

통합예측을 이용한 삼차원 메쉬의 기하정보 부호화 알고리즘

(Geometry Coding of Three-dimensional Mesh Models Using a Joint Prediction)

安 廷 桓 * , 扈 堯 盛 *

(Jeong-Hwan Ahn and Yo-Sung Ho)

요 약

MPEG-4 삼차원 메쉬 모델 압축(3DMC) 표준에서 사용되는 평행사변형예측 방법은 예측하고자 하는 꼭지점이 인접한 꼭지점들과 같은 평면상에 있다고 가정하여 하나의 삼각형 내에 있는 인접한 세 개의 꼭지점 좌표 값만을 이용하므로 예측 효율이 좋지 않다. 본 논문에서는 삼각형 주변의 꼭지점 좌표값과 인접하는 삼각형 사이의 사잇각을 고려한 통합예측을 이용하여 삼차원 메쉬 모델의 기하정보를 부호화하는 방법을 제안한다. 우선 제안한 꼭지점 계층탐색 방법으로 위상학적으로 거리가 가까운 점들을 탐색하여 정렬된 값들의 기하학적 상관도를 높이고, 정렬된 삼차원 메쉬의 꼭지점 순서에 따라 주변의 꼭지점 값들을 이용하여 현재 꼭지점 값을 예측한다. 본 논문에서 제안한 통합예측 방법은 다양한 VRML 포맷의 테스트 모델에 대해서 기존의 MPEG-4 3DMC의 평행사변형예측 방법보다 우수한 성능을 보인다.

Abstract

The conventional parallelogram prediction uses only three previously traversed vertices in a single adjacent triangle; thus, the predicted vertex can be located at a biased position. Moreover, vertices on curved surfaces may not be predicted effectively since each parallelogram is assumed to lie on the same plane. In order to improve the prediction performance, we use all the neighboring vertices that precede the current vertex. After we order vertices using a vertex layer traversal algorithm, we estimate the current vertex position based on observations of the previously coded vertex positions in the layer traversal order. The difference between the original and the predicted vertex coordinate values is encoded by a uniform quantizer and an entropy coder. The proposed scheme demonstrates improved coding efficiency for various VRML test data.

Keyword : 삼차원 메쉬, 기하정보 압축 부호화, 평행사변형예측 방법

I. 서 론

* 正會員, 三星綜合技術院 멀티미디어 랩
(Samsung Advanced Institute of Technology,
Multimedia Lab)

** 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)

接受日字:2003年2月10日, 수정완료일:2003年4月24日

최근 Virtual Reality Modeling Language(VRML) 기반의 삼차원 모델은 인터넷, 컴퓨터 가상현실, 애니메이션, 그래픽 디자인 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 하지만 삼차원 모델은 저장과 전송에 있어 많은 용량을 차지하기 때문에 인터넷과 같은 제한된 대역에서의 다양한 조작을 위해서는 삼차원 모델의 효율적인 부호화 방식이 요구된다^[1].

일반적으로 삼차원 모델은 삼각형 메쉬(mesh) 구조로 표현되는데, 이것은 연결(connectivity) 정보, 기하(geometry) 정보, 색상(color)과 법선 벡터 그리고 텍스처(texture) 좌표축의 특성(attribute) 정보 등으로 이루어져 있다.

기하정보는 삼차원 공간상에서 메쉬 모델의 전체적인 외형을 정의하며, 32 비트의 부동 소수점(floating point) 형태의 삼차원 벡터 (X, Y, Z)로 이루어져 있다. 연결성 정보는 이런 기하정보들의 연결 관계를 정수형(integer)으로 나타낸다. 특성정보는 삼차원 메쉬 모델에 색을 칠하거나 렌더링(rendering) 할 때 필요한 색상정보와 법선 벡터를 가지고 있으며, 부동 숫자로 표현한다. 따라서, 연결성정보를 압축하는 것보다 기하정보와 특성정보를 압축하는 것이 상대적으로 유리하기 때문에, 최근엔 기하정보와 특성정보 압축에 대한 연구가 많이 진행되고 있다.

