

논문 2008-45CI-3-19

# 연결성 정보와 기하학 정보를 이용한 삼차원 메쉬 모델의 광학성 정보 압축 방법

( Photometry Data Compression for Three-dimensional Mesh Models  
Using Connectivity and Geometry Information )

윤 영 석\*, 호 요 성\*\*

( Young-Suk Yoon and Yo-Sung Ho )

## 요 약

본 논문에서는 삼차원 메쉬 모델의 광학성 정보를 부호화하기 위한 새로운 방법을 제안한다. 색상 정보, 법선벡터 정보 및 텍스처 정보의 부호화 효율을 개선하기 위하여 제안한 방법들은 기하학 정보와 연결성 정보를 이용하여 광학성 정보를 예측 부호화한다. 먼저 연결성 정보를 이용하여 광학성 정보의 부호화 순서를 결정하고, 이를 통해 얻어진 인접한 꼭지점들의 기하학 정보를 이용하여 광학성 정보를 예측 부호화한다. 색상 정보는 기하 예측기를 사용하여 부호화하고, 법선벡터 정보는 거리 균등화와 최적화 평면 발생기를 적용하여 부호화하며, 텍스처 정보는 삼차원 메쉬 모델 분석기, 텍스처 좌표 분석기, 텍스처 영상 재배열기와 예측 부호화기를 이용하여 부호화한다. 색상 정보는 현재 꼭지점과 인접한 꼭지점 사이에 기하학 정보를 고려하여 인접한 꼭지점들의 색상 정보의 가중치 합으로 계산할 수 있다. 또한 법선벡터 정보는 현재 꼭지점의 법선벡터를 예측하기 위해서 이등변 삼각형의 특성을 이용한 거리 균등화 기법과 상호연관성이 높은 인접한 꼭지점의 특성을 이용한 최적화 평면을 개발했으며, 효율적으로 삼차원 좌표를 압축하기 위해서 구면 좌표계와 6-4분할 양자화 방법을 사용하였다. 마지막으로 텍스처 정보는 부호화 순서에 따라 텍스처 영상의 조각을 재배열하여 텍스처 좌표를 불연속성을 제거한다. 다양한 삼차원 메쉬 모델들에 대해 실험한 결과를 살펴보면 제안된 압축 방법이 이전의 방법보다 개선된 부호화 효율을 제공하였다.

## Abstract

In this paper, we propose new coding techniques for photometry data of three-dimensional (3-D) mesh models. We make a good use of geometry and connectivity information to improve coding efficiency of color, normal vector, and texture data. First of all, we determine the coding order of photometry data exploiting connectivity information. Then, we exploit the obtained geometry information of neighboring vertices through the previous process to predict the photometry data. For color coding, the predicted color of the current vertex is computed by a weighted sum of colors for adjacent vertices considering geometrical characteristics between the current vertex and the adjacent vertices at the geometry predictor. For normal vector coding, the normal vector of the current vertex is equal to one of the optimal plane produced by the optimal plane generator with distance equalizer owing to the property of an isosceles triangle. For texture coding, our proposed method removes discontinuity in the texture coordinates and reallocates texture image segments according to the coding order. Simulation results show that the proposed compression schemes provide improved performance over previous works for various 3-D mesh models.

**Keywords :** Photometry Data, 3-D Mesh Models, Colors, Normal Vectors, Texture Coordinates

\* 정회원, 한국전자통신연구원, SW콘텐츠연구부, 디지털콘텐츠연구부

(Electronics and Telecommunications Research Institute, S/W & Content Research Laboratory, Digital Content Research Division)

\*\* 평생회원, 광주과학기술원, 정보통신공학과

(Gwangju Institute of Science and Technology, Department of Information and Communications)

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT성장동력기술개발사업의 일환으로 수행하였음.

[2007-S-017-01, 사용자 중심의 콘텐츠 보호·유통 기술 개발]

접수일자: 2008년2월22일, 수정완료일: 2008년4월24일

## I. 서 론

최근 급속한 네트워크의 발전에 따라 사용자가 원하는 고품질, 고용량의 멀티미디어 서비스들이 증가하는 추세에 있으며, 사실감을 더해주는 삼차원 객체의 관심도 점차 커지고 있다. 이에 따라 삼차원 객체를 이용하는 멀티미디어 응용 프로그램들은 게임, 영화, 교육 도구, 가상 환경과 같은 많은 분야에서 이슈가 되고 있다.

많은 다각형으로 구성된 삼차원 메쉬 모델들은 실세계 혹은 가상 세계의 삼차원 객체를 표현하기 위해서 가장 널리 사용되는 방법 중에 하나이다. 기본적으로 삼차원 메쉬 모델은 연결성 정보, 기하학 정보, 광학성 정보로 구성된다. 연결성 정보는 삼차원 공간상에서 삼차원 메쉬 모델의 꼭지점들 간의 연결 관계를 기술하며, 기하학 정보는 삼차원 공간상의 삼차원 메쉬 모델을 구성하는 꼭지점의 좌표 정보를 나타낸다. 또한, 광학성 정보는 삼차원 메쉬 모델을 렌더링하기 위한 색상 정보, 법선벡터 정보, 텍스처 정보를 나타낸다.

삼차원 메쉬 모델들은 대용량의 자료 크기 때문에 저장과 전송할 때, 제한된 저장 공간과 전송 대역폭으로 인해 많은 제약을 받는다. 그러므로 이를 해결하기 위해서 삼차원 객체들의 데이터 크기를 최대한 줄이면서 왜곡을 인지할 수 없도록 최소화하는 것이 바람직하다. 이전에 연구된 삼차원 메쉬 모델의 부호화 방법은 연결성 및 기하학 정보를 부호화하는데 초점을 맞춰왔으나, 광학성 정보가 삼차원 메쉬 모델에서 반 이상의 저장 공간을 차지함을 고려한다면 효율적인 광학성 정보의 부호화 방법의 개발이 시급함을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 광학성 정보를 효율적으로 압축하기 위한 방법에 초점을 맞춘다.

MPEG-4 Synthetic/Natural Hybrid Coding(SNHC)에서는 삼차원 메쉬 모델을 압축하기 위해서 3-D Mesh Coding(3DMC) 방법을 제안했다<sup>[1]</sup>. 3DMC 알고리즘은 기존의 Deering의 방법<sup>[2]</sup>, Taubin의 방법<sup>[3]</sup>등의 장점을 지닌다. 색상 정보는 선행 양자화 예측 부호화(prequantized predictive coding) 방법과 꼭지점 그래프(vertex graph) 혹은 삼각형 나무(triangle tree)를 따라 일차 예측(first-order prediction) 방법을 적용한 뒤 QM 엔트로피 부호기로 부호화된다. 법선벡터 정보는 선행 양자화 예측 부호화 방법과 꼭지점 그래프 혹은 삼각형 나무를 따라 평행사변형 예측(parallelogram prediction) 방법을 이용하고 8-4 분할 양자화(8-4 subdivision quantization)한 뒤에 QM 엔트로피 부호기

로 압축 부호화한다. 텍스처 정보는 색상 정보와 같이 기하학 정보의 부호화 방법을 사용하였다.

Bajaj 등은 꼭지점 계층(vertices layers)과 삼각형 계층(triangle layers)을 사용하여 광학성 정보를 압축하는 방법을 개발했다<sup>[4]</sup>. 그들은 기하학 정보와 색상 정보를 압축하기 위해서 이차 예측(second-order prediction) 방법을 사용했다. 또한, 법선벡터를 예측하기 위해서는 인접한 면들의 법선벡터들의 평균을 계산했다.

기존에 제안된 알고리즘들이 비교적 좋은 압축 부호화 성능을 나타냈지만, 몇 가지 개선의 여지를 남겼다. 우선 MPEG-4 3DMC<sup>[1]</sup>는 선행 양자화 예측 부호화 방법을 이용하여 부호화 효율을 저하시켰다. 그리고 MPEG-4 3DMC 방법<sup>[1]</sup>과 Bajaj의 방법<sup>[4]</sup>은 바로 이전에 부호화된 꼭지점들의 광학성 정보만으로 현재 부호화할 꼭지점의 광학성 정보를 예측하여, 추가적으로 이용이 가능한 이웃한 꼭지점의 정보들을 간과하였다.

Ahn 등은 위의 문제를 해결하기 위해서 각각 대응표와 평균 예측법을 제안했다<sup>[5]</sup>. 색상 정보를 부호화하기 위해서 삼차원 메쉬 모델을 구성하는 색상 정보의 수가 작으면 대응표를 사용하고, 그렇지 않으면 MPEG-4 3DMC 방법<sup>[1]</sup>을 채택했다. 또한, 법선벡터를 부호화하기 위해서 평균 예측법<sup>[5]</sup>과 6-4 분할 양자화 방법<sup>[6]</sup>을 사용하였다. 하지만, 색상 정보를 압축 부호화할 때 대응표를 이용하는 Ahn의 방법은 색상 정보의 수가 적을 경우에는 뛰어난 압축 부호화 성능을 제공한다. 그러나, 고품질의 삼차원 메쉬 모델처럼 구성된 색상 정보의 수가 많아지면 성능이 저하되므로 MPEG-4 3DMC 방법을 이용하게 된다. 법선벡터 정보는 한 면의 법선벡터는 꼭지점의 법선벡터 평균 이웃한 면의 법선벡터의 평균이 같다고 가정하므로 규칙적이거나 평탄한 메쉬가 아닌 경우는 부호화 효율이 떨어지게 된다.

Isenburg는 텍스처 정보에서 텍스처 좌표의 불연속성으로 인해 부호화 효율이 떨어짐을 지적하고, 텍스처 좌표의 불연속성을 평가하는 알고리즘을 개발했다<sup>[7]</sup>.

개발된 방법들은 이미 부호화된 광학성 정보를 충분히 이용하지 못했을 뿐만 아니라, 삼차원 메쉬 모델들의 고유한 특징들을 간과했다. 먼저, 본 논문에서 제안한 방법은 인접한 꼭지점들의 광학성 정보를 효율적으로 이용한다. 게다가, 삼차원 메쉬 모델들의 연결성 정보와 기하학 정보를 참조하여 광학성 정보를 효율적으로 부호화할 수 있도록 새로운 정보를 제공한다.

본 논문에서는 독립적으로 압축하던 이전의 방식과는 달리 다른 정보를 이용하여 광학성 정보의 부호화에

기여하도록 하였다. 제II장에서는 광학성 정보의 대응 방식, 꼭지점의 분류, 공간적 중복성과 삼차원 메쉬 코덱 시스템에 대해 살펴본다. 제III장에서는 제안한 기하 예측기를 통한 색상 정보 압축 방법을 설명한다. 제IV장에서는 거리 균등화기를 적용한 최적화 평면을 이용하는 법선벡터 압축 방법을 기술한다. 제V장에서는 텍스처 영상 조각들의 재배열을 통한 텍스처 좌표의 불연속성을 제거하는 방법을 설명한다. 제VI장에서는 기존의 방법과 더 우수한 성능을 갖는 제안한 방법을 비교한 실험한 결과를 보인다. 마지막으로 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 삼차원 메쉬 모델의 특징과 부호화 시스템

본 절에서는 삼차원 메쉬 모델의 광학성 정보의 대응 방법, 각 꼭지점의 특징에 따른 꼭지점의 분류, 삼차원 메쉬 모델이 지닌 공간적 중복성에 대해 살펴본다. 최종적으로, 이를 고려하여 삼차원 메쉬 모델의 부호화 시스템을 새롭게 제안한다.

### 1. 광학성 정보의 대응 방식

광학성 정보의 대응 방식에는 꼭지점당 대응 방법(per-vertex binding), 면당 대응 방법(per-face binding), 코너당 대응 방법(per-corner binding)으로 크게 나눌 수 있다. 꼭지점당 대응 방법은 광학성 정보를 삼차원 메쉬 모델의 각 꼭지점에 할당한다. 따라서, 임의의 꼭지점 둘레의 모든 코너들은 같은 광학성 정보를 갖는다. 면당 대응 방법은 삼차원 메쉬 모델의 면마다 광학성 정보를 대응시키므로 임의의 면이 가진 모든 코너에 같은 광학성 정보를 할당한다. 코너당 대응 방법은 삼차원 메쉬의 각 코너에 광학성 정보를 할당한다.

각 코너에 다른 광학성 정보를 할당할 수 있지만, 일반적으로 한 꼭지점에 연결된 코너들은 광학성 정보를 공유하므로, 본 논문에서는 꼭지점당 대응 방법에 기반한 광학성 정보의 압축 부호화 알고리즘을 제안한다.

