

논문97-2-1-08

# Wavelet 변환 계수를 이용한 대용량 지형정보 데이터의 삼각형 메쉬근사에 관한 연구

유한주\*, 이상지\*\*, 나종범\*

## Fast Triangular Mesh Approximation for Terrain Data Using Wavelet Coefficients

Han Ju Yu\*, Sang Zee Lee\*\*, and Jong Beom Ra\*

### 요 약

본 논문에서는 대용량 지형 정보 데이터를 효과적으로 3차원 도시하기 위하여 wavelet 변환을 이용한 효과적이고 새로운 삼각형 메쉬 근사 기법과 압축 저장 기법을 제안한다. 제안된 방법은 wavelet 변환 계수의 공간-주파수 지역제한 특성을 이용하여 지형정보 데이터를 영역분할하고 각 영역에 대해 삼각형 메쉬를 생성하므로써 계산량이 적고 알고리즘이 간단하다는 장점이 있다. 또한 Embedded Zerotree Wavelet 부호화 기법을 도입하여 지형 정보데이터의 효과적인 저장, 관리는 물론 삼각형 메쉬 구성기법에 적용하였다. 제안된 지형정보 데이터의 3차원 고속도시기에는 데이터 압축, 저장 및 Level of Detail 구현에 이르는 모든 기법을 통합되었으며 모의실험을 통하여 높은 PSNR, 고속 수행, 간단한 구현 등의 장점들을 갖는 것이 확인되었다.

### Abstract

This paper propose a new triangular mesh approximation method using wavelet coefficients for large terrain data. Using spatio-frequency localization characteristics of wavelet coefficients, we determine the complexity of terrain data and approximate the data according to the complexity. This proposed algorithm is simple and requires low computational cost due to its top-down approach. Because of the similarity between the mesh approximation and data compression procedures based on wavelet transform, we combine the mesh approximation scheme with the Embedded Zerotree Wavelet (EZW) coding scheme for the effective management of large terrain data. Computer simulation results demonstrate that the proposed algorithm is very prospective for the 3-D visualization of terrain data.

\*한국과학기술원 전기 및 전자공학과  
Dept. of Electrical Engineering, KAIST  
\*\*국방과학연구소  
Agency for Defense Development, Taejon, Korea

※ 본 논문은 국방과학연구소의 연구비 지원에 의한 것임

### I. 서 론

최근 영화나 방송 등에서 효과적이고 실제적인 영상을 제작하기 위하여 컴퓨터 그래픽이 활발히 이용되고 있으며 시간이 갈수록 이를 이용한 영상제작의 비중은 점점 커

질 것으로 예상된다. 현재 상용화되어 있는 3차원 도시를 위한 그래픽 하드웨어들은 대부분이 다각형 메쉬의 도시를 기본으로 하고 있으며 특히 삼각형 메쉬를 기본 단위로 하는 시스템들이 주종을 이루고 있다. 삼각형 메쉬는 서로 겹치지 않고 각 변이나 꼭지점들을 공유하면서 연결되는 삼각형의 집합을 의미한다. 삼차원 도시를 위해서 사용되는 데이터 소스로는 3차원 digitizer의 출력, 인공위성 사진이나 레이더 조사로부터 얻어지는 지형정보 영상, 수학적 으로 정의되는 공간이나 상태와 같은 과학 데이터 등 아주 다양하다 [1]. 하지만 이러한 데이터 소스들로부터 얻어지는 삼각형 메쉬의 수는 엄청나게 많아  $10^6 \sim 10^7$ 이나 된다.

이와 같은 많은 수의 삼각형 메쉬를 도시하기 위해서는 오랜 시간과 많은 메모리가 필요하다는 문제가 있다.

이러한 많은 데이터량으로 발생하는 문제점을 줄이기 위하여 삼각형 메쉬의 수를 줄이기 위한 방법들이 연구되어져 왔다. 먼저 데이터로부터 얻어지는 정규적 분포의 다량의 초기 메쉬를 단순화 해 나가는 방법들이 제안되었으며 메쉬 근사 [2], 삼각형 메쉬 최적화 [3], 기하 최적화 [4] 등이 이에 속한다. 이러한 방법들은 초기 메쉬의 꼭지점이나 평면을 이용하여 지역적으로 메쉬의 수를 줄이거나, 메쉬의 모양, 꼭지점의 위치 등을 조절하여 주어진 에너지 함수를 최적화 하는 방법으로 메쉬를 수를 줄여나가며 시각적으로 좋은 결과를 보이거나 그 수행시간이 길다는 문제점이 있다.

이에 Gross는 wavelet 변환을 이용하여 2차원 지형정보를 효과적으로 빠르게 근사하는 방법을 제안하였다[5]. 2차원 지형정보 데이터는 인공위성이나 항공기 사진으로부터 지형의 고도 정보를 추출한 데이터이며 일반적으로 지형의 고도값과 밝기가 비례하므로 영상처리 분야에서 사용되는 기법을 이용할 수 있다. Gross의 방법은 지형정보의 다해상도 주파수 신호들을 wavelet 변환을 통하여 추출하고, 이러한 다해상도 주파수 신호를 각각 역변환하여 사용하므로써 비정규적으로 분포하는 다해상도의 중요한 꼭지점들을 찾는다. 그리고 이렇게 얻어진 꼭지점들을 quadtree형태의 격자로 구성하고 사각형 격자를 삼각형으로 쪼개서 삼각형 메쉬를 구성한다. 하지만 이와같은 기법에서는 중요 꼭지점을 찾기 위해 비교적 시간이 많이 걸리는 반복적인 방법을 써야 하고, 메쉬의 해상도를 바꾸기 위해서는 매번 wavelet 역변환을 수행해야 한다는 단점이 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 논문은 Gross가 제안한 방법과 달리 wavelet 계수의 공간 영역과 주파수 영역에서 나타나는 지역화 특성 (spatio-temporal localization characteristics)을 이용하여 지형정보 영역의 신호 복잡도를 판단하고 복잡한 영역은 많은 수의 메쉬로, 간단한 영역은 적은 수의 메쉬로 근사하는 방법을 제안한다. 제안된 방법은 wavelet 변환영역에서 신호 복잡도를 판단하여 지형정보 영역의 격자 구조를 결정하므로 알고리즘이 빠르고 간단하며 메쉬 모델의 해상도를 바꾸기 위

