

# 3차원 데이터의 다중 부호화 기법

준회원 박 성 범\*, 종신회원 김 창 수\*\*, 이 상 옥\*\*\*

## Multiple Description Coding of 3-D Data

Sung-Bum Park\* Associate Member, Chang-Su Kim\*\*, Sang-Uk Lee\*\*\* Lifelong Members

### 요 약

본 논문은 3차원 데이터의 다중 부호화(multiple description coding, MDC) 기법을 제안한다. 우선 다수의 평면으로 구성된 3차원 데이터를 그래프 컬러링(graph coloring)을 통해 3차원 데이터 복원 시 동일한 기여도를 제공하는 2개 평면 부분집합(subset)들로 분할한다. 다음으로 복원된 3차원 데이터의 화질을 최대화하기 위해 각 평면 부분집합의 평면 정보를 채널 오류 환경(channel error condition)에 따라 적응적으로 변형시킨다. 변형된 평면 부분집합들은 각각 압축되고 개별 채널을 통해 부호기로 전송된다. 복호기에서 전송된 2개 평면 부분집합 정보 모두가 복호되었을 경우, 복원된 3차원 부분 정보들을 결합하여 고품질 3차원 데이터를 복원한다. 만약 단일 채널만 유효하여 3차원 영상의 부분 정보만 복원될 경우, 3차원 손상부 복구 알고리즘을 적용하여 영상 표면의 손상을 복원함으로써 부드러운 3차원 표면을 재생한다. 따라서 제안하는 기법은 전송 오류 환경이 열악하여 하나의 채널이 완전히 손실된 경우에도 최소한의 3차원 영상 복원 화질을 보장한다.

**Key Words** : 3-D data, Multiple description coding, Graph coloring, Surface recovery

### ABSTRACT

A multiple description coding (MDC) scheme for 3-D Data is presented. First, a plane-based 3-D data is split into two descriptions, each of which has identical contribution in 3-D surface reconstruction. In order to maximize the visual quality of reconstructed 3-D data, then, plane parameters are modified according to channel error condition. Finally, these descriptions are compressed and transmitted over distinct channels. In decoder, if two descriptions are available, we reconstruct a high quality 3-D data. If only one description is transmitted, however, 3-D surface recovery scheme reduces artifacts on erroneous 3-D surface, yielding a smooth 3-D surface. Therefore, the proposed algorithm guarantees acceptable quality reconstruction of 3-D data even though one channel is totally lost.

### I. 서론

3차원 데이터 처리 분야에서 데이터 압축에 대한 다양한 연구 성과들이 도출되고 있다. 예를 들면 Touma 등은 꼭지점 차수(vertex degree)를 이용하여 단일 해상도 메시 데이터 압축기법을 제안하였다<sup>1)</sup>. 또한 전송 환경 및 복호 환경에 적응적인 점

진적 부호화(progressive compression) 기법들이 제안되었다<sup>2-4)</sup>. 그러나 이들 3차원 데이터 압축기법들은 예측 부호화(predictive coding) 및 가변장 부호화(variable length coding)에 기반하기 때문에 부호화된 비트스트림(bitstream)은 전송 오류에 취약하다.

3차원 부호화 비트스트림의 전송 오류 취약성을 보완하기 위한 다양한 기법들이 소개되었다. Yan

※ 본 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2006-331-D00410)을 받아 수행되었습니다.

\* 삼성전자 (sbpark@ieee.org), \*\* 고려대학교 (changasukim@korea.ac.kr), \*\*\* 서울대학교 (sanguk@ipl.snu.ac.kr)

논문번호 : KICS2007-05-237, 접수일자 : 2007년 5월 29일, 최종논문접수일자 : 2007년 8월 27일

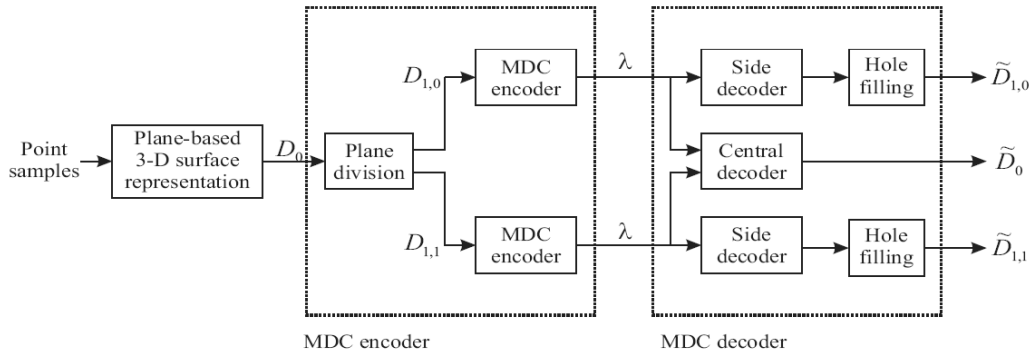


그림 1. 제안하는 3차원 영상 MDC 기법의 시스템 블록도.  $\lambda$ : 채널 손실률(channel failure ratio).

등은 데이터 분할(data partitioning) 기법을 도입하여 전송 오류 전파(propagation) 문제를 완화하였다<sup>[5-6]</sup>. 또한 차등 데이터 보호(unequal error protection) 기법을 점진적 메쉬 부호화에 적용한 알고리즘이 제안되었다<sup>[7]</sup>. 최근 Park 등은 3차원 데이터 오류 은닉(error concealment) 기법을 제안하여 전송 오류에 의해 손상된 3차원 표면(surface)의 화질을 개선하였다<sup>[8]</sup>. 그러나 전송 오류 환경이 열악할 경우 기존의 데이터 전송 기법들<sup>[5-8]</sup> 또한 납득할 만한 화질의 3차원 데이터 복원 결과를 보여주지는 못하는 실정이다.

