

數值高程模型自動化產生等高線之品質問題

—以臺灣 40 公尺 DTM 為例

The Quality Problems of the Contour Lines that Automatic Generated from Digital Elevation Model -A Case Study Using 40 Meter DTM of Taiwan

賴進貴*

王韋力**

葉高華**

Jinn-Guey Lay

Weiley Wang

Ko-Hua Yap

摘要

近年來數值高程模型 (DEM) 的發展不但沒有排除等高線圖的價值，由 DEM 自動化產生等高線，反而使等高線圖的繪製更為簡便、使用更為普及。然而，DEM 的品質問題往往使自動化產生的等高線，存有許多不合理的鋸齒狀型態，包括：水平波紋、邊界不整合及不規則扭曲等三種。本研究採用等高線密度法，有效檢測不合理等高線之分佈，並透過 DEM 資料的平滑化處理，消除水平波紋的等高線品質問題。

關鍵詞：數值高程模型、資料品質、等高線生產

Abstract

Although Digital Elevation Model (DEM) has become major data for the analysis and display of terrain, however, contour maps are still indispensable for several reasons. Traditional contour maps are drawn manually. Recent popularity of GIS makes the production of contours from DEM much more efficient. During an experiment, we found that the contour lines automatically generated from 40 meters DTM of Taiwan demonstrated unreasonable zigzag patterns, including horizontal ripples, marginal discontinuity and irregular warping. These problematic patterns were resulted from the

*國立臺灣大學地理環境資源學系副教授

Associate Professor, Department of Geography, National Taiwan University.

**國立臺灣大學地理環境資源學系研究助理

Research Assistant, Department of Geography, National Taiwan University.

problematic quality of DEM. In this research, we detect these unreasonable patterns by density of contour lines and attempts to improve the quality of the automatic generation. We find that horizontal ripple patterns could be eliminated by smoothing DEM data.

Key Words: Digital Elevation Model, Data Quality, Generation of Contours

研究動機

地形是地理環境的自然特徵，而等高線是地形圖用以表現地形的主要方法。在環境分析的應用中，等高線是進行坡度 (slope)、坡向 (aspect)、視域分析 (viewshed analysis) 等地形計測工作時的參考高程數據來源。雖然自 1970 年以後，使用電腦離散數位的高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 來儲存地形高程資料，已成為地理學界及其他工程界普遍應用的技術。DEM 和地理資訊系統 (Geographic Information System, GIS) 的結合，也帶來更強大的地形分析、模擬與更多元的地形展示功能。然而，DEM 的蓬勃發展不但沒有完全排除等高線的價值，反而使繪圖工作更加便捷，等高線地形圖的發行與使用層面因而更加普及。因此，利用 DEM 來產生等高線圖，已成為製圖界的一項重要應用。

自動化產生等高線雖有速度快、彈性大等優點，然而深受 DEM 資料品質的影響。不正常的 DEM 數值，往往使等高線出現不平滑、鉅齒狀等不合理現象，徒增人工編修的成本。有關等高線與 DEM 資料品質，吸引許多研究者的興趣。現有相關研究，主要探討由等高線產生 DEM 時的問題 (如：Lam, 1983; Eklundh and Martensson, 1995; 賴進貴與王慧勳，1996)。從 DEM 資料品質檢測的層面來看，利用 DEM 產生的等高線可以找出 DEM 隱含之點狀誤差情況及其大小 (石宏揚與史天元，1997)。這些研究皆由 DEM 生產者的觀點出發，然而對於地形圖的製圖者而言，通常僅是 DEM 的使用者，難以藉由 DEM 品質的修正來改善不合理等高線。因此以人工編修方式修改不合理等高線，已是目前製圖界自動化產生等高線的重大瓶頸。本研究由製圖者的觀點出發，以臺灣 40 公尺 DTM 為例，探討 DEM 自動化產生等高線的品質問題，希望藉以找出不合理等高線的型態與檢測方法，並發展自動化產生等高線的品質改善之道。

DEM 品質與等高線的自動化產生

(一) DEM 與資料品質問題

DEM 一詞源自美國地質調查所 (U. S. Geological Survey, USGS) 生產的網格式高度資料。數值地形模型 (Digital Terrain Model, DTM) 則泛指任何表達地形的方方法，如：數值等高線、不規則三角網 (Triangular Irregular Network, TIN)。因此 DTM 較 DEM 更抽象及廣義 (Burrough, 1986；賴進貴，1994)。DEM 的高度值就資料獲取、儲存與生產方式均與傳統地形圖不同。DEM 資料是一種抽樣的結果，隱含許多系統性資料品質問題，也包括人為操作之製程品質問題。

DEM 的資料來源分成三種：地面調查、航照資料獲取、現有資料的處理 (如：從地形圖上的等高線內插產生 DEM)。地面調查相對上較其他二者精準，但相當耗費成本，通常一次只能調查一個小區域，其結果能夠彌補其他二者資料錯誤或不足的地方。航照資料產生的 DEM 品質，受到資料樣本的抽樣方式及影像品質的影響。而地形圖內插產生的 DEM，由於等高線的離散疏密不一，在等高線位置上提供太多連續的資訊，形成過度抽樣；在等高線間隔的地方則沒有資訊供地形辨視，又形成抽樣不足的結果。此外，內插法產生的 DEM 地表型態較簡化，往往無法有效顯示細部的地形變化 (賴進貴，1996)。

由於上述原因，DEM 經常發生資料品質問題，使部份或全部資料偏移或失真。對於衍生自 DEM 的地形分析如：坡度、坡向、暈渲及等高線等，往往使資料在經過演算後造成更大的誤差。Maune (2001) 歸納出從航空照片的拍攝因素、攝影器材，到後製的參數校正、掃描等等作業環節，都有可能使最後的 DEM 資料產生系統性資料品質問題。1980 年代美國地質調查所生產的解析度 30 公尺 DEM，大部份的資料在經過暈渲圖處理後，均可以肉眼看出波紋之條狀系統性誤差。Oimoen (1997) 採用兩階段資料濾波 (pass filter) 處理，發現可以解決系統性資料品質問題。

