

## 높이 맵의 효율적인 뷰 의존적 표현

정용호 · 함원경 · 박상철<sup>†</sup>

아주대학교 산업공학과

### Efficient View-dependent Refinement of a Height Map

Yong Ho Chung, Won K. Hwam, and Sang Chul Park<sup>†</sup>

Department of Industrial Engineering, Ajou University

Received 29 November, 2013; received in revised form 23 December, 2013; accepted 2 January, 2014

#### ABSTRACT

This paper proposes a procedure enabling the extraction of view-dependent triangular approximations from a height map. In general, procedures to approximate a height map use tree hierarchies. These methods, however, have a limitation in terms of accuracy, because they depend on tree hierarchy than terrain features. To overcome the difficult, we apply the simplification method for triangular meshes to a height map. The proposed procedure maintains full decimation procedure to support multiresolution. The maintenance of decimation procedure results in creation of the groups (trees), each of which consists of vertices that can be merged into one vertex (root node). As the groups have tolerance which is determined by some tests, they support the generation of view-dependent arbitrary triangular meshes.

**Key Words:** Height map, Multiresolution, Simplification, Terrain data, View-dependent LOD

## 1. 서 론

국방 M&S, 컴퓨터 게임, Digital art 등의 여러 분야에서 효율적인 가상 환경의 구축이 강조 됨에 따라, 다른 객체들에 비해 상대적으로 많은 메모리가 요구되는 지형 데이터의 가시화가 중요한 요소로 인식되었다. 지형 데이터를 효율적으로 가시화하기 위해 Level-of-detail(LOD), 그래픽 처리 장치(Graphic Process Unit, GPU) 등의 기술들에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 그래픽처리장치는 컴퓨터의 영상정보를 처리하거나 화면 출력을 담당하는 연산처리장치이다. 하지만 그래픽처리 장

치의 기술 발전에도 불구하고, 지형 데이터의 크기가 커지게 되면서 신속하게 지형을 렌더링 하는데 있어서 한계점을 가졌다. 이러한 한계점을 극복하기 위해, 지형 데이터의 가시적인 품질에 영향을 주지 않는 한에서 지형의 복잡도(complexity)를 감소시켜야 한다. 지형의 복잡도는 지형 데이터의 가시화를 위한 계산량에 직접적인 영향을 미치기 때문에, 이를 감소시킨다면 그만큼 렌더링 효율이 높아진다. 다시 말해서, 지형 데이터의 합리적인 렌더링 시간을 위해 성능(performance)과 정확성(accuracy)간의 트레이드오프(trade off)를 만들어야 한다. LOD는 이러한 요구에 대응하기 위해 사용되는 기술로써, 어떠한 물체가 작거나 렌더링이 되는 이미지에 기여하는 것이 적을 경우에 조금 더 간략하게 표현하기 위해 사용되는 기법이

<sup>†</sup>Corresponding Author, [scpark@ajou.ac.kr](mailto:scpark@ajou.ac.kr)  
©2014 Society of CAD/CAM Engineers

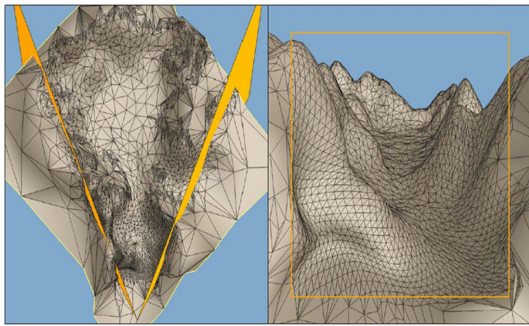


Fig. 1 View-dependent LOD

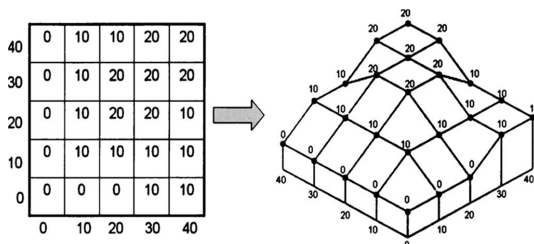


Fig. 2 Structure of a height map

다<sup>[1]</sup>. LOD 기법에는 여러 가지가 있지만 지형 데이터의 크기가 매우 방대하기 때문에, discrete LOD, continuous LOD와 같은 방법으로는 멀리 떨어진 두 지점을 동시에 표현할 수 없다. 따라서 지형 데이터의 가시화를 위해서는 view-dependent LOD를 이용해야 한다. View-dependent LOD는 시점을 기준으로 지형 데이터의 형상을 결정짓는 의미 있는 점들을 결정하여 메쉬(mesh)를 구성하는 방법이다<sup>[2]</sup>. Fig. 1이 view-dependent LOD가 적용된 지형 데이터의 예제를 보여준다.