### 2. 꼭지점 분류

본 논문에서는 꼭지점을 특징에 따라 각각 현재 꼭지점(CV), 이전 꼭지점(PV), 최근 꼭지점(NV), 이웃한 꼭지점들(AVs)로 정의한다. CV는 꼭지점 순회 알고리즘의 순서에 따라 현재 부호화될 꼭지점을 가리키며, PV는 CV 바로 이전에 방문하여 부호화한 꼭지점을 나타낸다. NV는 CV와 가장 가까운 꼭지점이며, AVs는 CV

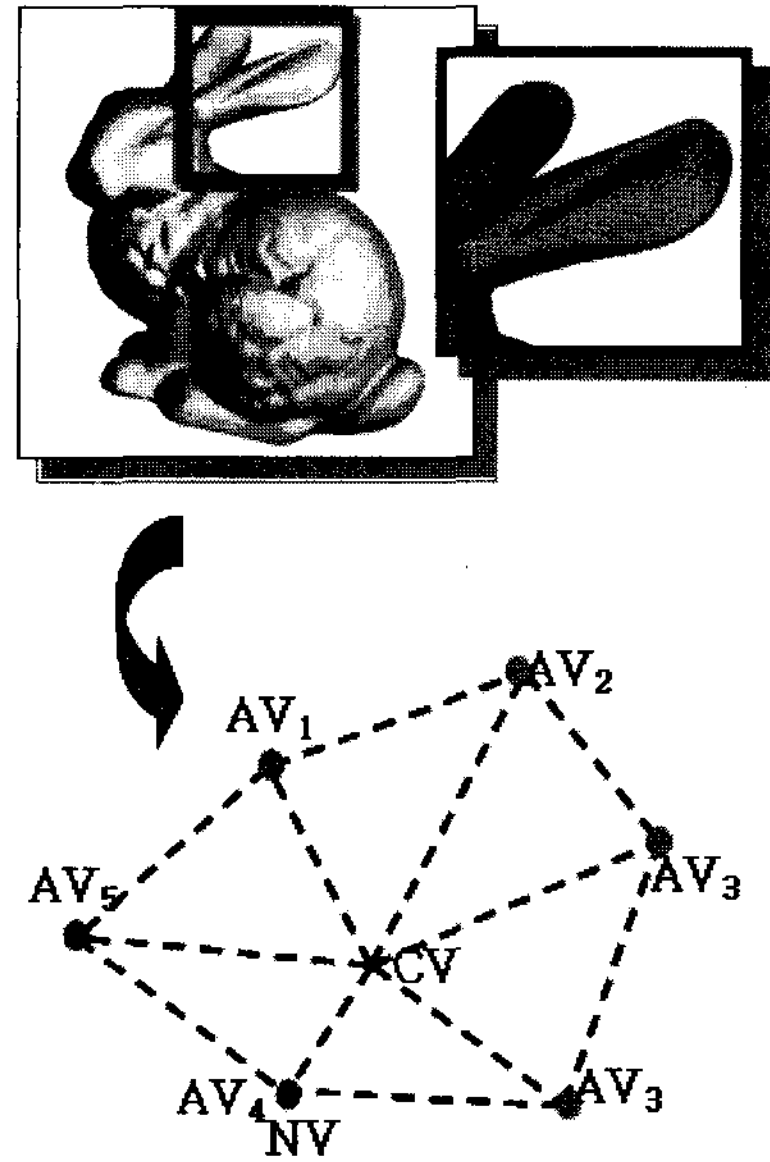


그림 1. 꼭지점 분류의 예  
Fig. 1. Example of vertex types.

와 바로 연결된 꼭지점들의 집합이다. 그림 1은 꼭지점 분류의 예를 보여준다. 위의 삼차원 메쉬 모델의 하나인 'Rabbit' 모델이며 아래는 위 모델의 한 부분을 확대한 것이다. CV에 AVs들은 6개가 존재하며 그 중에서 제일 짧은 AV<sub>4</sub>가 NV이다.

기존의 방법들은 일반적으로 CV의 광학성 정보를 압축하기 위해서 PV의 광학성 정보만을 사용했다. 하지만, 가장 가까운 거리의 광학성 정보가 유사할 확률이 높기 때문에 PV의 정보만을 사용하는 것은 광학성 정보를 압축하는데 부호화 효율을 저하시킬 수 있다.

PV만을 이용할 경우의 비효율성을 확인하기 위해서 몇 가지 확인을 했다. 먼저 CV의 NV가 AV일 확률은 약 99%를 넘었다. 또한, CV에 대해서 PV이면서 AVs에 속하는 꼭지점이 유사한 광학성 정보를 갖는 NV일 확률은 약 18%에 그쳤다. 하지만 CV에 대해서 PV가 아니고 AVs에 속하는 꼭지점이 유사한 특성 정보를 갖는 NV일 확률은 무려 82%로 나타났다. 이 결과로 우리는 광학성 정보를 압축하기 위해서는 PV만이 아닌 NV를 포함하는 AVs를 고려해야 함을 알 수 있다.

### 3. 공간적 중복성과 텍스처 좌표의 불연속성

이차원 영상을 압축하는 기본 원칙은 이차원 영상에서 하나의 화소를 선택하면 이 화소의 이웃한 화소들도 같거나 유사한 색상을 가질 확률이 높다는 것이다. 이를 높은 상관성(high correlation)을 갖거나 공간적 중복성(spatial redundancy)을 지닌다고 한다<sup>[8]</sup>.

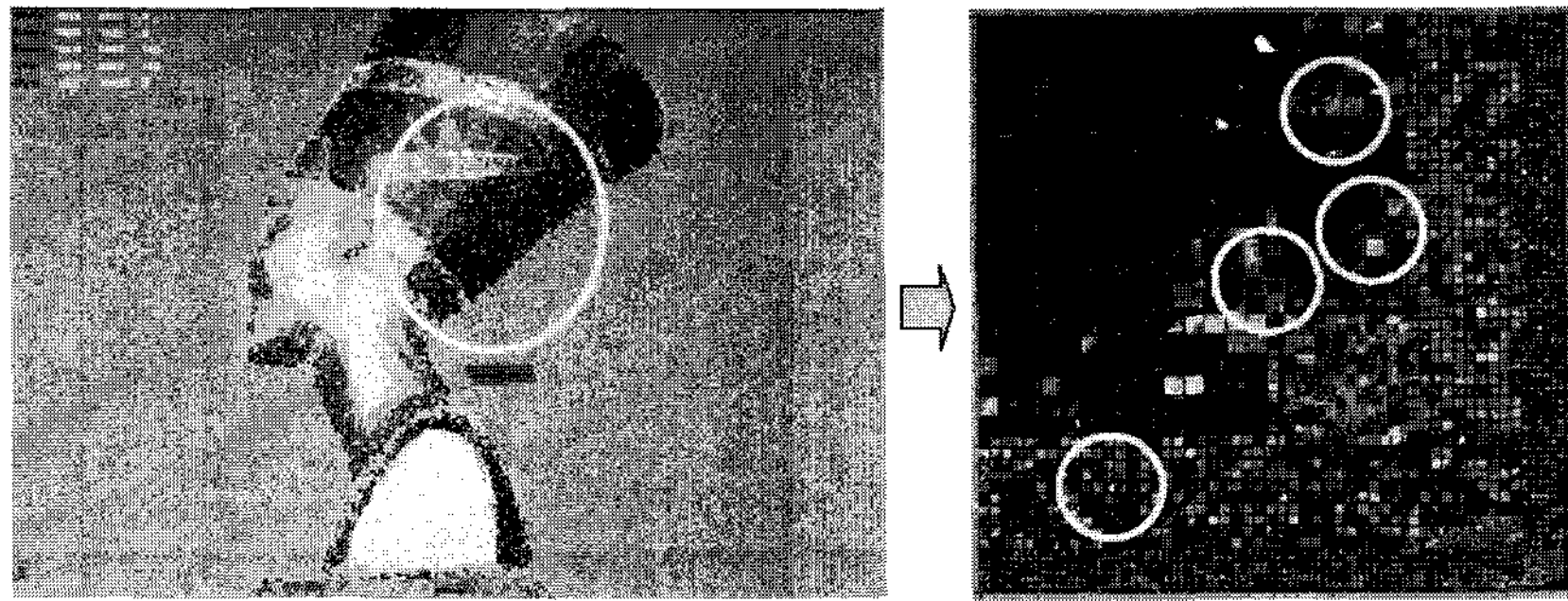


그림 2. 텍스처 좌표의 불연속성  
Fig. 2. Discontinuity in texture coordinates.

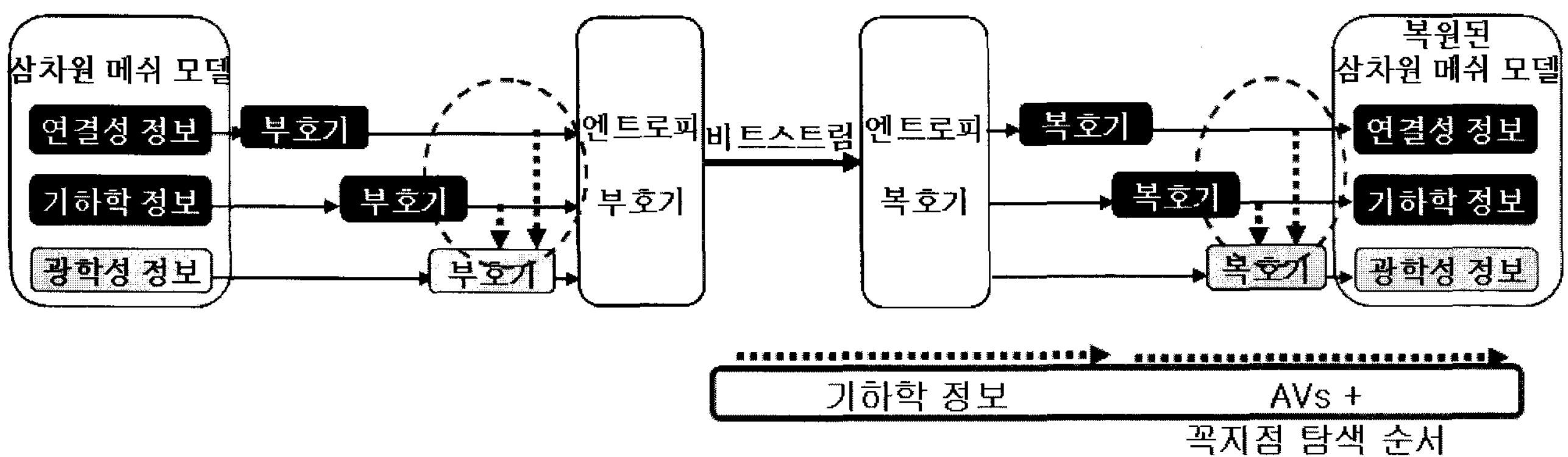


그림 3. 제안한 삼차원 메쉬 부호화 시스템  
Fig. 3. Proposed system for 3-D mesh codec.

공간적 중복성을 삼차원 메쉬 모델로 확장했을 때, 삼차원 영상에서 임의로 한 꼭지점을 선택한다면 이웃한 꼭지점들은 유사한 광학성 정보를 가질 확률이 높다. 따라서, CV와 이것의 NV를 포함하는 AVs는 유사한 광학성 정보를 지닌다. 하지만 이차원 영상과는 다르게 삼차원 메쉬 모델은 꼭지점이 규칙적으로 위치하지 않으므로, 부호화 효율을 향상시키기 위해서는 삼차원 영상의 특징을 이용하여 공간적 중복성을 제거해야 한다.

또한, 텍스처 영상을 삼차원 모델에 적용하는 것을 텍스처 매핑(texture mapping)이라고 하고 이것과 삼차원 영상간의 매개화(parameterization)과정을 거쳐 텍스처 매핑에 필요한 텍스처 좌표를 생성한다. 하지만 삼차원 정보획득 장치로 텍스처 좌표를 생성할 때 매개화 정보가 여러 부분에서 어긋난다<sup>[7]</sup>. 결과적으로, 꼭지점 부호화 순서에 따라 텍스처 좌표를 부호화하면 텍스처 좌표가 불연속적으로 정렬된다. 그림 2는 텍스처 좌표의 불연속성을 보여준다. 결국 이전에 개발된 예측기를 사용하여 텍스처 좌표를 부호화하면 텍스처 좌표의 불연속성이 생겨 부호화 효율이 저하된다.

#### 4. 삼차원 메쉬 부호화 시스템

기존의 시스템은 연결성 정보를 부호화하면서 얻은 부호화 순서를 이용하여 기하학 정보와 광학성 정보를 독립적으로 압축하였다. 하지만, 이차원 영상처럼 삼차원 메쉬 모델도 공간적 중복성을 지니므로, 연결성 정보, 기하학 정보와 이미 부호화된 광학성 정보는 현재 예측하려는 광학성 정보에 중요한 단서를 제공할 수 있다. 이러한 사실을 이용하여 삼차원 메쉬 모델을 압축하는 새로운 삼차원 메쉬 부호화 시스템을 개발했다.

그림 3은 제안한 삼차원 메쉬 부호화 시스템의 블록도를 설명하고 있다. 점선은 이전에 개발된 시스템과의 차이를 나타낸다. 물론 이전의 시스템도 연결성 정보를 참조하여 압축 순서를 결정하지만, 새로운 시스템은 이것과 더불어 AVs의 정보를 사용하므로 기존의 코덱 시스템과 차별성을 지닌다. 게다가, 색상 정보와 법선 벡터 정보를 각각 예측하기 위해서 기하학 정보를 이용한다. 따라서 제안한 삼차원 메쉬 코덱 시스템은 연결성 정보와 기하학 정보를 이용하여 광학성 정보를 압축하게 된다.



### III. 색상 정보 부호화 방법

인간의 시각 기관은 명암뿐만 아니라 색상도 중요한 정보로 인식하기 때문에, 컬러 영상 시스템에서 색상 정보는 영상으로부터 객체 추출 및 인식을 명확하게 할 수 있도록 돕는 중요한 역할을 한다. 또한, 삼차원 객체를 사용하는 멀티미디어 시스템에서 색상 정보의 사용은 사용자에게 삼차원 영상의 사실감과 몰입감을 부여할 수 있고 흥미를 유발할 수 있게 한다.

본 절에서는 삼차원 메쉬 모델의 색상 정보를 부호화 하는 방법을 소개한다<sup>[11]</sup>. 부호화 효율을 개선하기 위해서 색상 정보 부호기에 제안한 기하예측 방법을 채택했다.