(二) 等高線自動化產生演算法

等高線資料在 GIS 資料結構中由數個離散相異的點連接而成。電腦自動化產生等高線的演算規則，以每 4 個高程值為一組，4 節點之連線可供推估目標高程值的位置。此外，由 4 節點取平均值所產生的組中心點，也可與節點連線以供推估目標高程值的位置。目標高程值的位置依距離反比的線性內插方式決定，最後連接成為等高線。電腦對於所有包含高程起始值的等差數列，均視為目標值。例如：高程起始值為 0 公尺，間距為 10 公尺，則目標值為 0 公尺、10 公尺、20 公尺……。舉例說明，圖 1 為 3*3 高程矩陣，欲產生高程值為 10 公尺高之等高線，須先將高

程值為 10 公尺的點尋找並標示出來 (圖 1A)。其次，將搜尋到的目標高程串連起來 (圖 1B)。最後，完成各等間距高程 (10 公尺、20 公尺、30 公尺、40 公尺、50 公尺、60 公尺……) 之等高線 (圖 1C)。

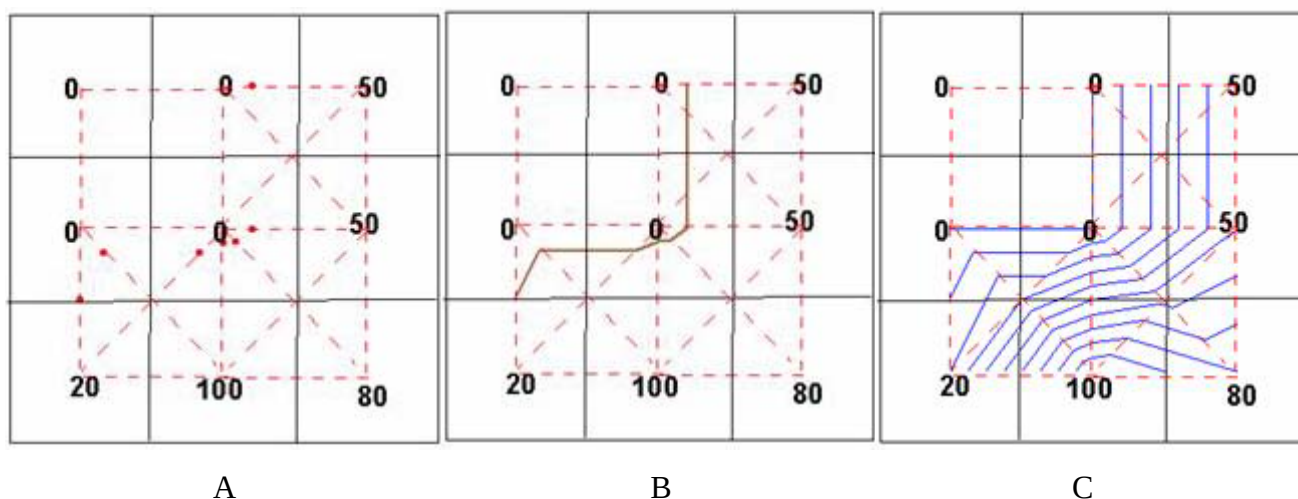


圖 1 等高線自動生產的過程

研究問題與方法

合理的等高線應具備連續平滑、封閉、未分岔等條件。在這個定義之下，自動化產生的等高線須符合上述的要求，否則將被歸類為不合理等高線的類別，同時也是本研究的具體對象。本研究尋找由 DEM 產生等高線時造成不合理型態之原因，主要問題包括：

1. 如何檢測不合理的自動化產生等高線？
2. 不合理之自動化產生等高線有哪些型態？
3. 如何消除不合理的自動化產生等高線？

針對上述三個問題，本研究以實作方式來進行探討。研究材料選擇農委會所生產的臺灣 40 公尺 DTM，藉由這些資料自動化產生的等高線來發掘問題。主要研究方法如下：

(一) 資料與設備

臺灣 40 公尺 DTM 由農委會林務局農林航空測量所生產，目前委託中央大學太空及遙測衛星中心代管及販售。該資料除農林航空測量所採自航空照片之外，其餘數值高程點均由地形圖等高線內插後產生。本研究以臺灣 40 公尺 DTM 做為

實作資料，自動化產生等高線，並與 1/25,000 經建版地形圖的等高線進行比對，以確認不合理等高線的位置。

處理 DEM 與等高線的軟體，則採用美國 ESRI (Environmental Systems Research Institute) 出品的 Arc/Info 8.0。本研究使用的模組為 GRID，乃針對網格式地理資料設計，可處理網格數值的空間分析、統計及程式需求等。

(二) 不合理等高線的偵測方法

傳統地圖的等高線是在一個連續且平滑的立體地形模型上，以立體繪圖儀 (stereo plotter) 進行判釋與繪製，所產生的等高線比較平滑。相對地，DEM 是由一組離散的抽樣點所構成，而且所記錄的高度值大都是經過四捨五入之後的整數值，因此所產生的等高線比較容易出現零星的情形，也容易受到個別取樣點的高度誤差而造成密集、不整合情形。密集的等高線尚反應了 DEM 資料生產過程中的接邊不整合問題。由於全臺灣的 DEM 資料是由一對對的航照相片鑲嵌而成，個別圖幅之間的基準點高度差異，造成圖幅之間的不整合，連帶形成錯誤的人工斷層，呈現在等高線圖上則是密集而規則的等高線。

為了檢測這種過度密集的等高線，本研究使用 Arc/Info 的指令「linedensity」，計算自動化產生等高線的密度，並測試以等高線密度檢測不合理等高線的可行性。

