SWCB-109-256

無人載具高解析影像及光達點雲於山區河川表層粒徑分析之精進研究

成果報告書



行政院農業委員會水土保持局　編印

中華民國109年12月

無人載具高解析影像及光達點雲於山區河川表層粒徑分析之精進研究　成果報告書　行政院農業委員會水土保持

行政院農業委員會水土保持局

與您一起打拼

行政院農業委員會水土保持局
南投市中興新村光華路6號
http://www.swcb.gov.tw

計畫編號：SWCB-109-256

無人載具高解析影像及光達點雲於山區河川表層粒徑分析之精進研究

（成果報告書）

執 行 單 位：長榮大學

執 行 期 間：109 年 2 月 6 日至 109 年 12 月 31 日

計畫主持人 ：曾志民 教授

行政院農業委員會水土保持局　編印

中華民國 109 年 12 月

（本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考）

目次

目次 I
表次 III
圖次 V
第一章　前言 1-1
第一節　研究背景及目的 1-1
第二節　工作執行架構 1-3
第三節　研究範圍 1-4
第四節　工作時程規劃 1-5
第二章　河床表層粒徑現場調查 2-1
第一節　河床質採樣調查方法 2-1
第二節　現場調查成果說明 2-10
第三節　調查樣區粒徑特性分類 2-24
第三章　無人載具 UAV 航拍 3-1
第一節　無人飛行載具介紹 3-1
第二節　UAV 航拍任務規劃 3-3
第三節　正射影像及三維點雲產製 3-6
第四章　粒徑影像判釋 4-1
第一節　粒徑影像判釋軟體比較分析 4-1
第二節　Digital Gravelometer 軟體簡介 4-3
第三節　粒徑影像判釋成果說明 4-9
第五章　點雲糙度特性粒徑分析 5-1
第一節　點雲資料前處理 5-1
第二節　點雲糙度分析指標粒徑 5-1
第三節　無人機河床表層粒徑分析之作業手冊草案初擬 5-12
第六章　結論與建議 6-1
參考文獻 參-1
附錄 附-1

表次

表 2-1.1 表面採樣調查方法比較.....2-2
表 2-1.2 網格法現場採樣記錄表.....2-9
表 2-2.1 0.5m 採樣間距之河床表層粒徑現場調查成果統計表(1/3).....2-15
表 2-2.1 0.5m 採樣間距之河床表層粒徑現場調查成果統計表(2/3).....2-16
表 2-2.1 0.5m 採樣間距之河床表層粒徑現場調查成果統計表(3/3).....2-17
表 2-2.2 1.0m 採樣間距之河床表層粒徑現場調查成果統計表(1/3).....2-18
表 2-2.2 1.0m 採樣間距之河床表層粒徑現場調查成果統計表(2/3).....2-19
表 2-2.2 1.0m 採樣間距之河床表層粒徑現場調查成果統計表(3/3).....2-20
表 2-2.3 0.5m 採樣間距之河床表層特徵粒徑現場調查成果.....2-21
表 2-2.4 1.0m 採樣間距之河床表層特徵粒徑現場調查成果.....2-22
表 2-2.5 兩種採樣間距之河床表層粒徑現場調查成果比較.....2-23
表 3-1.1 Microdrones MD4-1000 無人飛行載具基本資料.....3-2
表 4-3.1 影像判釋指標粒徑之分析成果(光源 8 時).....4-13
表 4-3.2 影像判釋指標粒徑之分析成果(光源 11 時).....4-14
表 4-3.3 影像判釋指標粒徑之分析成果(光源 14 時).....4-15
表 4-3.4 影像判釋指標粒徑之分析成果(光源 17 時).....4-16
表 5-2.1 點雲糙度指標粒徑之分析成果(光源 8 時).....5-6
表 5-2.2 點雲糙度指標粒徑之分析成果(光源 11 時).....5-7
表 5-2.3 點雲糙度指標粒徑之分析成果(光源 14 時).....5-8
表 5-2.4 點雲糙度指標粒徑之分析成果(光源 17 時).....5-9
表 5-2.5 光達點雲結合影像點雲之指標粒徑分析成果.....5-10

