

數位化地形模型概說

林雨莊 唐繼剛

近年來，由於立體模型技術的發展，如何有效的表示我們所處的地表(它是二度空間，而非地圖平面約二度空間)，數值化地形模型DEM成了重要的課題。

近年來，由於對二度空間決策支援的需求日益殷切，乃有了數值地形模型(Digital terrain model, DTM)的發展。所謂數值地形模型，乃是以數值化的方式，來表現地表二度空間的起伏變化情形。

然而，由於像懸崖、斷層之類的地形並不常見，因此，數值地形模型對於地形的表示方式，便和「場」(field)的方式相同。亦即，在一個連續的平面上，各個(X,Y)點只對應到一個值(即Z值)。由這個角度來看，數值地形模型是2.5D的資料，而非真正的3D。

數值地形模型的研究，在GIS領域中，日愈重要，牽涉的技術亦相當的多，我們將在適當的地方分別加以介紹。在本節，我們的重心將放在其資料模型上面。

目前數值地形模型最常見的表示方式有三種，分別討論如下：

(1) 規則的網格點(regular grid)

在一組正交的網格上，每一個網格點均量取其高度值，這些高度值便組成一個規則矩陣的結構。我們在2.4節討論網格式資料時，曾經提過，地表高度這一類的資料是比較適合用網格式資料結構來加以

示的。目前的DTM資料多以航測方式生產而得。例如，中央大學遙測中心所提供的全台灣的DTM資料乃農林航測所以titi測方式生產的。原始資料為散佈點，在生產成網格式DTM時，接須經過內差處理。

當我們想要以立體的方式來呈現地表資料時，最簡單的方法便是以電腦繪圖的技術，將各個網格點加上高度而加以展現出來。如果網格資料本身有殘缺的話，我們便須以內插的方式，來求出殘缺的點資料。

這種表示法的最大問題在於網格本身格子的大小。格於太大，對於地形的表現，會有所失真。而格子太小時，又將致使記憶體空間佔用太多。前面我們討論了周不同的格子大小來表現不同的精密度要求，也

就是四元樹。然而，對於地表的劇烈變化(例如，山脊、山谷、

鞍部、斷層，……，等等)，仍無法簡單有效的加以表示，而須藉助斷線點來加以彌補。

(2) 數值等高線(digital contour)

將地形資料中，高度相同的點連接起來，便成了數值等高線。這種表示法，在現今的紙兩地形圖中，相當的常見。在資料的展現上，具有相當良好的效果。用數值等高線來代表地形，有一些缺點存在。

由於等高線實際上只是地形視覺化展現上的一種做法，要以數值化方式來表示地表時，它並不是一種很有效的做法。沿著等高線上的資料點過於密集，而二條等高線之間又毫無點可用，資料點之分佈顯然差異過於懸殊。

此外，在繪製等高線的過程中，或多或少會加入一些錯誤，而在製成地圖的過程中，有一些原始資料可能會因為不在我們所要描繪的等高線上，而被捨棄。因此，以數值等高線所表示的地形模型，其精確度並無法很高。

而從分析與處理的角度來看，目前適用於等高線模式的分析、處理演算法並不多，亦是其缺點。

在GIS系統中，DTM資料多半不會以數值等高線的形式來加以表示。現今我們之所以有時會拿到數值等高線的資料，多半是因為它們是由傳統紙圖數化而來的。正確的程式，應該是將數值等高線再加以內插成網格式或是下面所要介紹的不規則三角網。

(3)不規則三角網 (Triangulated Irregular Network, TIN)

這是一種以連續不規則的三角形，來代表連續約二度空間資料(例如：地形資料)的資料結構。其解析度可隨空間資料複雜度之不同而改變，因此，地形上的劇烈變化亦可以有效的加以表示。例如，所表現的地形圖，由圖中可以看出地形的變化情形，其中各個三角形的頂點乃是實際的測量點，由這些有限的點，展現整個地形出來。

不規則三角網對於工程挖填方(cut and fill)的計算、地形坡度/坡向的計算、視域分析、等高線的繪製、數位元化地表模型的構建與展現等等立體的分析處理功能，相當的重要。在第5章中，我們將會介紹到這些

分析和處理的功能。

所示的乃是不規則三角網的資料結構。對於資料中的每一個節點，我們用兩個表格去存放它。第一個表格(圖中的「XY座標」)記錄其X和Y座標，第二個表格則記錄其Z座標(圖中的「Z座標」)。

這些節點便構成三角形的頂點，而圖中的「節點」表格負責記錄各個三角形的構成頂點。由「XY座標」以及「Z座標」產生各個三角形，乃是不規則三角網演算法所必須要處理的工作。不同的演算法，會產生不同約三角形，對於資料表面模擬的程度，也會有所不同。在位相方面，「邊」表格記錄了各個三角形的相鄰三角形。

和前面所述的網格表示法相較，TIN的主要缺點是三角形的建立比較耗費時間。而且，目前電腦的軟、硬體設計，都是比較適合用來處理規則的網格資料，而比較不適合用來處理TIN這一類不規則的向量式資料的。目前，已經有許多不錯的以網格點資料為基礎的地形分

