

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

由空載光達點雲數據擷取線形特徵研究

計畫編號：95-2221-E-009-243-MY2

執行期限：96年8月1日至97年7月31日

主持人：史天元 國立交通大學土木工程學系

計畫參與人員：吳俊毅、蔡建成、吳歷韋、邱煥欽

## 一、中文摘要

本研究之探討重點在由空載光達點雲中萃取線形特徵，並著重於格網化 DEM 生成之應用。本研究經由實證，顯現出不同格網化內插方法所產生之地形不同，從而所產生之水系亦不同。依照光達產品分類，第三級之產品為分類精度達 99%，亦即所萃取之地形點，其中 99% 為地形點，有 1% 可能為覆蓋點。第三級之產品並不符合一般 DEM 之要求，而增加地性線與地性點生成 DEM 所得之產品，隸屬第四級。傳統攝影測量作業中萃取地性線均以人工方式進行，對於空載光達作業，亦有生成立體對後以攝影測量方式進行人工萃取者。地性線如稜線、谷線，均可由格網狀 DEM 採用適當演算法生成。但是，如果原始資料為離散點，格網狀 DEM 生成便已使用內插，有邏輯上之不嚴謹性。本研究探討由空載光達點雲直接求取稜線、谷線，著重於以不規則三角網結構之演算法。經由實證，本研究證實，地性線加入之約制對所生成之 DEM 確實有影響，而由不規則三角網結構亦可衍生稜線、谷線。但是，由目前現有之不規則三角網結構之水系及集水區萃取演算法，所得之地性線是否周延仍有待探討。因為，由離散點產生不規則三角網時，以地性線加以約制，所產生之約制不規則三角網為描述較精確之地形模型。因此，由不規則三角網結構萃取水系時，應增加重組三角形之機制。

關鍵字：流水線、集水區、空間內插

## Abstract

This study investigates how to extract linear features from the airborne lidar point cloud, and its application in the grid DEM generation. From experiments, the grid DEM generated with different spatial interpolation schemes has different features. The drainage networks extracted from the DEM of different interpolation schemes are different as well. According to the product definition, the level three airborne lidar

product should meet the accuracy of 99%. However, this is for the classification. That is, 99% of the points classified as terrain surface should be terrain points. The other 1% may be points on the surface. Level 3 does not meet the common requirement of DEM. The characteristic lines should be included in the interpolation to make sure that the DEM fits the real terrain well. This belongs to level four. Traditionally, the ridge and valley lines are extracted manually from stereo-model. In the lidar production, this can be implemented by generating Inferred Stereo Pair, and then use photogrammetric workshop for the compilation. There are algorithms to extract drainage network and watershed boundary from grid DEM. But, there are logic problem is using these schemes if the original data is in the scattered point format. This study investigates the possibility of extracting the ridge and valley from scattered points. The algorithms based on Triangulated Irregular Network are applied. From experiments, it is confirmed that the constrains from linear features are useful and significant in generating DEM. And, it is feasible to generate drainage network from TIN data structure. However, the existing algorithms needed further improvement. Because for a good TIN representation of terrain, the linear constrain should be included already. That is, constrained TIN, which is constrained with the linear features, would be a better representation. Therefore, the scheme of re-constructing the triangles should be a part of the drainage network extraction algorithm.

Keywords: drainage network, watershed, spatial interpolation

## 二、前言

### 2-1 研究動機及目的

空載光達點雲點數量大，以原始觀測點雲而言，其密度尚稱均勻。但是以地面點而言，其分佈受地面覆蓋種類影響，變化甚大。數值高程模型之格式，包含有規則網格、不規則三角網、及等高線三種方式。由空載光達獲得者為離散點格式，無論是產出規則網格、不規則三角網、或等高線格式之數值高程模型，均需進行空間內插。

空間內插，基本上是以已知點求取未知點。就內插方法分類，依取樣資料之方式可分為全區域內插 (Global Interpolation) 與區域內插 (Local interpolation)，前者由全區之已知點決定內插之函數面，後者則僅進行區域性之取樣；依同位置之推估值與已知值是否相同，可分為精確內插 (Exact Interpolation) 與非精確內插 (Inexact Interpolation)，前者已知點上內插後之值與已知值必須相同，而後者則否；依是否提供預估變方產生預估誤差，則可分為隨機性內插 (Stochastic Interpolation) 與確定性內插 (Deterministic Interpolation) (Chang, 2008)。

在應用於地形之空間內插方法中，以距離為權倒數之移動平均法、不規則三

角網法、克利金法 (Kriging) 法、最小區率法(Minimum Curvature)、為最常用之內插模式。其中，以距離為權倒數之移動平均法，常用以距離之平方為權倒數，但是何者為最佳、如何選取樣點、等均為不易選取之處。不規則三角網法常用者包含線性內插法、亦即以三角形為一斜面進行內插，亦有使用區域性雲線(Spline)者，或自然鄰居法(Nature Neighbor)。克利金法為區域性、精確性、與隨機性之地理統計內插方法，建立在半變異數理論基礎上，在描述區域變量上有一定的連續性。克利金法為線性組合的權觀測值，期望誤差值等於零，變異數為最小值，稱作最佳線性不偏推估 (Best Linear Unbiased Estimator) (Caruso & Quarta, 1998)。基於此種方法進行內插，不僅考慮待預測點與鄰近點數據的空間距離關係，還考慮各參與預測樣點之間的位置關係，充份利用各樣點數據的空間分佈結構特徵，使推估結果較精確 (劉湘南等，2007)。最小區率法為一種雲線法，可以為精確內插亦可為非精確內插。上述各種方法均有其優劣之處，但是對地形內插而言，均難於單獨由離散點產生理想之地形模型。地性線與地形點，為理想地形模型所必須。地形點主要為區域最高點與最低點，如山峰與低地；地性線則包含稜線、谷線、等高線。本研究探討如何由離散點雲中產生地性線中之稜線與谷線。谷線亦為流水網路線。此外，房區在移除地形上之人工建物後，其位置並無任何量測點，若一體參與內插，往往有不合理之情形產生。因此，是否應於房屋建物處以其邊界為限，不進行內插？如是，則建物邊界亦為地性線之一種。

觀察空載光達離散點資料，線型特徵為隱含，包括自然地性線(山脊和水系)及人工建物線(道路和房屋)。光達點雲分布不均導致分布密度較低地區，無法獲得有效及正確之資訊，影響數值高程模型成果，或於地形高程變化區域，點雲分布無法表現真實地表特徵。為降低內插成果與真實地表差異影響，利用地性線(自然地性線及人工建物線)進行線性約制內插，使數值高程模型成果較符合真實地貌，進而減少內插錯誤之影響。

擷取河川水系網路之方法有多種，大多以網格式資料儲存格式之地形模型為演算法規劃。就流向之選擇而言，包含有單流向、多流向、無限流等方法。網格式資料利用特定解析度之網格式儲存地形，解析度大小影響網格式資料精度。資料來源為不規則分佈之空間點位時，水系網路擷取受內插影響。

不規則三角網擁有明確的數學地形模型，為連續地表模型，由一群不規則分布點組成互不重疊的三角形集合，區域內水流能夠任意流動。一般最常見之不規則三角網為 Delaunay 三角網，在沒有退化情況下，三角網具有唯一性。本研究使用此法組成不規則三角網，撰寫程式，以不規則三角網演算法擷取水系網路。另外使用商業軟體進行水系擷取，分析比較所獲成果。

## 2-2 文獻回顧

由點雲中萃取線形，依其應用目的可大分為匹配與平差、城市塑模、地形分析。Briese (2004)、Habib et al (2005)、Jaw and Chuang (2008)，均為以匹配與平差為目的，而萃取線形者。由於應用之目的不同，該類之線形多不具地形意義，

故以後兩類現有文獻，概要回顧如下。

### 房屋區塊萃取

賴彥中(2004)將房屋區塊附近之光達點雲切割出後，組成不規則三角網。以每個三角形為單位，設定三判斷準則：(1) 三角形頂點之最高與最低點差值小於某門檻值。(2) 三角網頂點必須位於房屋區塊以及設定之房屋區塊緩衝區內。(3) 三角形頂點必須高於地表所設定門檻之上。通過準則之三角形頂點，即為具有屋頂平面特性之光達點雲。

郭志奕(2005)使用空載光達點雲配合大比例尺向量圖，提出一套萃取建物點雲之方法。首先利用點於多邊內(point in polygon)之技術，判斷光達點是否位於建物輪廓線內。由於在建物輪廓線周圍可能有非建物點雲，故採內縮建物之輪廓線，以群聚法自動萃取建物屋頂面光達點雲，而位於建物輪廓線內之非建物屋頂面點雲亦能剔除。

羅詔元(2007)藉由整合空載光達點雲資料和二維路網，自動重建三維道路模型。以二維路網萃取光達點雲，再用道路中心線折點為圓心；路寬為半徑開圓形搜尋區，自動判別受非路面光達點雲干擾程度，決定使用面擬合或選取局部最低高程點求解中心線的高程值，並採用線擬合處理使路段內部平滑化，產生各路段初始道路模型。為使各路網連接處能夠符合連續條件，提出區域路網高程平差，使路網節點高程一致且坡度與坡度差均連續，進而產生精確三維道路模型。

謝淳彥(2008)提出以自動方式萃取連結長方體主平面上之空載光達點雲。將空載光達點雲之最後回訊三維坐標內插成為網格化影像，採 GD(Geodesic Dilation)法及區域成長法等影像處理技術，篩選出最合適之長方體建物，再利用投影方式萃取長方體連結體主平面上之光達點雲。

### 水系擷取

數值高程模型常發生假的窪陷(pit)，無論是真實或假之窪陷，均有礙於流水方向之確定。傳統消除方法為將窪陷地區高程逐步填滿，和鄰近區域最低高程相同。這種方法產生許多平坦地區，容易擷取錯誤流向。Grimaldi(2007)使用一個關於地貌上連續性質公式去除窪陷區域，利用簡單的地形參數模型消除窪陷。Grimaldi(2007)所提方法與傳統方法比較，可獲得更真實坡度及流向。

Colombo(2007)使用歐洲平面解析度 205m 之 DEM，驗證所擬之提取河川網絡和集水區邊界演算法。此演算法建立在數學形態學和地形參數。地形參數受到地表起伏影響，造成擷取河川密度不同。流向網格計算時，使用有效率的演算法消除假的窪陷。河川網絡設定最小集流區域門檻值，形成和維持河道。Colombo(2007)所得成果和其他來源資料獲得水系網絡比較，證明研究成果具合理性。