圖次

圖 1-2.1 工作架構流程.....1-3
圖 1-3.1 研究範圍.....1-4
圖 1-4.1 工作時程進度規劃.....1-5
圖 2-1.1 河床沉積分層示意圖.....2-2
圖 2-1.2 調查操作者因體型差異產生之誤差.....2-4
圖 2-1.3 等間距步伐採樣與採樣膠帶採樣之差異.....2-4
圖 2-1.4 網格法採樣作業流程.....2-5
圖 2-1.5 採樣繩(採樣標記間隔為 1 公尺).....2-6
圖 2-1.6 開口樣板.....2-7
圖 2-2.1 河床表層粒徑現場調查作業圖.....2-11
圖 2-2.1 河床表層粒徑現場調查作業圖(續).....2-12
圖 2-2.2 河床表層粒徑現場調查位置圖.....2-13
圖 2-2.3 河床表層粒徑現場調查樣區網格分布圖.....2-14
圖 3-1.1 無人飛行載具-旋翼型.....3-1
圖 3-1.2 多旋翼型無人載具 Microdrones MD4-1000 外觀.....3-2
圖 3-2.1 無人機飛航監控及任務規劃程序流程.....3-3
圖 3-2.2 無人飛機航拍規劃程序流程.....3-4
圖 3-2.3 無人飛機航拍規劃拍攝範圍.....3-5
圖 3-3.1 內方位坐標系統示意圖.....3-7
圖 3-3.2 外方位坐標系統示意圖.....3-7
圖 3-3.3 特徵點匹配示意圖.....3-8
圖 3-3.4 正射影像之產製流程及範例成果.....3-9
圖 3-3.5 三維點雲之產製流程及範例成果.....3-10
圖 3-3.6 無人飛機航拍正射影像產製成果 (8 時).....3-12
圖 3-3.7 無人飛機航拍正射影像產製成果 (11 時).....3-12
圖 3-3.8 無人飛機航拍正射影像產製成果 (14 時).....3-13
圖 3-3.9 無人飛機航拍正射影像產製成果 (17 時).....3-13
圖 3-3.10 無人飛機航拍三維點雲產製成果 (8 時).....3-14

圖 3-3.11 無人飛機航拍三維點雲產製成果 (11 時) 3-14
圖 3-3.12 無人飛機航拍三維點雲產製成果 (14 時) 3-15
圖 3-3.13 無人飛機航拍三維點雲產製成果 (17 時) 3-15
圖 4-1.1 河床樣區範例影像 4-1
圖 4-1.2 BASEGRAIN 軟體之河床樣區判釋成果 4-2
圖 4-1.3 Digital Gravelometer 軟體之河床樣區判釋成果 4-2
圖 4-2.1 Digital Gravelometer 影像判釋軟體系統畫面 4-3
圖 4-2.2 專案項目建立範例畫面 4-4
圖 4-2.3 載入預設影像及點選四個控制點 4-4
圖 4-2.4 查看及確認影像相關訊息 4-5
圖 4-2.5 粒徑影像判釋 4-6
圖 4-2.6 粒徑影像判釋報告 4-7
圖 4-2.7 Digital Gravelometer 影像處理流程 4-8
圖 4-3.1 不同航高影像之粒徑判釋成果比較 4-12
圖 5-1.1 河床調查樣區之點雲平面分布 5-2
圖 5-1.2 河床調查樣區之點雲側視分布 5-2
圖 5-2.1 點雲標準偏差之分析示意圖 5-3
圖 5-2.2 點雲高程偏差分析示意圖 5-3
圖 5-2.3 影像判釋分析與影像點雲分析在 4 種光源之整體誤差平均值比較 . 5-11

第一章　前言

第一節　研究背景及目的

對於山區集水區之降雨逕流分析、泥砂運移分析及土砂收支分析等相關數值模擬工作，廣域河床表面之曼寧 n 值為重要基本地文因子，對於模擬成果之合理性與正確性影響甚鉅。曼寧 n 值為一重要時空變量，由於颱洪事件造成之河道變化、防砂構造物之興建、土地利用之改變等皆會造成曼寧 n 值有所變化。因此，除需廣域獲得不同河段之曼寧 n 值外，定期針對上述環境因素改變後之曼寧 n 值檢討有其必要性。

目前河床粒徑資訊之調查仍依賴局部河段開挖進行篩分析，或進行現地表層粒徑調查，惟受限於人力及時間成本，現地調查分析仍僅限於部分局部河段，分析成果資訊無法有足夠之空間及時間頻率代表性。目前已有相關研究利用河床現地拍攝表層粒徑材料像片進行影像判釋獲得河床材料粒徑資訊，惟此種作法之仍無法有效克服作業時間效率問題。近年無人載具 UAV 航拍技術快速發展演進，目前已可高效率進行廣域航拍，利用航拍影像產置高階析度正射影像，也可進一步利用影像立體像對進行特徵點匹配產製三維密點雲，並進一步產製高精度數值地形。以航高 50 公尺為例，目前已可產製約 1~2 公分等級高解析度正射影像及同尺度高精度數值地形，以及超過 500 點/平方公尺之高密度三維密點雲，可有效兼顧高空間解析度及高作業時間效率之優勢。

本計畫團隊 108 年度以高雄寶來茗濃溪河段作為研究區域，首先進行表層粒徑現場調查分析，其次利用無人載具 UAV 於研究區域以不同航高進行航拍，產製高解析度正射影像及三維密點雲，進一步分別利用影像判釋表層粒徑分布，以及點雲糙度特性分析進而推估表層指標粒徑，並以現場調查成果驗證比較。108 年度研究成果顯示在航拍之航高範圍內(25 ~ 200 公尺)，最小可判釋粒徑大約為影像解析度之 3 ~ 5 倍。以航高 25 公尺為例，影像解析度為 0.81 公分，最小可判釋粒徑大約為 3 公分，惟影像判釋成果在小顆粒範圍誤差率略高，此點應係航拍時入射光線角度影響較小顆粒邊緣區隔判別能力所致；影像產製之密

