

주 제

3차원 영상 및 동영상의 새로운 표현 및 압축 기법

서울대학교 박성범, 고려대학교 김창수, 서울대학교 이상욱

차례

I. 서론

II. 메쉬 기반 3차원 영상의 표현

III. 3차원 메쉬 영상의 압축

IV. 3차원 메쉬 부호화와 관련된 최근 연구 동향

V. 결론

요약

3차원 영상 미디어는 산업 전반에서 널리 활용되고 있다. 그러나 방대한 3차원 영상의 원본 데이터량은 3차원 영상 데이터의 과급을 저해하는 걸림돌이었다. 이로 인해 3차원 영상의 효율적인 표현 및 압축에 대한 많은 관심이 모아졌으며 괄목할 만한 연구 성과들이 최근 10년 사이에 도출되었다. 3차원 메쉬 영상의 단일해상도(single-resolution) 및 점진적(progressive) 복원을 제공하는 압축 기법들이 소개되었으며, 최근에는 3차원 영상 시퀀스(sequence)의 새로운 표현 및 압축, 유무선망을 통한 3차원 영상의 전송 등 확장된 연구 주제들이 논의되고 있다. 본 논문에서는 3차원 메쉬 영상의 표현 및 압축에 관련된 최신 연구 동향을 정리한다. 이를 위해 3차원 영상의 압축 기법을 영상의 복원 방식에 따라 단일해상도 및 점진적 기법으로 분류하고, 각 범주의 기법들을 소

개한다. 또한 컴퓨터 그래픽 애니메이션의 발전과 함께 새롭게 부각된 3차원 메쉬 시퀀스의 표현 및 압축 기법에 대한 동향을 소개한다. 마지막으로 3차원 메쉬 영상의 오류에 강인한 전송 기법을 소개하고자 한다.

I. 서론

디지털 미디어 기술 및 컴퓨터 하드웨어의 발전, 인터넷의 보급과 함께 3차원 영상 미디어는 컴퓨터 게임, 3차원 TV, CAD (computer aided design), 가상현실 및 의료영상 등 산업 전반에서 다양하게 활용되고 있다. 일반적으로 3차원 영상은 삼각형 메쉬(triangular mesh) 구조를 이용하여 표현된다. 3차원 메쉬 영상은 메쉬 구조를 표현하는 연결정보(connectivity information) 및 메쉬 꼭지점

※ 본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업(IITA-2005-C1090-0502-0038)의 연구결과로 수행되었습니다.

(vertex)의 3차원 위치정보(geometry information)로 구성된다. 따라서 3차원 메쉬 영상은 균일 격자(regular grid)위에 화소의 계조값이 표현되는 2차원 영상/비디오 데이터에 비해 원본 데이터량이 방대하다.

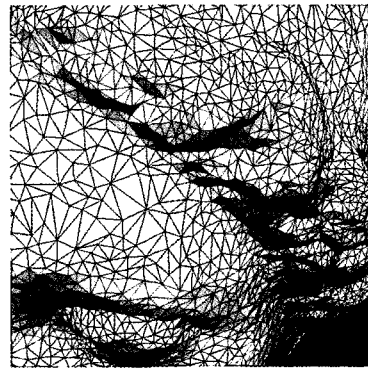
방대한 메쉬 영상을 효율적으로 표현하는 메쉬 압축 기술은 3차원 영상처리의 기반 기술로 인식되었으며, 컴퓨터 그래픽스(computer graphics) 분야를 중심으로 메쉬 기반 영상의 표현 및 압축에 대한 연구가 시도되었다[1-3]. 초기에는 메쉬 영상을 형성하는 연결정보 및 위치정보 모두에 대한 압축 기법들이 소개되었다[1-8]. 하지만 연결정보의 중요도를 완화해주는 준균일 메쉬 표현(semi-regular mesh representation) 방법[9]이 소개되면서 부호화 비트(bits)를 위치정보 부호화에 주로 할당하는 웨이블릿(wavelet) 기반 압축 기법이 도출되었다[10]. 또한 메쉬 압축 기법의 개발 초기에는 단일 해상도(single-resolution) 메쉬 복원을 가능케 하는 기법들이 제안되었으나[1-4], 점차 영상 전송 및 영상 렌더링(rendering) 등에서 유연성을 제공하는 점진적(progressive) 메쉬 압축 기법들이 컴퓨터 그래픽스 및 영상처리 분야에서 소개되었다[5-8,10].

더욱이 메쉬 압축에 대한 연구 성과들이 도출되면서 3차원 영상 압축의 표준화에 대한 논의 또한 활발하게 전개되었다[11,12]. 1997년 VRML(virtual reality modeling language) 표준이 마련되어 3차원 영상 저장 및 전송의 규약이 제정되었다[11]. ISO/IEC의 MPEG-4 표준화에서 3차원 메쉬 압축(3-D mesh coding, 3DMC)의 표준화가 대두되었으며 단일해상도 부호화[2]의 표준화가 정립되었다. 더욱이 MPEG-4 3DMC에는 점진적 영상 부호화, 오류 강인 부호화 및 스케일러를 부호화(scalable coding) 등이 선택사항으로 추가되었다[12].

본 논문에서는 메쉬 기반 3차원 영상의 압축 기법에 대한 과거 도출된 주요 연구 성과 및 최신 연구 동향을 소개하고자 한다. 우선 주요 압축 기법들을 단일 해상도 및 점진적 부호화로 분류한다. 그리고 각각 범주에 해당하는 기법들을 연결정보 부호화 및 위치정보 부호화 측면에서 서술한다. 3차원 메쉬 압축 기법에 대한 보다 자세한 개관 및 요약은 [24]에서 찾을 수 있다. 최종적으로 본 논문에서는 3차원 메쉬 부호화와 관련된 최신 이슈들인 메쉬 시퀀스 압축 및 메쉬 영상의 오류 강인 부호화에 대해 기술하며 본 논문을 끝맺고자 한다.



