

論文2003-40SP-6-5

3차원 메쉬 모델의 적응형 워터마킹 방법

(An Adaptive Watermarking Scheme for Three-Dimensional Mesh Models)

全正熙*, 扈堯盛*

(Jeong-Hee Jeon and Yo-Sung Ho)

요약

디지털 워터마킹 기술은 디지털 콘텐츠의 불법 복제를 방지하기 위해 디지털 데이터에 사람이 감지할 수 없는 정보를 은닉한다. 본 논문에서는 3차원 메쉬 모델(mesh model)에 대한 적응형 워터마킹 방법을 제안한다. 본 논문에서 제안한 방법에서는 서로 이웃하는 꼭지점 좌표들 사이의 공간적 상관성에 따라 워터마크를 삽입하며, 이는 사람의 눈에 잘 감지되지 않는 지역에 워터마크를 강하게 삽입하고 그렇지 않은 지역에는 약하게 삽입하는 적응형 워터마킹 기술이다. 우선, 3차원 메쉬 모델을 운행(traversing)하여 삼각형 스트립(triangle strip)을 생성하고, 모든 꼭지점 좌표를 구 좌표계(spherical coordinate system)로 변환시킨다. 그리고, 3차원 모델의 지역적 외관을 결정하는 꼭지점 좌표값들의 변화량을 계산한 후, 워터마크 신호를 계산한 변화량의 크기에 따라 유연하게 꼭지점 좌표값에 삽입시킨다. 본 논문에서 제안한 워터마크 방법이 워터마크 신호의 비지각성(imperceptibility)을 크게 개선시킬 수 있음을 실험을 통해 검증했으며, 제안한 방법의 강인성(robustness)에 대한 BER(bit error rate) 결과를 제시하였다.

Abstract

For copyright protection of digital contents, we employ watermarking techniques to embed watermark signals into digital host data. In this paper, we propose an adaptive watermarking algorithm for three-dimensional (3-D) mesh models. Watermark signals are inserted into vertex coordinates adaptively according to changes of their position values. While we embed strong watermarks in the areas of large variations, watermarks are weakly inserted in other areas. After we generate triangle strips by traversing the 3-D model and convert the Cartesian coordinates to the spherical coordinate system, we calculate variations of vertex positions along the traversed strips. Then, we insert watermark signals into the vertex coordinates adaptively according to the calculated variations. We demonstrate that imperceptibility of the inserted watermark is significantly improved and show the bit error rate (BER) for robustness.

Keyword : 워터마킹, 3차원 메쉬 모델, 비지각성

I. 서론

** 正會員, 光州科學技術院 情報通信工學科
(Kwangju Institute of Science and Technology, Dept.
of Information and Communications)
接受日: 2003年7月15日, 수정완료일: 2003年11월1일

최근 가상현실(Virtual Reality, VR)이나 CAD(Computer Aided Design)에 관련된 3차원 데이터(three-dimensional data)에 대한 워터마킹 기술이 많이 제안

되고 있다. 그러나, 기존의 1차원이나 2차원 데이터에 사용하던 워터마킹 기술을 3차원 데이터에 직접 적용하기 위해서는 해결해야 할 문제점들이 많다. 그 주된 문제점은 정규적(regular)으로 분포하는 1차원이나 2차원 데이터와는 달리, 3차원 표면 데이터(surface data)는 공간상에 불규칙(irregular)하게 분포하기 때문에 주파수 영역으로 변환하기 쉽지 않다^[1]. 또한, 3차원 모델에 삽입한 워터마크 신호를 고의적으로 삭제하거나 조작하는 악의적인 공격, 특히, 3차원 모델 데이터의 연결성 정보(connectivity information)에 대한 공격에 매우 취약한 성질을 갖고 있다. 즉, 3차원 모델의 연결성 정보는 꼭지점(vertex) 좌표값과 함께 반드시 필요하지만, 단순화(simplification)하거나 이것을 변경 또는 조작하는 공격에 쉽게 파괴될 수도 있다. 그러나, 최근 3차원 그래픽 데이터에 대한 신호처리(signal processing) 기술^[2-4]의 발전에 힘입어 3차원 모델에 대한 워터마킹 기술도 역시 빠르게 발전되고 있다.

3차원 모델의 워터마킹 기술에서 워터마크가 삽입되는 대상은 꼭지점의 좌표값이나 에지의 길이, 다각형의 면적이나 체적, 다각형들의 유사도(similarity) 또는 면적 비율, 표면이나 꼭지점의 색상, 꼭지점의 정규벡터(normal vector) 등 다양한 요소가 될 수 있다. 3차원 데이터에 대한 워터마크 삽입 기술의 전제 조건은 1차원이나 2차원 데이터의 워터마킹 기술과 마찬가지로 기본적으로 삽입한 워터마크 신호가 인간의 눈에 잘 띄지 않아야 하고, 불법적인 공격에 강인해야 되며, 삽입하려는 정보량을 충분히 수용할 수 있어야 한다. 이들을 각각 삽입한 워터마크의 비지각성(imperceptibility), 강인성(robustness), 정보 수용량(capacity)이라 한다^[5-6].

3차원 모델에 대한 워터마킹 기술은 Ohbuchi 등에 의해서 처음 제안되었다^[7]. 그들이 제안한 워터마킹 방법은 공간영역에 의미있는 워터마크 문자열이나 패턴을 TSQ(Triangle Similarity Quadruple Embedding), TVR(Tetrahedral Volume Ratio Embedding), MDP(Mesh Density Pattern Embedding)라는 방법으로 기하(geometry)나 위상(topology) 요소들에 삽입하였다. 또한 최근 Ohbuchi가 발표한 논문에서는 메쉬(mesh)의 연결성 정보를 이용해 Kirchhoff 행렬을 만든 다음, 고유벡터(eigenvector)와 고유치(eigenvalue)를 구해 꼭지점 좌표를 정규화된 고유벡터 집합으로 투영시켜 주파수 영역(spectral domain)으로 변환시켰다. 이렇게 변환된 영역에서 워터마크 신호를 삽입하는 알고리즘을 제

