

등고선을 이용한 지형 재구성

김성수, 이성호, 이종훈, 양영규
한국전자통신연구원

e-mail : {kss62937,sholee,jong,ykyang}@etri.re.kr

Terrain Reconstruction from Contour Lines

Sung-Soo Kim, Seong-Ho Lee, Jong-Hun Lee, Young-Kyu Yang
GIS Research Team
ETRI

요 약

기존의 종이지도를 수치지도 처리과정으로 얻어진 등고선(contour line) 데이터는 원격탐사(Remote Sensing)와 지리정보시스템(GIS)의 응용분야에서 주로 사용되어지는 데이터이다.

이러한 등고선은 해당 지역의 DTM(Digital Terrain Model) 데이터 생성을 위해 보간(interpolation)하여 생성하는 데 연구가 집중되어 왔다.

본 논문에서는 DEM(Digital Elevation Model)으로부터 얻어진 등고선 데이터를 이용하여 사용자에게 3차원으로 가시화 해 줄 수 있는 기법을 소개한다. 등고선 추출을 위한 방법으로는 기존의 소개되어진 Marching Square 알고리즘을 적용하였고, 지역적인 최저점(local minimum)과 최상점(maximum)을 구하기 위해 등고선을 열린 등고선(open contour)과 닫힌 등고선(closed contour)으로 분류하게 된다. 지역적 최고, 최저점을 찾기 위한 탐색공간을 줄이기 위해 닫힌 등고선만을 대상으로 등고선 트리를 생성하였으며, 생성된 트리의 리프노드에 대해서 최고, 최저점에 대한 근사(approximation)를 수행하게 된다. 이렇게 구해진 근사된 정점들과 등고선 데이터를 입력으로 하여 제한된 딜로니 삼각분할(Constrained Delaunay Triangulation)을 수행함으로써, 3차원 지형을 재구성할 수 있다.

실험에서 USGS로부터 획득한 지형 데이터를 이용하여 속도 측정을 하였다. 결과적으로 저장공간 측면에서 적은 량의 데이터를 가지면서 등고선을 표현할 수 있는 3차원 지형을 렌더링 할 수 있음을 알 수 있다.

1. 서론

수치고도모델(DEM : Digital Elevation Model)은 국토계획 및 관리, 토목, 환경, 자원 그리고 군사적 목적으로 활발하게 응용되고 있는 자료로서, GIS 선진국에서는 DEM 구축을 완료하였으며 활용단계에 있다.

DEM 획득방법 중에서 수치지도를 이용하는 방법은 세계적으로 가장 많이 이용되는 방법으로서 원천 자료로 이용될 수 있는 수치지도만 준비되어 있으면 단시간에 전국을 대상으로 비교적 균일한 정확도를 가진 고도자료를 적은 비용으로 획득할 수가 있다.

수치지도는 특정 공간 좌표체계에 기준으로 제작된 데이터로서 모델링된 공간지리현상을 그 좌표 및 속성으로 코드화, 구조화, 부호화하여 컴퓨터에서 사용

할 수 있는 형식으로 저장된 데이터이다.

수치지도는 일반적으로 특정 x, y 좌표계에 기반을 두고 각종 지형지물을 점, 선, 면으로 표현 할 수 있다. 이러한 각각의 도형정보는 좌표값의 수치조합으로 표현된다. 도형정보의 표현양식은 CAD 데이터들 간의 교환 포맷인 DXF 포맷으로 이루어져 있다. 이러한 기존의 종이지도를 수치지도 처리과정으로 얻어진 등고선(contour line) 레이어는 원격탐사(Remote Sensing)와 지리정보시스템(GIS)의 응용분야에서 주로 사용되어지는 데이터이다.

기존의 연구에서는 이러한 수치지도 등고선 레이어를 입력으로 하여 보간을 통한 고도자료를 추출하는 것에 집중되어 왔다. 또한, 사용자에게 3차원 지형을

가시화해 주기 위해서 추출된 DEM 을 이용하여 지형 렌더링을 한다. 가시화 측면에서 고려하면 많은 데이터량을 요구할 뿐만 아니라, 처리 속도가 늦다는 단점이 있다.

본 논문에서는 등고선 레이어를 이용한 3 차원 지형 렌더링에 초점을 두고 있다. 이 기법은 전체 등고선 레이어에 대한 보간 및 근사화 처리과정을 수행할 필요 없이 지형을 빠른 시간에 사용자에게 가시화해 줄 수 있다는 장점이 있다.

