

수치 고도자료를 이용한 지형의 유일성 평가 알고리즘 연구

A Technique for Measuring Terrain Uniqueness from Digital Terrain Elevation Data

김 수 환*

Kim, Su-Hwan

ABSTRACT

Digital Terrain Elevation Data is a set of numerical values that represent the heights of the terrain surface. Terrain has several properties. Among them, roughness is the most widely used one because it gives very useful information to land-based or land-reference platform. There are several ways to measure roughness of terrain. But each of them has own flaws. Moreover, it is not enough to represent the uniqueness of the terrain only by the roughness. We need another metric to measure the actual uniqueness. In this paper, we propose an improved method to measure essential characteristics, uniqueness, of terrain. It gives not only the roughness but also the unevenness. The combination of them makes up the uniqueness. And it can be applied even if there is no pre-planned path on the terrain.

주요기술용어(주제어) : Terrain, Uniqueness, Roughness, Multiple Linear Regression

1. 머리말

수치 고도자료는 SAR, 위성영상, 항공영상 등으로 부터 얻어진 지표면 고도 정보를 일정 간격에 따라 샘플링하여 각 샘플 지점의 고도를 수치로 표현한 것이다^[1]. 일반적으로 특정 크기의 행렬로 구성되며, 샘플링 간격에 따라 그 정밀도가 결정된다^[2]. 이러한 수치 고도자료는 지형의 특성을 분석하는 기초자료로 사용된다.

넓은 영역에서 본 지형은 경사, 능선, 계곡, 평지 등 여러 형태를 가지고 있고, 이 형태들은 자연 식생이나 사회 경제적 활동 상태 파악 및 계획 수립에 중

요한 기본 정보가 된다^[3]. 지형의 특성은 주로 이러한 광역 정보를 대상으로 하여 정의된다. 그런데 최근에는 지상에서 동작하는 무인 자율 시스템 개발이 활기를 띠고 있다. 이러한 시스템은 주변의 국지적인 지형 정보를 수집하여 위치 파악 및 다음 위치 선정 등에 이용한다. 일례로 화성 탐사에 이용되는 무인 로버(Mars Rover)은 자신의 위치 탐지 및 다음 진행 방향 결정에 지형 정보를 활용하고 있다^[4,5].

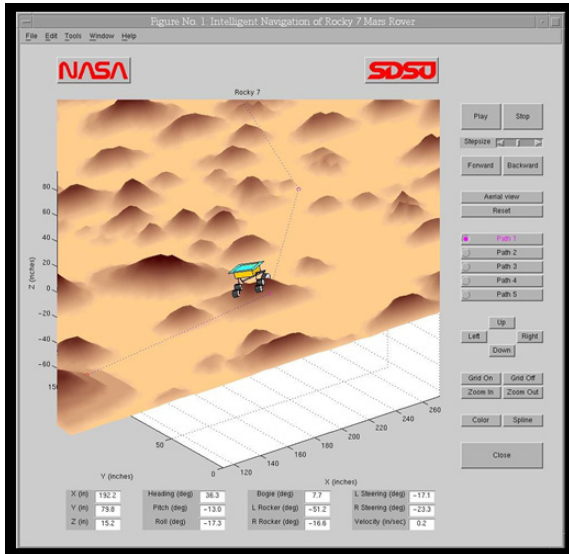
지형의 특성에는 여러 가지가 있는데, 그 중 험준도(Roughness)는 지표 고도의 변화 정도를 나타내는 것으로, 일반적으로 고도 변화가 심할수록, 즉 높은 봉우리가 많고 굴곡이 심할수록 해당 지형에서 많은 정보를 얻어낼 수 있다. 험준도는 지상에서 동작하는 시스템이나 지형 정보를 기반으로 동작하는 플랫폼에서 널리 활용되고 있다. 지형의 유일성(Uniqueness)은 어떤 지형을 다른 지형과 구별할 수 있는 정도를