기존 비디오 부호화에서는 다중 부호화(MDC) 기법을 이용하여 열악한 전송 환경에서도 최소한의 복원 화질을 보장하고 있다<sup>[9,10]</sup>. MDC에서는 데이터 복원 시 동일한 중요도를 갖는 2개 혹은 그 이상의 비트스트림을 생성하고 개별 채널을 통해 각각 전송된다. 복호기에서는 채널 오류 상황에 따라 부분 혹은 전체 비트스트림에서 데이터를 복원할 수 있는 적응적 복호 구조를 지원한다. 따라서 심각한 채널 오류에 의해 한 채널 전체가 손실된 경우에도 나머지 채널로 전송된 비트스트림을 이용하여 최소한의 복원 화질을 보장한다.

유사한 방법으로 3차원 데이터를 동일한 중요도를 갖는 2개 부분집합으로 분할할 수 있다면, MDC 기법은 전송 오류에 강인한 3차원 데이터 부호화 시스템을 제공할 수 있다. 그러나 3차원 데이터는 다각형 메쉬(polygonal mesh)<sup>[11]</sup> 또는 포인트 구름(point clouds)<sup>[12]</sup>과 같은 불규칙한 기하소(irregular geometry primitive)에 의해서 표현되기 때문에 2차원 MDC 기법을 바로 적용할 수 없다.

최근 Park 등은 3차원 포인트 데이터가 정의된 3차원 공간을 균일한 국부 육면체 집합(local cube

set)으로 분할하고 각각의 육면체에 포함된 포인트들을 단일 평면으로 근사하는 평면기반 표현법(plane-based representation)을 소개하였다<sup>[13]</sup>. 따라서 균일한 데이터 구조를 갖는 평면기반 3차원 데이터는 MDC에 보다 쉽게 이용 가능하다.

본 논문에서는 MDC 기법에 기반하여 전송 오류에 강인한 3차원 데이터 부호화 알고리즘을 제안한다. 첫째 3차원 포인트 집합을 평면기반 3차원 표현법으로 근사한다<sup>[13]</sup>. 다음으로 그래프 컬러링(graph coloring) 이론을 이용하여 다수의 평면 패치(plane patch)들을 동일한 중요도를 갖는 2개 평면 부분집합들로 분할한다<sup>[14]</sup>. 또한 평균 복원 오류를 최소화하기 위해 각 부분집합의 평면 정보를 채널 오류 환경에 적응적으로 변형하고 부호화한다. 복호기에서 2개 비트스트림에서 3차원 부분 정보가 독립적으로 복호되고 결합되어 3차원 표면 데이터를 복원한다. 따라서 모든 3차원 정보가 유효할 경우, 고품질 3차원 복원이 가능하다. 반면 한 채널이 심각한 전송 오류로 손실되어 단일 비트스트림만 복호될 경우, 효율적인 3차원 손상부보간 기법을 이용하여 3차원 표면 정보를 복구하고 시각적으로 만족스러운 복원 화질을 제공한다. 따라서 제안하는 알고리즘은 심각한 전송 오류 환경에서도 최소한의 화질을 갖는 3차원 데이터 복원을 보장한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 제안하는 MDC 부호화 기법을 소개한다. III장에서 손상된 3차원 표면 정보의 복구 기법을 포함하는 MDC 복호기를 제시한다. IV장에서는 전산 모의실험을 통해 제안하는 알고리즘의 전송 오류 강인성을 평가한다. 마지막으로 V장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 평면 기반 3차원 데이터의 다중 부호화

그림 1은 제안하는 3차원 MDC 시스템의 블록도를 보여준다. 취득된 원본 포인트 집합은 평면 기반 표현법을 이용하여 기하소가 균일 육면체 구조에서 한 개씩 존재하도록 한다<sup>[13]</sup>. 그리고 이들 평면 패치 집합은 3차원 데이터 복원 시 동일 기여도를 반영하도록 2개 평면 부분집합으로 분할된다. 최종적으로 이들 부분집합정보는 최적 복원 화질을 보장하도록 변형, 압축되어 개별 채널을 통해 복호기로 전송된다.

### 2.1 3차원 평면 패치 집합의 분할

평면 기반 3차원 데이터의 MDC를 위해 원본 평면 집합  $D_0$ 를 서로소(disjoint)인 평면 부분집합  $D_{1,0}$ 과  $D_{1,1}$ 로 분할한다. 평면 패치 집합  $D_0$ 는 균일하며 연속적인 육면체 구조 내에서 표현되기 때문에  $D_{1,0}$ 과  $D_{1,1}$ 을 얻는 가장 쉬운 방법은 균일 구조의 퀴нк스 표본화(quincunx sampling)이다<sup>[9]</sup>. 그러나 퀴нк스 표본화는 3차원 표면 정보의 특성을 고려하지 않고 데이터를 분할하기 때문에 표본화 결과로 도출된 2개 평면 부분집합들은 데이터 복원 시 상이한 기여도를 제공할 수 있다.

그래프 이론<sup>[14]</sup>의 그래프 컬러링을 이용하면 노드 집합(node set)  $N$ 과 노드 간 연결 정보인 에지 집합(edge set)  $E$ 로 구성된 입력 그래프  $G = \langle N, E \rangle$ 에서 동일 정보량의 서로소 노드 부분 집합을 얻을 수 있다. 즉 평면 집합  $D_0$ 의 각 평면 기하소들이 그래프  $G_{D_0}$  구조로 구성된다 가정하면  $D_0$ 의 균등 분할은 채색수(chromatic number)  $\chi(G_{D_0}) = 2$ 를 갖는 그래프  $G_{D_0}$ 의 그래프 컬러링 문제로 변환할 수 있다. 이때  $G_{D_0}$ 의 각 노드는 3차원 데이터의 각 평면소에 대응되고, 각 에지는 평면소가 존재하는 육면체 사이의 6-연결구조(6 connectivity, 즉 상-하-전-후-좌-우)로 대응된다.