하여 wavelet 역변환과 새로운 데이터 구조를 구성하는 과정이 필요없으므로 연속 해상도 변이 LOD를 구현하는데 효과적이다. 또한 격자 구조를 얻기 위한 데이터 구조를 EZW (Embedded Zerotree Wavelet) 압축기법의 zerotree를 이용하여 영상 압축기법과 접목하였으며 이러한 결합을 통하여 지형정보의 압축 저장, 삼각형 메쉬화 및 LOD (Level of Detail) 구현을 위한 하나의 새로운 통합 환경을 제안하였다.

본 논문의 2장에서는 Wavelet 변환계수를 이용한 삼각형 메쉬 구성기법을 제안하며 Wavelet 계수의 전반적 특성과 변환계수와 영상영역 특성의 상관 관계를 연구한다.

3장은 영상 압축기법과 제안된 삼각형 메쉬 단순화 기법을 결합하여 압축 저장된 지형정보를 이용하는 방법을 제안한다. 제안된 방법에서는 삼각형 메쉬를 저장하기 위해 필요한 메모리 량보다 평균적으로 40배정도 적은 양의 메모리를 이용하여 방대한 크기의 지형정보를 관리할 수 있다.

4장에서 제안된 방법들에 대한 실험결과를 보이고 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

## II. Wavelet 변환 계수를 이용한 삼각형 메쉬 구성

Wavelet 변환 기법 [6-7]은 신호로부터 다중해상도 정보를 얻기 위하여 신호처리 분야 및 영상 압축 분야에서 활발히 이용되어 왔으며 최근에는 컴퓨터 그래픽스 분야에서도 활발히 이용되고 있다[8-10]. 이러한 wavelet 변환은 주어진 신호를 주파수 영역과 공간 영역에 지역적으로 신호를 분리 시켜주는 특성과 다중해상도 해석 특성을 가진다. 본 장에서는 wavelet 변환의 특성과 그 특성을 이용한 지형 정보 데이터의 삼각형 메쉬 근사 방법에 대하여 알아본다.

### 1. Wavelet 변환 특성

Wavelet 변환은 에너지 제한 함수  $f(x, y) \in L^2(R^2)$ 를 유사한 기저함수로 확장 표현한다. Wavelet 변환을 정의하기 위해서 구간  $[0,1)$ 에서 구간연속 (piecewise-constant) 함수의 벡터 공간  $V$ 를 정의한다.  $V^n$ 는 구간  $[0,1)$ 에서 상수인 함수들을 포함하는 벡터 공간이며  $V^1$ 는 구간  $[1, \frac{1}{2})$ 와 구간  $[\frac{1}{2}, 1)$ 에서 상수인 구간연속 함수를 포함하는 벡터 공간이라고 정의하면 벡터 공간  $V^n$ 는  $[0,1)$  구간을 동등한 크기의 2개로 나눈 구간에서 상수로 나타나는 모든 함수들을 포함하는 벡터 공간이다.  $V^0 \subset V^1 \subset \dots \subset V^n \dots$ 이며,  $\dots + V^{n-2} + V^{n-1}$ 를  $V^n$ 의 다중해상도 해석이라고 정의하고 각 벡터 공간  $V^n$ 에 대하여 scaling 함수라 불리는 기저함수  $\phi^n$ 를 정의한다. 또한 벡터 공간  $V$ 와 함께  $V^{\perp}$ 을 구성하고  $V$ 에 대해 직교 상보관계 (orthogonal complement)인 벡터 공간  $W$ 를 정의한다.

$$V^{j+1} = V^j + W^j \quad (1)$$

이때 벡터 공간  $W^j$ 를 나타내는 기저함수  $\psi^j$ 를 정의하고 이를 wavelet이라 부르며 다음과 같은 특성을 갖는다.

- 벡터 공간  $V^j, W^j$ 를 구성하는 기저함수  $\phi^j$ 와  $\psi^j$ 는 벡터 공간  $V^{j+1}$ 의 기저함수를 구성.

- 벡터 공간  $W^j$ 에 대한 모든 기저함수  $\psi^j$ 는  $V^j$ 에 대한 기저함수  $\phi^j$ 와 주어진 내적에 대하여 직교관계 (orthogonal).

신호처리 측면에서 완전히 복원 가능한 선형 위상특성을 갖춘 orthonormal 기저함수는 Haar 기저함수를 제외하고는 존재하지 않는다는 것이 Smith [11]에 의해 알려졌다. 따라서 선형 위상특성을 갖는 기저함수를 얻기 위해서 wavelet 기저함수의 orthonormal 특성을 포기하고 이중직교 (biorthogonal) 특성을 이용하는 방법이 Daubechies [6]와 Mallat [7]에 의해서 제안되었다. Wavelet 기저함수를 구현하기 위해서 Vetterli [12]은 quadrature mirror filter를 이용하여 구현하는 방법을 제안하고 몇 가지의 filter bank를 제안하였다. 이와 같은 wavelet을 이용하여 신호처리 분야에서 압축기법에 주로 이용되어 왔는데 Antonini [13]는 spline 기저함수를 이용한 wavelet과 벡터 양자화를 근간으로 하는 신호 압축방법을 제안하였다. 고차 Spline 기저함수는 연속 함수로 신호처리나 컴퓨터 그래픽스 분야에서 주로 이용되고 있다. 2차원 이산 wavelet 변환은  $x, y$ 가 서로 독립적이도록 하여 이용하며 다음과 같은 기저함수로 구성된다.