지형 데이터의 가시화 효율성은 지형 데이터를 저장하고 있는 모델의 형식에 의존한다. 지형 데이터를 저장하는 형식은 크게 높이 맵(height map)과 삼각망(triangular mesh)으로 나눌 수 있다. 높이 맵이란 Fig. 2과 같이 지형의 높이 정보만을 저장하고 폴리곤은 내부적인 알고리즘으로 생성하는 방법으로 일정간격의 (x, y) 좌표에 대한 높이 값 z를 뜻한다<sup>[3]</sup>. 삼각망은 edge, corner에서 다른 삼각형과 연결 관계를 가지는 삼각형들의 집합이다<sup>[4]</sup>. 본 연구에서는 지형 데이터를 높이 맵 형식으로 저장하며, 그 이유는 다음과 같다. 1) 높이 맵이 삼각망보다 부분적으로 다루기가 용이하다. 2) 높이 맵이 삼각망보다 가시화하는데 있어서 요구되는 메모리 용량이 더 적다.

일반적으로 높이 맵 형식으로 저장된 지형 데이터는 특정 자료구조를 이용하여 렌더링한다<sup>[5,6]</sup>. 대표적인 방법으로 ROAM(Real-time Optimal Adapting Meshes) 방법이 있다<sup>[7]</sup>. ROAM은 직각 이등변삼각형의 속성에 의존한다. Fig. 3과 같이, 직각 이등변삼각형을 정점과 밑변의 중점을 연결하는 선을 따라 둘로 나누어 2개의 직각 이등변삼각형을 얻는 분할 과정을 무한히 반복하면 각 분할마다 삼각 수가 2배로 늘어난다. 이러한 분할 과정을 통해 이진 트리 계층이 생성된다. 이러한 이진 트리에는 각 삼각형마다 지형 데이터를 얼마나 정확히 나타내는 지의 척도인 오차량이 있는데, 맵 프레임마다 이 오차량을 기준으로 삼각형 분할 여부를 결정한다. 또한 뷰 독립성을 제공하기 위해 카메라로부터 멀어짐에 따라 허용되는 오차량이 달라진다. 위 방법은 매우 단순하지만 지형 데이터를 가시화하는데 있어 메모리 측면에서 매우 효율적인 방식이라 할 수 있다. 하지만 지형의 특징 형상 보다는 특정 자료 구조에 의존하기 때문에 지형을 왜곡시켜 표현할 수 있는 위험이 있다. 이러한 점은 지형 데이터 표현의 정확성을 중시하는 분야에서는 매우 큰 장애요소가 될 수 있다. 그렇기 때문에 반드시 해결되어야 할 문제점이다.

위의 요구사항에 대응하기 위해, 가장 쉽게 생각할 수 있는 방법은 높이 맵을 삼각망으로 변환하여 지형을 표현하는 방법이다. 삼각망을 대상으로 하는 단순화 방법들은 특정 자료 구조에 의존하지 않고, 지형 형상의 특징을 기반으로 작업을 수행하기 때문에 높이 맵에 대한 가시화 방법들에 비해 상대적으로 정확성이 높다. 하지만 Fig. 3에서 볼 수 있듯이, 높이 맵을 삼각망으로 변환하였을 때, 다중 해상도로 가시화 하기 위해 내부적으

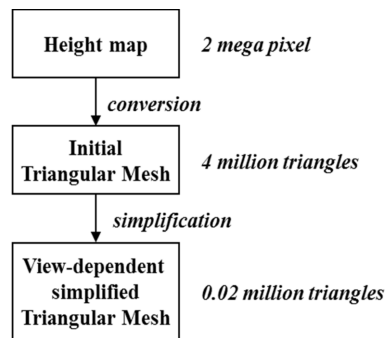


Fig. 3 Conventional simplification method of a height map

로 위상관계를 필요로 하기 때문에, 요구되는 메모리의 양이 매우 크다<sup>[8]</sup>. 그렇기 때문에, 하드웨어의 사양에 매우 의존적이게 된다.