각 부분집합의 원소 간에 연결 관계인 에지가 존재하지 않을 때, 그래프  $G$ 는 2 채색가능(2-colorable)하다고 한다. 본 논문에서는 채널 오류에 의해 한 채널이 손실될 경우, 복원된 3차원 부분 정보에서 손실된 3차원 부분 정보를 복구하는 것을 목표로 한다. 따라서  $\chi(G_{D_0}) = 2$ 를 만족하는  $G_{D_0}$ 의 그래프 컬러링이 이상적인 결과이다. 그러나 임의의 그래프는 이분 그래프(bipartite graph)일 경우

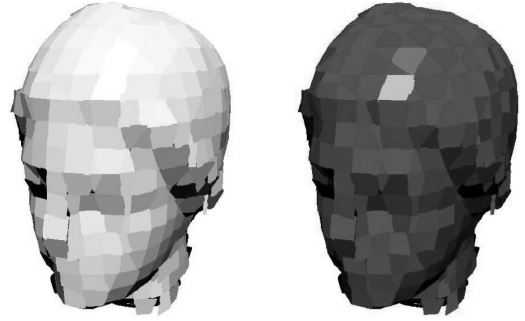


그림 2. 3차원 “Venus” 평면 데이터의 분할 예: (a) 데이터의 평면 기반 표현, (b) 그래프 컬러링을 이용한 서로소 평면 부분집합으로 분할한 결과. 시각화를 위해 각 부분집합은 각각 적색과 청색으로 채색됨.

에만 2색 채색가능하다는 것이 알려져 있다<sup>[14]</sup>.

일반적인 연결 구조를 갖는  $G_{D_0}$ 는 이분 그래프가 아니다. 따라서 그래프 컬러링에서 몇몇의 노드들은 불가피하게 동일 색을 갖는 인접 노드(adjacent node)를 갖게 된다. 이러한 노드들은 비용(cost)으로 정의할 수 있다<sup>[15]</sup>. 따라서 제안하는 알고리즘에서는 이와 같이 실패한 노드들에 의해 발생하는 전체 비용(overall cost)을 최소화하고자 한다.

평면 집합  $D_0$ 가 그래프  $G_{D_0}$ 에 대응될 때, 다음 비용함수를 최소화함으로써  $D_{1,0}$ 에 대응되는 적색 평면 부분집합  $P_R$  및  $D_{1,1}$ 에 해당하는 청색 평면 부분집합  $P_B$ 를 구한다.

$$(P_R, P_B) = \arg \min_{\substack{P_i \in P_R \\ P_j \in P_B}} \left[ \sum_{P_i \in P_R} C_R(P_i) + \sum_{P_j \in P_B} C_B(P_j) \right]. \quad (1)$$

이때  $C_R(P_i)$ 는 적색 평면  $P_i \in P_R$ 에 인접한 적색 평면들의 개수이며  $C_B(P_j)$ 는 청색 평면  $P_j \in P_B$ 에 연결된 청색 평면들의 개수를 의미한다. (1)을 국지적(local)으로 최적화하기 위해 본 논문에서는 다음의 반복법을 제안한다. 이와 유사한 풀이법이  $\chi(G_{D_0}) \geq 3$ 인 일반화된 그래프 컬러링에 소개된 바 있다<sup>[15]</sup>.

1. 동일 원소 개수를 갖는 초기 부분 평면 집합  $P_R$  및  $P_B$ 를 결정한다.
2.  $\Delta C_{RB}(P_i)$ 를 최대로 하는 적색 평면  $P_i \in P_R$ 를 구한다.
3.  $\Delta C_{BB}(P_j)$ 를 최대로 하는 청색 평면  $P_j \in P_B$ 를 찾는다.

4.  $\Delta C_{RB}(p_i) + \Delta C_{BR}(p_j) \leq 0$ 이면 반복을 종료하고, 그렇지 않으면  $p_i$ 를 청색으로  $p_j$ 를 적색으로 채색하고 과정 2로 되돌아간다.

이때  $\Delta C_{RB}(p_i)$ 는  $p_i \in P_R$ 가 청색으로 변환 때 발생하는 비용 변화를 의미한다. 마찬가지로,  $\Delta C_{BR}(p_j)$ 는  $p_j$ 에 대한 비용 변화이다. 비록 제안하는 반복법이 전역적(global) 최적화 결과를 도출하지 않지만, 매 반복에서 (1)의 비용 변화를 최대화하여 빠르게 수렴한다.

그림 2에 평면 기반 표현법으로 묘사된 3차원 “Venus” 데이터의 컬러링 예가 제시되었다. 이때 평면이 정의된 육면체는 주변에 대해 6-연결 구조를 갖는다. 그림 2를 통해 서로소인 적색 및 청색 평면들이 “Venus” 표면 위에 균등하게 분포함을 확인할 수 있다. 또한 하나의 평면에 대해 주변은 다른 색으로 채색되어 있음을 확인할 수 있다. 따라서 제안하는 기법은 3차원 표면 정보를 복원 시 동일 기여도를 제공하는 2개의 서로소 부분집합으로 분할한다.

### 2.2 평면 파라미터의 부호화

그림 1에서 관찰할 수 있듯이 MDC 복호기에서 세 가지 형태의 복원 시나리오를 예상할 수 있다. 즉 채널 전송 상황에 따라  $\tilde{D}_0$ ,  $\tilde{D}_{1,0}$  및  $\tilde{D}_{1,1}$ 이 복원된다. 각각의 채널들이 독립적으로 동일 손실률  $\lambda$ 로 손실된다고 가정하자. 그러면 복원된 3차원 데이터는 다음의 평균 왜곡값을 갖는다.

$$(1-\lambda)^2 d(D_0, \tilde{D}_0) + \lambda(1-\lambda) d(D_0, \tilde{D}_{1,0}) + \lambda(1-\lambda) d(D_0, \tilde{D}_{1,1}) + \lambda^2 \phi. \quad (2)$$

이때  $d(\cdot)$ 는 3차원 데이터 간 왜곡값이다.  $d(D_0, \tilde{D}_0)$ 는 중심 왜곡값(central distortion)이며  $d(D_0, \tilde{D}_{1,0})$  및  $d(D_0, \tilde{D}_{1,1})$ 는 측 왜곡값(side distortion)이라고 부른다. 그리고  $\phi$ 는 모든 비트스트림을 수신하지 못할 경우의 왜곡값이다. 본 논문에서는 채널 손실률  $\lambda$ 에 대해 (2)의 평균 왜곡값을 최소화하고자 한다.