#### 1. 색상 정보 부호기

기존의 방법들은 이전의 부호화된 광학적 정보만을 이용하여 부호화하는 방법을 제안했다. 제안한 색상 부호화 방법은 복원된 색상 정보뿐만 아니라 삼차원 메쉬 모델의 기본적인 요소인 연결성 정보와 기하학 정보도 사용한다. 제안한 기하예측 방법은 CV와 AVs 사이의 거리와 각을 고려하여 복원된 꼭지점들의 색상 정보에 대한 가중치 합으로 CV의 예측된 색상 정보를 나타낸다.

그림 4는 연결성 정보와 기하학 정보를 참조하여 기하예측(geometry prediction)을 하는 제안한 색상 정보 부호기의 블록도를 보여준다. 본래의 색상 정보와 기하예측으로 얻은 색상 정보의 차이 값인 잔류 오류(residual error)는 M레벨 Midtread 균등 양자화기<sup>[9]</sup>를 통해 양자화된다. 양자화기에서 나온 결과는 QM 엔트로피 부호기를 통해 부호화한다.

본 논문에서 제안한 색상 부호기를 기하 예측기(geometry predictor)로 정의한다. 먼저 기하 예측기는 CV의 AVs를 찾기 위해서 연결성 정보를 참조한다. 다

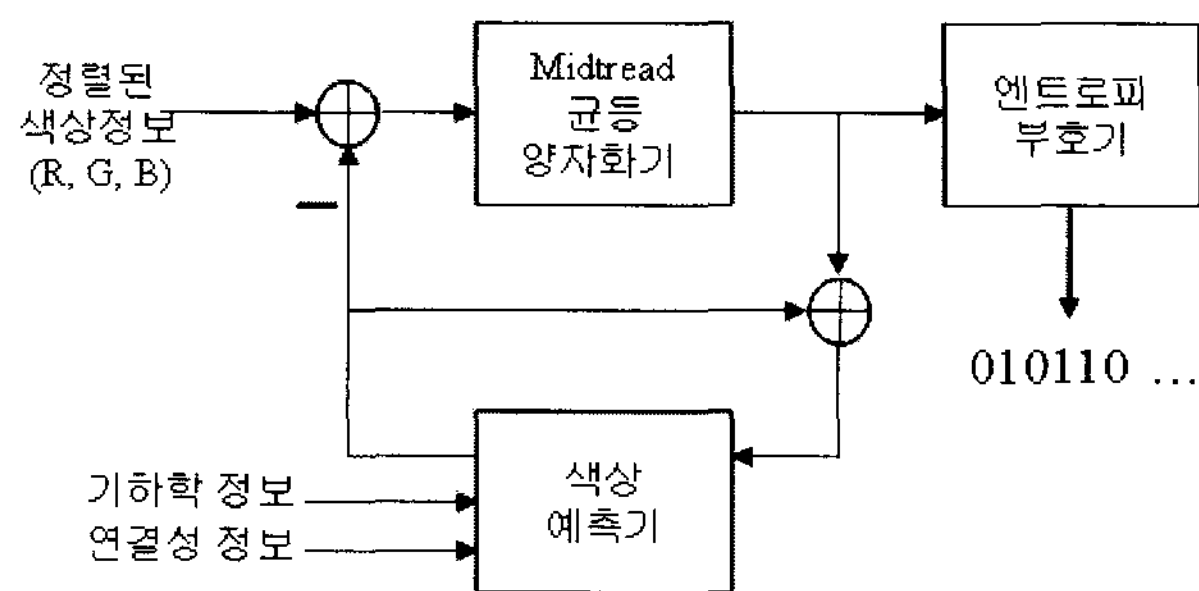


그림 4. 제안한 색상 정보 부호기의 블록도  
Fig. 4. Block diagram of the proposed color encoder.

음으로 정확한 색상 정보를 예측하기 위해서 AVs의 기하학 정보를 이용한다. 기하 예측기에서 CV의 예측된 색상 정보는 AVs에 대한 복원된 색상 정보의 가중치 합으로 계산할 수 있다.

$$color_p(CV) = \sum_{i=1}^{n(AVs)} w_i \times color(AVs_i) \quad (1)$$

여기서,  $color_p(CV)$ 는 CV의 예측된 색상 정보를 가리키며,  $n(AVs)$ 는 AVs의 개수를 나타낸다. 또한  $w_i$ 는 AVs에서  $i$  번째 꼭지점의 가중치 계수로 정의하고,  $color(AVs_i)$ 는 AVs 중에서  $i$  번째 꼭지점의 복원된 색상 정보를 나타낸다. 식 (1)에서  $w_i$ 의 합은 1이 되어야 한다.

$$\sum_{i=1}^{n(AVs)} w_i = 1 \quad (2)$$

#### 2. 기하예측 방법

대부분의 영상 압축 부호화 알고리즘들은 공간적 중복성이 존재한다는 사실을 기반으로 하며, 본 논문에서도 삼차원 메쉬 모델을 압축 부호화하기 위해서 광학적 정보가 공간적으로 중복됨을 이용한다.

하지만 이차원 영상에서 사용하던 방식을 확장하여 삼차원 영상에 적용하기 위해서는 크게 두 가지 고려해야 할 사항이 있다. 먼저 삼차원 메쉬 모델의 기본 단위인 꼭지점은 이차원 영상의 화소와 달리 삼차원 공간 상에서 임의의 위치에 존재한다. 게다가 화소는 영상의 외곽을 제외하고 항상 고정된 형태로 8개의 인접한 화소를 갖지만, 꼭지점은 항상 같은 수의 인접한 꼭지점을 갖지 않을 뿐만 아니라 연결된 형태도 다양하다. 따라서 인접한 꼭지점들을 참조하여 색상 정보를 부호화하기 위한 정보를 얻는 것은 쉽지 않다.

이차원 영상에서 예측할 화소의 값은 가까이 있는 화소와 유사한 값을 가질 확률이 높기 때문에, 이러한 특징을 이용하는 많은 압축 부호화 알고리즘들이 존재한다<sup>[8~10]</sup>. 최근에 이슈가 되고 있는 비디오 압축 부호화 표준인 H.264에서 인트라 16x16 모드에서 사용되는 예측 방법 가운데 하나인 선형 평면 함수(linear 'plane' function)가 좋은 예가 될 수 있다.

본 논문에서는 이를 삼차원 영상으로 확장하고 적용하여, 삼차원 메쉬 모델의 색상 정보가 포함한 공간적 중복성을 제거하기 위해서 현재 부호화하려는 꼭지점에

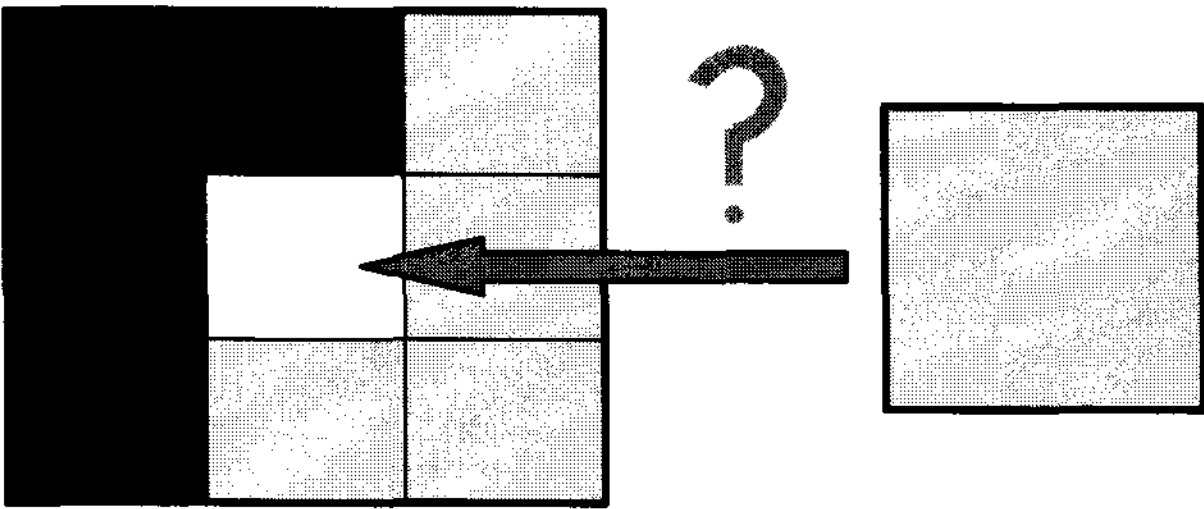


그림 5. 문맥 기반의 부호화 방법의 예  
Fig. 5. Example of context-based coding scheme.

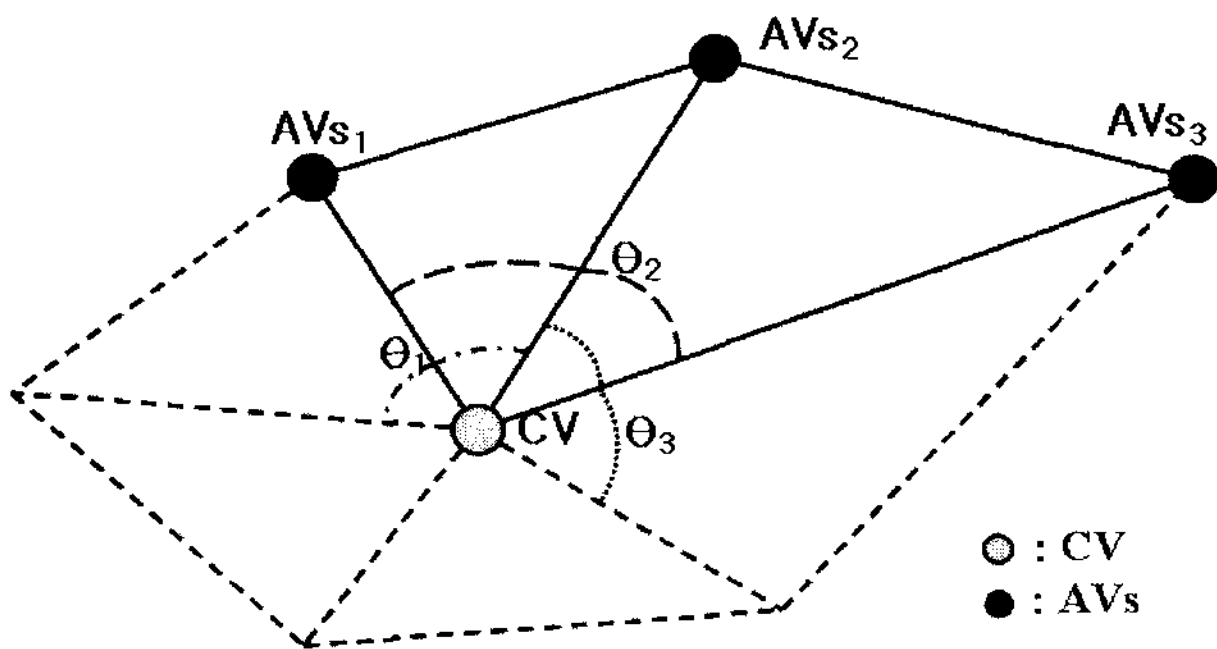


그림 6. 각도가 색상 예측에 미치는 영향  
Fig. 6. Influence of angles on color prediction.

인접하며 가까운 꼭지점의 색상 정보가 부호화 할 꼭지점의 색상 정보와 유사할 확률이 높다고 가정했다<sup>[11]</sup>.

$$color_p(CV) \propto \frac{1}{d(CV, AVs_i)} \quad (3)$$

여기서  $d(CV, AVs_i)$ 는 CV와 AVs중에서  $i$  번째 꼭지점 사이의 거리를 나타낸다.

이차원 영상에서 널리 사용되며 뛰어난 부호화 효율을 제공하는 방식 중에 문맥 기반(context-based)의 압축 부호화 방법이 있다<sup>[8-10]</sup>. 이것은 주변 화소의 문맥(context)을 통해 현재 부호화하려는 화소의 값을 예측한다. 그림 5는 발생 확률이 가장 높은 인접한 화소의 색상 정보로 부호화할 색상 정보를 예측하는 문맥을 기반으로 하는 부호화 방법의 간단한 예를 보여준다. 이러한 개념을 기반으로 본 논문에서는 CV와 AVs가 이루는 각도로부터 AVs의 색상 정보가 압축 부호화하려는 CV의 색상 정보에 미치는 영향력(influence)을 계산했다<sup>[12]</sup>.

$$color_p(CV) \propto \theta_i \quad (4)$$

여기서  $\theta_i$ 는 CV와 AVs의  $i$  번째 꼭지점에 의해 생기는 각도의 크기로 정의한다.

그림 6은 AVs의 색상 정보에 대한 영향력을 계산하기 위한 각도를 구하는 예제를 보여준다. CV는 현재

꼭지점인 CV를 가리키며,  $AVs_i$ 는 CV에 인접한 꼭지점들 AVs에서  $i$  번째 꼭지점을 나타낸다.

$$\theta_i = \angle AVs_{(i-1) \% n(AVs)} V_c AVs_i + \angle AVs_i V_c AVs_{(i+1) \% n(AVs)} \quad (5)$$

여기서  $i$ 는  $1 \leq i \leq n(AVs)$ 의 범위를 갖고,  $\%$ 는 나머지(modulo) 연산을 나타낸다.