析軟體存在。而在不規則三角網的資料模型上，則找不到對應的軟體。

然而，TIN所建立的三角形資料在存放空間上，卻比網格式資料節省許多。這也是以時間換取空間之一例。

3 數位化地形模型之應用

3.1 坡度與坡向分析

坡度(slope)的定義，乃是在單位距離內高度改變的情形。坡度因計算的方式之不同，而有不同的值。例如，在圖2.6-1中，我們便可以看出，隨著計算方向之不同，我們便可以計算出X方向坡度(僅考慮X方向的高度變化)、Y方向坡度(僅考慮Y方向的高度變化)，以及最大坡度(考慮高度變化之最大量)。坡度通常以弧度(arc)或是以百分比(高度上昇的值除以水平移動的值)來加以表示。

在結果的展現上，我們可以根據計算所得的坡度大小，訂定級距空間，然後加以表現出來。如此，我們便可以由坡度圖中，輕易的看出一塊區域的坡度變化情形。

當我們在進行地貌景觀評價時，坡度之計算是一個相當重要的考慮因素"

坡向(aspect)代表一個面積所朝向的方向，也就是其法向量(Normal Vector)的方向。一般是以水平和垂直的角度來表示它。水平的角度是方位，垂直的角度則為仰度。在坡向圖的展現上，我們可以將 360° 分成適當的級距，然後用不同的顏色在地形圖上展現出來。坡向也與地貌景觀有密切關係。

2.2 徐昇氏多邊形

Voronoi圖形又稱為徐昇氏多邊形(Thiessen's Polygon)。它將一個水平面上的所有面積，按照指定的若干資料點，分成數個多邊形，而每個多邊形內均含有一個資料點。對於任一個多邊形內的任何一點而言，它和多邊形外其他資料點的距離，均大於它和該多邊形內的資料點的距離。

Voronoi圖形的任何一個分隔邊均有一個特性，也就是它和兩邊約兩個資料點的距離恰為等距。從另外一個角度來看，任一資料點的Voronoi圖形的邊，乃是由此資料點和相鄰各資料點連線的垂直平分線所構成。

當我們的觀測點有限，而希望由這些觀測點來推出其他點時，我們常運用Voronoi圖形。我們先求出個資料點的Voronoi圖形，同時再假設在同一多邊形內各點約雨量，可以以該多邊形內觀測站所測得之值為代表。因此，各站觀測值乘以該多邊形面積便得到該面積的降雨量，最後，再全部加總後，便得到全部的降雨量。

當然，Voronoi圖形的計算，完全根據所指定的點座標，並未考慮實際的狀況，因此，求出的多邊形便可能和我們所欲觀察的地理現象之邊界分佈有異。例如，在前述的例子中，採用自然分界(例如，山脈)可能求出的總降雨量會更正確。此點在運用時，必須先行瞭解。

有人針對Voronoi圖形做了適度的擴充，他把各個點加上不同的權重，這些權重代表了它對於Voronoi圖形在建構上的影響力。這種多邊形，稱為加上權重的Voronoi圖形(weighted Voronoi graph)。

2.3 等值線繪製(內插推算)

等值線繪製的工作，乃是出已知的離散(discrete)點資料，推算出(此動作稱為內插法(interpolation))未知各點的值，然後將值相等的點連接起來。

一般地貌現地進行測量所得的資料，多是屬於離散型的點資料，而我們的真實世界，或是我們要運用的方式，卻都是屬於連續性的。此時，我們便需要使用等值線來加以模擬出這些連續性的需求。

只要是能以面表示的資料，均可以繪製其等值線。最常見到的應用，乃是在地形圖中。我們用以表示相同高度點所連接而成的等高線。

除了將值相等的點用線連起的等值線外，我們還可以進一步將各個等值線因其所代表的不同的值，而將其所圍起的多邊形填入不同的顏色，以區分各個等值線值的不同。在地形圖中，我們常常可以看到這種做法。例如，海拔0至500公尺的區域，我們可以用深綠色代表之。而海拔501至1000公尺的區域，我們用黃綠色代表之。更進一步，我們可以在兩條等值線之間，再做內插。換言之，我們可以由點而線，再出線而面，推算出整個面的值。此時，所表現的結果，便是一個漸進的等值線。

等值線繪製時，最基本的技術問題便是內插(interpolation)。亦即，給定若干已知點，求出這些已知點間未知點的值。

內插法的演算法相當的多，並沒有那一種做法特別的比其他的方法好，而是各有其適用領域。這些演算法可以大分為兩大類，一種我們稱之為準確型內插(exact)，其在求內插點時，保留原先已知點未變更"另一種稱為概略型內插(approximate)，它則是將各種資料點的值，加以平滑化處理。另一種不同的分類方式則是根據在求未知點時，所考慮的資料範圍。當我們在求取未知點值時，需要考慮到所有點值的方法，我們稱之為整體性方法(global)。而如果只有考慮該未知點週遭附近的點時，便稱之為局部性方法(local)。