等高線密度 = 搜尋半徑內之等高線長度 / 搜尋半徑之圓面積 (圖 2)

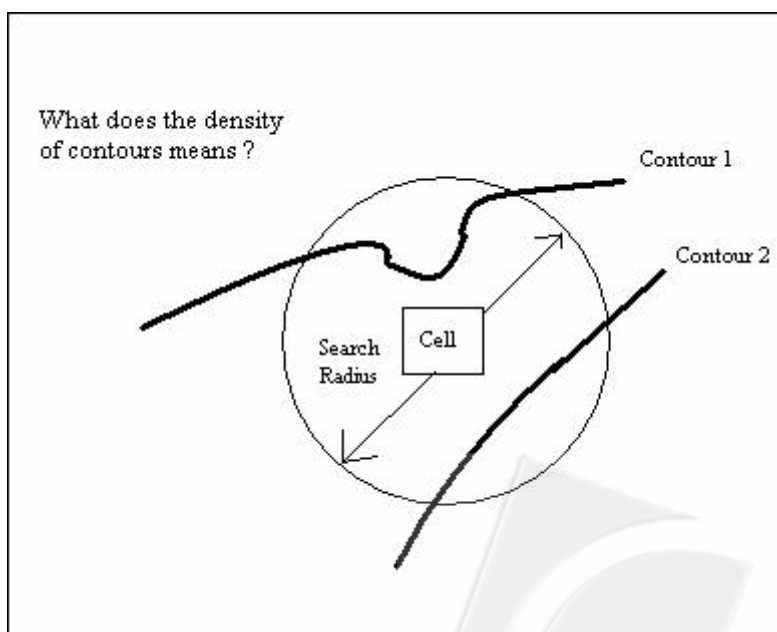


圖 2 等高線密度的意義

(三) DEM 資料的平滑化

本研究透過 Arc/Info 的 GRID 模組，將鄰近高程差異過大的 DEM 資料平滑化，以改善不合理的鋸齒狀等高線問題。方法為計算每個網格周圍若干網格數值之平均值，以此一平均值替換原網格數值。本研究比較 3*3、5*5、7*7 鄰近網格平均法的不同。此外，3*3 鄰近網格的平均法可以再縮減成前後左右 4 格之鄰近範圍，稱十字平均法 (cross average)；對角位置之平均也可以算是一種平滑化的選擇。本研究再比較十字平均法與對角平均法等的不同，試圖找出何者最能有效改善等高線品質問題。

除了上述方法外，本研究亦比較去條紋法 (de-stripped) 的效果。先找出水平條紋的範圍，第一次將水平條紋上網格之數值平均，此即低通濾波 (low-pass filter)。水平之網格數可自行定義，但不宜過短，否則無法表現水平條紋之明顯差異特性。其次，求出上下條紋之各水平平均化數值差異值，此即高通濾波 (high-pass filter)。上下條紋之範圍亦可自行定義。最後，再將原始網格值減去高通濾波處理後的數值，即可得到去條紋後之網格值。此法可用來消除特定之紋狀紋理。

等高線品質之檢測

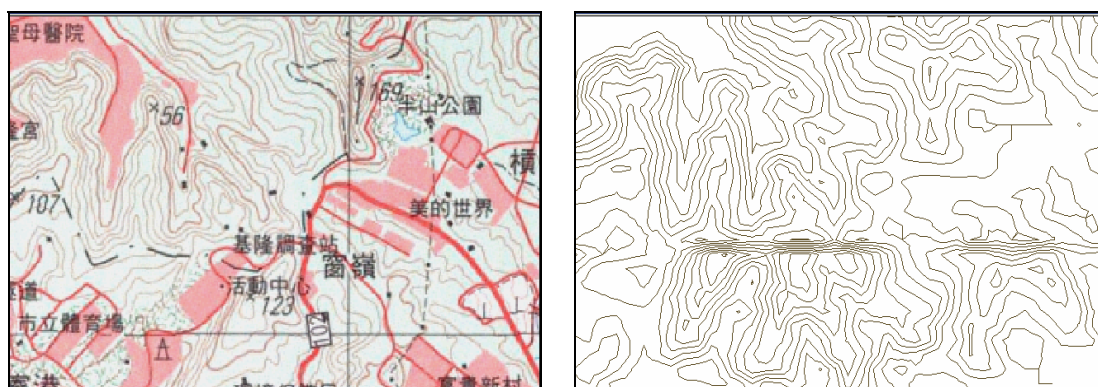
(一) 等高線密度

本研究以基隆丘陵一帶，做為檢測不合理等高線的樣本區，中心點位於 TM2 度坐標 (326768, 2781208)。圖 3A 為 1/25,000 經建版地形圖，圖中具有每 10 公尺一個間距之等高線。圖 3B 則為利用臺灣 40 公尺 DTM 所運算出來之等高線圖，間距同樣為 10 公尺。試驗結果發現 DEM 所生產之等高線，部份地區有明顯的資料品質問題，可以直接用肉眼觀察。

如等高線圖所示，當 DEM 資料有顯著不整合處時，其所產生的等高線密度非常高。等高線的密度因而成為一種檢測不合理等高線位置的指標。如果能利用自動化的分析找出等高線異常密集之處，便可進一步確認不合理等高線位置之所在。本研究利用 Arc/Info 系統 GRID 模組下的「linedensity」指令，進行這項分析。我們同樣以基隆丘陵一帶的等高線進行測試，設定網格大小 5 公尺，搜尋半徑為 5 個網格長度，最後之結果如圖 4 所示。