† 2008년 6월 2일 접수~2008년 8월 1일 게재승인

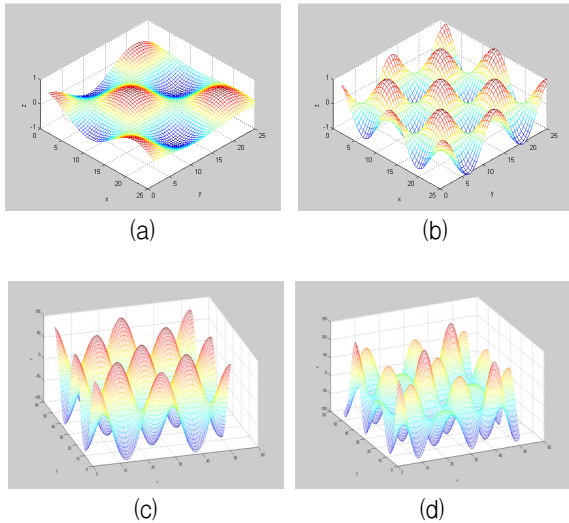
* 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : eebadal@gmail.com

나타낸다. 직관적으로, 지형의 유일성은 지형이 험준할수록, 불규칙할수록 높아진다고 할 수 있다. 그림 2에서 여러 가지 지형 모델을 보여주고 있다.



[그림 1] 지형을 이용하는 화성 탐사 로봇



[그림 2] 다양한 지형모델

위 그림에서 (b)는 (a)에 비해 더 험준하다고 할 수 있다. 봉우리의 수나 그 빈도에서 큰 차이를 보이기 때문이다. 그러나 (c)와 (d)의 경우는 험준도를 가

지고 설명하기가 애매하다. 봉우리의 높이나 빈도는 거의 유사하나 각 봉우리의 높이 분포에서 차이를 보이고 있다. (c)의 경우는 봉우리들의 높이가 비슷비슷한 형태를 보이고, (d)의 경우는 봉우리들의 높이가 매우 다양하다. 즉, (c)에 비해 (d)가 더 불규칙한 형태의 지형이다.

어떤 지형이 다른 지형과 명확히 구분되려면 그 지형이 (a)보다 (b)에, (c)보다 (d)에 가까울수록 유리하다. 그 정도를 지형의 유일성(unicqueness)이라 한다. 위에서 살펴본 바와 같이 지형의 유일성은 그 험준도와 불규칙성에 각각 비례한다.

2. 지형의 험준도(Roughness)

가. 신호 기반 험준도 평가 지수

지형의 험준도를 평가하는 알고리즘은 여러 가지가 있는데, 크게 고도정보 자체를 이용하는 방법과 고도정보의 변화, 즉 경사도(Slope)를 이용하는 방법으로 나눌 수 있다. 아래에 현재까지 알려져 사용되고 있는 몇 가지 알고리즘을 제시하였다^[6,7]. (수식에서 사용된 $x(n)$ 은 지형 위에 놓인 특정 경로를 따라 고도정보를 샘플링하여 얻은 신호이다.)

① CLA(Center Line Average)

: 절대 고도값의 평균

$$CLA = \frac{1}{N} \sum |x(n)|$$

② RSB(Root Squared Bias)

: 전체 고도값의 표준편차

$$RSB = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (x(n) - \bar{x})^2}$$

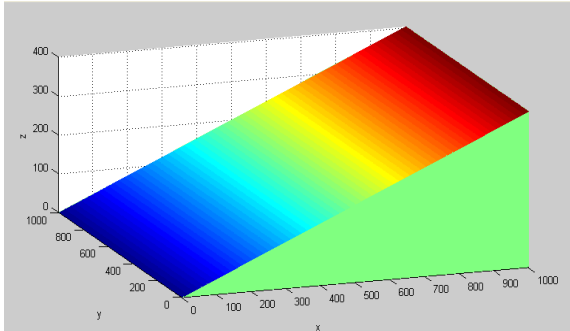
③ AAS(Average Absolute Slope)

$$AAS = \frac{1}{N} \sum |x(n-1) - x(n)|$$

④ RMSAS(RMS of Average Slope)

$$RMSAS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (x(n-1) - x(n))^2}$$

위에서 열거한 방법들은 계산 방식도 간단하고, 적용하기도 간편하여 널리 사용되고 있다. 그러나 각각의 알고리즘에는 약점이 존재한다.