(2)를 최소화하기 위해  $P_R \cup P_B$ 의 각 평면 파라미터들을 적응적으로 변환한다. 이때  $\tilde{D}_{1,0}$ 은  $p_i \in P_R$ 에 의존하며  $\tilde{D}_{1,1}$ 은  $p_j \in P_B$ 에 의존한다. 반면  $\tilde{D}_0$ 은  $P_R \cup P_B$  전체에 의해 영향을 받는다. 따라서

(2)의 최적화는 다음을 만족하는 평면 집합  $P = P_R \cup P_B$ 의 풀이로 귀결된다.

$$P = \underset{P_R, P_B}{\operatorname{argmin}} [(1-\lambda)d(D_0, \tilde{D}_0(P_R, P_B)) + \lambda d(D_0, \tilde{D}_{1,0}(P_R)) + \lambda d(D_0, \tilde{D}_{1,1}(P_B))]. \quad (3)$$

2개 평면 부분집합들에서 단일 정보만 복호 가능할 경우, 손상된 평면 정보를 복구하기 위한 3차원 손상부 복구 기법이 필요하다. 이때 손상부 평면 정보는 손상되지 않은 주변 영역의 평면 정보를 이용하게 된다. 따라서 이들 평면들 간 상호 의존 관계가 발생하며 (3)의 전역적 최적해를 구하는 것은 매우 어렵게 된다.

본 논문에서는 (3)의 해를 얻기 위한 대안으로서 반복적 평면 파라미터 변형 기법을 제안하여 국지적 최적해를 얻는다. 제안하는 알고리즘은 다른 평면들을 고정하고 하나의 평면  $p_i$ 의 최적 변형 값  $p_i^*$ 를 찾는다. 일반성의 결여 없이  $p_i$ 가  $P_R$ 에 속하고  $p_i$ 에 인접하며  $P_B$ 에 속하는 평면  $p_i$ ,  $i=0,1,2,3$ 이 존재한다고 가정한다. 그러면 (3)을 최소화하는  $p_i$ 의 변형값  $p_i^*$ 는 다음 방정식으로부터 얻을 수 있다.

$$p_i^* = \underset{p_i}{\operatorname{argmin}} [(1-\lambda)d_p(p_i, p_i^*) + \lambda \sum_{i=0}^3 d_p(p_i, \tilde{p}_i(p_i^*)) + \lambda d_p(p_i, \tilde{p}_i(p_0, p_1, p_2, p_3))]. \quad (4)$$

여기서  $d_p(\cdot)$ 는 평면 간 거리를 의미하며  $\tilde{p}(\cdot)$ 는 손상부 보간(interpolation)으로 복구된 평면이다. (4)의 마지막 항은  $p_i^*$ 에 의존하지 않으므로 (4)를 다음과 같이 정리한다.

$$p_i^* = \underset{p_i}{\operatorname{argmin}} [(1-\lambda)d_p(p_i, p_i^*) + \lambda \sum_{i=0}^3 d_p(p_i, \tilde{p}_i(p_i^*))]. \quad (5)$$

거리 함수  $d_p(p_i, p_i^*)$ 를 구하기 위한 다양한 형태의 척도(metric)를 생각할 수 있다. 본 논문에서는  $p_i$ 의 육면체 경계부에서 얻은  $p_i$ 의 표본 포인트(sample point)들과  $p_i^*$ 간의 3차원 Euclidean 거리를 척도로 정의한다. 이때 표본 포인트는  $p_i$ 와 육면체가 만나는 경계선과 각 육면 내부의 가상  $512 \times 512$  격자(grid)를 교차하는 점들로 정한다.

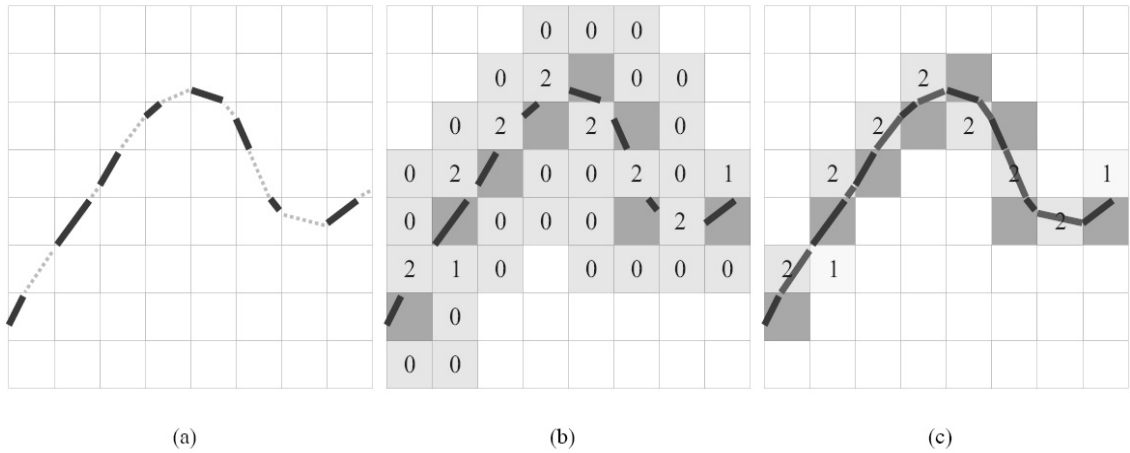


그림 3. 제안하는 3차원 손상부 복구 알고리즘: (a) 단일 비트스트림에서 3차원 부분 정보 복원, (b) 손상부 후보군, (c) 복구된 평면 정보. 청색선은 단일 비트스트림에서 복원된 3차원 평면 정보이며 적색선은 제안하는 3차원 손상부 복구 알고리즘으로 복구된 3차원 평면 정보를 제시함.