Jana(2007)使用 DEM 推論集水區可獲得陸地水流向、水流累積及任一點集流面積。DEM 的解析度和品質決定集水區參數達到何種程度正確性。不適當的高程資料藉由內插過程更加惡化 DEM 品質，造成窪陷或平坦地區產生，流向流入錯誤地區。為了解決問題，Jana(2007)提出一個 CBRGM 演算法萃取離散河川

線型特徵(解析度：20m)。另外使用1/150000地形圖獲得等高線資訊及計算坡度和網格式水系擷取演算法輔助流向符合河道所在位置。研究成果顯示，使用CBRGM演算法加上等高線和河道資訊確實更有效描述地形起伏，對水系擷取有很大的幫助。擷取出水系網絡和衛星影像(解析度：23.5m)擷取水系網絡相符，證明此方法萃取河川網絡具備優勢。

大部分在GIS使用水文模式適合陡峭的地形，對於平坦地無法有較佳的成果。Mackay(2000)提出一個自動計算數值高程模型流向、上流集水面積和集水區參數演算法，演算法包括廣先搜尋和整體最佳化(global optimization)萃取數值高程資料內資訊。研究成果顯示Mackay(2000)所提方法對氾濫平原、湖泊及其他平坦地形水文參數獲得良好，不需要太多經驗法則。Mackay(1998)最重要的貢獻是發展一套使用中解析度數值高程資料萃取高程差異較大和異質地區集水區的水文模式。利用遙測影像將湖泊分類出來，及利用現有DEM計算坡度，設定門檻值，定義出研究區內湖泊及非湖泊之平坦地區。接著將這些資訊協助流向及集水區搜尋，非湖泊的平坦地區對流向和集水區的搜尋也有幫助。這個結合特徵和網格式搜尋流向及集水區的方法，對湖泊或平坦地區有顯著的效果。

### 2-3 研究方法

本研究以網格式水系擷取成果，驗證不規則三角網水系擷取演算法之可行性，採用SRTM三維離散點數據。本部分著重在不規則三角網演算法參數設定及可行性，因此使用之SRTM雖為格網式數據，但是以不規則三角網法建構數據格式，將三維離散點組成不規則三角網，進行水系網路擷取，探討以不規則三角網擷取水系之演算法設計與其參數。所獲得不規則三角網水系成果和網格式資料水系成果進行比較分析。

然後，探討離散點以不同內插方法和不同解析度組成網格式資料時，對水系擷取成果之影響。了解不同內插方法對水系擷取成果影響。擷取水系網絡成果進行套疊分析比較。使用Optech提供ALTM多倫多地區測試空載光達點雲三維離散點，分別以網格式、不規則三角網演算法擷取水系。

## 三、流向方法介紹

### 1.網格式流向方法

流向是產生河川水系網路的重要步驟，圖1為於網格式資料河川水系網路擷取方法中流向決定方法之整理。最常用的演算法有六種，包括：D8(O'Callaghan and Mark, 1984)、Rho8(Fairfield and Leymarie, 1991)、Lea(Lea, 1992)、DEMON(Costa-Cabral and Burges, 1994)、與D-infinity(Tarboton, 1997)等。D8法由於計算量小、效率較高，對凹地、平坦區域均有處理能力而應用較為廣泛，例如：Idrisi軟體之RUNOFF algorithm乃採Jenson and Domingue(1988)方法，此法仍以D8流向法作為決定流向的基礎。其他像GRASS執行r.watershed以產生水系網路之前所進行之窪陷填平r.fill.dir內亦以D8流向法作為決定流向的基礎。

Tarboton(1997)認為在計算集流面積時，因盡量避免流域面積的發散現象，提出Dinf無限流向法，以整合單流向與多流向的優點。基本上，每種演算法都有其優點，各種方法希望達成的主要目標包括（Tarboton, 1997）：

- (1) 減少或避免河川網路交錯或發散
- (2) 減少流向誤判或數學演算之誤差
- (3) 增加流向預測之準確度
- (4) 增加運算效率，降低運算與儲存空間之負擔
- (5) 減少因網格解析度或地形區不同所產生之成果的差異

本研究使用D8流向法(O'Callaghan和Mark, 1984)與Dinf流向法(Tarboton, 1997)之網格式流向法。D8流向法是單流向演算法，該流向法由於計算簡單；效率較高及對凹地、平坦區域有較佳的處理能力而應用較為廣泛(Tarboton, 1997)。其乃將3×3的移動視窗中，周圍八個網格的具有最陡坡降視為中心網格水流的流向。再依據水流方向，計算每一網格上游累積流量，將累積流量設定門檻值擷取水系。D8流向法只能有E、NE、N、NW、W、SW、S和SW八種結果，如圖2所示。所以當坡面並不是剛好朝著這八個方向時，會導致錯誤的坡向判斷。結果以此法所推算的水系圖，經常呈現許多平行狀的不自然流線，並造成集流面積推算上的錯誤。D8流向法流程為：

1. 決定出數值高程模型每一網格點流向，產生流向矩陣；
2. 根據流向矩陣，求得每一網格點累積流量。計算時須加入距離權重，對角線網格\* $1/\sqrt{2}$ 之權重。迭代計算至研究區域內所有網格點完成計算，產生累積流量矩陣；
3. 選定累積流量門檻值，畫出河流網絡。

Dinf 流向法主要是修正傳統多流向法在分流的觀念，綜合單流向法與多流向法。認為分配流向的標準時，僅需考慮最陡地形面，而將此地形面以角度的方式表示，在分配流向的準則上則以流向的角度與最近的兩格點作為流出的方向，如圖3所示。其流程如下：

1. 在數值高程模型上以3\*3移動視窗搜尋整個研究區，找尋出移動視窗九個網格的中心點高程
2. 連接九個高程點，以中心網格高程點為中心，切割成八個三角形平面
3. 八個三角形各自擁有一通過移動視窗中心點之最陡坡降方向線，各方向線擁有一方向向量，比較八個平面的最陡坡度，其方向向量即為3\*3移動視窗之中心網格的水流流向。這樣運算的優點為每個網格紀錄一筆0至 $2\pi$ 間之流向，節省計算時間。
4. 流向確定後，每個網格皆假設有一個單位高度的水量，根據圖3分流式， $\alpha_1/\alpha_1+\alpha_2$ 的機率該中心網格水流會流入網格4； $\alpha_2/\alpha_1+\alpha_2$ 的機率該中心網格水流會流入網格3。可將其水流依據此比例分流至兩鄰近網格中。經過迭代計算可將整個研究區之累積流量計算出來。

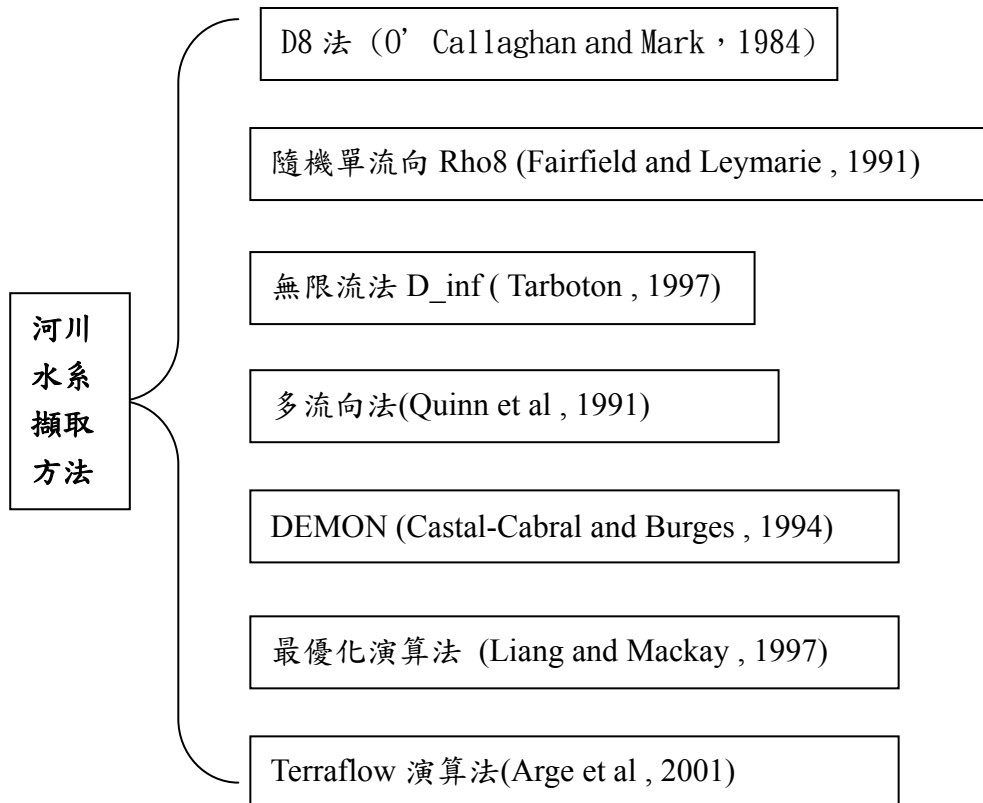


圖 1 網格式資料河川水系網路擷取方法

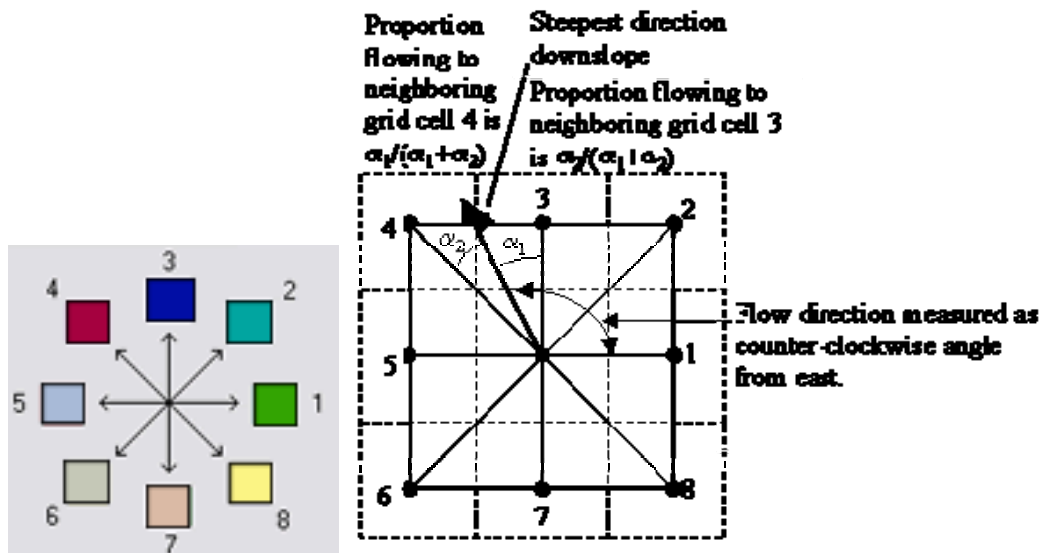


圖 2 D8 流向法

圖 3 Dinf 流向法

## 2. 不規則三角網水系擷取演算法

Liu and Snoeyink (2004) 提出不規則三角網水系擷取演算法流程，其流程為：

1. 以最陡坡降法尋找每個三角形之流向。
2. 每個三角形流向進行追蹤連接，獲得研究區內水系之網路。

3. 計算流域、水流溢出點及起始的流域階層。
4. 起始的流域階層內存在假的水系，它們是凹陷的地區，導致水流流經此處後，水流不再往其他點位流出。必須計算流域內各個流向是否屬於假的水系，是否具有代表性，真實符合地表水流方向。
5. 依續連接各個三角形流向，建立不規則三角網累積流量矩陣，矩陣即為研究區水系階層。簡化流域階層，獲得研究區域內主要水系網路。簡化過程須符合研究區地形起伏，不得任意刪除點位。