일반적으로 삼각형 메쉬에서 기하정보는 일차원 디지털 음성의 표본값 혹은 이차원 영상의 화소값과 기능적으로 유사하다. 그러나 삼차원 모델은 불규칙적인 메쉬 구조를 가지므로 기존의 일차원 음성이나 이차원 영상에 적용했던 DCT와 같은 변환 부호화 방법 등을 적용하기 어렵다. 따라서 주변의 꼭지점이나 면이 가지는 기하정보와 특성정보 값을 이용하여 현재 메쉬에 있는 기하정보와 특성정보 값을 예측하여 부호화하는 방법을 많이 사용한다.

<그림 1>은 삼차원 모델 정보의 압축 시스템이다. 먼저 연결성정보 압축기에서는 주어진 삼차원 메쉬에서 꼭지점들 사이의 관계를 탐색한 후 상호 연결정보를 압축한다. 기하정보와 특성정보 부호화기는 연결성정보 부호화기에서 탐색한 꼭지점의 순서를 따라 기하정보와 특성정보를 예측 부호화한다.

Deering은 삼차원 메쉬 모델의 렌더링 속도를 향상하고 압축하는 방법을 처음으로 제안하였다^[2]. 이 방법

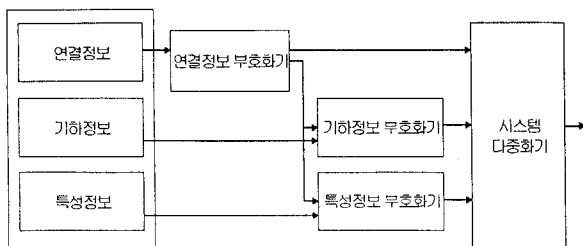


그림 1. 삼차원 모델 정보의 압축 시스템

Fig. 1. System configuration for 3-D model compression.

에서는 주어진 삼각형 메쉬를 삼각형 스트립(strip) 구조로 표현하고, 스트립을 따라 꼭지점을 재정렬한다. 그리고 최외곽 경계상자 (bounding box)를 정의한 후, 양자화를 통해 부동 소수점 값을 정수로 표현한다. 그리고 예측 과정을 거쳐 예측 오류는 Huffman 부호화한다. 그러나 Deering이 제안한 방법은 효과적인 전송과 압축보다는 렌더링에 초점을 맞추어 압축 효율이 별로 좋지 않다.

Taubin과 Rossignac은 topological surgery 방법을 제안하였다^[3]. 주어진 메쉬를 vertex spanning tree로 표현하고 이 순서에 따라 꼭지점들을 정렬한 후, Deering과 마찬가지로 최외곽 경계 상자를 취해 양자화하고 선형 예측(linear prediction)을 거쳐 Huffman 부호화한다. 그러나 이 방법에서도 연결성정보의 효과적인 압축방법에 중점을 두었고, 상대적으로 기하정보와 특성정보의 부호화 효율은 높지 않다.

Choi는 꼭지점 좌표 부호화를 위해 multi-stage VQ (vector quantization)를 제안하였고, 이후엔 이 단계 SQ(scalar quantization) 방법을 제안하여 좋은 성능을 보였다^[4]. Ahn은 꼭지점 좌표값을 (γ, θ, ϕ) 의 구 좌표계로 변환하고 r 의 크기에 따라 (θ, ϕ) 를 적응적으로 부호화하는 방법을 제안하였다^[5]. Li는 예측 오류를 비트 평면으로 표현하고 이것을 QM 부호화기를 사용하여 점진적으로 부호화하는 방법을 제안하였다^[6].