點雲則呈現在較小礫石粒徑(數公分至十幾公分)範圍之判釋優勢，判釋誤差率大約僅為影像判釋結果之一半，而在數十公分或更大尺寸卵石範圍則兩者有約略相近的判釋誤差率，惟影像產製點雲在部分稀疏植生分布之河床仍有可能造成判釋之不確定性。

基於上述，本計畫 109 年度係架構在台北科技大學土木工程系張國楨教授研提之總計畫「先進遙測技術於大規模山崩及周邊區域之活動監測、土砂運移及模擬分析」下，持續精進無人機航拍產製成果在河床表層粒徑判釋之應用。109 年度之計畫工作重點，首先在現場表層粒徑之調查方法方面，進一步縮小測線間距及採樣間距，增加粒徑採樣顆粒數，以提升現場調查成果之代表性；在航拍產製影像方面，嘗試探討不同日照光源條件下航拍影像之粒徑判釋品質比較。在密點雲應用分析指標粒徑方面，則在既有影像產製點雲優異之水平密度條件下，進一步結合垂直向度精度及植生穿透性更佳之無人機空載光達產製之密點雲，期能進一步提升三維密點雲在河床表層粒徑判釋分析之能力。

綜合上述，本計畫研究目的可歸納如下：

1. 完成研究區域山區河段之表層粒徑現場調查分析，以作為影像粒徑判釋分析及密點雲粒徑分析之驗證比較依據。
2. 利用顆粒影像分析軟體進行不同日照角度 UAV 產製影像之河床材料判釋分析，探討日照光線對影像判釋成果之影響。
3. 結合具水平密度優勢之 UAV 影像產製三維密點雲，及垂直精度優勢之 UAV 光達產製三維密點雲進行河床指標粒徑分析。
4. 結合本研究河床表層粒徑調查方法、影像粒徑判釋及密點雲粒徑分析方法，初步研擬無人機在河床表層粒徑分析之作業手冊草案。