$$\begin{aligned} \phi_{mpq}^2 &:= 2^m \phi(2^m x - p)\phi(2^m y - p) \\ \phi_{mpq}^{2,1} &:= 2^m \phi(2^m x - p)\psi(2^m y - p) \\ \phi_{mpq}^{2,2} &:= 2^m \psi(2^m x - p)\phi(2^m y - p) \\ \phi_{mpq}^{2,3} &:= 2^m \psi(2^m x - p)\psi(2^m y - p) \end{aligned} \quad (2)$$

따라서 어떤 에너지 제한 함수  $f(x, y) \in L^2(R^2)$ 는 다음과 같이 해석된다.

$$f(x, y) = \sum_p \sum_q \left( c_{pq}^M \phi_{mpq}^2 + \sum_{m=1}^M (c_{pq}^{m,1} \phi_{mpq}^{2,1} + c_{pq}^{m,2} \phi_{mpq}^{2,2} + c_{pq}^{m,3} \phi_{mpq}^{2,3}) \right) \quad (3)$$

$m = 1, \dots, M$

2차원 wavelet 변환은 그림 1과 같이 QM-filter pyramid를 이용하여 구현한다.

## 2. Wavelet 변환계수를 이용한 새로운 삼각형 메쉬 구성방법

이장에서는 2차원 지형정보 (terrain) 데이터를 wavelet 변환한 뒤 변환 계수를 이용하여 삼각형 메쉬를 구성하는 방법을 제안한다. Wavelet 변환을 이용한 지형정보 데이터

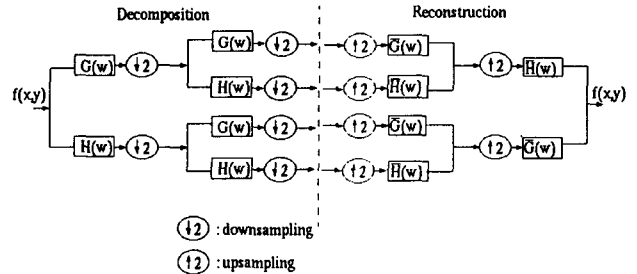


그림 1. QMF를 이용한 2차원 wavelet 구성  
Fig. 1. QMF implementation of 2D wavelet transform

의 삼각형 메쉬 구성방법은 Gross [5]에 의해서 처음 제안되었다. Gross는 wavelet 변환의 차신호들을 해상도에 따라 각각 복원하여 복원된 영상의 꼭지점 정보들을 이용하여 quadtree로 구성된 뒤 quadtree의 leaf node들을 삼각형으로 바꾸었다. Gross 방법은 계산량이 기존의 방법들에 비해 비교적 적고 lookup table을 이용하여 빠르게 삼각형 메쉬들을 구성하는 장점이 있는데 반하여, 메쉬를 구성하기 위해서는 매번 여러 단계의 wavelet 차신호를 wavelet 역변환 해야하고 역변환된 영상을 이용하여 다시 quadtree를 구성해야 하므로 물체를 보는 거리에 따라 메쉬의 수와 해상도를 조절하여 도시하는 level of detail을 구현하기에는 단점이 있다. 본 논문은 이러한 단점을 극복하기 위하여 wavelet 계수를 이용한 새로운 메쉬 구성방법을 제안한다.

먼저 wavelet 변환 계수를 이용한 메쉬 구성을 위하여 wavelet변환 계수와 영상의 관계를 살펴보면 wavelet변환은 data를 주파수 방향과 공간방향으로 각기 지역적으로 분리시켜주는 특성이 있다. 즉 wavelet 변환 계수의 해상도 level을 알면 그 계수의 주파수 영역에서의 위치를 알 수 있으며 변환계수의 위치를 알면 공간영역에서의 위치를 알 수 있다.

그림 2를 예로 보면  $m=1$ 인 위치의 차신호는 공간영역에서  $2 \times 2$ 영역의 데이터에서 존재하는 고주파 성분을 대표한다. QMF를 이용한 이산 wavelet 변환 구현에 있어서 신호처리 측면에서 보면 해상도가  $m$ 인 wavelet 계수는  $2^m \times 2^m$ 영역의 정보를 중심으로 주파수 성분을 구하므로 정확한 위치의 정확한 기여도를 알 수는 없지만 주어진 영역의 특성을 충분히 나타낸다고 가정할 수 있다.

제안된 방법은 이러한 wavelet 변환계수 특성을 이용하는 데  $m$ 단계의 wavelet 계수는  $2^m \times 2^m$ 영역에서 고주파 성분을 대표하며, 이 계수가 큰 영역은 실제 영상이 복잡한 영역이라고 가정하며 계수가 작은 영역은 단순한 영역으로 가정한다. 이와 같이 판단하여 복잡한 영역은 많은 수의 삼각형 메쉬로, 단순한 영역은 적은 수의 삼각형 메쉬로 근사하면 효과적으로 영상 정보를 메쉬화할 수 있다. 즉 wavelet계수를 이용하여 영상을 복잡한 영역과 단순한 영역으로 나누고, 복잡한 영역은 작은 삼각형들로 단순한 영역은 큰 삼각형들로 나타내는 것이며 이렇게 하므로써 고도 정보 데이터의 표면을 신호의 복잡도에 따라 삼각형

