

數值地形模型에 관한 研究

Investigation on Digital Terrain Model

李	石	贊*
Lee,	Suk	Chan
曹	圭	田**
Cho,	Kyu	Jon

Abstract

DTM data evaluation regards accuracy and efficiency as its most important parameters, and these two elements are sensitively influenced by the sampling technique employed and its procedure.

This study attempts to improve sampling techniques and evaluate the accuracy of DTM based on earth volume calculation, using aerial photography and field survey information as basic DTM data, and a regular grid and progressive sampling method for sampling process. Especially, the progressive sampling has employed different combinations of threshold and sampling criteria, that is, parameters influential on efficiency and accuracy, for the purpose of numerical tests intended to permit comparative analysis.

The tests have resulted in the findings that in progressive sampling its grid density fits in well with given terrain characteristics in proportion to their variability, and that threshold and accuracy contain close mutual relations in which an increased threshold bringing more efficiency but less accuracy.

It follows, therefore, that a threshold, when appropriately determined, can be of very efficient use for considerably broad applications, and particularly, will play a significant role in its application to such general civil engineering as earth volume calculation.

要 旨

DTM을 評價하는 데 가장 중요한 要素는 正確性和 效率性이다. DTM의 標本抽出法과 그 過程은 두 要素에 크게 영향을 준다. 本 研究에서는 DTM의 效果的인 標本抽出法の 개선과 土工量산출을 토대로 한 DTM의 正確도를 수치시험에 의해 분석해보고자 하였다.

航空寫眞과 現場實測資料를 DTM의 基本資料로 하였으며 標本抽出法으로서는 正規格子網法과 密度增加方法을 각각 適用하였다. 특히 密度增加式 標本抽出에서는 DTM의 效率性和 正確도에 가장 크게 영향을 주는 要素, 即 示算값과 抽出條件을 각각 다르게 적용하였다. 그 結果, 密度增加式 標本抽出法에 의해 抽出된 DTM資料는 地形 및 지세의 복잡성에 비례하여 실제지형의 특성에 잘 부합된다는 사실을 알게 되었다. 한편 示算값과 正確도는 서로 密接한 관계가 있

* 正會員·漢陽大備校 工科大学 教授

** 正會員·亞細亞航業(株) 技術理事

으며, 示算값의 크기가 증가하였을 때 正確度는 감소하였고 반대로 效率性은 크게 증가되었다. 따라서 필요로 하는 正確도와 效率성을 동시에 충족 시킬 수 있도록 示算값을 결정하면 일반토목 분야의 토공량산출에 매우 효과적으로 활용될 수 있다.

1. 서 론

數值地形模型(Digital Terrain Model)이란 지표면상에서 측정된 각종 불연속점들과 이에 연관된 補間法을 근간으로하여 불규칙한 지표면을 수치적으로 해석하는 것이라고 정의할 수 있다. 다시 말하면 지표면상에 있는 任意의 점들의 3차원 좌표를 관측한 후, 이들의 좌표치를 컴퓨터에 기억시켜서 지구표면의 한 斷片을 기하학적으로 再現, 描寫하는 것을 말한다.

현장측량에서 얻어진 각종 자료를 이용하여 필요한 부분의 중단, 평단 등 각종 지형정보를 얻을 수 있다는 사실을 본다면 DTM의 기본개념은 이미 오래 전부터 적용되어 왔었다고 말할 수 있다.

그러나 최초의 實用的인 DTM은 1958년 미국 MIT 공과대학의 Miller 교수에 의해 고안되었으며 도로공학부문의 比較路線 선정에 적용된 것을 말할 수 있다⁽¹⁴⁾. 이 때 航空寫眞과 地形圖가 基本資料로 사용되었고, 等格子網 방법에 따라 DTM 標本資料가 抽出되었다.

이와 같이 최초의 DTM 技法이 소개된 이래로 DTM의 발전과정은 주로 토목분야(각종 목적의 토공량산출 등)에 많이 이용되어져 왔다^(10, 15, 16, 18, 19). 근래에 와서는 고성능의 컴퓨터도입에 따라 토목공학분야는 물론 지도제작분야, 공학 및 기타 산업분야에 널리 활용되고있다^(6, 10). 이와 같이 증가되고 있는 DTM의 응용은 좀더 적극적인 DTM 기술의 발전을 요구하고 있으며, 특히 효율적인 標本抽出方法인 DTM 資料獲得方法에 관한 연구는 꼭 중요한 것이다. 이러한 사실은 다음에 열거된 DTM의 必要條件들을 분석해 본다면 더욱 더 확실해진다.

DTM의 필요조건은⁽¹⁰⁻¹³⁾ 첫째 DTM을 위한 지형정보자료의 획득은 가장 효율적인 방법이어야 하며, 둘째 DTM은 가능한 한 최소의 標本點으로 구성 되어야하고, 셋째 DTM은 실제지형모형의 참 값과 비교하여 충분하고 높은 정확

도를 지녀야 하며, 넷째 補間法의 적용은 간단하며, 효율적이고, 최단시간에 이루어져야 하며, 다섯째 DTM 資料는 컴퓨터처리에 가장 적합하여야 한다. 이상과 같은 DTM의 필요조건을 관찰해 본다면 DTM 標本抽出方法과 그 과정이 DTM의 정확도와 효율성에 크게 영향을 미친다는 사실과 그 중요성을 잘 알 수 있을 것이다.

DTM 標本抽出方法(資料獲得方法)은 크게 다음과 같이 세 가지로 分類할 수 있다⁽⁶⁾.

첫째 선택적 手動式 方法,

둘째 半 自動化 방법(예 : 密度增加式 標本抽出法)과

셋째 自動化방법(예 : Correlator를 사용하는 방법)

선택적 手動式방법이나 自動化방법은 모두 주관적 방법으로서 지형의 형태와는 관계없이 많은 수의 剩餘點을 소요로 하는 반면, 半 自動化방법은 지형의 형세에 따라 이에 적합하고 알맞는 標本點을 抽出하는 방법으로서 소형 컴퓨터의 조종에 의해 標本點의 추출밀도를 지형의 복잡성에 알맞게 조절한다. 이 방법은 다른 두 방법과는 달리 객관적 방법으로서 지형의 복잡성에 비례해서 標本點의 밀도를 증가시킬 수 있으며, 불필요한 剩餘點의 抽出을 피할 수 있는 특성이 있다.

