

효율적인 점진적 메쉬 부호화 알고리즘

박성범*, 노봉균*, 김인철**, 이상욱*

*서울대학교 전기컴퓨터공학부 뉴미디어통신공동연구소 영상처리연구실

**서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부

Efficient Progressive Mesh Compression Algorithm

Sung Bum Park*, Bong Gyun Roh*, Rin-Chul Kim**, and Sang Uk Lee*

*Image Processing Lab., Inst. of New Media And Comm., Seoul Nat'l Univ.

**School of Electrical Engineering, Univ. of Seoul

fax: +82-2-880-8220 email: sbpark@ipl.snu.ac.kr

요약

삼각형 메쉬(triangular mesh)로 이루어진 삼차원 영상의 큰 데이터량을 줄이기 위한 메쉬 부호화의 연구가 활발히 진행되고 있다. 그리고, 최근에는 삼차원 부호화 데이터의 네트워크 전송 문제가 대두되어, 점진적 부호화(progressive mesh compression)에 대한 알고리즘들도 제안되고 있다. 본 논문은 꼭지점의 위치 정보 및 간략화 과정의 꼭지점 패턴(vertex pattern) 규칙을 이용하여, 기존의 점진적 부호화 알고리즘의 부호화 성능을 개선한 알고리즘을 제안한다. 꼭지점의 위치 정보를 이용하여 기존의 알고리즘에 비해 낮은 엔트로피(entropy)를 얻었으며, 꼭지점 패턴 정보를 이용하여 복원시 분할 꼭지점(split vertex)의 탐색 범위를 한정하였다. 전산 모의 실험을 통해, 제안하는 알고리즘이 기존의 점진적 메쉬 부호화 연구에 비해, 연결 정보 부호화에서 대략 30%정도 향상된 부호화 성능을 가짐을 확인할 수 있었다.

I. 서론

컴퓨터 그래픽스에서 삼차원 모델을 표현하는 방법으로, 삼각형 메쉬(triangular mesh)가 널리 이용되고 있다. 삼각형 메쉬 영상은 불균일한 구조로 인해 삼각형을 형성하는 꼭지점들의 위치 정보(geometry information) 및 꼭지점들 간의 연결 정보(connectivity information)로 구성되어, 균일한 구조를 지닌 이차원 영상에 비해 데이터량이 매우 크다. 따라서, 삼각형 메쉬 영상은 저장 및 전송 등에 많은 문제점을 보이며, 이러한 문제점들을 해결하기 위해 삼각형 메

쉬 영상의 부호화에 대한 많은 연구들이 진행되어왔다[1-7].

삼각형 메쉬 영상의 부호화 연구에서, 우선 단일 해상도의 메쉬를 부호화하는 기법들이 제안되었으나, 단일 해상도의 메쉬 부호화 기법은 네트워크 전송시 시간 지연(time delay) 및 전송 중 에러(error)에 취약한 단점을 지니고 있다. 따라서, 최근에는 단일 해상도 메쉬 부호화 기법의 문제점들을 해결하기 위해 점진적 메쉬 부호화(progressive mesh compression)에 대한 연구들이 활발히 이루어지고 있다 [2,3,5,7].

점진적 부호화 기법은 Hoppe에 의해 처음 제안되었으며, 같은 다중 해상도를 지니는 LOD(level-of-detail) 기법과는 달리 각각의 해상도간의 이동이 가능한 계층적 구조를 갖는다 [3]. 일반적으로 삼각형 메쉬의 점진적 부호화 기법은 단일 해상도 메쉬의 압축에 비해 많은 비트(bit)를 필요로 한다. 하지만, 최근에는 수백 번의 메쉬 간략화 연산을 한 단계의 해상도로 정의하고, 효율적인 꼭지점 위치 예측 알고리즘을 통해 점진적 부호화 성능을 단일 해상도 메쉬 압축 기법과 대등한 수준으로 향상시킨 알고리즘이 Pajarola에 의해 제안되기도 하였다 [2].