안했으며^[8], 지난해에 이 방법을 개선시켜 발표했다^[8]. Benedens 등은 3차원 모델의 표면 정규 벡터(normal vector)를 단위 구(unit sphere)에 투영한 다음, 비슷한 벡터 값들끼리 그룹화시켜 워터마크를 삽입했다^[10]. Kanai 등은 3차원 메쉬 모델을 웨이블릿(wavelet) 변환하여 웨이블릿 계수에 워터마크를 삽입함으로써 다양한 공격에 강인하다는 것을 보였다^[11]. 그러나 이 방법은 하나의 꼭지점과 연결된 이웃이 언제나 일정한 연결 정보를 갖고 있어야 한다는 한계를 갖고 있다. Yeung와 Yeo는 원본 데이터가 변경되었는지를 검출하기 위한 연성(fragile) 워터마킹 방법을 발표했고^[12], Praun은 기존 1차원이나 2차원 데이터 워터마킹 방법에서 흔히 사용되는 확산 스펙트럼(spread spectrum) 기술을 3차원 메쉬 모델에 적용해 강건한 워터마킹 방법을 제안했다^[1]. 또한, Yin^[13]은 Guskov^[4]의 메쉬를 위한 다중해상도 신호처리 방법을 이용해 Burt-Adelson 피라미드를 만들어 적절하게 성긴(coarse) 해상도에 워터마크 정보를 삽입하는 방법을 제안했다. 최근에 우리는 3차원 모델의 꼭지점 좌표들을 DCT(discrete cosine transform) 영역으로 변환시켜 AC 계수의 중간 주파수 대역에 워터마크 신호를 삽입하는 워터마킹 알고리즘을 발표한 바 있다^[14, 18].

본 논문에서 우리는 3차원 메쉬 모델의 외관적 특성을 고려하여 워터마크를 삽입하는 새로운 적응형 워터마킹 방법을 제안한다. 제II장에서 삼각형 스트립 생성 방법과 구 좌표계(spherical coordinate system)로 변환, 워터마크를 삽입하기 위한 좌표값의 변화량 계산 방법, 워터마크 삽입 및 추출 방법 등에 관하여 설명하고, 제III장에서 제안한 알고리즘의 성능을 평가하기 위한 실험결과를 보인다. 그리고 제IV장에서 결론을 맺는다.

II. 적응형 워터마킹

본 논문에서 제안하는 적응형 워터마킹 알고리즘의 개략적인 흐름도는 <그림 1>에 있다. 먼저, 3차원 모델을 운행(traversing)하여 삼각형 스트립들을 생성하고, 각 스트립에 포함된 직각 좌표(cartesian coordinate) 좌표계의 꼭지점 좌표들을 구 좌표계로 변환한 다음, 각 좌표 값들의 변화량을 계산해 정규화 한다. 이렇게 정규화된 변화량을 이용해 각 꼭지점 좌표에 삽입될 워터마크 신호의 변조크기(modulation amplitude)를 조절한다. 이런 변조값 크기에 따라 삽입될 좌표값의 위치

가 결정되면, 결정된 위치에 워터마크 비트가 삽입된다.

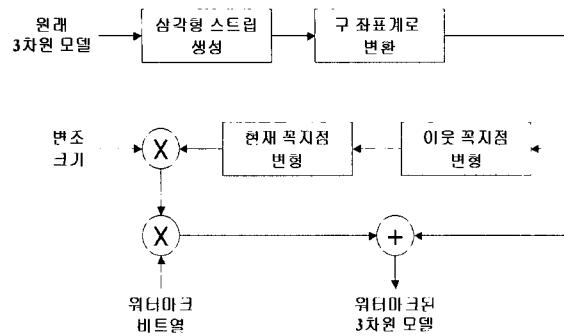


그림 1. 제안하는 워터마크 삽입 방법
Fig. 1. Proposed watermark insertion scheme.

1. 다중 삼각형 스트립

컴퓨터 그래픽에서 3차원 삼각형 메쉬 모델의 데이터는 대용량이기 때문에 흔히 삼각형 스트립(triangle strip)을 생성해 렌더링(rendering)한다. 그 주된 이유는 삼각형 스트립을 생성함으로써 데이터를 보다 빠르고 명료하게 처리할 수 있을 뿐만 아니라 메모리 공간을 효과적으로 절약할 수 있기 때문이다. 그러나 삼각형 메쉬로부터 삼각형 스트립을 만들기 위한 유일한 방법은 아직까지 알려져 있지 않다. 따라서, 본 논문에서 제안하는 적응형 워터마킹 방법은 우리가 기존에 제안한 워터마킹 알고리즘^[14, 18]을 위해 사용했던 삼각형 스트립 생성 방법과 동일한 방법을 이용한다. 간략한 삼각형 스트립 생성 방법은 다음과 같다.

- 과정 1: 면(face)을 선택한다.
- 과정 2: 스트립을 생성해 나갈 에지(edge)의 진행방향(좌/우)을 결정한다.
- 과정 3: 진행하는 방향에서 더 이상 연결된 에지가 존재하지 않을 때까지 스트립을 생성한다.
- 과정 4: 현재 진행 방향에 더 이상 에지가 존재하지 않는다면 반대 방향에서 과정 3을 수행하고, 반대방향에서도 스트립 생성이 완료되면 새로운 스트립을 생성하기 위해 과정 1로 간다.
- 과정 5: 3차원 메쉬 모델의 모든 면이 방문될 때까지 과정 1~ 과정 4를 반복적으로 수행한다.

위 과정에서 생성된 다중 삼각형 스트립을 이용해서

3차원 모델로 워터마크를 은닉하게 되면 다음과 같은 장점이 있다. 첫째, 3차원 모델을 운행하여 생성되는 삼각형 스트립들은 각 3차원 모델의 연결성정보에 따라서 생성되는 각각의 스트립 크기와 위치, 그리고 개수가 다르다. 그러므로 각 스트립을 따라 꼭지점 좌표값에 워터마크를 삽입하면 이것은 워터마킹 기술의 정보 은닉(information hiding) 개념^[6]과 잘 부합된다. 둘째, 과정 1 ~ 과정 4로부터 생성된 삼각형 스트립에서 각 스트립에 속한 삼각형 집합은 3차원 모델을 여러 개의 지역(subsection)으로 분할시켰을 때 각 지역의 삼각형 집합과 같은 의미가 된다. 그러므로 만일, 삼각형 스트립을 따라 워터마크를 삽입한다면, 워터마크 신호를 좀더 강건하게 삽입하려고 3차원 모델을 지역 분할시켜 삽입하는 방법^[7]과 같이 우리도 강건하게 워터마크를 삽입할 수 있다. 셋째, 과정 1 ~ 과정 4로부터 생성된 다중 삼각형 스트립을 이용해 워터마크를 삽입한다면, 우리는 각 좌표 축에 독립적으로 좌표 값들에 기존의 워터마킹 기법에서 많이 이용되는 확산 대역폭(spread spectrum)^[15] 기술을 적용해 워터마크 신호를 확산시킬 수 있다.