본 논문은 높이 맵 형식의 지형 데이터를 효율적으로 가시화 하기 위한 프로시저를 제안한다. 같은 수의 삼각형으로 같은 지형을 표현하고자 할 때, 상대적으로 정확성이 떨어지는 높이 맵의 가시화 알고리즘 문제점을 해결하기 위해 높이 맵을 지형의 특징 형상을 가장 우선적으로 고려하여 단순화 하였다. 다시 말해서, 제안되는 알고리즘은 지형 데이터의 특징형상을 최대한 고려하면서도 지극히 적은 메모리만을 사용한다. 다음 2장에서는 지형의 특징을 우선적으로 고려하여 높이 맵을 단순화 하는 방법에 대해서 설명하고, 3장에서는 뷰 의존적인 다중 해상도 표현을 위한 알고리즘을 설명한다. 마지막으로 4장에서는 결론을 맺도록 한다.

## 2. 접근 방법

높이 맵의 가시화 방법이 지형을 왜곡시킬 수 있는 원인은 지형의 특징형상보다는 특정 자료구조에 의존하여 지형을 표현하기 때문이다. 그에 비해 삼각망에 대한 가시화 방법은 오로지 지형의 특징 형상만을 고려하여 지형을 표현하기 때문에 상대적으로 표현의 정확성이 높다. 따라서 높이 맵을 이용한 지형 표현의 정확성을 높이기 위해서는 높이 맵을 오로지 지형의 특징 형상만을 고려하여 가시화해야 한다. 다시 말해서, 높이 맵을 단순화 하기 위해 삼각망에 적용되는 단순화 방법을 적용해야 한다고 말할 수 있다.

기존에 삼각망을 단순화하는 방법에는 여러 가지가 있지만 가장 일반적인 방법은 edge contraction 방법으로써, 변을 반복적으로 제거하는 것이다. 변이 하나가 제거된다는 것은 두 개의 점이 하나의 점으로 합쳐진다는 것을 의미한다. Fig. 4가 edge contraction의 예제를 보여준다. 본 논문에서는 edge contraction를 기반으로 개발된 QEM(Quadric Error Metrics) 방법을 이용하여 높이 맵을 단순화 한다. QEM은 삼각망을 단순화 할 때 주어진 허용 에러를 넘지 않는 범위 내에서 제거 대상이 되는 변의 순서를 결정하여 변을 반복적으로 소거함으로써 삼각망을 단순화 하는 알고리즘이다<sup>[9]</sup>.

삼각망에서 하나의 꼭지점  $v$ 는 여러 개의 삼각

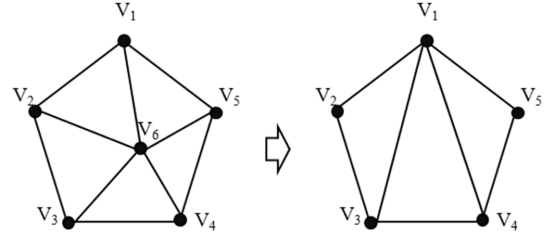


Fig. 4 Edge contraction  $[V_1, V_6] \rightarrow V_1$

형에 의하여 공유된다. 이때 여러 개의 삼각형은 각각 하나의 무한 평면 상에 존재하게 되는데, QEM은 공유되는 꼭지점  $v$ 가 이러한 무한 평면이 공통 교차하는 지점이라 본다. 만약 해상도의 변화로 인해 꼭지점  $v$ 의 위치가 바뀌어야 한다면, 그로 인해 발생하는 형상의 변화는 기존의 꼭지점을 공유했던 평면들로부터의 거리 변화를 이용하여 평가할 수 있을 것이다. 이를 정량적으로 나타내면 수식은 아래와 같다.