第二節　工作執行架構

本計畫擬定之執行架構流程如圖 1-2.1 所示，主要工作項目及採用之研究方法說明如下：

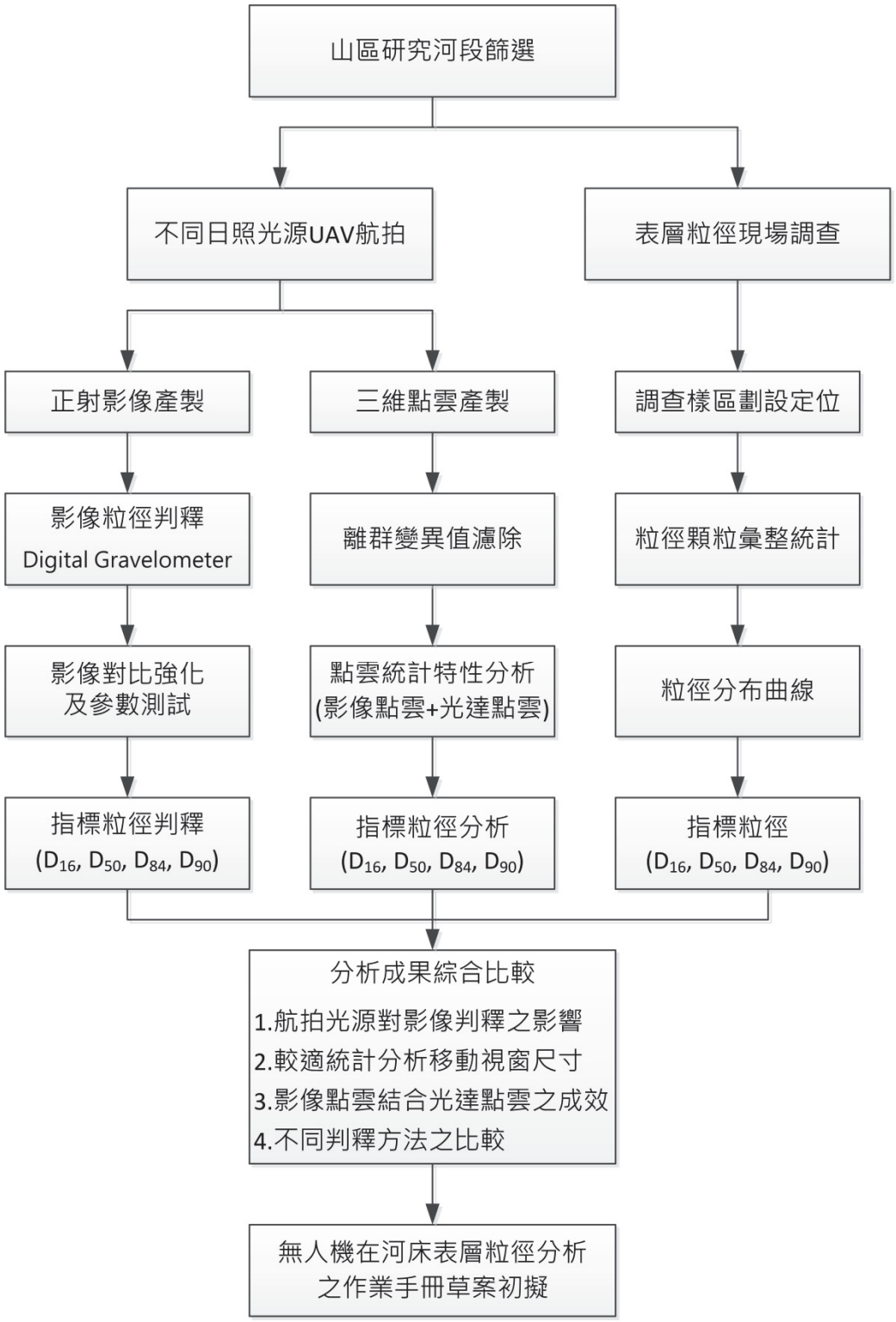


圖 1-2.1 工作架構流程

第三節　研究範圍

本計畫配合總計畫「先進遙測技術於大規模山崩及周邊區域之活動監測、土砂運移及模擬分析」之調查規劃，在高雄市寶來區選取一處荖濃溪河床作為研究區域(圖 1-2.1)，選取原則為河床顆粒材料以卵礫石為主，材料粒徑約介於(10 ~ 1000) n mm，儘量選取級配優良區位，亦即河床表面較均佈不同尺寸之卵礫石材料，以利探討顆粒判釋分析之限制條件。

