

프랙탈 기법을 이용한 자연지형의 고도 복원

진강규[†] · 김현준^{*}

[†] 한국해양대학교 IT공학부, ^{*}한국해양대학교 대학원 제어계측공학과

Elevation Restoration of Natural Terrains Using the Fractal Technique

Gang-Gyoo Jin[†] · Hyun-Jun Kim^{*}

[†] Division of IT, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

^{*} Control and Instrumentation Engineering Dept., Graduate School, KMU, Busan 606-791, Korea

요 약 : 자연지형의 3D 디지털 지형모델(DTM)을 다루면서 소실된 셀의 데이터를 복원하거나, 저해상도의 DTM 이미지 일부를 컴퓨터 화면상에 확대표시 할 경우에는 존재하지 않는 데이터를 인위적으로 만들어줄 필요가 있다. 기존의 Bilinear법과 Bicubic법은 고도가 완만한 모델에는 잘 맞지만, 자연지형과 같이 무한의 상세함이 내재된 곳에는 부적합하다. 따라서 본 연구에서는 프랙탈 이론(Fractal theory)에 기초하여 자연지형을 보간하는 문제를 다루면서, 보간 전후 지형의 지형정보(프랙탈 차원과 표준편차)가 유지되는 한 방법을 제안한다. 이를 위해 DTM을 다수의 패치로 분할하고 프랙탈 기법으로 지형정보를 추출하고, 이 정보와 원래의 고도와 Random midpoint displacement법으로 보간한다. 제안된 알고리즘의 유효성을 확인하기 위해 가상의 프랙탈 지형을 만들어 시뮬레이션을 실시하고 기존의 방법과 비교한다.

핵심용어 : 디지털 지형모델, 프랙셔널 브라운운동, 프랙탈 차원, 지형보간, Random Midpoint Displacement법

Abstract : In this paper, we presents an algorithm which restores lost data or increases resolution of a DTM(Digital terrain model) using fractal theory. Terrain information(fractal dimension and standard deviation) around the patch to be restored is extracted and then with this information and original data, the elevations of cells are interpolated using the random midpoint displacement method. The results of the proposed algorithm are compared with those of the bilinear and bicubic methods on a fractal terrain map.

Key words : Digital terrain map, Fractional Brownian motion, Fractal dimension, Interpolation, Random midpoint displacement

1. 서 론

최근 행성탐사, 인명구조와 작전수행 등에 무인로봇 사용의 가능성이 검증되면서 선진국들은 이에 대한 연구와 개발을 서두르고 있다. 무인로봇이 작전 지역을 안전하게 탐사하고 또 주어진 임무를 성공적으로 완수하기 위해서는 DTM(Digital terrain map)을 구축하고 이로부터 지형정보(경사, 장애물, 거칠기 등)를 파악해 안전한 경로를 찾고 주행속도를 정하는 것이 필수적이다. 한편 조작자가 원격지에서 무인로봇을 조작할 경우에는 컴퓨터 화면에 표시되는 DTM의 이미지에 의존해 주변 환경의 위험 요소들을 판단하고 조종하게 된다.

그러나 가끔 DTM 구축 시 센서의 한계 또는 여러 센서 정보를 융합하는 과정에서 셀의 고도 데이터를 확정할 수 없는 경우가 발생되고 또 조작자가 관심 지역의 DTM 이미지를 컴퓨터 화면상에 확대해서 보고자 할 경우에는 데이터가 없는 픽셀은 인위적으로 보간해서 표시할 수밖에 없다.

인접 픽셀 정보를 근간으로 새로운 픽셀 값을 보간하는 전통적인 방법으로는 Bilinear법과 Bicubic법이 있고(Google,

2010), 이 두 방법은 컴퓨터상에서 이미지를 확대할 때 자주 이용된다. Bilinear법과 Bicubic법은 고도가 완만한 모델에는 적합하지만, 특히 자연지형과 같이 무한의 상세함을 가지고 있는 곳에 적용하면 저역통과 필터(Low-pass filter)와 같은 역할로 인해 화면이 불투명하고 부예지는 문제점이 발생될 수 있다.