본 연구의 목적은 DTM의 효과적인 標本抽出방법의 개선과 토공량산출을 토대로한 정확도분석에 그 목적이 있다. 이를 위해서 正規格子網 標本抽出방법과 密度增加式 標本抽出法을 비교하여 DTM의 효율성과 정확성을 검토하였으며, 특히 밀도증가식 표본추출법에서는 효율성과 정확성에 크게 영향을 주는 몇가지 要素, 즉 標本點의 밀도를 결정하는 기준값인 示算값과 標本抽出條件을 각각 다르게 적용하여 상호비교검토하는 수치적 시험을 하였다.

본 수치해석시험에서는 자료의 빈곤, 장비, 시간, 예산상의 문제 때문에 다음과 같은 제한된 사항하에서 시행되었다.

① 기본지형 및 최소작업단위는 구체적인 지형의 구분없이 보편적인 지형을 선택하였으며 이중 320m×320m의 면적을 시험지역으로 선정하였다.

② 컴퓨터 프로그램작성시, 경계치문제는 제외하였고

③ DTM의 참 값으로서는 시험지역을 每 10m 格子間隔으로 格子網을 구성하고, 格子點마다 평면 및 높이의 좌표를 현장에서 실측하였다. 한편 본 연구에 사용된 DTM의 기본자료는 항공사진을 사용하였다.

추출된 標本點으로부터 數值地形模型을 재현시키는 방법으로서는 補間法(Interpolation)을 사용하였다. 補間法에는 간단한 방법(예: 單純線形, 二重線形, 多重線形)으로부터 복잡한 방법(高次多項式, 最少自乘法, Linear Prediction)등 많은 방법이 있다^(8~11). 그러나 적절한 지형정보 자료획득의 실패는 일차적으로 標本點의 밀도에 좌우되며, 자료획득에 실패한 지형정보는 어떠한 補間法을 사용하여도 다시 얻을 수 없다. 한편 각종 다른 補間法을 사용하여도 그 정확도를 크게 향상시킬 수 없으며 반면에 능률만 저하된다는 사실에 비추어^(1,2,8,9,10) 본 연구에서 사용된 補間法은 간단한 單純補間法을 사용하였다.

2. 密度增加式 標本抽出法(Progressive Sampling)⁽³⁾

2-1. 기본원리

Progressive Sampling은 입력지형의 성질에 따라 標本點의 밀도를 점진적으로 증가시키는데 그 특성이 있다는 사실은 이미 설명한 바 있다. 다시 말해서 최소의 노력으로 최대의 효과를 얻는데 그 목적이 있다⁽³⁾.

標本點의 抽出은 基本點 9점으로 구성되는 기본格子點의 추출로부터 시작된다(零次抽出). 零次抽出에서 얻어진 9점의 標本點을 분석하여 次回에 필요한 標本點의 위치를 결정하고 동시에 기계에 부착된 컴퓨터로 하여금 새로이 추출될 표본점의 위치로 가도록 명령한다. 이와 같은 방법을 반복하여 표본점의 밀도가 지형의 형태에 알맞도록 추출회수가 2차, 3차, 4차...등으로 반복 시행된다. 이상과 같은 일련의 반복작업들

은 기계에 부착된 소형컴퓨터에 의해 자동제어된다.

본 작업에서는 컴퓨터의 소요용량을 극소로 하고 작업의 편의성을 위하여 전체작업단위(예: 항공사진의 한개의 입체모델)를 여러개의 매우 작은 단편으로 쪼갬다. 이렇게 얻어진 최소의 기본작업단위를 "PATCH"라 하며, 한개의 Patch 안에 있는 모든 標本點의 자료가 얻어진 후 이들 자료는 모두 컴퓨터의 주변기억장치로 옮겨진다. Patch의 크기는 지형의 복잡성이나 요구되는 DTM의 정확도에 의해 각각 다르게 선정된다. Patch는 정사각형 형태의 格子網으로 형성되며 格子網의 각 요소(格子點)는 점진적으로 증가되어 한개의 Patch가 전부 채워진다.

따라서 Patch 안에 있는 임의의 점은 각각 X, Y行列로서 표시된다. 본 연구에서 사용된 Patch

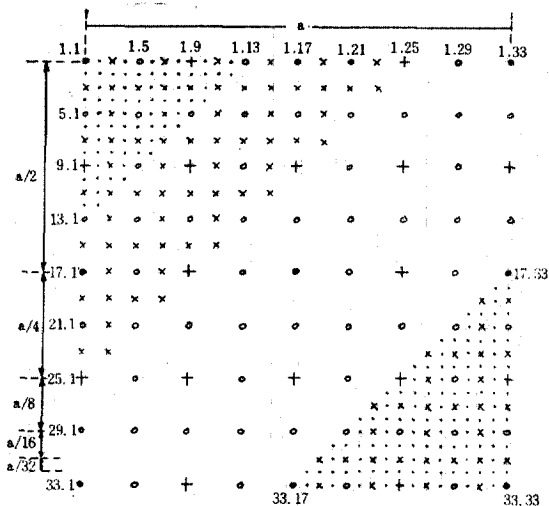


그림 1. 5組의 格子點 構成

表 1. Patch안에 있는 點

抽出次數	記號 (그림 1)	最大點數	間隔(p)	p의 값
0	•	9	a/2	p=16
1	+	25	a/4	p=8
2	○	81	a/8	p=4
3	×	289	a/16	p=2
4	·	1089	a/32	p=1

는 5 개의 각각 다른 格子點으로 구성되었으며 Patch의 格子點이 완전히 채워졌을 때에는 총 33×33行列이 된다(그림 1 및 표 1 참조).

모든 표본점의 좌표는 Patch의 X, Y 좌표로부터 유도되며, 이들 좌표들은 매회 추출시마다 컴퓨터에 자동기록되어 추후 관측장비를 표본점의 위치로 자동유도하는데 사용된다.