위와 같은 장점들 때문에 우리는 3차원 모델로부터 만들어진 삼각형 스트립들을 이용해 워터마크 신호를 삽입한다.

2. 구 좌표계 변환

3차원 모델을 운행하여 생성된 다중 삼각형 스트립에서 각 스트립에 포함된 직각 좌표계(Cartesian)의 꼭지점 좌표들은 원점(origin)으로부터의 거리 γ 와 각도 θ, φ 로 표현되는 구 좌표계로 간단하게 변환시킬 수 있다. <그림 2>는 직각 좌표계 (x, y, z) 와 구 좌표계 $(\gamma, \theta, \varphi)$ 사이의 관계를 보여주고 있다. 구 좌표계로의 변환식은 식 (1), 식 (2), 그리고 식 (3)과 같다.

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \tag{1}$$

$$\theta = \tan^{-1}(y / x) \tag{2}$$

$$\varphi = \tan^{-1}(z / \sqrt{x^2 + y^2}) \tag{3}$$

본 논문의 3차원 모델의 시각적 표현은 모두 직각 좌표계 (x, y, z) 에서 이루어진다. 워터마크 신호는 구 좌표계로 변환된 꼭지점의 좌표값을 이용해 식 (4), 식 (5), 그리고 식 (6)과 같이 삽입한다.

$$\hat{r}_i = r_i + b_i \cdot \alpha_{i,r} \quad (4)$$

$$\hat{\theta}_i = \theta_i + c_i \cdot \alpha_{i,\theta} \quad (5)$$

$$\hat{\phi}_i = \phi_i + d_i \cdot \alpha_{i,\phi} \quad (6)$$

여기에서 (b_i, c_i, d_i) 는 난수 발생기의 키(key) 값에 의해 생성된 워터마크 신호 0과 1이다. 그리고 $\alpha_{i,r}, \alpha_{i,\theta}, \alpha_{i,\phi}$ 는 꼭지점 i 의 좌표 (r, θ, ϕ) 속에 워터마크를 삽입하기 위해 삽입 강도를 조절하는 변조크기이다.

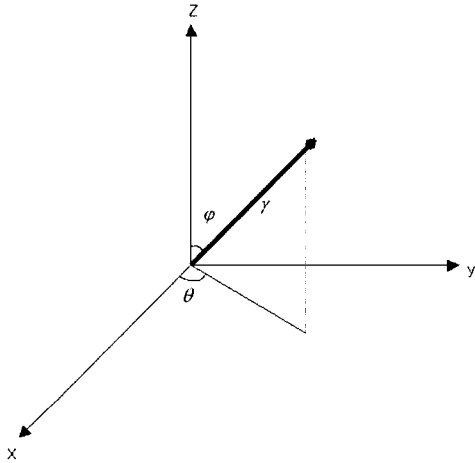


그림 2. 직각 좌표계와 구 좌표계의 변환
Fig. 2. Conversion between the Cartesian and Spherical coordinate system.

일반적으로 워터마크 된 3차원 모델의 왜곡 정도는 식 (4), 식 (5), 그리고 식 (6)에 나타난 것과 같이, 변조크기 $\alpha_{i,r}, \alpha_{i,\theta}, \alpha_{i,\phi}$ 가 많은 영향을 끼친다. 그러나, $\alpha_{i,r}, \alpha_{i,\theta}, \alpha_{i,\phi}$ 값이 크면 외형은 많이 변형되어 워터마크 비가시성이 더 나빠지지만, 삽입된 워터마크를 제거하거나 조작하려는 악의적인 공격으로부터 삽입된 워터마크가 생존할 가능성이 높아진다. 이와 반대로, $\alpha_{i,r}, \alpha_{i,\theta}, \alpha_{i,\phi}$ 값이 작게 된다면 3차원 모델의 외형은 왜곡이 작아져서 삽입된 워터마크 신호의 비가시성은 좋아지게 되지만, 삽입된 워터마크의 강인성은 나빠지게 된다. 따라서 3차원 모델에 워터마크를 삽입할 때 유일한 한 개의 변조값만을 사용해 좌표값을 변조시킨다면, 위에서 설명한 바와 같이 비가시성과 강인성 사이의 조절 문제 때문에 적절치 않다. 결국, 우리가 좌표값에 워터마크를 삽입하기 위해 최적의 삽입강도 값을

유도할 수 있다면, trade-off 문제는 최소화될 수 있다.

3. 적응적 변조(adaptive modulation)

컴퓨터그래픽에서 3차원 물체는 일반적으로 삼각형 그물 구조(mesh)로 표현되는데, 연결성정보, 기하(geometry) 정보, 색(color)과 법선 벡터(normal vector), 그리고 텍스처(texture) 정보 등으로 구성된다. 연결성 정보는 메쉬의 삼각형들이 어떻게 연결되어 있는지에 대한 정보를 갖고 있고, 기하 정보는 메쉬의 꼭지점 좌표값들을 갖고 있다. 또한, 색이나 법선 벡터, 텍스처 정보는 3차원 물체를 렌더링하는데 필요한 정보를 갖고 있다. 따라서 3차원 메쉬 모델의 외관은 기하 정보에 포함된 꼭지점 좌표값들에 의해 결정된다는 것을 알 수 있다.

그렇다면 3차원 모델의 지역적 특성에 맞는 삽입강도 값들을 유도하기 위해서 우선, 유일한 변조크기 값을 이용해 좌표에 워터마크를 삽입시키는 경우를 다시 고려해 보자. 흔히, 인간의 시각 시스템의 특성상 고주파 영역에서의 변화보다는 저주파 영역의 변화에 상대적으로 민감하다고 알려져 있다. 따라서 3차원 모델에 삽입된 워터마크 신호는 외관의 변화가 심한 울퉁불퉁한 지역에서 감지하기가 더욱 어렵다. 또한 이웃하는 꼭지점 좌표값들의 차이가 거의 없는 지역 즉, 편평한 지역은 워터마크 신호가 상대적으로 쉽게 감지된다. 그러므로 본 논문에서는 워터마크 신호가 3차원 모델에 강인하게 삽입되면서도 외관의 손상이 최소화되는 적응형 워터마킹 기법을 개발하고자 한다.