Touma는 꼭지점의 차수에 기반을 두고 탐색하여 부호화하는 방법을 제안하였다^[7]. 여기서 탐색한 순서를 따라 기하정보와 특성정보들은 평행사변형예측(parallelogram prediction)에 기반을 두고 부호화하였다. 나중에 Bossen은 평행사변형예측 방법과 QM 부호화 방법을 topological surgery방법에 적용하였고, 이것이 MPEG-4 3DMC 표준으로 채택되었다^[8]. 그러나 MPEG-4 3DMC 표준에서 사용되는 평행사변형예측 방법은 예측하고자 하는 꼭지점이 인접한 꼭지점들과 같은 평면상에 있다고 가정하여 하나의 삼각형 내에 있는 인접한 세 개의 꼭지점 좌표 값만을 이용하므로 예측 효율이 좋지 않다.

본 논문에서는 삼각형 주변의 꼭지점 좌표값과 인접한 삼각형 사이의 사잇각을 고려한 통합예측을 이용하여 삼차원 메쉬 모델의 기하정보를 부호화하는 방법을 제안한다. 우선 제안한 꼭지점 계층탐색 방법으로 위상학적으로 거리가 가까운 점들을 탐색하여 정렬된 값들의 기하학적 상관도를 높이고, 정렬된 삼차원 메쉬의

꼭지점 순서에 따라 주변의 꼭지점 값들을 이용하여 현재 꼭지점 값을 예측한다. 본 논문에서 제안한 통합 예측 방법은 다양한 VRML 형식의 테스트 모델에 대해서 기존의 MPEG-4 3DMC의 평행사변형예측 방법보다 우수한 성능을 보인다.

II. 삼차원 메쉬 모델의 부호화 구조

본 절에서는 삼차원 메쉬 모델을 부호화하는데 사용되는 선행 양자화 예측 부호화 방법과 DPCM 부호화 방법을 비교 설명하고, 불규칙적인 메쉬 구조에서 꼭지점들을 정렬하는 방법을 살펴본다.

1. 부호화기 구조

삼차원 메쉬 부호화기는 크게 선행 양자화 예측 부호화 방법(prequantized predictive coding, PPC)과 DPCM의 두 가지로 나눌 수 있다^[10]. Deering은 PPC 방법을 처음으로 제안하였는데, MPEG-4 표준을 포함하여 대부분의 방법들이 PPC 방법을 사용하고 있다.

<그림 2>에서 보듯이, PPC 방법에서는 입력 데이터가 먼저 양자화되고, 양자화 인덱스는 예측 부호화된다. 그러나 양자화 과정이 다른 과정보다 선행하므로 실시간으로 비트를 제어가 어렵다는 단점이 있다. 또한, 부호화 전에 입력 값의 통계학적인 특성을 알 수 없으므로 균등 양자화 외에 다른 다양한 적응 양자화를 적용하기 어렵다.

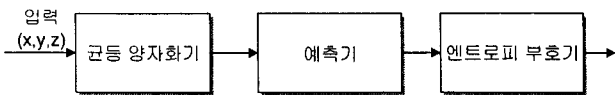


그림 2. 선행 양자화 예측 부호화
Fig. 2. Prequantized predictive coding(PPC).

<그림 3>은 DPCM 구조로, 이전에 복원된 값을 가지고 현재 값을 예측한다. 그리고 예측 오류를 양자화하고 양자화 인덱스는 엔트로피 부호화된다. 현재 값은 양자화 오류와 이전 값이 더해져 복원하고 이 값이 다음 입력 값의 예측 값으로 사용된다. DPCM에서는 예측 오류에 대한 분포를 알고 있으므로, 적응적인 양자화 방법이 적용될 수 있어 비트를 제어가 용이하고 입력 모델의 통계학적인 특성에 맞게 양자화기를 설계할 수 있다. 따라서, DPCM에서는 예측기가 데이터의 잉여정보를 없애고 부호화 효율을 높이는 역할을 하므로

아주 중요하다^[4, 5, 10].

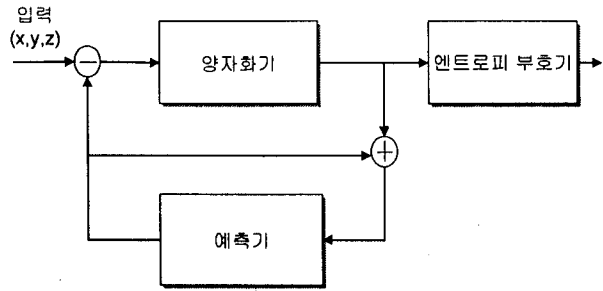


그림 3. DPCM 부호화
Fig. 3. DPCM coding.

