. 워터마크의 삽입으로 인한 원본 데이터의 왜곡 정도를 측정하기 위해  $SNR$  (Signal to Noise Ratio)를 사용하였고, 이를 비지각성의 평

가 척도로 사용하였다.

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{\sum_{i=0}^{M-1} (v_{x_i}^2 + v_{y_i}^2 + v_{z_i}^2)}{\sum_{i=0}^{M-1} ((v_{x_i}'' - v_{x_i}')^2 + (v_{y_i}'' - v_{y_i}')^2 + (v_{z_i}'' - v_{z_i}')^2)} \quad (7)$$

여기에서,  $v$ 와  $v''$ 는 각각 원본 메쉬 프레임  $s_n$ 의 꼭지점과 왜곡이 가해진 메쉬 프레임  $s_n''$ 의 꼭지점을 의미한다. 또한, 강인성 평가 척도로서 원본 워터마크와 검출된 워터마크 사이의 유사도(correlation)를 사용하였다.

$$Corr = \frac{\sum_{m=0}^{M-1} (\omega_m'' - \bar{\omega})(\omega_m - \bar{\omega})}{\sum_{m=0}^{M-1} (\omega_m'' - \bar{\omega})^2 (\omega_m - \bar{\omega})^2} \quad (8)$$

여기에서  $\omega_m$ 은 원본 메쉬 시퀀스에 삽입한 워터마크 비트이며,  $\omega_m''$ 은 왜곡을 가한 후 검출한 워터마크 비트이다.  $\bar{\omega}$ 는 워터마크 비트열의 평균을 의미하고,  $Corr$ 는 [-1, 1]의 범위에 존재한다.

표 1. 고주파수 대역에 삽입 강도를 달리하여 워터마크를 삽입 한 후 신호처리 공격이 없는 경우의 실험 결과  
Table 1. Evaluation of watermarked sequences with different strength factors in the case of no attack when embedding high frequency coefficients

Model	$\Delta$	제안된 방법				기존 방법 <sup>[24]</sup>			
		$Corr$	$SNR_{avg}$	$SNR_{min}$	$SNR_{max}$	$Corr_{avg}$	$SNR_{avg}$	$SNR_{min}$	$SNR_{max}$
Cow	0.04	1.00	71.49	55.67	89.15	1.00	63.84	46.82	80.84
	0.08	1.00	68.54	52.71	86.52	1.00	61.34	45.11	77.44
	0.10	1.00	67.27	51.42	85.31	1.00	60.23	44.31	76.09
Dance	0.04	1.00	81.61	70.46	90.09	0.99	69.81	52.17	78.51
	0.08	1.00	79.16	68.38	87.60	1.00	67.82	50.60	76.26
	0.10	1.00	78.07	67.45	86.48	1.00	66.91	49.86	75.27
Chicken	0.04	1.00	104.65	77.70	136.15	0.99	95.39	67.13	123.76
	0.08	1.00	102.56	75.81b)	133.09	1.00	93.48	65.27a)	119.88
	0.10	1.00	101.59	74.96	131.11	1.00	92.62	64.41	118.34

a)그림 7 (b) 참조, b)그림 7 (c) 참조

표 2. 중간주파수 대역에 삽입 강도를 달리하여 워터마크를 삽입 한 후 신호처리 공격이 없는 경우의 실험 결과  
Table 2. Evaluation of watermarked sequences with different strength factors in the case of no attack when embedding middle frequency coefficients

Model	$\Delta$	제안된 방법				기존 방법 <sup>[24]</sup>			
		$Corr$	$SNR_{avg}$	$SNR_{min}$	$SNR_{max}$	$Corr_{avg}$	$SNR_{avg}$	$SNR_{min}$	$SNR_{max}$
Cow	0.04	1.00	63.49	45.47	84.05	0.94	58.96	40.99	75.25
	0.08	1.00	60.91	43.21	81.77	1.00	55.85	38.24	71.77
	0.10	1.00	59.77	42.20	80.74	1.00	54.53	37.03	70.36
Dance	0.04	1.00	73.81	58.85	95.26	1.00	63.97	45.21	86.58
	0.08	1.00	72.00	57.39	93.41	1.00	61.93	43.59	84.42
	0.10	1.00	71.15	56.60	92.43	1.00	61.01	42.84	83.46
Chicken	0.04	0.85	98.84	71.84	130.03	1.00	89.29	63.95	114.25
	0.08	0.97	96.60	69.81b)	126.93	1.00	87.46	61.52a)	112.51
	0.10	0.97	95.59	68.90	125.82	1.00	86.61	60.42	111.50