2-2. 입력자료의 분석

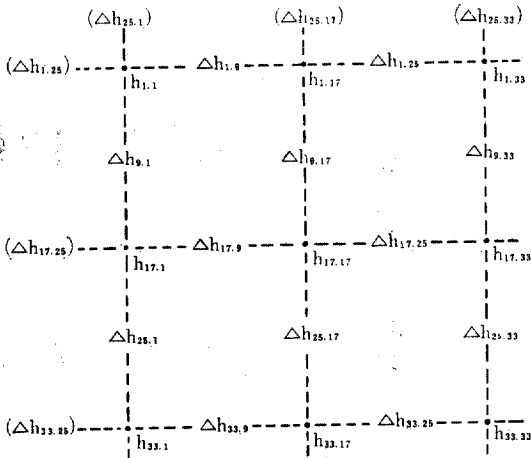


그림 2. 零次標本抽出에서의 一次高差

입력자료분석의 제 1 단계는 각 行과 列의 인접된 3 개의 點들의 제 2 차高差를 구하는 것이다. 제 2 차高差는 제 1 차高差로부터 계산된다. 그림 2는 零次抽出에서의 제 1 차高差 Δh 를 표시한 것이다. 제 1 차高差 Δh 의 밑수는 Δh 가 계산되어져야 할 점들의 中央點의 위치를 나타낸다.

예로서 零次抽出에서 본다면

$$(行) \Delta h_{i,j-8} = h_{i,j-16} - h_{i,j}$$

$$(列) \Delta h_{i-8,j} = h_{i-16,j} - h_{i,j}$$

$$i=1, 17, 33 (i=1은 行의 경우)$$

$$j=1, 17, 33 (j=1은 列의 경우)$$

제 2 차高差는 다음 식으로 표시되며 行과 列을 각각 구분하여 계산한다.

$$\delta h_{i,j} = h_{i,j-p} - 2h_{i,j} + h_{i,j+p}$$

$$\text{여기서 } p=2^{(r_{max}-r)}$$

$$r_{max} : \text{최대추출회수}$$

$$r : \text{현재의 추출회수(표 1 참조)}$$

입력자료에 포함된 임의의 오차에 관계 없이 제 2 차高差 δh 는 지형기복상태에 관한 어떤 형

태의 정보를 수록하고 있다. 단일 지형의 기복상태가 복잡하면 이에 따른 標本點의 밀도도 증가하게 된다. 따라서 제 2 차高差를 이용한 어떤 基準值 즉, 示算값을 설정한다면 이에 따라 標本點의 밀도를 조절할 수 있으며 동시에 지형의 기복도에 연관을 맺을 수 있는 것이다. 이러한 결정들은 제 1 차 標本抽出이 완료된 후 일정한 크기의 示算값을 적용하여 결정하게 된다.

2-3. 示算값(Threshold)의 결정

제 2 차高差 δh 가 어떤 示算값(δh_{th})을 넘으면 새로운 標本點이 추출되어져야 하며 따라서 그 부근의 밀도가 증가된다. 示算값은 입력자료의 성격, 標本抽出과정, 요구되는 DTM의 정확도에 따라 달라지며 대체로 다음과 같이 결정된다(4).

示算값의 구분	가 정	示算값, δh_{th}
(1) 偶然誤差식 산출 방법	지형기복은 우연한 상태	$\delta h_{th} = 2 \cdot g \cdot k \cdot \sigma_0$
(2) 포물선식 산출방법	지형은 대체로 포물선형	$\delta h_{th} = 8 \cdot g \cdot \sigma_0$
(3) 선형식 산출방법	쉬운 기하학적 쉬운 가상적	$\delta h_{th} = a \cdot s$
(4) 등고선식 산출방법	미국 C-계수	$\delta h_{th} = 2 \cdot \frac{g}{k} \Delta h$

σ_0 : 높이측정의 標準誤差

k, g : 경험값

a : 零次抽出시의 標本간격

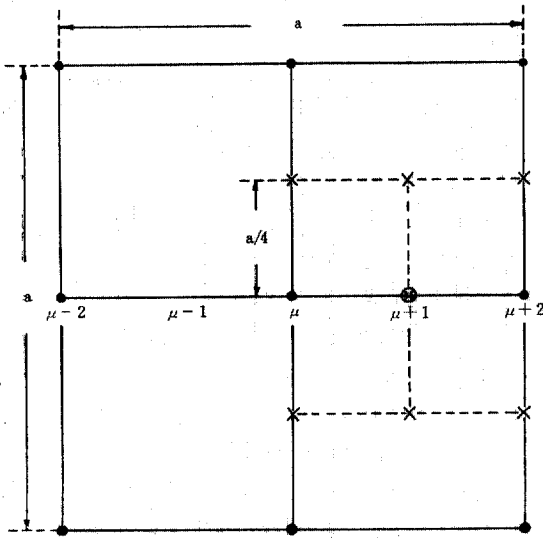
s : 높이의 相對誤差

Δh : 최소 등고선간격

σ_0 는 보통 0.2~0.5%Z (Z는 비행고도), k, g 는 2~3, s 는 0.04 정도이나 모두 응용하는 경우에 따라 각각 다르며 조심스럽게 사용되어져야 한다.

2-4. 標本點의 선택

제 2 차 높이差, $|\delta h_i|$ 가 示算값, δh_{th} 보다 클 경우 格子網의 밀도는 증가되어야 한다. 다시 말해서 어느 인접된 두점의 $|\delta h_i|$ 가 δh_{th} 보다 클 경우에는 이 두점의 中央에 위치하는 점, 즉 中心點이 새로이 抽出되는 標本點이 된다. 그러나 반대로 $|\delta h_i|$ 가 $|\delta h_{th}|$ 보다 적을 경우에는 두 點을 연결하는 그 범위 안에는 새로운 標本點을 抽出할 필요가 없게되며 次回の 抽出순서로 넘



- : 零次抽出點
- ⊗ : 中央點
- × : 주변점
- a : Patch의 한邊

그림 3. 새로운 점의 결정

어간다.