이러한 단점을 보완하기 위해 자연지형의 보간에 프랙탈을 이용하는 방법들이 연구되어 왔다. 프랙탈 기하학(Mandelbrot, 1967)은 유클리드 기하학으로는 다루기 어려운 불규칙적이고 비예측성 형상을 가지는 자연현상을 더 잘 기술할 수 있기 때문에 기복 정도를 측정하는 합리적인 도구로 인식되고 있다. 이와 관련하여 지형의 FD를 추정하고 또 이를 기반으로 보간하는 연구가 제안되었다(Huajun, 2004; Arakawa, 1996; Purnar, 1996; Dudgeon, 1996). Huajun(2004)은 ALV 주행을 위해 프랙탈 차원 기반의 거칠기를 추정하는 문제를 다루었고, Arakawa (1996)는 불규칙적으로 샘플된 데이터를 사용하는 프랙탈 기반의 보간법을 다루었고, Purnar(1996)는 셀과 셀사이의 오프셋(Offset)을 이용하는 프랙탈 기반의 보간법을 특정지역의 지형 이미지 확대 문제에 적용하였고,

[†] 교신저자 : 연희원, ggjin@hhu.ac.kr 051)410-4341

^{*} 연희원, kim1jun2@naver.com 051)410-4924

Dudgeon (1996)은 3D 메시 지형의 해석과 지형보간에 프랙탈을 사용하였다.

이와 같이 지형정보 추출과 복원에 프랙탈 이론을 이용하는 예를 찾아볼 수 있으나 제한적이다. 따라서 본 연구에서는 프랙탈 이론으로 지형의 FD와 표준편차를 추정하고 추정된 정보와 Random Midpoint displacement(RMD)법(Saupe, 1988)으로 DTM을 보간하는 문제를 다룬다. 제안한 방법은 가상의 프랙탈 DTM상에서 그 유효성을 검증한다.

2. 프랙탈 차원과 fBm

2.1 프랙탈 차원

1967년 B. Mandelbrot는 “How Long Is the Coast of Britain?”라는 논문(Mandelbrot, 1967)을 통해 대단히 복잡하고 불규칙하게 보이는 자연현상에도 어떤 법칙과 규칙성이 내재되어 있음을 알고 그 복잡성을 프랙탈 차원(Fractal dimension: FD)으로 정의하는 프랙탈 이론은 제안하였다. 주위에서 자주 찾아볼 수 있는 산, 지형, 구름, 해안선, 나무 등이 대표적인 프랙탈 구조이다. 프랙탈 구조는 부분이 전체와 닮은 구조를 가지고 끝없이 되풀이되기 때문에 자기유사성(Self-affinity)과 순환성(Recursiveness)을 그 특징으로 하고 있다.

유클리드 기하학에서는 차원이 다른 도형을 축소하거나 확대하면 자기 유사도형의 수가 각각 달라진다. 가령 1차원에서 하나의 선분을 m등분하면 원래 길이의 1/m 배인 선분이 m(= N)개가 생기고, 2차원에서 정사각형의 각 변을 m등분하면 변이 1/m배 줄어든 자기 유사도형(작은 사각형) m²(= N)개가 생긴다. 마찬가지로 3차원에서 정육면체의 각 변을 m등분하면 변이 1/m배 줄어든 자기 유사도형(작은 정육면체) m³(= N)개가 생긴다. 이로부터 축소를 r= 1/m과 유사도형의 수 N과 차원 D와의 관계는 다음 식으로 쓸 수 있다.

$$N=(1/r)^D \text{ 또는 } D=\frac{\log(N)}{\log(1/r)} \quad (1)$$

이를 복잡한 도형에 적용하여 FD를 구할 수 있다. 프랙탈 기하학의 핵심은 도형의 특징을 비정수(Non-integer) 차원이라는 개념으로 인식한다는 것이며, FD가 커질수록 도형이 복잡해지고 거칠어진다는 사실이다.

2.2 fBm

프랙셔널 브라운운동(Fractional Brownian motion: fBm)은 브라운운동을 일반화한 것으로서 불규칙적이고 비예측성 형상을 가지는 자연현상을 수학적으로 기술하는데 매우 적합하다. 이를 이용해 지형정보를 추출하고 복원하기에 앞서 fBm의 특징에 대해 간단히 살펴보면, 1차원 fBm f(q)는 단변수(시간, 거리 등) 함수로서 그 증분(Increment)을

$$B(q,\Delta q)= f(q+\Delta q)-f(q) \quad (2)$$

로 정의하면, B(q,Δq)는 평균 E[B(q,Δq)]= 0 이고 분산이

$$\text{Var}(B(q,\Delta q))= E[B^2(q,\Delta q)]\propto |\Delta q|^{2H} \quad (3)$$

인 정규분포를 따른다. 여기서 E는 기대치를 뜻하며, 분산은 q+Δq와 q의 차에 비례할 뿐, 모든 q, Δq에 대해 통계적으로 동일하다. 한편 H는 0<H<1의 값을 가지는 자기유사성 상수(Self-affinity parameter)이며, H= 1/2이면 f(q)는 브라운 운동이 된다.