본 논문에서는 삼차원 메쉬 모델의 특성을 고려하여 제안한 두 가지 특징을 바탕으로 기하예측 방법을 제안하였다. 기하예측 방법은 CV와 AVs 사이의 거리<sup>[11]</sup>와 각도<sup>[12]</sup>를 이용하여 AVs의 색상 정보가 CV의 색상 정보에 기여하는 정도를 계산하고, 이를 바탕으로 AVs의 색상 정보에 대한 가중치 합으로 CV의 색상 정보를 예측한다. 식 (3)과 식 (4)를 참조하여 제안한 방법에서 얻은 CV의 예측된 색상 정보와 AVs의 색상 정보들 사이의 관계를 다음과 같이 나타냈다.

$$color_p(CV) \propto \frac{\theta_i}{d(CV, AVs_i)} \quad (6)$$

이제 식 (2)와 식 (6)을 이용하여 AVs에서  $i$  번째 꼭지점의 가중치 계수  $w_i$ 를 구할 수 있다.

$$w_i = \frac{\frac{\theta_i}{d(CV, AVs_i)}}{\sum_{j=1}^{n(AVs)} \frac{\theta_j}{d(CV, AVs_j)}} \quad (7)$$

식 (7)을 식 (1)에 대입하면, 제안한 색상 정보를 예측하는 기하 예측기를 설계할 수 있다. 최종적으로 CV의 예측된 색상 정보  $color_p(CV)$ 는 식 (8)을 통해 얻을 수 있다.

$$color_p(CV) = \frac{\sum_{i=1}^{n(AVs)} \frac{\theta_i \times color(AVs_i)}{d(CV, AVs_i)}}{\sum_{j=1}^{n(AVs)} \frac{\theta_j}{d(CV, AVs_j)}} \quad (8)$$

#### IV. 법선벡터 정보 부호화 방법

법선벡터 정보는 삼차원 메쉬 모델의 자연스러운 표면과 양방향 조명의 표현을 위해 중요한 역할을 한다. Gouraud 셰이딩<sup>[13]</sup>이나 Phong 셰이딩<sup>[14]</sup>과 같은 기술을 적용하면, 불연속적으로 연결된 각 면들이 부드럽게 연

결된 것처럼 처리된다. 게다가, 법선벡터를 사용하면 빛의 가감, 다양한 빛의 위치와 양, 색의 조절들에 대한 양방향 처리가 가능해진다.

삼차원 메쉬 모델에 법선벡터 정보를 포함하지 않는다면, 복호기에서 삼차원 메쉬 모델을 렌더링하기 위해서 기하학 정보를 이용하여 법선벡터를 일일이 계산해야 하므로 복호기의 복잡도를 증가시키게 된다. 그러므로 삼차원 메쉬 압축 부호화 시스템은 일반적으로 법선벡터 정보를 함께 처리한다. 그러나 법선벡터 정보는 부동소수점을 사용하는 기하학 정보, 색상 정보처럼 많은 저장 공간과 네트워크 대역폭을 필요로 한다. 이 문제를 해결하기 위해서는 효율적인 법선벡터 압축 방법이 필요하다.

법선벡터 정보는 부동 소수점 형태의 데이터 형식을 갖기 때문에 기존의 알고리즘들은 색상 정보처럼 기하학 정보를 압축 부호화하는 방법을 사용하거나 이미 부호화된 법선벡터 정보만을 이용하여 예측 부호화하는 방법이 제안되었다. 본 절에서는 삼차원 메쉬 모델을 렌더링하기 위해서 필요한 법선벡터 정보의 압축 부호화 방법에 대해 설명하고자 한다<sup>[12]</sup>. 제안한 방법은 거리 균등화 방법을 이용한 최적화 평면 기술을 사용하여 뛰어난 부호화 성능을 제공한다.

1. 법선벡터 정보 부호기

제안한 법선벡터 정보 부호기는 일반적인 예측 부호화 방법과 다른 특징을 갖는다. 기존의 알고리즘들은 이미 압축 부호화된 법선벡터를 이용하므로 부호화된 법선벡터의 반대편에 있는 부호화되지 않은 법선벡터는 전혀 고려할 수 없다. 게다가, 부호화할 CV의 법선벡터와 연관성이 높은 AVs가 아닌 다른 꼭지점들의 법선벡터를 이용하여 법선벡터를 정확히 예측하기 어렵다.

예측 부호화 방법은 예측된 데이터가 원본 데이터와 얼마나 비슷한가에 따라 압축 부호화 효율이 결정되는데, 오류가 큰 예측값으로 인해 기존의 방법들은 개선의 여지를 보였다. 제안한 방법은 이미 압축된 법선벡터를 참조하지 않고, 삼차원 메쉬 모델의 연결성 정보와 기하학 정보를 이용하여 예측한 법선벡터를 생성하여 부호화한다.

그림 7은 연결성 정보와 기하학 정보를 이용하는 법선벡터 예측기를 갖는 제안한 법선벡터 정보 부호기를 보여준다.  $n$ 은 꼭지점 순회 알고리즘을 통해 주어진 법선벡터를 나타내며,  $n_p$ 는 제안한 방법을 이용하여 예측

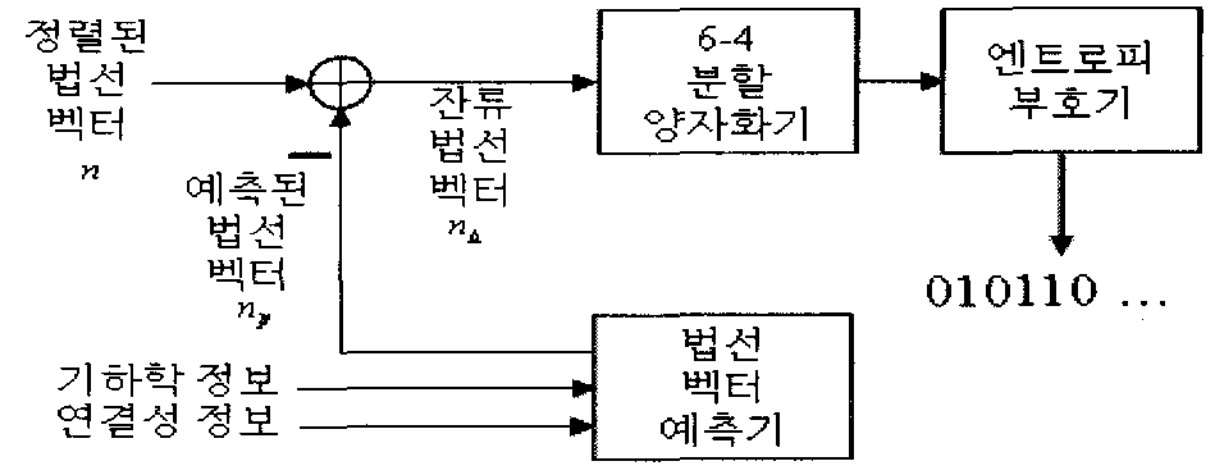


그림 7. 제안한 법선벡터 정보 부호기의 블록도  
Fig. 7. Block diagram of the proposed normal vector encoder.

된 법선벡터로 정의하고,  $n_Δ$ 는 잔류 오류 법선벡터를 표현한다.

법선벡터 예측기에서 채택한 거리 균등화 방법을 이용한 최적화 평면 생성법<sup>[12]</sup>은 다음과 같은 과정에 따라 법선벡터를 예측한다. 먼저, 법선벡터 예측기는 CV의 AVs에 거리 균등화 기술을 적용하여 CV와 AVs를 연결하는 직선상에서 CV에서 거리가 동일한 꼭지점들의 집합 AVs'를 얻는다. 다음으로 CV의 법선벡터를 예측하기 위해서 동일한 거리에 있는 AVs'를 이용하여 최적화 평면을 생성한 후, 최적화 평면의 법선벡터를 예측된 CV의 법선벡터로 사용한다.

그림 7의 블록도를 통해서 예측된 법선벡터와 잔류 오류 법선벡터를 얻을 수 있다. 하지만, 우리가 사용하는 일반적인 직교 좌표계(cartesian coordinate system)에서 잔류 오류 법선벡터를 사용한다면 좋은 압축률을 기대할 수 없기 때문에, 본 논문에서는 데카르트 좌표계에서 반지름이 1인 구면 좌표계(spherical coordinate system)로 변환한다. 꼭지점 순회 알고리즘에 의해 정렬된 법선벡터  $n$ 과 예측된 법선벡터  $n_p$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} n = (x, y, z)_c = (1, \theta, \phi)_s \\ n_p = (x_p, y_p, z_p)_c = (1, \theta_p, \phi_p)_s \end{cases} \quad (9)$$

여기서  $(x, y, z)_c$ 와  $(x_p, y_p, z_p)_c$ 는 직교 좌표계에서  $n$ 과  $n_p$ 를 각각 가르킨다. 또한,  $(1, \theta, \phi)_s$ 와  $(1, \theta_p, \phi_p)_s$ 는 반지름이 1인 구면 좌표계에서  $n$ 과  $n_p$ 로 각각 정의한다. 따라서  $(x, y, z)_c$ 와  $(1, \theta, \phi)_s$ 의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} (x, y, z)_c &= (\sin\theta \cos\phi, \cos\theta \cos\phi, \sin\phi)_c \\ &= (1, \arctan(\frac{x}{z}), \arctan(\frac{y}{z}))_s \quad (10) \\ &= (1, \theta, \phi)_s \end{aligned}$$

6-4분할 양자화의 입력으로 사용되는 잔류 오류 법선벡터  $n_{\Delta}$  는 식 (9)와 식 (10)에서 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} n_{\Delta} &= n - n_p \\ &= (x, y, z)_c - (x_p, y_p, z_p)_c \\ &= (1, \theta, \phi)_s - (1, \theta_p, \phi_p)_s \\ &= (0, \theta_{\Delta}, \phi_{\Delta})_s \end{aligned} \tag{11}$$

식 (11)에서 얻은 잔류 오류 법선 벡터  $n_{\Delta}$ 를 양자화하기 위해서 6-4분할 양자화기를 채택하고 QM 엔트로피 부호기로 양자화 계수를 부호화한다.

### 2. 최적화 평면

기존의 연구들은 이미 부호화된 법선벡터를 이용하여 부호화하기 때문에 크게 두 가지 약점을 지닌다. 첫째, 제안된 방법들은 부호화된 법선벡터의 반대편의 법선벡터들, 즉, 부호화되지 않은 법선벡터들을 전혀 고려할 수 없다. 둘째, CV와 연관성이 높은 AVs가 아닌 인접하지 않은 꼭지점들의 법선벡터를 참조하여 압축 부호화 효율을 저하시킨다.

본 논문에서는 이러한 약점들을 해결하기 위해서 최적화 평면의 법선벡터를 예측된 법선벡터로 사용하는 방법을 개발했다. 여기서, 최적화 평면이란 자신과 AVs 간의 최소 제곱근 오류(minimum square error)를 가진 평면으로 정의되며 최소 자승 근사법(least squares approximation)<sup>[15]</sup>을 적용하여 쉽게 계산할 수 있다.

그림 8은 최소 자승 근사법을 적용하여 AVs로부터 얻은 최적화 평면을 보여준다. 그림 8 (a)와 (b)는 각각 제안한 최적화 평면의 평면도와 측면도를 보여준다. CV의 법선벡터를 예측하기 위해서 기존의 알고리즘들은 주변의 복원된 법선벡터를 이용하지만, 본 논문에서는 법선벡터를 예측하기 위해서 최적화 평면의 법선벡터  $\vec{n}_{op}$ 를 이용한다.

최적화 평면의 획득 방법을 소개하기에 앞서, 최소 자승 근사법에 대해 살펴보자.  $m \times n$  크기의 행렬  $A$ 가 존재할 때, 행렬  $A$ 는  $Ax = b$  를 만족한다고 가정하자. 미지수가 하나이고 하나의 열  $\vec{a}$ 을 갖는다면, 행렬  $A$ 는  $n$ 개의 열을 갖는다. 하지만, 행렬  $A$ 에서  $m$ 이  $n$ 보다 크면,  $Ax = b$  라는 방정식은 불능이 된다. 바꿔 말하면,  $b$ 는 행렬  $A$ 에서 열들의 조합으로 나타낼