2. 관련연구

등고선 레이어와 관련된 기존의 연구는 스캔된 지형 이미지로부터 수치지도와 하는 연구와 등고선 데이터로부터 근사화 과정을 통한 DEM 추출 연구에 집중해 왔다[2, 4, 5, 6].

Yamamoto[3]는 표고를 나타내는 문자와 등고선이 함께 있는 지도로부터 수치지도 등고선 데이터를 생성하고 정규처리과정을 통해 DEM 을 생성하는 기법을 제안하였다. 이 기법은 고도 점들이 너무 흐린 경우에는 결과가 매우 부정확하다는 문제점이 있다.

Jaaski[1]는 Voronoi skeleton 의 분석에 기반한 자동화된 등고선 추출 시스템을 제안하였다. 이 시스템은 등고선 뿐만 아니라 DTM 을 생성할 수 있는 기능이 있다. 이 시스템은 일반적인 경우에는 좋은 결과를 얻을 수 있지만, 곡선의 끊어짐이 많거나 길 경우에는 결과에 오류가 많다는 단점이 있다.

3. 3 차원 지형 렌더링 알고리즘

3.1. 알고리즘 개요

본 논문에서 제안하는 등고선 데이터를 이용한 지형 재구성 시스템의 처리 흐름도는 그림 1.과 같다.

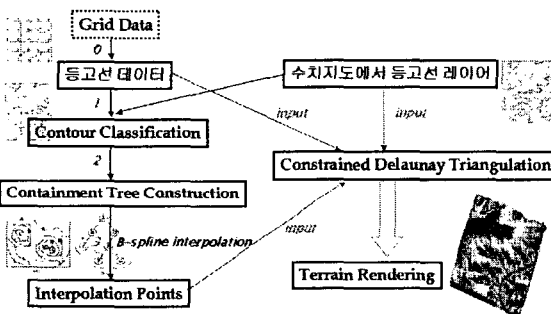


그림 1. 시스템 처리 흐름도

3 차원 지형 렌더링 알고리즘은 다음과 같은 주요 수행 과정으로 이루어진다.

1. 주어진 입력 DEM 으로부터 Marching Square 알고리즘을 통해 등고선 데이터를 추출한다.
2. 추출된 등고선을 열린 등고선(open contour) 과 닫힌 등고선(closed contour) 으로 분류한다.
3. 앞 단계에서 분류된 닫힌 등고선에 대해 포함 트리(containment tree)를 구성한다.
4. 포함트리에서의 리프노드에 해당되는 등고선

에 대해 지역적인 최고, 최저점을 이용하여 근사된 정점들을 계산한다.

5. 근사된 정점과 추출된 등고선 데이터를 입력으로 하여 제한된 딜로니 삼각분할을 수행함으로써 3 차원 지형을 렌더링한다.

3.2. 등고선 추출

등고선(contour line)이란 동일한 고도값을 가진 정점들로 연결된 선분을 말한다.

균일한 그리드상에 정의 되어진 스칼라 값들로 이루어진 DEM 으로부터 2 차원 등고선을 구성하기 위해서는 구하고자 하는 등고값(contour value, iso-value) 를 선택한 다음 등고값이 예지의 양끝점의 스칼라값들 사이에 존재하는 에지를 찾는다. 그림 2 에서는 등고값이 5 일 경우의 등고선 추출 결과를 보여 주고 있다.

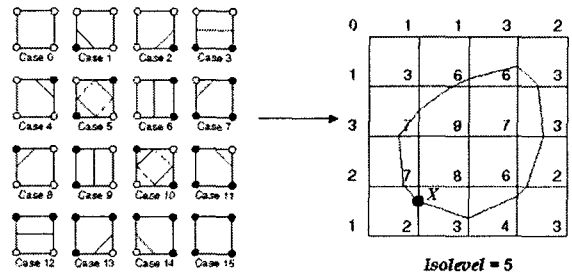


그림 2. 등고선 추출 (contour line extraction)

그리드 데이터에서 등고선을 추출하기 위해 기존에 소개되어진 Marching Square 알고리즘을 사용하였다. Marching Square 알고리즘은 그리드 데이터에 대해 16 가지의 경우를 가지는 셀(cell) 단위로 위에서 설명한 선형보간(linear interpolation)을 통하여 등고선을 구해 나가는 방법이다. 아래 기술한 자료구조는 본 논문에서 사용된 등고선들에 대한 저장구조이다.

```

struct CVertex {
    float x, y;
};
struct CContourList {
    List<CVertex> VertexList;
    int Elevation;
};
    
```

3.3. 등고선 분류

등고선 추출 이후 지역적인 최고, 최저점에 대한 근사정점을 구해야 할 대상 등고선을 찾기위한 탐색 공간을 줄이기 위해 추출된 등고선의 종류를 열린 등고선과 닫힌 등고선으로 분류한다.