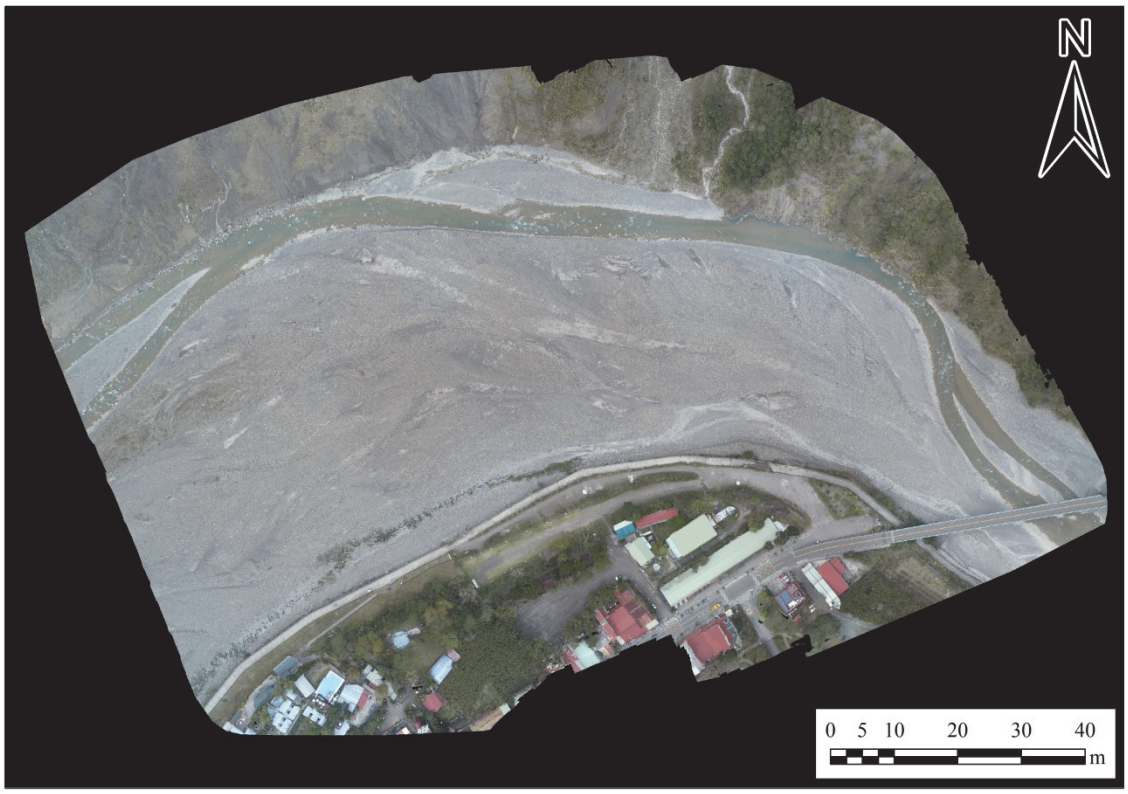


圖 1-3.1 研究範圍

第四節　工作時程規劃

本計畫之工作時程規劃如圖 1-4.1，其中包含提送期中報告書 (7/31)及提送期末報告書 (11/13)兩個查核點。計畫執行迄今，已完成所有工作項目。

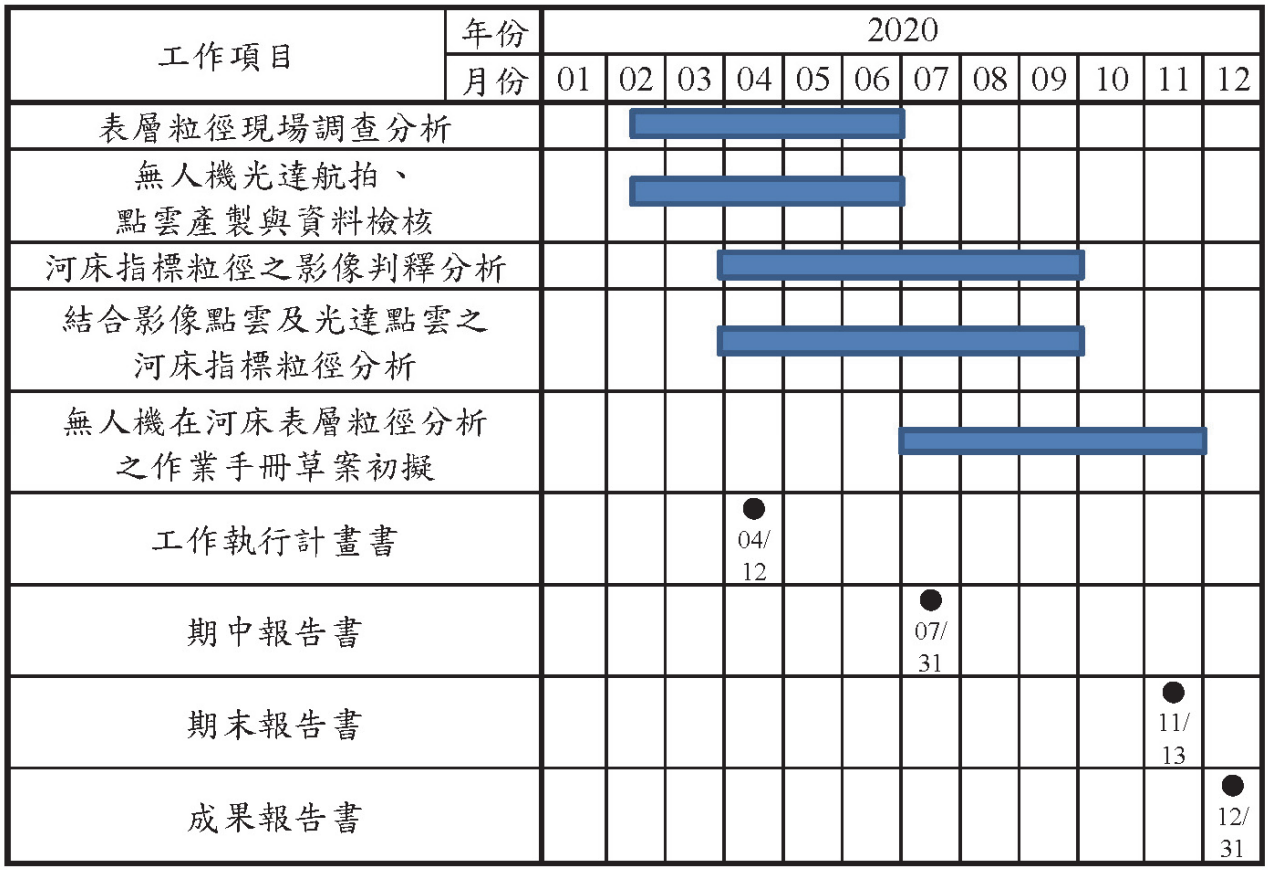


圖 1-4.1 工作時程進度規劃

第二章　河床表層粒徑現場調查

第一節　河床質採樣調查方法

河床質採樣調查目前尚無一般性之調查方法準則，依據「河床質調查方法之比較研究」(2006)及「河道曼寧 n 值與河床質粒徑關係之研究(2/2)」(2009)所述，眾多調查方法中一般較傾向採用標準方法(standard method)，如 Bunte and Abt (2001)提及 Wolman (1954)之 100 顆粒網格式卵石採樣方法(pebble counts)常被當成是表面顆粒採樣之標準方法；McNeil and Ahnell (1964)採樣器常被當成水下體積法採樣之標準方法。Bunte and Abt (2001)進一步介紹河床質採樣調查方法如下：

一、河床質採樣調查方法基本分類

礫石河床之河床質採樣調查方法可分為兩大類：

(一) 表面採樣法：

表面採樣方法可分為三大類：分別為 A.網格式卵石採樣方法(pebble counts)；B.方型網格採樣方法(grid sampling)；C.面積採樣方法(areal sampling)。

(二) 體積採樣法：

一般河床沉積分層如圖 2-1.1 所示，可分成以下兩種區分類型，第一種為護甲層(armor layer)、護甲底層(subarmor layer)；第二種為表層(surface sediment)、底層(subsurface layer)。一般表面採樣對象為表層(surface sediment)之底床材料，而體積法所區分之表底層即分別為護甲層(armor layer)及護甲底層(subarmor layer)。