만약 q를 r(>0)배 하면 B(q,rΔq)= f(q+rΔq)-f(q)의 평균은 0이고 분산은

$$\text{Var}(B(q,r\Delta q))\propto r^{2H}|\Delta q|^{2H} \quad (4)$$

이 되어 B(q,Δq) ∝ r^HB(q,rΔq)의 관계가 성립된다. 모든 q, Δq와 r>0에 대해 B(q,Δq)와 B(q,rΔq)는 통계적으로 서로 유사하기 때문에 이러한 특성을 자기 유사성(Self-affinity)이라 한다.

Pentland(1984)는 fBm과 Self-affine 프로세스 특성을 동시에 갖는 2차원 프랙셔널 브라운함수 f(q)를 제안하였고, 그 증분을 B(q,Δq)= f(q+Δq)-f(q)로 정의하면 f(q)는 모든 q와 Δq에 대하여 식 (5)를 만족한다.

$$P\left\{\frac{B(\mathbf{q}, \Delta\mathbf{q})}{\|\Delta\mathbf{q}\|^H} < t\right\} = F(t) \quad (5a)$$

$$F(t) = \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{s^2}{2\sigma^2}\right) ds \quad (5b)$$

여기서 $\mathbf{q} = (x_i, y_i) \in \mathbf{R}^2$ 와 $\mathbf{q} + \Delta\mathbf{q} = (x_i + \Delta x_i, y_i + \Delta y_i) \in \mathbf{R}^2$ 는 X-Y 평면상의 두 점, $\|\Delta\mathbf{q}\| = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}$ 는 두 점간의 거리, F(t)는 N(0, σ²)을 따르는 확률변수 t의 누적분포함수이다. f(q)의 증분 B(q,Δq) 또한 통계적으로 자기유사성을 가지며, FD는 다음 식으로 주어진다.

$$D=T+1-H \quad (6)$$

여기서 T는 위상학적 차원(Topological dimension)을 의미한다.

2.3 프랙탈 차원의 추출

프랙탈 기하학은 유클리드 기하학으로는 다루기 어려운 불규칙적이고 비예측성 형상을 가지는 자연현상을 더 잘 기술할 수 있기 때문에 그 응용분야는 공학, 건축, 예술, 컴퓨터 그래픽 등 다양하다(Saupe,1988; Pokorný, 1994). 특히 FD는 우리가 직관적으로 느끼는 지형의 기복 양상과 밀접한 연관성을 갖기 때문에 기복 정도를 측정하는 합리적인 도구로 사용되어 왔다. FD를 추정하는 대표적인 방법으로는 fBm, Box-counting, Triangular prism, Isarithm 등이 있으며(Saupe, 1988), 본 연구에서는 fBm법을 이용한다.

식 (5)에 기대치를 취하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$E[|B(\mathbf{q},\Delta\mathbf{q})|] = \|\Delta\mathbf{q}\|^H C \quad (7a)$$

$$C = 2\sigma / \sqrt{2\pi} \quad (7b)$$

여기서 $E[|B(\mathbf{q}, \Delta\mathbf{q})|]$ 는 Fig. 1에서 프랙셔널 브라운함수의 중심점의 고도와 이로부터 $d = \|\Delta\mathbf{q}\|$ 거리에 위치한 점들의 고도차의 절대치를 평균한 값을 뜻한다.

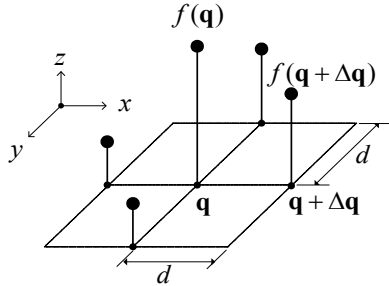


Fig. 1 Fractional Brownian function

식 (7a)의 양변에 대수를 취하면 다음 선형식을 얻는다.

$$\log E[|B(\mathbf{q}, \Delta\mathbf{q})|] = H \log \|\Delta\mathbf{q}\| + \log C \quad (8)$$

이 때 기울기 H는 다음 식으로 표시되며

$$H = \frac{\partial \log E[|B(\mathbf{q}, \Delta\mathbf{q})|]}{\partial \log \|\Delta\mathbf{q}\|} \quad (9)$$

이는 양 대수(log-log) 좌표축상의 선형식 또는 최소자승법을 이용하면 구할 수 있고, 누적분포함수의 표준편차 σ 는 식 (8)의 절편과 식 (7b)로부터 구할 수 있다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\pi}{2}} C \quad (10)$$

H와 σ 는 다음 절에서 다룰 지형복원에 사용된다. 한편 식 (6)으로부터 지형면의 경우 $T = 2$ 이므로(Saupe, 1988) FD는 $D = 3 - H$ 로부터 계산될 수 있다.

3. 지형고도 복원

3.1 1차원 RMD법

앞서 잠시 언급하였듯이 Bilinear법과 Bicubic법(Wikipedia, 2010)은 자연지형의 세밀함을 표현하기에는 부적합하므로 셀의 복원에 프랙탈에 기초한 RMD법을 이용한다.