$$\Delta(v) = \Delta([v_x, v_y, v_z, 1]^T) = \sum_{p \in \text{planes}(v)} (p^T v)^2$$

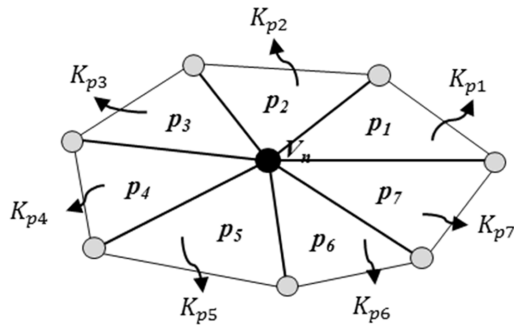
위의 수식에서 평면  $p = [a, b, c, d]^T$ 는  $ax + by + cz + d = 0$ ,  $(a^2 + b^2 + c^2 = 1)$ 라는 평면의 방정식으로 표현된다. 이를 고려하면 위의 수식에 표현된 예러는 아래와 같이 quadratic form으로 표현될 수 있다. 우리는 아래 수식을 이용하여 모든 꼭지점에 대한 단순화 과정에 의한 특징형상의 변화량을 수치적으로 구할 수 있으며, 본 논문에서는 이 값을 *cost*라고 한다.

$$\Delta(v) = \sum_{p \in \text{planes}(v)} (v^T p)(p^T v) = v^T(Q)v = \text{cost}$$

Fig. 5와 같이, Q matrix는 어떠한 점에 인접하는 평면들에 대한 Fundamental error quadric  $K_p$ 의 합으로 계산된다. 아래 식은  $K_p$ 를 계산하기 위한 수식이다.

$$K_p = PP^T = \begin{bmatrix} a^2 & ab & ac & ad \\ ab & b^2 & bc & bd \\ ac & bc & c^2 & cd \\ ad & bd & cd & d^2 \end{bmatrix}$$

QEM 방법은 두 점이 합쳐지는 edge contraction이 수행될 때, 특징형상이 가장 적게 변하는 점을



$$Q_{v_n} = K_{p_1} + K_{p_2} + K_{p_3} + K_{p_4} + K_{p_5} + K_{p_6} + K_{p_7}$$

Fig. 5 Calculation of Q matrix

계산하여 두 점이 합쳐지는 점을 결정한다. 이러한 방법은 edge contraction이 발생할 때 매번 새로운 점의 생성을 야기시킨다. 본 논문에서는 QEM 방법을 이용하여 높이 맵을 단순화 시킬 것이다. 높이 맵을 구성하는 점들이 규칙적으로 배치되어 있다는 점을 고려하였을 때, QEM 방법의 위와 같은 특징은 높이 맵에 오리지널 QEM 방법을 적용할 수 없다는 것을 말해준다. 따라서 우리는 edge contraction이 발생할 때 해당하는 두 점이 합쳐지는 새로운 점을 생성하지 않고, 두 점 중에서 어느 한쪽으로 합쳐졌을 때, 특징형상이 더 적게 변하는 방향으로 edge contraction을 수행하도록 하였다. 이러한 방법을 통해 우리는 QEM 방법을 높이 맵에 적합하도록 알고리즘을 단순화 시켰다.

앞에서도 언급했듯이, 본 논문의 목적은 높이 맵 형식의 지형 데이터를 뷰 의존적인 다중 해상도 표현을 위한 프로시저를 제안하는 것이다. QEM 방법이 삼각망을 단순화 하기 위한 방법이기 때문에, 우리는 높이 맵을 삼각화 하는 과정이 필요하다. 하지만 삼각화에 의해 요구되는 메모리 양이 매우 크기 때문에, 높이 맵의 각 셀을 두 개의 삼각형으로 구성된다는 정보만을 가질 필요가 있다. 각 셀의 삼각화는 두 대각선 중 짧은 대각선을 기준으로 나뉜다.