비슷한 방법으로  $d_p(p_i, \tilde{p}_i(p_i^*))$ 를 근사한다. 이 경우  $p_i$ 를 포함하는 육면체와  $p_i^*$ 를 포함하는 육면체의 경계면에서 표본 포인트를 찾고 표본 포인트와  $p_i$  간의 Euclidean 거리를 얻는다.

평면 파라미터의 변형은 평면 집합  $P = P_R \cup P_B$ 의 모든 평면들에 대해 수행된다. 모든 평면들에 대해 변형이 완료되면 이를 1회 반복(iteration)으로 정의한다. 그리고  $i$ 번 반복과  $(i+1)$ 번 반복 결과의 변화가 무시할 수준일 경우 반복을 멈춘다. 최종적으로 반복적 변형으로 구한 최종 평면 파라미터 들<sup>[16]</sup>에서 제안된 3차원 평면 부호화 기법으로 부호화 하여 채널을 통해 복호기로 전송한다.

### III. MDC 복호 알고리즘

복호기에서 두 가지 형태의 복호 시나리오가 가능하다. 우선 2개 채널에서 전송된 비트스트림들을 모두 복원하는 경우, 각각의 비트스트림에서 3차원 부분 데이터를 복원하고 이들을 결합하여 최종 3차원 데이터를 재생한다.

반면 한 채널이 손실된 경우, 전송에 성공한 단일 비트스트림만이 복원된다. 이 경우 전체 3차원 데이터의 절반이 손실되기 때문에 복원된 3차원 평면은 손상부에 의한 화질 저하가 발생한다. 따라서 제안하는 알고리즘에서는 두 부분 평면 집합  $D_{1,0}$ 과  $D_{1,1}$ 의 높은 상관관계를 이용하여 손상부를 검출하고 손상부의 평면 정보를 복구하고자 한다.

그림 3에 제안하는 3차원 손상부 복구 알고리즘의 개념을 제시한다. 그림 3 (a)에 단일 비트스트림에서 복원된 평면들이 청색으로, 손실된 정보가 회색 점선으로 각각 묘사된다. 우선 그림 3 (b)와 같이 손상되지 않은 육면체 영역의 주변 육면체 영역을 손상부 후보군으로 정의한다. 이때 각 손상부 후보군에 손상되지 않은 주변 육면체 공간의 개수  $K$ 가 저장된다. 본 논문에서는  $K \geq 2$ 인 경우 해당 육면체를 손상부로 최종 간주한다.

손상부를 검출한 뒤 각 손상부에서 새로운 평면  $\tilde{p}$ 를 예측한다. 우선  $K$ 개 주변 평면들과  $\tilde{p}$ 를 포함하는 육면체의 경계면에 위치하는 경계점(boundary point)  $\mathbf{c}_i, i = 0, 1, \dots, L-1$  들을  $512 \times 512$  격자와 주변 평면의 경계선의 교점으로 정의한다. 그러면  $\tilde{p}$ 의 평면 파라미터  $(\tilde{\mathbf{a}}, \tilde{\mathbf{n}})$ 를 다음과 같이 할 수 있다.

$$\tilde{\mathbf{a}} = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{L-1} \mathbf{c}_i,$$

$$\tilde{\mathbf{n}} = \arg \min_{\tilde{\mathbf{n}}} \sum_{i=0}^{L-1} [\tilde{\mathbf{n}} \cdot (\mathbf{c}_i - \tilde{\mathbf{a}})]^2. \quad (6)$$

이때  $\tilde{\mathbf{a}}$ 는 평면  $\tilde{p}$ 위의 점이며  $\tilde{\mathbf{n}}$ 은  $|\tilde{\mathbf{n}}|=1$ 을 만족하는  $\tilde{p}$ 의 법선(normal) 벡터이다. (6)을 이용하여 그림 3 (c)의 적색선으로 묘사된 평면 정보가 복구되어 손상부의 화질을 개선한다.

그림 4는 3차원 “Venus” 데이터에 대한 손상부 복구 예를 제시한다. 그림 4 (a)는 단일 비트스트림

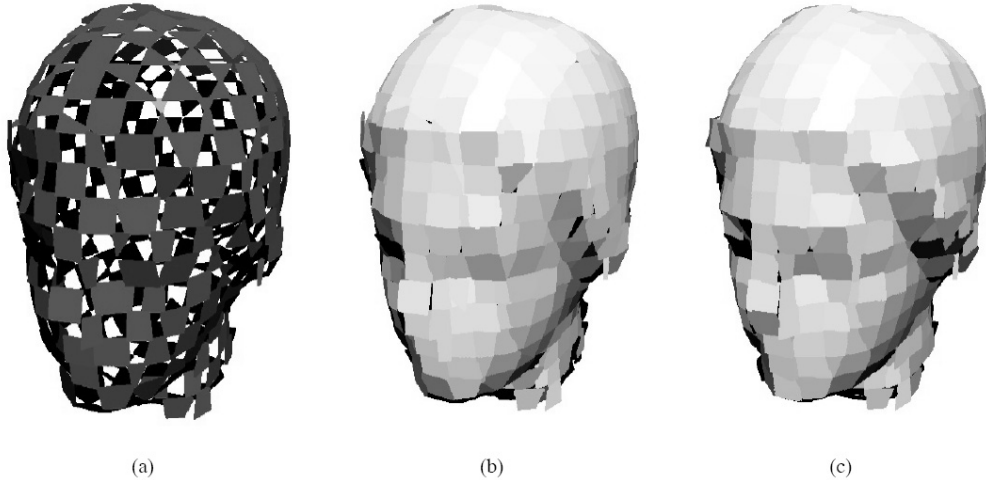


그림 4. 제안하는 3차원 손상부 복구 기법의 적용 예: (a) 단일 비트스트림에서 복원한 3차원 부분 정보, (b) 제안하는 손상부 복구 기법을 적용하여 (a)의 열화 영상의 복구한 결과, (c) 무손실 환경에서 복원된 3차원 정보

