

# 예측 이단계 양자화에 의한 3차원 메쉬 모델의 위치 정보 압축

정회원 이호장\*, 박인성\*\*, 김용한\*\*\*

## A 3-D Mesh Geometry Compression Using Predictive Two-Stage Quantization

Ho-Jang Lee\*, In-Sung Park\*\*, Yong Han Kim\*\*\* *Regular Members*

### 요 약

기존의 예측 양자화 방식을 3차원 메쉬 모델의 위치 정보 압축에 적용하면, 빈번하지는 않지만 값이 큰 예측 오차에 대한 왜곡으로 인하여, 모델 전체의 모양이 크게 훼손되는 현상이 발생한다. 이는 메쉬 꼭지점의 좌표를 양자화할 때, 주어진 오차 범위 이내로 제한하지 못하기 때문이다. 이러한 큰 예측 오차 값들로 인한 시각적 왜곡을 완전히 제거하기 위해, 본 논문에서는 메쉬 꼭지점 좌표의 양자화 오차를 주어진 값 이내로 제한할 수 있는 예측 이단계 양자화(predictive two-stage quantization) 방식을 제안한다. 이 방식은 기존 DPCM과 유사하지만 예측 루프 내부의 양자화기가 연속된 두 개의 양자화기로 구성되며, 각 양자화기의 출력은 산술부호기에 의해 압축된다. 전형적인 3차원 메쉬 모델들에 이 방법을 적용하여, 비트율-왜곡 성능 및 시각적 평가에서 기존 방식에 비해 훨씬 우수하고, MPEG-4 방식에 대해서는 우수하거나 비슷함을 보였다.

### ABSTRACT

In conventional predictive quantization schemes for 3-D mesh geometry, excessively large residuals or prediction errors, although occasional, lead to visually unacceptable geometric distortion. This is due to the fact that they cannot limit the maximum quantization error within a given bound. In order to completely eliminate the visually unacceptable distortion caused by large residuals, we propose a predictive two-stage quantization scheme. This scheme is very similar to the conventional DPCM except that the embedded quantizer is replaced by a series of two quantizers. Each quantizer output is further compressed by an arithmetic code. When applied to typical 3-D mesh models, the scheme performs much better than the conventional predictive quantization methods and, depending upon input models, even than the MPEG-4 compression method for 3-D mesh geometry both in rate-distortion sense and in subjective viewing.

### I. 서 론

최근 컴퓨터 기술의 급속한 발전으로 인해 기존의 텍스트 위주의 사용자 환경에서 벗어나 이미지,

그래픽, 오디오 및 비디오 데이터 등을 제공하는 멀티미디어 사용자 환경으로 변화하고 있다. 영상 산업, 제조업, 건축설계, 지리정보 시스템(GIS: Geographic Information System), 오락 산업 등 산업 전반에 걸쳐 3차원 입체 모델을 표현하고자 하는

\* 산업기술정보원 기술이전정보센터(huxleyi@lena.uos.ac.kr),

\*\* 서울시립대학교 전자전기공학부(ispark@lena.uos.ac.kr),

\*\*\* 서울시립대학교 전자전기공학부 (yhkim@uoscc.uos.ac.kr)

논문번호 : 99151-0416, 접수일자 : 1999년 4월 16일

\* 본 연구는 한국과학재단 핵심전문연구과제(971-0916-099-2) 지원 관리로 수행되었습니다.

요구가 확산되고 있다. 뿐만 아니라 인터넷이 획기적으로 발전하고 사용자가 급증함에 따라 이러한 3차원 영상을 전송 대역폭이 제한된 환경에서 이용하고자 하는 요구가 급격히 증가하고 있다<sup>[1],[2]</sup>. 따라서 최근 이러한 3차원 모델을 효율적으로 저장하고 전송할 수 있도록 하는 압축 방식에 대한 연구가 ISO/IEC JTC1/SC29/WG11(MPEG: Moving Pictures Experts Group)의 표준화 활동을 중심으로 활발히 진행되고 있다. 특히, 3차원 모델의 압축 표준화는 MPEG 내의 SNHC(Synthetic and Natural Hybrid Coding) 소그룹이 담당하고 있다<sup>[3]</sup>.

일반적으로 3차원 모델은 다각형으로 구성된 메쉬(mesh)로 표현되며, 다각형을 삼각형으로 변환한 후 압축 과정을 거치게 된다. 삼각형으로 표현된 3차원 모델은 각 삼각형의 연결형태를 나타내는 연결정보(connectivity information; topology), 각 다각형을 구성하는 꼭지점(vertex)들의 위치를 나타내는 위치정보(geometry), 그리고 각 다각형과 꼭지점 그리고 꼭지점으로 이루어진 면에 부가된 색상, 법선 벡터, 질감 등을 나타내는 특성정보(attribute information)등 세 부분으로 나누어진다. 이들 정보 중 위치 정보는 3차원 모델 데이터의 60% 이상을 차지한다. 따라서, 3차원 모델 부호화에서는 이 위치 정보를 효율적으로 압축하는 것이 대단히 중요하다.

각 꼭지점 위치 정보 사이에 존재하는 잉여 정보(redundancy)를 효율적으로 제거하기 위해 여러 가지 부호화 방식이 연구되었는데 대부분이 예측 부호화를 사용한다<sup>[1],[4]~[10]</sup>. 3차원 모델의 위치정보를 예측 부호화할 때, 기하학적 분할 방법(geometric surgery)을 통해 얻어진 삼각형 나무(triangle spanning tree)와 꼭지점 나무(vertex spanning tree) 연결정보를 이용하여 예측과 양자화를 위한 꼭지점들의 순서를 정한다<sup>[4],[5]</sup>. 예측기에 의해 예측된 꼭지점 좌표의 예측값과 꼭지점의 원래 좌표 값의 차, 즉 예측 오차가 양자화기의 입력으로 제공된다. 양자화기에는 균일 양자화기(uniform quantizer), 로이드 맥스 최적 양자화기 또는 벡터 양자화기(vector quantizer) 등 여러 가지 양자화기를 사용한다.

3차원 모델 부호화에서 위치 정보의 왜곡은 모델 형태의 손상, 즉 찌그러짐으로 나타나며 시각적으로 대단히 민감하다. 화소 값이 8비트로 표현되는 영상 부호화와는 달리 32비트 부동소수점으로 표현되는 3차원 모델 꼭지점 좌표들의 예측 오차는 넓은 범위를 갖는다. 따라서, 이렇게 넓은 범위의 값들을

낮은 비트율로 부호화하기 위해 작은 부호책을 사용할 경우, 빈도수가 아주 많고 사람의 눈으로 느끼기 어려운 '0' 부근의 예측오차는 시각적으로 무시할만한 양자화 오차를 발생시키지만, 발생 빈도는 작다고 하더라도 그 값이 큰 예측오차는 큰 값의 양자화 오차를 발생시킴으로써 3차원 모델의 시각적 왜곡이 커진다. 3차원 메쉬 모델 중 한 두 꼭지점의 위치 왜곡이 크면, 나머지 꼭지점들의 위치 왜곡이 아무리 작아도, 전체 모델의 모양이 크게 손상되어 시각적 왜곡이 심하다. 따라서, 3차원 메쉬 위치 정보 압축에서 평균 제곱 오차(MSE: mean square error) 측도는 이러한 시각적 왜곡을 잘 반영하지 못한다. 왜냐 하면, MSE 경우에는 오차들을 평균하게 되므로 한 두 꼭지점 위치에 대한 오차가 커서 메쉬 모델의 모양이 크게 일그러지더라도 다른 꼭지점들의 위치 오차가 작으면 MSE 수치가 작게 되기 때문이다.