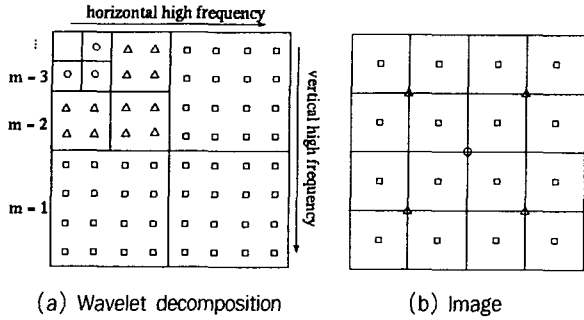


그림 2. Wavelet 변환의 공간-주파수 지역분리 특성  
 Fig. 2. Spatio-temporal localization characteristics of wavelet transform

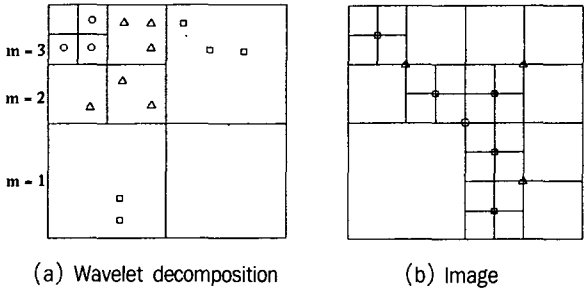


그림 3. Wavelet 변환 계수를 이용한 격자 구조  
 Fig. 3. Cell structure of an image based on wavelet coefficients

메쉬로 근사한다. 일반적으로 영상 데이터는 “감쇄 신호” 모형으로 가정된다. 감쇄 신호 모형은 data에 높은 상관관계가 존재하여 낮은 주파수 성분의 신호는 강하게 나타나고 높은 주파수 신호일수록 점점 작아진다고 가정하는 것이다.

일반적으로 자연계의 신호가 이와 같은 가정을 만족시킨다는 것은 널리 알려져 있다. 감쇄 신호 모형을 기반으로 하여 wavelet 변환 계수를 살펴보면  $m$ 이 높으면 높을수록 에너지는 높게 나타나며  $m$ 이 낮으면 에너지도 낮아짐을 알 수 있다. 또한 위치가 일치하는 같은 방향의 계수들은 서로 상관 관계를 가지며 신호  $x$ 가 주어진 문턱값  $T$ 보다 낮다면 높은 해상도의 위치가 일치하는 같은 방향의 계수들도 또한  $T$ 보다 작다고 가정할 수 있다.

따라서 초기에  $m=M$ 인 계수들을  $T$ 와 비교하고 만약 계수가  $T$ 보다 작다면 같은 위치의 모든 높은 해상도의 wavelet 계수는  $T$ 보다 작다고 가정할 수 있으므로  $2^m \times 2^m$  크기의 하나의 격자로 대표된다. 계수가  $T$ 보다 크다면  $2^m \times 2^m$  크기의 영역은 하나의 격자로 대표하기에는 복잡한 영역이므로 영역을 4개의  $2^{m-1} \times 2^{m-1}$  크기의 영역으로 나누고 같은 위치의 4개의  $m-1$  계수들을 대상으로  $T$ 에 대해서 비교하여 앞서와 같이 반복한다. 이와 같이 낮은 해상도의 계수들로부터 시작하여 높은 해상도의 계수들로

나누어 비교하는 것을 반복한다.  $m=1$ 인 계수는  $T$ 보다 크다면  $1 \times 1$  크기의 격자로 나누고 반대로 작다면  $2 \times 2$  크기의 격자로 나타내진다. 이렇게 구성된 격자들을 나누어서 삼각형 메쉬를 구성하게 된다.

그림 3에 wavelet 계수를 이용한 격자 나누기의 예가 나타나 있다. 이와 같은 방법을 효과적으로 수행하기 위해서 zerotree 구조를 이용한다. Zerotree는 wavelet 변환 계수를 quadtree의 형태로 이용하기 위해 Shapiro [14]가 제안한 데이터 구조이다. 그림 3의 (b)와 같이 사각형 격자를 구성한 뒤 Gross [5]가 제안한 방법과 같이 lookup table을 이용하여 삼각형 메쉬를 구성한다.

### III. Embedded Zerotree Wavelet을 이용한 지형정보의 압축 저장 및 LOD 구현

삼각형 메쉬를 이용하여 삼차원 도시하는 경우 메쉬정보를 저장하기 위해서는 삼각형을 이루는 각 꼭지점의 위치와 꼭지점간의 관계를 저장해야 한다.  $512 \times 512$  크기의 지형정보를 메쉬화 하여 저장한다고 가정하면 각 삼각형 정보를 위하여 54bit, 꼭지점 정보를 위해서 36bit가 필요하다고 할 때 약 4.8Mbyte의 메모리가 요구되며 메쉬의 수를 10%로 줄였다고 하면 약 480Kbyte 정도의 메모리가 요구된다. 하지만 원래의 지형정보를 압축 없이 저장하면 256Kbyte의 메모리만 필요하며 영상처리 분야에서 이용되는 정보 압축 기법을 이용하면 그보다 10배에서 20배 이상 줄일 수 있게 된다. 따라서 지형정보를 3차원 도시하는 경우에는 원래의 데이터를 빠르게 메쉬로 근사하는 방법이 존재한다면 데이터를 저장할 때 메쉬정보가 아니라 원래의 영상 정보를 저장하여 이용하는 것이 보다 효율적이다.