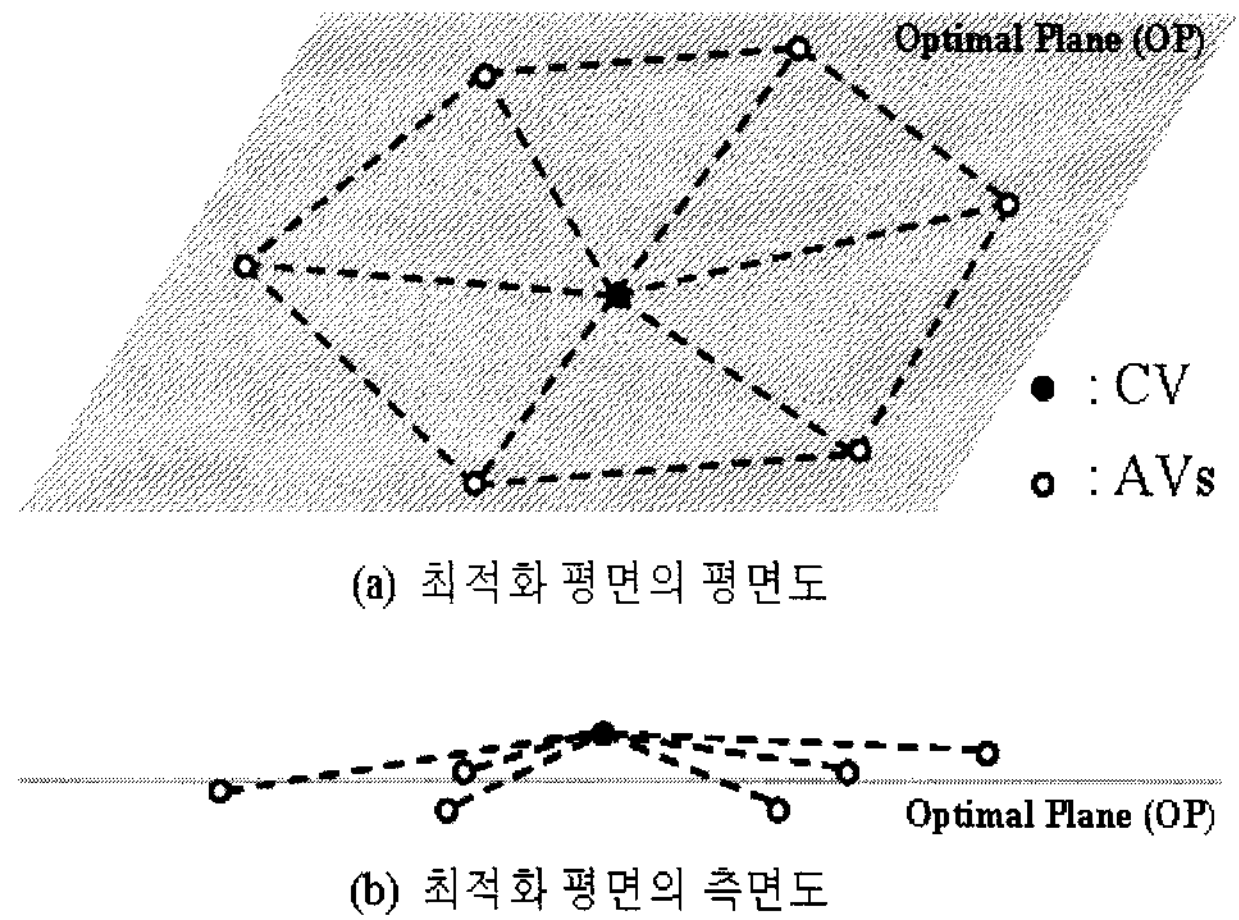


그림 8. 최적화 평면  
Fig. 8. Optimal plane.

수 없다. 따라서  $b$ 는 행렬  $A$ 의 열 공간 외부에 존재하게 된다. 이때  $Ax = b$  을 만족하는  $x$ 는 존재하지 않지만, 근사한 해  $\vec{x}$ 를 찾기 위해 이용하는 방법이 최소 자승 근사법이다.

방정식  $Ax = b$ 의 유일한 해  $x$ 가 존재하지 않더라도, 최소 자승 근사법을 이용하면 주어진 방정식의 오류를 최소화하는 근사해인  $\vec{x}$ 를 구할 수 있다. 오류  $E$ 는 식 (12)처럼 열 공간에서  $Ax$ 에서  $b$ 까지의 거리로 정의한다.

$$E = |Ax - b| \tag{12}$$

오류  $E$ 를 최소화하기 위한 최소 자승 해  $\vec{x}$ 는 행렬  $A$ 의 열 공간에서 다른 어떤 점보다  $b$ 에 가깝다. 그러므로 오류  $E$ 를 최소화하려면  $Ax - b$ 는 행렬  $A$ 의 열 공간에 직교하는 벡터이어야 한다. 즉, 행렬  $A$ 의 열들은  $Ax - b$ 와 수직이 되어야 한다. 두 벡터가 수직하면 내적이 0이므로 식 (13)과 식 (14)를 만족한다.

$$A^T(Ax - b) = 0 \tag{13}$$

$$A^T Ax = A^T b \tag{14}$$

또한, 행렬  $A$ 의 열들이 서로 독립이면  $A^T A$ 는 정사각 행렬, 대칭 행렬이 되고 역변환이 가능해지며 식 (15)가 성립된다.

$$\vec{x} = (A^T A)^{-1} A^T b \tag{15}$$



지금부터 앞서 설명한 최소 자승 근사법을 바탕으로 최적화 평면의 획득 방법에 대해서 살펴본다. 앞서 최적화 평면을 자신과 AVs간의 거리가 가장 짧은 평면이라 정의했으며 최적화 평면의 식을 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$ax + by + cz + d = 0 \tag{16}$$

식 (16)에서 최적화 평면의 법선벡터  $\vec{n}_{op}$ 는  $\vec{n}_{op} = (a, b, c)$ 으로 정의되고  $\vec{n}_{op}$ 를 단위 벡터로 표현하면  $\|\vec{n}_{op}\| = 1$ 이어야 한다. 게다가, 식 (16)은 식 (17)과 동일한 형태를 갖는다.

$$\frac{b}{a}y + \frac{c}{a}z + \frac{d}{a} = -x, a \neq 0 \tag{17}$$

그리고  $i$  번째 AVs의 꼭지점의 좌표는  $(x_i, y_i, z_i)$ 으로 표현하고 모든 AVs를 포함하는 최적화 평면이 존재한다면 식 (18)과 식 (19)로 정의할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & y_{n(AVs)} & z_{n(AVs)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d}{a} \\ \frac{b}{a} \\ \frac{c}{a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -x_1 \\ \vdots \\ -x_{n(AVs)} \end{bmatrix} \tag{18}$$

$$Ax = b \tag{19}$$

만약 식 (18)과 식 (19)을 풀 수 있다면 최소 제곱근 오류는 존재하지 않는다. 하지만  $n(AVs)$ 는 일반적으로 3보다 크므로, 최적화 평면은 최소 제곱근 오류가 존재하며 최소 자승 근사법으로 풀어야 한다. 그러므로 최소 자승 근사법을 적용하면,  $\|\vec{n}_{op}\| = 1$ 과 식 (18)에서 CV의 예측된 법선벡터인  $\vec{n}_{op}$ 를 얻을 수 있다.

### 3. 거리 균등화

만약 삼차원 메쉬 모델이 규칙적(regular)이거나 평탄한(even) 특성을 갖는다면 국부적으로 곡률이 작아지므로 최적화 평면 방법만으로도 뛰어난 압축 부호화 성능을 제공할 수 있다. 하지만, 삼차원 메쉬 모델이 불규칙적이거나 상대적으로 적은 면으로 구성되어 곡률이 큰 경우에는 개선의 여지를 보여주었다. 따라서, 최적화 평면 방법의 성능을 극대화하기 위해서, 전처리 과정으로 거리 균등화(distance equalization) 방법을 제안하였다.

거리 균등화 기법은 CV에서 AVs까지의 거리를 모두 같게 만들어 주는 것이다. 우선 CV와 AVs를 연결하는 각 직선 상에 CV에서 동일한 거리에 떨어진 꼭지점의 집합 AVs'를 구한다. 이렇게 얻어진 AVs'를 가지고 최적화 평면을 구하면 더 정교한 법선벡터를 예측할 수 있다.

거리 균등화 기법은 최적화 평면을 획득하기 전에 사용하는 전처리 과정으로 최적화 평면만을 이용했을 때 발생할 수 있는 미세한 오류를 보정하는 역할을 한다. 제안한 거리 균등화 방법과 최적화 평면을 이용하여 법선벡터를 예측하면, 연결성 정보와 기하학 정보를 참조하여 기존의 알고리즘들이 이용하지 못한 복원되지 않은 법선벡터에 대한 정보를 고려할 수 있고, CV와 상호 연관성이 떨어지는 AVs가 아닌 꼭지점의 정보를 이용하지 않아도 되며, 최적화 평면의 미세한 오류를 보정하여 법선벡터를 더 정확히 예측할 수 있다.

그림 9는 최적화 평면만을 적용한 경우와 거리 균등화 기법을 이용한 최적화 평면을 적용한 경우의 차이를 보여준다. 그림 9 (a)는  $\theta_i \cong \theta_j$ 인 매우 유사한 이면각(dihedral angle)을 갖는 경우를 보여준다. 이 경우에는 이면각이 같으므로 이등변 삼각형의 특성으로 인해 CV의 법선벡터와 최적화 평면의 법선벡터는 같다. 하지만, 일반적으로 이면각들이 같은 경우는 매우 드물다. 그림 9 (b)는  $\theta_i \neq \theta_j$ 인 서로 다른 이면각을 갖는 일반적인 경우를 나타낸다. CV의 본래 법선벡터와 최적화 평면의 법선벡터 사이에는 오류가 발생하게 되므로 최적화 평면 기술의 부호화 효율이 저하된다. 본 논문에서는 이 때 발생하는 오류를 보정하기 위해서 거리 균등화 방법

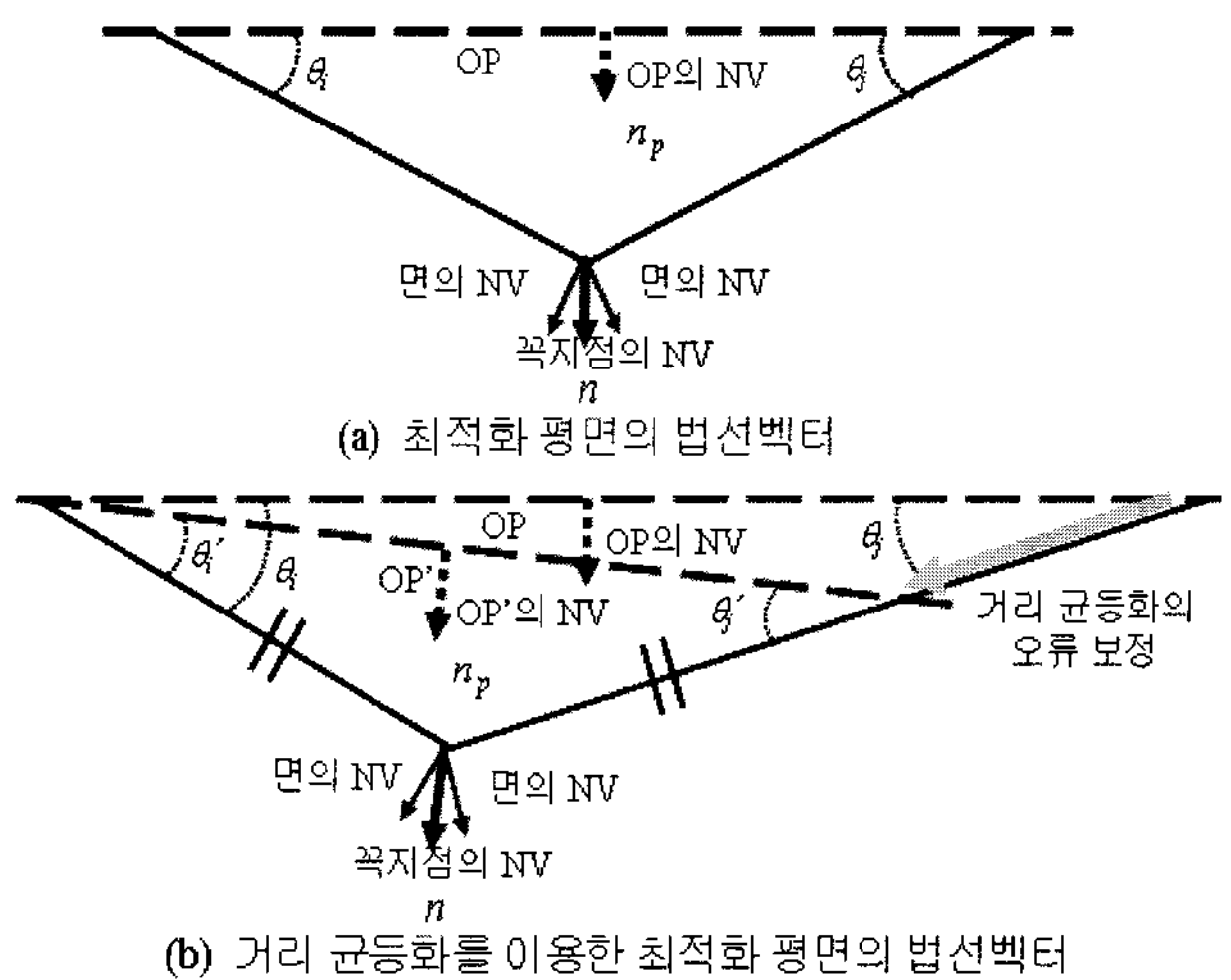


그림 9. 거리 균등화 방법  
Fig. 9. Distance equalization scheme.

을 제안했다. 그림 9 (b)에서 보는 것처럼 거리 균등화 방법을 적용하면  $\theta_i' \cong \theta_j'$ 인 매우 유사한 이면각을 갖게 되어, 그림 9 (a)와 같은 이상적인 경우에 근접하게 된다. 제안한 거리 균등화 방법은 이등변 삼각형 고유의 특징을 이용하므로 이전의 방법들보다 CV의 법선벡터를 정확히 예측할 수 있다.

### V. 텍스처 정보 부호화 방법

텍스처 영상을 사용하여 렌더링하는 것은 삼차원 메쉬 모델에 실제감을 부여하는 간단한 방법이다. 색상 정보는 삼차원 메쉬 모델의 각 꼭지점에 색상을 할당하는 방식임에 반해, 텍스처 정보는 텍스처 영상을 텍스처 좌표에 맞게 메쉬 모델에 매핑을 하는 방식이다. 본 절에서는 삼차원 메쉬 모델의 텍스처 정보를 부호화하는 방법을 소개한다<sup>[16]</sup>.