等高線愈密集之處，則其等高線密度之值愈高。因此，利用等高線密度不但可將不合理等高線的位置標示出來，更可明顯看出其強度。然而，由於山區地形

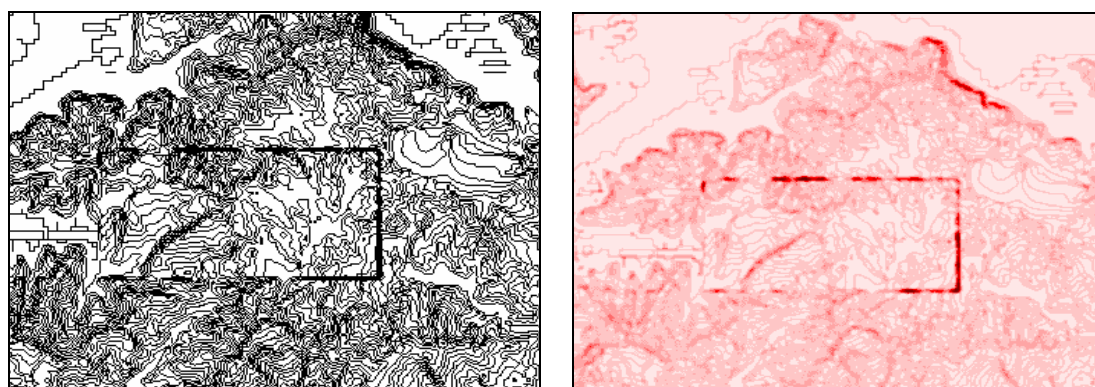
變化大，如圖 4 左上角落之局部地形陡峭情形，等高線亦呈較密集分佈。因此，等高線密度大不一定代表等高線有品質問題，仍要針對特定區域進行細部檢查。



A：1/25000 地形圖之等高線

B：DEM 自動生產之等高線

圖 3 地形圖等高線與自動生產等高線的比較



A：等高線圖

B：等高線密度圖

圖 4 水平波紋的等高線品質問題

（二）不合理等高線之型態

從等高線密度分析結果再局部放大觀察後，可歸納出主要的等高線品質問題有三種類型：水平波紋、邊界不整合及不規則扭曲。水平波紋的等高線品質問題，指的是等高線沿地圖 X 或 Y 方向密集排列。這樣的排列在自然地形上相當罕見，因此可被列為等高線品質問題的一種。如圖 4 即屬於水平波紋的等高線品質問題，若以 3D 展現，該地形成為一個突兀的凸起或凹入地塊。我們詳細檢核水平波紋處的 DEM 資料，發現有圖幅接邊不整合的問題。由於 DEM 個別圖幅之間的基準點高度差異，使鄰近高程呈規律性的水平排列。

邊界不整合的等高線品質問題，在大比例尺的等高線圖中，無法有效展現 (圖 5A)。但在等高線密度圖中，透過資料分級和配色的調整，比從等高線圖更容易看出資料品質問題的存在 (圖 5B)。我們詳細檢核邊界不整合處的 DEM 資料，發現亦有圖幅接邊不整合的問題。然而由於圖幅間的不整合沿著 X 軸或 Y 軸呈不連續變化，因此不若水平波紋具有規律性的顯著排列。

無法歸類至水平波紋或邊界不整合的等高線品質問題，呈現不規則排列，是為不規則扭曲的類型。由等高線密度圖亦可清楚看出不規則扭曲的等高線聚集於一處或呈點狀散布 (圖 6)。我們詳細檢核不規則扭曲處的 DEM 資料，發現該網格與其鄰近網格的高程值差異非常大，因而造成局部的等高線扭曲。