따라서 본 논문에서는 DPCM을 삼차원 메쉬 압축으로 채택했으며 효과적인 예측기를 제안하여 부호화 효율을 높였다.

2. 꼭지점 계층탐색

메쉬의 꼭지점을 정렬하는 이유는 예측 부호화 효율을 높이기 위해서이다. 제안한 방법에서는 우선 삼차원 모델의 무게 중심에서 가장 먼 꼭지점을 찾고 이것을 기준 꼭지점으로 설정한다. 기준 꼭지점을 기준으로 <그림 4>에서와 같이 위상학적으로 거리가 1인 꼭지점을 반 시계 방향으로 탐색한다. 그리고 이것을 계층 1로 정한다. 그 다음 위상학적인 거리가 2인 꼭지점을 탐색하고, 계층 2로 정한다. 탐색된 꼭지점들은 큐(queue)에 저장되고, 모든 꼭지점을 탐색할 때까지 이러한 방법을 계속한다. 만일 주어진 메쉬가 하나의 구성성분으로 이루어져 있다면 탐색과정은 한번에 끝나며, 여러 개의 구성성분으로 구성되어 있다면, 그 수에 맞춰 반복한다. <그림 4>에서 꼭지점에 있는 숫자는 꼭지점들이 탐색된 순서를 의미하며, 이 순서대로 꼭지점들을 정렬한다.

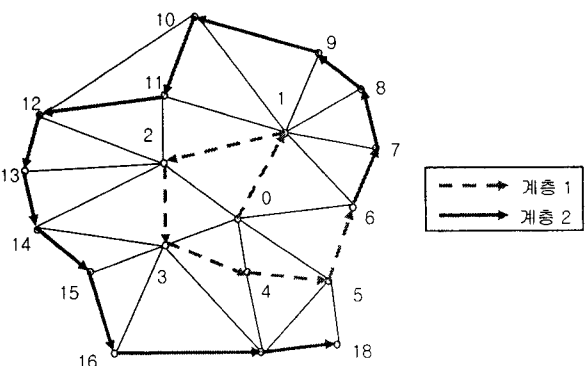


그림 4. 꼭지점 계층 탐색
Fig. 4. Vertex Layer Traversal.

기존의 탐색 방법들은 연결정보에 맞춰 탐색하지만, 제한한 방법은 꼭지점에 기반을 두고 탐색하는 점이 다르다. 여기서 정의된 순서대로 꼭지점이 정렬되고 이미 부호화된 주위에 있는 값들을 선행 꼭지점이라고 정의하고 선행 꼭지점들을 가지고 예측 부호화한다.

III. 기하정보 압축

본 절에서는 기하정보를 압축하기 위해 주어진 꼭지점 주위의 꼭지점 값들과 사잇각을 가지고 예측하는 방법을 제안한다. <그림 5>는 제안한 부호화기로 크게 전처리 과정, 예측 과정, 양자화, 엔트로피 부호화기로 구성되어 있다.

1. 전처리 과정

전처리 과정에서는 크게 여러 개의 구성성분(multiple component) 부호화와 정규화(normalization) 과정이 있다. 때로 하나의 삼차원 메쉬 모델은 여러 개의 독립적인 구조가 붙어서 모델을 이루는 경우가 있다. 예를 들어, 돌고래 세마리가 헤엄치고 있는 모델을 생각해 보자. 이때 각 돌고래는 하나의 독립된 성분이며 이것은 전체적으로 세계의 구성성분을 가진다. 여기서 각 부분의 첫 번째 꼭지점을 루트 꼭지점이라 정의하고, 각 독립 부분의 첫 번째 꼭지점은 이전 부분의 마지막 꼭지점의 값으로 예측한다. 그리고 각 구성성분은 서로 독립적으로 부호화한다.