그림 3에서 μ 와 $\mu+2$ 의 제 2차 높이차 $|\delta h_{\mu+1}|$ 가 δh_{ih} 보다 클 경우, 그 中心點 $\mu+1$ (⊗표)은 새로운 標本點으로 抽出되어져야 하며 동시에 그 주변에 있는 점, 6點(상, 하 각 3점)도 새로운 標本點으로 抽出되어져야 한다.

이렇게 해서 抽出된 새로운 標本點들은 그들의 위치에 따라 順次的으로 行列안에 들어가게 되며 동시에 X, Y, Z 行列이 형성된다.

일반적으로 密度增加式 標本抽出方法은 기본 抽出點 9점으로 시작하는 零次抽出을 시작으로, 1차, 2차, 3차, 4차까지 총 5회의 標本抽出로 종결된다. 이와 같이 총 5회의 標本抽出이 종결되어도 Patch 안에 있는 33×33 行列이 전부 메꾸어 지지는 않는다. 참고적으로 密度增加式 標本抽出方法의 작업계통도는 그림 4와 같다⁽⁵⁾.

3. 자료해석

본 연구의 자료해석에서 시도된 바는 첫째 항공사진으로부터 얻어진 DTM의 자료는 實際地形模型과 비교해서 어느 정도의 정확도를 지니며, 이들로부터 계산된 토공량은 실제의 토공량

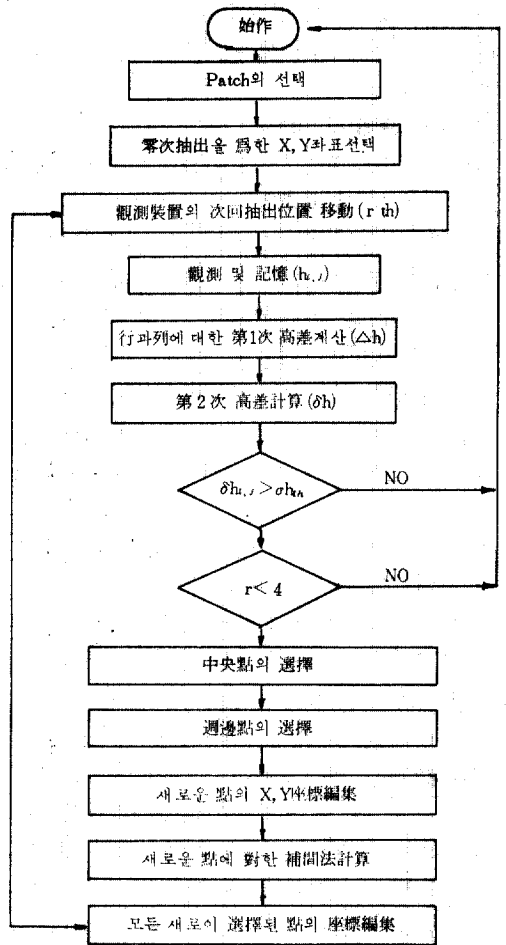


그림 4. 密度增加式 標本抽出法의 作業系統圖

과 어떠한 상관관계를 갖고 있으며, 둘째 正規格子網 標本抽出方法과 密度增加式 標本抽出方法에 의한 DTM 標本抽出方法의 상호관계를 경제성 및 정확성을 기초로 하여 비교분석하였으며 셋째, 密度增加式 標本抽出方法의 핵심이 되는 “示算값”의 연구와 아울러 각각 다른 구분의 示算값을 적용했을 경우의 標本點의 密度變化상태와 토공량의 變化상태, 이에 따른 가장 적절한 示算값의 산출방법 등을 연구 검토하는 데 있다.

3-1. 입력자료의 준비

3-1-1. 지형모형 자료

實際地形模型은 원래 각종 지형의 형태를 대표할 수 있는 여러개의 지형모형(예, 평탄지, 구릉지, 산악지, 시가지, 등)을 선택하여야 하며 Patch의 크기도 여러개를 선택하여 여러가지 모

든 가능한 상태를 비교검토하여야 하였으나 여러가지 사정상 부득이 다음과 같이 최소값을 선택하였다.

實際地形模型 資料

대상지역 : 경기도 화성군 비봉면 삼화리(그림 7 참조)

크기 및 格子網구성 : 320 m×320 m의 지형을 한 개의 Patch로 선정하였으며, 格子網은 가로, 세로 각각 10 m 간격으로 구성되었다. 다시 말해서 "Patch"는 33×33의 크기를 갖는 行列로 구성되었다.

관측 방법 및 장비 : 평면위치측정에는 Wild T 2 角觀測器, 높이관측에는 Wild NA 2 정밀레벨을 사용하여 현장실측을 하였고, 또한 Wild A 10 정밀도화기를 사용하여 33×33의 格子點을 독립적으로 관측하였다.

사용된 航空寫眞 : 축척은 1/6,000, 화면거리는 152.15 mm, 화면각은 광각, 비행고도는 900 m 이었다.

"Patch"의 구성 및 크기 : 수치시험에 사용되는 地形模型의 최소작업단위 "Patch"는 그림 5와 같이 33×33, 즉 1089點의 行列因子를 갖는 格子網으로 구성되었다(格子間隔 각각 10 m).

3-1-2. 示算값(threshold)

示算값의 推定은 本文 2-4에서 이미 설명된

방법에 따라 다음과 같이 4가지의 경우로 계산하였다.

遇然誤差式	拋物線式	線形式	等高線式
1.44m~3.6m	2.88m~4.32m	6.4m	1m

計算에 사용된 基礎資料는 標高의 標準誤差로 0.2%Z~0.5%Z를 사용하였고

비행고도는 900m

美國 C-係數는 1800으로 하였다.

따라서 위 表로부터 1m, 2m, 3m, 4m, 5m, 6m, 모두 6개의 값을 示算값으로 선정하였다.