본 논문은 위에서 설명한 바와 같은 문제를 극복하기 위해 발생 빈도는 매우 작지만 3차원 모델의 형태에 큰 영향을 미치는 예측 오차를 일정 범위 안으로 제한함으로써, 낮은 비트율에서도 복원된 3차원 모델의 형태가 크게 손상되지 않는 예측 이단계 양자화(predictive two-stage quantization) 방식을 제안하였다. 이 방법은 기존의 DPCM과 매우 유사하지만, 내부의 양자화기를 두 개의 연속된 양자화기로 대체한 것이다. 각 양자화기의 출력은 신술부호기<sup>[11]</sup>를 이용하여 엔트로피 부호화한다. 이 방식에서는 전체 최대 양자화 오차가 두 번째 양자화기의 스텝 크기의 반으로 제한된다. 또한, 첫 번째 양자화기의 스텝 크기를 입력 모델에 적응적으로 설정하여 전체 시스템이 모델 적응적(model-adaptive)이 되도록 하였다. 본 논문에서는 이 방식을 이단계 양자화기를 사용하는 DPCM이라는 뜻으로 "이단계 DPCM (TS-DPCM: two-stage DPCM)"이라 부르기로 한다.

과형 부호화의 경우, 다단계 벡터 양자화기는 동일 비트율에서 단일 단계의 보통 벡터 양자화기에 비해 계산량은 작지만, 전체 MSE는 오히려 크다<sup>[12]</sup>. 그러나, 3차원 메쉬 부호화에서는 MSE가 시각적 왜곡을 잘 표현하지 못하기 때문에, 각 꼭지점 좌표의 양자화 오차 중 최대치를 왜곡의 측도로 사용한다. 이 측도는 하우스도르프(Hausdorff) 측도라 불리며, 두 점집합 사이의 거리를 나타내는 일종의 최대-최소(max-min) 값이다. 본 논문에서는 이를 "최대 오차 (ME: maximum error)"라 부르기로 한다.

원래 3차원 메쉬 모델의 꼭지점 집합을  $V = \{ V_i ; i=1,2,\dots,M \}$ 라 하고, 복원된 3차원 메쉬 모델의 꼭지점 집합을  $\hat{V} = \{ \hat{V}_i ; i=1,2,\dots,M \}$ 라 할 때, 두 꼭지점 집합 사이의 하우스도르프 거리  $H(V, \hat{V})$ 는 아래 식 (1)과 같다.

$$ME = H(V, \hat{V}) = \max(h(V, \hat{V}), h(\hat{V}, V)) \quad (1a)$$

여기서,

$$h(V, \hat{V}) = \max_i \min_j \| V_i - \hat{V}_j \| \quad (1b)$$

이고,  $\| \cdot \|$ 는 유클리드 놈(Euclidean norm)을 나타낸다.

3차원 원 모델과 복원 모델 간의 ME를 최소화하기 위해 본 논문에서 제시한 다단계 양자화기 설계 방법은 [12]의 방법과 다르며, 본 논문에서는 이단계 양자화기 경우의 설계 방법을 제시하였다. 또한, ME를 왜곡 측도로 사용하는 경우에는, 이단계 양자화기가 단일 단계의 보통 양자화기 보다 우수한 성능을 갖는다는 것을 실험 결과를 통하여 보였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 3차원 메쉬 모델의 표현법과 지금까지 제안된 3차원 모델 압축방법에 대하여 간략히 살펴보고, III장에서는 본 논문이 제안하는 TS-DPCM 방법을 설명하였다. 그리고 IV장에서는 컴퓨터 모의실험을 이용하여 제안된 방법을 전형적인 3차원 메쉬 모델들에 적용하여 얻은 결과를 비트율-왜곡 곡선(rate-distortion curve)으로 제시하고 복원된 모델을 원 모델과 비교함으로써 성능을 평가하였다. 마지막으로 V장에서는 본 논문의 결론을 제시하였다.

## II. 3차원 메쉬 모델 위치 정보를 위한 기존 압축 방법

이 절에서는 삼각형 메쉬를 이용한 3차원 물체의 표현방법과 기존의 3차원 메쉬 모델의 위치 정보 압축방법과 문제점들을 살펴본다.

### 1. 3차원 메쉬 모델의 표현과 구성

3차원 메쉬 모델은 그림 1에서 보는 바와 같이 삼각형 혹은 다각형으로 구성된 메쉬로 표현된다. 이러한 3차원 메쉬 모델을 표현하는 방법으로 각 다각형의 연결정보와 위치 정보, 특성정보를 ASCII

(American Standard Code for Information Interchange) 문서로 표현하는 VRML(Virtual Reality Markup Language)이 주로 이용되고 있다<sup>[2]</sup>. VRML 문서의 예를 그림 2에 보였다. 그림에서 보는 바와 같이 모델 헤더와 위치 정보, 연결정보, 특성정보 등의 정보를 아스키 텍스트 문서로 표현한다. 3차원 모델의 각 꼭지점의 좌표를 부동소수점 숫자로 표현하여 늘어놓은 것이 위치 정보이고, 3차원 모델의 각 다각형을 구성하는 꼭지점들을 위치 정보에 대한 인덱스로 표현하여 늘어놓은 것이 연결 정보이다. 연결 정보에서 -1은 다각형들을 구분해 준다. 그림 2에서 특성정보는 본 논문의 관심 밖이기 때문에 생략하였다.

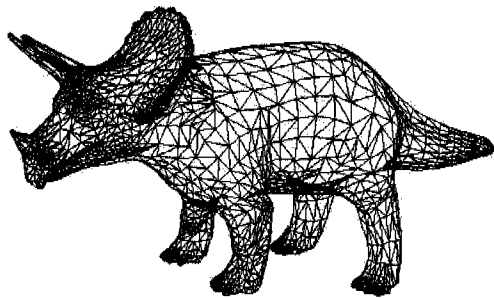


그림 1. 3차원 메쉬 모델의 예

```
#VRML V2.0 utf8 (Converted to ASCII)
Shape {
  geometry IndexedFaceSet {
    coord Coordinate {
      point [
        1.63299 -0.942809 -0.666667
        0.00145 0.230104 2.11010
        -1.63299 -0.942809 -0.666667
        0.0000001 1.88562 -0.666667
      ]
    }
    coordIndex [
      0 1 2 -1 3 1 0 -1 2 1
      3 -1 2 3 0 -1
    ]
  }
}
```

위치  
정보

그림 2. VRML ASCII 문서의 예

그림 3에 3차원 메쉬 모델의 기하학적 분할 방법을 나타내었다<sup>[4]</sup>. 그림 3(a)는 간단한 메쉬 모델을 보이고 있으며 그림 3(b)는 꼭지점의 분할 순서를 나타내는 꼭지점 나무이다. 이 정보를 이용해 메쉬 꼭지점들의 압축 순서를 구한다. 그림 3(c)는 기하학적 분할로 만들어진 삼각형 나무이다. 3차원 메쉬의 압축 효율을 높이기 위해, 인접 꼭지점들 간의

상관도가 최대가 되도록 삼각형 나무를 만든다<sup>[4]</sup>. 이 정보를 이용해 다음 꼭지점 위치 예측에 사용될 꼭지점들을 결정한다. 그림 3(a)는 간단한 모델이기 때문에 하나의 삼각형 나무만으로 이루어져 있으나 복잡한 메쉬 모델인 경우 여러 개의 구성소(component)로 전체 모델이 구성되는 경우가 많으므로 삼각형 나무도 여러 개가 된다.