기본적으로 지형 데이터의 다중 해상도 표현을 지원하는 대부분의 알고리즘들은 전처리 과정을 의존적이다<sup>[7]</sup>. 이러한 알고리즘들은 전처리 과정을 통해 다양한 해상도의 지형 데이터를 미리 정의하고, 매 프레임마다 적절한 삼각망을 추출하여 효율적으로 지형 데이터를 렌더링한다. 다양한 해상도를 미리 정의한다는 것은 지형 데이터의 단순

화 과정을 저장하는 것이다. 높이 맵의 단순화 과정이 시작되면, edge contraction이 진행되면서 삼각형들의 topology가 자유롭게 변하는데 이러한 과정을 표현할 방법이 용이하지 않다. 다음 장에서는 높이 맵의 불규칙한 위상관계를 저장하기 위한 자료 구조를 설명하고, 저장된 단순화 정보를 이용하여 지형을 뷰 의존적으로 표현하기 위한 알고리즘 또한 설명한다.

### 3. 높이 맵의 뷰 의존적 다중해상도 표현

본 논문에서는 지형 데이터의 다중 해상도 표현을 위해 전처리 과정을 통해 높이 맵의 단순화 과정을 저장한다. 높이 맵의 단순화는 edge contraction을 위한 Cost가 사용자에게 의해 정의된 최대 허용 에러를 넘지 않는 시점까지 수행된다. 높이 맵의 단순화 과정을 저장하기 위한 자료구조는 다음과 같다. 각 점의 높이 값만을 가지는 2차원 배열인 높이 맵과는 달리, 제안되는 자료 구조는 각각의 점이 높이 값 이외에 네 가지의 추가적인 정보를 가지는 컨테이너의 2차원 배열이다. Fig. 6는 높이 맵의 단순화 예제와 각 점이 가져야 할 정보를 보여준다. 예제에서 알 수 있듯이, 전처리 과정을 거친 각 점은 높이 값 뿐만 아니라 추가적인 네 가지 정보를 가지는 노드(Node)로 표현된다. 높이 맵을 구성하는 노드는 전처리 과정을 통해 다중 해상도 표현을 위한 정보(Hvalue, Q, MergeDir, Cost)를 가진다. Hvalue는 기존의 높이 맵이 가지고 있던 어떠한 점의 높이 값이다. Q는 QEM의 계산을 위해 각 점마다 계산되는 Q matrix이다. MergeDir은 어떠한 점이 다른 점으로 합쳐지는 방향이다. 높이 맵의 점들은 적게는 두 가지에서 많게는 여덟 가지의 방향으로 합쳐질 수 있다. 이 중 Cost가 가장 적은 방향으로 합쳐진다. Fig. 6에서는 V<sub>1</sub>과 V<sub>4</sub>의 edge contraction이 가능한 방향과 각각의 Cost를 표현하고 있다. 화살표가 점이 이동할 수 있는 경로이며, 그 중 점선은 실제로는 이동하지 않는 방향이다. V<sub>4</sub>의 단순화 정보는 다음과 같다 : V<sub>4</sub>[Hvalue = height<sub>4</sub>, Q = Q<sub>4</sub>, MergeDir = left&middle, Cost = 0.3, GroupTol = NULL]. 높이 맵을 구성하는 모든 점은 전처리 과정을 통해 위와 같은 정보를 가지게 되며, GroupTol은 전처리 과정을 마친 후, 다음 과정에서 계산된다.