3-1-3. 標本抽出 回數

일반적으로 標本抽出 回數는 "Patch"의 크기, 지형의 복잡성, 요구되는 DTM의 정확도 등에 좌우된다. 표본추출회수를 증가시키면 정확도는 향상되나 상대적으로 소요시간이 증가되어 비경제적이다. 그러나 Patch의 크기를 적절히 한다면 抽出回數는 보통 3~4회 반복하면 충분하다. 본 연구에서는 총 4회 추출로서 종결하였다.

3-2. 數值解析 試驗

數值試驗은 다음과 같이 크게 두 가지로 구분하여 시행되었다.

試驗 1. 航空寫眞에 의해 얻어진 DTM資料와 實際地形資料와의 비교시험(正規格子網을 中心으로)

이 시험은 실제 현장측량에서 얻어진 地形模型과 航空寫眞으로부터 얻어진 수치지형모형을 높이 및 토공량 등에 관하여 각각 비교검토하고자 하였다. 土工量계산에서는 兩端平均法을 사용하였으며, 切土量과 盛土量이 대략 같도록 平均地盤高를 11.024 m로 산출하여 切土, 盛土量 산출에 적용하였다.

試驗 2. 密度增加式 標本抽出方法을 중심으로 한 試驗

正規格子網대신에 密度增加式 抽出方法을 적용하여 試驗 1에서 실시한 모든 사항을 수행하였으며, 이에 추가해서 密度增加式 抽出方法에서 標本抽出條件을 부가하고 抽出條件 1,2를 계속해서 6개의 각각 다른 示算값을 적용하여 총 12개의 경우(2조건×6示算값)에 대하여 그 효율성과 토공량을 기준으로한 정확도를 검토하였다.

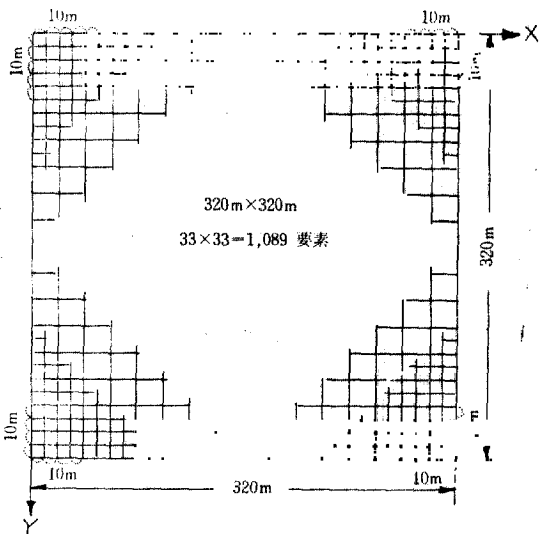


그림 5. Patch 크기 및 構成

密度增加式 標本抽出法에서 標本點으로 直接 추출되지 않은 標本點에 대하여는 補間法을 사용하여 그 높이를 계산하였으며 이들 資料는 추후 오차분석에 사용되었다. 총 15,246 점의 지형 정보자료가 본 연구에서 취급되었으며 계산은 IBM 370/135 에서 시행되었다. 여기에서 좀 아쉬웠던 사항은 컴퓨터會社의 사정상 본 연구에서 고려되어야 할 각 경우마다의 實電算所要 시간을 분석치 못한 점이었다.

3-3. 본 연구의 전산처리

본 연구목적을 위해서 작성된 프로그램은 Fortran IV 言語로 작성되었으며 1개의 主프로그램과 10개의 副프로그램으로 구성되었다. 主프로그램은 전체적인 작업을 통제하고 반면에 10개의 副프로그램은 標本抽出과 최종통계분석을 행한다. 主, 副프로그램의 기능은 각각 다음과 같다.

*主 프로그램은

- 標本資料의 入力,
- 標本抽出순서 및 抽出回數의 통제,
- 標本抽出方向(X, Y)의 결정 및 순서,
- 標本點의 위치결정 및 印刷에 관한 것이고,

*副 프로그램은

총 10 개의 副 프로그램중에서 6개는 密度增加式 標本抽出을 1次 높이差(Δh)의 결성, 2차 높이差(δh)의 결정 및 새로운 標本點의 위치결정 등의 순서로 시행한다. 나머지 4개의 副프로그램중에서 2개는 統計分析用이며 다른 2개는 토공량계산 및 그 분석을 행한다.

4. 數值試驗결과에 대한 비교분석

4-1. 수치계산결과의 표현

표 2, 3, 4 그림 7, 8은 모두 수치시험결과를 나타낸 것이다. 특히 그림 7은 入力地形을 地形圖로 表示한 것이며 그림 8은 密度增加式 標本抽

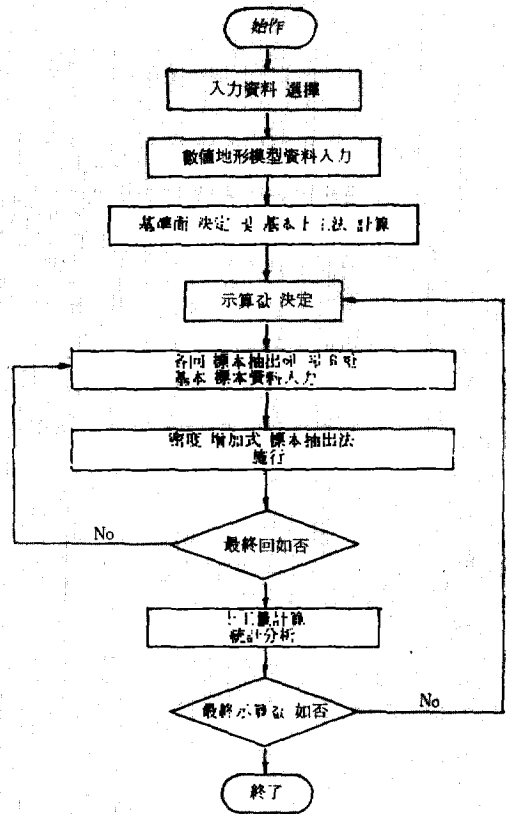


그림 6. 프로그램의 作業系統圖

출에 의거 抽出된 標本の 圖式的 例이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 抽出된 標本の 密度가 얼마나 實際地形과 부합되는가를 잘 나타내주고 있다. 그림안에 있는 숫자(0, 1, 2, 3, 4)는 標本點이 抽出되었던 標本抽出 次數를 表示한다. 表 2에서 土工量의 계산은 基準面 11.024 m를 기준으로 하였다.