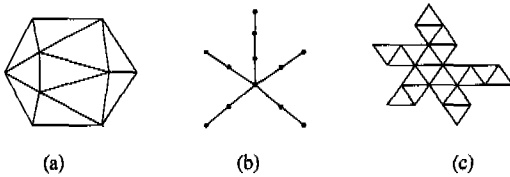


그림 3. 3차원 메쉬 모델의 기하학적 분할 방법

3차원 메쉬 모델이 여러 구성소로 구성되는 것은, 복잡한 3차원 모델을 저작할 때 비교적 간단한 여러 개체로 분리 저작한 후 한 개의 모델로 합치는 것이 편리한 경우가 많기 때문이다. 두 개 이상의 구성소가 공유하는 꼭지점의 좌표 값이 동일한 것이 이상적이지만, 실제 저작 도구에서는 동일 꼭지점에 대해 서로 다른 구성소 내에 표현된 좌표 값들이 미세하게 서로 다를 수 있다. 여러 구성소를 갖는 3차원 메쉬 모델을 구성소별로 독립적으로 양자화하면, 동일한 꼭지점의 좌표 값이 서로 크게 상이하게 되어 복원 모델의 구성소 사이에 틈이 보이는 경우가 발생한다. 이를 균열(crack)이라 하는데, 비트율이 낮을수록 심각하다. 균열을 방지하려면, 동일한 꼭지점 좌표를 동일한 값으로 양자화하거나, 동일한 꼭지점에 대한 정보를 복호기 측에 부가 정보(side information)로 제공하여야 한다. 그림 4에 균열의 예를 보였다. 이것은 MPEG-4에서 시험용으로 사용하고 있는 “cafetable” 모델에 대해 균열 방지를 하지 않은 채 보통의 DPCM 방법으로 10 bits/vertex로 압축하여 복원한 모델과 원래 모델을 비교한 그림이다.

## 2. 위치 정보의 압축 방법

3차원 메쉬 모델의 위치 정보를 압축하기 위해 사전 양자화 예측 산술부호화(pre-quantized predictive arithmetic coding) 방법<sup>[1]</sup>, 로이드-맥스 최적 양자화기를 이용한 DPCM<sup>[6]</sup> 방법, 예측 오차의 양자화 범위를 예측 오차 히스토그램의 99% 지점의 내부와 외부로 구분한 적응 DPCM 방법<sup>[7]</sup>, 그리고 예측 잉여신호 벡터 양자화(PRVQ: Predictive Residual

Vector Quantization) 방법<sup>[8],[9]</sup> 등이 있다. 이들 중 사전 양자화 예측 산술부호화법은 VRML 압축 방식으로 Web3D 컨소시엄에 제안되었다가<sup>[1]</sup>, 추후 보안을 거쳐 MPEG-4의 3차원 메쉬 위치정보 압축 표준으로 채택된 방법이다. 이를 VRML-CBF (VRML Compressed Binary Format)라 부르기로 한다.



그림 4. 균열 발생 모델과 원 모델 비교

로이드 맥스 최적양자화를 이용한 DPCM 방법<sup>[6]</sup>은 3차원 메쉬의 꼭지점 위치 정보에 대한 예측 값과 입력 값의 차분치를 무기억 라플라스 확률 과정으로 모델링하여 로이드 맥스 양자화한 후, 양자화 인덱스를 허프만 부호화하는 방법이다. 이 방식은 서론에서 설명한 바와 같이 빈도는 적으나 예측 오차가 큰 꼭지점에 대해서는 기하학적 왜곡이 과도하게 크게 나타나 3차원 메쉬의 모양이 전체적으로 훼손되는 약점이 있다. 이를 보완하기 위해 [7]에서는 예측 오차의 범위에 대한 히스토그램을 작성하고, 이 히스토그램의 원점을 기준으로 99%의 샘플들이 속하는 범위 내에만 균일 양자화기의 레벨 값을 분포시킨 후, 이 99% 지점을 초과하는 예측 오차 값에 대해서는 99% 지점의 값을 뺀 나머지 값을 동일한 균일 양자화기로 부호화하였다. 물론 양자화기 입력 값이 99% 범위 내에 있는지 여부는 특별한 부호어(escape code)를 이용하여 복호기에 전달된다. 이 방법에 의하면, 위에서 설명한 과도한 기하학적 왜곡이 발생할 확률은 줄어들지만 절대 발생하지 않도록 해 주지는 못한다. 이 방법은 본 논문에서 제안한 TS-DPCM의 특별한 경우에 해당하며, TS-DPCM은 이 방법을 일반화하여 ME를 임의로 설정할 수 있도록 한 것이다. 따라서, TS-DPCM에서는 가끔 예측이 잘 되지 않기 때문에 발생하는 과도한 기하학적 왜곡이 전혀 일어나지 않는다.

PRVQ<sup>[8],[9]</sup>에서는 3차원 메쉬 모델 꼭지점 좌표의

벡터 특성을 이용하여 예측 벡터 양자화를 적용한 후 여분의 비트율을 이용하여 양자화된 벡터와 원래 벡터의 차분치를 벡터 양자화하였다. 이 방식은 다단계 양자화를 이용하고 있으나, 다른 방식에 비해 계산량이 많을 뿐만 아니라, 양자화기들이 ME를 최소화하도록 설계되지 못하였다. 따라서 이 방식도 ME 성능이 나쁘고, 낮은 비트율에서 시각적 왜곡이 심하다.

마지막으로, MPEG-4에서 채택된 VRML-CBF<sup>[11]</sup> 방법은 식 (2)과 같이 입력되는 위치 정보를 입력되는 각 축의 최소값, 최대값으로 정규화하고, 이렇게 0과 1 사이로 정규화된 값을 정해진 비트수로 균일하게 사전 양자화한다. 즉,

$$X_q = \frac{(X_n - m)}{b} (2^P - 1) \quad (2)$$

여기서,  $X_q$ 는 사전 양자화된 정수값,  $X_n$ 은 꼭지점 좌표의 축별 값,  $m$ 은 축별 최소값,  $b$ 는 축별 값의 범위 즉, 최대값 - 최소값, 그리고  $F$ 는 사전 양자화 비트수이다. 이렇게 얻어진 정수에 대해 무손실 예측 산술부호화한다. 손실 부호화 과정이 사전 양자화에 국한되기 때문에 VRML-CBF에서는 ME의 상한 값을 쉽게 예측할 수 있고, 균열이 발생하지 않는 장점은 있으나, 부호화 성능이 예측 산술부호화의 효율에 주로 의존하며, 다양한 양자화 방법을 적용하기 힘들다는 단점이 있다. 원래 VRML-CBF의 산술부호기에는 선형 예측기(linear predictor)가 사용되었으나, MPEG-4에 채택되면서 평행사변형법 예측기(parallelogram predictor)<sup>[10]</sup>로 보완되었다. 본 논문에서는 이를 "MPEG-4 방식"이라 부르기로 한다. 평행사변형법 예측에 대해서는 아래 III절에서 상세히 설명하였다.