#### 1. 텍스처 정보 부호기

기존의 방법들은 텍스처 정보의 특징은 무시하고 기하학 정보나 색상 정보와 유사한 방식으로 예측 부호화하였다. 하지만, 본 논문에서는 텍스처 정보를 예측 부호화하기 위해서 텍스처 영상을 재배열하여 텍스처 좌표의 불연속성을 제거한다<sup>[16]</sup>. 제안한 텍스처 정보 부호화 방법은 삼차원 메쉬 모델과 텍스처 좌표를 분석하여 텍스처 영상을 재배열하고 마지막으로 텍스처 좌표를 예측 부호화하게 된다. 그림 10은 제안한 텍스처 정보 부호화 방법을 나타낸다.

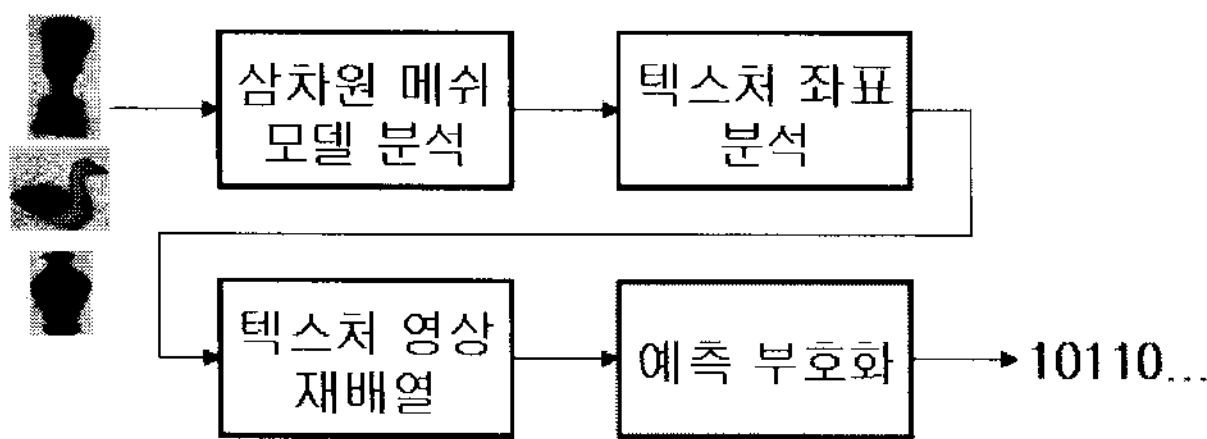


그림 10. 제안한 텍스처 정보 부호기의 블록도  
Fig. 10. Block diagram of proposed texture encoder.

#### 2. 텍스처 메쉬 모델 분석

삼차원 메쉬 모델 분석은 삼차원 메쉬 정보로부터 연결성 정보, 기하학 정보, 광학성 정보로 분리한 뒤, 광학성 정보 중 텍스처 정보인 텍스처 영상과 텍스처 좌표를 각각 분리한다. 입력 모델의 자료 형식은 VRML이고, VRML 분석기를 통해 텍스처 영상과 텍스처 좌표

```
texture ImageTexture {
    url "nefert5_T5k1.bmp"
}

texCoord TextureCoordinate { point [
0.333008 1.13184, 0.333008 1.11621, 0.348633 1.13184,
0.192383 1.19434, 0.192383 1.20996, 0.176758 1.19434,
0.750977 1.53027,
```

그림 11. 텍스처 영상과 텍스처 좌표  
Fig. 11. Texture image and texture coordinates.

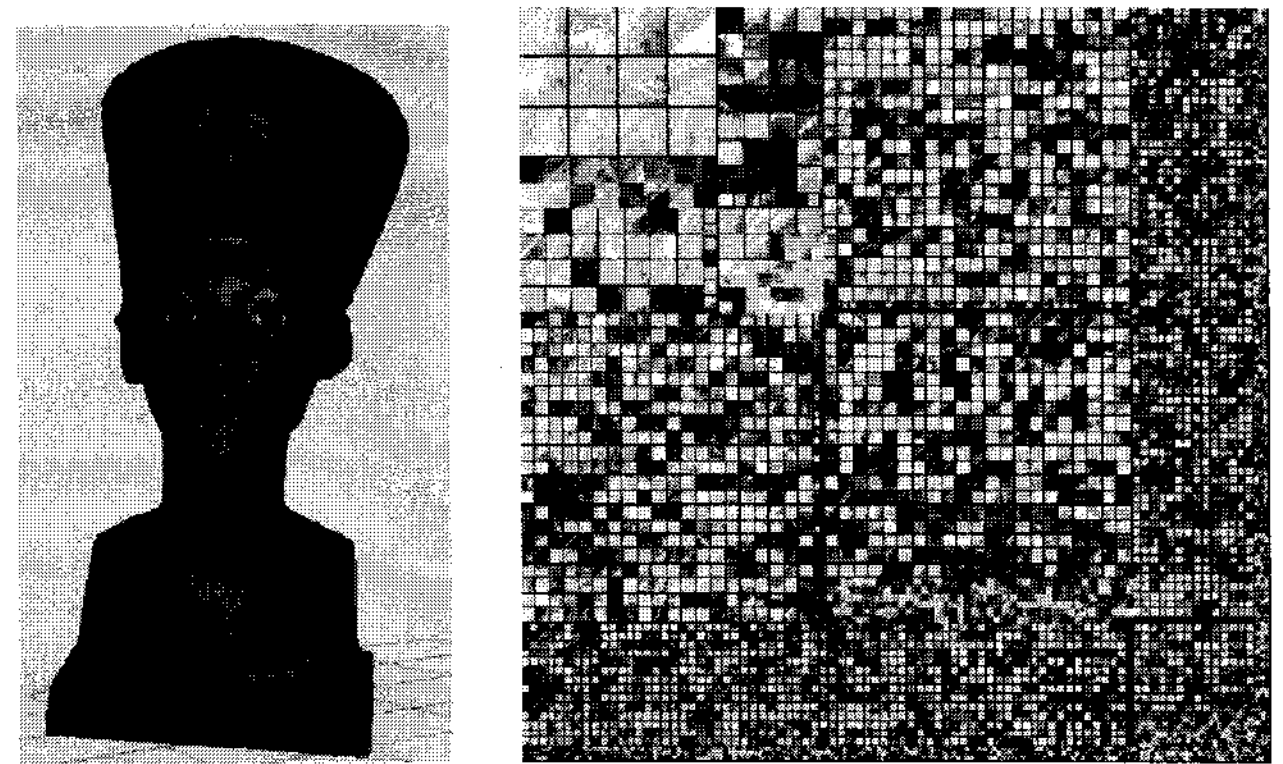


그림 12. 삼차원 메쉬 모델과 텍스처 영상  
Fig. 12. Example of 3-D mesh model and its texture image.

를 분리하게 된다. 그림 11은 Nefertiti를 표현한 VRML 파일의 텍스처 영상과 텍스처 좌표의 일부분을 보여준다. Nefertiti 모델의 텍스처 영상은 이차원 512×512 크기의 nefert5\_T5k1.bmp 파일이다. 텍스처 좌표는 텍스처 영상의 위치를 나타내므로 이차원 (x,y) 좌표로 구성된다. 그림 12는 Nefertiti 모델의 삼차원 영상과 텍스처 영상을 보여준다.

#### 3. 텍스처 좌표 분석

일반적으로 텍스처 좌표들은 0에서 1사이의 값으로 정규화된다. 텍스처 좌표들을 분석하기 위해서는 먼저 정규화된 텍스처 좌표들로부터 텍스처 영상에 대응되는 텍스처 좌표들의 정확한 위치를 구해야 한다. 텍스처 좌표들의 위치들은 아래 식 (20)과 식 (21)처럼 텍스처 영상의 폭과 높이를 정규화된 텍스처 좌표의 x성분과 y성분에 각각 곱한다.

$$x_p = w_{TextureImage} \times x_{norm} \tag{20}$$

$$y_p = h_{TextureImage} \times y_{norm} \tag{21}$$

여기서,  $x_p, y_p$ 는 텍스처 좌표들의 위치를 나타내고,

$w_{TextureImage}$ ,  $h_{TextureImage}$ 는 텍스처 영상의 폭과 높이로 정의하고,  $x_{norm}$ ,  $y_{norm}$ 은 정규화 된 텍스처 좌표를 표현한다.

텍스처 좌표 분석은 텍스처 영상과 텍스처 좌표간의 불연속성 정보를 추출한다. 불연속성 정보를 찾아내기 위해서 일정한 탐색 순서가 필요한데, 본 논문에서는 3DMC에서 제안된 꼭지점 탐색 알고리즘을 사용한다. 찾아낸 불연속성 정보는 메모리에 불연속점의 텍스처 좌표와 텍스처 좌표의 인덱스를 연결리스트 형태로 저장한다. 탐색 순서에 따라 현재 텍스처 좌표와 이전 텍스처 좌표의 차이가 일정한 문턱값(threshold)을 넘으면 불연속점으로 정의한다.

4. 텍스처 영상 재배열

텍스처 영상 재배열은 텍스처 좌표의 불연속성을 제거하기 위해서 텍스처 영상을 연속적으로 재배열하는 과정이다. 먼저 텍스처 영상을 재배열하기 위해서 본래의 텍스처 영상의 크기보다 큰 버퍼를 할당하고, 텍스처 영상에서 삼각형에 해당하는 텍스처 영상의 조각들을 추출한다.

그림 13은 세가지 형태의 텍스처 영상의 조각들을 나타낸다. 그림 13의 (a) 형태 1과 (b) 형태 2는 각각 직각 삼각형 형태로 표시되지만 (c) 형태 3은 점으로 세 개의 텍스처 좌표가 모두 같다. 불연속 정보를 포함하는 자료 구조를 점검한 후, 텍스처 영상의 조각들은 형

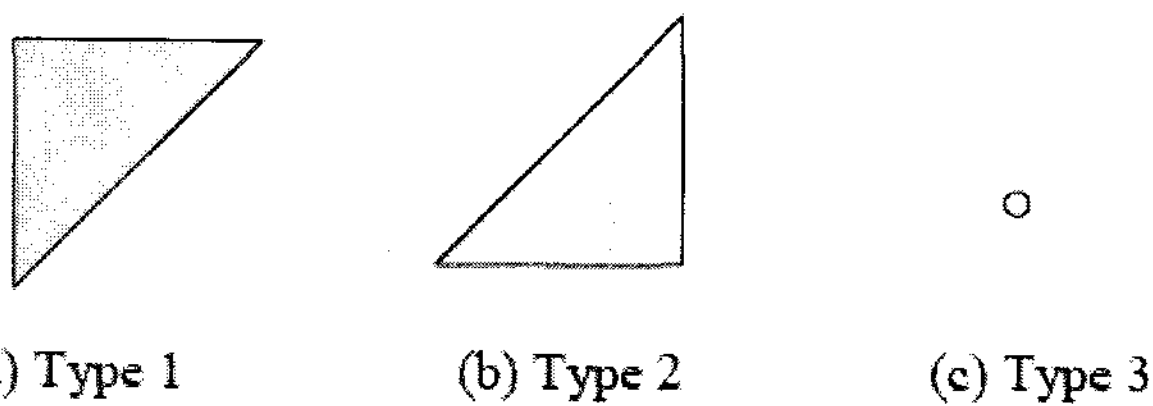


그림 13. 텍스처 영상 조각들의 형태  
Fig. 13. Types of texture image segments.

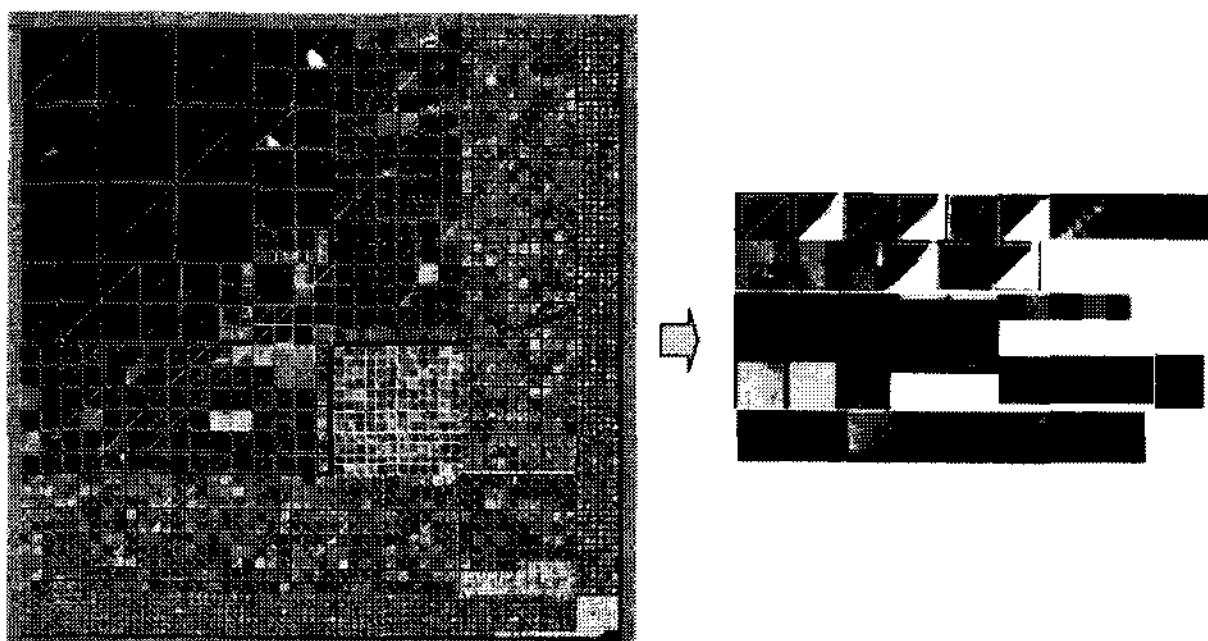


그림 14. 텍스처 영상의 재배열  
Fig. 14. Texture image rearrangement.