정의 1 열린 등고선(open contour)이란 등고선 정점으로 이루어진 사이클(cycle)을 가지지 않는 그래프이다. 그림 3 의 (a)에서 h, i, j, k 이 열린 등고선의 한 예이다.

정의 2 닫힌 등고선(closed contour)이란 등고선 정점으로 이루어진 사이클(cycle)을 가지는 그래프이다. 닫힌 등고선의 사이클을 가지는 지에 대한 검사는 등고선에 대한 정점리스트에서 시작정점과 끝 정점이

같은 경우 쉽게 구분이 가능하며 그림 3의 (a)에서 B, C, D, E, F 등이 닫힌 등고선의 한 예이다.

본 단계에서는 위 단계에서 수행 되어 얻어진 모든 등고선을 분류함으로써 다음 단계에 이루어질 트리 생성을 위한 탐색 공간(search space)을 최소화하는 데 그 목적이 있다.

3.4. 포함 트리 생성

포함트리를 생성하기 위해서는 먼저 각 닫힌 등고선에 대한 MBR(Minimum Bounding Rectangle)을 구한 후에 해당 MBR 들 간에 포함관계를 기반으로 하여 트리를 구축해 나간다. 임의의 MBR $A(x_{min}, y_{min}, x_{max}, y_{max})$ 가 $B(x_{min}, y_{min}, x_{max}, y_{max})$ 를 포함하려면 다음 조건을 동시에 만족하여야 한다.

$$Ax_{min} < Bx_{min}, Ax_{max} > Bx_{max}$$

$$Ay_{min} < By_{min}, Ay_{max} > By_{max}$$

이 조건을 이용하여 포함관계에 근거한 포함 트리(containment tree)를 구성해 나갈 수 있다. 그림 3의 (b)는 등고선간의 MBR 에 대한 포함관계를 이용하여 구성한 포함트리의 한 예를 보여 주고 있다.

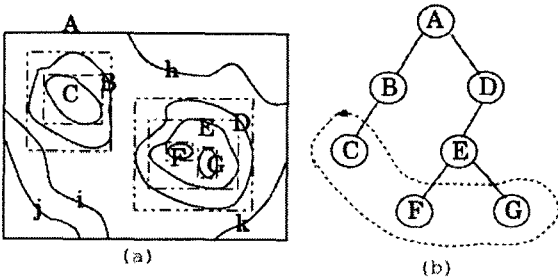


그림 3. 포함트리(containment tree) 생성

3.. 지역적 최고저점에 대한 근사(approximation)

포함 트리가 생성되고 난 뒤에는 지역적 최고점이나 최저점을 가지는 등고선을 찾아 해당 최고점 혹은 최저점을 이용하여 근사된 정점을 구하는 것이 필요하다.

여기서 지역적 최고, 최저점을 가지는 등고선은 항상 포함트리의 리프노드에 있는 등고선이 된다. 다시 말해, 해당 등고선 내부에 다른 어떤 닫힌 등고선을 포함하지 않으면 지역적 최고점 혹은 최저점을 가진다는 말이다. 지형에서의 봉우리 혹은 계곡이 이것에 해당될 것이다.

근사를 위한 기본적인 방법으로는 Multilevel B-spline 에 의한 보간법을 사용하였다. Multilevel B-spline 에 의한 보간법은 주어진 입력 데이터 즉 표고(elevation) 정보에 대해 근사화(approximation)하는 B-spline 함수를 구한 뒤 표고정보와 근사화한 함수값과의 오차가 0 이 될 때까지 계속해서 근사화하는 B-spline 함수를 구해 나가되 주어진 입력 데이터의 영역에 대해 B-spline 함수를 정의하는 그리드의 해상도를 단계적으로 두배씩 높여가며 구해나가는 방법을 말한다.

$$\Omega = \{(x,y) | 0 \leq x < m, 0 \leq y < n\}$$

라고 하고, Ω 상에 있는 3차원 이산 데이터 정점들 $P = \{(x_c, y_c, z_c)\}$ 가 있다고 가정하자. 이때 이산 데이터 집합 P 를 근사화하기 위해 근사화 함수 f 를 uniform bicubic B-spline 함수로 나타내며, 이 함수 f 는 Ω 영역에 걸쳐진 control 그리드 Φ 에 의해 정의된다. 일반화를 위해, Φ 는 $(m+3)$ 평면상의 사각영역에서 3차원 이산 데이터 정점들이 있을 때 uniform bicubic B-spline function 을 다음과 같이 정의한다.

$$f(x, y) = \sum_{k=0}^3 \sum_{l=0}^3 B_k(s) B_k(t) \phi_{(i+k)(j+l)}$$

여기서, $i = \lfloor x \rfloor, j = \lfloor y \rfloor - 1, s = x - \lfloor x \rfloor, t = y - \lfloor y \rfloor$ 이다.