### 3. 예측 오차의 특성

앞에서 언급한 바와 같이 지금까지 제안된 방식 중 [6]~[9]의 압축방식은 비록 MSE 측면에서 적절한 양자화를 달성하지만 3차원 메쉬 모델의 특성을 충분히 고려하지 못하는 한계를 가진다. 즉, 빈도수가 아주 작고 평균과 큰 차이를 보이는 예측오차는 발생 빈도가 매우 낮음에 따라 평균 제곱 오차(MSE)에 미치는 영향은 아주 작지만 3차원 모델의 특성상 한 꼭지점 정보의 양자화 오차가 복원된 메쉬 모델의 형태에 결정적인 왜곡을 발생시킴으로써 사용자가 실제로 느끼는 성능은 급격히 저하된다. 특히, 메쉬 모델을 구성하는 다각형의 크기에 변화

가 많은 모델이나 평면과 같은 변화가 거의 없는 구성소와 복잡한 구성소가 결합된 형태의 메쉬 모델에서는 이러한 경향이 심하다.

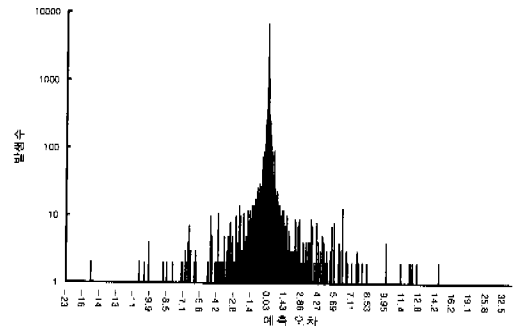


그림 5. "32\_dodge" 모델의 예측오차 히스토그램

그림 5는 실제 MPEG에서 시험 데이터로 사용하는 "32\_dodge" 모델에 대한 예측오차 히스토그램이다. 그림 5는 x, y, z축을 구분하지 않고 예측 오차 값의 빈도수를 측정하여 로그 스케일로 표현하였다. 그림에서 알 수 있듯이 발생 빈도가 아주 작고 평균에서부터 먼 예측오차로 인하여 예측오차 범위가 크게 넓어짐을 알 수 있다. 따라서 비트율이 높은 경우, 이러한 넓은 범위의 예측오차를 수용할 수 있는 만큼 부호책이 크기 때문에 평균으로부터 먼 거리에 있는 예측오차에 대해서도 허용할 만한 양자화 오차를 발생시킨다. 반면, 낮은 비트율에서는 평균과 거리가 먼 예측오차에 대해서는 심각한 문제를 발생시킨다.

## III. 제안 방식: 예측 이단계 양자화 알고리즘

### 1. 제안 알고리즘

본 논문에서는 3차원 메쉬 꼭지점 위치의 양자화 오차를 주어진 값 이내로 제한할 수 있는 TS-DPCM을 제안한다. 이 방법에서는 예측 오차를 두 단계로 균일 양자화하는데, 첫 번째 단계의 균일 양자화기의 스텝 크기(step size)는 두 번째 단계의 스텝 크기의 정수배가 되도록 한다. 두 번째 단계의 균일 양자화기의 스텝 크기는 주어진 ME 상한 값의 두 배로 설정한다. 이 두 양자화기를 연속적으로 거칠 경우 최종 양자화 오차의 최대 크기는 두 번째 양자화기의 스텝 크기의 반으로 제한된다. 본 논문에서는 첫 번째 단계의 양자화기로는 원점 부근의 스텝 크기가 다른 스텝 크기의 두 배인 데드존

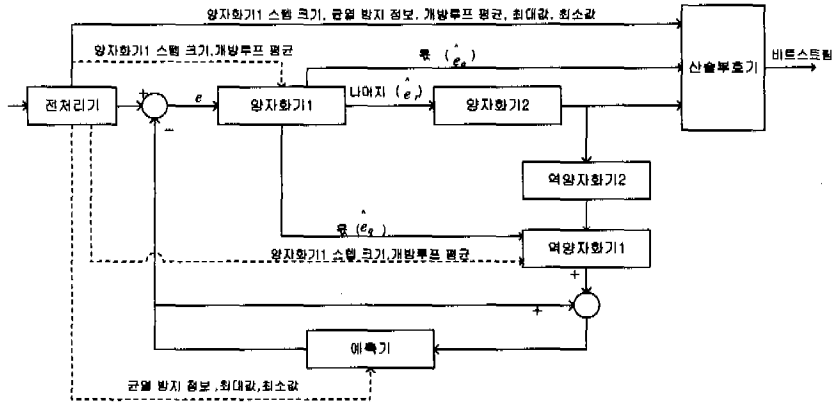


그림 6. 두 단계 예측 양자화기의 부호기

(dead-zone) 균일 양자화기를, 두 번째 단계의 양자화기로는 중앙 상승(mid-rise) 균일 양자화기를 사용하였다. 첫 번째 양자화기의 스텝 크기는 각 입력 모델에 대한 개방 루프 예측 오차 (open-loop prediction error)를 이용하여 실험적으로 최적인 값을 선택하도록 하였다. 일단 각 양자화기의 스텝 크기가 결정되면, TS-DPCM의 양자화 방법은 매우 간단하다. 즉, 예측 오차를 첫 번째 단계의 양자화 스텝 크기로 나눈 몫과 나머지로 표현하였을 때, 몫은 첫 번째 단계의 양자화 인덱스가 되고, 나머지는 두 번째 단계의 양자화기 입력이 된다. 각 단계의 양자화 인덱스는 각기 산술부호기를 이용하여 무손실 부호화된다.

그림 6에 본 논문에서 제안한 TS-DPCM에 의한 3차원 메쉬 모델의 위치 정보 부호기의 블록도를 나타내었다. 이 부호기는 전처리기, 이단계 양자화기 및 역양자화기, 예측기, 그리고 산술 부호화기로 구성되어 있다. 그림에서와 같이, 첫 번째 양자화기를 “양자화기1”, 두 번째 양자화기를 “양자화기2”로 표현하기로 한다.

전처리기는 최대값, 최소값을 구하여 정규화하는 과정, 개방 루프 예측 오차의 평균을 구하는 과정, 양자화기1의 최적 스텝 크기를 결정하는 과정, 그리고 균열 방지를 위한 부가 정보를 구하는 과정 등으로 이루어진다. 전처리기에서는 꼭지점들의 위치 정보를 처리하기 위해 원래 모델의 위치 정보로부터 최대값과 최소값을 구하여 0과 1 사이값으로 정규화한다. 이 때의 최대값과 최소값은 부가 정보로 복호기로 보내진다. 정규화된 위치 정보에 대해 개방 루프, 즉 양자화기가 없는 DPCM을 수행하여 예측 오차들의 평균을 구한다. 이 값은 양자화기1의

입력의 평균을 0에 가깝게 하기 위한 것이다.

균열을 방지하기 위해 부호화기는 모델 내에 존재하는 동일한 꼭지점 정보를 찾고 이 정보를 복호기에 부가 정보로 제공하였다. 동일한 꼭지점 정보를 찾기 위해서 [9]에 제시된 방법을 사용하였는데, 한 구성소의 꼭지점에 대해 다른 구성소들의 꼭지점과의 거리를 계산하여 이 거리가 정해진 문턱값보다 작으면 다른 구성소에 속한 꼭지점이라 하더라도 동일한 꼭지점으로 삼는다. 이렇게 찾아진 동일 꼭지점 정보는 꼭지점 나무가 지정하는 순서에 따라 얻어진 인덱스로 표현된 후 예측 산술부호화된다.