그런데, 기존의 점진적 메쉬 부호화 알고리즘들은 삼각형 메쉬의 연결 정보 및 위치 정보의 관계를 무시하고 독립적으로 각각의 정보를 부호화 하였다. 또한, 분할 꼭지점(split vertex)의 탐색 범위도 모든 꼭지점에 적용하여 부호화 효율을 저하시켰다 [2].

따라서, 본 논문에서는 Pajarola의 연구를 기반으로 연결 정보 부호화에서 꼭지점의 위치 정보 및 간략화 과정에서

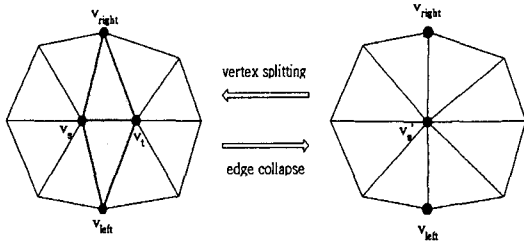


그림 1. 에지-제거 연산자(edge-collapse operator).

이용할 수 있는 꼭지점 패턴(vertex pattern) 규칙을 이용하여, 연결 정보의 부호화의 효율을 향상시키는 알고리즘을 제안한다. 이때, 점진적 메쉬 부호화에 필요한 메쉬 간략화는 에지-제거 연산자(edge-collapse operator)를 이용하였으며, 근사화된 곡률을 오차 측정 수단(error measure)으로 활용하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 에지-제거 연산에 기반한 삼각형 메쉬 영상의 점진적 부호화 기법 및 제안하는 알고리즘에 대해 기술한다. III장에서는 제안하는 부호화 알고리즘의 전산 모의 실험 결과를 제시한다. 그리고, IV장에서 본 논문의 결론을 짓는다.

II. 제안 알고리즘

본 장에서는 제안하는 점진적 메쉬 부호화 알고리즘이 기반으로 하는 에지-제거 연산자에 기반한 점진적 메쉬 부호화 기법을 소개하고, 효율적인 연결 정보 부호화 알고리즘을 제안한다.

2.1 에지-제거 연산자 기반 점진적 메쉬 부호화

에지-제거 연산자는 메쉬 간략화 및 LOD 등의 분야에서 가장 일반적으로 이용되는 간략화 연산자이므로, 많은 점진적 메쉬 부호화 알고리즘에서 채택되고 있다 [2-3].

에지-제거 연산은 그림 1에서 볼 수 있다. 이때, 두 꼭지점 v_s 및 v_t 가 이루는 에지 $\overline{v_s v_t}$ 는 분할 꼭지점(split vertex) v_s' 으로 합쳐지며, 일반적으로 v_s' 은 v_s 와 v_t 의 중점으로 결정된다. 반대로 단순한 단계에서 복잡한 단계로 복원하기 위해 꼭지점-분할(vertex-splitting)이 수행되며, 이는 에지-제거의 역 과정이다. 그리고, 이 두 과정을 가역적

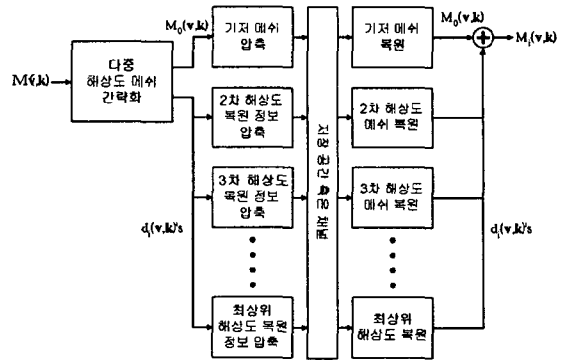


그림 2. 점진적 메쉬 압축의 전반적인 과정.

으로 수행하기 위해 꼭지점-분할이 발생할 지점을 알려주는 분할 꼭지점 v_s' 과 v_t' 주변의 v_{right} 및 v_{left} 의 연결 정보가 필요하며, 위치 정보로 v_s 와 v_t 의 위치 복원을 위해 두 꼭지점 v_s 및 v_t 사이의 x, y, z 방향 좌표별 차이 값이 필요하다.