식 (2)에서 편의상 $q = 0$, $\Delta q = d$ 로 놓고, 두 셀간의 거리가 1인 $f(1) - f(0)$ 의 분산을 σ^2 라 하면, 거리가 $d (> 0)$ 일 때의 분산은 식 (3)으로부터 다음 같게 된다.

$$\text{Var}(f(d) - f(0)) = d^{2H} \sigma^2 \quad (11)$$

1차원 RMD법은 거리가 d 인 두 경계점의 셀로부터 시작하여 d 를 반분해 가면서 내부 셀의 고도를 만들게 되는데, 일례로 $f(d/2)$ 는 $f(0)$ 와 $f(d)$ 의 평균값에 오프셋, 즉 $N(0, \delta_1^2)$ 의 정규난수 Δ_1 을 더해 만들고, $f(d/4)$ 는 $f(0)$ 와 $f(d/2)$ 의 평균값에 $N(0, \delta_2^2)$ 의 정규난수 Δ_2 를 더해 만든다.

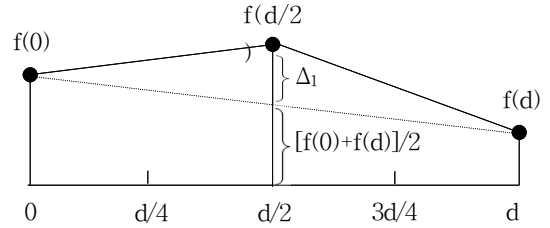


Fig. 2 1D RMD method

따라서 $f(d/2)$ 와 $f(0)$ 의 증분은

$$\begin{aligned} f(d/2) - f(0) &= [f(0) + f(d)]/2 + \Delta_1 - f(0) \\ &= [f(d) - f(0)]/2 + \Delta_1 \end{aligned} \quad (12)$$

이 되고, 양변 식의 분산을 구하면

$$\text{Var}(f(d/2) - f(0)) = \text{Var}(f(d) - f(0))/4 + \text{Var}(\Delta_1) \quad (13)$$

즉,

$$\left(\frac{d}{2}\right)^{2H} \sigma^2 = \frac{1}{4} d^{2H} \sigma^2 + \delta_1^2 \quad (14)$$

의 관계를 만족해야 하므로 이를 정리하면 Δ_1 의 분산은 다음 식과 같게 된다.

$$\delta_1^2 = \frac{1}{2^{2H}} (1 - 2^{2H-2}) d^{2H} \sigma^2 \quad (15)$$

같은 방법으로 이전 값의 중점 $f(d/4)$ 와 $f(0)$ 의 증분으로부터

$$f(d/4) - f(0) = [f(0) + f(d/2)]/2 + \Delta_2 - f(0) \quad (16)$$

분산을 구하면

$$\left(\frac{d}{4}\right)^{2H} \sigma^2 = \frac{1}{4} \left(\frac{d}{2}\right)^{2H} \sigma^2 + \delta_2^2 \quad (17)$$

이 되고 이를 정리하면 다음 식을 얻는다.

$$\delta_2^2 = \frac{1}{2^{4H}} (1 - 2^{2H-2}) d^{2H} \sigma^2 \quad (18)$$

한편 $f(d/2)$ 와 $f(d)$ 로부터 $f(3d/2)$ 를 만들 때 $f(3d/2) - f(d/2)$ 는 $f(d/4) - f(0)$ 와 통계적으로 동일하다는 사실을 알 필요가 있다.

이러한 과정을 n 번 반복하면 두 점들간의 거리는 $1/2^n$ 비로 감소하고, n 번째 오프셋 Δ_n 의 표준편차는 다음 식으로 주어진다.

$$\delta_n = \frac{1}{2^{nH}} \sqrt{1 - 2^{2H-2}} d^H \sigma \quad (19)$$

이로부터 두 셀간의 거리가 $1/2$ 로 줄면 오프셋의 표준편차 또한 $\delta_n / \delta_{n-1} = 1/2^H$ 비율로 줄게 됨을 알 수 있다.

3.2 2차원 RMD법을 이용한 고도 복원

한편 2차원 RMD법은 Fig. 3(a)와 같이 사각형 4 모서리

셀간의 거리(Step size) d 와 고도값을 가지고 내부 점들의 고도값을 만들게 되는데, 크게 다음 두 단계로 동작한다. 첫째 단계는 4 모서리의 고도 평균값에 오프셋을 더해 두 대각선이 만나는 지점(사각형의 중점)의 고도를 발생시킨다. 이 결과 도형은 Fig. 3(b)와 같은 다이아몬드 모양이 된다. 둘째 단계는 Fig. 3(c)와 같이 인접한 3셀의 고도 평균값에 오프셋을 더해 가장자리 셀의 고도를 만든다. 이 결과로 4개의 작은 사각형이 만들어진다. 이후 원하는 해상도의 DTM을 만들어낼 때까지 (d)~(f)의 과정을 반복하게 된다.