외형적으로 봐서 하나의 메쉬 모델이라도 독립적인 각 부분이 붙어서 하나의 메쉬 모델을 이루는 경우, 다른 부분이 붙는 부분에 위치한 꼭지점은 서로 각 부분에 공유된다. 예를 들어, 삼차원 저작도구로 모델을 만드는 경우, 다른 곳에서 만든 부분을 가져다 붙이는 경

우가 있다. 이런 경우 서로 다른 부분이 붙는 부분의 꼭지점은 서로 다른 선행 꼭지점으로부터 예측하기 때문에, 이 값이 양자화되는 경우 복원한 모델엔 균열(crack)이 발생한다. 이런 문제를 해결하기 위해, 다음과 같은 방법을 사용한다.

먼저 하나의 꼭지점이 서로 다른 선행 꼭지점을 갖는 경우, 이것을 전처리 과정에서는 공유(shared) 꼭지점이라 정의하고, 이 꼭지점은 부호화 과정에서 한번만 부호화한다. 즉, 다시 이 공유 꼭지점을 부호화해야 하는 경우 그냥 넘어간다. 그리고 이러한 정보는 헤더 정보로 복원단에 전송된다. 따라서, 공유 꼭지점이 많은 경우엔 전체적인 비트율에서 많은 이득이 생길 수 있다.

정규화 과정에서는 입력되는 (x,y,z) 꼭지점 값을 정규화하여 [0,1]×[0,1]×[0,1]의 범위로 한정시킨다.

2. 통합예측

기존의 평행사변형예측 방법은 삼각형 스트립을 따라 예측하도록 정의된 방법이다. <그림 6>에서 화살표 방향으로 탐색하고 꼭지점 v_l, v_r, v_m 은 이미 복호된 꼭지점일 때, 공통에지 (v_l, v_r)의 반대편 꼭지점 v 는 식 (1)과 같이 예측한다.

$$\hat{v} = v_l + v_r - v_m \tag{1}$$

따라서 예측된 값 \hat{v} 는 선행 꼭지점 v_l, v_r, v_m 과 평행사변형을 이루고 같은 평면상에 위치하는 점이 된다. 그러나 평행사변형예측 방법은 하나의 인접 삼각형에 있는 이미 복호된 세 점만을 이용하므로 예측된 점이 복호된 점들 쪽으로 치우쳐 질 수 있다. 또한, 모든 꼭

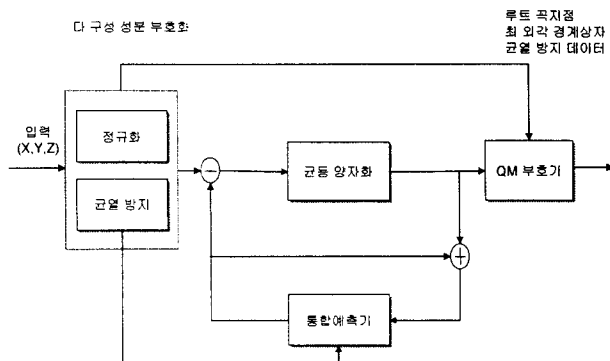


그림 5. 기하정보 부호화기
Fig. 5. Block diagram of the geometry encoder.

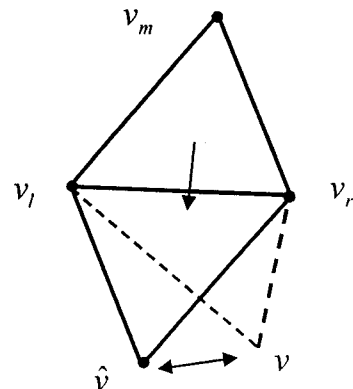


그림 6. 평행사변형예측
Fig. 6. Parallelogram prediction.