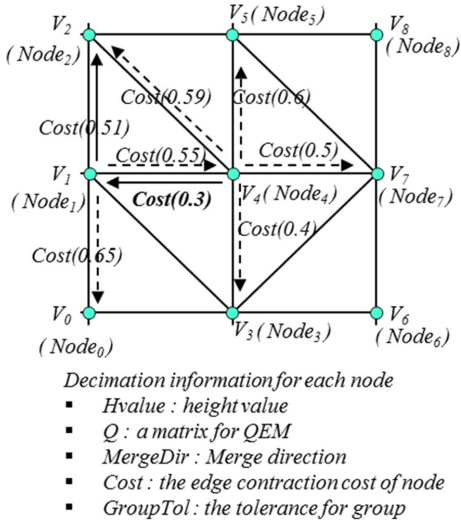


Fig. 6 Height map having decimation information

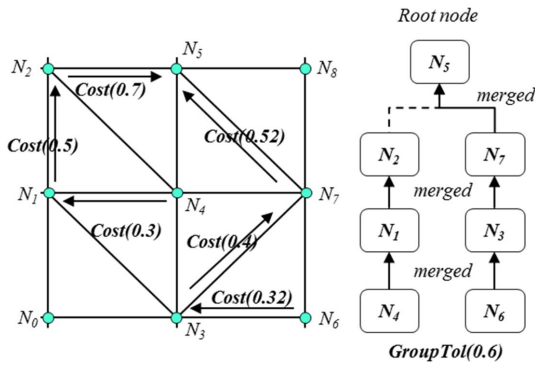


Fig. 7 Group supporting view-dependent LOD

어떠한 노드에 대해 MergeDir이 어떠한 값을 가지고 있다는 것은 다른 노드로 합쳐 질 수 있다는 것을 뜻한다. 이동 방향에 따른 edge contraction의 Cost가 최대 허용 에러를 넘지 않는 모든 노드는 다른 노드로 합쳐질 수 있으며, 이러한 특성은 Fig. 7과 같이 그룹(Group)을 형성하게 한다. 각 그룹을 구성하는 노드들은 서로 merge 관계를 가지기 때문에, Fig. 7과 같이 트리 형태로 표현될 수 있다. 다른 선들과 달리 N2에서 N5로 가는 선은 점선으로 표현되어 있는데, 이는 단순화 Cost가 GroupTol을 초과하였기 때문에 단순화 될 수 없다는 것을 나타낸다.

단순화 과정을 통해 생성된 그룹은 하나의 노드로 합쳐질 수 있는 노드들의 집합이다. 각 그룹에 대한 GroupTol은 아래와 같은 수식을 통해 계산된다.

$$\text{GroupTol} = \text{Distance} * \text{Simplification coefficient}$$

거리(Distance)는 루트 노드(Root node)와 카메라와의 거리로 정의되며, 루트 노드는 높이 맵의 단순화 과정을 저장하는 과정에서 어떠한 점으로도 합쳐지지 않는 점을 의미한다. 루트 노드가 어떠한 점으로도 합쳐지지 않는 이유는 다른 점으로 합쳐지기 위한 Cost가 사용자에게 의해 정의된 최대 허용 에러보다 크기 때문이다. 단순화 계수(Simplification coefficient)는 거리와 지형 특징 사이에서 우선권을 제어할 수 있게 도와준다. 큰 단순화 계수 값은 지형 특징에 비중을 두게 하여 카메라에 가까운 지형보다 거친 지형을 보다 많이 분할시킨다. 작은 축적 값은 반대의 효과를 가지므로 거리를 더 중요하게 여긴다. 지형에 적합한 단순화 계수 값은 실험을 통해 결정된다. GroupTol은 전처리 과정과 달리 매 프레임마다 계산되며, 높이 맵의 뷰 의존적인 표현을 지원한다. 높이 맵을 구성하는 모든 그룹의 GroupTol이 결정되면, 마지막으로 삼각망을 추출한다. 삼각망 추출의 기본적인 개념은 Cost와 GroupTol과의 비교이다. 높이 맵을 구성하는 모든 노드가 가지는 두 값을 비교하여 Cost가 GroupTol보다 작다면 자신이 가지는 MergeDir 방향에 있는 점으로 이동한다. Fig. 8이 본 논문에서 제안하는 프로시저를 보여준다.