본 연구에서는 DTM 셀들은 등간격으로 배치된 것으로 간주하며, 셀이 내포된 패치(Patch)는 4 모서리 셀들이 반드시 고도 값을 갖도록 $(2^m+1) \times (2^m+1)$ 크기로 분할된다. 이때 m 은 적절한 크기의 정수이다. 해당 패치 또는 주변의 패치로부터 H (또는 D)와 σ 가 추출되면 이로부터 셀의 고도를 합리적으로 복원해내는 것이 가능하다.

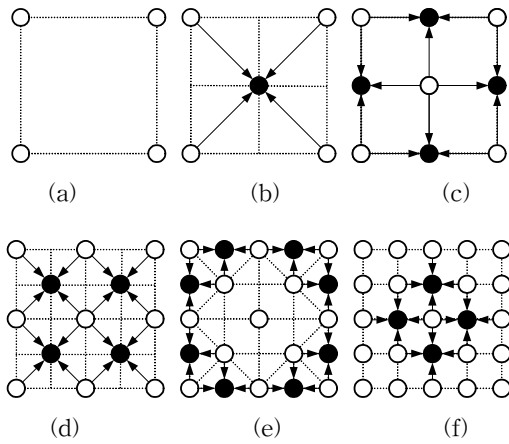


Fig. 3 2D RMD method

Fig. 3(d)~(f)를 살펴보면 RMD법에는 크게 2가지 패턴이 있음을 알 수 있다. 직전 단계에서 셀간의 거리가 d 라면, 패턴 1은 Fig. 4(a)와 같이 4개 셀의 고도값으로 새로운 셀의 고도를 보간하며 새로운 셀과의 거리는 $d/\sqrt{2}$ 이고, 패턴 2는 Fig. 4(b)와 같이 3 또는 4개 셀의 고도값으로 새로운 셀의 고도를 보간하고 새로운 셀과의 거리는 $d/2$ 가 된다. 이러한 사실로부터 패턴 1, 2가 교대로 반복될 때마다 이전 셀과 새로운 셀간의 거리는 $1/\sqrt{2}$ 비로 줄고 오프셋의 표준편차 또한 $\delta_n/\delta_{n-1} = (1/\sqrt{2})^H = 1/2^{H/2}$ 비율로 줄게 됨을 알 수 있다.

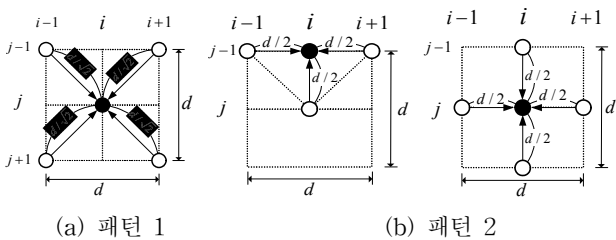


Fig. 4 RMD법의 패턴

이러한 사실과 식 (19)를 결합하면 복원식은 다음과 같이 쓸 수 있다. 이 때 $f_{ij} = f(x_i, y_j)$ 이고, w 는 표준정규난수를 의미한다.

$$\text{패턴 1: } f_{ij} = \frac{1}{4} (f_{i-1,j-1} + f_{i+1,j-1} + f_{i-1,j+1} + f_{i+1,j+1}) + \frac{1}{2^{H/2}} \sqrt{(1-2^{2H-2})} d^H \sigma w \quad (20a)$$

$$\text{패턴 2: } f_{i,j-1} = \frac{1}{3} (f_{i-1,j-1} + f_{i+1,j-1} + f_{i,j}) + \frac{1}{2^H} \sqrt{(1-2^{2H-2})} d^H \sigma w \quad (20b)$$

$$f_{ij} = \frac{1}{4} (f_{i-1,j} + f_{i+1,j} + f_{i,j-1} + f_{i,j+1}) + \frac{1}{2^H} \sqrt{(1-2^{2H-2})} d^H \sigma w \quad (20c)$$

RMD법을 적용할 때 본 방법은 복원이 필요한 셀 고도만을 보간하고, 보간 시 활용 가능한 셀의 실제 고도값은 사용함으로써 원래의 DTM에 더욱 근접한 지형을 만든다.