3차원 모델을 운행하여 생성된 삼각형 스트립들은 연속적인 꼭지점들의 집합이다. 만일, 연속적인 꼭지점 좌표 값들에 대한 변화량의 총합 V 을 수식으로 유도한다면, 식 (7)과 같이 쓸 수 있다.

$$V_i = \sum_{j=i-N_B}^{i+N_B-1} |r_{j+1} - r_j| + \sum_{j=i-N_B}^{i+N_B-1} |\theta_{j+1} - \theta_j| + \sum_{j=i-N_B}^{i+N_B-1} |\phi_{j+1} - \phi_j| \quad (7)$$

여기에서 N_B 는 현재 꼭지점 i 와 이웃하고 있는 이전 또는 이후 꼭지점들의 집합을 말한다. 본 논문에서 N_B 는 4로 고정하였다. 그러므로 식 (7)은 현재 꼭지점과 이웃하고 있는 좌표값들의 변화량을 모두 더한 것이다. 이런 좌표값들의 변화량을 이용해 식 (4), 식 (5), 그리고 식 (6)에 있는 워터마크 변조값 $\alpha_{i,r}, \alpha_{i,\theta}, \alpha_{i,\phi}$ 를 각각 정규화된 형태로 쓰면 식 (8), 식 (9), 그리고 식 (10)과 같다.

$$\hat{\alpha}_{i,r} = \alpha \cdot \frac{\sum_{j=i-N_B}^{i+N_B-1} |r_{j+1} - r_j|}{V_i} \quad (8)$$

$$\hat{\alpha}_{i,\theta} = \alpha \cdot \frac{\sum_{j=i-N_B}^{i+N_B-1} |\theta_{j+1} - \theta_j|}{V_i} \quad (9)$$

$$\hat{\alpha}_{i,\varphi} = \alpha \cdot \frac{\sum_{j=i-N_B}^{i+N_B-1} |\varphi_{j+1} - \varphi_j|}{V_i} \quad (10)$$

식 (8), 식 (9), 그리고 식 (10)에 나타난 것과 같이 유일한 변조값 α 는 지역적인 좌표값들의 변화가 반영된 적응형 변조값 $\alpha_{i,\gamma}, \alpha_{i,\theta}, \alpha_{i,\varphi}$ 이 된다. 그러므로 워터마크 삽입의 대상이 되는 모든 좌표값들에 대해 위 식에서 유도한 변조값들을 이용해 워터마크를 삽입의 강도를 조절한다. 이렇게 3차원 모델 외관의 변화량을 계산해 유도한 모든 변조값들을 이용해 워터마크를 삽입한다. 따라서 본 논문에서 우리는 식 (8), 식 (9), 그리고 식 (10)으로부터 유도된 변조값들을 지역적 특성을 고려한 적응적 변조값이라 한다.

4. 워터마크 삽입

본 논문에서 제안하는 적응형 워터마크 삽입 방법에 대한 전체적인 흐름이 <그림 1>에 있다. 먼저, 3차원 모델을 운행하여 삼각형 스트립을 만들고, 각 스트립에 포함된 꼭지점 좌표값들을 구 좌표계로 변환한 다음, 좌표들의 변화량을 계산하여 식 (8), 식 (9), 그리고 식 (10)과 같이 적응형 변조값들을 유도한다. 결국, 워터마크 삽입 연산식을 표현한 식 (4), 식(5), 그리고 식 (6) 은 적응형 변조값을 이용해 식 (11), 식 (12), 그리고 식 (13)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\hat{r}_i = r_i + b'_i \cdot \hat{\alpha}_{i,r} \quad (11)$$

$$\hat{\theta}_i = \theta_i + c'_i \cdot \hat{\alpha}_{i,\theta} \quad (12)$$

$$\hat{\varphi}_i = \varphi_i + d'_i \cdot \hat{\alpha}_{i,\varphi} \quad (13)$$

여기에서 b'_i, c'_i, d'_i 는 1과 1을 갖은 워터마크 신호이다. 난수 발생기에 의해 발생하는 워터마크 신호 1과 0은 식 (14), 식 (15), 그리고 식 (16)에 의해 각각 1과 1로 바꾸어 사용한다. 식 (11), 식 (12), 그리고 식 (13)과 같이 워터마크 신호는 γ 축에 있는 좌표들에 삽입되

고 θ 축 그리고 φ 축에 있는 좌표들에도 역시 독립적으로 삽입시킨다.

$$b'_i = 2b_i - 1 \quad (14)$$

$$c'_i = 2c_i - 1 \quad (15)$$

$$d'_i = 2d_i - 1 \quad (16)$$

워터마크 신호 1과 1은 식 (11), 식 (12), 그리고 식 (13)과 같이 원래의 꼭지점 좌표값을 약간 변경시키는 역할을 한다.

5. 워터마크 추출

본 논문에서 제안한 적응형 워터마크 삽입 알고리즘에 의해 삽입된 워터마크의 추출 과정은 <그림 3>에 보이고 있다.

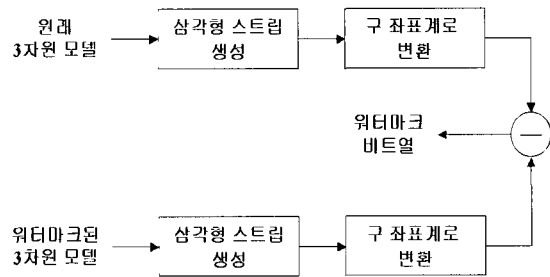


그림 3. 워터마크 추출

Fig. 3. Watermark extraction scheme.

먼저, 워터마크를 추출하기 위해서 3차원 모델 원본과 워터마크 된 모델에 대해 각각 삼각형 스트립을 만들고, 각 스트립에 포함된 꼭지점 좌표들을 구 좌표계로 변환한 다음, 원본 모델의 좌표값과 워터마크 된 모델로부터 워터마크를 추출한다. 워터마크 추출 연산식은 식 (17), 식 (18), 그리고 식 (19)과 같다.

$$b'_{i,r} = 0.5 * (\text{sign}(\hat{r}_i - r_i) + 1) \quad (17)$$

$$c'_{i,\theta} = 0.5 * (\text{sign}(\hat{\theta}_i - \theta_i) + 1) \quad (18)$$

$$d'_{i,\varphi} = 0.5 * (\text{sign}(\hat{\varphi}_i - \varphi_i) + 1) \quad (19)$$

각 축의 좌표값으로부터 추출한 b'_i, c'_i, d'_i 는 난수 발생기에 의해 만들어진 원래의 워터마크 신호와 비교함으로써 삽입한 워터마크와 동일한지를 판단할 수 있

다. 이때 추출한 워터마크는 3차원 모델의 저작권 또는 소유권을 주장할 수 있는 증거로 사용될 수도 있다.