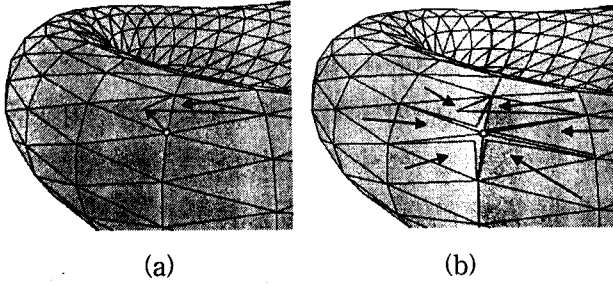


그림 7. 평균 평행사변형예측: (a); (b) 다 방향 예측
 Fig. 7. Average parallelogram prediction: (a) one direction; (b) multi direction.

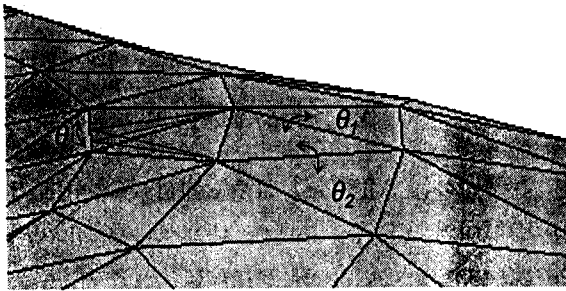


그림 8. 곡률이 있는 메쉬
 Fig. 8. Curvature mesh.

지점들이 같은 평면상에 위치한다고 가정하므로 곡률이 있는 면에 위치한 점들에 대해서는 정확한 예측이 어렵다.

따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 꼭지점 계층탐색을 따라 기하학적으로 가까운 점들을 모두 이용하고 공통 에지 사이의 각도를 예측하는 방법을 제안한다. 일반적으로 하나의 꼭지점에 대해 인접하는 꼭지점의 수에 따라 식 (2)와 같이 예측한다

$$\hat{v} = \begin{cases} v_l & : v_l \text{ 만 부호화된 경우} \\ v_r & : v_r \text{ 만 부호화된 경우} \\ 0.5v_l + 0.5v_r & : v_l \text{ 와 } v_r \text{ 가 부호화된 경우} \\ v_l + v_r - v_m & : v_l, v_r, v_m \text{ 가 부호화된 경우} \end{cases} \quad (2)$$

기존의 평행사변형예측 방법은 하나의 삼각형 내에 있는 꼭지점만을 이용하여 예측한다. 그러나 일반적으로 꼭지점 계층탐색을 이용하여 탐색하면 하나의 꼭지점에 대해 여러 개의 선행된 삼각형들을 얻을 수 있다. 이런 경우 식 (2)에서 얻어진 값들을 식 (3)처럼 평균하여 예측값으로 사용한다.

$$\hat{v} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \hat{v}_k \quad (3)$$

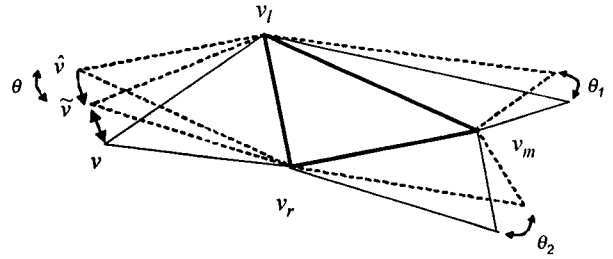


그림 9. 사잇각 예측
 Fig. 9. Estimation of dihedral angle.

<그림 7>은 EIGHT 모델에서 예측의 예를 보여준다. <그림 7(a)>는 기존의 한 방향 예측방법이고, <그림 7(b)>는 제안한 여러 방향 예측방법이다. <그림 7>에서 보듯이, 여러 방향 예측이 곡률이 있는 곳에서 기존의 한 방향 예측보다 우수함을 알 수 있다.