하지만 영상 정보를 이용하여 초기 메쉬를 구성하는 것은 쉽게 할 수 있으나 이를 이용하여 메쉬를 근사하는 것은 기존의 방법들로는 많은 계산량이 필요하고 도시하는데 많은 시간이 걸린다. Gross[5]는 wavelet 변환을 이용하여 빠르게 메쉬근사를 얻는 방법을 제안하였다. 이를 이용하면 지형정보를 2D로 저장하여 이용할 수 있으나 wavelet 계수들을 여러 해상도마다 각각 영상을 복원하여 표면 정보를 근사하므로 필요한 해상도의 메쉬를 얻기 위해서는 wavelet 역변환과 영역 분할 격자를 매번 계산해야 하는 단점이 있다. 본 장에서는 영상 압축분야에서 이용되는 EZW 압축기법을 이용하여 지형정보를 압축 저장하고 복원단계에서 zerotree 정보를 복원과 메쉬 근사에 동시에 사용하여 빠르고 효과적으로 지형정보의 표면을 삼각형 메쉬로 근사하는 방법에 대하여 설명하겠다. 또한 zerotree를 이용한 LOD구현방법도 제안한다.

EZW를 이용한 영상 압축 방법은 Shapiro [14]에 의해서 제안되었는데 wavelet 변환 계수의 embedded 특성을 이용한 영상 방법이다. Embedded 부호화는 정보를 전송할 때 중요한 정보부터 먼저 보내도록 bit stream의 순서를 중

요정보 순으로 나열시켜서 압축 전송하는 기법이다. 압축 단에서는 목표로 하는 bit rate나 distortion이 만족될 때까지 순차적으로 신호를 전송하며 복원단에서는 입력되는 압축신호를 받아서 원하는 해상도나 bit rate에서 신호를 복원한다. 이러한 순차적 전송기법을 이용하면 하나의 압축단으로 다양한 성능의 복원단을 이용할 수 있다. 지형정보 데이터 베이스를 이용할 때 이와 같은 방법의 영상 압축방법을 이용하여 지형정보를 압축하여 저장하면 고객은 자신의 시스템 성능에 맞는 해상도나 bit rate에서 정보를 이용하면 된다.

복원단에서는 embedded bit stream을 받아서 significance map으로 zerotree를 구성하고 역양자화 과정을 통하여 wavelet 계수의 값을 복원한다. 새로 제안된 방법은 원래의 EZW 복호기단에 약간의 처리단을 추가하여 지형정보의 삼각형 메쉬근사를 구현한다. 제안된 메쉬근사 방법에서 복잡도를 판단하는 기준  $T$ 는 EZW 부호화에서 중요도를 나타내는 기준  $T$ 와 일치한다. 따라서 제안된 메쉬근사 방법은 EZW 복호기단에서 생성되는 zerotree를 이용하여 영역의 복잡도를 판단할 수 있다. EZW 부호화된 정보를 바로 이용하여 압축 신호를 복원하면서 삼각형 메쉬로 근사하기 위해서 원래의 EZW복호기에 삼각형 격자 생성기와 이를 이용한 삼각형 메쉬생성기를 추가한다. 삼각형 메쉬근사를 위하여 영역의 복잡도를 판단하는 계산 없이 기존의 EZW 복호기에 존재하는 zerotree를 이용하여 영역의 복잡도를 정하고 이에 따라 zerotree의 leaf node에 대해서 삼각형 격자를 구성하고 이러한 삼각형 격자를 이용한 삼각형 메쉬구조 (topology)를 얻는 것이다.

Zerotree에 의해서 얻어진 삼각형 메쉬정보는 2D상의 x, y좌표만으로 구성되며 새로이 필요한 z좌표 값은 wavelet 계수로 이루어진 영상을 역 wavelet변환을 통하여 얻는다. 삼각형을 이루는 각 꼭지점의 z값을 zerotree로 제한된 wavelet 계수에서 얻고 삼각형 메쉬근사를 위한 영역정보도 동일한 zerotree로부터 구하므로 삼각형 근사를 위한 메쉬의 해상도와 영상의 해상도를 일치시키고 시각적으로 저역 주파수 제한된 효과를 갖는다.

지역적 해상도 차등 도시기법 (Level of Detail)은 물체가 도시되는 해상도에 따라 물체 모형의 해상도를 조절하는 기법이다. 즉 어느 물체가 상대적으로 낮은 해상도로 도시되는 경우에는 적은 수의 삼각형 메쉬로 근사하는 것이 바람직하며 이렇게 하므로써 도시하기 위한 시간 및 메모리를 절약할 수 있다. LOD기법은 주로 다중 해상도의 모델들을 구성하여 놓고 도시할 때 필요한 해상도에 따라 선택적으로 골라서 도시하는 기법과, 기본 물체 모델을 구성하여 놓고 이를 이용하여 필요한 해상도로 물체를 변화시키며 도시하는 적응적 해상도 변이기법으로 구분된다. 전자는 여러 해상도의 모형을 저장해야 하고 각 모델간의 비연속성으로 인한 결점이 있다. 반면에 후자는 적은 메모리량 이용 및 물체 모형 해상도의 연속성 구현이 가능한 장점이 있으나 현재 연구되어진 삼각형 메쉬 단순화 기법

으로는 실시간 구현이 어렵다. 기존의 LOD방법은 주로 여러 해상도의 물체 모형을 동시에 저장하고 이를 도시될 해상도에 따라 모형을 선택하여 도시하는 방법을 이용하였다. Hoppe는 불연속적 해상도 변이 문제를 해결하기 위하여 "progressive mesh"[15]를 제안하였다. 하지만 도시되는 해상도의 변화가 클 때 연산하는 계산량이 많으며 매 해상도마다 변화하는 정보를 저장해야 하기에 정보 저장량도 상당하다.