III. 실험 결과 및 고찰

본 논문에서 제안한 3차원 모델을 위한 적응형 워터마크 삽입 및 추출 시스템은 MS의 VC++ 6.0 환경에서 개발되었다. 제안한 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 Vase 모델과 또한 단순화된 Bunny 모델을 사용한다. <그림 4(a)>와 <그림 4(d)>에 보인 Vase 모델은 1745개의 꼭지점과 3482개의 삼각형 면으로 이루어져 있고, Bunny 모델은 3116개 꼭지점과 6100개의 삼각형 면으로 이루어져 있다.

1. 워터마킹 매개변수(watermarking parameters)

3차원 모델에 삽입하기 위한 워터마크 비트 열(watermark bit stream)은 70비트(bit)로서 난수 발생기의 키 값을 이용해 생성한다. 생성된 비트 열을 구 좌표계 (γ, θ, ϕ) 의 좌표값에 독립적으로 삽입한다. 만일, 생성된 첫 번째 삼각형 스트립의 꼭지점에서 γ 축의 좌표를 따라 70비트의 워터마크가 삽입 완료되면 또다시 70비트의 워터마크 신호 삽입한다. 이때 생성된 첫 번째 스트립의 길이가 충분치 않다면 두 번째 스트립 또는 세 번째 스트립 등 생성된 스트립의 순서에 따라 최종 스트립까지 계속해서 반복 삽입시킨다. 적응형 변조 크기를 계산하기 위해서 사용되는 이웃하는 꼭지점의 좌표 개수(N_b)는 4이다. 그러므로 현재 좌표를 위해 참조하는 총 좌표의 개수는 현재 좌표를 포함하여 연속된 8개 좌표이다. 물론, N_b 의 값을 더 크게 하면 좀 더 정확한 변화량을 측정할 수 있다.

워터마크를 삽입하기 위해 적용되는 워터마크 신호의 변조 크기는 기본적으로 사용자가 입력한다. 사용자가 입력 한 변조 크기 값은 3차원 모델의 외관을 변형시키지 않을 만큼 작은 값이 되어야 하고, 워터마크를 제거하기 위한 악의적인 공격에서도 충분히 견디어 낼 수 있는 값이어야 한다. 그러나 제안한 적응형 워터마크 삽입 알고리즘은 식 (8), 식 (9), 그리고 식 (10)에 나타난 것과 같이 사용자가 입력한 변조 크기 값을 좌표값의 변화에 따라 유연하게 변경시킨 후 적용한다. 그러므로 3차원 모델의 외관은 삽입되는 워터마크에 영향을 적게 받는다. 또한 적응형 변조 값들은 식 (8), 식 (9), 그리고 식 (10)과 같이 기본적으로 사용자가 입

력한 값보다 크지 않는 값들이다.

워터마크가 삽입된 3차원 모델의 왜곡정도를 측정하기 위해서 우리는 MESH (Measuring Error between Surfaces using the Hausdorff distance) 틀^[16]을 이용한다. 메쉬 틀은 다양한 방법으로 이산적인 3차원 표면 모델간의 RMS (root-mean-square) 거리를 계산하여 모델의 왜곡 정도를 측정하는데 그 중에 우리는 대칭적(symmetry) RMS 거리 측정 방법을 사용하여 워터마크 된 3차원 모델의 왜곡 정도를 계산한다.

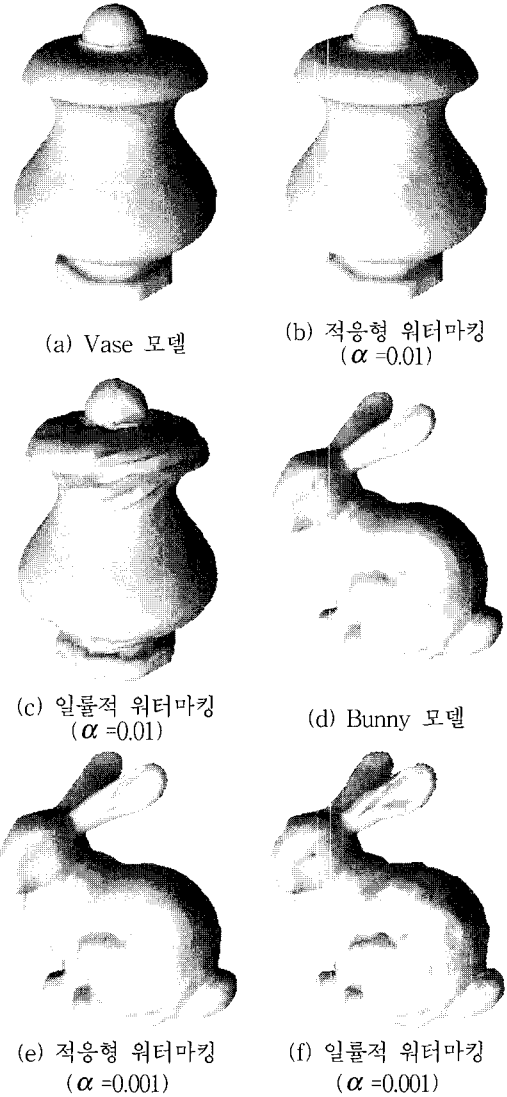


그림 4. 원본 3차원 모델과 워터마크 된 모델
Fig. 4 . The original and watermarked 3-D models.

워터마킹 시스템의 강인성은 일반적으로 BER (bit error rate)을 이용해 평가한다. 본 논문에서 BER은 워터마크 된 3차원 모델을 공격한 후 오류가 난 비트의 개수를 삽입한 워터마크 비트의 총 개수로 나눈 백분율을 말한다.

2. 비지각성(imperceptibility)

1차원 신호나 2차원 이미지 경우에 원본 데이터와의 왜곡 정도는 MSE (mean square error)나 SNR (signal to noise ratio)또는 PSNR(peak signal-to-noise ratio) 등, 다양한 방법을 이용해 계산할 수 있다. 그러나 3차원 데이터의 왜곡 측정에 대한 연구는 1차원이나 2차원에 비해 상대적으로 많지 않지만, 최근에 Aspert 등은 이산적인 3차원 표면 모델 간의 거리를 측정하는 방법을 개발했다^[6]. 우리는 그들이 개발한 MESH 툴을 이용해 워터마크 된 3차원 메쉬 모델과 원본 3차원 모델 사이의 왜곡을 정량적으로 측정해 제안한 알고리즘의 성능을 보인다.