a)그림 7 (d) 참조, b) 그림 7 (e) 참조

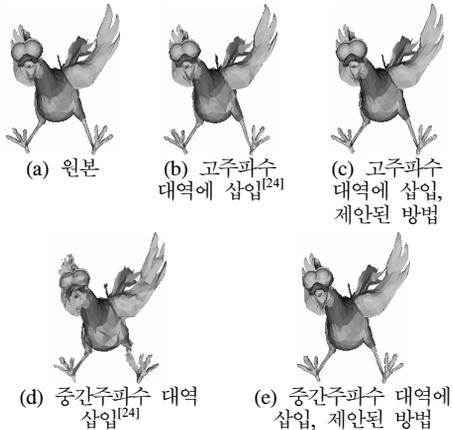


그림 7. Chicken 시퀀스의 262번째 프레임 (워터마크 삽입강도  $\Delta = 0.08$ )

Fig. 7. 262-th frame of Chicken sequence

표 1과 2는 각각 고주파 대역 계수 및 중간주파수 대역 계수에 워터마크 삽입강도를 달리하여 64비트의 워터마크를 삽입하고, 임의의 신호처리 공격이 없는 경우 워터마크를 검출한 결과를 보여준다. 또한 워터마크 삽입 후 원본 데이터의 왜곡 정도를 보이게 위해, 프레임별 SNR을 구한 뒤 평균값, 최소값, 최대값 각각  $SNR_{avg}$ ,  $SNR_{min}$ ,  $SNR_{max}$ 로 나타내었다. 실험 결과는 세 축에 대하여 독립적으로 64비트의 워터마크를 삽입한 기존 방법<sup>[24]</sup>와 비교하였으며, 이때 검출율은 세 축에 대하여 각각 구한 유사도의 평균값  $Corr_{avg}$ 으로 나타내었다. 삽입강도  $\Delta$ 가 높을수록 SNR이 감소하는 것을 알 수 있으며, 전반적으로 고주파 영역에 워터마크를 삽입하는 방식이 중간주파수 영역에 삽입하는 경우보다 SNR이 줄어드는 것을 알 수 있다. 기존 방법<sup>[24]</sup>과 비교한 경우 제안된 방법의 SNR이 모두 우수하게 나타나는데, 이는 기존 방식에서  $x$ ,  $y$ ,  $z$ 축에 각각 독립적

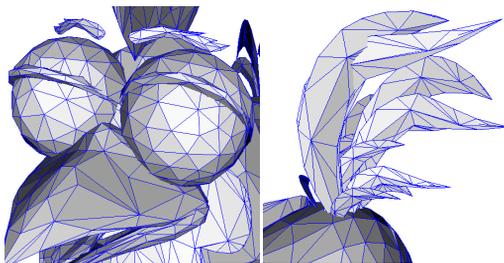


그림 8. Chicken 메쉬 시퀀스의 non-manifold 메쉬 구조

Fig. 8. Non-manifold meshes in Chicken mesh sequence

표 3. 고주파수 대역에 삽입 강도( $\Delta = 0.08$ )를 고정하고, 삽입 비트수를 달리하여 워터마크를 삽입 한 후 신호처리 공격이 없는 경우의 실험 결과

Table 3. Evaluation of watermarked sequences with fixed strength factor( $\Delta = 0.08$ ) and different numbers of embedded bits in the case of no attack

Model	$M$	$Corr$	$SNR_{avg}$	$SNR_{min}$	$SNR_{max}$
Cow	32	1.00	69.48	54.21	87.28
	64	1.00	68.54	52.71	86.52
	128	1.00	68.14	52.14	85.18
	256	0.96	68.19	52.17	85.70
Dance	32	1.00	79.07	66.60	87.52
	64	1.00	79.16	68.38	87.60
	128	1.00	79.93	68.97	88.49
	256	0.99	79.22	67.89	87.70
Chicken	32	1.00	101.99	76.36	131.77
	64	1.00	102.56	75.81	133.09
	128	0.88	99.55	74.47	126.94
	256	0.85	101.29	75.19	129.72