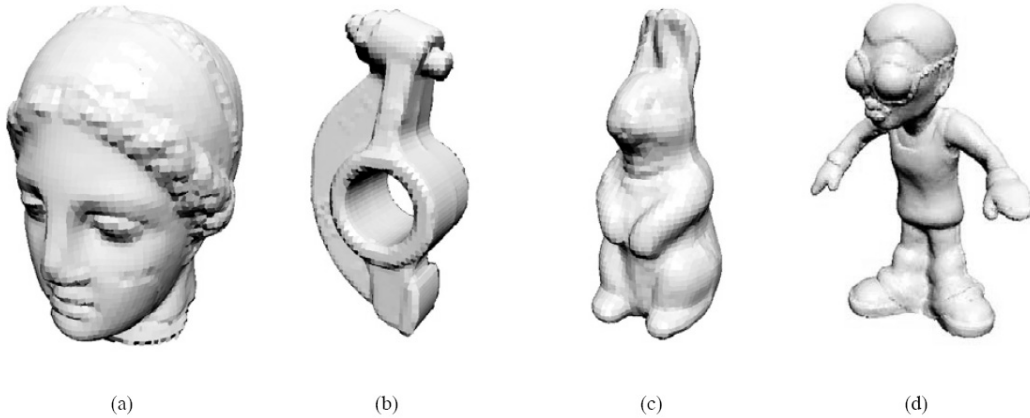


그림 5. 3차원 실험 데이터: (a) “Venus” (평면수: 12K), (b) “RockerArm” (평면수: 6K), (c) “Rabbit” (평면수: 6K), (d) “Dancer” (평면수: 24K).

을 복원하여 얻은 부분 3차원 정보이며, 제안하는 손상부 복구 기법으로 보간된 최종 영상이 그림 4 (b)에 제시된다. 그림 4 (c)는 비교를 위한 전송 오류가 없을 경우에 해당하는 3차원 복원 결과이다. 그림 4 (b)와 (c)의 비교를 통해 손상부의 평면 정보가 성공적으로 보간되며 무손실 환경의 복원 결과와 유사하게 부드러운 영상 복원 결과를 제공함을 관찰할 수 있다. 이는 제안하는 기법이 주변의 평면 기하정보를 이용하여 손상부 평면 정보를 효과적으로 보간함을 의미한다.

#### IV. 전산 모의실험 결과

그림 5에 제시된 다양한 평면 기반 3차원 데이터

에 대한 제안 알고리즘의 전산 모의실험을 수행한다. 부호기에서 입력 데이터는 2개 평면 부분집합들로 분할되고 각 부분집합의 평면 정보들이 채널 오류 환경에 적응적으로 변형된다. 그리고 변형된 평면 정보들을 3차원 평면 기반 데이터 압축기법<sup>[16]</sup>으로 압축하고 전송한다.

복호기에서는 채널 오류 환경에 따라 전송된 비트스트림을 이용하여 3차원 표면 정보를 복원한다. 만약 복호기에서 3차원 부분 정보가 복원될 경우, 제안하는 3차원 손상부 복구 알고리즘을 적용하여 부드러운 3차원 표면 복구 결과를 얻는다.

본 논문에서 3차원 데이터 간 왜곡값을 측정하기 위해 원본 데이터( $D_0$ )와 복원 정보( $\tilde{D}_0, \tilde{D}_{1,0}$  혹은

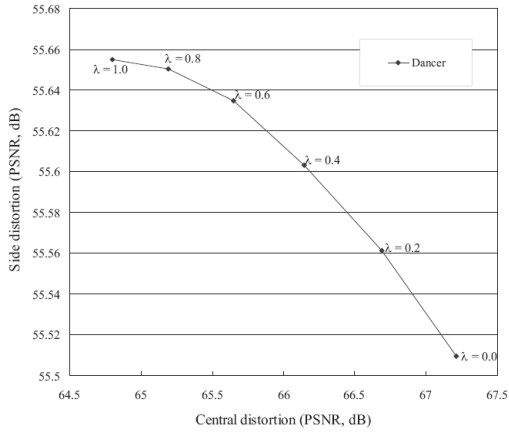


그림 6. 채널 손실을  $\lambda$ 에 따른 중심 왜곡과 측 왜곡의 tradeoff 관계. 각 축의 값은 정규화된 Hausdorff 거리를 dB 단위로 변환하여 제시함.

$\tilde{D}_{1,1}$ 간의 Hausdorff 거리를 계산한다. 3차원 메시에 대한 Hausdorff 거리 기반 왜곡 측정은 Cignoni 등에 의해 제안되어 3차원 영상 왜곡 측정에 널리 이용되고 있다<sup>[7]</sup>.

그림 6은 채널 손실을  $\lambda$ 의 변화에 따른 중심 왜곡  $d(D_0, \tilde{D}_0)$ 과 측 왜곡값  $1/2[d(D_0, \tilde{D}_{1,0}) + d(D_0, \tilde{D}_{1,1})]$ 간의 관계 그래프를 도시한다. “Dancer” 영상에 대해 실험이 수행되었으며, 비트율(bitrate)은 1.0 bpp(bit per plane)으로 고정된다.  $\lambda$ 가 증가함에 따라 측 복호기(side decoder)에서 복원된 3차원 영상의 화질이 증가함을 알 수 있다. 반면에 중심 복호기에서 복원되는 영상의 화질은 열화 된다.