(a)



(b)

(그림 1) 메쉬 기반 3차원 영상 표현: (a) 위치정보, (b) 연결정보.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서 메쉬 기반 3차원 영상의 표현 형식을 간략하게 정리한다. III 장에서 최신 메쉬 영상 압축 기법들을 단일해상도 부호화 및 점진적 부호화 기법으로 구분하여 소개한다. IV 장에서는 메쉬 영상 부호화에 관련된 최근 기술 동향을 기술한다. 마지막으로 V장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 메쉬 기반 3차원 영상의 표현

삼각형 메쉬 구조는 컴퓨터 그래픽스를 중심으로 3차원 형상을 표현하기 위해 널리 이용되고 있다. 그림 1에 제시되었듯이 개별 메쉬 삼각형은 원본 3차원 물체의 곡면을 부분 선형 근사(piecewise linear approximation)하고 있다. 이때 (그림 1 (a))와 같이 삼각형을 구성하는 꼭지점의 3차원 좌표값들은 위치정보를 형성하며, (그림 1 (b)) 표에 요약된 삼각형의 연결 구조는 연결정보로 정의된다. 따라서 메쉬 기반 3차원 영상처리를 수행하기 위해선 위치정보와 연결정보 쌍방의 활용이 필요하다[1-8].

위상 구조(topological structure) 측면에서 메쉬 구조가 구(sphere)와 동질(homeomorphic)이며 메쉬 구조에서 경계부(boundary)가 발견되지 않을 경우 단순 메쉬(simple mesh)라고 정의된다[13]. 특히 단순 메쉬 구조는 다음의 Euler 방정식을 만족한다.

$$v - e + f = 2. \quad (1)$$

이때 v 는 꼭지점 개수, e 는 에지(edge) 개수, f 는 삼각형 수를 각각 의미한다. v , e 및 f 가 상당히 크다고 가정하자. 이때 단일 에지가 두 삼각형에 의해 공유되므로 다음의 관계를 갖는다.

$$e = 3f/2. \quad (2)$$

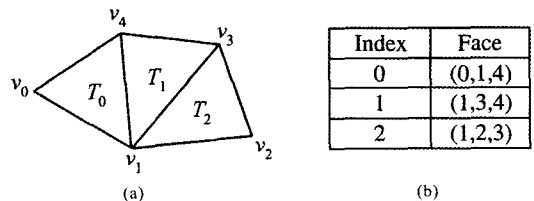
또한 꼭지점의 차수(degree) d 는 꼭지점에 연결된 에지의 수이며 메쉬 구조 전체 차수를 D 로 정의하면 D 는 (1), (2)에 의해 다음과 같이 정리된다[13].

$$D = \sum_{i=0}^{v-1} d_i = 3f. \quad (3)$$

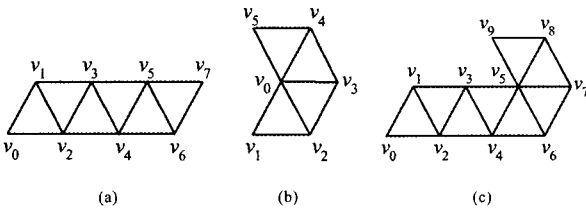
따라서 메쉬 꼭지점들의 평균 차수는 6임을 확인할 수 있다. 대부분의 꼭지점 차수가 6일 경우 해당 메쉬 구조를 준균일(semi-regular) 메쉬 구조라고 정의한다. 준균일 구조는 메쉬 영상의 연결정보 압축 분야 및 불균일(irregular) 메쉬를 준균일 구조로 변형해주는 리메싱(remeshing) 분야와 밀접한 관계를 맺고 있다[9,10].

III. 3차원 메쉬 영상의 압축

본 장에서는 3차원 메쉬 영상의 주요 압축 기법들을 소개한다. 메쉬 압축의 연구 초기에는 단일 해상도 복원을 기반으로 하는 기법들이 소개되었다[1-4]. 그러나 단일해상도 메쉬 영상은 압축 비트스트림(bitstream)의 전송 및 렌더링 과정 등에서 문제점을 도출시켰다. 따라서 최근의 연구는 비트스트림 전송 및 복원의 유연성을 보장하는 점진적 부호화에 집중되고 있는 실정이다[5-8,10].



(그림 2) VRML을 이용한 메쉬 표현 [24]: (a) 삼각형 메쉬 연결 구조, (b) 개별 삼각형을 구성하는 꼭지점 인덱스 집합.



(그림 3) 스트립을 이용한 연결정보 표현 [24]: (a) 삼각형 스트립(strip), (b) 삼각형 팬(fan), (c) 일반화된 삼각형 스트립.

일반적으로 메쉬 압축 시 연결정보 및 위치정보를 독립적으로 압축하는 방식을 이용하였다[1,2,5,7]. 그러나 최근에 연결정보와 위치정보의 상관관계를 이용하여 압축 성능을 개선한 기법들이 소개되고 있다[3,4,6,8]. 더욱이 리메싱 기법을 이용하여 연결정보의 엔트로피를 획기적으로 감소시킴으로써 높은 부호화 이득을 얻는 알고리즘도 제안되었다[10].

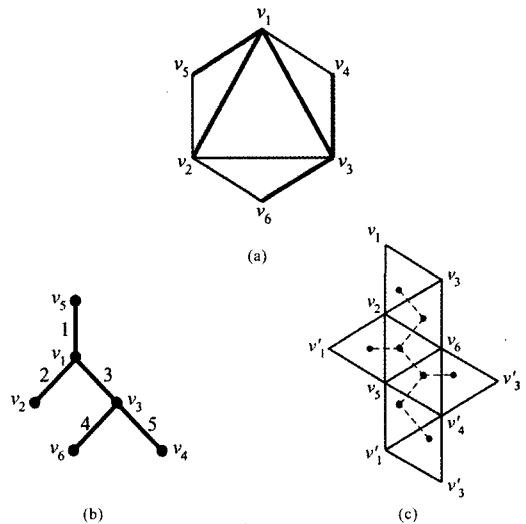
3.1. 단일해상도 메쉬 부호화

3.1.1 연결정보 부호화 기법

삼각형 메쉬 영상의 연결 구조를 표현하는 기본적인 방법은 꼭지점의 인덱스(index)를 ASCII 혹은 이진(binary) 형식으로 표현하는 VRML 표준을 이용하는 것이다[11]. (그림 1)은 VRML의 메쉬 표현 기법을 소개하고 있으며, (그림 1 (b))와 같이 각각의 삼각형은 3개의 꼭지점 인덱스의 집합으로 표현된다. VRML 표현법은 그래픽 하드웨어 처리비용을 감소시키는 장점이 있지만, 전체 꼭지점 v 에 대해 $6 \log_2 v$ bpv (bit-per-vertex)에 해당하는 비트 (bit)량이 요구되는 단점이 있다.