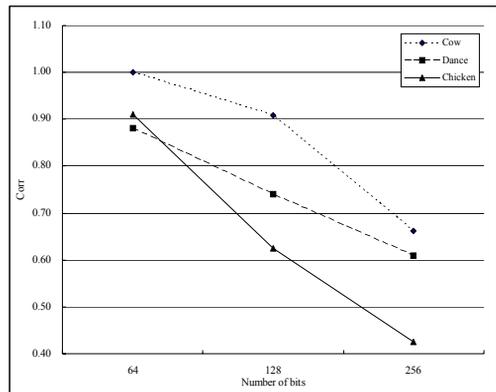


그림 9. 삽입강도를 고정( $\Delta = 0.08$ )하고 삽입 비트수를 달리하여 워터마크를 삽입 한 후 균일 양자화 공격을 가한 후 워터마크 검출 결과

Fig. 9. Evaluation of watermarked sequences with fixed strength factor ( $\Delta = 0.08$ ) and different numbers of embedded bits in the case of uniform quantization (7 bits) attack

으로 워터마크가 삽입되었기 때문으로 분석된다. 그림 6에서 보이는 바와 같이 실험에 사용된 메쉬 시퀀스 중 가장 급격한 움직임을 가지고 있는 Chicken 메쉬 시퀀스의 262번째 프레임의 경우 특히 그러하다. 원본(그림 7 (a))과 비교해 보았을 때, 고주파수 대역 계수에 삽입한 워터마크의 경우에는 기존방법(그림 7 (b))과 제안된 방법 모두 시각적 왜곡이 눈에 거의 나타나지 않지만, 중간 주파수 대역 계수에 삽입한 워터마크의 경우, 기존방법에서는(그림 7 (c)) Chicken의 다리 부분에서 특히 심각한 시각적 왜곡이 발생한다. 제안된 방법은 그림 7 (e)에서 보이는 바와 같이 그림 7 (c)와 같은 왜곡 현

상이 나타나지 않음을 알 수 있다.

고주파수 대역 계수에 워터마크를 삽입한 경우에는 공격이 없는 경우 완벽한 검출이 가능하다. 중간 주파수 대역 계수에 워터마크를 삽입한 경우에는, Cow, Dance 메쉬 시퀀스에서는 완벽한 검출이 가능한 반면, Chicken 메쉬 시퀀스의 경우 다른 두 메쉬 시퀀스보다 상대적으로 유사도가 떨어진다. Cow, Dance 메쉬 시퀀스는 한 프레임 안에 하나의 연결된 객체(number of connected components)로 구성되어 있음에 반해, Chicken 메쉬 시퀀스는 그림 8 (a)와 같이 한 프레임에 37개의 분리된 객체를 가지고 있어, 워터 마크 검출 시 원본 메쉬와 동일한 무게 중심을 구하기 힘들게 된다. 또한, 한 개의 에지(edge)가 두 개의 삼각형을 공유하는 manifold 구조가 아닌, 그림 8 (b)와 같은 non-manifold 구조를 가지는 메쉬 구조 또한 워터마크 검출 시 무게 중심을 구하기 어렵게 만드는 원인이 될 수 있다. 이러한 부정확한 무게중심은 제안된 방법의 워터마크 검출 성능을 떨어뜨리는 것으로 분석된다.

삽입하는 워터마크의 비트 수에 따른 제안된 방법의 비가시성 성능을 평가하기 위해, 고주파수 계수 값에 각각 32비트, 64비트, 128비트, 256비트의 워터마크를 삽입하고, 신호처리 공격을 가하지 않고 측정된 SNR과 Corr을 표 3에 나타내었다. 제안된 방법은 시간축 웨이블릿 변환 후 고주파수 (또는 중간 주파수) 대역의 계수의 분포를 수정하는 방법이 기 때문에, 삽입 비트수가 시각적 손상에 미치는 영향은 적음을 알 수 있다.