Fig. 9에서는 제안된 프로시저를 이용해 지형 데이터가 단순화되는 예를 보여준다. Table 1은 단순

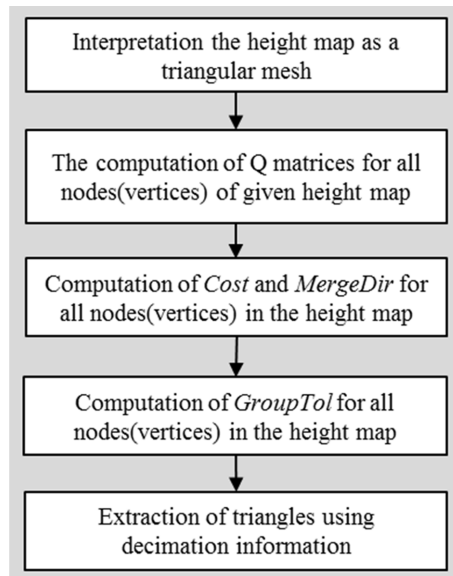


Fig. 8 The proposed overall procedure



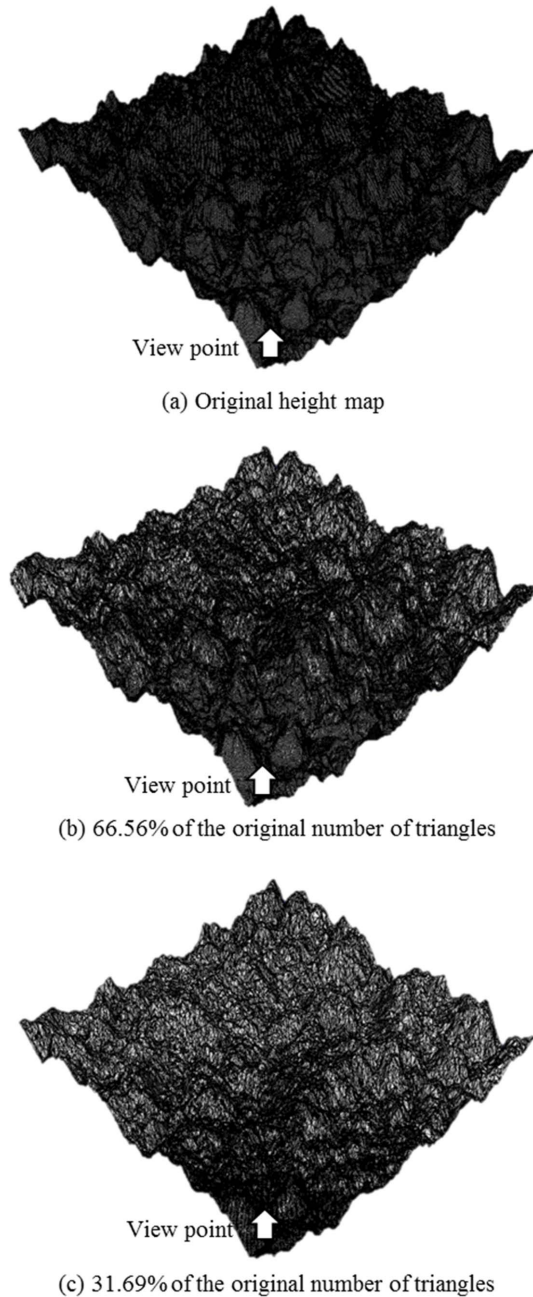


Fig. 9 Simplification of height map, example

화 결과에 대한 정보를 정리한 것이다. 표에서 알 수 있듯이, 세 경우 모두 최대 허용 에러가 같기 때문에 Time for preprocessing이 모두 같다. 하지만 단순화 계수에 따라 Time for extraction이 달라지면서 삼각형의 수도 달라진다. 따라서 추출되는 삼각망의 해상도도 달라진다. 본 논문의 목적은 높이 맵을 효율적으로 나타내기 위한 알고리즘을 제

Table 1. The view-dependent refinement result of a height map

Contents	(a) 100%	(b) 66.56%	(c) 31.69%
Maximum Tolerance	1.0	1.0	1.0
# of Root node	34,492		
Simplification coefficient	0.0	0.0005	0.0015
Time for preprocessing (s)	0.499	0.453	0.453
Time for extraction (s)	0.125	0.109	0.112
# of Triangles	444,394	295,130	140,526
Triangular mesh Memory (MB)	56.9	37.78	17.74

안하는 것이기 때문에, 적용 분야에 따라 다를 수 있는 권장 해상도를 판단하지는 않는다.

#### 4. 결 론

본 논문은 높이 맵 형식의 지형 데이터를 효율적으로 단순화 하기 위한 프로시저를 제안하였다. 일반적으로 높이 맵을 이용한 지형 데이터의 가시화는 지형의 특징형상보다는 쿼드 트리와 같은 특정 자료구조에 의존하기 때문에, 삼각망에 비해 상대적으로 정확성이 떨어진다. 이러한 한계점을 극복하기 위해 edge contraction을 기반으로 하는 QEM 방법을 적용하여 높이 맵을 단순화 하였다. 이는 높이 맵 또한 지형의 특징 형상을 우선적으로 고려하여 단순화시킴으로써 정확성을 높이는 것을 목적으로 한다. 제안되는 프로시저는 뷰 의존적인 다중 해상도 표현을 지원한다.