이러한 단점을 보완하기 위해 삼각형 구조를 스트립(strip), 트리(tree)와 같은 데이터 구조를 이용하여 표현하는 기법들이 연결정보 압축을 위해서 소개되었다[1,2]. 예를 들어, Deering은 (그림 3)과 같이 메쉬 구조를 다수의 삼각형 스트립으로 분할하고 꼭

지점 버퍼(buffer)를 이용하여 각각의 일반화된 삼각형 스트립을 압축하여 요구 비트량을 11 bpv로 개선하였다[1]. 더욱이 Taubin 등은 삼각형간의 연결 구조를 단일 이진 트리(single binary tree)로 표현하여 스트립 표현법보다 효율적인 연결정보 표현이 가능하게 하였다[2]. Taubin 등은 (그림 4)와 같이 다양체(manifold) 메쉬를 컷에지를 따라 전개하였고 전개된 삼각형들을 (그림 4 (c))와 같이 이진 트리로 표현하였다. 특히 이진 트리 구조를 연속길이 부호화(run-length coding)하여 2.4~7.0 bpv의 보다 향상된 연결정보 압축 결과를 제공하였다[2].



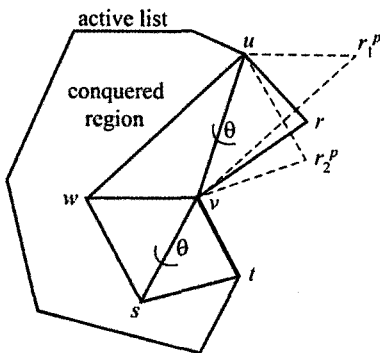
(그림 4) 이진트리를 이용한 연결정보 표현 [24]: (a) 정팔면체 메쉬 데이터, (b) (a)를 전개하는 컷에지(cut edge, 굵은 선)들로 표현된 꼭지점 트리, (c) 컷에지로 전개된 삼각형의 이진 트리.

Touma 등은 꼭지점의 차수를 이용한 획기적인 메쉬 연결정보 압축 기법을 제안하였다[3]. 이 기법에서는 메쉬 삼각형의 연결정보가 꼭지점의 차수 탐색 결과에 의해 결정되도록 설계되었다. 즉 꼭지점의 차수와 예외적인 경우를 고려하는 기호 등이 연결정

보로 저장되었다. 따라서 [3]에서는 차수 분포의 엔트로피에 의해 연결정보의 부호화 비트량이 결정되었다. 특히 메쉬 구조가 준균일 구조일 경우 차수의 분포가 6에 집중되고 분포의 엔트로피가 0에 근접함으로써 매우 우수한 압축 효율을 얻을 수 있었다[3]. 다만 꼭지점의 차수를 이용한 기법[3]은 실시간 렌더링(real-time rendering)에서 그래픽 하드웨어에 상당한 부담을 제공하므로, 꼭지점이 아닌 삼각형에 기반한 탐색 기법이 소개되어 실시간 렌더링을 지원하였다[4].

3.1.2 위치정보 부호화 기법

VRML 형식에서 꼭지점의 좌표값은 IEEE 32비트 부동소수표기법(floating point representation)으로 저장된다[11]. 그러나 부동소수표기법은 인간 시각의 정밀도와 비교하여 지나치게 정밀하므로 전양자화(pre-quantization) 및 예측(prediction) 기법을 적용한 위치정보 압축 기법들이 소개되었다[1-8]. 즉 2차원 영상/비디오 압축에서 예측 및 양자화의 과정으로 계조값을 부호화 하는데 반해, 대부분의 메쉬 부호화 기법들은 전양자화를 통해 실수 좌표값을 8~16 비트 해상도를 갖는 정수로 변환하고 예측 기법을 적용하여 위치정보를 압축한다.



(그림 5) 평행사변형(parallelogram) 예측을 이용한 꼭지점 위치 예측 [24].

초기의 예측 기법들은 연결정보 압축 과정 중 버퍼에 저장되는 꼭지점의 전후 관계를 이용한 선형 예측을 활용하고 있다[1,2]. 예를 들어, 버퍼에 저장된 K 꼭지점에서 현재 꼭지점의 예측값 w'_n 은 다음과 같다.

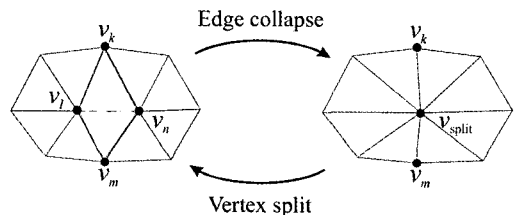
$$w'_n = \sum_{i=1}^K \lambda_i \cdot v_{n-i} \quad (4)$$

이때, $\Lambda = \{\lambda_i | i=1, \dots, K\}$ 는 다음과 같은 평균자승오차(mean square error)를 최소화하도록 결정된다[2].

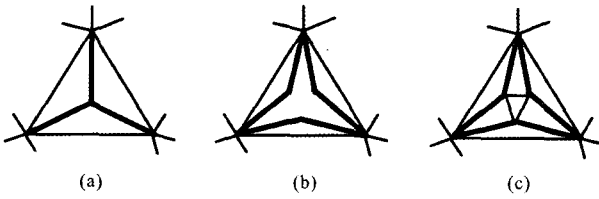
$$\Lambda = \arg \min \left[(v_n - w'_n)^2 \right] \quad (5)$$

따라서 실제 부호화되는 값은 $v_n - w'_n$ 이며, 8비트 전양자화 조건에서 13bpv의 위치정보 압축 성능을 제공한다[2]. 그러나 선형 예측 기법에서는 삼각형 메쉬 구조 중에서 단지 꼭지점의 스트림만 활용되었기 때문에 저조한 부호화 성능을 보인다.

이러한 한계를 극복하기 위해 삼각형 팬(fan) 위의 꼭지점 및 삼각형간 형상정보가 함께 고려된 평행사변형(parallelogram) 예측 기법이 제안되었다[3]. (그림 4)에 꼭지점 r 의 좌표를 예측하기 위한 평행사변형 예측 과정이 도시되었다. 우선 팬 위의 꼭지점 u , w 및 v 에서 평행사변형 대응점 r_1^p 를 다음과 같이 예측한다.



(그림 6) 에지 제거(edge collapse) 연산 및 꼭지점 분할(vertex split) 연산.



(그림 7) 숲 분할(forest split) 연산 [24]: (a) 숲(굵은 선)이 표시된 원본 메쉬, (b) 숲 에지에서 메쉬 절개, (c) 절개부의 삼각화(triangulation)를 통한 연결정보 복원.

$$r_1^p = v + u - w. \quad (6)$$

다음으로 v 와 인접한 팬 삼각형간 평균 교각(crease angle) θ 를 조사하여 삼각형 Δuvw 와 $\Delta r_1^p uv$ 의 교각이 θ 가 되도록 r_1^p 를 조정한다. 따라서 최종적으로 예측값 r_1^p 를 (그림 5)와 같이 얻는다. 평행사변형 예측은 (6)에서 확인할 수 있듯이 선형 예측의 확장된 형태이지만 주변 삼각형간의 교각정보를 이용하여 단순 선형 예측 기법에 비해 bpv 측면에서 30% 정도 향상된 압축 성능을 제공한다[3].