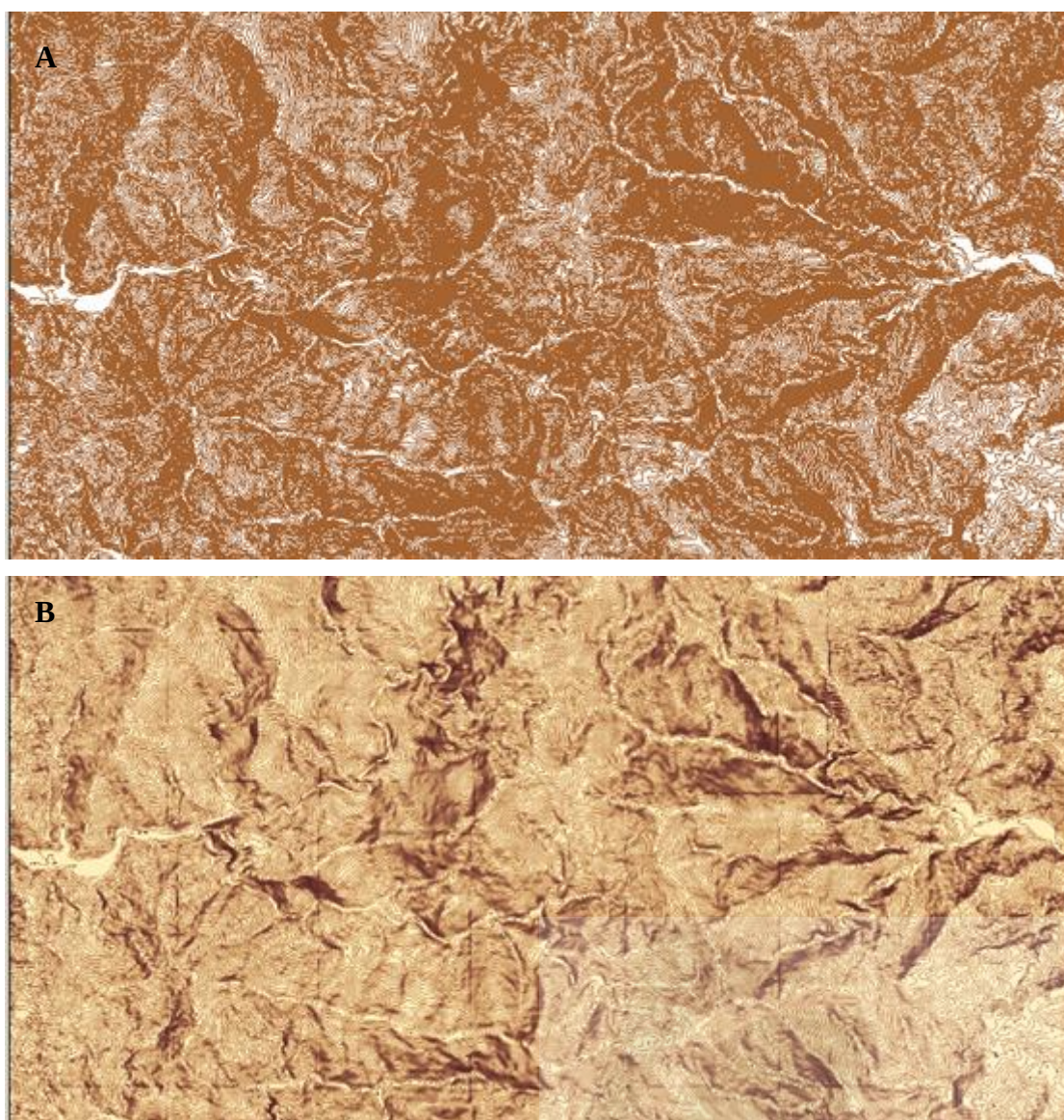


圖 5 邊界不整合的等高線品質問題。A：等高線圖；B：等高線密度圖。

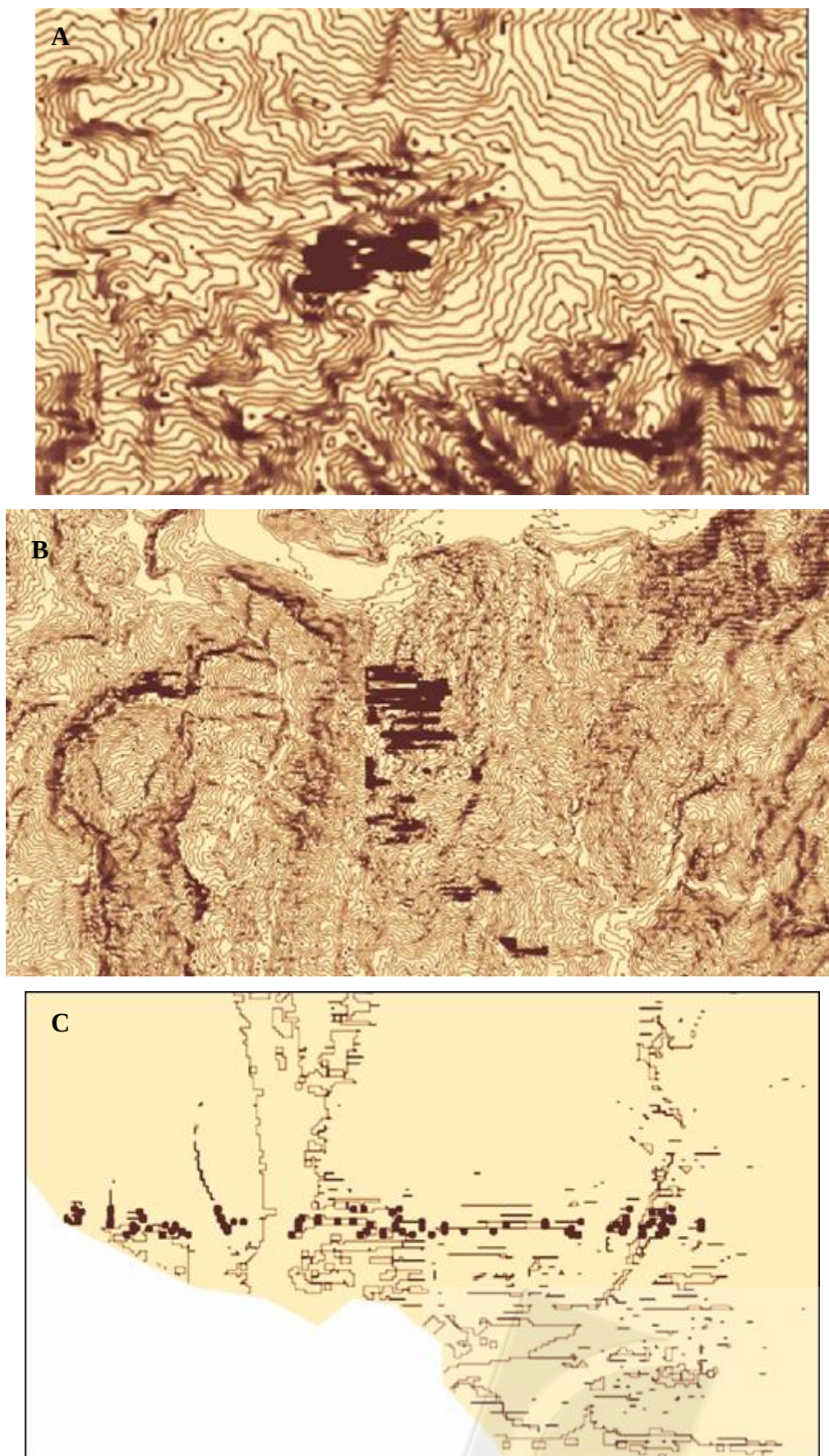


圖 6 不規則扭曲的等高線品質問題

(三) 不合理等高線與 DEM 鄰近高程差之相關性

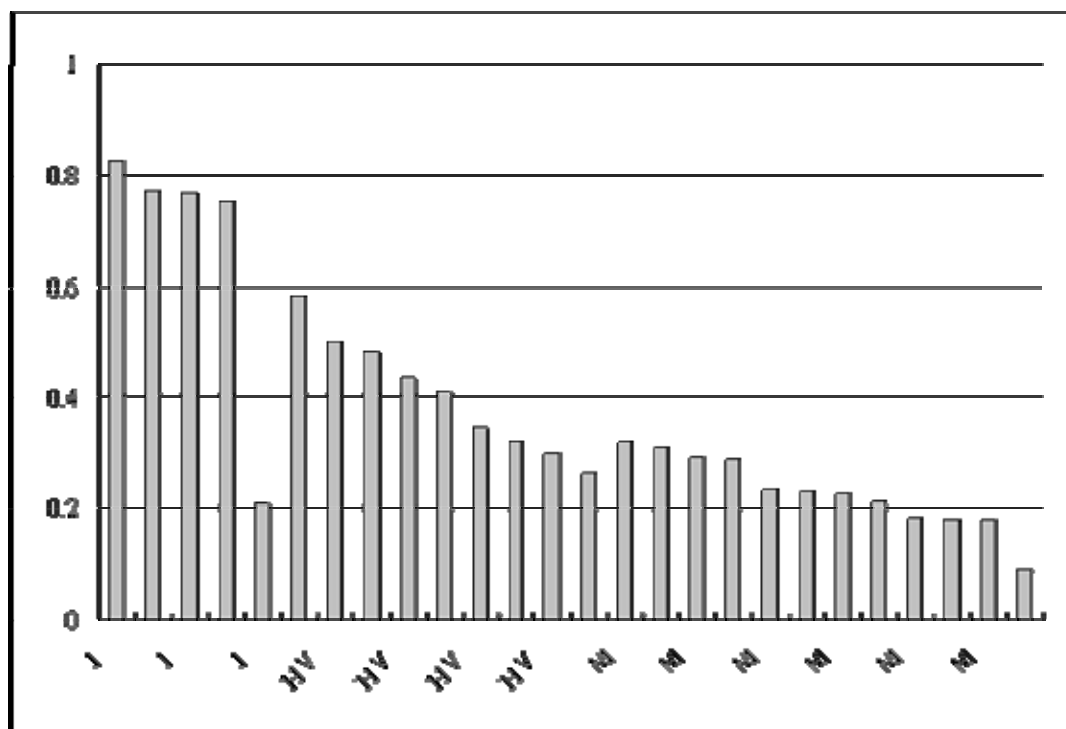
不合理等高線的等高線密度偏高，與 DEM 鄰近高程差可能有正相關性。本研究計算每個網格值與其前後左右 4 個網格值之平均差異值，得到 DEM 的鄰近高程差值。然後選取 22 個發現等高線品質問題的樣本區，進行相關性分析。結果發現，有些樣本區的等高線密度值，並未與鄰近高程差值呈正相關。兩者的相關係數，從無相關到高度正相關均有 (表 1)。其中呈不規則扭曲處的相關係數，普遍高於呈邊界不整合處。

表 1 22 個樣本區等高線密度與 DEM 鄰近高程差值之相關性

樣本區	區域中心點的 TM2 坐標	相關係數	類型
1	327033, 2780604	0.320	HV
2	292277, 2780073	0.299	HV
3	341431, 2771652	0.407	HV
4	306850, 2758370	0.753	I
5	316142, 2749319	0.089	M
6	274847, 2730583	0.182	M
7	256876, 2722553	0.825	I
8	299318, 2709553	0.213	M
9	286701, 2714141	0.233	M
10	262229, 2702288	0.286	M
11	280200, 2705729	0.320	M
12	313084, 2700759	0.479	HV
13	299701, 2698464	0.180	M