本研究依據 Liu and Snoeyink (2004)演算法流程，發展出一套不規則三角網水系擷取演算法，流程如圖 9 所示，分別對各步驟描述如下。

### 1.組 TIN

將 SRTM 數值高程模型 x,y 坐標讀入程式，組成 Delaunay 三角網。

### 2.建立位相關係

建立不規則三角網空間相位關係，將點位包含的三角形編號製成矩陣，如表 1 及表 2 所示。

表 1 紀錄各三角形內三個頂點矩陣

三角形編號	點位 I	點位 II	點位 III
1	254	352	2

表 2 紀錄各三角形每邊鄰接三角形矩陣

三角形編號	鄰接三角形 I	鄰接三角形 II	鄰接三角形 III
1	254	3	45

### 3.判斷 pit 和 peak，及平坦三角形

將 SRTM 各點高程值輸入，分別將各點和周圍鄰近點比較，分辨此點位高程值是否為局部最大值或最小值，局部最大值高程點代表集水區邊界(peak)；局部最小值高程點代表水流集流的位置(pit)。三角形三個頂點高程值相同，視為平坦三角形。

凹陷地與窪地處理與修正方式

#### 1.高程平滑化法 (O'Callaghan and Mark, 1984)：

利用 3\*3 的平滑加權矩陣，重覆平滑窪地高程直到窪地高程消失為止。

#### 2.直接填高法(Jenson and Domingue, 1998)

填高窪地與鄰近網格中高程最低之網格相同。

#### 3.逐步填高法(Martz and Garbrecht, 1999)

依平坦地區之週遭地形高低，以不同程度之逐步填高方式來模擬排水方向(莊永忠, 2004)。

### 4.流向定義

以三角形邊界為流向作為約制條件，流向方向利用最陡坡降法求得，將每個三角形之流向定義出來。



平坦三角形由於三個端點高程值相同，流向無法以最陡坡降法求得，需利用特殊定義方法。流向定義方法如圖 4 及圖 5 所示，紅色叉表示平坦三角形記號。圖 4 為有流向流入口和流出口之平坦三角形，流向定義簡單，直接將流入口及流出口定義為平坦三角形流向起點和終點。圖 5 為有流向流入口或流出口之平坦三角形，另外兩邊鄰接三角形也是平坦三角形，流向定義不易。三角形流向判定由鄰接具流向之三角形決定，判斷鄰接三角形流向和平坦三角形相交端點是流入或流出，以非鄰接邊端點與鄰接三角形流向端點和平坦三角形相交端點連接，確認平坦三角形流向。

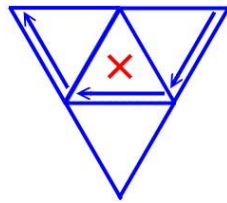


圖 4 平坦三角形流向定義(有流向流入口和流出口之平坦三角形)

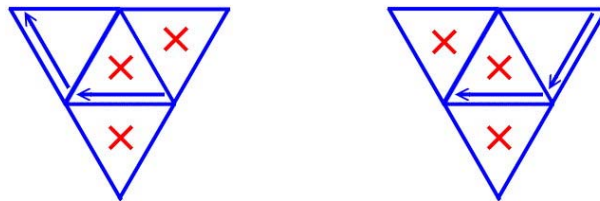


圖 5 平坦三角形流向定義(有流向流入口或流出口之平坦三角形)

### 5. 流向連接

連接各個三角形之流向，看是否有流向不連接之三角形。相鄰三角形流向連接共有五種情況，鄰接三角形流向相同、流向頭尾相連、流向聚合、流向分岐及流向無鄰接三角形(邊界三角形)，如圖 6 所示。其中流向無鄰接三角形表示三角形位處研究區邊界，鄰接三角形無流向。



圖 6 流向相同

流向頭尾相連

流向聚合

流向分岐

## 6. ridge 和 channel 判別

利用最陡坡降法所得之流向連接後，鄰接三角形流向相同可能為山脊或是水系，如圖 7 所示。經過 orientation 判別，將山脊線分辨出來剔除，獲得正確流向。避免水系不連接錯誤。

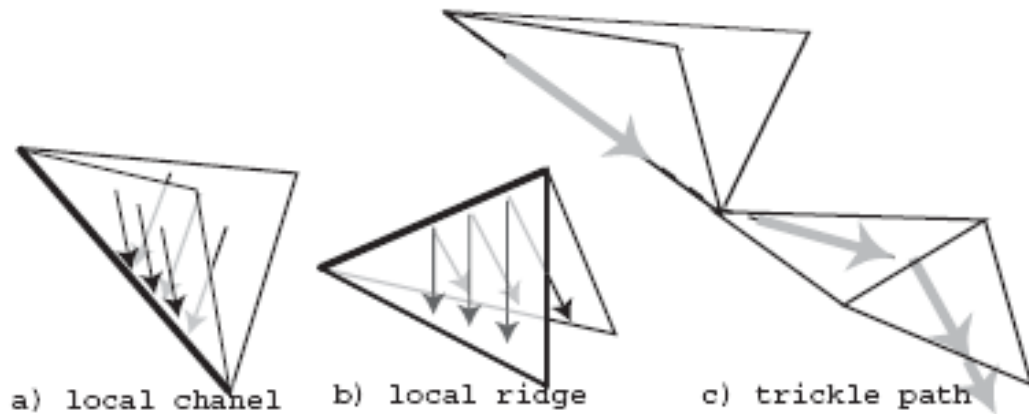


圖 7 ridge 及 channel 示意圖(Liu and Snoeyink, 2004)

## 7. 水系階層建立及簡化

本研究獲得各三角形流向非常雜亂繁瑣，必須剔除細小支流獲得具有代表性水系網絡。本研究以研究區內 peak 點(局部高程最大值)作為起點，依續連接各個三角形流向，建立不規則三角網累積流量矩陣，矩陣即為研究區水系階層。流向連接正確後，設立三角形門檻值，門檻值設定使用試誤法決定，目視法確定流向正確連接即為最佳門檻值。門檻值設定可將研究區域內細小支流剔除，水系階層簡化，研究區水系網絡具有代表性。

## 8. 輸出成果展示

將所得流向成果輸出，本研究使用 AutoCAD 軟體展繪不規則三角網水系擷取圖。程式需要輸出流向起點(x,y)座標值、流向終點(x,y)座標值及線段起點終點設定值(Lcode)，將水系擷取成果經由 AutoCAD 軟體展繪。

表 3 AutoCAD 輸入格式

1.基本上格式 Pt Lcode XYZ 以逗號隔開
2. Lcode:0 單點 Lcode: 1 線起點 Lcode: 2 線內點 Lcode: 3 線終點 Lcode: 4 線終點並與起點連接封閉
3.Pt 僅是註記使用,配合 Lcode (0,1)註記於圖面

#### 四、研究流程與研究材料

本研究使用 SRTM 及 ALTM 空載光達點雲離散點。SRTM 數據進行不規則三角網水系擷取演算法參數設定探討，所獲成果與規則網格水系擷取成果進行比較分析。ALTM 空載光達點雲離散點除使用規則網格和不規則三角網演算法擷取水系成果外，使用 Bentley 公司 PowerCivil 軟體進行水系擷取，三者進行比較分析。

SRTM 的 DTM 檔案格式為 .hgt，利用 MicroDEM 8.01 版軟體進行轉檔，將 .hgt 轉成 ASCIIxyz 的資料。SRTM 的坐標是形狀基準為 WGS84 之球面坐標 ( $\phi, \lambda, h$ )，必須將它們轉換為 TWD97 坐標系統，本研究將 SRTM 之 ASCII 檔案使用 proj.4 軟體進行地圖投影，將 ASCII 資料內的球面坐標轉換至 TWD97 之平面方格坐標系統。

本研究首先進行網格式資料之水系擷取，流程如圖 8 所示。將 SRTM DTM 的 ASCIIxyz 檔案讀入至 ArcGIS9.0(ESRI, 2005)產品之 ArcMAP 內，生成 TIN，利用 TIN 轉換成網格式資料。得到網格式資料後，使用 TauDEM 軟體，外掛於 ArcGIS9.0 版上，進行集水區邊界的萃取和流域內流向確定。TauDEM 處理 DEM 程序，如圖 8 所示。必須將 DEM 作窪陷填平，改善 DEM 中雜訊，確定 DEM 內網格點不會有不正常之匯流。TauDEM 使用兩種方法決定流向，一個是 D8 流向法；另一個為 Dinf 流向法。獲得兩種流向法成果後，給定面積門檻值，參考魏世青 (2005)，面積門檻定為 100，得到水系和集水區位置。

不規則三角網水系網路擷取演算法使用 Matlab 軟體進程式編寫，流程如圖 9 所示。將 SRTM ASCIIxyz 經由窪陷填平處理後檔案讀入，組成 Delaunay 不規則三角網，建立不規則三角網位相關係。判定 SRTM 各點高程值是否為局部最大值或最小值，將 DEM 作窪陷填平，改善 DEM 中雜訊。接著利用最陡坡降法獲得各三角形之流向，各三角形原始流向進行平坦三角形和山脊線或水系判定修正。最後將流向連接，設定三角形門檻值，將水系階層簡化，剔除細小支流，得到研究區域內水系網路。