4. 시뮬레이션 및 결과검토

4.1 프랙탈 DTM

제안된 기법의 유효성을 검증하기 위하여 프랙탈기법으로 만든 DTM을 이용해 모의실험을 실시하였다. Fig. 5는 128×128 셀의 DTM을 보여준다. 셀의 크기(해상도)는 $0.1m \times 0.1m$ 로 간주하였고 따라서 전체 지역은 $12.8m \times 12.8m$ 를 커버한다. 한편 DTM의 고도는 차량의 상단에 설치된 센서로부터 취득된 것으로 가정해 $-10 \sim 0m$ 사이의 값을 가지도록 하였으며 평균 고도값은 $-5.71m$ 이다. DTM으로부터 9×9 셀과 17×17 셀 크기의 두 패치를 임의로 취해(Fig. 5의 흰색부분) 복원하도록 만들고 제안한 방법과 Bilinear법과 Bicubic법을 서로 비교하였다.

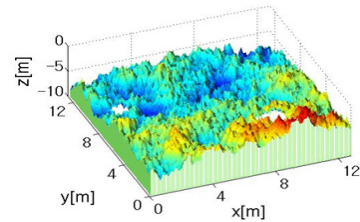


Fig. 5 Fractal DTM

4.2 시뮬레이션 시나리오

본 연구에서는 Fig. 6과 같이 두 가지 시나리오를 고려해 시뮬레이션을 실시하였다. 하나는 고도정보가 부분적으로 소실된 경우에 복원하는 문제이고, 다른 하나는 저해상도의 DTM을 고해상도로 변환하는 문제이다. 첫 번째 문제를 위해 복원될 셀이 집중된 시나리오를 가상하였고, 두 번째는 DTM의 해상도를 높이는 것이므로 셀과 셀 사이를 등간격으

로 복원하는 시나리오를 가상하였다.

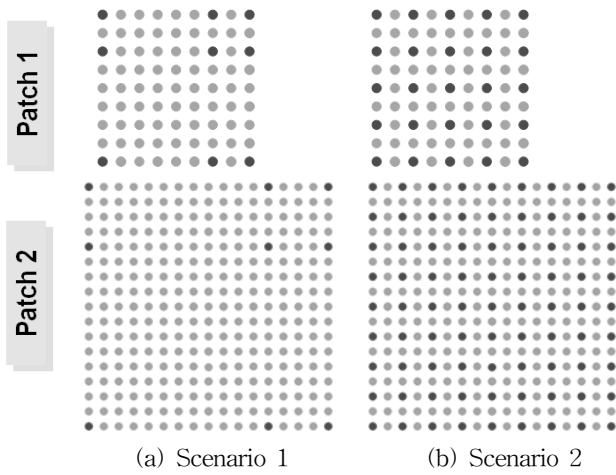


Fig. 6 Restoration scenarios

이를 위해 Fig. 5로부터 선택된 두 패치로부터 원하는 셀의 고도를 제거하였다. Fig. 6에서 회색이 복원될 셀을 의미한다.

인근 또는 해당 패치 지형으로부터 지형정보를 추정할 결과 패치 1과 2의 경우 각각 $H=0.24$, $\sigma=0.43$, $H=0.27$, $\sigma=0.48$ 을 얻었다. 이때 H (또는 D)는 모든 스케일에 대해 선형일 수 없으므로 신뢰도 95% 수준의 데이터만 사용하여 계산하였다(Jin, 2010).

4.3 결과검토

따라서 Fig. 6의 데이터(흑색 부분)와 추정된 H , σ 와 식 (20)의 알고리즘으로 보간하였고, 제안한 방법과 Bilinear법과 Bicubic법을 서로 비교하였다. Fig. 7~10은 각각의 패치와 시나리오에 대해 3 가지 방법으로 보간한 결과를 보여준다.

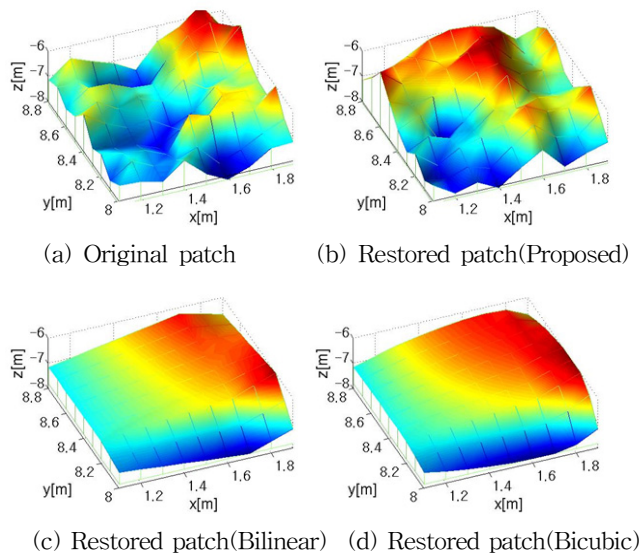


Fig. 7 Restored patches(Patch 1, Scenario 1)