그림 9은 고주파수 대역 신호에 워터마크를 삽입한 경우의 삽입되는 비트수에 따른 워터마크 검출 성능을 보여준다. 이 때, 워터마크 삽입 강도는 ( $\Delta=0.08$ ), 신호처리 공격은 각 좌표축에 대한 7비트 양자화인 경우를 예로 보였다. 그림 8에서 보인 바와 같이, Cow, Dance, Chicken 시퀀스 모두 삽입 비트수가 많아질수록 워터마크의 검출율은 감소하며, 이는 삽입 비트수가 많아질수록 하나의 bin에 속하는 좌표 벡터의 개수가 감소함으로 인해 해당 bin의 확률 분포가 신호처리 공격에 보다 민감해지는데 기인한다. 또한, 워터마크가 삽입되는 시퀀스의 특성에 따라 워터마크의 검출 성능에 차이가 있음을 알 수 있다. 즉, Chicken 시퀀스와 같이 non-manifold 메쉬 구조를 가지는 경우, 앞서 설명한 바와 같이 무게 중심의 변화 정도가 크기 때문에 삽입할 워터마크 비트수가 늘어날 경우 워터마크 검출 성능은 급격히 감소하게 된다. 따라서 삽입되는 워터마크 비트수는 이러한 특성들을 고려하여 선택되어야 한다.

제안된 방법의 각종 공격에 대한 강인성 실험을 위해, 삽입강도( $\Delta=0.08$ )를 고정하고 고주파수 (또는 중간 주파수) 대역의 계수값에 64비트의 워터마크를 삽입한 메쉬 시퀀스를 이용하여 다양한 부가 잡음, 라플라시안 평활화, 균일 양자화, 프레임 평균 공격, 회전 공격을 가하고, 표 4과 표 5에 워터마크 검출 결과를 나타내었다.

부가잡음(additive noise) 공격의 경우, 0.1%, 0.3%, 0.5%의 오류율(error rate)을 가지는 이진 랜덤 잡음(binary random noise)이 각각의 좌표축에

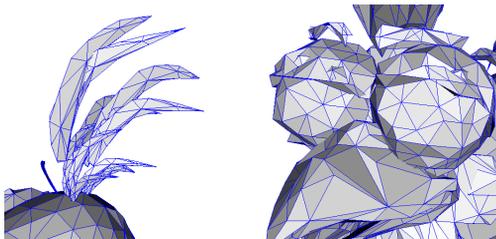
표 4. 고주파수 대역 계수에 워터마크를 삽입한 경우의 다양한 공격에 대한 실험 결과  
Table 4. Evaluation of robustness against various attacks when embedding the watermark into temporal high frequency coefficients

공격 (공격강도)	Cow		Dance		Chicken	
	제안된 방법	참고문헌 <sup>[24]</sup>	제안된 방법	참고문헌 <sup>[24]</sup>	제안된 방법	참고문헌 <sup>[24]</sup>
부가 잡음 (0.1 %)	1.00	1.00	1.00	0.97	1.00	0.98
부가 잡음 (0.3 %)	1.00	0.95	0.97	0.98	1.00	0.98
부가 잡음 (0.5 %)	1.00	0.95	0.88	0.96	0.97	0.97
평활화 (10회)	1.00	0.91	1.00	0.98	0.44	0.51
평활화 (30회)	0.44	0.70	0.94	0.87	0.16	0.31
평활화 (50회)	0.41	0.56	0.72	0.72	0.19	0.09
균일 양자화 (9 비트)	1.00	1.00	1.00	0.97	0.94	0.81
균일 양자화 (8 비트)	1.00	0.93	1.00	0.96	1.00	0.83
균일 양자화 (7 비트)	1.00	0.92	0.88	0.88	0.91	0.85
프레임 평균 (1/24프레임)	0.91	1.00	0.88	1.00	0.70	0.95
프레임 평균 (1/12프레임)	0.84	0.87	0.85	1.00	0.59	0.95
프레임 평균 (1/6프레임)	0.85	0.71	0.13	0.86	0.45	0.62
회전 (1°, 2°, 3°)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.76
회전 (15°, 20°, 13°)	1.00	0.88	1.00	0.65	1.00	0.51

표 5. 중간주파수 대역 계수에 워터마크를 삽입한 경우의 다양한 공격에 대한 실험 결과  
Table 5. Evaluation of robustness against various attacks when embedding the watermark into temporal middle frequency coefficients