제안되는 프로시저는 총 세 단계로 이루어진다 : 1) 전체 단순화 과정의 저장 2) 그룹에 대한 허용 에러(GroupTol) 계산 3) 삼각망 추출. 1단계에서는 단순화 과정을 저장하기 위해, 각 점이 높이 값 이외에 추가적인 정보를 가지는 새로운 자료 구조를 이용하였다. 2단계는 높이 맵의 뷰 의존적인 표현을 지원하기 위한 과정이다. 그룹은 하나의 노드(점)로 합쳐질 수 있는 노드들의 집합이다. 3단계는 재귀적 방법을 통해 삼각망을 추출하는 단계이다. 각 노드마다 Cost와 GroupTol을 비교하여 Cost가 GroupTol보다 작으면 MergeDir 방향으로 이동

하여 edge contraction이 이루어진다. 본 연구는 비록 그래픽 처리장치를 사용하지 않았지만 프레임 속도가 10 fps 미만으로 나오기 때문에 컴퓨팅 속도에 대한 문제점을 해결해야 한다.

### 감사의 글

본 연구는 국방과학연구소(UD120035JD), 및 산학연 공동기술 개발 전국사업(C0003579)의 지원으로 수행되었습니다.

### References

1. Zhou, X. and Lin, X., 2004, Direct Mesh: A Multiresolution Approach to Terrain Visualization, *Data Engineering 2004 Proceeding 20<sup>th</sup> International*, pp.766-776.
2. Hugues Hoppe, 1997, View-dependent Refinement of Progressive Meshes, *ACM SIGGRAPH 1997 Proceedings*, pp.189-198.
3. Park, S.C., Kim, J.H. and Chung, Y.H., 2012, Efficient Simplification of a Height Map, *International Journal of CAD/CAM*, 17(2), pp.132-139.
4. Mun, H.S., Jeong, C.B. and Kim, J.J., 2008, The Compression of Normal Vectors to Prevent Visual Distortion in Shading 3D Mesh Models, *International Journal of CAD/CAM*, 13(1), pp.8-17.
5. Wu, J., 2010, A New Quadtree-based Terrain LOD Algorithm, *Journal of Software*, 5(7), pp.769-776.
6. Paul S. Heckbert and Michael Garland, 1999, Optimal Triangulation and Quadric-Based Surface Simplification, *Journal of Computational Geometry:Theory and Applications*, 14, pp.49-65.
7. Mark A. Duchaineau, Murray Wolinsky, David E. Sigiety, Mark C. Miller, Charles Aldrich, and Mark B. Mineev-Weinstein, 1997, ROAMing Terrain: Real-time Optimally Adapting Meshes, *97 Proceedings of the 8th Conference on Visualization*, pp.81-88.
8. Chang, M.H. and Park, S.C., 2009, Range Data Simplification for Reverse Engineering, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41(1-2), pp.86-96.
9. Garland, M. and Heckbert, P.S., 1997, Surface Simplification Using Quadric Error Metrics, *In Proceeding SIGGRAPH*, pp.209-216.



#### 정 용 호

2011년 아주대학교 산업정보시스템 공학부 학사  
 2013년 아주대학교 산업공학과 석사  
 2013년~현재 아주대학교 산업공학과 박사과정  
 관심분야: Modeling & Simulation, CAD/CAM, Synthetic Environment



#### 함 원 경

2011년 아주대학교 산업정보시스템 공학부 학사  
 2013년 아주대학교 산업공학과 석사  
 2013년~현재 아주대학교 산업공학과 박사과정  
 관심분야: Distributed Simulation System, Synthetic Environment, 3D Visualization



#### 박 상 철

1994년 한국과학기술원 산업공학과 학사  
 1996년 한국과학기술원 산업공학과 석사  
 2000년 한국과학기술원 산업공학과 박사  
 2004년~현재 아주대학교 산업정보시스템공학부 교수  
 관심분야: Digital manufacturing system, CAD/CAM, CAPP, Manufacturing system modeling & simulation