양자화기1에서는 예측기로부터 얻어진 예측 값과 실제 위치 정보 값과의 차이를 전처리기의 개방 루프에서 구한 평균을 이용해 식 (3)과 같이 평균이 0에 가깝도록 변환한다.

$$\hat{e} = (e - \bar{e}_0) \tag{3}$$

여기서,  $\hat{e}$ 는 변환된 예측 오차,  $e$ 는 예측기로부터 얻은 결과와의 예측 오차 그리고  $\bar{e}_0$ 는 개방 루프의 예측 오차의 평균이다. 개방 루프에서 얻어진 오차의 평균은 폐쇄 루프에서 구해진 평균값은 별로 차이가 없으므로 작은 차이를 허용하도록 한다. 다음에 그 결과 값을 양자화기1의 스텝 크기로 나눈다. 이 때 몫( $\hat{e}_0$ )은 산술 부호기로 그리고 나머지 값( $\hat{e}_1$ )은 양자화기2로 보내진다. 역양자화기2 및 역양자화기1에서는 이 과정의 역과정이 수행된다. 양자화기1에는 스텝 크기의 2배에 해당하는 데드존(dead zone)을 갖는 중앙 평탄(mid-tread) 균일 양자화기를 사용하고, 양자화기2에는 중앙 상승(mid-

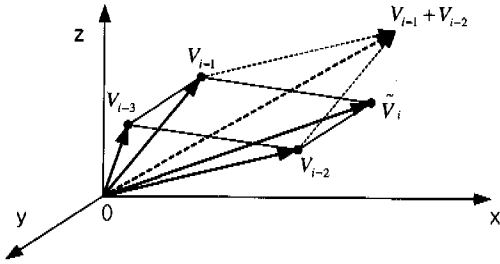


그림 7. 평형사변형법 예측 ( $i \geq 3$ )

rise) 균일 양자화기를 사용하였다.

예측기에서 사용된 예측 방법은 평형사변형법이다<sup>[10]</sup>. 다각형으로 구성된 3차원 메쉬 모델은 연결 정보를 부호화할 때 삼각형으로 재구성된다. 그림 7에서 보는 바와 같이 한 변을 공유하는 삼각형 나무의 순서에 따라 인접한 삼각형들이 사각형을 형성하게 된다. 평형사변형법은 이 사각형이 평형사변형이 되는 경향을 이용한 예측법이다. 따라서 사각형을 구성하는 각 꼭지점의 관계가 평형사변형이라 가정하면 그림 7 및 식 (4)와 같이 다음에 부호화될 꼭지점의 위치를 예측할 수 있다.

$$\hat{V}_0 = 0, \tag{4a}$$

$$\hat{V}_1 = V_0, \tag{4b}$$

$$\hat{V}_2 = \frac{(V_0 + V_1)}{2}, \tag{4c}$$

$$\hat{V}_i = V_{i-1} + V_{i-2} - V_{i-3} \quad i \geq 3 \tag{4d}$$

여기서,  $\{V_0, V_1, V_2, \dots, V_i, \dots\}$ 는 한 구성소의 연결 정보로부터 얻어진 꼭지점 순서에 의해 나열된 꼭지점 좌표이고,  $\hat{V}_i$ 는  $i$ 번째 꼭지점에 대한 예측값이다.

부호기 종단의 엔트로피 부호화부는 전처리부의 부가 정보와 두 양자화기의 출력 인덱스들을 산술 부호화기를 통해 가변길이 부호화한다. 부호화 순서는 꼭지점 압축 순서에 따라  $x$ 축을 부호화한 다음  $y$ 축, 마지막으로  $z$ 축의 순서로 부호화한다. 하지만 모든 꼭지점에 대해서 부호화하는 것이 아니고, 앞에서 서술한 균열 방지 정보에 의해 동일한 꼭지점이라고 선언된 꼭지점들에 대해서는 첫 번째 꼭지점만 부호화하고 나머지는 부호화하지 않는다. 본 논문에서 사용한 산술부호화는 Witten이 제안한 산술부호기<sup>[11]</sup>이다.

### 3. 이단계 양자화기의 설계

우선 요구되는 ME 상한 값에 따라 양자화기2의 스텝 크기를 결정한다. 즉, 양자화기2의 스텝 크기와 ME 상한 값의 관계는 식 (5)와 같다.

$$ME_{max} = K \frac{\Delta_2}{2} \tag{5}$$

여기서,  $ME_{max}$ 는 ME 상한 값,  $\Delta_2$ 는 양자화기2의 스텝 크기, 그리고  $K$ 는 각 축별 정규화에 의한 상수이다. 이 값이 결정되면, 아래 식 (6)과 같이 양자화기1의 스텝 크기  $\Delta_1$ 을 양자화기2의 스텝 크기, 즉  $\Delta_2$ 의 정수배로 설정한다.

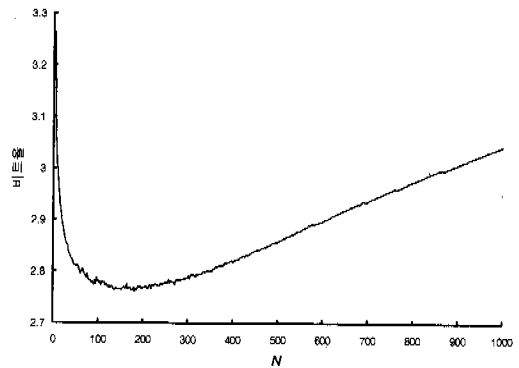
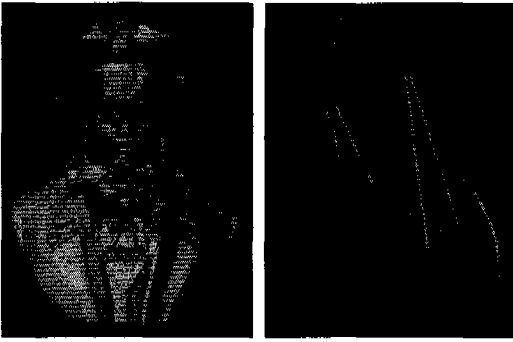


그림 8. N에 따른 비트율

$$\Delta_1 = N \Delta_2 \tag{6}$$

여기서,  $N$ 은 양의 정수이다.

여러  $N$  값에 대해 TS-DPCM을 수행하여 비트율을 측정해 본 결과, 대부분의 3차원 메쉬 모델에 대해 그림 8과 같은 경향이 있음을 알았다. 그림 8은 "beethoven" 모델에 대해 양자화기2의  $\Delta_2$ 를 0.01로 고정하고  $N$ 을 증가시키면서 비트율을 측정한 결과이다. 최적  $N$  값, 즉 전체 비트율을 최소화하는  $N$ 을  $N_{opt}$ 라 하자. 본 논문에서는 개방 루프에서의 예측 오차를 이단계 양자화하여 엔트로피를 측정함으로써,  $N_{opt}$ 를 추정하였다. 단, 그림 8에서 보는 것과 같이  $N$ 에 대한 비트율 곡선이 대체로 2차원 곡선의 특성을 나타내므로, 이진 탐색법을 이용하여  $N_{opt}$ 를 추정함으로써 부호기의 복잡도를 낮출 수 있다.