[그림 3] 평평한 연속 경사면

그림 3과 같은 지형을 가정해 보자. 평평한 연속 경사면이 연속적으로 이어져 있어 직관적으로 볼 때 전혀 험준하지 않은 지형이므로 험준도는 0에 가까운 값을 보여야 한다. 이제 그림 3의 지형에 대해 ①, ②와 같이 고도 정보를 이용하는 알고리즘을 적용해 보았다.

[표 1] 고도정보를 이용한 험준도 평가

평가방법	CLA	RSB
험준도	200	115.47

표 1에 나타난 것처럼 전혀 험준하지 않은 지형임에도 불구하고 그 험준도가 크게 나타난다. 원인은 변화 빈도에 있다. 고도 정보를 이용하는 알고리즘은 고도의 변화빈도, 즉 신호의 주파수를 구별할 수 없어 그림 3과 같은 지형의 험준도 평가에 취약하다.

한편, 경사(Slope)를 이용하는 알고리즘은 같은 지형일지라도 그 샘플링 간격에 따라 엄청난 차이를 보인다. 그림 3의 지형에 샘플링 간격을 달리하며 ③, ④의 알고리즘을 적용해 보았다.

표 2에서 보이는 것처럼 결과가 샘플링 간격에 따라 큰 차이를 보인다. 따라서, 샘플링 간격에 대한 사전 정보가 없는 지형을 분석할 경우에는 적용할 수 없다.

[표 2] 경사를 이용한 험준도 평가

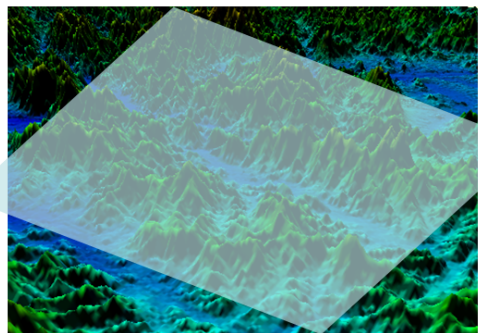
간격	1	10	100	200
AAS	0.39	3.92	32.4	51.2
RMSAS	0.39	3.96	36	64

이와 같은 약점들을 보완하기 위한 새로운 험준도 평가 알고리즘이 요구된다. 본 논문에서는 평면을 기반으로 다중 선형 회귀법(Multiple Linear Regression)을 적용한 험준도 평가 알고리즘을 이용하였다.

나. 평면 기반 험준도 평가 지수 제안

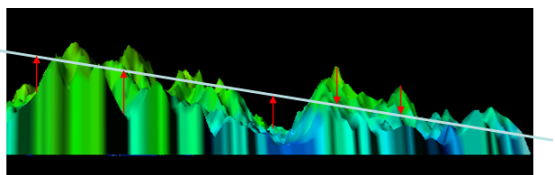
특정 경로가 생성되기 전 지형의 험준도를 평가하기 위해서는 평면상의 정보를 한꺼번에 처리하여야 한다. 본 논문에서는 다음과 같은 절차를 통해 지형의 험준도를 산출하였다.

먼저 그림 4와 같이 지형 위에 가상의 평면을 설정한다.



[그림 4] 지형 위에 설정한 가상 평면

지형의 각 점들을 이 평면에 투영시키면 그에 따른 오차가 발생한다. 그림 5의 붉은색 화살표가 각 점에서의 투영 오차를 나타낸다.



[그림 5] 지형과 가상 평면의 투영 오차

평평한 지형은 가상 평면과 그 형태가 유사하므로 이 투영 오차가 작게 나타난다. 바꾸어 생각하면, 험준한 지형일수록 이 투영 오차가 크게 나타난다. 따라서 투영 오차는 곧 지형의 험준함을 반영한다는 결론에 도달한다. 본 논문에서는 다음과 같은 순서로 그 정도를 계산하였다.

먼저 지형 고도자료로부터 n 개의 샘플 포인트 $\{(x_i, y_i, z_i)\} (i=1,2,\dots,n)$ 를 선정하여 다음과 같은 행렬을 구성한다.