4-2. 數值試驗 結果分析

수치지형모형을 평가하는 방법 중 가장 적합한 것은 그 效率性과 正確性을 검토하는 방법이라 할 수 있다^(1,2).

4-2-1. 效率性 分析

表 2. 正規格子網에 의한 土工量 計算結果

區 分	盛土量(m ³)	切土量(m ³)	盛土誤差	切土誤差	誤差百分率(%)	
					盛 土	切 土
實際 地形模型	172078.75	172535.44	—	—	—	—
航空寫眞 數值地形模型	171358.94	173367.44	720.81	-2832	0.42	-1.64



二圖 7. 標本地域の地形圖(等高線 0.5 m)

MATRIX REPRESENTATION OF SAMPLED PATCH

0	4	3	4	2	4	3	1	2	2	4	3	4	1	4	3	2	3	0									
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4									
3	4	3	4	3	3	4	3	3	3	4	3	4	3	3	3	3	3	3									
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4									
2	4	3	4	2	3	2	2	3	2	4	2	4	3	4	2	4	3	2									
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4									
4	3	4	3	3	3	3	3	3	3	4	3	4	3	4	3	4	3	2									
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4									
1	4	3	4	2	3	1	2	1	4	2	4	3	4	1	4	3	2	3	1								
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4								
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4								
4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3								
2	3	2	2	2	3	2	2	3	2	4	3	4	2	3	2	3	2	3	2								
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4								
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3	4	3	3	3	4	3	4	3								
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4								
0	3	2	1	3	4	2	4	3	4	0	3	2	3	4	1	4	3	4	2	4	3	4	0				
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4				
3	3	4	3	4	3	4	3	4	3	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4				
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4				
2	2	2	3	4	2	4	3	4	2	3	2	4	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2			
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4				
3	3	3	3	3	3	4	3	4	3	3	4	3	3	3	4	3	4	3	4	3	3	4	3	4			
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4				
1	3	2	3	1	2	4	2	4	1	3	2	3	1	3	4	2	4	3	1	3	4	2	4	3	1		
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4			
3	3	3	3	3	3	4	3	4	3	4	3	4	3	3	3	4	3	4	3	3	4	3	4	3			
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4			
2	3	2	3	2	2	2	2	2	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	3	2	4	3	4	2		
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4			
3	3	3	3	3	3	4	3	4	3	3	4	3	3	3	4	3	4	3	4	3	3	4	3	4			
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4			
0	3	2	4	3	4	1	2	3	0	2	3	0	2	3	1	4	2	4	3	4	0	3	2	4	3	4	0

SIZE OF MATRIX .. (31 *33)
 PATCH SIZE... 320. METER
 THRESHOLD ... 2. METER
 TOTAL RUNNING INCL. ZERIC... 4 RUNS

二圖 8. 密度增加式 標本抽出圖 圖式的 例

表 3. 높이 誤差에 대한 度數分布圖

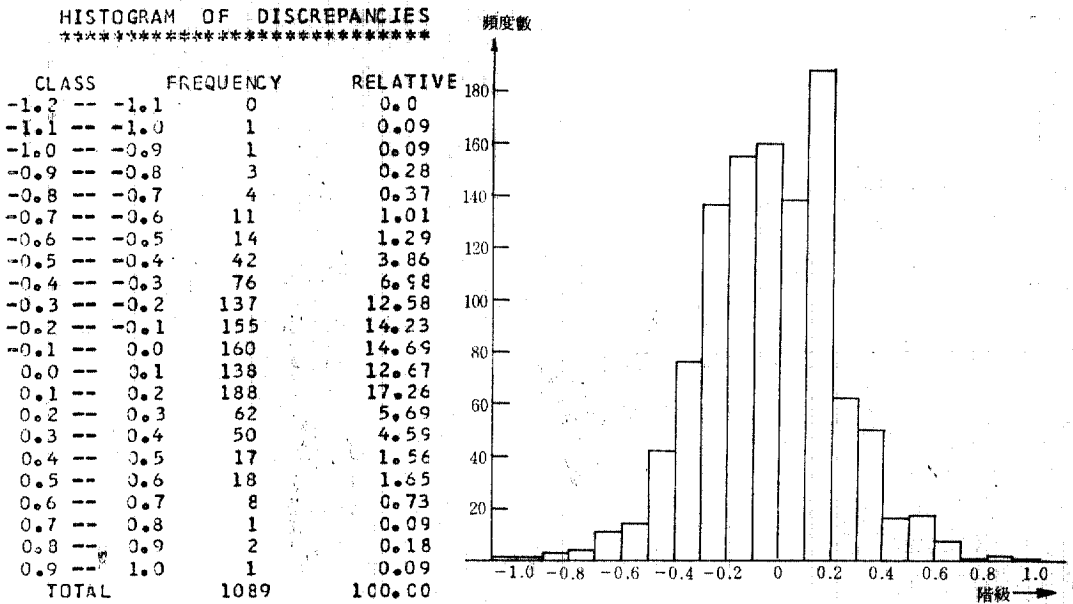


表 4. 密度增加式 標本抽出法에 의한 試驗結果

區 分	示算값 抽出條件	1 m		2 m		3 m		4 m		5 m		6 m	
		條件 1	條件 2	條件 1	條件 2	條件 1	條件 2	條件 1	條件 2	條件 1	條件 2	條件 1	條件 2
抽出된 標本 總數		918	797	562	504	375	344	267	232	139	134	96	100
百 分 率(%)		84.3	73.2	51.6	46.3	34.4	31.6	24.5	21.3	12.8	12.3	8.8	9.2
最大 높이 誤差(m)		1.35	3.45	1.95	3.45	2.70	2.70	2.70	3.45	7.10	7.10	7.10	7.10
標 準 誤 差(m)		0.12	0.29	0.31	0.38	0.42	0.45	0.49	0.67	0.96	1.03	1.07	1.11
盛 土 量 誤 差(m³)		1528	3354	3449	4697	5714	7270	4376	8104	-2261	-1439	7785	8607
百 分 率(%)		0.89	1.95	2.00	2.73	3.32	4.23	2.75	4.71	-1.31	-0.84	4.52	5.00
切 土 量 誤 差(m³)		-2814	-2338	-2740	-4115	-6969	-7785	-6669	-6563	-5080	-6150	569	-2262
百 分 率(%)		-1.63	-1.36	-1.59	-2.39	-4.04	-4.51	-3.87	-3.80	-2.95	-3.57	0.33	-1.38
平均土工量誤差百分率(%)		1.26	1.65	1.80	2.56	3.68	4.37	3.31	4.25	2.13	2.20	2.42	3.16