將網格式水系擷取成果與不規則三角網水系擷取成果進行分析比較，驗證不規則三角網水系擷取演算法之參數設定及可行性。

水系擷取成功後，本研究探討不同離散點內插為網格式資料內插方法對水系網路影響，使用農委會之數值高程資料，其原始平面解析度為四十公尺，以隔點選一方式疏化為八十公尺三維離散點。將離散點讀入 Surfer8.0，以移動視窗法、不規則三角網線性內插法和克利金(Kriging)法三種內插方法進行離散點內插，解析度為 80 公尺和 100 公尺，比較內插後網格式 DEM 高程差異和不同解析度對水系擷取之影響。內插所得數值高程模型使用掛載於 ArcGIS 上 TauDEM 模組，進行水系擷取，面積門檻值設為 50，所得成果進行套疊比較分析。

ALTM 空載光達測試數據與 SRTM 處理流程前面大致相同，首先將空載光達點雲離散點利用 SCOP++ 5.3 軟體內插成規則網格。規則網格檔案讀入

ArcMap，使用 TauDEM 軟體獲取研究區域水系網絡。面積門檻定為 20，得到水系和集水區位置。此外使用 PowerCivil 軟體擷取水系網絡。將三維離散點讀入後，組成不規則三角網。利用地形分析功能獲得研究區集水區邊界和水系網絡。

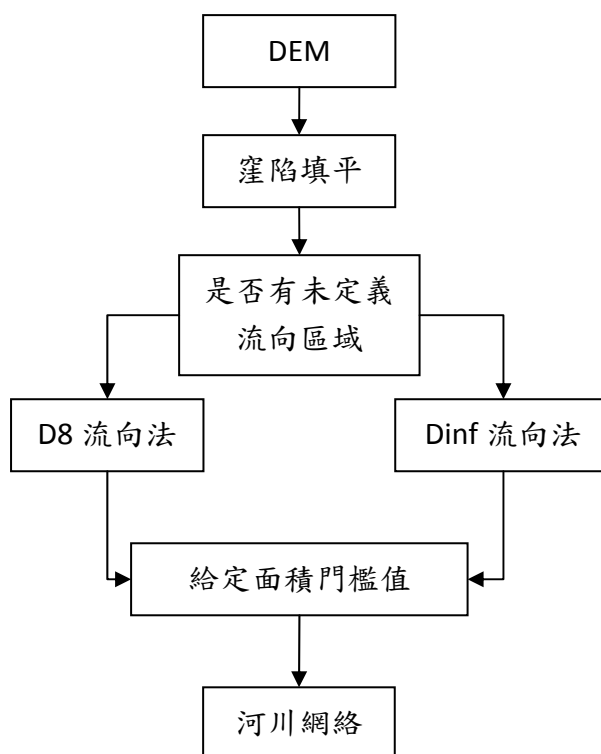


圖 8 TauDEM 流程圖

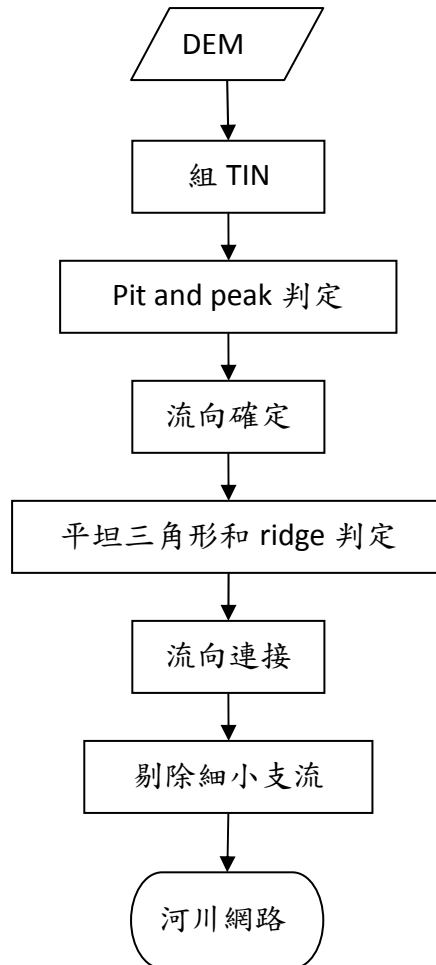


圖 9 TIN 水系擷取演算法流程圖

## 五、成果討論及分析

### 5-1 SRTM 成果

本研究使用 SRTM 數據共 104908 個點，組成 208718 個不規則三角形。圖 10 為 SRTM TIN 成果；圖 11 為網格式水系擷取成果；圖 12 為不規則三角網演算法水系擷取初始成果，整個研究區遍布水系；圖 13 為 SRTM peak 點分布位置，本研究以這些點做為流向連接及水系階層建立起始點，由 peak 點出發，建立水系階層；圖 14 為不規則三角網水系階層簡化成果，和網格式水系擷取成果作套疊分析比較差異。由圖 14 可知，研究區內主流能夠萃取出來，有些地區和網格式水系流經地區不同，但是整體趨勢很明顯。有些大片水系地區，水系階層簡化過程無法將其簡化成細小支流，待改進的地方。