<그림 4(b)>와 <그림 4(e)>는 본 논문에서 제안한 적응형 워터마킹 방법으로 워터마크를 삽입한 모델이고, <그림 4(c)>와 <그림 4(e)>는 오로지 한 개의 변조 크기 값을 이용해 일률적으로 워터마크를 삽입한 3차원 모델이다. <그림 4(b)>와 <그림 4(e)>로부터 외관이 단순한 Vase 모델 뿐만 아니라 좀더 외관이 복잡한 Bunny 모델에서도 역시 제안한 방법이 매우 효과적으로 워터마크 신호를 은닉하고 있음을 알 수 있다. 또한, <표 1>에 모델간의 RMS 거리가 있다.

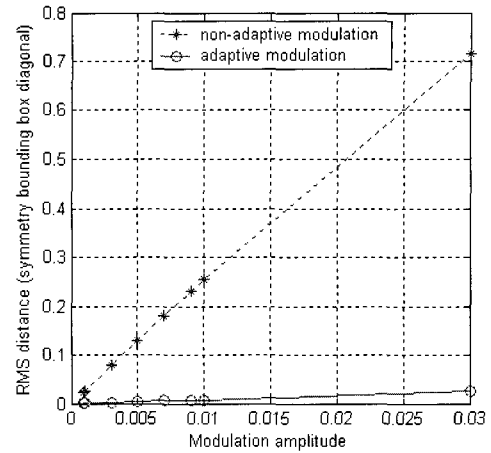
우리는 제안한 방법의 우수성을 정량적으로 입증하기 위해서 변조 크기 값을 0.0009에서부터 0.03까지 변화시키면서 RMS 거리를 측정해 그래프로 표현하였다.

표 1. 제안한 적응형 워터마킹 알고리즘의 강인성

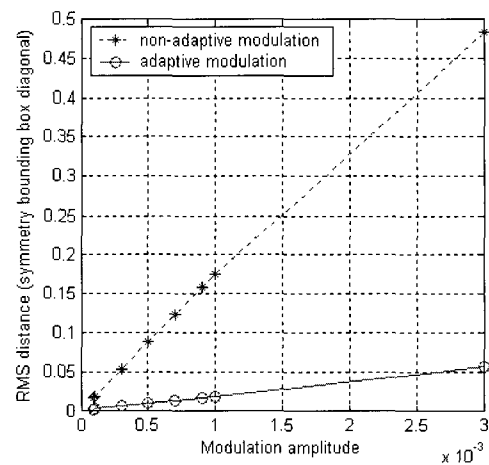
Table 1. Robustness of the proposed adaptive watermarking algorithm.

모델	변조 크기 ()	RMS	공격 종류										
			무작위 잡음(%)			기하 압축 (96 bits)			단순화		다중 워터마킹		
			BER (%)	BER (%)	BER (%)	BER (%)	BER (%)	BER (%)					
Vase	0.01	0.0078	0.8*	0.4	0.2	9.5	11.2*	20.8	1/2	1/4	1/8	N+C	All
			25.0	24.0	24.0	24.0	23.0	8.0	32.0	40.0	32.0	24.0	44.0
Bunny	0.001	0.0183	0.75	0.55	0.15	23.3	26.3	29.3	1/6	1/7	1/8	C+N	All
			24.0	23.0	15.0	11.0	2.0	1.0	35.0	34.0	33.0	21.0	36.0

(*로 표시된 것은 <그림 6>에 있다)



(a) Vase 모델



(b) Bunny 모델

그림 5. RMS 거리 비교

Fig. 5. Comparison of RMS distance.

<그림 5>에 나타난 것과 같이, Vase 모델의 경우에 제안한 적응형 워터마크 삽입 방법은 RMS 거리가 0.03을 넘지 않지만 단 한 개의 변조 크기 값을 이용해 일률적으로 워터마크를 삽입한 경우에는 RMS 거리가 변조 크기 값이 증가됨에 따라 급격하게 증가 된다는 것을 알 수 있다. 좀 더 복잡한 외관을 갖은 Bunny 모델의 경우에도 비슷한 실험 결과가 도출되었다. 결국, 제안한 적응형 삽입 방법이 워터마크 비가시성 측면에서 매우 효과적임을 알 수 있다.

3. 강인성

제안하는 워터마킹 방법에 대한 강인성을 평가하기 위해서 무작위 잡음 첨가, MPEG-4 SNHC 표준 방법을 이용한 기하 압축^[17], 단순화(simplification), 그리고

다중 워터마킹 방법을 이용해 워터마크 된 3-D 모델을 공격한다. 이렇게 공격한 3차원 모델로부터 제한한 적응형 워터마크 추출 방법을 이용해 워터마크를 추출한 실험 결과가 <그림 6>과 <표 1>에 있다.

워터마크를 삽입하기 위해 사용한 변조 크기는 Vase 모델의 경우에는 0.01이며 Bunny 모델의 경우에는 0.001이다. 이에 대응하는 RMS 거리는 <표 1>과 같이 각각 0.0078과 0.0183이다. 워터마크를 삽입할 좌표값의 변화량에 따라 변조 크기를 유연하게 변경시켜 삽입한 3차원 모델이 <그림 6(a)>와 <그림 6(f)>에 있다.

<그림 6(a)>와 <그림 6(f)>에 나타난 것과 같이 삽입된 워터마크를 거의 식별하기 힘들다. 제한한 알고리즘의 강인성을 객관적으로 평가하기 위해서 공격한 후에 워터마크를 추출할 때 에러가 난 비트 수를 삽입한 워터마크의 총 비트 수로 나눈 백분율, 즉, BER을 구해 <표 1>에 보였다. 기본적으로 워터마크 된 3차원 모델을 공격할 때 외관이 심각하게 변형되지 않도록 공격을 하였다. 왜냐하면 어떤 3차원 모델에 숨겨진 워터마크 신호를 제거 또는 조작하여 만든 모델을 불법적으로 배포하려는 공격자는 모델의 품질이 크게 훼손되는 것을 바라지 않는다고 가정했기 때문이다.

무작위 잡음 첨가는 균일한 무작위 잡음을 워터마크가 삽입된 모델의 꼭지점 좌표값에 첨가한다. <그림 6(b)>와 <그림 6(g)>, 그리고 <표 1>에 있는 백분율(%)은 워터마크 된 모델의 바운딩 박스(bounding box)의 크기를 계산한 후, 바운딩 박스의 면(side) 중에 최대값과 각 좌표와의 변위(displacement) 중에 최대값의 비율을 말한다^[1]. 따라서 무작위 잡음 첨가는 이렇게 계산된 비율의 범위 내에서 워터마크 된 3차원 모델의 좌표값에 잡음을 균일하게 첨가한 공격이다. 공격 당한 모델로부터 추출한 워터마크의 BER 결과가 <표 1>에 있다.