공격 (공격강도)	Cow		Dance		Chicken	
	제안된 방법	참고문헌 <sup>[24]</sup>	제안된 방법	참고문헌 <sup>[24]</sup>	제안된 방법	참고문헌 <sup>[24]</sup>
잡음 첨가 (0.1 %)	1.00	1.00	1.00	1.00	0.70	0.74
잡음 첨가 (0.3 %)	1.00	0.99	1.00	0.97	0.83	0.75
잡음 첨가 (0.5 %)	0.97	0.99	1.00	0.94	0.85	0.78
평활화 (10회)	1.00	0.90	1.00	1.00	0.49	0.62
평활화 (30회)	0.60	0.66	0.91	0.81	0.29	0.23
평활화 (50회)	0.44	0.46	0.73	0.69	0.18 <sup>(a)</sup>	0.13
균일 양자화 (9 비트)	1.00	0.99	1.00	1.00	0.74	0.66
균일 양자화 (8 비트)	1.00	0.99	1.00	0.98	0.72	0.70
균일 양자화 (7 비트)	1.00	0.97	1.00	0.94	0.65 <sup>(b)</sup>	0.78
프레임 평균 (1/24프레임)	1.00	1.00	1.00	1.00	0.94	0.86
프레임 평균 (1/12프레임)	1.00	1.00	1.00	1.00	0.94	0.85
프레임 평균 (1/6프레임)	1.00	0.99	1.00	1.00	0.88	0.82
회전 (1°, 2°, 3°)	1.00	0.99	1.00	1.00	0.97	0.81
회전 (15°, 20°, 13°)	1.00	0.83	1.00	0.67	0.97	0.31

<sup>(a)</sup> 그림 10 (a) 참조, <sup>(b)</sup> 그림 10 (b) 참조



(a) 라플라시안 평활화 50회 (b) 균일양자화, 7비트  
그림 10. 중간주파수 대역 계수에 워터마크를 삽입 후 공격을 가한 Chicken 메쉬 시퀀스  
Fig. 10. Attacked Chicken mesh sequence when embedding the watermark into temporal middle frequency coefficients with  $\Delta = 0.08$

적용되었다. 여기에서 오류율은 각 정지 메쉬 프레임  $s_n$ 의 모든 좌표 점 벡터 크기 값 중 최대값에 대한 비율을 나타낸다. 고주파수 대역에 삽입한 경우(표 4), 0.3%이하의 부가 잡음 공격에 모든 메쉬 시퀀스가 강인함을 보임을 알 수 있다. 중간주파수 대역에 삽입한 경우(표 5), 0.5%이하의 부가 잡음에 대하여 강인함을 보이고 있으나, Chicken 메쉬 시퀀스는 앞서 설명한 무게 중심의 영향을 많이 받게 되어 검출율이 떨어짐을 알 수 있다.

메쉬 평활화(smoothing) 공격에는 식 (9)와 같은 라플라시안 평활화(Laplacian smoothing)<sup>[25]</sup>가 적용되었다.

$$v'(i) = v(i) + r \cdot \sum_{n=1}^N \left( \frac{v(n) - v(i)}{N} \right) \quad (9)$$

여기서,  $r(0 < r < 1)$ 은 relaxation 파라미터,  $N$ 은  $v(i)$ 의 이웃 꼭지점의 개수이다. 실험에는 고정된

relaxation 파라미터( $r = 0.03$ )로 각각 10회, 30회, 50회의 반복횟수를 적용하였다. 또한, 라플라시안 평활화 공격에 대한 강인성은 메쉬 모델의 곡률(curvature)에 많은 영향을 받는다. 다른 두 시퀀스와 비교했을 때, 곡률이 상대적으로 작은 Dance 메쉬 시퀀스의 경우 고주파수 대역과 중간주파수 대역에서 다른 두 시퀀스보다 상대적인 강인함을 보였다. 그러나 Chicken 메쉬 시퀀스의 경우, 평활화의 반복횟수가 커지면 그림 10 (a)와 같은 non-manifold 메쉬구조의 부객체(꼬리)가 주객체(몸통)로부터 떨어져 나오는 등의 왜곡이 생겨, 검출율에 많은 영향을 주게 된다.