그림 4와 같이 시각점에서 물체를 볼 때 정의되는 도시체적이 물체 평면에 정사영되어 나타나는 평면을 도시평면이라 하고, 도시 평면을 포함하는 지형 평면의 격자들에 대해서만 삼각형 메쉬근사를 수행한다면, 화면에 도시하는데 필요한 모든 지형 정보를 골라 낼 수 있다. 그림 4에서 보듯이 시각점과 지형 평면과의 거리에 따라, 정의되는 도시평면의 크기는 비례한다. 이때 같은 지형 정보에 대해서 도시 평면의 면적이 커지면 커질수록 도시되는 지형 정보의 해상도를 낮추어도 전체적이 시각적 해상도는 영향을 받지 않는다. 따라서 지형 정보를 도시할 때 도시평면과 지형 평면의 면적 비에 따라 도시 평면을 포함하는 물체 평면의 해상도를 조절하여 메쉬근사를 하는 방법으로 LOD를 구현한다.

이러한 다양한 해상도의 모형을 얻기 위하여  $T_i$ 를 문턱값으로 구성된 초기 zerotree를 기반으로 도시 평면과 지형 평면의 넓이 비율에 따른 새로운 문턱값  $T_i$ 를 다음과 같이 결정한다.

$$T_i = \begin{cases} a(\frac{A_n}{A_i})+b & T_i \geq T_i \\ T_i & otherwise \end{cases} \quad (4)$$

$A_i$  = 도시평면의 면적       $A_n$  = 도시평면의 면적  
 $a$  = 비례 계수               $b$  = 문턱값 옵션

$T_i \geq T_i$ 로 제한되면  $T_i$ 로 구성되는 zerotree는 모든  $T_i$ 로 구성되는 zerotree를 포함한다. 따라서 초기 zerotree를 충분히 높은 해상도를 갖는  $T_i$ 로 구성하고 도시할 때는 도시평면의 면적에 의한  $T_i$ 를 기준으로 초기 zerotree에서 새로운 값에 대한 leaf node를 이용하여 영역의 삼각형 모형을 구한다. 초기 zerotree와  $T_i$  zerotree의 관계는 그림 5에 예가 나타나 있다. 초기 zerotree를 이용하여  $T_i$  zerotree의 leaf node를 구하는 것은 적은 계산량으로 가능하며 전체적으로 실시간 구현이 가능하다.

앞에서 제안된 압축 정보를 이용한 삼각형 메쉬근사 및 LOD구현 방법을 통합하여 그림 6과 같은 지형 정보의 효과적 3차원 도시를 위한 통합 환경을 제시한다. 도시기는 전송 채널이나 데이터 베이스, 또는 저장 메모리로부터 EZW로 부호화된 정보를 받아서 복원하고 이때 생성되는 zerotree를 이용하여 LOD를 구현하여 삼각형 메쉬를 모형을 얻어서 도시한다. 이때 전송될 정보량은 전송 bit rate나 원하는 최상 화질  $T_i$ 에 의해서 결정된다. 도시기는 사용자

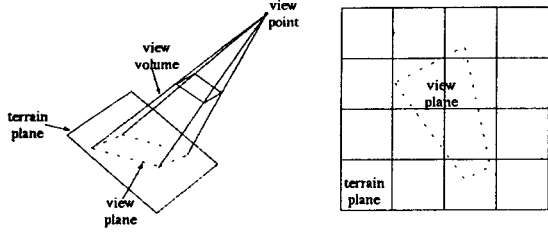


그림 4. 지형평면과 도시 평면  
Fig. 4. View plane on the terrain plane

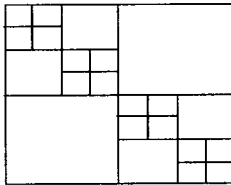
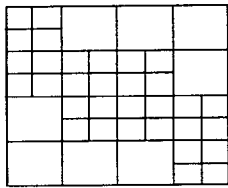
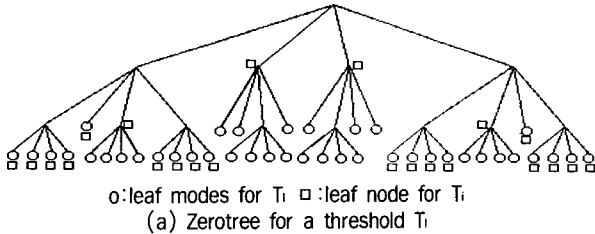


그림 5. 경계치에 따른 격자 구성의 예( $T_i/T_i$ )  
Fig. 5. Cell structures depend on the threshold value( $T_i/T_i$ )

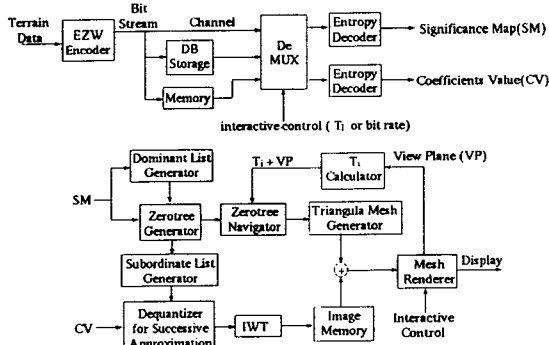


그림 6. 지형정보데이터 도시기 전체 구조  
Fig. 6. Terrain data rendering system

로부터 시각점을 입력받고 도시 체적을 계산한 뒤 도시 평면의 크기에 따라  $T_i$ 를 결정하고  $T_i$  zerotree를 이용하여  $T_i$  zerotree의 leaf node들을 구한다. 이렇게 얻어진 leaf node들로 구성되는 격자를 삼각형 메쉬의 형태로 바꾼다. 얻어진 삼각형 메쉬와 영상 메모리상의 복원 영상을 결합하여 메쉬를 구성하는 삼각형의 각 꼭지점에서의 z값을 정한 뒤 도시한다. 제안된 시스템은 압축 저장된 지형정보를 이용하여 지형 정보의 삼각형 메쉬근사 도시를 위한 메모리 사용량을 효과적으로 줄이며 영상복원과 함께 구성되는 zerotree를 초기 zerotree로 이용하여 삼각형 메쉬를 구하는데 이용하므로 적은 추가 계산량으로 효과적인 LOD를 구현한다.