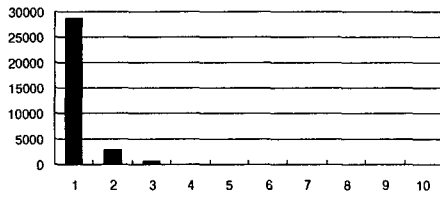
전반적인 점진적 메쉬 부호화는 그림 2와 같다. 이때, 간략화 과정에서 에지-제거 연산이 수행되고, 복원 과정에서 꼭지점-분할이 수행된다. 본 논문에서는 간략화 과정에서 간략화된 메쉬 영상의 위상(topology)을 유지하기 위해, 두 개의 삼각형이 연결된 에지를 에지-제거 대상으로 선정하였다. 그리고, 영상의 품질을 저하시키는 둔각 삼각형의 발생을 막기 위해, v_s 및 v_t 에 다음과 같은 규칙을 주어 에지-제거 연산에 적용되는 에지를 한정하였다.

$$\begin{aligned}
 N_{v_s} &: \text{number of triangles connected to } v_s, \\
 N_{v_t} &: \text{number of triangles connected to } v_t, \\
 &\begin{cases} 4 < N_{v_s} < 9, \\ 4 < N_{v_t} < 9, \\ N_{v_s} + N_{v_t} < 10. \end{cases} \quad (1)
 \end{aligned}$$

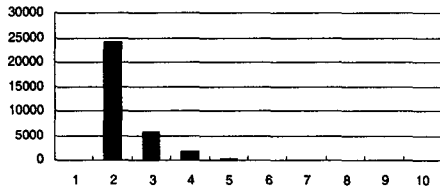
2.2 v_{left} 및 v_{right} 의 연결 정보 부호화

2.1절에서 언급했듯이, 꼭지점-분할 과정을 통해 복잡한 단계로 복원하기 위해, v_{right} 및 v_{left} 의 연결 정보가 필요하다. 본 논문에서는 꼭지점의 위치 정보를 이용하여 v_{right} 및 v_{left} 를 효율적으로 부호화 하였다.

그림 1에서 에지 $\overline{v_s v_t}$ 의 주변 꼭지점들의 분포 형태를 고찰해 보면 v_{right} 및 v_{left} 가 다른 꼭지점들에 비해 꼭



(a)



(b)

그림 3. 각도의 크기 순위로 구성된 꼭지점 순위 리스트: (a) 순위 리스트에서 최초로 v_{right} 혹은 v_{left} 가 발견되는 위치의 분포, (b) 순위 리스트에서 두 번째로 v_{right} 혹은 v_{left} 가 발견되는 위치의 분포.

지점 $v_s - v_t$ 와 이루는 각 $(\angle v_s v_{right} v_t$ 및 $\angle v_s v_{left} v_t)$ 이 다른 꼭지점들이 $v_s - v_t$ 와 이루는 각에 비해 상대적으로 큰 것을 관찰할 수 있다. 실제, 예지 $\overline{v_s v_t}$ 를 둘러싸고 있는 꼭지점들이 $v_s - v_t$ 와 이루는 각을 조사해보면, 그림 3에서 보는 바와 같이 v_{right} 와 v_{left} 가 다른 꼭지점에 비해 상위에 존재함을 볼 수 있다. 이때, 이들 각 $\angle v_s v_i v_t$ 는 벡터 $\overrightarrow{v_i v_s}$ 및 $\overrightarrow{v_i v_t}$ 가 이루는 각이므로 아래와 같이 벡터 내적으로 쉽게 구할 수 있다.

$$\cos \theta_i = \frac{\overrightarrow{v_i v_s} \cdot \overrightarrow{v_i v_t}}{|\overrightarrow{v_i v_s}| |\overrightarrow{v_i v_t}|}, \quad (2)$$

$$\theta_i = \angle v_s v_i v_t.$$

본 논문에서는 그림 3의 분포에서 발견되는 위치에 따라 Huffman 부호화를 수행하였다. 그리고, 고정 길이 부호화 (fixed length coding)를 이용한 기존의 알고리즘에 비해 향상된 부호화 효율을 얻을 수 있었다.