14	246935, 2695406	0.207	I
15	309642, 2683552	0.307	M
16	254582, 2660611	0.180	M
17	241582, 2663287	0.584	HV
18	211758, 2649140	0.262	HV
19	250759, 2649904	0.225	M
20	267582, 2651434	0.289	M
21	301613, 2652963	0.434	HV
22	259553, 2626198	0.229	M

註：HV=水平波紋，M=邊界不整合，I=不規則扭曲。

等高線密度與 DEM 鄰近高程差值之相關性，就樣本區內的結果來看，呈不規則扭曲處最高，約 0.6-0.8；呈水平波紋處次之，約 0.5-0.3；呈邊界不整合處最小，約 0.3-0.1 (圖 7)。這個試驗指出，自動化產生的等高線品質問題中，最不明顯的是邊界不整合，須輔以圖形來判識其等高線是否呈合理的空間圖形型態。



註：HV＝水平波紋，M＝邊界不整合，I＝不規則扭曲。

圖 7 樣本區之相關係數排序

等高線品質之改善

從上述 DEM 資料品質問題的成因特性上來說，DEM 資料若呈現明顯不連續之排列，就會造成自動化產生的等高線產生不合理的結果。將原始資料予以平滑化，是改善等高線品質的方式之一，其目的在於讓變化明顯的 DEM 資料轉換為較平滑的組合。我們選定南投與臺東交界處之山區進行平滑化試驗，因為該處之自動生產等高線呈水平波紋的資料品質問題。

從圖 8 的比較中可以發現，3*3 較 5*5 及 7*7 的鄰近網格平均法為佳。因水平波紋的等高線品質問題，為垂直波紋方向的網格高程差異明顯所造成，在波紋方向上的網格高程差異不大。因此上述三種平滑演算方法中，以 3*3 鄰近網格平均法最能達到平滑化之效果。