균일 양자화(uniform quantization) 공격의 경우, 각 좌표축을 9비트, 8비트, 7비트로 꼭지점 좌표 값을 양자화 하였다. 중간주파수 대역에 워터마크를 삽입한 Cow, Dance 메쉬 시퀀스는 균일 양자화 공격에 매우 강인하며, Chicken 메쉬 시퀀스는 역시 무게 중심의 영향으로 고주파수 대역에서만 검출율이 우수하였다.

시간 축 비동기화(temporal desynchronization) 공격에는 프레임 평균(frame averaging) 공격이 적용되었으며, 워터마크가 삽입된 시퀀스에서 24, 12, 6번째 프레임마다 한 프레임을 제거하고, 제거된 프레임을 인접 프레임간의 보간(interpolation)으로 복원하여 사용하였다. 제안된 방법은 시간 축 웨이블릿 변환을 적용하였기 때문에 프레임 평균 공격에 강인하다. 특히 프레임 평균에 영향을 적게 받는 중간 주파수 대역이 고주파수 대역보다 더욱 강인함을 알 수 있다.

제안된 방법은 회전(rotation) 공격에 영향을 받지 않는 꼭지점 좌표 벡터 크기를 변화시키기 때문에, 기존 방법<sup>[24]</sup>에 비해 회전 공격에 매우 강인함을 알 수 있다. 다만, Chicken 메쉬 시퀀스는 워터마크 검출 시 무게중심의 영향으로, 공격이 없을 때와 동일한 유사도를 보인다.

#### IV. 결론

본 논문에서 3차원 메쉬 시퀀스의 워터마킹 기법을 제안하였다. 다양한 공격에 대한 강인성을 보장하기 위해서, 워터마크는 꼭지점의 좌표 벡터 크기에 대하여 시간 축 웨이블릿 변환을 적용한다. 또한, 제안된 방법은 고주파수 대역 계수에 비해 상대적으로 변화가 적은 저주파수 대역 계수의 확률분포를 이용하여 빈을 생성한 다음, 각 빈에 대응하는 고주파수 (혹은 중간 주파수) 대역 계수의 확률 분포를 삽입할 워터마크 비트에 따라서 비대칭적으로 수정한다. 이때, 라플라시안 함수에 근사하는 고주파수 대역(혹은 중간 주파수) 계수의 확률분포를 양의 방향의 확률분포와 음의 방향의 확률분포로 나누고, 한쪽 방향의 2차 모멘트를 다른 방향의 2차 모멘트에 비하여 상대적으로 크게 혹은 작게 수정한다. 이로 인해, 원본 데이터를 사용하지 않고, 2차 모멘트의 상대적인 크기만을 비교함으로써 워터마크를 검출하는 것이 가능하다. 모의실험을 통해 잡음 첨가, 균등 양자화, 프레임 평균화, 회전 등과 같은 다양한 공격에 대한 강인성을 보였다. 제안된 방법은 좌표 점의 벡터 크기 값을 수정하기 때문에, 기존 방법보다 삽입된 워터마크의 비가시성 및 회전 공격에 대한 강인성이 더욱 우수하다.

#### Appendix

구간 [0,1)에서 식 (A-1) 과 같은 라플라시안 분포를 가지는 랜덤 변수(random variable)  $X$ 가 있다고 가정하자.

$$p_X(x) = \frac{\lambda}{1-e^{-1}} \cdot e^{-\lambda x} \quad , \text{ for } 0 \leq x < 1 \quad (\text{A-1})$$

랜덤 변수  $X$ 가 식 (A-2)과 같은 히스토그램 사상 함수에 의해 랜덤 변수  $Y$ 로 변환된다면,

$$y = x^k \quad , \text{ for } 0 \leq x < 1 \text{ and } 0 < k < \infty \quad (\text{A-2})$$

$Y$ 의 2차 모멘트  $E[Y^2]$ 는 식 (A-3)과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} E[Y^2] &= \int_0^1 x^{2k} p_X(x) dx \\ &= \frac{1}{1-e^{-1}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \cdot \lambda^{n+1}}{n! \cdot (n+2k+1)} \end{aligned} \quad (\text{A-3})$$

그림 (A-1) 은 히스토그램 사상 함수의 파라미터  $k$ 값에 따른  $E[Y^2]$ 의 변화를 보여준다. 그림 (A-1)에서 알 수 있듯이  $k$ 를 조절함으로써 원하는 분산 값을 갖도록  $Y$ 의 확률 분포를 수정할 수 있다.