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n \end{bmatrix} \quad Z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix}$$

가상 평면을 나타내는 평면의 방정식은,

$$ax + by + cz + d = 0$$

$$z = Ax + By + D$$

$$\left(A = -\frac{a}{c}, B = -\frac{b}{c}, D = -\frac{d}{c} \right)$$

평면의 방정식은 다음과 같은 행렬식으로 표현된다.

$$Z = X \cdot t \quad (\text{where } t = [D \ A \ B]^T)$$

이제 최소 자승법(LS : Least Square Method)을 적용하여 투영 오차의 평균 자승 오차(MSE : Mean Squared Error)를 구한다. 최소 자승법에 의해 벡터 t 는 다음과 같이 얻어진다^[8].

$$t = (X^T X)^{-1} X^T Z$$

이상의 결과를 종합하여 다음과 같은 식을 통해 평균 자승 오차를 구할 수 있다.

$$SSE = Z^T Z - t^T X^T Z$$

$$MSE = \frac{SSE}{n - p - 1}$$

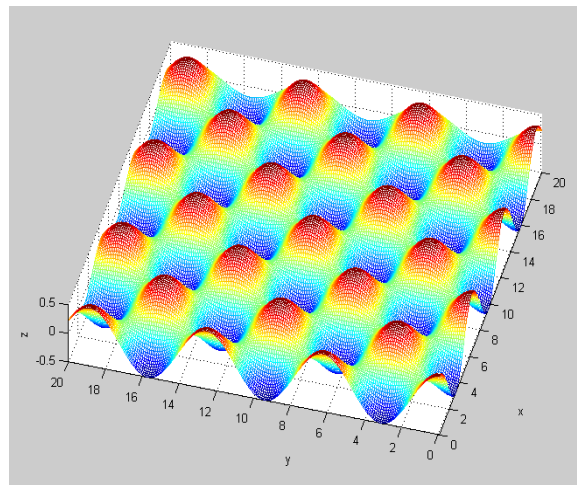
$$\sigma_R = \sqrt{MSE}$$

(p 는 Fitting Dimension. 여기서는 $p=2$)

위와 같이 산출된 σ_R 을 이용해 지형의 험준도를 알아낼 수 있다.

3. 지형의 불규칙성(Irregularity)

일반적으로 험준한 지형일수록 다양한 형태(Feature)를 가지고 있어 정보량이 많고, 한 지점과 다른 지점 간의 구분이 용이하다. 그러나 험준도 하나만으로 지형의 유일성을 정의하는 것은 충분하지 않다. 다음과 같은 지형 모델을 가정해 보자.



[그림 6] 규칙적인 지형 모델

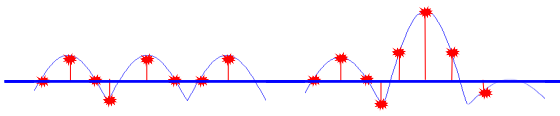
그림 6에 나타난 지형 모델은 z 축의 스케일에 따라 각 봉우리의 고도값이 결정되고, 이 값이 클수록 험준한 지형으로 평가된다. 하지만 동일한 패턴이 규칙적으로 반복되는 이러한 지형은 그 특징을 추출하기가 곤란하다. 이 경우에서 보는 것처럼 험준도가 곧 지형의 유일성을 반영한다고는 할 수 없다.

따라서 험준도 외에 지형의 유일성에 영향을 미치는 다른 특성인 ‘불규칙성’을 평가하기 위한 추가적인 방법이 요구된다.

규칙적인 지형과 불규칙적인 지형의 형태가 다음 그림에 나타나 있다.

그림 7에서 좌측 지형은 규칙적인 형태를 보이고 우측 지형은 불규칙한 형태를 보인다. 중앙을 가로지

르는 선은 지형을 투영할 가상 평면을 나타낸 것이다. (2. 지형의 험준도' 참조) *표시는 지형에서 추출한 샘플링 지점 (x_i, y_i, z_i) 을 나타내며($i=1,2,\dots,n$), 각 지점에서 발생하는 투영 오차가 수직 막대로 표시되어 있다. 각 샘플 지점에서 발생하는 투영 오차의 분포를 보면, 규칙적인 지형에서는 분포가 균일하게 나타나고, 불규칙한 지형에서는 상대적으로 불균일하게 나타난다. 이 점을 이용하면 지형의 불규칙성을 평가할 수 있다.