다음으로 두 채널 중 한 채널이 완전히 손실된 경우를 실험한다. 이 경우 단일 비트스트림에서 3차원 부분 데이터를 복원하고 손상된 3차원 표면은 제안하는 손상부 복구 기법으로 보간한다. 그림 7은 “Dancer” 영상에 대한 보간 결과를 보여주고 있다. 단일 비트스트림으로 부분 복원한 그림 7 (a)의 영상은 그림 7 (b)에서 부드러운 3차원 표면 정보로 복구되었다. 이때 손상부는 제안하는 기법에 의해 새로운 평면 정보로 대체되었으며 그림 7 (c)의 완벽하게 복원된 영상과 비교하여 적은 왜곡만을 보인다.

그림 8에 “Venus,” “RockerArm” 및 “Rabbit”에 대한 손상부 복원 결과가 제시된다. 각 실험 데이터의 손상부는 제안하는 기법으로 불연속점이 없는 평면들로 보간된다. 특히 무손실 환경의 복원 결과와의 비교를 통해 복구된 영상의 화질이 우수함을

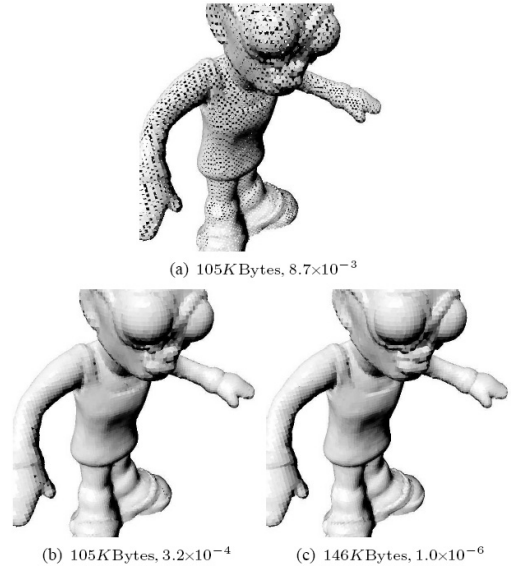


그림 7. “Dancer” 데이터의 손상 화질 복구: (a) 단일 비트스트림으로부터 부분 복원한 3차원 표면 영상, (b) 제안하는 손상부 복구 기법으로 개선된 화질, (c) 무손실 환경에서 복원된 표면 정보. 첫 번째 숫자는 소모된 비트량을 의미하며 두 번째 숫자는 영상 왜곡값을 의미함.

확인할 수 있다. 이는 제안하는 3차원 데이터 복구 기법이 손상되지 않은 주변부 3차원 정보를 이용하여 손상부의 평면 정보를 효과적으로 보간함을 의미한다.

마지막으로 표 1은 각 데이터에 대한 부호화 성능 및 복원 후 영상 왜곡값을 제시한다. MDC를 수행할 경우 그렇지 않은 경우에 비해 같은 왜곡 수준에서 40% 가량 증가된 비트량이 소모됨을 확인할 수 있다. 그러나 이러한 증가된 비트량은 3차원 영상 비트스트림의 전송 오류 강인성을 향상시킴으로써 두 채널 중 한 채널이 완전히 손실된 경우에도 시각적으로 허용할 수 있는 3차원 영상 복원을 가능하게 한다.

표 1. 제안하는 3차원 MDC 기법의 부호화 성능.

Data	Compressed Bitstream (Bytes)			Reconstruction Error		
	$D_0$	$D_{1,0}$	$D_{1,0}$	$\tilde{D}_0$	$\tilde{D}_{1,0}$	$\tilde{D}_{1,1}$
Venus	72,374	52,088	52,141	$1.0 \times 10^{-6}$	$3.5 \times 10^{-5}$	$3.4 \times 10^{-5}$
RockerArm	39,111	29,019	29,024	$1.0 \times 10^{-6}$	$3.3 \times 10^{-5}$	$3.2 \times 10^{-5}$
Rabbit	35,503	25,643	25,602	$1.0 \times 10^{-6}$	$2.5 \times 10^{-5}$	$2.6 \times 10^{-5}$
Dancer	146,779	105,745	105,454	$1.0 \times 10^{-6}$	$3.2 \times 10^{-5}$	$3.3 \times 10^{-5}$

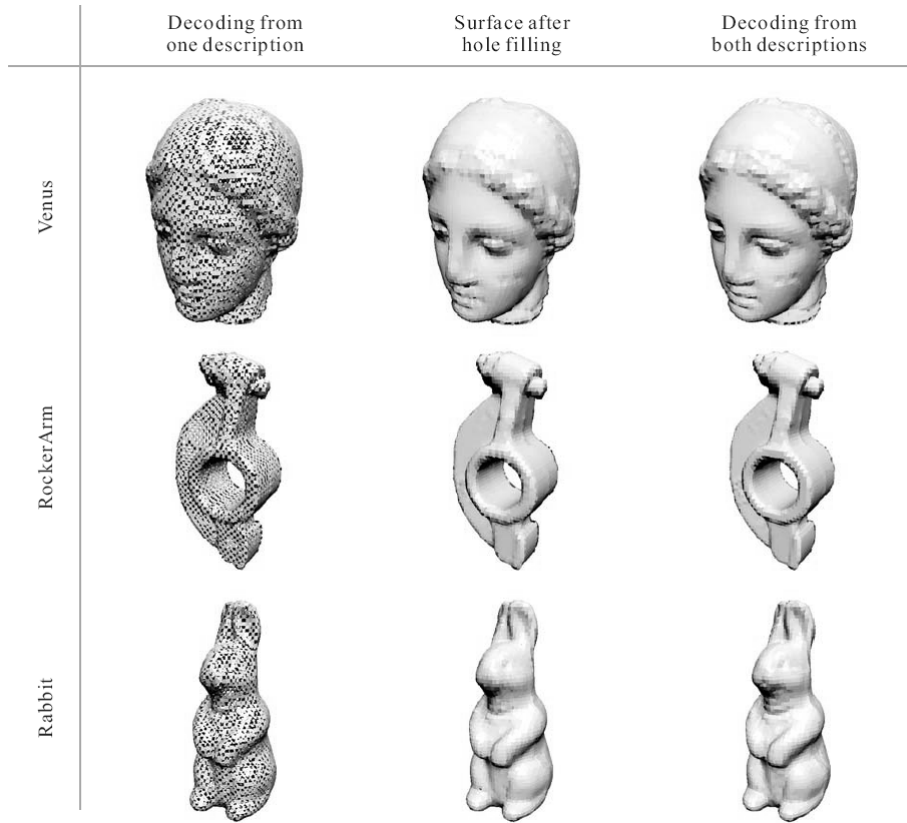


그림 8. “Venus,” “RockerArm” 및 “Rabbit”의 손상부 복구. 첫 번째 열은 단일 비트스트림에서 복원한 3차원 부분 영상, 두 번째 열은 손상 영역의 복구 결과, 세 번째 열은 비교를 위해 무손실 데이터 복원 결과임.