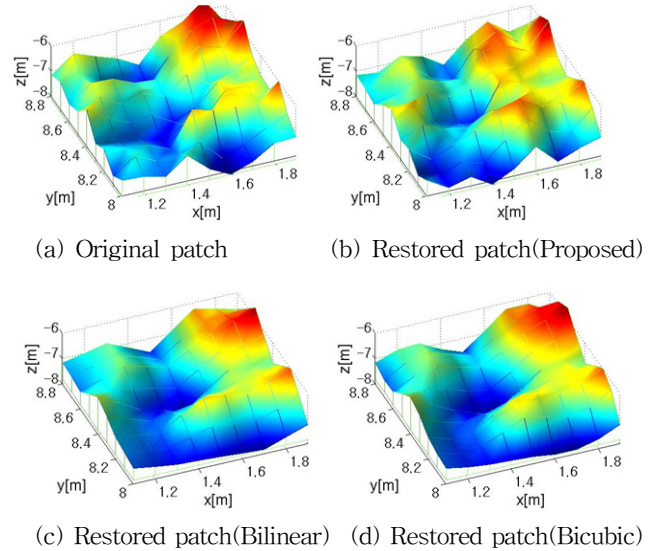


Fig. 8 Restored patches(Patch 1, Scenario 2)

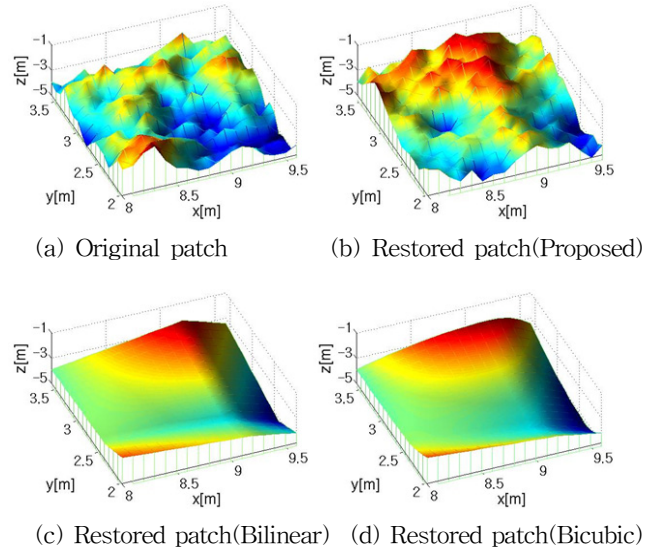


Fig. 9 Restored patches(Patch 2, Scenario 1)

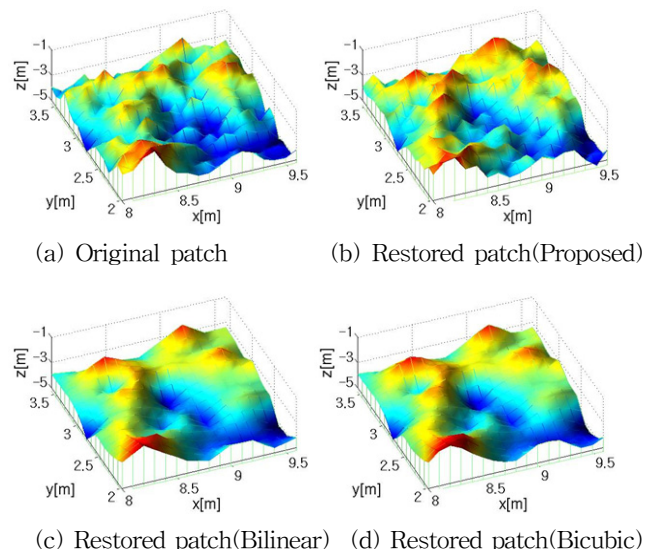


Fig. 10 Restored patches(Patch 2, Scenario 2)

그림에서 보면 Bilinear법과 Bicubic법은 제안된 방법에 비해 패치 내부를 완만하게 복원해 자연지형의 세밀함을 표현해 주지 못하고 있음을 확인할 수 있다. 한 가지 주목해야 할 점은 제안된 방법으로 복원된 지형이 원래의 지형과 일치하지 않는다는 점이다. 그 이유는 식 (20)은 FD이 유사하도록 지형을 복원할 뿐, 확률적 동작 특성으로 인해 똑 같은 고도 지형을 만들 수 없기 때문이다.