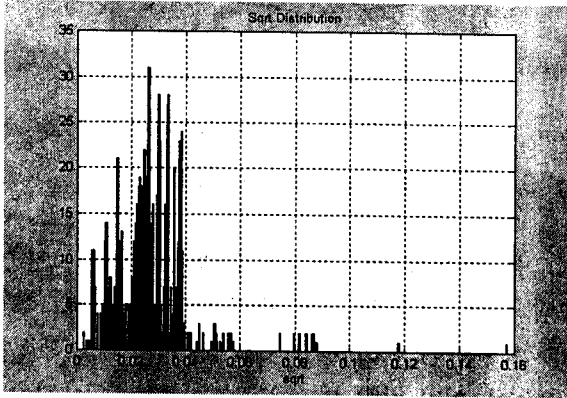
평행사변형예측은 모든 꼭지점들이 같은 평면상에 존재한다고 가정한다. 하지만, <그림 8>에서 보는 것처럼, 실제 메쉬에서 대부분의 삼각형들은 공통 에지를 따라 접혀 있으므로, 이 각도를 <그림 8>과 같이 주위 삼각형들의 사잇각을 이용하여 예측하면 좀더 정확한 값을 얻을 수 있다.

<그림 9>는 v값을 좀더 정확하기 예측하기 위해 사잇각을 구하는 방법을 보여준다. <그림 9>에서 짚은 선으로 이루어진 $\Delta(v_r, v_l, v_m)$ 은 주어진 삼각형이고 세 개의 에지 $e(v_l, v_r), e(v_l, v_m), e(v_r, v_m)$ 에 대해 실선으로 표시된 세 개의 삼각형이 인접해 있다. 그리고 에지 $e(v_l, v_m)$ 을 공유하고 있는 두 삼각형과의 사잇각을 θ_1 로 정의하고, $e(v_r, v_m)$ 을 공유하고 있는 두 삼각형과의 사잇각을 θ_2 로 정의한다. 이때 점선으로 표시된 삼각형은 사잇각을 구하기 위해 $\Delta(v_r, v_l, v_m)$ 을 가상으로 표시한 것이다.

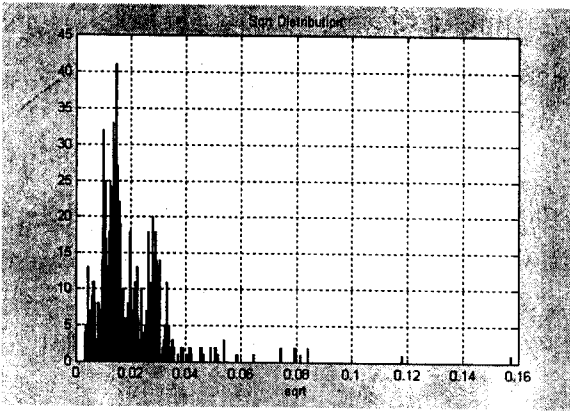
<그림 9>에서 평행사변형예측을 통해 얻은 값이 \hat{v} 라면, 이 값은 주위의 인접 θ_1 를 θ_2 가지고 예측한 θ 만큼 공통 에지 (v_l, v_r) 에 대해서 회전한 \hat{v} 를 얻는다. <그림 9>에서 보듯이, 이렇게 예측한 \hat{v} 이 평행사변형 예측으로 얻은 \hat{v} 보다 더 정확함을 알 수 있다. <그림 9>에서 θ 는 식 (4)와 같이 예측한다.

$$\theta = \begin{cases} \theta_1 & : \theta_1 \text{ 만 아는 경우} \\ \theta_2 & : \theta_2 \text{ 만 아는 경우} \\ (\theta_1 + \theta_2)/2 & : \theta_1 \text{ 와 } \theta_2 \text{ 를 아는 경우} \end{cases} \quad (4)$$

만일 하나 이상의 선행하는 삼각형들이 존재한다면 식 (5)와 같이 회전 변환된 \tilde{v} 들을 평균하여 v' 를 구한다. 선행하는 삼각형들이 없다면 식 (3)에서 얻은 \hat{v} 을



(a)



(b)

그림 10. EIGHT 모델에 대한 실험 결과: (a) 평행사변형예측; (b) 제안한 방법

Fig. 10. Comparison of prediction errors for the EIGHT model: (a) conventional parallelogram prediction; (b) proposed scheme.