3.2. 점진적 메쉬 부호화

본 절에서는 최근까지 제안된 점진적 메쉬 압축 기법들을 연결정보의 점진적 부호화 기법 [5-7] 및 위치정보의 점진적 부호화 기법 [8,10]으로 분류하여

기술한다. 일반적으로 위치정보의 점진적 압축 기법이 비트율-왜곡(rate-distortion) 측면에서 연결정보의 점진적 부호화 기법에 비하여 효율적인 부호화 성능을 보여주고 있다. 하지만 연결정보의 점진적 부호화 기법은 랜더링 과정에서 삼각형의 개수와 같은 랜더링 요소(rendering primitive)를 적응적으로 변화시킬 수 있기 때문에 낮은 하드웨어 비용을 요구하는 응용 분야에서 널리 활용되고 있다[5-7].

3.2.1 연결정보의 점진적 부호화

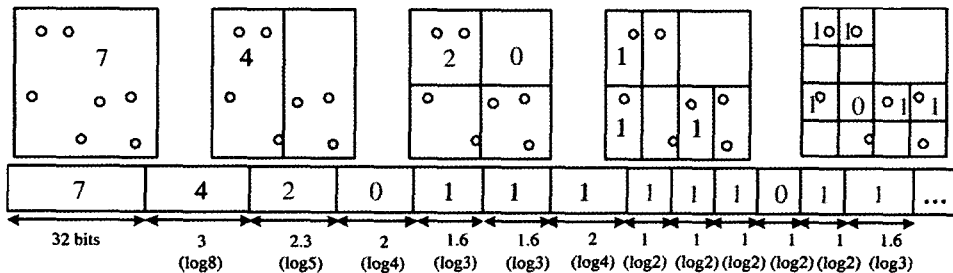
일반적으로 연결정보의 점진적 부호화 기법에서는 원본 메쉬 영상을 다중해상도 모델(levels-of-details, LOD)로 재구성한다[5-7].

$$(M_1, M_2, \dots, M_L). \quad (7)$$

이때 M_1 은 최저 해상도 혹은 기저(base) 메쉬이고 M_L 은 최고 해상도 혹은 원본 메쉬 영상이다. 만약 M_i 에서 M_j 를 복원하는 D_j 를 추출할 수 있다면, 부호기에서는 (7)을 변형하여 다음의 정보만 전송하면 된다.

$$(M_1, D_2, \dots, D_L). \quad (8)$$

복호기에서는 M_1 과 순차적인 D_j 를 이용하여 (7)의 점진적 영상 복원을 제공한다. 따라서 연결정보의 점진적 부호화 기법들은 D_j 를 정의하는 방법에 따라 알



(그림 8) K-D 트리를 이용한 메쉬 영상의 위치정보 부호화[24].

고리들을 정리할 수 있다.

Hoppe는 (그림 6)에 도시된 에지 제거(edge collapse) 연산 및 꼭지점 분할(vertex split) 연산을 도입하여 메쉬 영상의 점진적 부호화의 개념을 정립하였다[5]. 에지 제거 연산은 저해상도 모델을 구성하며 꼭지점 분할은 고해상도 모델을 복원하는 역할을 하는데 꼭지점 분할에 필요한 정보가 D_i 에 저장된다. (그림 6)의 경우 분할 꼭지점 v_{split} 및 분할 에지를 결정하는 v_k 및 v_m 들이 D_i 의 연결정보를 구성하며, v_l 및 v_n 의 좌표값 복원에 필요한 벡터 $\overrightarrow{v_l v_{split}}$ 및 $\overrightarrow{v_n v_{split}}$ 이 위치정보에 해당된다. Pajarola 등은 하나의 D_i 에 다수의 꼭지점 분할 연산을 묶음으로써 복원시 화질의 개선단계(granularity)를 희생하며 Hoppe의 기법에 비해 개선된 부호화 성능을 도출할 수 있었다[6].

이와는 별도로 MPEG-4 3DMC[12]에 점진적 메쉬 압축 표준으로 채택된 기법이 점진적 숲 분할(progressive forest split, PFS) 기법이다[7]. (그림 7)에 제시된 것처럼 PFS에서는 숲 분할 연산자를 이용하여 연결정보를 복원한다. 이때 숲 에지 및 절개 영역의 삼각화 정보가 연결정보로 정의된다. 또한 새로운 꼭지점의 위치는 Taubin의 메쉬 평탄화 기법[14]을 활용하여 위치를 예측하고 오차를 Huffman 부호화하였다. 비록 PFS 기법이 MPEG-4 3DMC의 표준화에 채택되었지만 비율-왜곡 측면에서 Pajarola 등의 기법에 비해 같은 화질에서 2배 이상의 비트량을 요구하는 것으로 알려져 있다[6].

3.2.2 위치정보 점진적 부호화

일반적으로 메쉬 압축 기법들은 연결정보와 위치정보를 독자적으로 압축하거나 연결정보를 기반으로 위치정보를 부호화한다[1-7]. 그러나 최근의 경향은 메쉬 영상에서 연결정보의 중요도를 감소시키고 위치정보 압축에 많은 비트량을 할애하고 있다. 이와

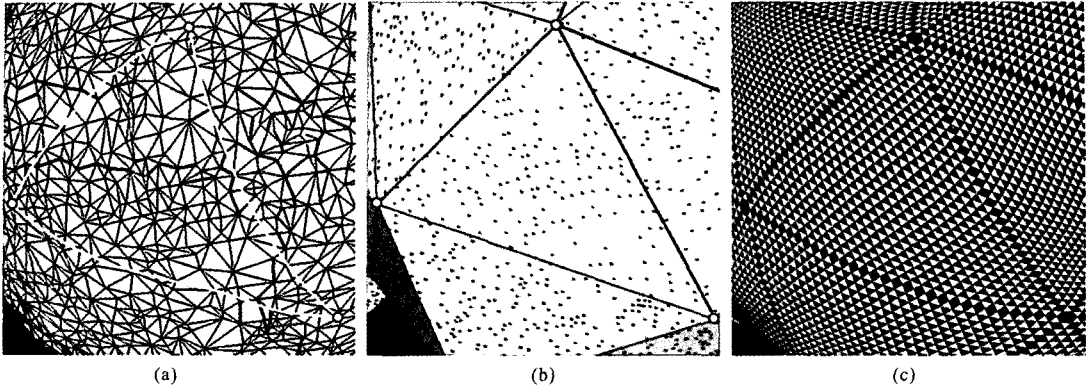
같은 추세는 K-D (K-dimensional) 트리 분해 기법[8]과 웨이블릿(wavelet) 기반 메쉬 영상 압축[10] 등에서 공통적으로 관찰되고 있다.