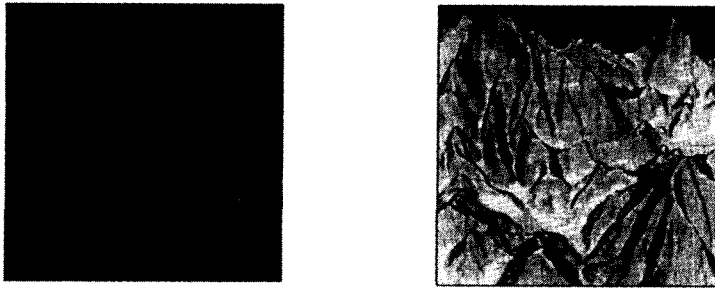
#### IV. 실험 결과

앞에서 제안되었던 방법을 구현하기 위해 C 언어를 사용하였으며 삼각형 메쉬의 도시를 위한 도시기는 OpenGL [16]을 이용하였다. 컴퓨터 모의실험은 Silicon Graphics사의 Indigo2 High Impact를 이용하였다. 실험을 위한 지형정보 영상은 1:50,000 배율의 256×256 영상을 이용하였다.

실험을 위한 지형정보 영상은 그림 7의 (a)에 있다. Wavelet 계수를 이용한 지형정보의 격자 분할 방식의 성능을 평가하기 위해서 그림 7의 (b), (c), (d)는 여러 가지 문턱값 대하여 생성된 삼각형 메쉬와 Gouraud shading된 영상을 도시 하였다. 결과를 보면 wavelet 계수를 이용한 영상 격자 나누기 방식이 영상의 복잡도를 잘 반영함을 알 수 있다. 표 1에 각 문턱값에 대한 EZW 복원된 영상의 PSNR과 결과 메쉬의 PSNR, 그리고 삼각형 메쉬 근사의 수행 시간이 나타나 있다. 삼각형 메쉬의 높은 PSNR은 근사된 삼각형 메쉬가 원래의 지형 정보 영상을 상당히 정확하게 근사함을 보인다. 복원 영상의 PSNR과 삼각형 메쉬의 PSNR은 평균적으로 15dB정도 차이가 난다. 이러한 차이의 원인으로는 wavelet 계수를 이용한 영역 분할법에서 계수의 특성을 격자 내부에 제한된다는 가정, 즉 Harr 기저함수 특성을 가정하고 spline 기저함수를 이용하였기 때문이다. 이러한 문제에 대해서는 더 많은 연구가 필요하다. 표 2에는 EZW 부호화된 지형정보를 이용할 때의 bit rate와, 삼각형 근사된 모형의 메모리 요구량 등이 나타나 있다. 표 2서 보듯이 지형정보 데이터를 EZW 부호화 하여 저장하는 것이 직접 메쉬를 저장하는 경우보다 약 34배에서 45배정도 메모리를 절약한다. 특히 주로 저장되는 고해상도 정보의 경우에는 평균적으로 40배이상을 절약한다. 메모리 사용량 비교를 위하여 삼각형 메쉬를 저장할 때 삼각형 정보를 위하여 18×3bit, 꼭지점 정보를 위하여 12×3bit가 필요하다고 가정하였다.

#### V. 결론

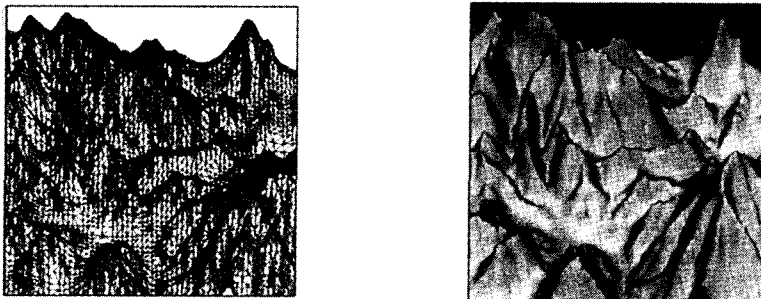
본 논문에서는 wavelet 변환계수를 이용하여 빠르고 효



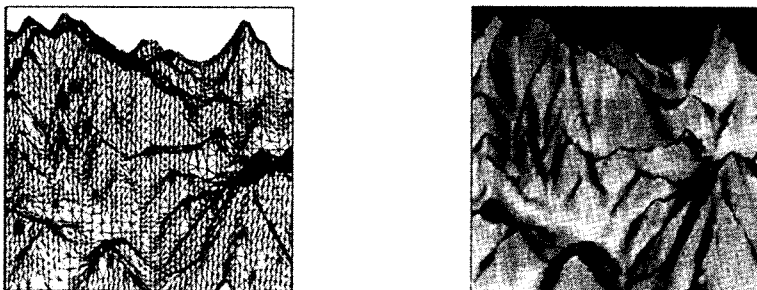
(a) 지형정보 데이터(왼쪽)와 Gouraud shade 영상  
(a) Terrain data(left) and Gouraud shaded image



(b) The number of triangles = 51,646, remain ratio = 39.7%



(c) The number of triangles = 21,221, remain ratio = 16.3%



(d) The number of triangles = 9,193, remain ratio = 7.1%

그림 7. 지형정보 데이터와 각 해상도의 삼각형 메쉬 및 Gouraud shading된 영상  
Fig. 7. Terrain data, wireframes, and Gouraud shaded images on defferent resolution