二、河床質表面採樣調查方法(surface sampling)

將表面採樣調查方法之各種作業方式整理比較如表 2-1.1，臺灣河川流量豐枯水季節流量差異甚大，因此暴雨或颱風豪雨退水時，大小礫石在幾乎未經淘選作用下急速沉降，此時調查結果即為淘選度相當不良之河床質粒徑級配；而在枯水時期，小流量無法搬運較大粒徑之卵礫石，僅能帶走表面之細粒料，調

查結果即為普遍可見之表層粗粒化現象。因此若以表面採樣之各種作業方式考量，網格式卵石採樣具備之涵蓋面積廣、適用大型卵礫石及調查速度快等特性，應是山區河川進行表面調查較佳之選擇。方形網格採樣方法及面積採樣方法之涵蓋面積小且無法適用較大卵石之採樣，因此較不建議採用(河道曼寧 n 值與河床質粒徑關係之研究(2/2)，2009)。

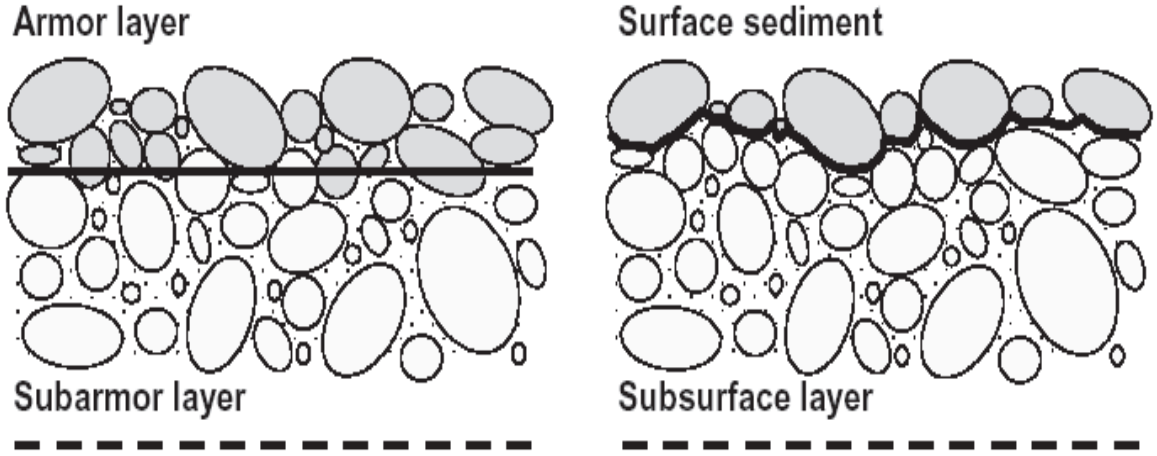


圖 2-1.1 河床沉積分層示意圖

表 2-1.1 表面採樣調查方法比較

調查方法	網格式卵石採樣 (Pebble counts)	方型網格採樣 (Grid smapling)	面積採樣 (Areal sampling)
施做方式	1.步伐測距採樣	1.網框採樣	1.人工撿拾(配合噴漆)
			2.採樣黏著版(Adhesive)
	2.採樣繩測距採樣	2.照相採樣	3.照相採樣
採樣方式	等距離增加方式，採集預定數量的顆粒	採集網框所有格點下的樣品	採集所有設定面積下的樣品
採樣面積	相對大範圍，可至 100m^2	相對小範圍，約 1~10m^2	限制於小區域下，約 0.1~1m^2
樣品大小	適用礫石與大卵石，不適用於砂	適用礫石，不適用砂	適用砂至中小礫石，不適用粗礫石及大卵石
工作時間	現場調查時間長，不需實驗室時間	網框採樣現場調查時間長，不需實驗室時間	現場調查時間與實驗室時間均需要
		照相採樣現場時間短，實驗室時間長	
資料比較與後續應用	資料可直接與方形網格採樣及體積法採樣進行比較與合併運用	資料可直接與網格式卵石採樣及體積法採樣進行比較與合併運用	資料無法直接與網格式卵石採樣、方形網格採樣、及體積法採樣進行比較與合併運用

資料來源：「河床質調查方法之比較研究」，(2006)。

以下針對表面採樣調查之網格式卵石採樣方法(pebble counts)作業方法說明如下：

在一選定的區域內拉相互平行的測線，並沿著測線上等間距的點採樣，直到取得所需要的樣品數量為止，此法一般適用範圍約在 100 m^2。此法可分為步伐測距採樣(heel-to-toe)、採樣繩測距採樣(measuring tape)等兩種作業方法，此兩種方法實質上之意義大致相同，皆是利用一等間距方法進行採樣。

一、步伐測距採樣(heel-to-toe)