Gandoin 등은 메쉬 꼭지점 집합의 K-D 트리 분해에 기반한 위치정보의 점진적 부호화 기법을 제안하였다[8]. Gandoin 등의 기법에서는 메쉬 위치정보에 의해 연결정보가 결정되기 때문에 우선 K-D 트리 분해를 이용하여 꼭지점 좌표값들을 점진적으로 표현 및 압축한다. 그리고 꼭지점 좌표의 인접 해상도 간 연결정보 차이를 부수적으로 부호화한다[8].

(그림 8)과 같이 2-D 영역에 7개의 꼭지점이 존재한다고 가정하자. [8]에서 위치정보 압축을 위해 부호화되는 값은 K-D 분해 후 부분영역에 존재하는 꼭지점 수이다. 특히 이전 단계의 꼭지점 수는 제공되므로 현 단계의 좌측 혹은 상단의 분할 영역만 부호화된다. 예를 들면, (그림 8)과 같이 전체 꼭지점 수 7이 32비트로 전송된 뒤 분해를 수행하고 좌측 분할 영역의 꼭지점 수인 4를 비트를 할당하여 전송한다. 복원시 각 부분 영역에 꼭지점이 존재한다면 부분 영역에 존재하는 꼭지점 개수에 관계없이 한 개의 꼭지점이 부분영역에 제공되고 부분영역의 중심에 꼭지점이 위치하게 된다. 따라서 K-D 트리 분할의 결과가 복원될수록 꼭지점의 개수 및 각 꼭지점의 좌표가 점진적으로 복원된다[8].

Khodakovsky 등은 2차원 웨이블릿 압축을 3차원 메쉬 압축에 적용하여 획기적인 부호화 효율을 제공하였다[10]. [10]에서는 리메싱 기법을 이용하여 불균일 메쉬 영상을 균일 영상으로 변환하였으며 [9], Loop의 서브디비전(subdivision) 기법을 채용하여 리메싱 후 생성한 균일 메쉬를 기저 메쉬 및 웨이블릿 계수(coefficient)들로 표현하였다[15].

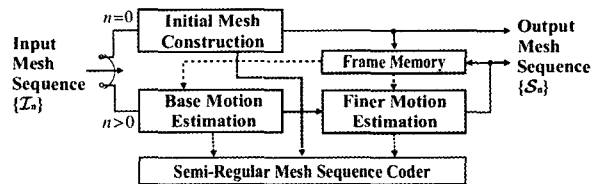
(그림 9)에서 실제 3차원 메쉬 영상의 리메싱 예를 도시하였다. (그림 9 (a))의 흰색 곡선으로 둘러싸인 곡면의 꼭지점들은 (그림 9 (b))의 기저 메쉬의



(그림 9) 3차원 메쉬의 리메싱: (a) 불균일 구조의 메쉬 표면, (b) (a)의 대응 기저 메쉬, (c) 리메싱 후 제공된 준균일 메쉬 표면.

대응 삼각형 위로 투영된다. 따라서 투영된 꼭지점 좌표를 이용하여 생성되는 서브디비전 꼭지점의 좌표를 보간하면 (그림 9(c))의 리메싱 결과를 얻는다. 이때 (그림 9(c))는 원본 메쉬의 위치정보를 보존하면서 연결정보를 준균일 구조로 변형된 영상이다. 따라서 (그림 9 (b))의 기저 메쉬 연결정보와 서브디비전 수행 횟수를 알면 준균일 메쉬 연결정보를 복원할 수 있다. 위치정보의 경우 각 서브디비전 단계별 좌표의 변화량이 웨이블릿 계수로 표현되어 있다. 따라서 웨이블릿 계수들은 2차원 영상/비디오 압축에서 널리 활용된 SPIHT 기법을 이용하여 압축된다[16].

비트율-왜곡 측면에서 웨이블릿 기반 압축 기법은 [6]의 연결정보의 점진적 부호화 기법에 비해 대략 4배정도 우수한 압축률을 제공하였다[10]. 특히 이와 같은 부호화 효율은 단일해상도 압축기법 중 가장 우수한 차수 기반 기법[3]보다 우수하다. 이는 Khodakovsky 등의 기법이 불균일 메쉬를 준균일 구조로 변환하고 Loop 서브디비전으로 웨이블릿 계수를 추출하여 하여 기존 2차원 웨이블릿 압축 기법을 채용할 수 있었기 때문이다[10].



(그림 10) 3차원 메쉬 시퀀스 부호화 시스템[19].

IV. 3차원 메쉬 부호화와 관련된 최근 연구 동향

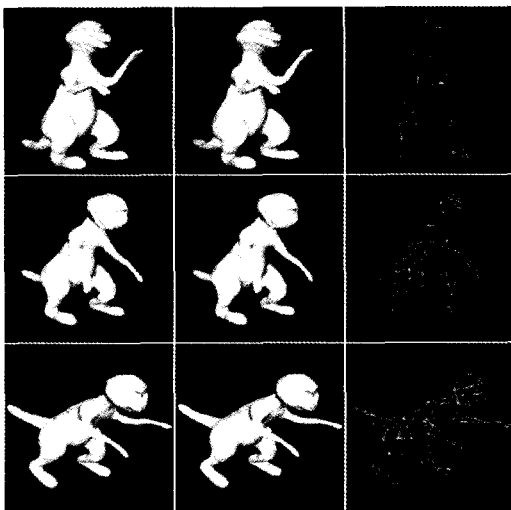
최근 3차원 애니메이션 영화의 성공으로 3차원 시퀀스 영상의 표현 및 압축에 대한 관심이 증대되었다. 또한 디지털 멀티미디어의 유무선 전송과 더불어 3차원 메쉬의 전송에 대한 연구도 태동기에 접어들었다. 따라서 본 장에서는 3차원 메쉬 압축의 최신 경향으로서 3차원 메쉬 시퀀스 데이터의 압축과 3차원 메쉬 영상의 오류에 강인한 전송 기법에 대해 소개한다.