태에 맞게 재분류하고, 연결성 정보에 따른 탐색 순서에 따라 텍스처 좌표를 Zig-zag순으로 버퍼에 차례로 입력한다.

텍스처 영상의 조각들에 대한 텍스처 좌표는 생성된 텍스처 영상의 해상도에 따라 변한다. 예측 부호화기에서 불연속점을 효율적으로 부호화하기 위해서, 불연속점 발생시 플래그(flag)로 표시한다. 플래그는 예측 부호화 과정에서 잉여 자료(residual data)를 줄이기 위해서 사용된다. 그림 14는 재배열된 텍스처 영상의 일부를 표현한다.

텍스처 영상을 재배열한 후, 이에 해당하는 텍스처 좌표를 계산해야 한다. 식 (22)와 식 (23)처럼 바뀐 텍스처 좌표( $x'_{norm}$ ,  $y'_{norm}$ )는 재배열로 인해 생성된 텍스처 영상의 좌표( $x'_p$ ,  $y'_p$ )를 생성된 텍스처 영상의 폭( $w'_{TextureImage}$ )과 높이( $h'_{TextureImage}$ )로 각각 나눈다.

$$x'_{norm} = x'_p \div w'_{TextureImage} \tag{22}$$

$$y'_{norm} = y'_p \div h'_{TextureImage} \tag{23}$$

5. 텍스처 좌표의 예측 부호화

본 논문에서는 3DMC에서 사용한 방법을 이용하여 텍스처 좌표를 예측 부호화한다. 3DMC에서는 꼭지점 탐색 과정을 거쳐 평행사변형법(parallelogram scheme)을 적용한 예측기를 사용한다. 텍스처 좌표의 부호화 순서로 텍스처 영상을 재배열하여 잉여 자료의 분산과 엔트로피를 감소시킨다.

그림 15는 텍스처 좌표의 예측 부호화 방법에 사용된 평행사변형법을 나타낸다. 아래 식 (24)처럼 꼭지점 ( $tx_4, ty_4$ )을 예측하기 위해서 평행사변형법에 의해 얻

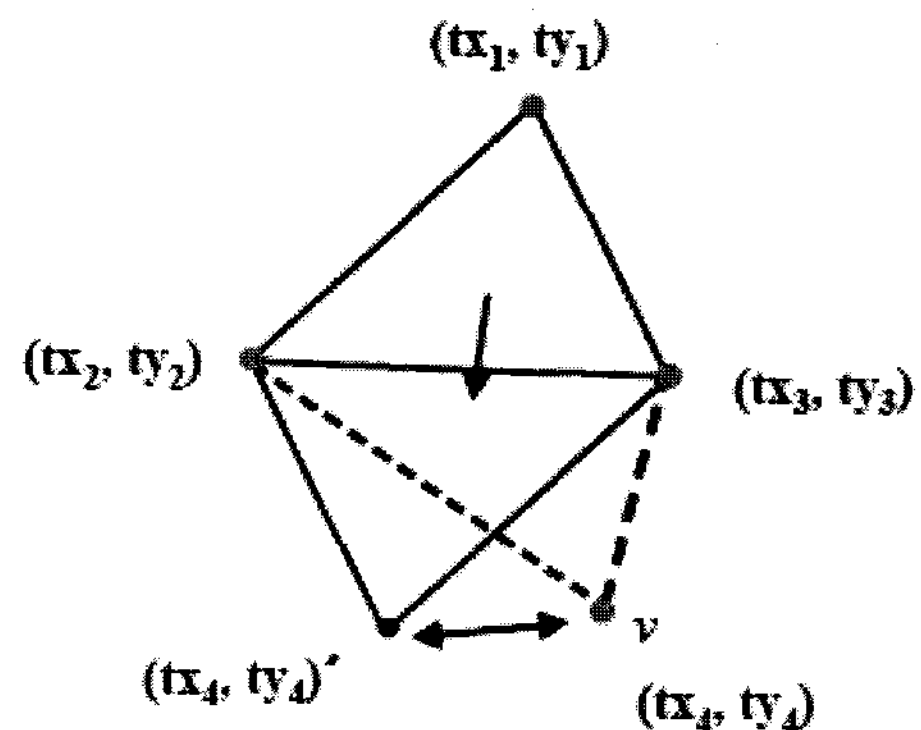


그림 15. 평행사변형법  
Fig. 15. Parallelogram scheme.

어진 꼭지점  $(tx_4, ty_4)'$  을 참조한다.

$$(tx_4, ty_4)' = (tx_1, ty_1) + (tx_2, ty_2) - (tx_3, ty_3) \tag{24}$$

다시, 잔류 오류  $(ex_4, ey_4)$  는 식 (25) 을 이용하여 계산할 수 있다. 계산된 잔류 오류는 양자화 과정과 가변 길이 부호화 과정을 통해 최종적으로 비트열로 저장된다.

$$(ex_4, ey_4) = (tx_4, ty_4) - (tx_4, ty_4)' \tag{25}$$

### VI. 실험 결과 및 분석

본 논문에서 광학성 정보를 효율적으로 부호화하는 방법을 제안했다. 제안한 색상 정보, 법선벡터 정보, 텍스처 정보에 대한 부호화 성능을 평가하기 위해서 기존에 제안된 방법과 비교하였다.

#### 1. 색상 정보의 부호화 성능

그림 16은 제안한 색상 정보의 압축 부호화 효율을 비교하기 위해서 실험에서 사용된 색상 정보를 갖는 삼차원 메쉬 모델들을 보여준다.



그림 16. 색상 정보를 갖는 삼차원 메쉬 모델  
Fig. 16. Three-dimensional mesh models with color.

표 1. 색상 정보를 갖는 실험 모델들의 특성  
Table 1. Properties of test models with color data.

	GLOBE	NEFERTITI	SPHERE	TAL
$n(V)$	36,866	10,013	41,369	30,737
$n(F)$	73,728	20,022	82,734	61,470
$n(C)$	36,866	10,013	41,369	30,737
$n'(C)$	5,562	7,943	337	8,412

표 2. 색상 정보에 대한 부호화 성능 비교  
Table 2. Coding performance comparison of color data.

	GLOBE	NEFERTITI	SPHERE	TAL
3DMC	9.80	15.63	18.98	14.09
제안한방법	9.55	14.36	17.85	13.22

표 1은 제안한 색상 정보 부호화 방법의 성능을 비교하기 위해서 사용된 실험 모델들의 특성을 보여준다. 여기서  $n(V)$  는 꼭지점의 수,  $n(F)$  는 면의 수,  $n(C)$  는 색상 정보의 수, 그리고  $n'(C)$  는 중복이 없는 색상 정보의 수로 정의한다. 색상 정보는 꼭지점당 대응 방법을 사용하였으므로  $n(C)$  는  $n(V)$  와 같고, 색상 정보의 공간적 중복성 때문에 색상 정보가 중복되므로  $n'(C)$  는  $n(V)$  보다 작다.

표 2는 MPEG-4 3DMC 방법과 제안한 방법의 부호화 성능을 비교한다. 색상 정보당 24비트로 양자화했을 경우, 각각의 결과를 비트의 크기로 나타내었다. 표 2를 통해서 제안한 기하예측 방법이 비슷한 오류를 지닐 때 더 우수한 부호화 성능을 제공함을 알 수 있다. 특히, 그림 9 (a)의 'GLOBE' 처럼 색상의 분포가 특정 색상으로 집중되지 않고 다양한 색상으로 이루어진 모델인 경우 우수한 성능을 제공했다. 따라서 기존의 방법들보다 연결성 정보와 기하학 정보를 고려한 기하예측 방법이 색상 정보 부호화할 때 보다 효율적임을 알 수 있다.

#### 2. 법선벡터 정보의 부호화 성능

그림 17은 제안한 법선벡터 정보의 압축 부호화 효율을 비교하기 위한 실험에 이용된 법선벡터 정보를 포함한 삼차원 메쉬 모델들을 보여준다. 'CROCODILE'과 'HORSE' 모델을 이용한 이유는 색상 정보의 압축 부호화 효율을 비교하기 위해 사용한 모델은 비교적 평탄한 모델이므로 불규칙하거나 평탄하지 않은 특성을 지닌 삼차원 메쉬 모델에서 법선벡터 정보에 대한 부호화 성능을 정확히 비교하기 어렵기 때문이다.

표 3은 법선벡터 정보의 압축 부호화 성능 비교에 사용된 모델들의 특성을 나타낸다. 여기서  $n(N)$  은 법선벡



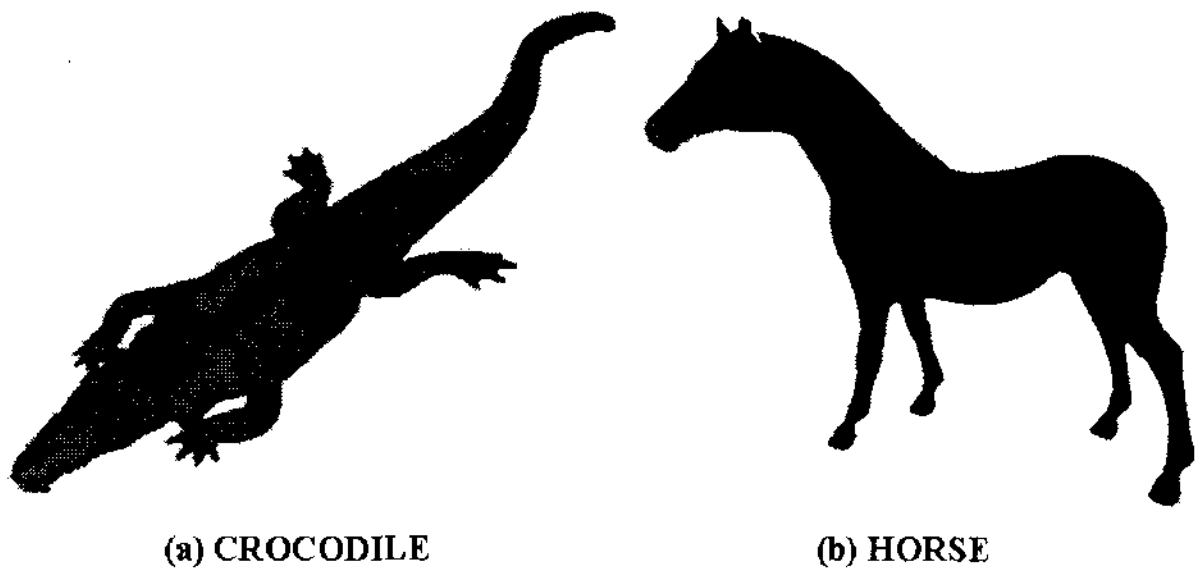


그림 17. 법선벡터 정보를 갖는 삼차원 메쉬 모델  
Fig. 17. Three-dimensional mesh models with normal vector data.

표 3. 법선벡터 정보를 갖는 실험 모델들의 특성  
Table 3. Properties of test models with normal vector.

	CROCODILE	HORSE	SPHERE	TAL
$n(V)$	17,332	19,851	41,369	30,737
$n(F)$	34,404	39,698	82,734	61,470
$n(N)$	17,332	19,851	41,369	30,737

표 4. 법선벡터 정보에 대한 부호화 효율 비교  
Table 4. Coding efficiency comparison of normal vector.

	CROCODILE	HORSE	SPHERE	TAL
3DMC	0.88	0.36	0.05	0.26
평균예측	0.82	0.30	0.03	0.24
제안한방법	0.38	0.06	0.004	0.06

터의 개수로 정의한다. 꼭지점당 대응 방식이므로 법선 벡터와 꼭지점의 개수는 같다. 또한, 꼭지점당 대응 방식의 경우 법선벡터 정보의 자료의 크기는 기하학 정보와 색상 정보의 크기와 같다.

두 법선벡터 사이의 왜곡된 정도를 평가하기 위해서 다음과 같은 각도 왜곡(angular distortion) 측정방법을 사용하였다.

$$d_{normal} = \frac{1}{n(V)} \sum_{i=1}^{n(V)} \cos^{-1}(n_i \cdot n'_i) \quad (5)$$

여기서  $n_i$ 는 주어진 법선벡터를,  $n'_i$ 는 복원된 법선벡터를 나타낸다.

제안한 적응적 최적화 평면 방법의 성능을 이전의 방법과 비교하였다. 표 4는 법선벡터당 15비트로 양자화했을 때의 결과를 보여준다. 표 4에서 제안한 적응적 최적화 평면 방법이 모든 메쉬 모델에 대해서 더 작은 각도 왜곡을 보였다. 따라서 제안한 거리 균등화 방법과 최적화 평면법이 법선벡터 정보를 효율적으로 압축하는데 기

여함을 알 수 있다.