B_k, B_l 을 uniform cubic B-spline Basis 함수이며 아래와 같이 정의된다.

$$B_0(t) = (1-t)^3/6$$

$$B_1(t) = (3t^3 - 6t^2 + 4)/6$$

$$B_2(t) = (-3t^3 + 3t^2 + 3t + 1)/6$$

$$B_3(t) = (1-t^3)/6$$

여기서, $0 \leq t < 1$ 이다.

B-spline approximation 알고리즘을 바탕으로 control 그리드의 해상도를 단계적으로 높여가며 적용하는 Multi-level B-spline Approximation 알고리즘은 아래의 Algorithm 1 과 같다. 이 알고리즘을 통해 주어진 입력 데이터(분류된 등고선 데이터)에 대한 보간이 이루어진다. 보간은 실제 데이터와 단계별로 구해진 함수값과의 오차가 0 이 될 때까지 이 알고리즘을 수행하는 것을 말한다.

포함트리의 리프노드에 해당되는 등고선과 해당노드의 부모노드에 대해 영역을 x, y 방향으로 일정한 간격으로 그리드를 설정하고 Multilevel B-spline 에 의한 보간법을 통해 Control 그리드를 구한 다음 그것을 이용하여 그 그리드의 고도값을 구할 수가 있다.

Algorithm 1 Multi-level B-spline Approximation

Input : $P = \{(x_c, y_c, z_c)\}$

Output: a control lattice hierarchy $\Phi_0, \Phi_1, \dots, \Phi_k$

Step 1. (initialization) set $k = 0$

Step 2. (obtain discrete point) $P_k = \{x_c, y_c, \Delta z_c\}$

Step 3. (computation of ϕ_k)

compute ϕ_k from P_k by the B-spline approximation.

Step 4. (computation of elevation value)

compute $\Delta^{k+1}z_c = \Delta^k z_c - f_k(x_c, y_c)$ for each data point.

Reset $k \leftarrow k + 1$ and go to step 2.

3.6. 제한된 딜로니 삼각분할(Constrained Delaunay Triangulation)

포함트리의 각 리프노드에 해당되는 등고선으로부터 근사되어진 정점들과 추출된 전체 등고선을 이용하여 3차원 surface 렌더링을 위해 본 논문에서는 제한된 딜로니 삼각분할을 수행하였다.

딜로니 조건이란 주어진 삼각형의 세 정점 모두에서 볼 수 있는 새로운 점을 삼각형의 외접원 내부에 포함하지 않도록 하는 것이다. 제한된 딜로니 삼각분할(Constrained Delaunay Triangulation)이란 포함될 예지

집합 일부가 미리 명시되고 가능한 딜로니 조건을 만족하는 삼각분할을 말한다. 제한된 딜로니 삼각분할을 구하는 최적의 알고리즘은 분할 정복 기법을 이용한 것으로 $O(n \log n)$ 의 시간복잡도를 가진다. 여기서, 3차원으로 렌더링을 위해 제한된 딜로니 삼각분할을 한다는 것은 등고선에 있는 모든 에지가 포함되도록 딜로니 삼각분할을 수행한다는 의미다.

4. 실험 결과

본 논문의 실험은 PentiumIII-850MHz(M.M : 512MB)에서 OpenGL 라이브러리를 사용하여 C++로 컴포넌트 형태(ActiveX Control)로 구현하였다. 그림 4는 실험에서 사용된 원본 데이터를 보여주고 있다.

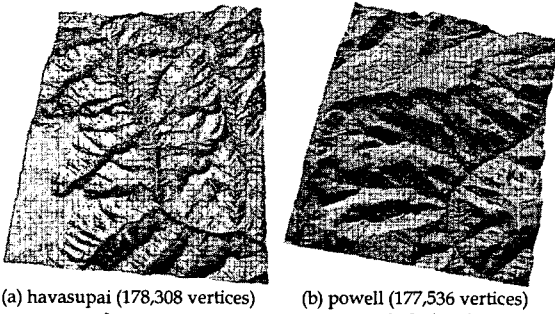


그림 4. USGS Grand Cannon 데이터 원본
그림 5는 USGS의 Grand Cannon 데이터로부터 얻어진 등고선을 이용하여 지형을 재구성한 결과를 보여주고 있다.