4.1. 3차원 메쉬 시퀀스 데이터 부호화

2차원 비디오의 압축과 마찬가지로 3차원 메쉬 시

퀀스 데이터의 압축도 시퀀스 내부의 공간-시간적 (spatio-temporal) 상관성을 모델링하여 효율적인 압축 기법의 개발을 도모하고 있다[17-19]. 예를 들어 주성분 분석(principal component analysis, PCA)을 이용하여 시퀀스를 공간, 시간 및 특이값(singular value)들로 재구성하는 기법이 소개되었다[17]. 또한 재구성된 시간성분에 대한 선형예측 기법이 도입되어 PCA 기반 시퀀스 압축 효율을 개선하였다[18]. 그러나 PCA 연산의 복잡도 및 프레임 연결 구조가 같은 동형(isomorphic) 시퀀스에만 기법이 적용되는 제한 등은 PCA 기반 시퀀스 압축 기법의 한계로 지적되고 있다[17,18].

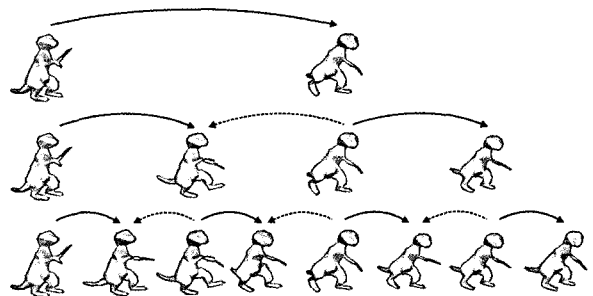
PCA 기반 시퀀스 압축의 한계를 극복한 기법이 최근 Yang 등에 의해 제안되었다[19]. (그림 10)은 Yang 등이 제안한 메쉬 시퀀스 압축 기법의 블록도이다. 우선 메쉬 시퀀스의 첫 번째 프레임(frame)이 준균일 메쉬로 변형된다. 다음 3차원 움직임 예측(motion estimation)으로 이후 프레임들을 첫 번째 프레임의 준균일 구조에 매핑(mapping)한다. 마지막으로 준균일 메쉬 구조에서 예측된 위치정보 계수



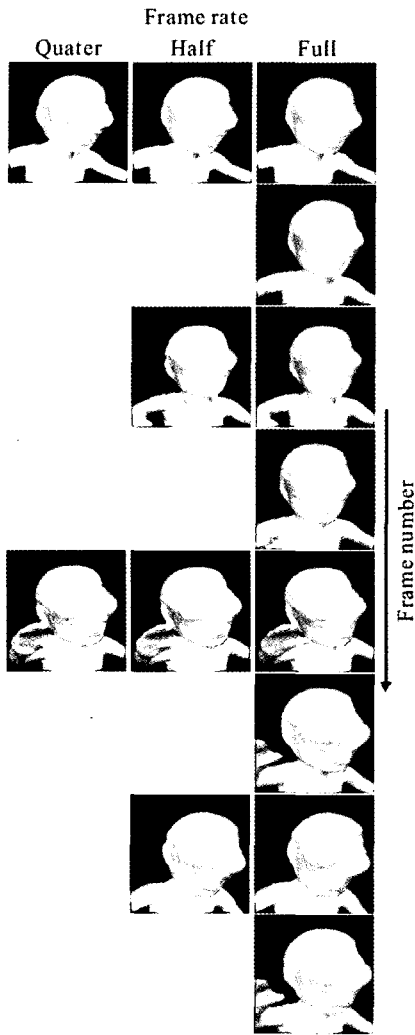
(그림 11) 3차원 움직임 예측을 이용한 메쉬 시퀀스의 준균일 표현 [19].

를 SPIHT 기법[16]을 이용하여 압축한다. 이 기법의 대표적인 특징은 일반적인 3차원 메쉬 시퀀스를 리메싱 및 3차원 움직임 예측을 이용하여 동형 준균일 메쉬 시퀀스로 표현했다는 점이다[19]. 예를 들어, (그림 11)의 1열과 같이 일반 메쉬 시퀀스가 주어지면 리메싱 기법을 이용하여 시퀀스의 첫 번째 프레임을 준균일 메쉬로 변형한다. 그리고 첫 번째 프레임의 기저 메쉬를 3차원 움직임 예측을 이용하여 불균일 프레임들과 일치시킴으로서 (그림 11)의 3열과 같은 불균일 프레임에 대한 동형 기저 메쉬를 얻는다. 이러한 과정을 거쳐 일반 불균일 메쉬 시퀀스는 동형 준균일 메쉬 시퀀스로 변환된다[19].

Yang 등의 알고리즘에는 또한 2차원 비디오 부호화의 스케일러블(scalable) 기법이 적용되었다[19]. (그림 12)에서 도시한 바와 같이 시간적(temporal) 스케일러블 복원을 위한 계층적 예측(hierarchical prediction)이 도입되었는데[19], 프레임의 시간 순서가 아닌 계층 구조에 따라 0-4-2-6-1-3-5-7 순서로 프레임이 압축되었다. 더욱이 프레임 압축에서 전방향 예측(그림 12의 실선) 및 역방향 예측(그림 12의 점선)을 병행하여 움직임 예측 성능을 향상시켰다. 따라서 복호기에서는 (그림 13)에서 관찰되는 것과 같이 랜더링 환경에 따라 복원되는 메쉬 시퀀스의 시간당 프레임수(frame rate)를 가변적으로 조정할 수 있다.



(그림 12) 시간적 스케일러블 표현을 위한 계층적 예측[9]



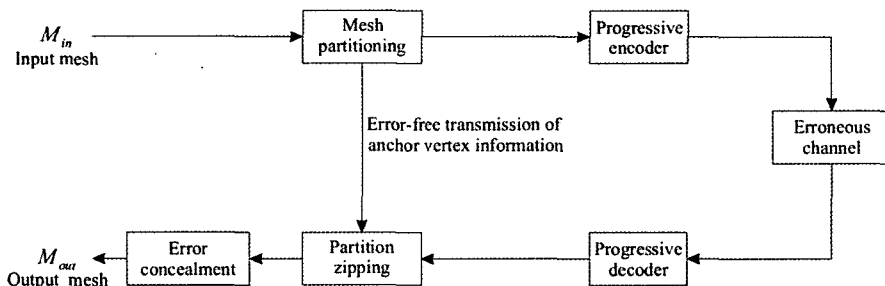
(그림 13) 메쉬 시퀀스의 시간적 스케일러블 부호화 [19].