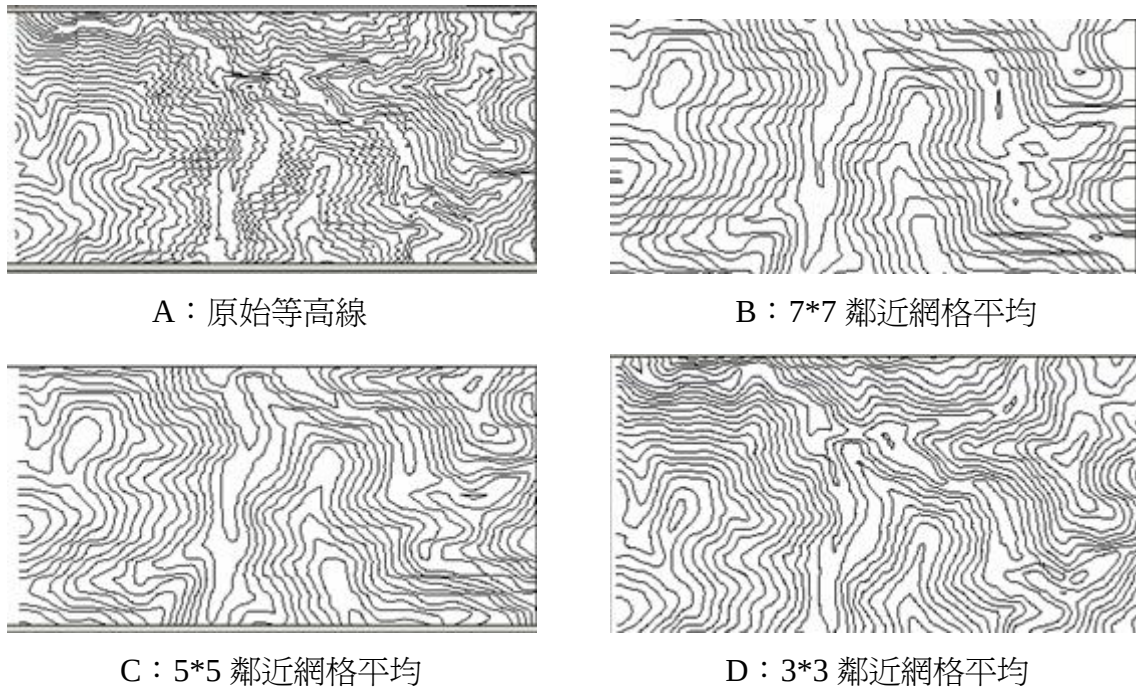
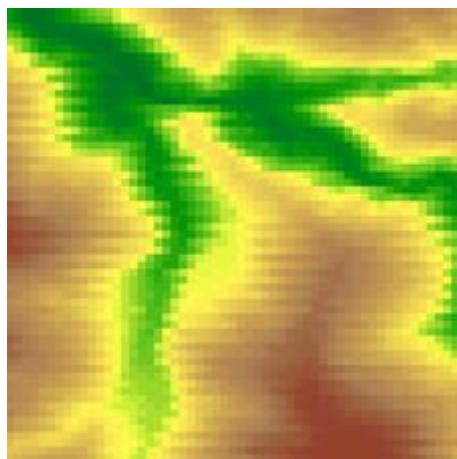


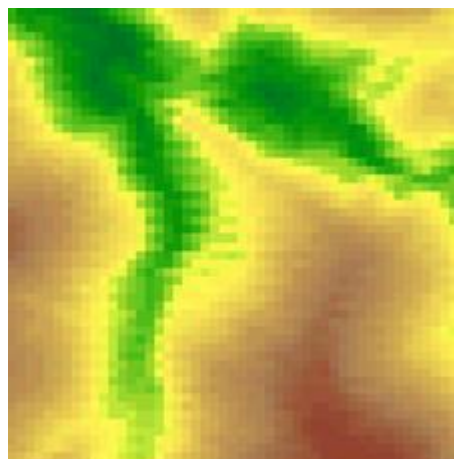
圖 8 不同鄰近網格平均法對等高線之比較

經過去條紋法、十字平均法、對角平均法的處理之後，以地形彩色暈渲圖對比原資料及處理後的資料，可看出不同的平滑化效果（圖 9）。原始未經處理之 DEM 資料以彩色暈渲圖展示後，以肉眼易觀察出有明顯的紋理。以去條紋法處理後的圖像較未處理之影像稍佳，但以十字平均法及對角平均法處理，顯然更為自然且連續。其中十字平均法又較對角平均法更能獲得平滑化的結果，因前後左右 4 格的平均，能夠減緩垂直波紋方向上的網格差異值。

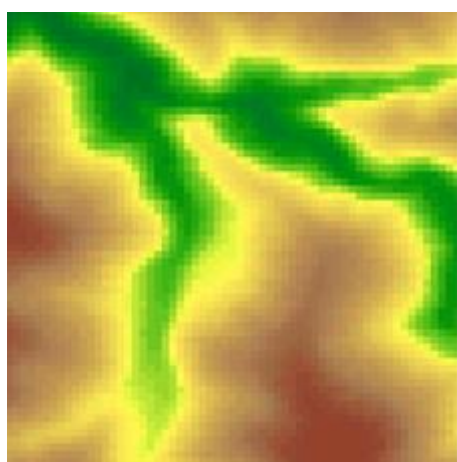
將樣區中原始等高線，與經過去條紋法、十字平均法處理的等高線作比較，可以看出不同平滑化處理對於等高線形態所造成的差異（圖 10）。呈現水平波紋問題的等高線呈現許多不同程度的扭曲，在經過去條紋法處理後，其扭曲的狀況已有改善，但仍不夠平滑。十字平均法之等高線與前者相較，在圖形上已達到平滑程度。以十字平均法再加上 3*3 鄰近網格平均後的等高線，呈現相當平滑的特性，但可能會有資料過度校正的情形。就整張等高線來看，圖 10C 較圖 10D 細緻，後者為再平均之運算結果，高程資料的鄰近差異已減到一定的程度。從小地方再注意觀察，在右側山稜與左側河谷地方，圖 10D 的等高線卻呈現尖銳的轉折曲線，並不符合一般地形圖等高線的圓滑轉折。