(a) "beethoven" 모델 (b) "bicycle" 모델

그림 9. 실험에 사용된 3차원 모델

#### IV. 실험 결과

실험 영상으로는 MPEG에서 시험용으로 사용되고 있는 "beethoven"과 "bicycle" 모델을 사용하였다. 그림 9에 이 모델들의 원래 모양을 보였다.

"beethoven" 모델은 3차원 메쉬 모델의 구성소의 수가 작아 간단한 특성을 갖고 있고, "bicycle" 모델은 구성소의 수가 비교적 많아 복잡한 구조를 갖고 있다. 표 1에 위 두 모델에 대한 꼭지점 수와 구성소 수를 보였다.

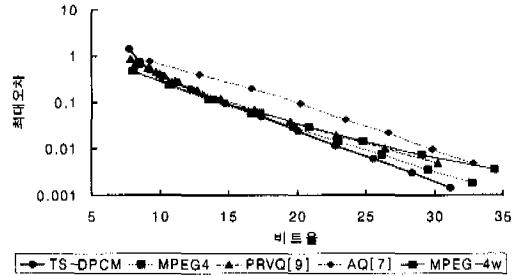
표 1. 실험 모델의 꼭지점 및 구성소 수

모델 이름	beethoven	bicycle
꼭지점 수(M)	2,845	4,545
구성소 수	20	584

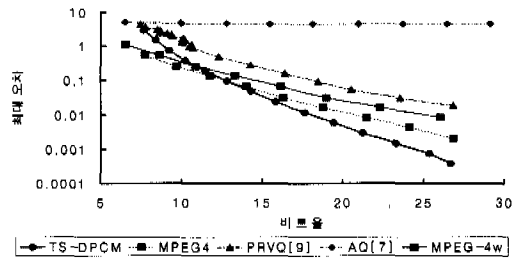
성능 비교를 위해서 두 가지 방법을 사용한다. 첫 번째 방법은 원래 3차원 메쉬 모델과 복원된 3차원 메쉬 모델의 꼭지점 사이의 거리 중 가장 큰 것을 측정하는 하우스도르프 측도로서, 이미 식 (1)에서 정의하였으며, 본 논문에서는 ME라 부른다. 두 번째는 아래 식 (7)과 같이 원래 3차원 메쉬 모델과 복원된 3차원 메쉬 모델의 꼭지점끼리의 거리를 제곱해서 합한 값의 평균을 구하는 MSE이다.

$$MSE = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} \|V_i - \hat{V}_i\|^2 \quad (7)$$

여기서, M은 전체 모델의 꼭지점 수이다. ME는 3차원 메쉬 부호화 오차로 인한 시각적 왜곡의 크기를 MSE 보다 더 잘 반영한다. 아래에서 제시할



(a) "beethoven" 모델



(b) "bicycle" 모델

그림 10. ME 측면의 비교

ME 및 MSE 수치는 꼭지점 좌표의 각 축별 최대, 최소 입력값을 기반으로 입력을 정규화한 후 측정된 값이다.

그림 10은 AQ 부호화<sup>[7]</sup>, PRVQ 부호화<sup>[9]</sup>, MPEG-4 표준에 채택된 방법과 제안된 방법, 그리고 TS-DPCM을 ME 측면에서 비교한 것이다. 그림 10에서 "MPEG-4"라고 표기된 것은 MPEG-4에서 채택된 방식의 성능을 나타내고, "MPEG-4w"라고 표기된 것은 MPEG-4 방식에서 산술부호기만 Witten의 산술부호기로 대처한 것이다. 이것은 TS-DPCM 방법에 사용된 Witten의 산술부호화와 동일한 것으로서, 산술부호기를 제외한 나머지 부분의 성능 비교를 위해 그림 10에 추가하였다. 본 논문에서 제시한 PRVQ 방식의 결과는 모두 단일 단계의 스칼라 양자화만 수행한 것으로 보통의 DPCM에 의한 결과와 유사하다. 그림 10(a)는 위의 네 방식에 따라 복원된 "beethoven" 모델의 경우에 ME를 비트율에 따라 로그 스케일로 나타냈다. 그림 10(a)에서 알 수 있듯이 제안된 방법이 최대 오차 성능 면에서 AQ, PRVQ에 비해 약 10 bits/vertex 이상의 비트율에서, 또 MPEG-4 방식에 비해 약 17 bits/vertex 이상의 비트율에서 우수함을 알 수 있다. 그리고, MPEG-4w보다는 약 15 bits/



vertex 이상의 비트율에서 우수함을 알 수 있다. 그림 10(b)는 "bicycle" 모델에 대해 비트율에 따라 ME를 로그 스케일로 나타낸 그림이다. "bicycle" 모델은 "beethoven" 모델에 비해 구성소가 훨씬 많기 때문에 균열 방지를 위한 동일 꼭지점 정보도 훨씬 많다. 이 모델의 경우, AQ와 PRVQ 방식에 비해 제안된 방식이 전체 비트율 구간에서 월등히 나은 성능을 보임을 알 수 있다. 그리고, MPEG-4 방식에 비해서는 약 13 bits/vertex 이하, MPEG-4w 방식에 비해서는 약 11 bits/vertex 이하의 하위 비트율에서 TS-DPCM의 성능이 조금 떨어지지만 비트율이 높아질수록 성능이 더 우수함을 알 수 있다. 실제로 약 10 bits/vertex 이하의 너무 낮은 비트율에서는 시각적 왜곡이 너무 크기 때문에 ME 또는 MSE와 같은 객관적 측도가 시각적 왜곡을 잘 반영하지 못하는 점을 감안하면, 결론적으로 본 논문에서 제안한 방법이 기존 방법들에 비해 ME 측면에서 전반적으로 우수함을 알 수 있다.

그림 11(a)는 "beethoven"에 대해 상기 네 가지 방식의 비트율-MSE 곡선을 로그 스케일로 나타낸 그림이다. PRVQ방식이 MSE 측도에서 가장 우수하고, TS-DPCM은 8 bits/vertex이상의 비트율에서 AQ방식, 그리고 15 bits/vertex이상 비트율에서

MPEG-4 방식에 비해 우수함을 알 수 있다. 또한, MPEG-4w보다는 14 bits/vertex이상에서 우수함을 알 수 있다. 그림 11(b)는 "bicycle"에 대해서 네 가지 방식의 MSE를 로그 스케일로 나타내었다. 12 bits/vertex이상의 비트율에서 모든 기존 방식보다 TS-DPCM이 우수함을 알 수 있다. 결국 구성소수가 작은 모델에 대해서 TS-DPCM의 MSE 성능이 PRVQ 방식에 비해 다소 나쁘지만, "bicycle" 모델과 같이 구성소가 많은 모델에 대해서는 이러한 현상이 줄어들음을 알 수 있다. 단, MSE는 ME에 비해 3차원 메쉬 모델의 시각적 왜곡을 잘 반영하지 못한다는 점을 유의하여야 한다.