[그림 7] 규칙적인 지형과 불규칙한 지형

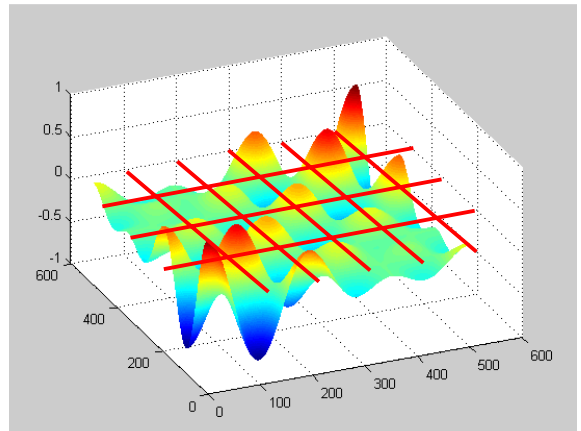
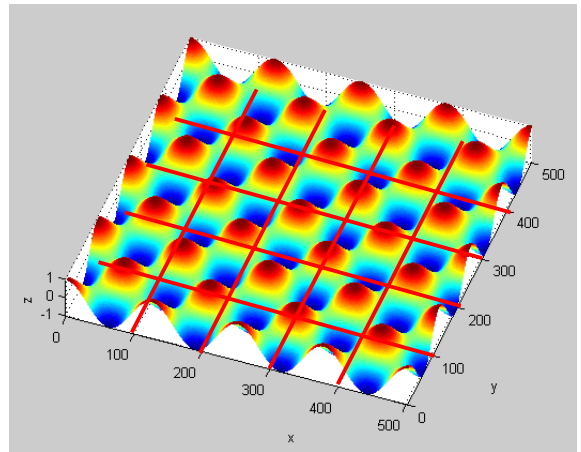
다음은 규칙적인 지형과 불규칙한 지형 모델을 가상으로 생성한 것이다. 두 지형의 고도는 공히 $[-1, 1]$ 범위로 제한하여 고도에 의한 영향을 배제하였다.

그림 8에서 보는 바와 같이, 지형을 일정 간격의 격자로 구분하여 여러 개의 구역(Region)으로 나눈다. 나누어진 구역을 각각 독립된 영역으로 간주하고 각 구역에서의 험준도를 산출해 본다. 규칙적인 형태의 지형에서는 각 구역의 험준도가 유사한 값을 가지거나 그 분포 영역이 크지 않다. 반면 불규칙한 형태의 지형에서는 각 구역의 험준도가 넓은 영역에 분포하는 것을 확인할 수 있다.

험준도가 넓은 영역에 분포한다는 것은 곧 각 개별 구역의 험준도 사이의 분산(Variance)이 크게 나타남을 의미한다. 따라서 전체 영역에 대한 가상 평면을 가정하여 각 구역의 험준도를 계산하고, 그 분산을 통해 지형의 불규칙성을 나타낼 수 있다.

아래에 지형의 불규칙성을 평가하기 위한 절차를 다음과 같이 제시하였다.

- ① 전체 지형 고도 자료로부터 N_1 개의 샘플을 추출하여 행렬 X, Z 를 구성한다.
- ② X, Z 에 최소 자승법을 적용하여 투영 오차를 최소로 하는 계수 벡터 T 를 산출한다.



[그림 8] 지형을 격자로 구분

- ③ $(m \times n)$ 개로 분할된 각 구역에 2절의 험준도 평가 방법을 적용하되, 산출시 계수 벡터는 ②에서 얻어진 T 를 이용한다.
- ④ 모든 구역에 대해 ③의 과정을 반복하여 다음과 같은 행렬을 구성한다.