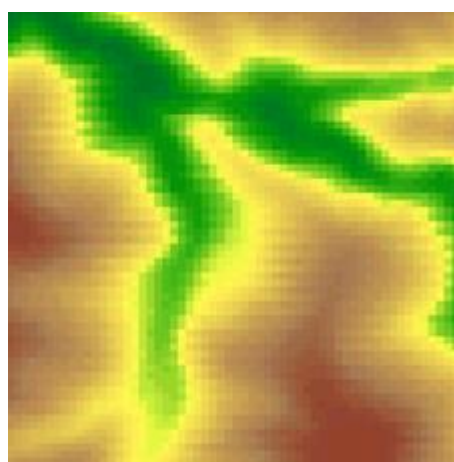
A：原始 DEM



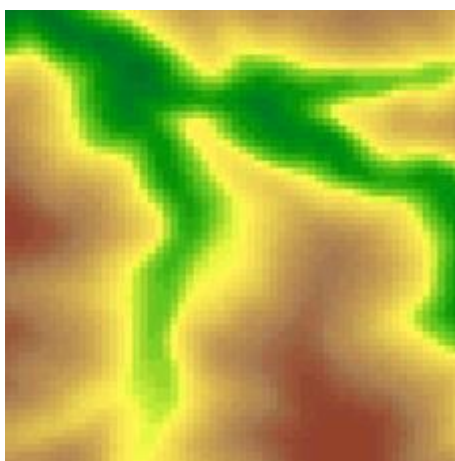
B：去條紋處理



C：十字平均



D：對角平均



E：十字平均後再以 3*3 鄰近網格平均

圖 9 不同平滑化處理對 DEM 資料之比較

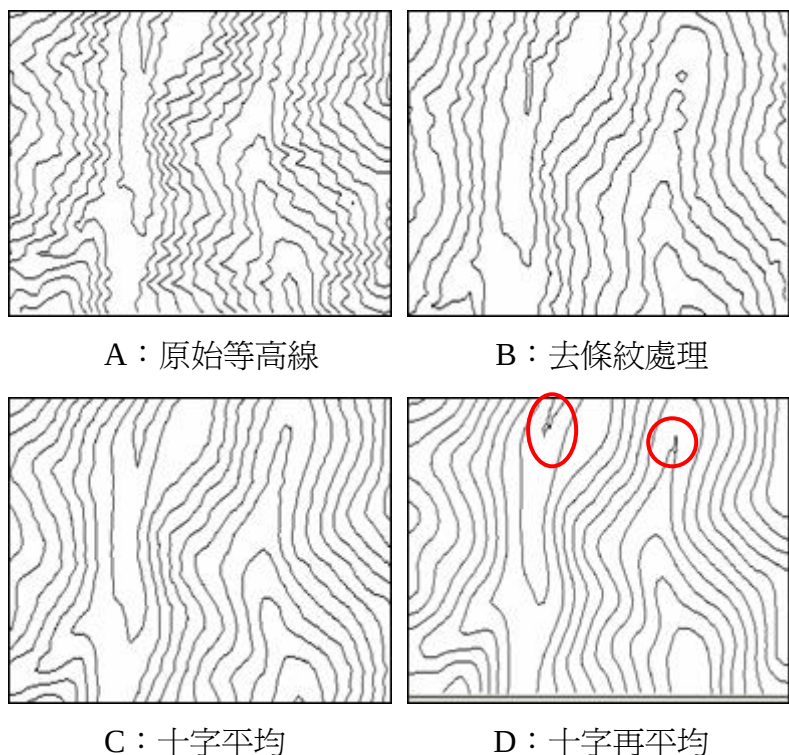


圖 10 不同平均法對等高線之比較

結論與建議

自動化產生之等高線有時呈現不合理之鋸齒狀，乃導因於 DEM 的資料品質問題，可利用等高線密度有效檢測其分佈與強度。自動化產生等高線的資料品質問題，從型態上分為水平波紋、邊界不整合及不規則扭曲三種。而透過 DEM 的平滑化處理，可以有效改善水平波紋的等高線問題。此處的改善乃針對製圖或地形展示方面，而非在測量及精密領域的應用。

水平波紋、邊界不整合及不規則扭曲的等高線資料品質問題，可就高程資料的特性再加以深入研究。後續研究應針對平滑化的演算公式及權重設定，使平滑後的數值高程更接近原始高程的數值。邊界不整合及不規則扭曲的問題，應從現有地形圖的等高線或以地面測量的方式，修改高程數值。

謝 辭

本研究為農委會科專計畫（編號：）之部分成果，研究期間承水土保持局提供相關行政協助、國立交通大學土木工程學系史天元教授寶貴建議。謹此致謝。

參考文獻

- 石宏揚，史天元 (1997) 八掌溪流域農委會 40 公尺 DEM 之資料品質問題探討，
土木水利，24(3): 46-55。
- 賴進貴 (1994) 數值地形模型比較之研究，台大地理學報，17: 87-100。
- 賴進貴 (1996) 數值高度模型與地形計測研究：資料解析度問題，地理學報，20:
61-73。
- 賴進貴，王慧勳 (1996) 數值等高線內插比較之研究，地理學報，21: 83-94。
- Burrough, P.A. (1986) *Principles of Geographical Information Systems for Land
Resources Assessment*. New York: Oxford University Press.
- Eklundh, L. and Martensson, U. (1995) Rapid Generation of Digital Elevation Models
from Topographic Maps, *INT. J. Geographical Information Systems*, 9(3):
329-340.
- Lam, N.S. (1983) Spatial Interpolation Methods: A Review, *The American
Cartographer*, 10(2): 129-149.
- Maune, D.F. (2001) *Digital Elevation Model Technologies and Applications: The Den
Users Manual*. Maryland: American Society for Photogrammetry and Remote
Sensing.
- Oimoen, M.J. (1997) *An Effective Filter for Removal of Production Artifacts in USGS 7.
5-minute DEMs*, USGS EROS Data Center,
<http://edcnts12.cr.usgs.gov/ned/paper.asp>