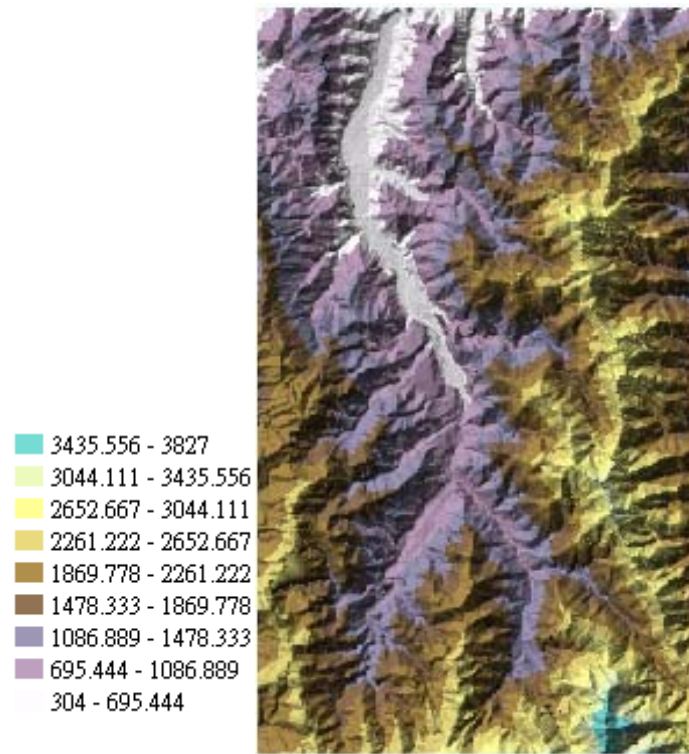


圖 10 SRTM TIN 成果

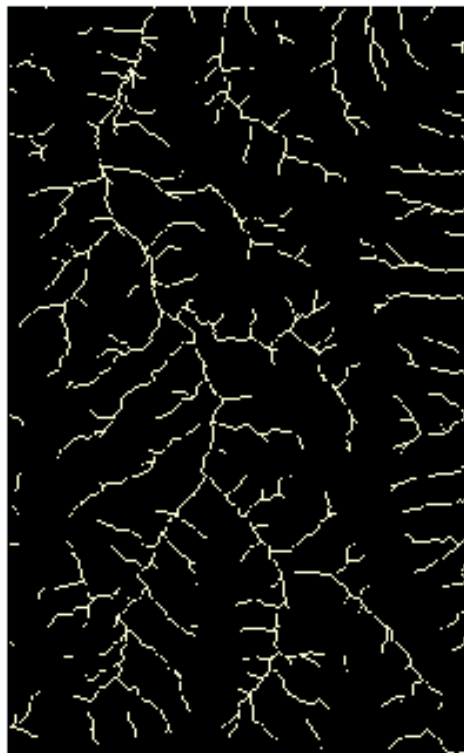


圖 11 SRTM 網格式水系擷取成果

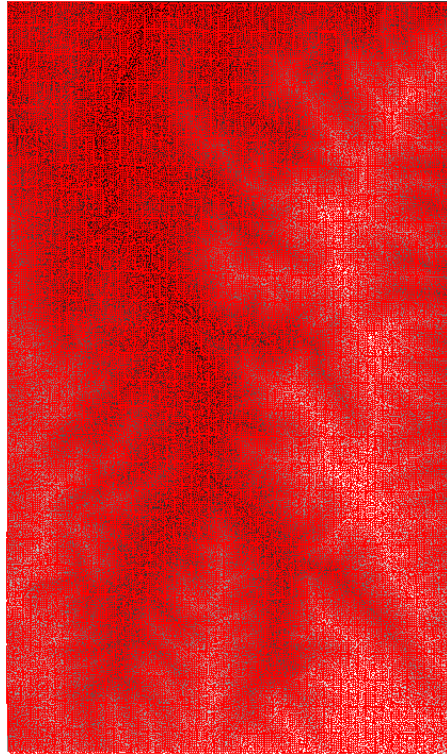


圖 12 SRTM 不規則三角網水系擷取初始成果

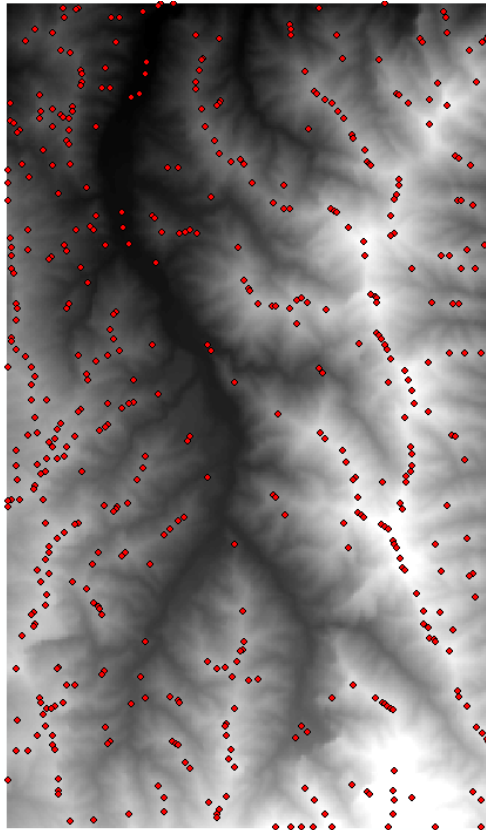


圖 13 SRTM peak 點分布位置

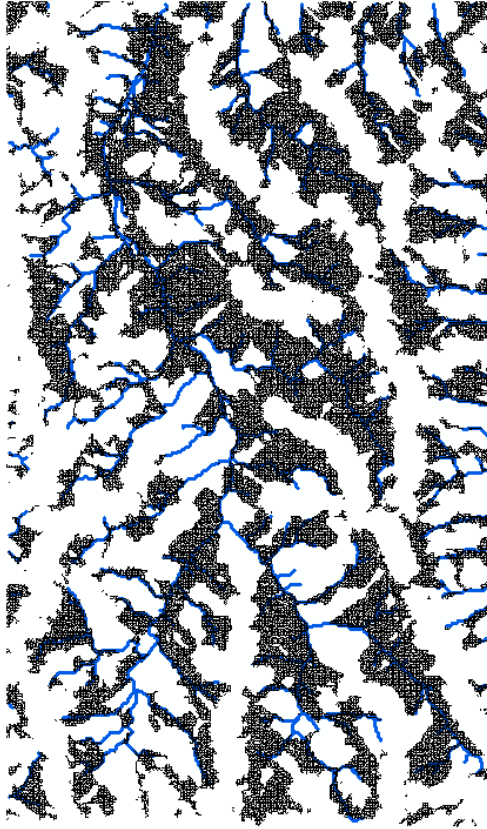


圖 14 不規則三角網水系階層簡化成果

## 5-2 不同內插方法成果比較

本研究利用農委會之數值高程資料，其原始平面解析度為四十公尺，以隔點選一方式疏化為八十公尺三維離散點。研究區域為陳有蘭溪流域一小部分，共 110375 個點。圖 15 為三種內插方法在解析度 80m 之內插成果，由圖可知，移動視窗法所得數值高程模型較平滑。圖 16 為三種內插方法在解析度 80m 下，互相相減所得高程差值，移動視窗法和其他兩種內插方法所得內插成果差異較大，達 200 公尺；而不規則三角網線性內插和克利金法高程差只有 60 公尺。圖 17 和圖 18 是解析度 100m 內插成果和高程差圖，成果和 80m 的相符，證明解析度大小不影響內插成果差異程度。

圖 19 和圖 20 是離散點經由內插所得數值高程模型，進行水系網絡擷取之成果。圖 21 和圖 22 是不同解析度下，兩種內插方法所得水系網絡進行套疊分析，可看出水系擷取差異之處。圖由左至右為移動視窗法套疊在不規則三角網之上、移動視窗法套疊在克利金法之上、克利金法套疊在不規則三角網之上。克利金法和不規則三角網較移動平均多出許多細小的支流。有些流向雖一致，但是卻流經不同區域，因此可知不同內插方法對水系擷取成果的確有影響。圖 23 是三種內插方法所得水系網絡進行套疊分析，移動視窗在最上面，水系顏色為藍色；克利金法在中，水系顏色為綠色和不規則三角網在最下面，水系顏色為紅色。左右兩張分別為不同解析度套疊成果。圖 24 是相同內插方法下，不同解析度水系網絡擷取套疊分析比較，可得知解析度不同，造成水系網絡不一致。



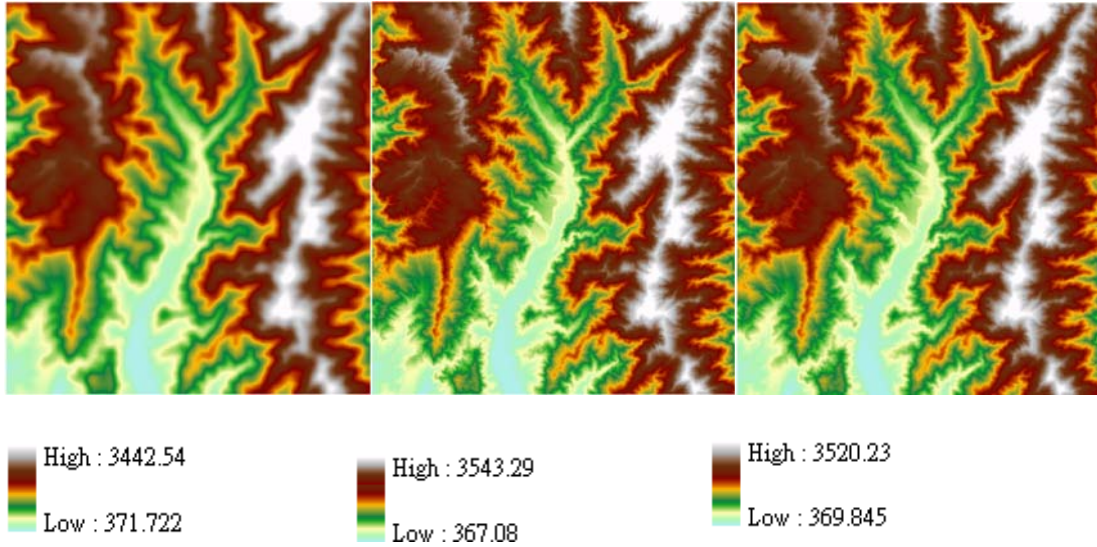


圖 15 內插成果(解析度 80m) (移動視窗法、不規則三角網、克利金)

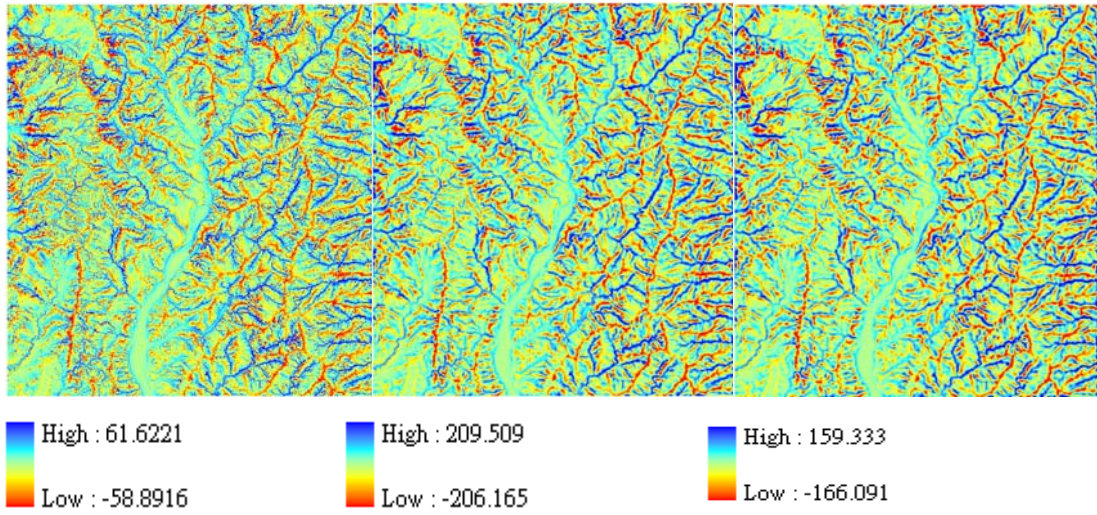


圖 16 高程差(解析度 80m)

(左至右：克利金-不規則三角網、移動視窗-不規則三角網、移動視窗-克利金)

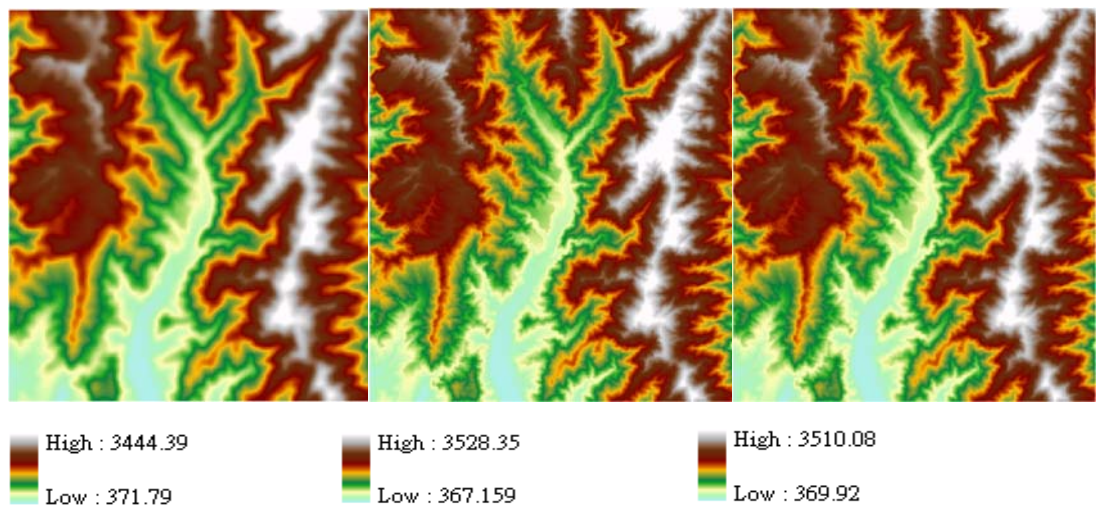


圖 17 內插成果(解析度 100m) (移動視窗法、不規則三角網、克利金)

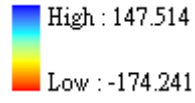
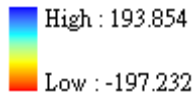
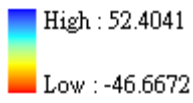
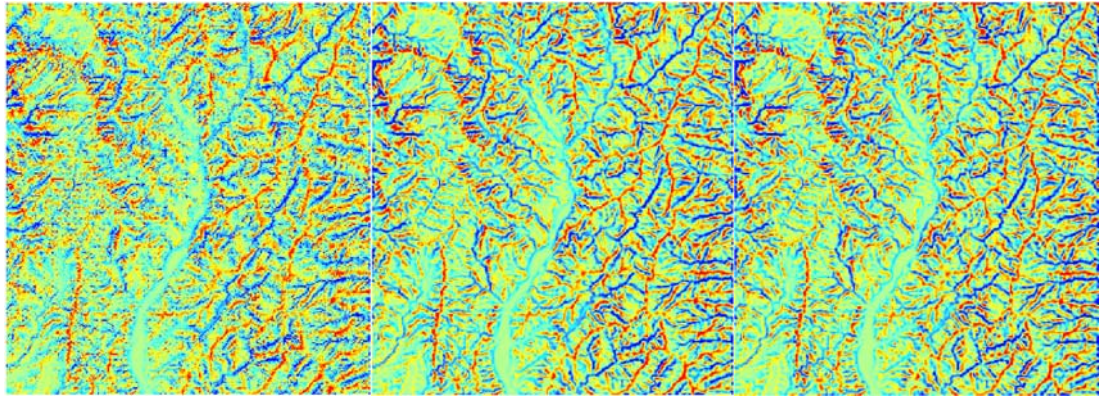