3차원 모델 압축에 의한 공격은 MPEG-4 SNHC의 표준 기하 압축 방법을 적용했다. 일반적으로 3차원 다각형 모델의 꼭지점(x, y, z) 좌표는 각 좌표 당 32 비트 실수형 변수를 이용하여 메모리에 저장한다. 그러므로 꼭지점 1개를 저장하기 위해서는 96비트의 메모리 공간이 필요하게 된다. 따라서 <표 1>의 기하 압축에 있는 Vase 모델의 경우, 96비트를 9.6, 11.2, 그리고 20.8 비트로 압축했다는 의미이다.

3차원 모델의 연결성 정보에 대한 공격은 삽입된 워터마크의 생존에 치명적인 역할을 한다. 꼭지점들 간의

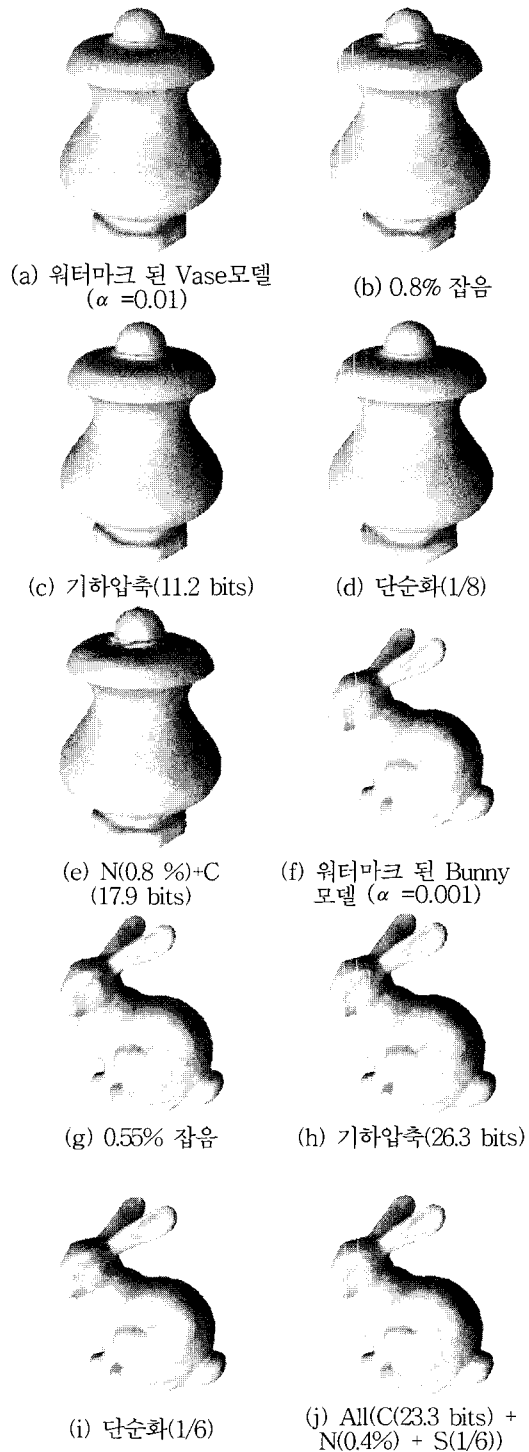


그림 6. 다양한 공격
Fig. 6. Various attacks.

연결성 정보는 메쉬 표면에 대한 단순화 작업에 의해 쉽게 삭제되거나 변경될 수 있다. 따라서 3차원 모델

에 대한 워터마킹 기술은 연결성 정보에 대한 공격으로부터 삽입한 워터마크가 살아 남을 수 있도록 워터마킹 알고리즘을 설계하는 것이 연구자들의 주요 목표 중에 하나이다. 특히, 공간영역에서의 워터마킹 기술은 주파수 영역에서의 기술에 비해서 이런 공격에 더욱 취약한 측면이 있다.

본 논문에서 제안한 워터마킹 알고리즘은 공간영역 워터마킹 기술로써 <표 1>에 나타난 실험결과와 같이 단순화 공격에 다소 약하다. 이때 워터마크된 3차원 메쉬 모델을 점진적 메쉬 압축(progressive mesh compression)에서 많이 이용되는 에지병합(edge collapse) 방법을 사용해 단순화 시켰다. 단순화 공격에 의해 원래 메쉬의 연결성 정보가 일부 파괴되지만, 그 모델의 외관은 크게 훼손시키지 않는다는 특징이 있다. 왜냐하면 메쉬 내부의 꼭지점들을 우선적으로 병합시키면서 단순화하기 때문이다. 따라서 외관이 변형될 정도로 심각하게 단순화시키지 않는다면, 다중 삼각형 스트림을 생성시켜 워터마크를 삽입하고, 각 축에 독립적으로 반복해서 워터마크를 삽입하는 알고리즘은 이런 단순화 공격에서도 워터마크가 살아남을 수 있으며 실험 결과는 <표 1>에 있다. 이때 삽입한 워터마크는 <그림 3>과 같이 다른 워터마크 추출 방법과 동일한 방법으로 추출했다는 점에 주의해라. <표 1>의 Vase 모델에 대한 단순화 공격에서 1/2, 1/4, 1/8의 의미는 오리진얼 면(face)의 개수를 1/2 개, 1/4개, 1/8개로 단순화 시킨다는 의미이다. 워터마크 추출 방법은 <그림 3>에 나와 있는 방법으로 추출한다.

다중 워터마킹에 의한 공격은 <표 1>과 같이 두 가지 유형이 있다. 예를 들어, Vase 모델의 N+C(Noise+Compression) 공격이란 워터마크 된 3차원 모델에 잡음을 첨가 한 후에 기하 압축을 적용한다는 의미이고, All 공격은 N+C 공격에 단순화 연산을 또다시 적용했다는 것을 의미한다. 그러므로 <표 1>에서 Vase 모델에 대한 All 공격은 잡음첨가(0.8%)와 기하압축(17.9 bits) 연산을 수행한 후, 단순화(1/5) 공격을 한 것이다. 그리고 <그림 6(j)>에서 S(Simplification)는 단순화 공격을 나타낸다.