그림 12는 실제로 복원된 "beethoven" 모델을 비슷한 비트율인 13 bits/vertex에서 각 방식의 결과와 비교한 것이다. 본 논문에서 제안한 방법인 TS-DPCM과 MPEG-4에서 표준으로 채택한 방법은 원래 모델과 거의 유사하게 복원함을 볼 수 있다. 하지만 PRVQ 방식은 모델의 바닥 부분이 깨진 것처럼

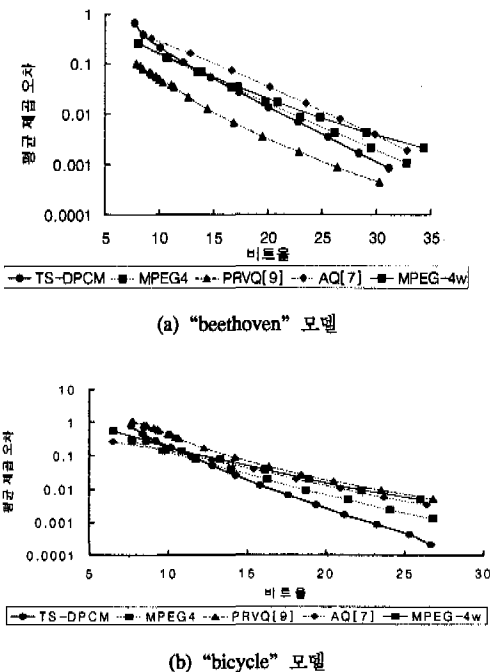


그림 11. MSE 측면의 비교

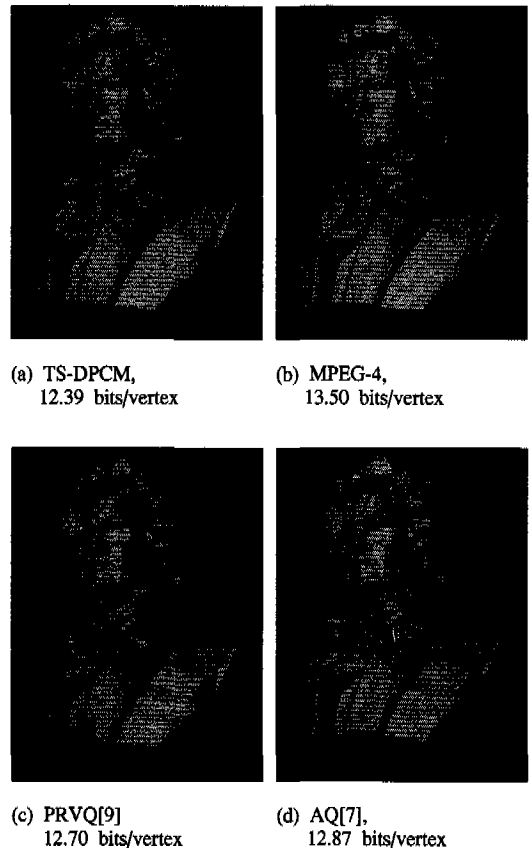
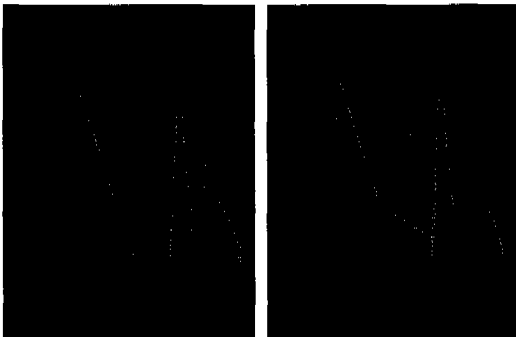


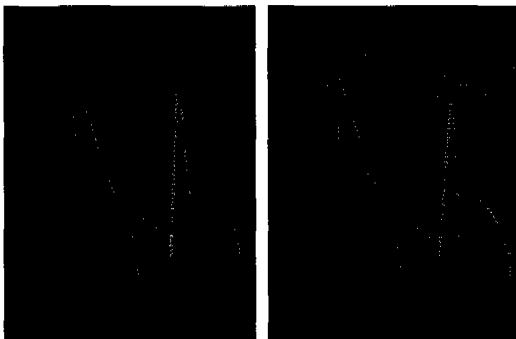
그림 12. 약 13 bits/vertex에서 각 방식에 따른 "beethoven"의 복원된 모델

럼 복원하였고, AQ 방식은 다른 방식보다 상대적으로 높은 비트율임에도 불구하고 바닥이 매끄럽지 못하게 복원함을 알 수 있다. 그리고 균열 방지에 대한 내용이 없어 균열이 발생함을 알 수 있다. 그림 13은 "bicycle" 모델에 대한 주관적 성능 비교로서, 11~12 bits/vertex의 비슷한 비트율에 대해 각 방식에 의한 복원 모델을 보여준다. AQ 방식의 경우, 자전거 바퀴 살이 아주 가늘어지거나 아예 사라지는 현상이 발생하고 뒷 바퀴의 윗 부분과 안장 아래 부분에 왜곡이 크게 발생함을 볼 수 있다. PRVQ 방식의 경우, 자전거 바퀴 살이 원래 모델에 비해 훨씬 더 두꺼워 보이고 뒷 바퀴 축과 안장을 연결하는 축대에는 원래 모델에는 없는 도형이 더해졌음을 볼 수 있다. MPEG-4 방식은 위 두 방식에 비해 잘 복원이 되었지만 바퀴 살이 가늘어졌다. 마지막으로 제안된 방식인 TS-DPCM으로 복원된 모델은 원 모델과 비교했을 때 바퀴 살이 약간 두꺼워졌지만 시각적 왜곡이 거의 없다.



(a) TS-DPCM, 11.50 bits/vertex

(b) MPEG-4, 11.78 bits/vertex



(c) PRVQ[9], 12.29 bits/vertex

(d) AQ[7], 12.78 bits/vertex

그림 13. 약 12 bits/vertex에서 각 방식에 따른 "bicycle"의 복원된 모델

TS-DPCM을 이용하였을 때, MSE 면에서 낮은 성능을 보인 모델은 있었으나 ME 면에서는 다른 방식에 비해 높은 성능이 얻었고 시각적 왜곡도 가장 작음을 알 수 있었다.

표 2에 "beethoven" 모델과 "bicycle" 모델에 대해 TS-DPCM 방법에 의한 부호화 비트 정보를 비트율에 따라 나타내었다. 균열 방지 정보와 기타 고정된 헤더 정보는 비트율에 따라 일정한 값을 유지하므로 낮은 비트율에서 이들 정보가 차지하는 비율이 높다.

표 3에 "beethoven"과 "bicycle" 이외의 6개 모델에 대한 TS-DPCM과 MPEG-4의 성능을 비교하였다. 이 시험 모델들은 MPEG에서 사용하는 400여개의 시험 모델 중 임의로 선택한 것으로서 선택된 모델명은 "eight", "shape", "triceratops", "skull", "crocodile", "monster" 등이다. 표 3에서 알 수 있는 바와 같이 "skull" 모델에 대해서는 TS-DPCM이 MPEG-4 방식 보다 우수하며, 그 외의 모델에 대해서는 비슷하거나 조금 낮은 성능을 보인다.