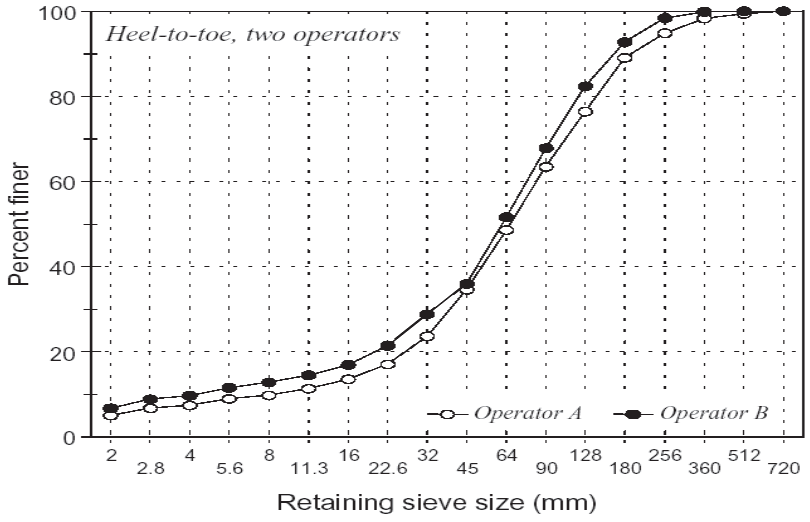
由操作者沿著一選定橫切線(操作者想像的線)，等間距步伐拾取每一步鞋尖所碰觸到之石頭，數量上一般依照 Wolman (1954)建議之 100 顆為主。

二、採樣繩測距採樣(measuring tape)

在採樣範圍內拉設採樣繩，採集採樣繩上預先設定標誌(等距離)正下方之樣品，數量上一般依照 Wolman (1954)建議之 100 顆為主。

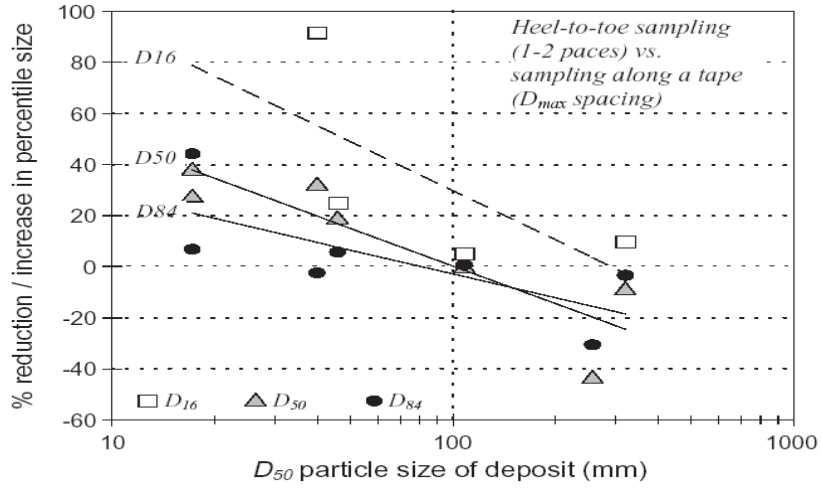
等間距步伐可能會因為施作者的體型以及採樣位置是以隨機拾取腳下石頭，而產生操作者誤差，Bunte and Abt (2001)比較兩不同操作者因體型上的差異而產生誤差如圖 2-1.2 所示，操作者 A 及 B 體型上不同，而得到不同的結果。其中操作者 A 體型較 B 高大，採樣得到之累積粒徑曲線分佈較操作者 B 為粗。

Wohl et al. (1996)比較等間距步伐和採樣膠帶採樣所得到的結果(圖 4)發現，等間距步伐之隨機採樣因操作者在採樣時會取較好撿起之粒徑，因此在大粒徑區域內所得到的粒徑會偏小，而在小粒徑區域內則會得到較粗的粒徑分佈曲線。圖 2-1.3 中三條線分別為等間距步伐得到粒徑大小與採樣膠帶得到者之比較，可發現當此區域內 D_{50} 粒徑大於 100 毫米時，等間距步伐採樣得到之 D_{50} 與 D_{84} 皆較利用採樣膠帶得到者小 0～20%左右，此亦表示利用隨機採樣亦因操作者不同而產生誤差。綜合以上之比較，網格式卵石採樣方法應以採樣繩測距採樣作業方式較佳，因此本計畫採用此法進行表層顆粒材料採樣調查。



資料來源：Bunte and Abt, 2001.

圖 2-1.2 調查操作者因體型差異產生之誤差



資料來源：Wohl et al., 1996.