圖 18 高程差(解析度 100m)

(左至右：克利金-不規則三角網、移動視窗-不規則三角網、移動視窗-克利金)

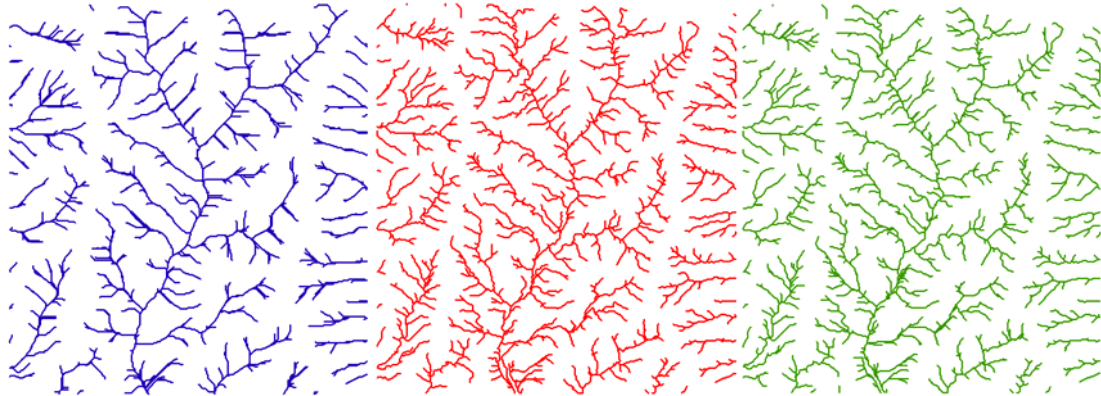


圖 19 解析度 80m 水系擷取成果(移動視窗法、不規則三角網、克利金)

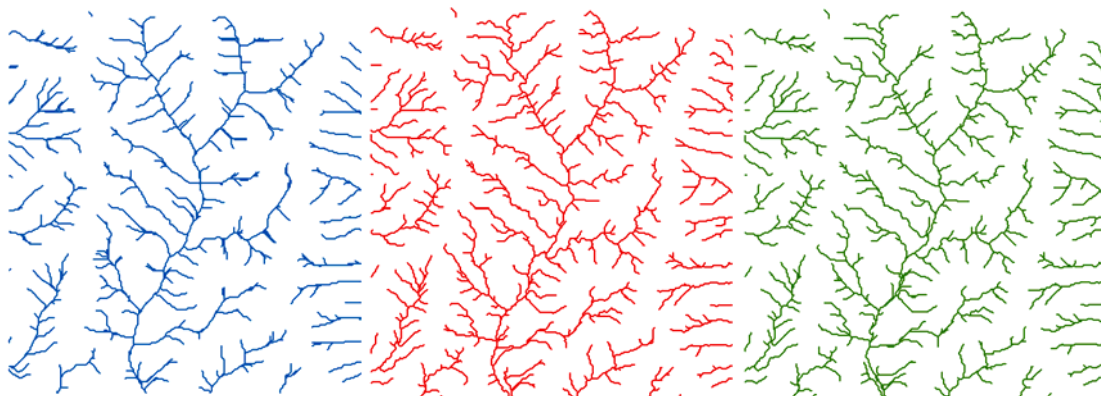


圖 20 解析度 100m 水系擷取成果(移動視窗法、不規則三角網、克利金)

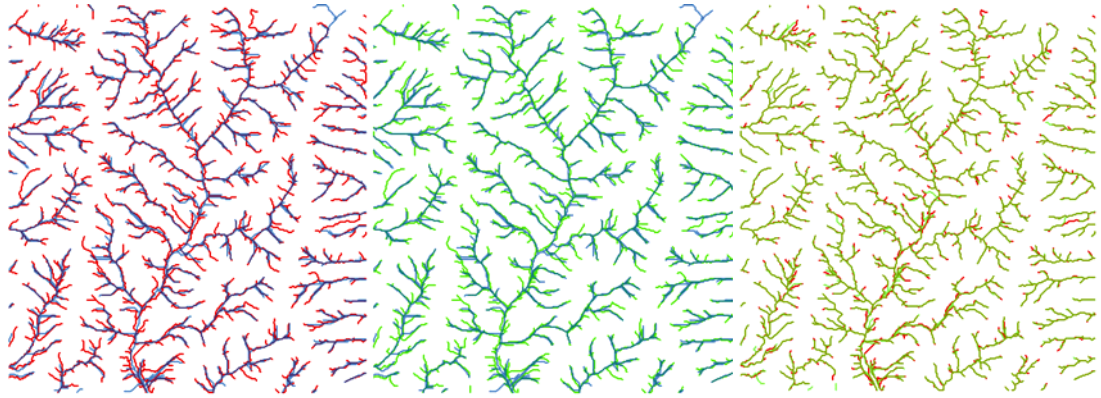


圖 21 水系套疊比較分析圖(解析度 80m)  
 (左至右：移動視窗-不規則三角網、移動視窗-克利金、克利金-不規則三角網)

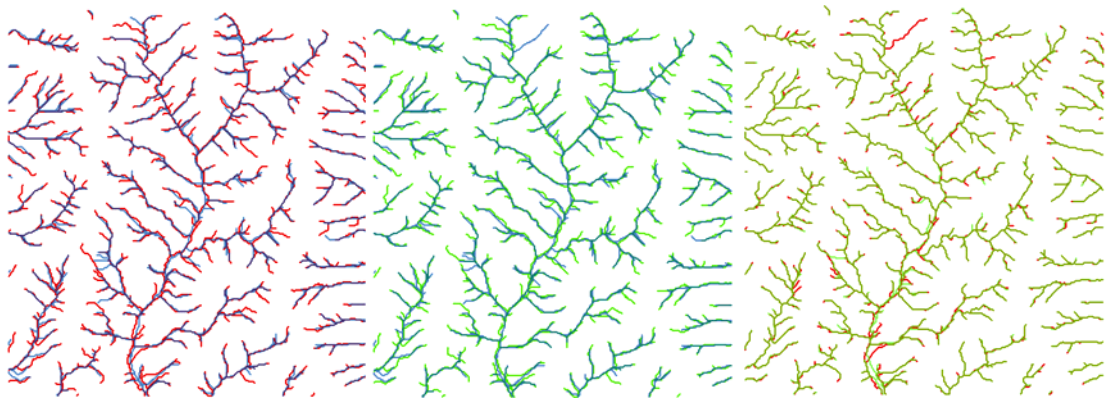


圖 22 水系套疊比較分析圖(解析度 100m)  
 (左至右：移動視窗-不規則三角網、移動視窗-克利金、克利金-不規則三角網)

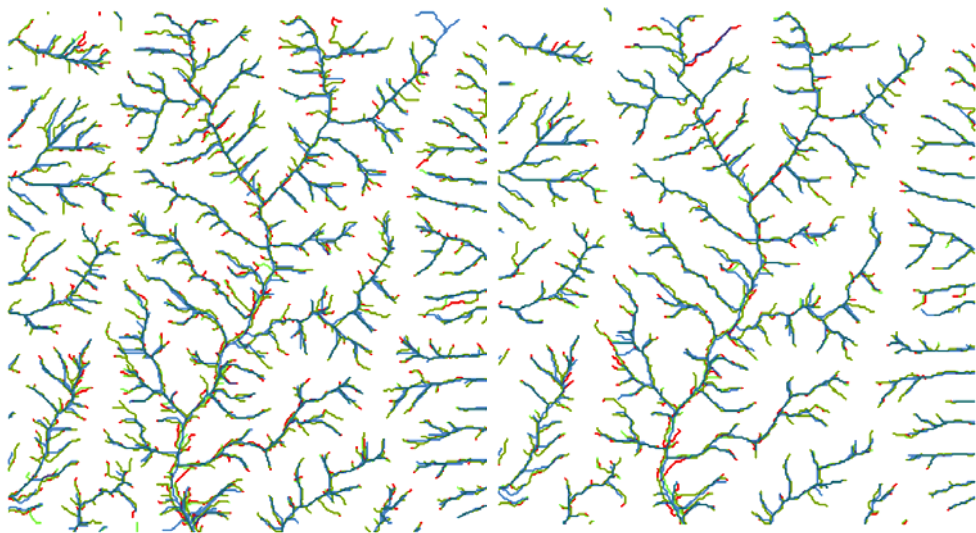


圖 23 移動視窗-克利金-不規則三角網水系套疊比較分析圖(左：80m、右：100m)

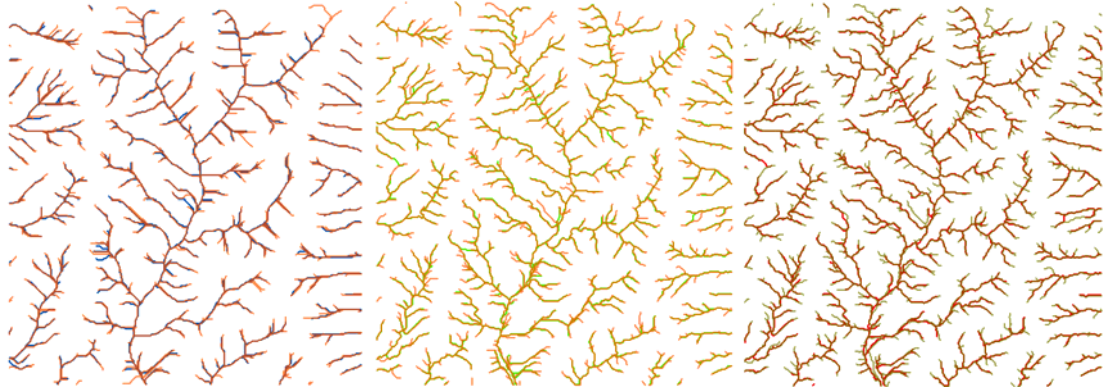


圖 24 解析度不同水系成果套疊圖(80m-100m)  
(左至右：移動視窗法、克利金法、不規則三角網)

### 5-3 ALTM 測試空載光達成果

本研究使用 ALTM 測試空載光達離散點共 864786 個點，組成 1729477 個不規則三角形。此區屬於河谷地區，河川地區點雲分布密度較低，網格解析度不能太小，導致缺漏網格過多，缺漏網格易造成水系網絡擷取困難，故解析度設為 5m。圖 25 為 ALTM 測試空載光達數值高程模型；圖 26 為 ALTM 測試空載光達網格式水系擷取成果；圖 27 為 ALTM 測試空載光達點雲以 PowerCivil 軟體獲得集水區邊界，此軟體將每個三角形之流向計算出來，獲得集水區邊界，但是它沒有進行簡化過程。