IV. 결 론

본 논문에서는 3차원 메쉬 모델의 국부적인 특징을 고려한 적응형 워터마킹 알고리즘을 제안했다. 제안된

워터마크 삽입 방법은 이웃하는 꼭지점 좌표값의 변화가 큰 경우에는 큰 변조 값을 할당하여 워터마크가 좀 더 강하게 삽입하고, 변화가 작은 경우에는 작은 값을 할당해 워터마크가 더욱 약하게 삽입되도록 하는 방법이다. 따라서 제안한 워터마킹 방법은 3차원 모델 외관의 변화에 따라서 워터마크를 적응적으로 삽입하기 때문에 워터마크 비가시성이 매우 우수하다. 또한, 컴퓨터 모의 실험을 통해 무작위 잡음 첨가 연산, MPEG-4 SNHC 표준 기하 압축, 단순화, 그리고 다중 워터마킹과 같은 다양한 공격에 대한 워터마크 신호의 BER 성능이 우수함을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] E. Praun, H. Hoppe, and A. Finkelstein, "Robust Mesh Watermarking," Proceedings of SIGGRAPH, pp. 45-56, Aug. 1999.
- [2] J. M. Lounsbery, "Multiresolution Analysis for Surfaces of Arbitrary Topological Type," Ph.D Thesis, University of Washington, 1994.
- [3] G. Taubin, "A Signal Processing Approach to Fair Surface Design," Proceedings of SIGGRAPH, pp. 351-358, 1995.
- [4] I. Goskov, W. Sweldensy, and P. Schroder, "Multiresolution Signal Processing for Meshes," Proceedings of SIGGRAPH, pp. 325-334, 1999.
- [5] I. J. Cox, M. L. Miller, and J. A. Bloom, "Digital Watermarking," Morgan Kaufmann Publishers, 2002.
- [6] S. Katzenbeisser and F. A. P. Petitcolas, "Information Hiding Techniques for Steganography and Digital Watermarking," Artech House, 2000.
- [7] R. Ohbuchi, H. Masuda, and M. Aono, "Watermarking Three-Dimensional Polygon Models," Proceedings of ACM Multimedia, pp. 261-272, Nov. 1997.
- [8] R. Ohbuchi, S. Takahashi, T. Miyazawa, and A. Mukaiyama, "Watermarking 3D Polygonal Meshes in the Mesh Spectral Domain," Proceedings of Graphics Interface, pp. 9-17, 2001.
- [9] R. Ohbuchi, A. Mukaiyama and S. Takahashi,

- "A Frequency-Domain Approach to Watermarking 3-D Shapes," Computer Graphics Forum 21(3), pp. 373-382, Sept. 2002.
- [10] O. Benedens, "Geometry-Based Watermarking of 3D Models," IEEE Computer Graphics and Applications, pp. 46-55, Jan. 1999.
- [11] S. Kanai, H. Date, and T. Kishinami, "Digital Watermarking for 3-D Polygons Using Multiresolution Wavelet Decomposition," Proceedings sixth IFIP WG 5.2 GEO-6, pp. 296-306, Dec. 1998.
- [12] M. Yeung and B. Yeo, "Fragile Watermarking of Three-Dimensional Objects," Proceedings of ICIP, Vol. 2, pp. 442-446, 1998.
- [13] K. Yin, Z. Pan, J. Shi, and D. Zhang, "Robust Mesh Watermarking Based on Multiresolution Processing," Computer and Graphics Vol. 25, pp. 409-420, 2001.
- [14] 김정희, 호요성, "DCT 영역에서 3차원 다각형 메쉬 모델의 디지털 워터마킹 방법," 전자공학회 논문지, 제40권 CI편 제3호, pp. 30-37, 2003년 5월
- [15] I. J. Cox, J. Kilian, F. T. Leighton, and T. Shamon, "Secure Spread Spectrum Watermarking for Multimedia," IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 6, No. 12, pp. 1673-1687, Dec. 1997.
- [16] N. Aspert, D. Santa-Cruz, and T. Ebrahimi, "MESH: Measuring Errors between Surfaces using the Hausdroff Distance," Proceedings of the IEEE International Conference in Multimedia and Expo (ICME 2002), Vol. 1, pp. 705-708, 2002.
- [17] ISO/IEC 14496-2, Coding of Audio-Visual Objects: Visual (MPEG-4 Video), Committee Draft, 1997.
- [18] J. H. Jeon, S. K. Lee, and Y. S. Ho, "A DCT-Domain Watermarking Algorithm for Three-Dimensional Triangle Meshes," International Workshop on Digital Workshop (IWDW 2003), Vol 1, pp. 529-538, Oct. 22, 2003

저 자 소 개



金正熙(正會員)

1993년 2월 : 조선대학교 컴퓨터공학과 졸업(학사). 1997년 8월 : 조선대학교 컴퓨터공학과 졸업(석사). 2001년 2월 : 조선대학교 컴퓨터공학과 졸업(공학박사). 2001년 2월~현재 : 광주과학기술원 정보통신공학과 박사후과정(Post Doctor) <주관심분야: 3차원 컴퓨터 비전, 그래픽 데이터 및 볼륨 데이터 신호처리, 3차원 모델 워터마킹>

신공학과 박사후과정(Post Doctor) <주관심분야: 3차원 컴퓨터 비전, 그래픽 데이터 및 볼륨 데이터 신호처리, 3차원 모델 워터마킹>



曷堯盛(正會員)

1981년 2월 : 서울대학교 전자공학과 졸업(학사). 1983년 2월 : 서울대학교 전자공학과 졸업(석사). 1983년 3월~1995년 9월 : 한국전자통신연구소 선임연구원. 1989년 12월 : 미국 University of California, Santa Barbara Department of Electrical and Computer Engineering(박사), 1990년 1월~1993년 5월 : 미국 Philips 연구소 Senior Research Member. 1995년 9월~현재 : 광주과학기술원 정보통신공학과 교수 <주관심분야: 디지털 신호처리, 영상신호 처리 및 압축, 초저속 영상통신, 디지털 TV와 고선명 TV 방식, 멀티미디어 통신>

1981년 2월 : 서울대학교 전자공학과 졸업(학사). 1983년 2월 : 서울대학교 전자공학과 졸업(석사). 1983년 3월~1995년 9월 : 한국전자통신연구소 선임연구원. 1989년 12월 : 미국 University of California, Santa Barbara Department of Electrical and Computer Engineering(박사), 1990년 1월~1993년 5월 : 미국 Philips 연구소 Senior Research Member. 1995년 9월~현재 : 광주과학기술원 정보통신공학과 교수 <주관심분야: 디지털 신호처리, 영상신호 처리 및 압축, 초저속 영상통신, 디지털 TV와 고선명 TV 방식, 멀티미디어 통신>