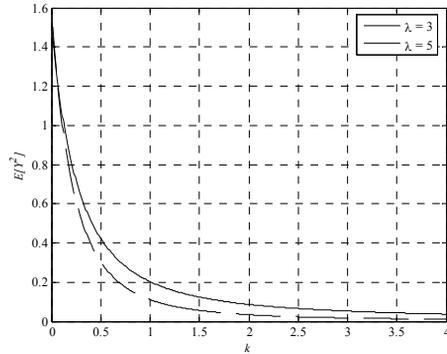


그림 A-1. 입력 랜덤 변수가 라플라시안 분포를 가질 때, 히스토그램 대응 함수의 파라미터  $k$ 값에 따른 출력 변수의 2차 모멘트

Fig. A-1. Second moment of the output random variable via histogram mapping function with different  $k$ , assuming that the input variable has Laplacian distribution over [0,1)

#### 참 고 문 헌

- [1] I. Cox, M. L. Miller, J.A. Bloom, Digital Watermarking, Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 2002.
- [2] D. Hearn, M. Pauline Baker, "Computer Graphics with OpenGL," Prentice Hall, 3rd Edition, 2004.
- [3] R. Ohbuchi, H. Masuda, and M. 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.
- [4] F. Cayre, B. Macq, "Data hiding on 3-d triangle meshes," IEEE Trans. on Signal Processing

- Vol. 51, p939-949, 2003.
- [5] A. G. Bors, "Watermarking Mesh-Based Representations of 3-D Objects Using Local Moments," *IEEE Trans. on Image Processing*, vol. 15, no. 3, pp. 687- 701, Mar. 2006.
- [6] E. Praun, H. Hoppe, and A. Finkelstein, "Robust mesh watermarking," *Proceedings of SIGGRAPH99*, Los Angeles, pp. 49-56, Aug. 1999.
- [7] Z. Karni and C. Gotsman, "Compression of soft-body animation sequences," *Computer and Graphics*, vol. 28, no. 1, pp. 25 - 34, feb 2004.
- [8] J. E. Lengyel, "Compression of time-dependent geometry," in *Proceeding of SI3D '99*, New York, NY, USA, 1999, pp. 89 -95, ACM Press.
- [9] I. Guskov and A. Khodakovsky, "Wavelet compression of parametrically coherent mesh sequences," in *Proceedings of SCA '04*, 2004, pp. 183 - 192.
- [10] F. Payan and M. Antonini, "Wavelet-based compression of 3d mesh sequences," in *Proceedings of IEEE ACIDCAICMI'2005*, Tozeur, Tunisia, november 2005.
- [11] L. Ibarria and J. Rossignac, "Dynapack: space-time compression of the 3d animations of triangle meshes with fixed connectivity," in *SCA '03*, 2003, pp. 126 - 135.
- [12] O. Benedens, "Geometry-based watermarking of 3D models," *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol.19, no.1, pp.46-55, Jan./Feb. 1999.
- [13] S.H. Lee, T.S. Kim, B.J. Kim, S.G. Kwon, K.R. Kwon, and K.I. Lee, "3D polygonal meshes watermarking using normal vector distributions," *IEEE International Conference on Multimedia & Expo*, Maryland, USA, Jul. 6-9, 2003, vol.3, pp.105-108.
- [14] Z. Yu, H.S. Ip, and L.F. Kwok, "A robust watermarking scheme for 3D triangular mesh models," *Pattern Recognition*, vol.36, issue.11, pp.2603-2614, 2003.
- [15] Z. Yu, H.S. Ip, and L.F. Kwok, "Robust watermarking of 3D polygonal models based on vertice scrambling," *Computer Graphics International 2003*, Tokyo, Japan, Jul. 9-11, 2003, pp.254-257, 2003.
- [16] Jae-Won Cho, R. Prost, H.Y. Jung, "An oblivious watermarking for 3-d polygonal meshes using distribution of vertex norms," *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 55, no. 1, pp. 142-155, Jan 2007.
- [17] S. Kanai, H. Date, and T. Kishinami, "Digital watermarking for 3D polygons using multi-resolution wavelet decomposition," *Proceedings 6th IFIP, WG 5.2, GEO-6*, Tokyo, Japan, Dec. 1998 pp.296-307.
- [18] K. Yin, Z. Pan, J. Shi, and D. Zhang, "Robust mesh watermarking based on multiresolution processing," *Computers and Graphics*, vol.25, pp.409-420, 2001.
- [19] M.S. Kim, J.W. Cho, R. Prost, H.Y. Jung, "Watermarking of 3D Irregular Meshes Based on Wavelet Multiresolution Analysis," *LNCS 3710*, pp. 313-324, Sept. 2005.
- [20] M.S. Kim, J.W. Cho, H.Y. Jung, R. Prost, "A Robust Blind Watermarking for 3D Meshes Using Distribution of Scale Coefficients in Irregular Wavelet Analysis," In *Proc. of ICASSP 2006*, vol. 5, pp. 477-480, Toulouse, France, May, 2006.
- [21] T.H. Kim, J.H. Lee, S.Y. Shin, "Robust Motion Watermarking based on Multiresolution Analysis," *Computer Graphics Forum*, Vol. 19 No. 3, pp. 189-198, 2000 (*Proc. EUROGRAPHICS '2000*).
- [22] S. Yamazaki, "Watermarking Motion Data," In *Proc. Pacific Rim Workshop on Digital Steganography (STEG04)*, pp. 177-185, Nov 2004
- [23] G. Doerr, J.-L. Dugelay, "A guided tour of video watermarking," *Signal Processing. Image Communication*. vol. 18, pp.263-282, 2003
- [24] 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.
- [25] D. Field, "Laplacian smoothing and delaunay triangulation," *Communication and Applied*