効率性은 抽出된 標本의 총수와 직접 관련이 있다. 자동화 또는 반자동화 된 DTM용 관측장비는 X, Y, Z 3차원 운동이 컴퓨터에 의해 자동으로 제어되고 있으며 작업진행도중 중단없이 연속적인 동작에 의해 이루어진다. 따라서 수동동작을 최소로 줄이고 동시에 高速度의 標本抽出이 가능하다. 따라서 標本抽出의 効率性은 抽出된 標本의 單位面積當 標本抽出數(百分率)로서 表示할 수 있다.

그림 9는 示算값과 抽出條件의 變化에 따른 標本點의 抽出數가 어떻게 달라지는가를 표시하

고 있다. 이 그림으로부터 우리는 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

첫째 일반적으로 抽出된 標本點의 百分率은 示算값이 높아지거나 抽出回數가 줄어들 때 감소하였고, 둘째 効率性은 示算값이 增加함에 따라 급격히 증가하며 이 관계는 非線形으로 表示되고, 標本抽出의 條件을 변경했을 경우에도 効率性은 向上되었다.

4-2-2. 正確度 分析

抽出된 標本點으로부터 再現된 數值地形模型의 正確度는 다음 두가지의 誤差원인에 의하여

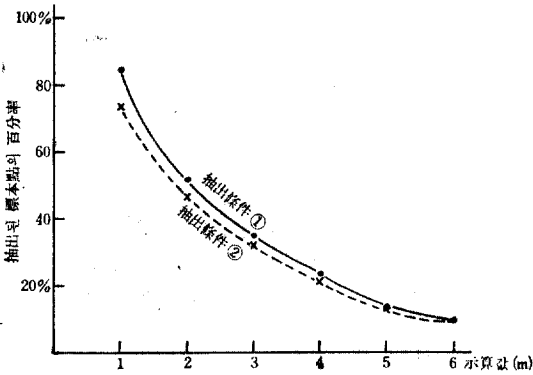


그림 9. 抽出된 標本點의 百分率과 示算값과의 關係

영향을 받는다.

첫째: 標本點의 密度

둘째: 不完全한 觀測

수식으로 표현하면

$$\sigma_T^2 = \sigma_0^2 + \sigma_s^2$$

σ_T : 標準誤差

σ_0 : 觀測誤差

σ_s : 標本抽出 誤差

그러나 위에서 表示된 觀측오차는 여러 가지 要素에 의한 복합적인 것으로 매우 복잡하여 理論적으로 결정할 수는 없으며 다만 경험적인 수치에 의존할 수 밖에 없다. 따라서 客觀性이 결여되어 있다. 따라서 문제를 쉽게 풀기 위해서 단순히 標本抽出에서 오는 오차만을 가지고 正確性を 논하고자 한다.

여기서 말하는 標準誤차는 補間法으로 얻어진 點의 높이와 實際地形의 높이와의 差로서 계산되었다. 이러한 표현은 DTM 성과의 精確도를 논하는데 있어서 보편적으로 사용되고 있다. 한편 높이差들에 의해 산출된 標準오차는 높이差들 自體가 매우 밀접한 相關關係가 있어서 비록 이들의 分布狀態가 正規分布를 이루고 있다고 하여도 아직 그들의 통계적 성질을 알기는 쉽지 않다.

그림 10, 11, 12는 이들의 關係를 표시한 그림이다.

그림 10은 土工量 誤差에 대한 분석표이다. 토공량의 오차는 補間法에 의해 再現된 數值地形

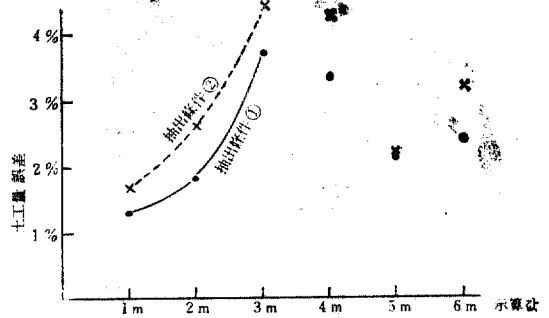


그림 10. 土工量 誤差와 示算값의 關係

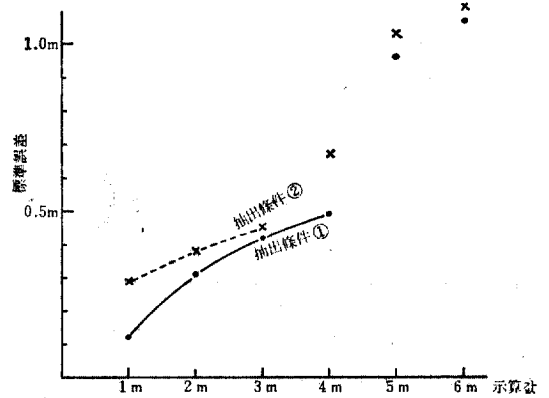


그림 11. 標準誤差와 示算값의 關係

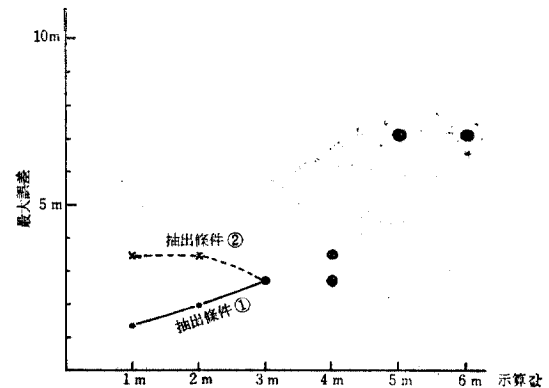


그림 12. 最大誤差와 示算값의 關係

模型과 實際地形模型의 差를 말한다. 이들 그림으로부터 다음 사항을 알 수 있다.