### 3. 텍스처 정보의 부호화 성능

그림 18은 제안한 텍스처 정보의 부호화 성능을 비교하기 위한 실험에 이용된 텍스처 정보를 포함한 삼차원

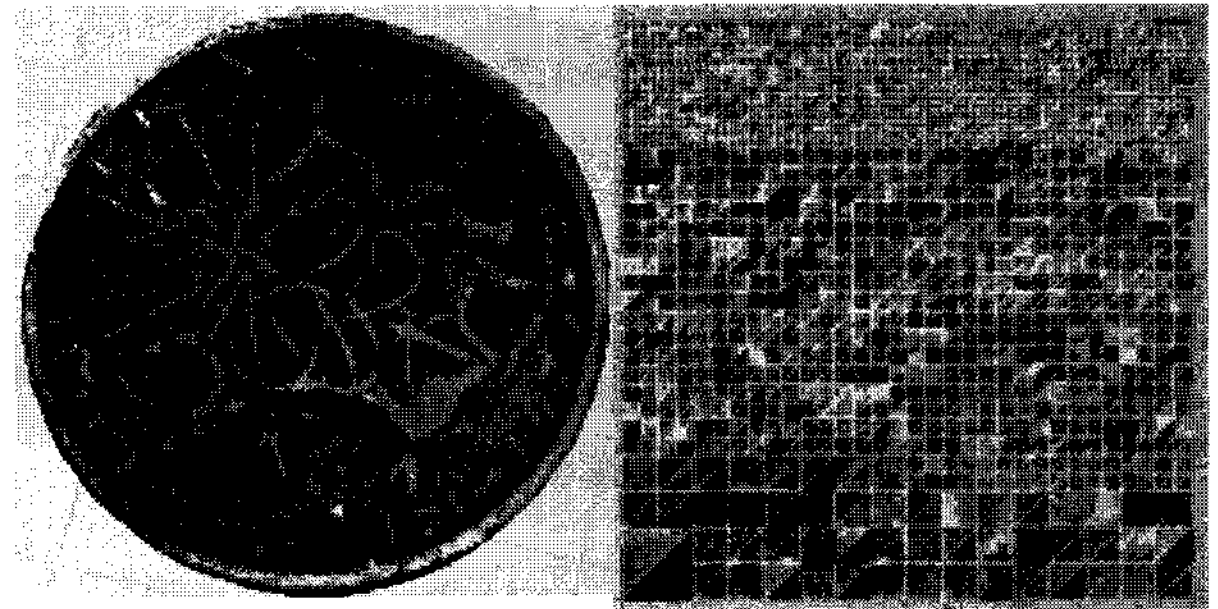


그림 18. 텍스처 영상을 가진 실험 모델들  
Fig. 18. Tested models with texture image.

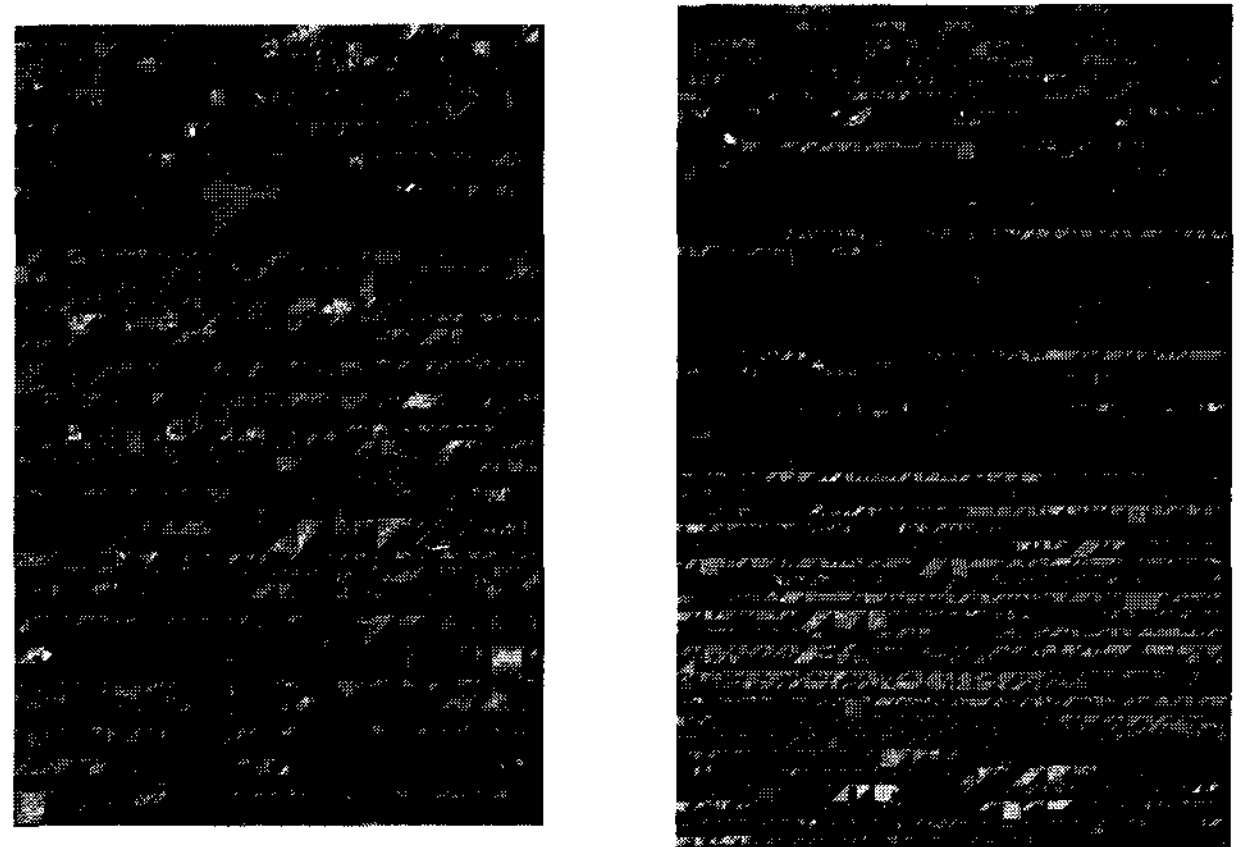


그림 19. 재배열된 텍스처 영상들  
Fig. 19. Rearranged texture images.

표 5. 텍스처 정보를 갖는 실험 모델들의 특성  
Table 5. Properties of test models with texture data.

	NEFERTITI	COIN
$n(V)$	2,501	1,468
$n(F)$	4,998	2,832
$n(TC)$	14,993	8,796
$r(TI)$	512×512	512×512

표 6. 텍스처 좌표에 대한 부호화 효율 비교

Table 6. Coding efficiency comparison of texture coordinates.

		NEFERTITI	COIN
3DMC	잉여 자료의 분산	27.64	25.44
	예측 부호화	287.5 KB	168.4 KB
제안한 방법	잉여 자료의 분산	14.27	13.22
	예측 부호화	184.3 KB	106.3 KB

표 7. 텍스처 영상의 크기 비교

Table 7. Data size comparison of texture images.

		NEFERTITI	COIN
3DMC	텍스처 영상 해상도	512×512	512×512
	JPEG 크기	96 KB	79 KB
제안한 방법	텍스처 영상 해상도	512×680	512×612
	JPEG 크기	112 KB	91 KB

메쉬 모델들을 보여준다.

표 5는 텍스처 정보의 부호화 성능 비교에 사용된 모델들의 특성을 나타낸다. 여기서  $n(TC)$ ,  $r(TI)$ 는 텍스처 좌표의 개수와 텍스처 영상의 해상도로 정의한다.

표 6과 표 7은 MPEG-4 3DMC 방법과 제안한 방법의 성능을 비교하여 보여준다. 텍스처 영상을 재배열한 후, 부호화 순서에 따라 텍스처 좌표의 잉여 자료를 생성하면 이들의 분산이 감소한다. 따라서 텍스처 좌표의 불연속성 문제를 해결할 수 있고, 예측 부호화할 때 텍스처 좌표의 부호화 효율이 향상됨을 표 6에서 볼 수 있다.

그림 19는 실험 모델에 대한 재배열된 텍스처 영상을 나타낸다. 좌측은 COIN의 재배열된 텍스처 영상, 우측은 NEFERTITI의 재배열된 텍스처 영상을 보여준다.

텍스처 좌표의 연속성을 위해 Zig-zag순으로 텍스처 영상의 조각들을 재배열하므로, 구멍(Hole)이 생기고 그림 19와 표 7처럼 더 큰 해상도의 텍스처 영상을 갖게 된다. 이를 해결하기 위해 구멍이 발생하지 않도록 텍스처 영상의 조각을 크기 변환(Resizing)하여 재배열을 하고 렌더링할때, 텍스처 영상에 오류가 발생하여 삼차원 메쉬 모델의 품질이 심각히 저하됨을 확인하였다. 하지만 구멍이 존재함에도 불구하고 텍스처 좌표에 대한 부호화 효율이 대폭 증가하여, 표 6과 표 7에서 나타나듯이 전체적으로 부호화 효율이 30% 이상 향상됨을 확인했다.

## VII. 결 론

본 논문에서는 앞서 제안되었던 방식보다 향상된 압

축 부호화 효율을 제공하기 위해서 기하학 정보와 연결성 정보를 참조하여 삼차원 메쉬 모델의 색상 정보, 법선벡터 정보, 텍스처 정보를 예측 부호화하는 새로운 방법을 제안하였다. 삼차원 메쉬 모델을 구성하는 정보들의 상호 연관성을 고려하여 우수한 부호화 성능을 제공하는 예측 부호화 기법을 개발할 수 있었다. 삼차원 메쉬 모델의 색상 정보가 지닌 공간적 중복성을 제거하기 위해서, 이웃한 꼭지점들이 현재 꼭지점의 색상 정보에 미치는 영향력을 거리와 각도로 표현하여 가중치 합으로 나타낸 기하예측 방법을 제안하였다. 또한, 불규칙하거나 평탄하지 않은 삼차원 메쉬 모델에서도 정확한 법선벡터를 예측하는 거리 균등화 기법을 이용한 최적화 평면 방법을 개발하였다. 마지막으로, 텍스처 좌표와 텍스처 영상간의 불연속성을 제거하여 텍스처 좌표를 예측 부호화하기 위해서 텍스처 영상의 재배열 방법을 제안하였다. 실험을 통해 제안한 방법들이 다양한 삼차원 메쉬 모델에서 우수한 부호화 성능을 제공함을 확인할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- [1] Description of core experiments on 3D model coding, ISO/ IEC JTC1/ SC29/ WG11 MPEG/ M4312, Dec. 1998.
- [2] M. Deering, "Geometry Compression," Proceedings of SIGGRAPH, pp. 13-20, Aug. 1995.
- [3] G. Taubin and J. Rossignac, "Geometry Compression through Topological Surgery," ACM Transactions on Graphics, pp. 84-115, Apr. 1998.
- [4] V. Bajaj, V. Pascucci and G. Zhuang. "Single Resolution Compression of Arbitrary Triangular Meshes with Properties," Proceedings of the Data Compression Conference, pp. 167-186, 1999.
- [5] J.H. Ahn, C.S. Kim, and Y.S. Ho, "An Efficient Coding Algorithm for Color and Normal Data of Three-dimensional Mesh Models," Proceedings of International Conference on Image Processing, pp. 789-792, Sept. 2003.
- [6] J. Li, C.-C. Kuo, and H. Chen, "Embedded Coding of Mesh Geometry," ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 MPEG/M3325, 1998.
- [7] M. Isenburg and J. Sneoink, "Compression Texture Coordinates with Selective Linear Prediction", Proceeding of Graphics Interface, pp. 126-131, 2003
- [8] A.K. Jain, "Fundamentals of Digital Image Processing," Prentice-Hall, 1989.

- [9] D. Saloman, "Data Compression : The Complete Reference," Springer, 2004.
- [10] K. Sayood, "introduction to Data Compression," Morgan Kaufmann, 2000.
- [11] Y.S. Yoon, S.Y. Kim, and Y.S. Ho, "Color Data Coding for Three-dimensional Mesh Models Considering Connectivity and Geometry Information," Proceedings of International Conference on Multimedia Expo, pp. 7-12, July. 2006.
- [12] Y.S. Yoon, S.Y. Kim, and Y.S. Ho, "Photometry Data Coding for Three-dimensional Mesh Models Using Connectivity and Geometry Information," Lecture notes in Computer Science, 3768, pp. 794-805, 2005.
- [13] H. Gouraud, "Continuous shading of curved surfaces," IEEE Transactions on Computers, vol. C-20, pp. 623-629, June 1971.
- [14] B. T. Phong, "Illumination for Computer Generated Pictures," Computer Graphics (SIGGRAPH '90 proceedings), pp. 311-317, June 1975.
- [15] G. Strang, "Linear Algebra and Its Applications," Tomson Learning, 1986.
- [16] S.Y. Kim, Y.S. Yoon, and Y.S. Ho, "Texture Coordinate Compression for 3-D Mesh Models Using Texture Image Rearrangement," Lecture notes in Computer Science, 3767, pp. 687-697, 2005.

---

 저 자 소 개
 

---



윤 영 석(정회원)

2003년 강원대학교 정보통신 공학과 학사 졸업.

2005년 광주과학기술원 정보통신 공학과 석사 졸업.

2005년~현재 한국전자통신 연구원 연구원.

&lt;주관심분야 : 3차원 메쉬 모델링 및 압축, 디지털 신호처리, 멀티미디어 시스템, 비디오 인식·검색·모니터링 시스템, DRM&gt;



호 요 성(평생회원)

1981년 서울대학교 전자공학과 학사 졸업.

1983년 서울대학교 전자공학과 석사 졸업.

1983년~1995년 한국전자통신 연구원 선임연구원.

1989년 University of California, Santa Barbara Department of Electrical and Computer Engineering 박사 졸업.

1990년~1993년 미국 Philips 연구소 Senior Research Member.

1995년~현재 광주과학기술원 정보통신공학과 교수.

&lt;주관심분야 : 디지털 신호처리, 영상신호처리 및 압축, 멀티미디어 시스템, 디지털 TV와 고선명 TV, MPEG 표준, 3차원 TV, 실감방송&gt;