### V. 결론

본 논문에서 MDC에 기반하여 3차원 데이터의 전송 오류에 강인한 부호화 기법을 제안하였다. 우선 평면 기반 3차원 데이터를 그래프 컬러링 이론을 이용하여 서로소인 2개 평면 부분집합으로 분할하였다. 다음으로 복구 시 평균 왜곡을 최소화하기 위해 각 부분집합의 평면정보를 채널 오류에 적응적으로 변형하여 부호화 하였다. 최종적으로 두 채널 중 한 채널이 손실된 경우에도 시각적으로 만족할 만한 3차원 데이터 복원 결과를 제공하였다. 전산 모의실험을 통해 제안하는 3차원 데이터의 MDC 부호화 알고리즘은 전송 오류에 강인한 3차원 데이터 부호화 기법임을 확인하였다.

본 논문의 MDC 구성에 사용된 평면 압축기법은 평면정보와 평면들이 존재하는 3차원 공간을 모두 부호화 하고 있다<sup>16)</sup>. 이로 인해 부분 평면 집합의 부호화에 예기치 않은 추가 비트 소모가 발생하였다. 현재 부분 평면정보 부호화 시 추가 비트 소모

가 발생하지 않는 효율적인 3차원 평면 데이터 압축기법이 개발되고 있다.

### 참고 문헌

- [1] C. Touma and C. Gotsman, “Triangle mesh compression,” in *Proc. Graphics Interfaces '98*, pp. 26-34, June 1998.
- [2] R. Pajarola and J. Rossignac, “Compressed progressive meshes,” *IEEE Trans. Visual. Comput. Graphics* 6(1), pp. 79-93, Jan.-Mar. 2000.
- [3] A. Khodakovsky, P. Schröder, and W. Sweldens, “Progressive geometry compression,” in *Proc. ACM SIGGRAPH 2000*, pp. 271-278, July 2000.
- [4] S. Fleishman, D. Cohen-Or, M. Alexa, and C. Silva, “Progressive point set surfaces,” *ACM Trans. Graph.* 22(4), pp. 997-1011, Oct. 2003.
- [5] Z. Yan, S. Kumar, and C.-C. J. Kuo, “Error-re-



silient coding of 3-D graphic models via adaptive mesh partitioning,” *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, 11(7), pp. 860-873, July 2001.

[6] Z. Yan, S. Kumar, and C.-C. J. 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.

[7] G. Al-Regib, Y. Altunbasak, and J. Rossignac, “Error-resilient transmission of 3D models,” *ACM Trans. Graph.* 24(2), pp. 182-208, Apr. 2005.

[8] S.-B. Park, C.-S. Kim, and S.-U. Lee, “Error resilient 3-D mesh compression,” *IEEE Trans. Multimedia* 8(5), pp. 885-895, Oct. 2006.

[9] C.-S. Kim and S.-U. Lee, “Multiple description coding of motion fields for robust video transmission,” *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.* 11(9), pp. 999-1010, Sept. 2001.

[10] Y. Wang, A. Reibman, and S. Lin, “Multiple description coding for video delivery,” *Proc. IEEE* 93(1), pp. 57-70, Jan. 2005.

[11] H. Hoppe, T. DeRose, T. Duchamp, J. McDonald, and W. Stuetzle, “Surface reconstruction from unorganized points,” in *Proc. ACM SIGGRAPH '92*, pp. 71-78, July 1992.

[12] S. Rusinkiewicz and M. Levoy, “QSplat: A multiresolution point rendering system for large meshes,” in *Proc. ACM SIGGRAPH 2000*, pp. 343-352, July 2000.

[13] S.-B. Park, H. Choi, and S.-U. Lee, “Multiresolution surface representation and rendering for point clouds,” in *Proc. IEEE ICIP 2004*, pp. 1939-1942, Oct. 2004.

[14] J. Gross and J. Yellen, *Graph Theory and Its Applications*, CRC Press, 1999.

[15] D. Brélaz, “New methods to color the vertices of a graph,” *Commun. ACM* 22(4), pp. 251-256, Apr. 1979.

[16] S.-B. Park, H. Choi, and S.-U. Lee, “3-D geometry compression using multiscale plane based representation and zerotree based coding,” in *Proc. IEEE ICIP 2006*, pp. 537-540, Oct. 2006.

[17] P. Cignoni, C. Rocchini, and R. Scopigno,

“Metro: Measuring error on simplified surfaces,” *Computer Graphics Forum* 17(2), pp. 167-174, June 1998.

**박 성 범 (Sung-Bum Park)**

준회원



2000년 연세대학교 기계전자공학부 학사  
2002년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사  
2007년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사  
2007년 ~ 현재 삼성전자

<관심분야> 3차원 영상처리, 영상압축, 영상전송, 영상 복원

**김 창 수 (Chang-Su Kim)**

종신회원



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

2001년~2003년 서울대학교 전기공학부 박사후연구원  
2003년~2005년 Assistant Professor, Chinese University of Hong Kong  
2005년~현재 고려대학교 전기전자전파공학부 조교수

**이 상 옥 (Sang-Uk Lee)**

종신회원



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  
2006년 ~ 현재 한국방송공학회 회장  
<관심분야> 신호처리, 영상압축 및 전송, 컴퓨터 비전