有許多問題，即使在日常資料中常見到，可是目前仍沒有很好的演算法可以自動加以全部解決。例如，在圖5. 22所示的例子中，是很常見的等高線情形。如果我們想在這些已知的等高線之間，內插加入更細的等高線，則效果並不佳。

至於像懸崖、峭壁、斷層之類的地形，則需人為的介入，設定其範圍，而無法全部自動化加以產生。

內插法中有一種很常見的，便是用TIN來做內插的工作。實際上，TIN用在做內插的工作比做為資料模式用的情形還多。在這種做法中，我們先根據已知的資料點，建構其TIN資料結構。按著，任何一個待求點的值，但是由它所位處的那一個三角形來加以決定。在較簡單的方法中，只要將該三角形各頂點的X,Y,Z值代入公式中，便可求出未知點的值。而在較複雜的做法中，除了要各頂點的X,Y,Z值外，其一階、二階微分，皆需列入考慮。

這種以TIN來進行內插的做法，主要的優點是其效率很高，一旦第一階段的TIN建構完成，往下的工作便相當的快速。另一個優點在於它是一種局部性的方法，因此，資料的中斷相當容易納入考慮。

事實上，由於以上的優點，TIN的內插法是目前在大量資料的情形下，仍可運用的少數方法之一。

2.5擴散分析

擴散分析，基本上是以網格式資料結構為考慮對象。在擴散分析中，我們由一個點出發，向外逐步擴散，並且逐步累積我們所要觀察的值。換言之，擴散分析便是以某一參考點為基準，就其鄰近範圍內，依指定的計算函數求出結果。

此外，擴散分析尚可以運用於空間統計中，例如：求參考點近鄰範圍內目標物之總數、平均數、變異數、眾數、最大數、最小數等等。當我們所要觀察的值是行經的距離，而且出發點和目的點中間沒有障礙物時，這種特殊的情形便稱為鄰近度分析(proximity)。

擴散分析有一個特別的好處是，不規則分佈的各種情況都可以納入考慮。擴散分析在實作上，困難度並不大。最大的困難點在於它必須處理相當多的網格資料點，記憶體的管理，是一個瓶頸。

2.6尋徑分析

尋徑分析(seek或stream)由一個起始點出發，一步一步的向外發展，並且每一步做一次判斷，直到根據你的判斷準則，不再往外走為止。基本上，它的基本運算和前一節所述的擴散分析相當類似。例如，在預測雨水流向時，我們由某一點出發，進行尋徑分析。其判斷準則是，如果鄰近點的高度較低，則向其發展。此程式將重複至我們到達一個

點，四週的點的高度都較這一個點高時才停止。

結合尋徑分析與前述的擴散分析，我們可以找到任一點和出發點間的最佳路徑。例如，如果我們找出A點和B點間的最佳路徑，我們可以運用在擴散分析中所得到的圖。然後，我們再出B點出發做尋徑分析，而判斷的準則是往時間值較小的鄰近格發展，我們便可以得到所示的路徑。

2.5視域分析

所謂的視域，乃是指由一觀測點進行觀測時。所能觀察到的區域。例如，在圖5.26所示的雷達站例子中，由於雷達波進行的方向是直線的，因此，圖中有岩石擋住的陰影部份，變成了雷達觀測的死角。在這些死角之外，雷達所能觀測得到的區域，便稱為該雷達站進行觀

測時之視域。

在視域分析(intervisibility)中，我們找出由所指定的幾個觀測點或區域進行觀測時，所無法觀測到的區域(即是前面所謂的死角)。在許多的應用中，這個功能相當重要。例如，雷達站、微波站的設置、景觀的設計等等。

當我們以雷達站作為視域觀念的說明例時，事實上我們已經做了相當的簡化。實際上，由於機械上的特點，雷達本身還有一些其他的限制存在。例如，它的仰角有最高的限度以及最低的限度。換言之，超出此一範圍就已超出其視域之外。同樣的，也不是所有的雷達都可以360度旋轉。因此，在作視域分析時，只需考慮這些範圍即可。最後，不論雷達也好，或是其他觀測工具也好，都有其最遠的觀測距離。超出此一距離之外，便不需列入視域考慮了。

在進行視域分析時，我們運用的是地表的高程資料以及觀測點的位置。若在觀測區域內，已有一些助成建物存在，這些建物的高度亦應同時納入考慮。圖

5. 27所示的，便是視域分析的輸入資料以及輸出成果。

以下我們用圖5. 28為例，解釋一下視域分析。假設由點VP向圖的右方進行觀測，我們可以求出各點和點VP的連線以及點VP

出發的垂直線間的夾角。例如，在圖中，點P1和點VP連線和由點VP出發之垂直線間的夾角為 α_1 。而對於點P2而言，該項夾角為 α_2 。…對於點P5而言，該項夾角為 α_5 。由點VP向外掃瞄時，對於任何一點，只要該點的這一個夾角高於先前所遇各點的夾角，該點便屬於可見的區域;否則，便是在視域死角之中。

因此，位於視域中的點有P5,P2,P1;而P3,P4則位於視域死角之中。