일반적으로 標準誤차는 示算값이 커짐에 따라 增加한다. 이들이 대략 어느 일정한 示算값에

도달될 때까지는 선형변화를 하나 그 이상부터는 불規則인 변화를 한다. 따라서 이 선형변화 하는 부분의 示算값이 적합한 示算값이라고 할 수 있다. 이러한 상태는 標本抽出條件을 변경시켰을 경우에도 동일하다.

토공량의 오차도 示算값이 증가함에 따라 거의 직선비례로 증가하고 있으나 示算값 3m를 기준으로 그 이상은 불規則變化를 하고 있다. 그러나 3m 이내의 경우에는 토공량의 오차가 5% 미만으로서 실제 토공량 산출에는 충분하다고 볼 수 있다.

그림 12에 표시된 최대오차의 경우도 위에 열거된 사항과 별로 다른 점이 없으나 抽出條件②의 경우는 條件①의 경우보다 크기가 상당히 큰 것을 알 수 있다. 즉 최대오차는 示算값보다는 標本抽出條件에 의해 더 큰 영향을 받는다.

5. 결 론

이상의 數值試驗結果分析에 따르면, 正規格子網 標本抽出法과 密度增加式 標本抽出法에서 記述된 바와 같이 다음의 몇가지 사항에 유의하여 航空寫眞에 의한 數值地形模型에서 얻어진 地形資料를 토공량 산출에 活用하면 다음과 같은 特徵이 있다.

1. 密度增加式 標本抽出法은 抽出된 標本の 數가 地形 및 地勢의 複雜性에 比例하여 變化하였다는 事實로보아 密度增加式 標本抽出法에 의한 數值地形模型은 實際地形의 特性에 아주 잘 부합된다.

2. 示算값과 抽出條件을 알맞게 결정하여 사용하면 密度增加式 標本抽出法은 높은 精度를 가지며 가장 效率인 數值地形模型 標本抽出法이라고 본다.

3. 線形式方法에 의한 示算값의 계산은 大縮尺航空寫眞으로 높은 精度의 結果를 요구할 경우에는 적합치 않다고 본다.

4. 正確도에 크게 영향을 미치는 要素는 示算값이라 할 수 있다.

5. 일반적으로 最大誤差가 標準오차보다 5~10倍 크기로 나타나고 있으나 그 빈도수가 적기 때문에 전체에 미치는 영향이 아주 적으며 특히 토공량산출에서는 실제적으로 거의 영향이 미치지 않는다.

참 고 문 헌

1. Makarovic, B. "Information Transfer in Reconstruction of Data from Sampled Data". *Photogrammetria*, 1972, 28(4) : 111-130.
2. Makarovic, B. "Conversion of fidelity into accuracy" *ITC Journal*, 1974-4.
3. Makarovic, B. "Progressive Sampling for Digital Terrain Models". *ITC Journal* 1976.
4. Makarovic, B. "Amended Strategy for Progressive Sampling". *ITC Journal*, 1975-1.
5. Makarovic, B. "A Digital Terrain Model System". *ITC Journal*, 1976-1.
6. Makarovic, B. "From Digital Components to Intergrated Systems" *ITC Journal*, 1974-5.
7. Makarovic, B. "Lecture Course for the M. Sc. Students on Digital Terrain Models"
8. Leberl, F. "Interpolation in Square Grid DTM" *ITC Journal*, 1973-5.
9. Leberl, F.: "Photogrammetric Interpolation, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing" *ASP Vol. XL 1, no. 5*
10. Braker, F. "Generation of Regular Point Grid from Contour Lines for Digital Terrain Models" Unpublished thesis. Enschede, The Netherlands, 1975.
11. Jiwalai, W. "Digital Terrain Models-Numerical Investigation of Regular Point Grids" Unpublished thesis. Enschede, 1972.
12. El Ghazalli, M.S.A. "Performance Investigation of Progressive Sampling for Digital Terrain Models by Computer Simulation" Unpublished thesis. Enschede, 1974.
13. Nakamura, H. "On Digital Terrain Models" *ISP Commission V*, Iausanne, 1968.
14. Miller, C.L. "The Digital Terrain Model-Theory and Applications" *Photogrammetric Engineering*, June 1958.
15. "ISP Working Group IV, On Photogrammetry and Highway Engineering. Ottawa, 1972.
16. "ISP Working Group IV, Invited Papers" Lausanne, 1968.
17. Silar, F. "Die Interpolation der Hohen auf dem Digitalen Gelande Modelle in Beziehung zu der

- Klassifikation der Geländeflachen und zu der Dichte und Zerlegung der Dichte und Zerlegung der Knotenpunkte" *ISP Working Group IV/I*, Bratislava, 1979.
18. Blaschke, W. "Application of Orthophotomaps in Highway Work" *ISP Commission IV*, Ottawa, 1972.
 19. Wrahasitirto "Investigation of Volumetric Determination by Computer Simulation-using Irregular Points Pattern" Unpublished thesis, The Netherlands, Enschede 1974.
 20. Makarovic, B. "Lecture Course for the M. Sc. Students ITC on Digital and Automated Restitution System"
 21. Makarovic, B. "Hybrid Stereorestitution System" *Photogrammetric Engineering*. October, 1970. p. 1086-1092.
 22. Makarovic, B. "Fundamental Consideration in Stereorestitution" *ISP Commission II*, Bad God- esberg, 1966.
 23. K.J. Cho "Evaluation of Progressive Samling Implementing Different Criteria." Unpublished thesis. The Netherlands, 1976.

(接受: 1982. 3. 4)