예측 값으로 사용한다. 원래 이 개념은 Touma 논문^[7]에 제시되어 있으나 실제로 구현하지 않았으며, 본 논문에서 제안한 방법에서는 하나 이상의 삼각형을 이용하므로 좀더 정확한 값을 예측할 수 있다.

$$v' = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \tilde{v}_k \quad (5)$$

여기서 N 은 주어진 꼭지점 v 에 대해 선행하는 인접 삼각형들의 수이다.

<그림 10>은 기존의 평행사변형예측 방법과 제안한 통합예측 방법과의 성능을 비교한 것이다. 본 실험에서는 EIGHT 모델을 사용하였고, 예측오류 $\Delta v = v - v'$ 는

$\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$ 로 정의한다. <그림 10>에서 알 수 있듯이, 제안한 방법이 좀더 많은 주변 삼각형과의 상관관계를 이용하였기 때문에 예측오류를 "0" 근처로 집중시켜 성능이 우수함을 알 수 있다.

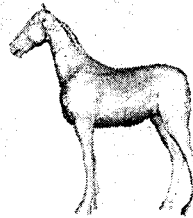
3. 양자화 및 엔트로피 부호화기

통합예측 방법을 거쳐 나온 예측오류는 M레벨 Midthread 균등 양자화기로 양자화한다. 이미 전처리 과정에서 입력된 기하정보를 정규화시켰기 때문에 예측 오류는 $[-1,1] \times [-1,1] \times [-1,1]$ 의 값의 범위를 갖는다. 여기서 양자화 스텝 크기 Δ 는 $2/(M-1)$ 로 계산된다. 양자화 인덱스는 QM 부호화기로 엔트로피 부호화된다.

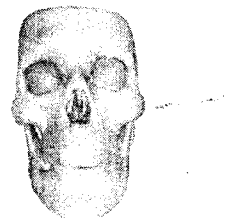
IV. 실험 결과

본 논문에서는 MPEG-4 3DMC에서 사용하고 있는 다양한 형태의 VRML 모델에 대해서 제안한 방법과 MPEG-4 3DMC 방법을 비교하였다.

<그림 11>은 실험에 사용한 HORSE, SKULL, BEETHOVEN, CROCODILE, 57CHEVY, CAM-



(a) HORSE



(b) SKULL



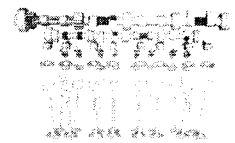
(c) BEETHOVEN



(d) CROCODILE



(e) 57 CHEVY



(f) CAM-SHAFT

그림 11. 실험 모델
Fig. 11. Test models.

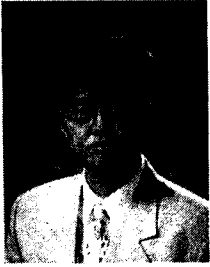
[9] W. Pennebaker and J. Mitchell, JPEG still image compression standard, Van Nostrand Reinhold, 1993.

[10] A. Gersho and R. M. Gray, Vector quantization and signal compression, Kluwer Academic

Publishers, 1992.

[11] F. Ng, B.-L. Yeo, and M. Yeung, "Improving 3D model geometry coding using DPCM techniques," ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 MPEG/M4719, 1999.

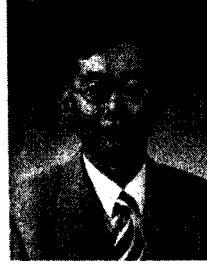
저 자 소 개



安 廷 桓(正會員)

1996년 2월 : 한국항공대학교 항공통신정보공학과 졸업(학사). 1998년 2월 : 광주과학기술원 정보통신공학과 졸업(석사). 2003년 2월 : 광주과학기술원 정보통신공학과 졸업(박사). 2003년 3월~현재 : 삼

성종합기술원 멀티미디어 랩 <주관심분야 : 삼차원 영상 부호화 및 처리, 멀티미디어 영상통신>



扈 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 Cali-

fornia, 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>