2.3 분할 꼭지점의 연결 정보 부호화

부호시에 상위 계층으로의 복원을 위해 꼭지점-분할 과정 에서 분할 꼭지점 v_s 을 전체 꼭지점들 중에서 찾아야한다.

표 2. 분할 꼭지점을 표시하기 위해 각 계층에서 필요한 비트량 비교

Layer 변화	기존의 탐색 범위에 필요한 비트량	개선된 탐색 범위에 필요한 비트량	개선 효율
2→1	29128	15950	0.54
3→2	24558	13904	0.56
4→3	20538	13246	0.64
5→4	17248	10011	0.58
6→5	14136	8200	0.58
7→6	12456	6975	0.56
8→7	10620	5854	0.55
9→8	9093	4880	0.53
10→9	7834	4075	0.52

기존의 Pajarola의 알고리즘에서는 l 계층(layer)에서 $l-1$ 상위 계층으로 복원하기 위해 l 계층의 전체 꼭지점과 같은 비트를 할당하여 l 계층의 꼭지점 중에서 분할 꼭지점인 꼭지점들을 지정해 주고 있다.

본 논문에서는 메쉬 영상의 위상(topology)을 유지하고 간략화로 인한 메쉬 영상의 급격한 품질 저하를 막기 위한 제한 조건들을 이용하여 탐색 범위를 한정해 주었다. 부호기에서 (1)에서 제시한 조건을 만족하는 에지만을 에지-제거하므로, 상위 계층으로의 복원시 분할 꼭지점의 후보가 될 수 있는 꼭지점은 다음과 같은 꼭지점 패턴을 갖는 꼭지점들로 한정된다. 이때, N 은 꼭지점 패턴으로 꼭지점에 연결된 삼각형의 개수를 의미한다.

$$5 < N_{\text{split vertex candidate}} < 10. \quad (3)$$

즉, 복호시에 해당 l 계층의 모든 꼭지점을 탐색할 필요 없이 (3)의 꼭지점 패턴을 만족하는 꼭지점들만 탐색해도 모든 분할 꼭지점들을 찾을 수 있다.

표 2는 기존의 알고리즘의 탐색 범위에 의한 부호화 비트량과 제안하는 알고리즘의 부호화 비트량의 예를 보여준다. 제안하는 알고리즘의 꼭지점 패턴을 우선 조사하여 탐색 범위를 결정하는 기법이 기존의 탐색 범위로 결정하는 기법에 비해 상당히 우수함을 확인할 수 있다.

III. 전산 모의 실험

제안하는 알고리즘의 성능평가를 위하여, 삼각형 메쉬 영상의 압축 실험에 널리 이용되는 'Bunny(꼭지점: 34446개, 삼각형: 68675개)' 모델을 이용하여 전산 모의 실험을 수행하였다. 이때, 위치 정보는 별도의 부호화를 수행하지 않고

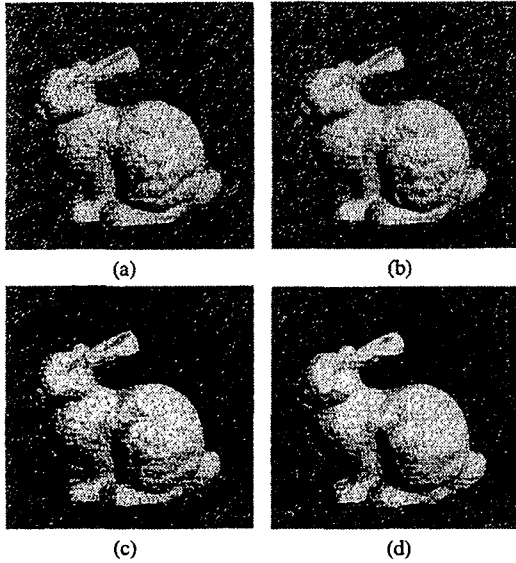


그림 4. 'Bunny' 실험 영상: (a) 제 1 계층(꼭지점: 34446, 삼각형: 68675), (b) 제 5 계층(꼭지점: 16135, 삼각형: 32053), (c) 제 10 계층 (꼭지점: 6721, 삼각형: 13225), (d) 제 16 계층(꼭지점: 2600, 삼각형: 4983).