표 2. 각 모델에 대한 부호화 비트 정보

(a) "beethoven" 모델의 부호화 비트 정보(총 꼭지점 수 2,845개)

비트율	1단계 양자화	2단계 양자화	균열 방지	기타	총 비트수
10.07	654	22,821	4,716	448	28,639
14.74	1,282	35,470	4,716	448	41,916
20.06	2,929	48,954	4,716	448	57,047
25.56	3,639	63,915	4,716	448	72,718
31.14	7,436	75,997	4,716	448	88,597

(b) "bicycle" 모델의 부호화 비트 정보(총 꼭지점 수 4,545개)

비트율	1단계 양자화	2단계 양자화	균열 방지	기타	총 비트수
10.11	203	25,391	19,920	448	45,962
15.74	7,735	43,457	19,920	448	71,560
19.34	8,200	59,320	19,920	448	87,888
21.11	7,684	67,911	19,920	448	95,963
25.22	8,196	86,042	19,920	448	114,606

## V. 결론

본 논문에서는 3차원 메쉬 모델에 대한 새로운 위치 정보 압축 알고리즘을 제안하고, 최대 오차

표 3. 임의로 선택된 모델들의 ME와 MSE 비교

모델 이름	꼭지점 수	구성소 수	TS-DPCM			MPEG-4		
			비트율	ME	MSE	비트율	ME	MSE
eight	766	1	9.81	0.3780	0.2040	9.48	0.2920	0.1699
			14.52	0.0954	0.0528	14.81	0.0742	0.0411
			20.36	0.0239	0.0134	20.63	0.0179	0.0105
			26.37	0.0059	0.0033	23.65	0.0091	0.0052
			29.46	0.0030	0.0017	30.10	0.0021	0.0013
shape	2,562	1	9.06	0.3632	0.2133	11.79	0.1884	0.1172
			14.20	0.0947	0.0545	14.89	0.0889	0.0562
			20.06	0.0235	0.0136	21.00	0.0231	0.0134
			25.96	0.0057	0.0034	27.07	0.0058	0.0034
			31.63	0.0014	0.0008	30.17	0.0029	0.0017
triceratops	3,100	24	10.77	0.1879	0.1040	10.37	0.1417	0.0818
			15.27	0.0480	0.0257	15.56	0.0357	0.0206
			19.81	0.0120	0.0065	20.37	0.0086	0.0051
			24.15	0.0030	0.0017	24.97	0.0023	0.0013
			31.21	0.0004	0.0002	27.12	0.0011	0.0006
skull	10,952	1	10.56	0.1932	0.1083	10.36	0.2039	0.1142
			16.10	0.0475	0.0270	16.45	0.0502	0.0285
			19.06	0.0236	0.0136	19.53	0.0247	0.0143
			25.09	0.0060	0.0034	25.88	0.0063	0.0036
			31.21	0.0015	0.0008	29.10	0.0032	0.0018
crocodile	17,332	65	9.86	0.0968	0.0453	9.86	0.0381	0.0219
			14.63	0.0243	0.0127	14.83	0.0096	0.0055
			17.35	0.0121	0.0064	17.76	0.0048	0.0028
			20.25	0.0060	0.0032	20.78	0.0024	0.0014
			23.29	0.0030	0.0016	23.84	0.0012	0.0007
monster	25,118	140	9.15	0.0956	0.0435	8.77	0.0652	0.0348
			13.34	0.0241	0.0128	12.91	0.0160	0.0091
			18.60	0.0060	0.0033	18.31	0.0041	0.0023
			21.52	0.0030	0.0017	21.39	0.0021	0.0011
			24.58	0.0015	0.0008	24.53	0.0010	0.0006

(ME), 평균 제곱 오차(MSE) 등의 객관적 성능 평가와 주관적 화질 평가에서 그 성능이 기존 방법에 비해 우수함을 보였다. 즉, 제안된 예측 이단계 양자화 방식은 예측 오차를 여러 구간으로 분할하여 두 단계로 균일 양자화함으로써 기존 단일 단계 양자화 방법들에서 넓은 예측 오차의 범위를 전체 양자화 범위로 설정함에 따라 복원된 3차원 모델의 형태가 심하게 왜곡되는 한계를 극복하였다. 본 논문에서 보인 결과로 예측 이단계 양자화 방법이 3차원 메쉬 모델의 위치 정보 압축에 효과적인을 확인하였다. 본 연구에서는 Witten이 제안한 산술부호기를 사용하였는데, 이를 MPEG-4에서 사용된 산술부호화기로 대체하면 더욱 성능이 향상 될 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] G. Taubin, W. Horn, and F. Lazarus, "The VRML Compressed Binary Format - ISO/IEC 14772-3 Editor's Draft 5," *ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 MPEG98/m3062*, Feb. 1998.
- [2] ISO/IEC 14772-1, "VRML97: The Virtual Reality Modeling Language," <http://www.vrml.org/Specifications/>, Dec. 1997.
- [3] ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 N2301, "SNHC Verification Model 9.0 [3D Mesh Encoding ]", July 1998.
- [4] G. Taubin and J. Rossignac, "Geometric

compression through topological surgery," *ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 MPEG98/m3059*, Feb. 1998.

- [5] G. Taubin, W. Horn, F. Lazarus, and J. Rossignac, "Geometric coding and VRML.," *ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 MPEG98/m3061*, Feb. 1998.
- [6] Yo-Sung Ho and Jeong-Hwan Ahn, "Geometry compression of 3D meshes using optimal quantization for prediction errors," *ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 MPEG98/m3751*, July 1998.
- [7] Yo-Sung Ho and Jeong-Hwan Ahn, "Geometry compression of 3D meshes using adaptive quantization for prediction errors," *ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 MPEG98/m3997*, Oct. 1998.
- [8] 최진수, 이명호, 안치득, "예측 잉여신호 벡터 양자화를 이용한 3차원 메쉬 모델 부호화", *방송공학회논문지*, 제2권, 제2호, pp. 136- 145, 1997년 12월.
- [9] ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 N2303, "Description of core experiments on 3D mesh coding," pp. 6-10, July 1998.
- [10] Jin Soo Choi, Jinyoung Yang, Myoung Ho Lee, and Chieteuk Ahn, "Geometry coding using Predictive Residual Vector Quantization," *ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 MPEG98/m4054*, Oct. 1998.
- [11] I. H. Witten, R. M. Neal, and J. G. Cleary, "Arithmetic Coding for Data Compression," *Commun. ACM*, vol. 30, no. 6, pp. 520-540, June 1987.
- [12] A. Gersho and R. M. Gray, *Vector Quantization and Signal Compression*, Boston, MA: Kluwer, 1992, pp. 451-159.

이 호 장(Ho-Jang Lee)



1993년 2월 : 서울시립대학교 전자공학과 졸업(공학사)  
 1999년 2월 : 서울시립대학교 전자공학과 졸업(공학석사)  
 1999년 3월~현재 : 산업기술정보원(KINITI) 기술이전정보센터

<주관심 분야> 영상처리, 영상통신

박 인 성(In-Sung Park)

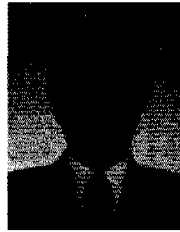


1989년 2월 : 서울시립대학교 전자공학과 졸업(공학사)  
 1999년 3월~현재 : 서울시립대학교 전자공학과 석사과정

<주관심 분야> 영상처리, 영상통신 공학

김 용 한(Yong-Han Kim)

정회원



1982년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과 졸업(공학사)  
 1984년 2월 : 서울대학교 대학원 제어계측공학과 졸업(공학석사)

1990년 12월 : Rensselaer Polytechnic Institute 졸업(공학박사)

1984년 3월~1996년 3월: 한국전자통신연구원

1991년 10월~1992년 9월: 일본 NTT 휴먼인터페이스연구소 재원연구원

1996년 3월~현재: 서울시립대학교 전자전기공학부 조교수

<주관심 분야> 영상 압축 부호화, 멀티미디어 통신