4.2. 3차원 영상의 오류에 강인한 전송

최근 급격하게 증가된 3차원 영상 미디어의 이용과 더불어 3차원 영상의 효율적인 전송에 대한 관심이 증가하고 있다. 특히 전송오류에 강인한 3차원 영상 비트스트림의 설계는 3차원 영상의 전송 문제 중에서 중요한 과제로 대두되고 있다[20-22].

2차원 비디오의 전송 기법에 대한 광범위한 연구 결과에 비해 3차원 영상의 전송에 대한 연구는 태동기이지만 몇 가지 주목할 만한 연구 결과들이 최근에 도출되었다[20-22]. Yan 등은 전송 오류 전파 문제를 완화하기 위해 메쉬 분할을 이용한 전송 기법을 소개하였다[20]. Yan 등의 기법은 신호원 부호화(source coding) 측면에서의 전송 오류에 강인하게 비트스트림을 구성한 기법이었으며, 이에 대해 전송 망 부호화(channel coding) 측면에서 비트스트림을 강인하게 설계한 기법이 소개되었다[21]. 특히 [21]에서는 2차원 비디오 전송에서 활용된 불균등 오류 보호(unequal error protection) 기법이 소개되어, 메쉬 복원에 영향이 큰 정보들을 오류에 보다 강인하도록 설계하였다.

Park 등은 기존 메쉬 분할 기법[20]을 개선하고 오류로 손상된 메쉬 표면을 오류 은닉(error concealment) 기법으로 복구하는 새로운 개념의 3차원 메쉬 전송 기법을 제안하였다[22]. (그림 14)

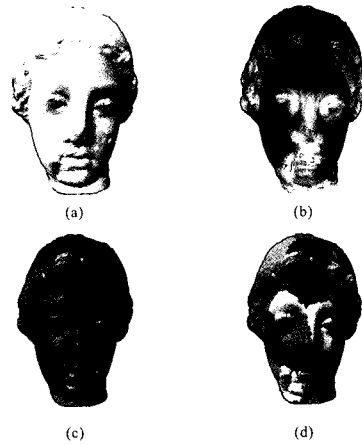


(그림 14) Park 등이 제안한 전송 오류에 강인한 메쉬 압축 알고리즘의 시스템 블록도[22].

에 Park 등이 제안한 3차원 메쉬 전송 시스템이 소개되고 있다. 부호기에서 원본 메쉬 영상을 분할하고 개별적으로 압축하여 전송 오류의 영향을 해당 파티션(partition)으로 제한하였다. 복호기에서는 각 파티션을 복원한 뒤 파티션들을 결합하여 전체 메쉬 영상을 복원한다. 만약 전송 오류에 의해 파티션 정보가 손실되었을 경우, 3차원 오류 은닉 알고리즘을 이용하여 손실된 영역을 복구하고 최종 복원된 메쉬의 화질을 개선하였다[22].

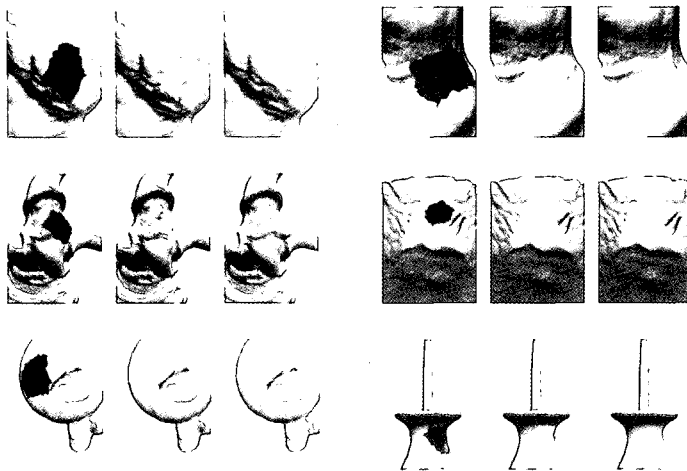
(그림 15)에 Park 등에 의해 개선된 메쉬 분할의 예가 제시되었다[22]. 개선된 분할 기법은 메쉬 표면의 법선벡터 변화량을 이용하여 표면 복잡도를 계산하고 (그림 15 (c))와 같이 원본 메쉬를 단순 영역과 복잡 영역으로 구분한다. 또한 오류로 임의의 파티션의 화질이 급격하게 저하되는 것을 억제하기 위해 GLA(generalized Lloyd algorithm)에 기반하여 그림 7(d)와 같이 균일한 파티션 크기를 갖는 최종 메쉬 분할 결과를 얻는다[23].

더욱이 Park 등의 기법은 전송 오류에 의해 소실된 메쉬 표면을 3차원 오류 은닉 기법으로 복구함으로써, 기존 메쉬 전송 기법[20,21]들의 한계를 극복



(그림 15) 메쉬 표면에 적응적인 분할 기법: (a) 원본 메쉬, (b) 표면 복잡도(밝은 계조가 표면이 복잡함을 의미), (c) 단순 영역 및 복잡 영역의 분류, (d) 최종 분할된 메쉬 패치(patch).

하였다. 특히 손상된 영역의 연결정보는 서브디비전 기법을 활용하여 복구하였고, POCS(projection onto convex sets) 이론을 이용한 형상 보간 기법을 이용하여 손실된 영역의 위치정보를 복구하였다. (그림 16)에 오류에 의해 손상된 메쉬 표면의 복구 예가 제시되었다. 각 데이터 쌍의 첫 번째 영상은 소실되어 어둡게 표시된 메쉬 영상을 보여주며 두 번째 영상은



(그림 16) 손실된 메쉬 영상의 표면 복구. 각 쌍의 가운데 영상이 복구된 영상이며 오른쪽 영상은 비교를 위한 원본 영상이다.

복구된 영상을 의미한다. (그림 16)에서 확인할 수 있듯이 손상된 영역의 화질은 소실된 영역을 3차원 오류 은닉 기법으로 복구함으로써 상당부분 개선되었다. 특히 복구된 영역은 주변 영역과 매끄럽게 연결되는 특징을 보여주고 있다[22].