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \cdots & \sigma_{1m} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \cdots & \sigma_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{n1} & \sigma_{n2} & \cdots & \sigma_{nm} \end{bmatrix}$$

$(\sigma_{ij} : (i,j)$ 구역에서 산출된 험준도)

- ⑤ R 행렬의 분산을 계산하여 지형의 불규칙성 정도를 판단한다.

$$\sigma_{Irr} = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum (\sigma_{ij} - \bar{\sigma})^2}$$

4. 모의실험

지금까지 살펴본 지형의 유일성 평가 알고리즘을 검증하기 위해 대상별로 다음과 같은 모의실험을 수행하였다.

가. 평평한 연속 경사면

2절에서 언급한 평평한 연속 경사면에 대해 지형의 유일성 알고리즘을 적용하여 험준도를 평가하여 그 결과를 표 3에 제시하였다.(본 논문에서 제시한 알고리즘은 MLR*로 표시하였다) 보는 바와 같이 MLR만이 평평한 연속 경사면의 험준도(σ_R)를 0에 가깝게 평가하였다.

[표 3] 평평한 연속 경사면의 험준도 평가

	CLA	RSB	AAS	RMSAS	MLR
σ_R	200	115.47	32.4	36.0	1.9e-6

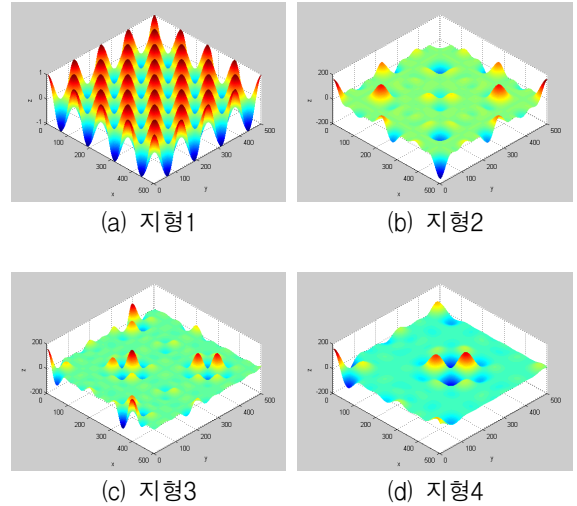
나. 가상지형

다양한 환경에서 험준도와 불규칙성의 관계를 알아보기 위해 가상지형을 생성해 표 4와 같은 모의실험을 구성하였다.

[표 4] 모의실험 시나리오(가상지형)

고도자료 크기		1000 × 1000
한 구역의 크기		100
형태	규칙적	cosine 파형의 반복
	불규칙적	변형된 정현파의 조합으로 불규칙한 형태 생성
평가방법		각각의 지형에 대해 험준도와 불규칙정도 산출

* MLR(Multiple Linear Regression) : 다중 선형 회귀분석법



[그림 9] 모의실험용 가상 지형

그림 9와 같이 여러 형태의 가상 지형을 생성하고 각각에 대해 험준도(σ_R)와 불규칙성(σ_{Irr})을 살펴보았다. 그 결과는 다음과 같다.

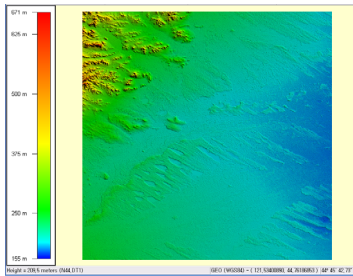
[표 5] 모의실험 결과

	지형1	지형2	지형3	지형4
σ_R	44.72	6.60	16.17	5.55
σ_{Irr}	2.93	7.65	7.59	11.23

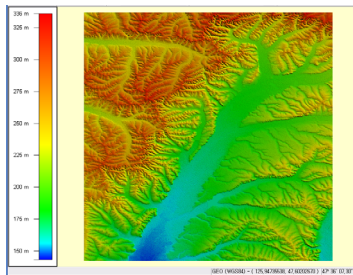
지형 1의 경우, 봉우리의 빈도와 높이로 인해 험준도는 상당히 크게 나타나나 규칙적인 패턴의 반복으로 불규칙성은 매우 낮은 값을 보이고 있다. 반면 지형 4의 경우 봉우리가 거의 없어 험준도는 낮게 나타나지만 반복적인 형태를 찾기 힘들어 불규칙성이 상당히 높게 나타나고 있다. 이상의 결과는 험준도 만으로는 지형의 유일성을 완전히 파악할 수 없고, 불규칙성을 함께 고려해야 함을 보여준다.