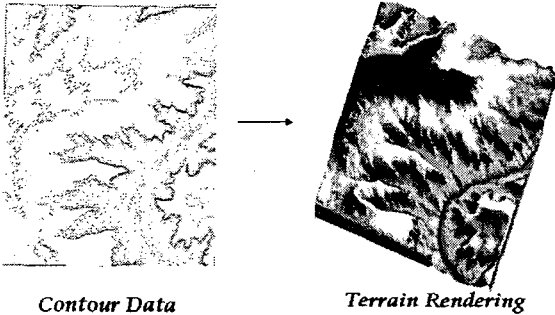


그림 5. 지형 재구성 결과 (Grand Cannon)

표 1은 원본 DEM 상의 정점수와 추출된 등고선의 정점수 및 보간을 통해 구해진 정점수에 대한 데이터이다. 표의 결과로 볼 때 원본 데이터의 절반가량의 등고선 데이터를 이용하여 지형을 재구성 할 수 있음을 알 수 있다.

데이터명	원본 정점수	등고선 정점수	보간을 통해 구해진 정점수
Cape royal	176,614	88,270	1,357
Havasupai	178,308	89,089	2,736
King authr	177,927	78,324	1,836
Powell	177,536	78,121	2,921

표 1. 데이터량 분석 결과

그림 6는 추출되어진 등고선을 이용하여 제한된 딜로니 삼각분할을 수행한 후 렌더링한 결과이다.

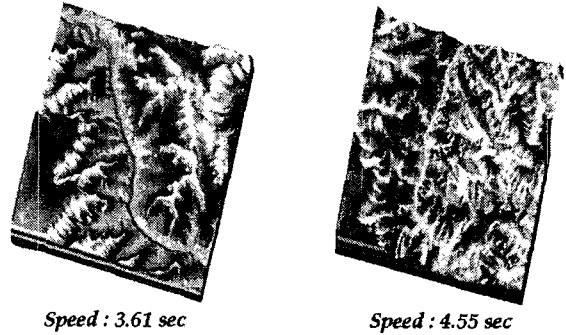


그림 6. 재구성된 지형 렌더링 결과

5. 결론 및 향후과제

본 연구는 DEM 으로부터 추출된 등고선 데이터를 이용하여 3차원 지형 가시화하는 방법을 소개하였다. 등고선 레이어의 일부 등고선에 대해서만 근사화를 수행함으로써 계산량을 최소화할 수 있었다.

Multi-level B-spline Approximation 알고리즘을 이용하여 인접한 등고선간의 보간을 통해 최소점과 최저점을 구할 수 있었다.

이렇게 구해진 근사된 정점들과 등고선 데이터를 입력으로 하여 제한된 딜로니 삼각분할 (Constrained Delaunay Triangulation)을 수행함으로써, 실제 원본 데이터 보다 적은 량의 데이터로 3차원 지형을 재구성하고 가시화를 수행할 수가 있었다.

향후 연구과제로는 실험에서 원본 지형 데이터와 등고선을 이용한 데이터와의 에러 측정을 수행하여야 할 것이며 딜로니 삼각분할 시 속도를 개선하기 위한 정점의 순서를 결정하고 재정렬하는 기법에 관해 연구가 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

[1] J. Y.-J. H. Ahonen. Knowledge based analysis of line drawing. In *The 6th Scandinavian Conference on Image Analysis*, pages 774-777, 1989.
 [2] F. D. et al. Automatic interpretation of scanned maps : Recon-struction of contour lines. In *Lecture Notes in Computer Science*, volume 1389, pages 194-206, 1998.
 [3] K. Y. et al. Symbol recognition and surface reconstruction from topographic map by parallel method. In *ICDAR*, pages 914-917, 1993.
 [4] L. E. et al. Tools for interactive map conversion and vectorization. In *ICDAR*, pages 927-930, 1995.
 [5] S. S. et al. Agent-based parallel recognition method of contour lines. In *ICDAR*, pages 154-157, 1995.
 [6] K. J. Goodson and P. H. Lewis. A knowledge based line recognition system. In *Pattern Recognition Letter*, volume 11, pages 295-304, 1990.