V. 결 론

본 논문에서는 3차원 메쉬 영상의 압축 및 표현에 대한 최신 연구 동향을 소개하였다. 메쉬 영상의 복원 유형에 따라 단일해상도 압축 기법 및 점진적 압축 기법으로 메쉬 부호화 기법들이 분류하였으며 각각의 범주를 소개하였다. 메쉬 압축의 초창기에는 연결정보의 부호화 및 위치정보 부호화 기법들이 분리되어 개발되거나 연결정보를 이용한 위치정보의 압축 기법들이 제안되었다. 그러나 꼭지점 차수를 이용한 연결정보 부호화 기법이 소개되고 연결정보의 중요도를 감소시키는 준균일 메쉬 표현 기법이 소개되면서 부호화 비트는 주로 위치정보 압축에 집중되는 경향이 관찰되었다. 특히 최근에는 3차원 메쉬 부호화에 웨이블릿 기반 압축 기법이 도입하여 메쉬 부호화의 성능을 크게 향상시켰다.

또한 3차원 영상 처리에서 최근 새롭게 조명되고 있는 3차원 메쉬 시퀀스 데이터의 효율적인 표현 및 압축, 3차원 영상의 전송 오류에 강인한 부호화에 대한 연구들을 소개하였다. 이들 분야는 기존 3차원 영상 압축 분야에 비해 연구의 태동기에 있으나 3차원 영상 미디어의 다양한 활용과 함께 그 중요성이 점차 확대되고 있다.

결론적으로 3차원 영상 미디어의 수효 및 활용은 기하급수적으로 증가하는 추세이다. 따라서 3차원 영상의 효율적인 표현, 압축 및 전송에 대한 연구도 지속적으로 발전할 것으로 예상된다.

[참 고 문 헌]

- [1] M. Deering, "Geometry compression," in *Proc. ACM SIGGRAPH '95*, pp.13-20, Aug. 1995.
- [2] G. Taubin, J. Rossignac, "Geometric compression through topological surgery," *ACM Trans. Graph.* 17(2), pp. 84-115, Mar. 1998.
- [3] C. Touma, C. Gotsman, "Triangle mesh compression," in *Proc. Graphics Interface '98*, pp. 26-34, June 1998.
- [4] S. Gumhold, W. Strasser, "Real time compression of triangle mesh connectivity," in *Proc. ACM SIGGRAPH '98*, pp. 133-140, July 1998.
- [5] H. Hoppe, "Progressive meshes," in *Proc. ACM SIGGRAPH '96*, pp. 99-108, Oct. 1996.
- [6] R. Pajarola, J. Rossignac, "Compressed progressive meshes," *ACM Trans. Graph.* 6(1), pp. 79-93, Apr. 2000.
- [7] G. Taubin, A. Guezic, W. Horn, F. Laarus, "Progressive forest split compression," in *Proc. ACM SIGGRAPH '98*, pp. 123-132, July 1998.
- [8] P. Gandoin, O. Devillers, "Progressive lossless compression of arbitrary simplicial complexes," *ACM Trans. Graph.* 21(3), pp. 372-379, July 2002.
- [9] A. Lee, W. Sweldens, P. Schröder, L. Cowsar, D. Dobkin, "MAPS : Multiresolution adaptive parameterization of surfaces," in *Proc. ACM SIGGRAPH '98*,

- pp. 95–104, July 1998.
- [10] A. Khodakovsky, P. Schröder, W. Sweldens, “Progressive geometry compression,” in *Proc. ACM SIGGRAPH 2000*, pp. 271–278, July 2000.
- [11] Virtual reality modeling language (VRML). ISO/IEC 14772–1, Apr. 1997.
- [12] Coding of audio–visual objects: Visual. ISO/IEC 144962–2, July 2001.
- [13] J. Gross, J. Yellen, *Graph theory and its applications*, CRC Press, 1998.
- [14] G. Taubin, “A signal processing approach to fair surface design,” in *Proc. ACM SIGGRAPH '95*, pp. 351–358, Aug. 1995.
- [15] C. Loop, “Smooth subdivision surfaces based on triangles,” *Master's Thesis*, Department of Mathematics, University of Utah, Aug. 1987.
- [16] A. Said, W. Pearlman, “A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees,” *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol* 6(3), pp. 243–250, June 1996.
- [17] M. Alexa, W. Müller, “Representing animations by principal components,” *Comput. Graph. Forum* 19(3), pp. 411–418, Aug. 2000.
- [18] Z. Carni, C. Gotsman, “Compression of soft–body animation sequence,” *Comput. Graph. Special Issue on Compression* 28(1), pp. 25–34, 2004.
- [19] J.–H. Yang, C.–S. Kim, S.–U. Lee, “Semi–regular representation and progressive compression of 3D dynamic mesh sequence,” accepted for publication in *IEEE Trans. Image Process*.
- [20] Z. Yan, S. Kumar, C.–C. Kuo, “Mesh segmentation schemes for error resilient coding of 3–D graphic models,” *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.* 15(1), pp. 138–144, Jan. 2005.
- [21] G. Al–Regib, Y. Altunbasak, J. Rossignac, “Error–resilient transmission of 3D models,” *ACM Trans. Graph.* 24(2), pp. 182–208, Apr. 2005.
- [22] S.–B. Park, C.–S. Kim, S.–U. Lee, “Error resilient 3–D mesh compression,” accepted for publication in *IEEE Trans. Multimedia*.
- [23] Y. Linde, A. Buzo, R. Gray, “An algorithm for vector quantizer design,” *IEEE Trans. Commun.* 28(1), pp. 84–95, Jan. 1980.
- [24] J. Peng, C.–S. Kim, C.–C. J. Kuo, “Technologies for 3D triangular mesh compression: a survey,” *J. Vis. Commun. Image R.* 16(6), pp. 688–733, Dec. 2005.



박성범

2000년 연세대학교 기계전자공학부 학사
2002년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사
2002년 ~ 현재 서울대학교 전기컴퓨터공학부
박사과정
관심분야 : 3차원 영상표현, 영상압축, 영상전송



김창수

1994년 서울대학교 제어계측공학과 학사
1996년 서울대학교 제어계측공학과 석사
2000년 서울대학교 전기공학부 박사
2000년 ~ 2001년 Visiting Researcher, USC
2001년 ~ 2003년 서울대학교 전기공학부 박사후
연구원

2003년 ~ 2005년 Assistant Professor, Chinese University of Hong Kong
2005년 ~ 현재 고려대학교 전기전자전파공학부 조교수



이상욱

1973년 서울대학교 전기공학과 학사
1976년 Iowa State University 석사
1980년 University of Southern California 박사
1980년 ~ 1981년 General Electric Co., Advanced
Research Engineer
1981년 ~ 1983년 M/A-COM Research Center,

Senior Member of Technical Staff
1983년 ~ 현재 서울대학교 전기공학부 교수
2005년 한국통신학회 회장
관심분야 : 신호처리, 영상압축 및 전송, 컴퓨터 비전