다. 실제 지형고도자료

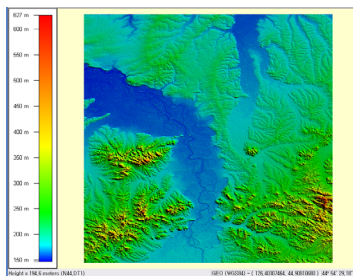
이번에는 가상지형이 아닌 실제 지형 고도자료를 사용하여 실험을 수행하였다. 자료의 출처와 형태를 제외한 다른 조건은 가상지형을 이용한 실험의 경우와 같다.



(a) 지형 A



(b) 지형 B



(c) 지형 C

[그림 10] 모의실험용 지형모델

[표 6] 모의실험 결과

	지형A	지형B	지형C
σ_R	6.43	10.94	14.66
σ_{Irr}	40.13	15.60	29.10

실제 지형모델을 적용한 실험에서도 알 수 있는 바와 같이, 지형의 험준도와 불규칙성은 항상 비례하지는 않는다. 험준도는 산지를 포함한 지역일수록 높게 나타나는 경향이 있고, 불규칙성은 산지, 구릉지, 강/

바다 등 여러 가지 지형이 혼합된 지역일수록 높게 나타나는 경향이 있다. 따라서 이 두 가지 특성은 필요에 따라, 플랫폼의 요구에 따라 상호 보완적으로 이용되어야 할 것이다.

5. 맺음말

지금까지 살펴본 바와 같이, 지형의 유일성을 평가하기 위해서는 험준도와 불규칙성을 같이 고려해야 한다. 다중 선형 회귀법을 이용하면 미리 계획된 경로 없이도 지형의 험준도를 구할 수 있고, 구역 간의 분산을 통해 불규칙성을 확인할 수 있다. 두 가지 특성은 플랫폼의 특성에 따라, 요구에 따라 적절하게 적용되어야 할 것이다.

향후 험준도와 불규칙성을 통합하여 표현할 수 있는 새로운 정량적 지수의 개발과 수치 고도자료의 밀도와 정확성에 따른 영향에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] Christoph Witzgall, Geraldine S. Cheok, David E. Gilsinn, "Terrain Characterization from Ground based LADAR", Proceedings of PerMIS'03 Workshop, 2003.
- [2] Louis A. Fatale, James R. Ackeret, Jeffrey A. Messmore, "Impact of Digital Terrain Elevation Data(DTED) Resolution on Army Applications : Simulation vs. Reality", ASPRS/ACSM Annual Convention & Exposition Technical Papers, 1994.
- [3] Peter P. Siska, I-Kuai Hung, "Advanced Digital Terrain Analysis using Roughness Dissectivity Parameters in GIS", 2004 ESRI User Conference Proceedings, 2004.
- [4] Gennery, D. B., "Visual Terrain Matching for a Mars Rover", Proceedings CVPR 1989, IEEE Computer Society Conference on Computer

- Vision and Pattern Recognition, pp. 483~491, 1989.
- [5] Volpe R., Estlin T., Laubach S., Olson C., Balaram J., "Enhanced Mars Rover Navigation Techniques", Proceedings of ICRA'00, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 926~931, 2000.
- [6] Mattia Castelnovi, Ronald Arkin, Thomas R. Collins, "Reactive Control System Based on Terrain Roughness Detection", Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 891~896, 2005.
- [7] Regis Hoffman, Eric Krotkov, "Terrain Roughness Measurement from Elevation Maps", SPIE Vol. 1195 Mobile Robots, p. 106, 1989.
- [8] J. Neter, W. Wasserman and M. H. Kutner, Applied Statistical Models, Irwin, Burr Ridge, 3rd ed, 1990.