Numerical Methods, vol. 4, pp. 709 - 712, 1988.

[26] J.W. Cho, M.S. Kim, S. Valette, H.Y. Jung, and R. Prost, "3-d dynamic mesh compression using wavelet-based multiresolution analysis," In Proceedings of ICIP 2006, pages 529--532, october 2006.

[27] J.W. Cho, M.S. Kim, S. Valette, H.Y. Jung, and R. Prost, "A 3-D Mesh Sequence Coding Using Combination of Spatial and Temporal Wavelet Analysis," MIRAGE 2007, March, 2007, accepted.

Rémy Prost

정회원



1987년 : 프랑스 리옹 국립 응용  
과학원 전자공학과 박사  
1994년 9월~현재 : 프랑스 리옹  
국립 응용과학원 교수  
2000년 9월~현재 : 프랑스 리옹  
국립 응용과학원 1급 교수  
<관심분야> 신호처리, 의료영상,

3차원볼륨영상

김 민 수 (Min-Su Kim)

정회원



2000년 2월 : 경일대학교 공과대  
학 컴퓨터공학과 졸업  
2002년 2월 : 영남대학교 정보통  
신공학과 석사  
2002년 3월~현재 : 동대학 정보  
통신공학과 및 프랑스 리옹 국  
립응용과학원 (INSA de Lyon)

전자공학과 박사과정

<관심분야> 멀티미디어 신호처리, 디지털 워터마킹, 3차원 그래픽스, 압축

정 호 열 (Ho-Youl Jung)

정회원



1998년 4월 : 프랑스 리옹 국립  
응용과학원 전자공학과 박사  
1999년 3월 : 영남대학교 공과대  
학 정보통신공학과 조교수  
2005년 3월~현재 : 영남대학교  
공과대학 정보통신공학과 부  
교수

<관심분야> 신호처리, 디지털 워터마킹, 손실/무손실 압축

조 재 원 (Jae-Won Cho)

정회원



2002년 8월 : 영남대학교 공과대  
학 정보통신공학과 졸업  
2004년 8월 : 동대학 정보통신 공  
학과 석사  
2004년 9월~현재 : 동대학 정보  
통신공학과 및 프랑스 리옹 국  
립응용과학원 전자공학과 박

사과정

<관심분야> 멀티미디어 신호처리, 메쉬 압축, 디지털 워터마킹, 전송품질측정