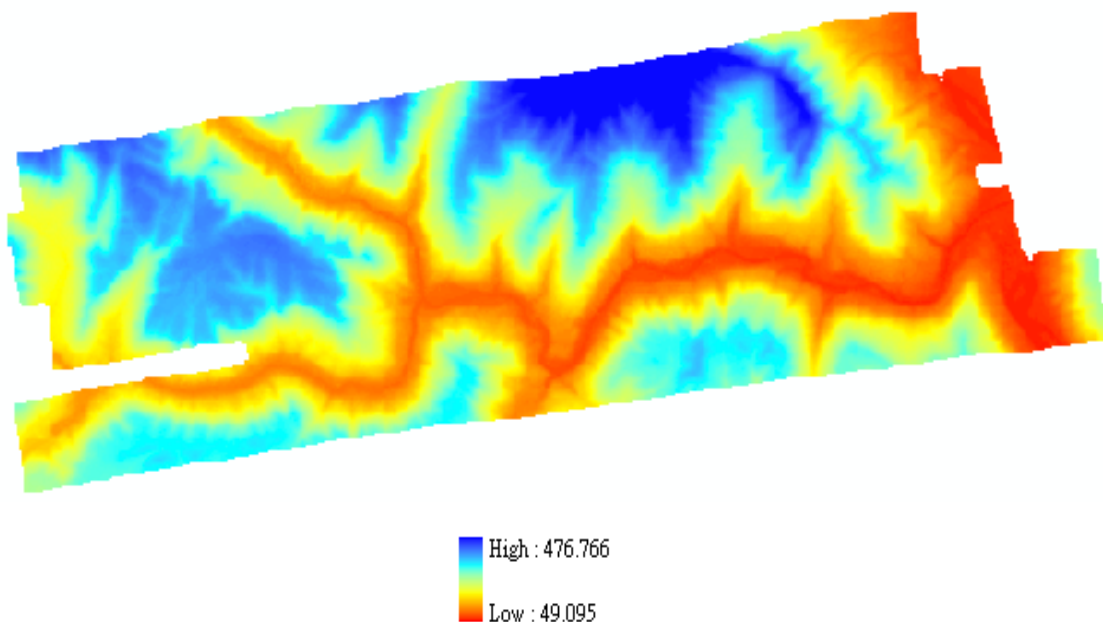


圖 25 ALTM 測試空載光達數值高程模型

圖 28 和 29 為 ALTM 測試空載光達以 PowerCivil 軟體獲得集水區邊界放大圖，圖中白色是不規則三角網、藍色是集水區邊界和紅色是三角形坡度為零的區域(即為平坦三角形)。圖 30 為 ALTM 測試空載光達點雲以 PowerCivil 軟體獲得水

系網絡，成果和集水區邊界相符，另外由放大圖可知，PowerCivil 軟體水系擷取成果，有些流向並沒有連接在一起，而是直接斷頭於某處。圖 31 和圖 32 為 ALTM 測試空載點雲光達以 PowerCivil 軟體獲得水系網絡放大圖，圖中白色是不規則三角網和藍色是集水區邊界。每個三角形水系方向不一定約制在三角形三邊上，可由三角形任一頂點往對邊流。