3가지 방법으로 복원된 결과를 정량적으로 비교하기 위하여 각각에 대해 FD를 구하고 또 식 (21)로부터 복원 전후의 패치 지형과의 차의 RMS를 구하였다.

$$f_{diff} = \sqrt{\sum_{i=1}^M (f_{i,j} - \hat{f}_{i,j})^2 / M} \quad (21)$$

여기서 $f_{i,j}, \hat{f}_{i,j}$ 는 각각 복원 전후의 패치의 고도를, M은 패치 내 복원된 셀의 수를 의미한다.

Table 1 Quantitative comparison of the methods(patch 1)

Method	Scenario 1			Scenario 2		
	D	H	f_{diff}	D	H	f_{diff}
Original patch	2.76	0.24	-	2.76	0.24	-
Proposed method	2.60	0.40	0.73	2.71	0.29	0.49
Bilinear method	2.19	0.81	0.53	2.46	0.54	0.37
Bicubic method	2.15	0.85	0.59	2.43	0.57	0.40

Table 2 Quantitative comparison of the methods(patch 2)

Method	Scenario 1			Scenario 2		
	D	H	f_{diff}	D	H	f_{diff}
Original patch	2.73	0.27	-	2.73	0.27	-
Proposed method	2.63	0.37	0.99	2.68	0.32	0.49
Bilinear method	2.38	0.62	0.66	2.46	0.54	0.40
Bicubic method	2.31	0.69	0.67	2.44	0.56	0.41

Table 1, 2에서 보면 제안된 방법으로 복원된 지형은 원본 패치 지형의 FD에 근접한 값을 갖지만 나머지 두 방법은 예견할 수 있듯이 FD값이 많이 줄어든 것을 알 수 있다. 한편 제안된 방법의 f_{diff} 는 다른 두 방법에 비해 약간 크지만 비슷한 수준임을 알 수 있다. 특히 Scenario 1의 f_{diff} 가 Scenario 2보다 약간 큰 이유는 Fig. 6에서도 알 수 있듯이 복원에 사용된 원 데이터의 수가 더 작기 때문이다.

5. 결론

본 연구에서는 3D DTM으로부터 지형정보를 추출하고 이로부터 셀의 고도를 복원하는 문제를 다루었다. 프랙탈 이론을 이용하여 부근의 지형정보(H, σ)를 추정하였고, 추정된 정보와 RMD법으로 셀의 고도를 보간하였고 기존의 두 방법과 비교하였다. 가상의 프랙탈 DTM으로부터 두 개의 패치 지형을 임의로 추출하고, 두 가지 시나리오를 가정해 제안된 알고리즘의 유효성을 검증한 결과 그 가능성을 확인할 수 있

었다. 앞으로 이 방법을 3D 해양 GIS구축 등에 응용하는 것이 하나의 과제로 남아 있다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 ‘네트워크 기반 다목적 견마형 로봇 개발 연구’의 일환으로 수행하였음.

참 고 문 헌

- [1] Arakawa, K. and Krotkov, E.(1996), “Fractal Modeling of Natural Terrain: Analysis and Surface Reconstruction with Range Data”, Graphical Models and Image Processing, Vol. 58, No. 5, pp. 413-436.
- [2] Dudgeon, J. E. and Gopalakrishnan, R.(1996), “Fractal-based modeling of 3D terrain surfaces”, Proc. of IEEE '96 Southeastcon, Tampa, FL, pp. 246-252.
- [3] Huajun, L., Jingyu, Y. and Chunxia, Z.(2004), “A Generic Approach to Rugged Terrain Analysis Based on Fuzzy Inference”, Proc. of the 8th Int. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision, pp. 1108-1113.
- [4] Jin, G. G. et al.(2010), “Fuzzy-Based Speed Estimation for Navigation of Unmanned Robots”, Int. J. of Control, Automation, and Systems, Vol. 8, No. 2, pp. 385-391.
- [5] Mandelbrot, B.(1967), “How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension”, Science, Vol. 156, No. 3775, pp. 636-638.
- [6] Pentland, A.(1984), “Fractal-Based Description of Natural Scenes”, IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 6, no. 6, pp. 661-674.
- [7] Pokorny, C.(1994), Computer Graphics an Objected-Oriented Approach to the Art and Science, Franklin, Beedle & Associates Inc., Wilsonville, Oregon.
- [8] Pumar, M. A.(1996), “Zooming of Terrain Imagery Using Fractal-Based Interpolation”, Comput. & Graphics, Vol. 20, No. 1, pp. 171-176.
- [9] Saupe, D.(1988), Algorithms for Random Fractals, The Science of Fractal Images, In H. -O. Peitgen and D. Saupe, Editors, Springer-Verlag.
- [10] Wikipedia(2010) http://en.wikipedia.org/wiki/Bicubic_interpolation.

원고접수일 : 2010년 10월 14일
 심사완료일 : 2010년 12월 23일
 원고채택일 : 2010년 12월 28일