전송하였다.

그림 4에서 점진적 부호화를 통해 형성된 각 계층의 'Bunny' 영상을 볼 수 있다. 이때, 제 16 계층이 최저 계층이고 제 1 계층이 원본 'Bunny' 영상이다. 제 16 계층은 원본 메쉬 영상의 7.5%의 꼭지점으로 구성되어 있으며, 단순화된 단계에서도 원본 'Bunny'의 특성을 잘 보여주고 있다.

표 3은 이들 각각의 계층간에 변화에 필요한 연결 정보 비트량을 보여주고 있다. 제안하는 알고리즘을 통해 'Bunny' 영상을 16 계층의 점진적 부호화를 수행하는데 요구된 비트량은 꼭지점당 4.91 비트가 필요한 것을 확인할 수 있다. 이는 기존의 Pajarola의 알고리즘에서 연결 정보 부호화를 위해 요구된 비트량 7.2 비트에 비해 대략 30%의 부호화 효율이 향상된 결과이다 [2].

이와 같은 성능 향상은 점진적 메쉬 압축 과정의 연결 정보 부호화에서 꼭지점의 위치 정보를 이용하여 부호화할 대상의 정보량을 감소시키고, 간략화에서 적용한 꼭지점 패턴 조건을 부호기와 복호기에서 함께 이용하여 분할 꼭지점의 탐색 범위를 감소시켰기 때문이다.

표 3. 하위 계층에서 상위 계층으로 복호하기 위해 필요한 비트량.

Layer 변화	분할 꼭지점 부호화 비트량	v_{right} 및 v_{left} 부호화 비트량
2→1	15950	14869
3→2	13904	11617
4→3	13246	10153
5→4	10011	8344
6→5	8200	6418
7→6	6975	5368
8→7	5854	4503
9→8	4880	3648
10→9	4075	3027
11→10	3376	2516
12→11	2846	2090
13→12	2401	1775
14→13	2034	1427
15→14	1702	1205
16→15	1432	988
Total	96884	77915
Bits per vertex	2.72	2.19

III. 결론

본 논문에서는 점진적 부호화 기법의 연결 정보 부호화 과정에서 꼭지점의 위치 정보 및 간략화 과정의 제한 조건을 이용하여 효율적인 부호화 알고리즘을 제안하였다. 이를 통해 기존의 점진적 부호화 과정의 연결 정보 부호화에 비해 30% 정도 향상된 부호화 성능을 얻을 수 있었다. 새로운 꼭지점 위치 정보 예측자(vertex geometry predictor)를 개발하여 위치 정보 부호화 성능 개선을 통한 전반적인 부호화 효율의 증가가 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] C. Touma, and C. Gotsman, "Triangle Mesh Compression," *Proc. Graphics Interfaces '98*, pp. 26-34, 1998.
- [2] R. Pajarola, and J. Rossignac, "Compressed Progressive Meshes," *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, vol. 6, no. 1, pp. 79-93, Jan.-Mar. 2000.
- [3] H. Hoppe, "Progressive Meshes," *Proc. SIGGRAPH '96*, pp. 99-108, 1996.
- [4] J. Li, and C.C. Kuo, "Progressive Coding of 3D Graphics Models," *Proc. IEEE*, vol. 96, no. 6, pp. 1052-1063, 1998.
- [5] G. Taubin, and J. Rossignac, "Geometric Compression through Topological Surgery," *ACM Trans. Graphics*, vol. 17, no. 2, pp. 84-115, 1998.
- [6] M. Deering, "Geometry Compression," *Proc. SIGGRAPH '95*, pp. 13-20, 1995.
- [7] A. Khodakovsky, P. Schroder, and W. Sweldens, "Progressive Geometry Compression," *Proc. SIGGRAPH 2000*, pp. 271-278, 2000.