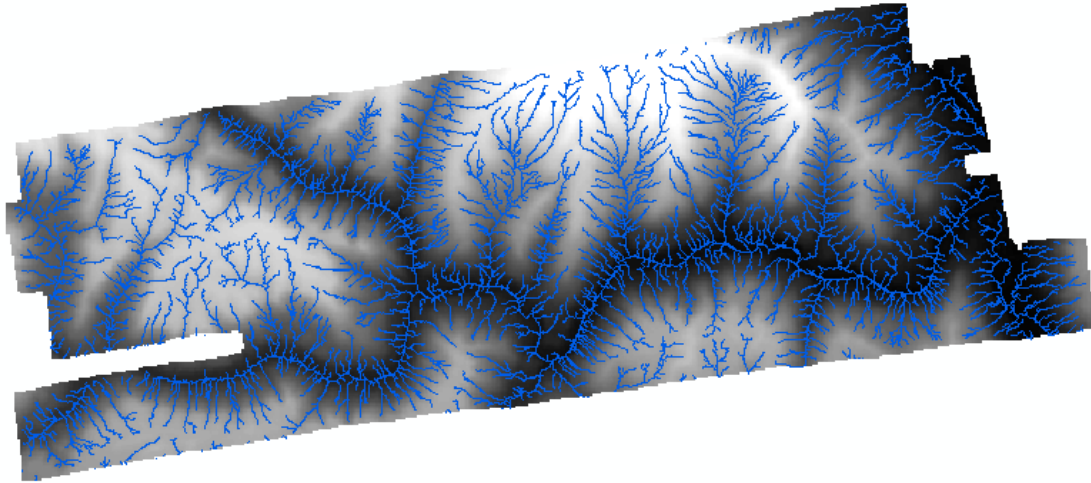


圖 26 ALTM 測試空載光達網格式水系擷取成果

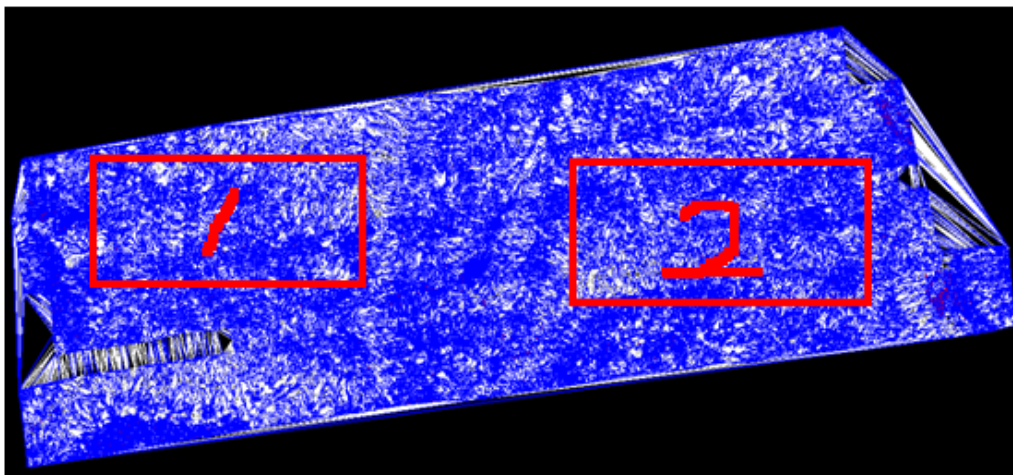


圖 27 ALTM 測試空載光達點雲以 PowerCivil 獲得集水區邊界

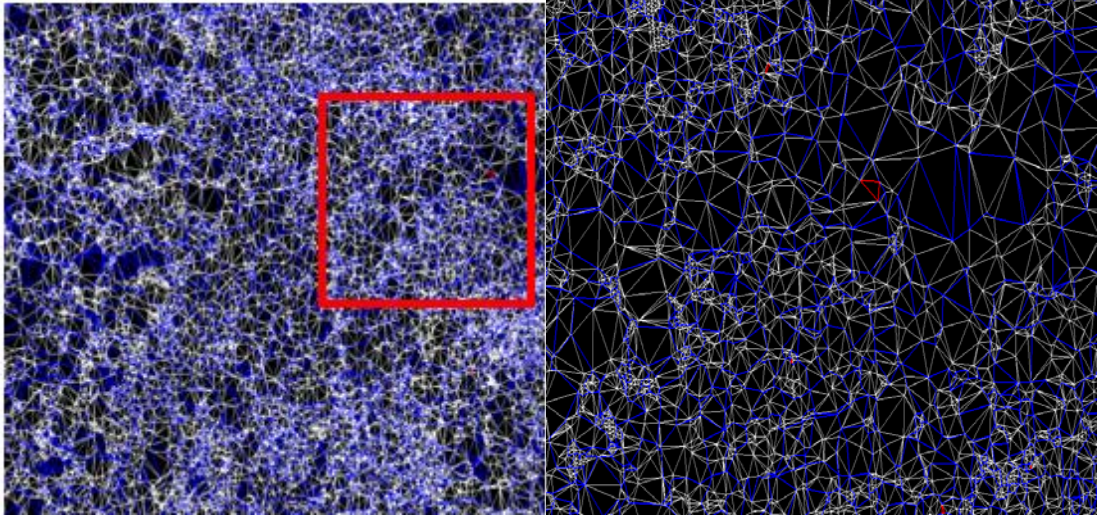


圖 28 ALTM 測試空載光達以 PowerCivil 獲得集水區邊界放大圖-1

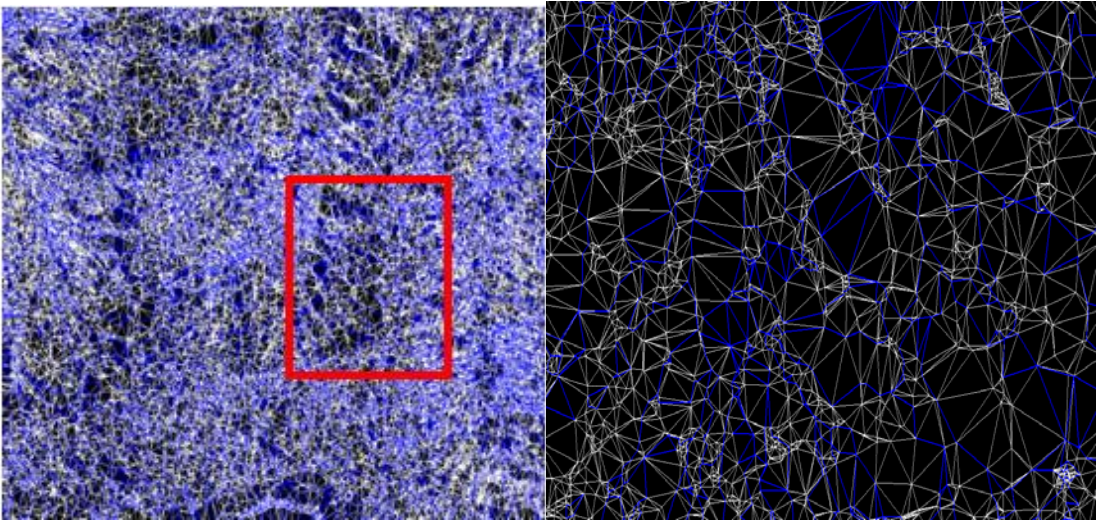


圖 29 ALTM 測試空載光達點雲以 PowerCivil 獲得集水區邊界放大圖-2

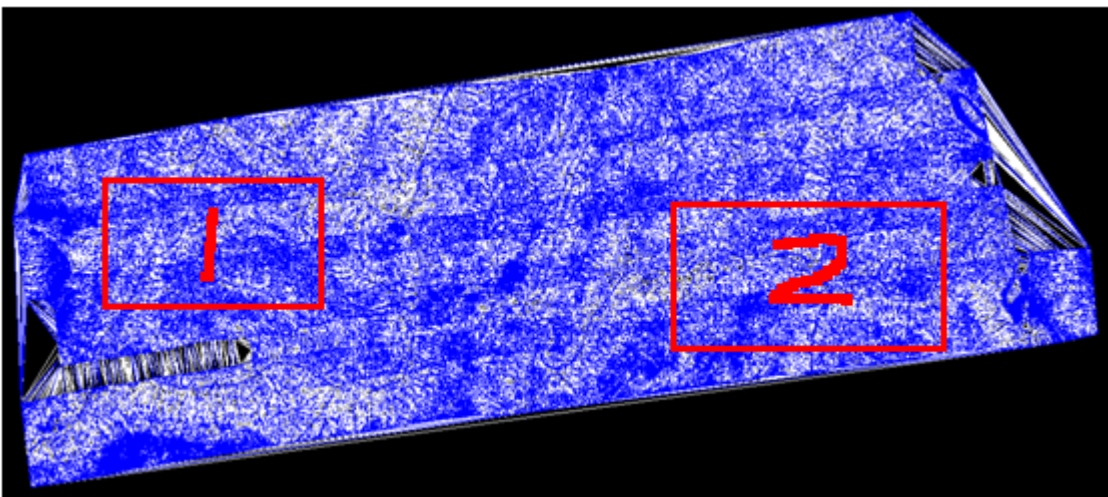


圖 30 ALTM 測試空載光達點雲以 PowerCivil 獲得水系網絡

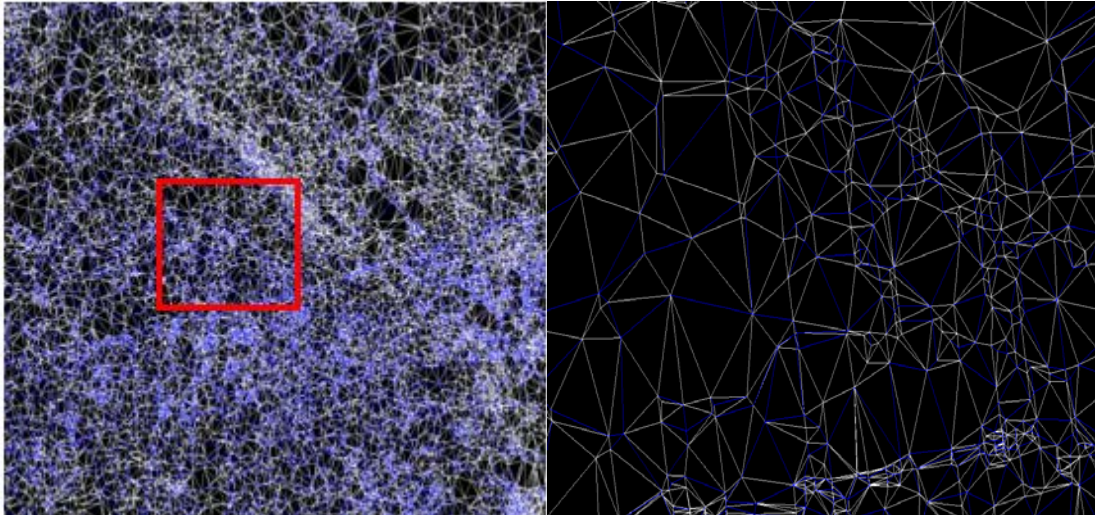


圖 31 ALTM 測試空載光達點雲以 PowerCivil 獲得水系網絡放大圖-1

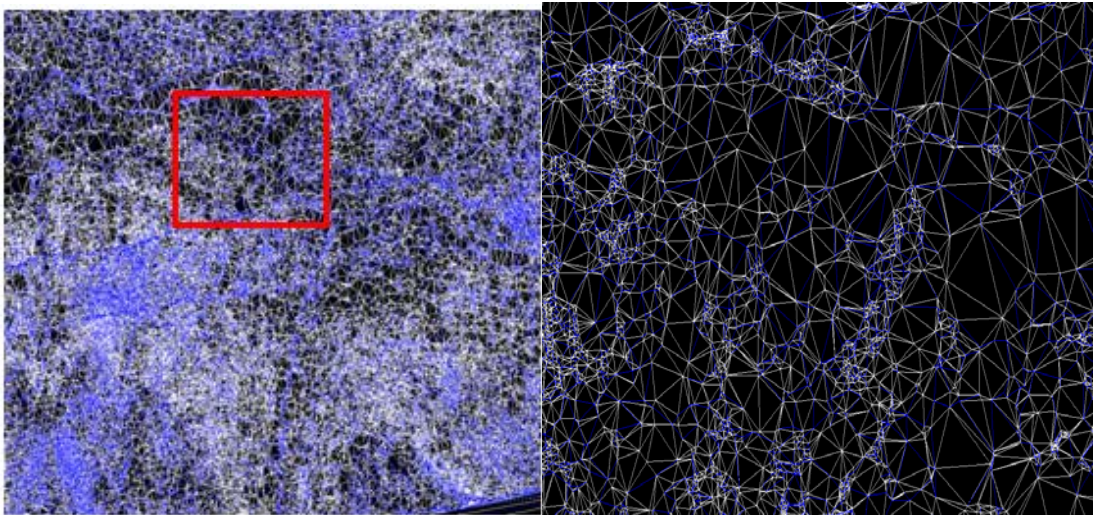


圖 32 ALTM 測試空載光達點雲以 PowerCivil 獲得水系網絡放大圖-2

## 六、結論與建議

有關不規則三角網水系擷取演算法參數設定及可行性，由成果討論發現，網格式水系網絡擷取成果良好，研究區域內水流皆能匯流。不規則三角網演算法所得成果已將研究區水系主流萃取出，只是水系階層簡化尚未完成，產生一些大範圍的水系區域。

有關內插影響部分，實驗顯示，移動視窗、不規則三角網線性內插和克利金法三種不同內插方法，進行離散點內插網格式數值高程模型，所得成果差異頗大，至少達 10m 級；甚至到 100m 級。移動視窗在陡峭地區高程易被平滑化，導致內插後成果高程起伏較為平滑。內插後數值高程模型進行水系擷取，套疊分析比較三者水系網絡之差異。移動視窗由於高程起伏較平滑，水系網絡也較另外兩種方法簡單，因此另外兩種方法與移動視窗水系擷取成果套疊，多出許多細小支流。而不規則三角網和克利金法雖然流向差不多一致，但水系流經之網格卻有所不同。不同解析度對水系擷取也會產生影響。

最後以 ALTM 測試空載光達點雲測試數據，進行水系擷取，萃取隱含於空載光達離散點雲線型特徵。使用網格式和 TIN 分別擷取水系網絡，由成果可知，PowerCivil 軟體擷取集水區邊界和水系網絡後，由於沒有作水系階層簡化，故包含太多資訊，尚有待進一步釐清萃取。

### 參考文獻

- 吳俊毅、史天元，2006。不同圖源數值高程模型於陳有蘭溪流域集水區邊界分析探討，2006 年台灣地理資訊學會年會暨學術研討會論文集(CD 版，學生組 S210)。
- 莊永忠，2004，台灣山地集水區河川網絡自動化萃取之特性分析與符合度探討，國立台灣大學森林學研究所碩士論文。
- 陳威誠，2004。由光達覆蓋模型萃取數值高程模型之研究，國立交通大學土木工程學系碩士論文。
- 陳良健、羅詔元，2007。整合光達資料與二維路網重建三維道路模型，航測及遙測學刊，12(2):179-195。
- 郭志奕，2005，結合光達資料與大比例尺向量圖重建三維建物模型，國立中央大學土木工程學系碩士論文。
- 賴進貴，1994，數值地形模型比較之研究，國立台灣大學理學院地理環境資源學系地理學報，17:1-14。
- 賴子銘，2004，SRTM/TopSAR 高程數據比對與多尺度分析，國立交通大學土木工程學系碩士論文。
- 賴彥中，2004，結合光達資料與數位空照影像重建三維建物模型，國立中央大學土木工程學系碩士論文。
- 魏世青，2005，以 SRTM 數據擷取水系網路及集水區邊界分析探討，國立交通大學土木工程學系碩士論文。
- 謝淳彥，2008，連結長方體法主平面點雲自動萃取法，2008 年第二十七屆測量及空間資訊研討會論文集(CD 版，A56)。
- Briese, C., 2004, Breakline Modelling from Airborne Laser Scanner Data, Ph.D. Dissertation, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna University of Technology, Austria, 67p.
- Colombo R., Vogt J. V., Soille P., Paracchini M. L. and Jager A., 2007. Deriving river networks and catchments at the European scale from medium resolution digital elevation data. *Catena* 70:296-305.
- Grimaldi S., Nardi F., Benedetto F. D., Istanbuluoglu E. and Bras R. L., 2007. A physically-based method for removing pits in digital elevation models. *Advances in Water Resources* 30:2151-2158.
- Habib, A., Mwafag, G., Michel, M., and Al-Ruzouq, R., 2005, Photogrammetric and LiDAR Data Registration Using Linear Features, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(6):699-707.



- Jana, R., Reshmidevi, T. V., Arun, P. S. and Eldho, T. I., 2007. An enhanced technique in construction of the discrete drainage network from low-resolution spatial database. *Computers & Geosciences* 33:717-727.
- Jaw, J.J., and Chuang, T.Y., 2008, Registration of Ground-based LIDAR Point Clouds by Means of 3D Line Features, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 31(6), in Press.
- Liu, Y. and Snoeyink, J., 2004. Flooding Triangulated Terrain, *International Symposium on Spatial Data Handling*:137-148.
- Mackay, D. S. and Band L. E., 1998. Extraction and representation of nested catchment areas from digital elevation models in lake-dominated topography. *Water Resources Research*, 34(4):897-901.
- Mackay, D. S. and Liang C., 2000. A general model of watershed extraction and representation using globally optimal flow paths and up-slope contributing areas. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(4):337-358.
- Renslow, M. 2001. Development of a bare ground DEM and canopy layer in NW forestlands using high performance LIDAR, *ESRI International User Conference*.
- Tarboton, D. G., 2005. *Terrain Analysis Using Digital Elevation Models (TauDEM User Guide)*.