표 1. 제안된 방법의 성능  
Table 1. Performance of the proposed method

Threshold	# of triangles	# of vertices	Search time [sec]	Time for triangulation [sec]	PSNR of wireframe [dB]	PSNR of decoded image[dB]	Remaining rate[%]
0	130050	65536	-	-	-	-	100
1.11	51646	26154	0.04	0.68	48.55	50.04	39.7
2.22	21221	10832	0.03	0.26	47.03	48.48	16.3
4.45	9193	4754	0.01	0.12	45.17	46.84	7.1

표 2. 메모리 사용량  
Table 2. Comparison of the required memory

Threshold	Bit rate [bpp]	Memory for wireframe [byte]	Memory for EZW [byte]	Memory saving ratio
0	8	1.1M	64K	17.9
1.11	1.23	455.4K	9.8K	46.5
2.22	0.53	147.5K	4.2K	35.1
4.45	0.27	79.2K	2.2K	36.0

과적인 지형정보의 삼각형 메쉬 구성 기법을 제시하였다. Wavelet 변환 계수의 공간-주파수 지역화 특성을 이용하여 여러 해상도의 wavelet 계수와 영상 영역의 관계를 구하고 이에 따라 영상 영역을 분할하여 삼각형 메쉬를 구성한다. 낮은 해상도의 wavelet 계수를 이용하여 높은 해상도의 wavelet 계수값의 예측이 가능하며 top-down 방식의 고속 알고리즘을 구현할 수 있다. 또한 전체 데이터 구조를 영상 압축에서 널리 쓰이는 EZW zerotree와 일치시킴으로써 EZW 부호화 기법을 수정 없이 곧 바로 적용할 수 있으며 이는 거대한 영역을 나타내는 지형정보를 관리하고 3차원 도시하는데 효과적이다. 또한 각 영상 영역을 quadtree 형태의 격자구조로 분할하여 삼각형을 구성하기 때문에 도시되어야 할 영역에 대해서만 선택적으로 삼각형 메쉬 근사를 수행하여 연속 해상도 변이 LOD를 효과적으로 구현할 수 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] W.J. Schroeder, "Polygon reduction techniques," *ACM SIGGRAPH94 Course Notes*, no. 4, pp. 11-147, Jul. 1994.
- [2] W.J. Schroeder and J.A. Zarge, "Decimation triangle meshes," *Proc. SIGGRAPH92*, pp. 65-70, Jul. 1992.
- [3] H. Hoppe, T. DeRose, T. Duchamp, T. McDonald, and W. Stuetzle, "Mesh optimization," *Proc. SIGGRAPH93*, pp. 19-26, Jul. 1993.
- [4] P. Hinker and C. Hansen, "Mesh optimization," *Proc. Visualization '93*, pp. 189-195, 1993.
- [5] M. Gross, O.G. Staadt, and R. Gatti, "Efficient triangular surface approximations using wavelets and quadtree data structure," *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphic*, vol. 2, no. 2, pp. 130-143, Jun. 1996.
- [6] I. Daubechies, A. Grossman, and Y. Mayer, "Orthonormal bases of compactly supported wavelets," *Comm. Pure Appl. Math.*, vol. 41, pp. 909-996, 1988.
- [7] S. Mallat, "A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intel.*, vol. 11, Jul. 1989.
- [8] E.J. Stollnitz, T.D. DeRose, and D.H. Salesin, "Wavelet for computer graphics: A primer, part 2," *IEEE Comp. Graphics and Applications*, vol. 15, no. 4, pp. 75-85, Jul. 1995.
- [9] D. Berman, J. Bartell, and D. Salesin, "Multiresolution painting and composition," *Proc. SIGGRAPH94*, pp. 85-90, Jul. 1994.
- [10] A. Finkelstein and D. Salesin, "Multiresolution curves," *Proc. SIGGRAPH94*, pp. 261-268, Jul. 1994.
- [11] M.J. Smith and D.P. Barnwell, "Exact reconstruction of tree structured subband coders," *IEEE Trans. Acoust. Signal Processing*, vol. ASSP-34, pp. 434-441, 1986.
- [12] V. Vetterli and C. Herley, "Wavelet filter banks: Relationships and new result," *Proc. IEEE ICASSP*, Albuquerque, Apr. 1990.
- [13] M. Antonini, M. Barlaud, P. Mathieu, and I. Daubechies, "Image coding using wavelet transform," *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 1, no. 2, Apr. 1992.
- [14] J.M. Shapiro, "Embedded image coding using zerotree of wavelet coefficients," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 41, no. 12, Dec. 1993.
- [15] H. Hoppe, "Progressive mesh," *Proc. SIGGRAPH96*, pp. 99-108, Aug. 1996.
- [16] J. Neider, T. Davis, and M. Woo, *OpenGL Programming Guide*, Addison Wesley, 1993.



---

저 자 소 개

---



**유 한 주**

1991년 2월 한양대학교 전자공학과 졸업  
1993년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사학위 취득  
1993년 3월 ~ 현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사과정  
주관심분야 : 3차원 visualization, 영상 부호화



**이 상 지**

1977년 2월 서울대학교 전자공학과 졸업  
1981년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사학위 취득  
1991년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사학위 취득  
1977년 4월 ~ 현재 국방과학연구소 책임연구원  
주관심분야 : GIS, 3차원 시각화



**나 종 범**

1975년 2월 서울대학교 전자공학과 졸업  
1977년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사학위 취득  
1983년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사학위 취득  
1987년 7월 ~ 현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 교수  
주관심분야 : 디지털 영상 처리, 비디오 신호 처리, 3차원 시각화