圖 2-1.3 等間距步伐採樣與採樣膠帶採樣之差異

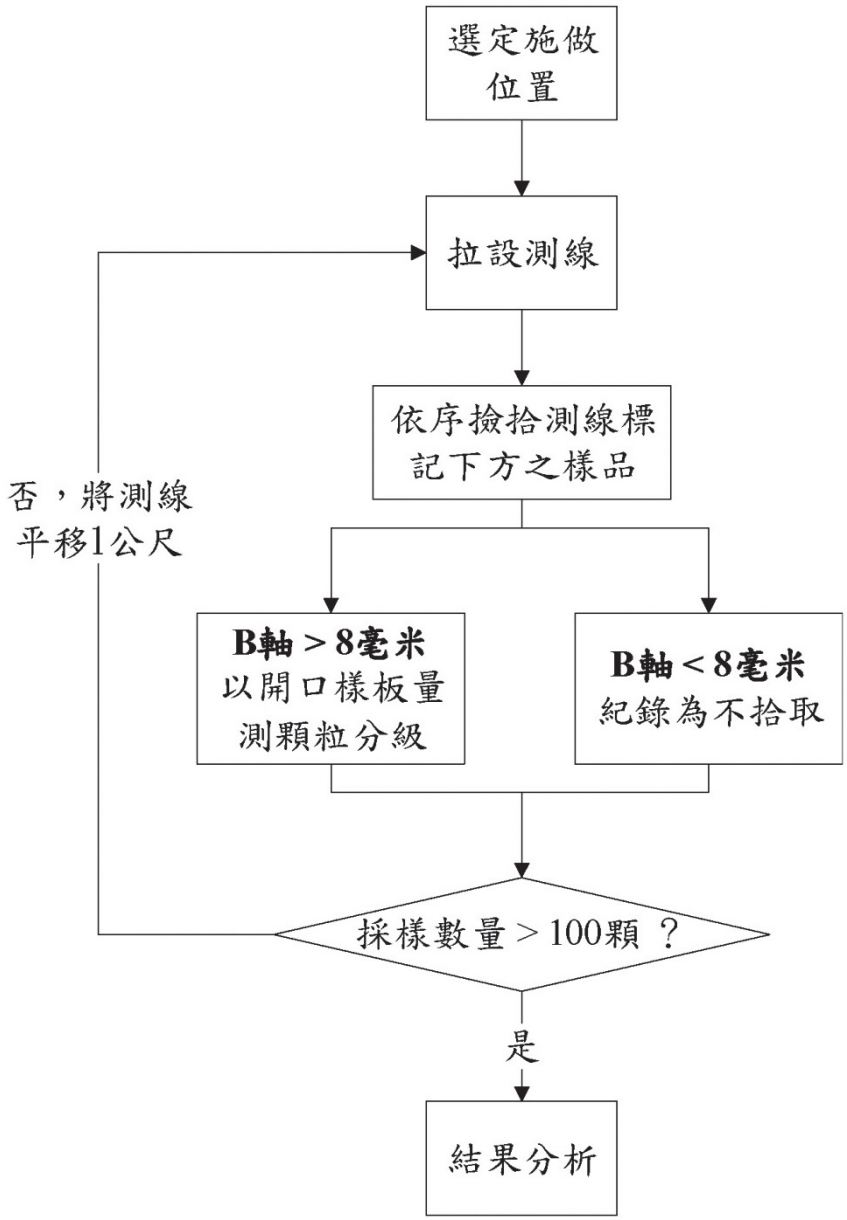
水土保持技術規範中第三十七條所述河床質調查方法之表面粒徑調查分析方法說明，茲摘錄如下：

1.每 500 m 至少取一處為調查之主斷面，再於主斷面上、下游每間距 10 m，另取 2 個副斷面，合計共 5 個斷面。

2.每一個斷面以等間隔(或整數距離)之測點，量測在該測點上之泥砂粒徑，每一個斷面以不少於 5 個測點，測點之間隔不得超過 5 m。

3.每一測點量測 10 cm 以上之粒徑，依統計資料繪製粒徑分佈曲線

另依據河床質調查作業參考手冊，網格法採樣作業流程如圖 2-1.4 所示，作業程序說明茲摘錄如下：



資料來源：修改自「河床質調查方法之比較研究」，(2007)。

圖 2-1.4 網格法採樣作業流程

1.設備：採樣繩、開口樣版、捲尺、工作手套、採樣記錄表、筆、照相機、GPS。

2.人員：2 人一組。

3.選定採樣位置，進行放樣，以噴漆或其他方式標示採樣範圍。

4.決定採樣間距，以 1～2 倍 D_{max}，同一顆粒不重複採樣為原則。於採樣繩上依據採樣間距做記號標示，採樣繩（圖 2-1.5）的材質需使用剛性較佳之材質，可降低伸縮性而避免操縱上的誤差。



圖 2-1.5 採樣繩(採樣標記間隔為 1 公尺)

5.於灘地或砂洲時，在採樣位置上開始拉設採樣繩，採樣樣繩之放置方向以平行河流流向為準，並固定由左岸往右岸方向施作，固定之採樣順序可降低施做過程產生之誤差，測線之分佈依據現地可施做區域進行調整，以組成矩形或方形區域為佳；建議各網格法測線之組合採用相同形狀，以降低後續試驗結果比較之變異性。

6.放置好採樣繩即開始由上游方向往下游方向撿拾採樣繩標記正下方之樣品。

7.將拾取之樣品以開口樣板(圖 2-1.6)進行樣品粒徑分級並紀錄各取樣繩標記下樣品之粒徑大小，當標記下之樣品粒徑尺寸小於 8 毫米時則不取樣，並在紀錄表(表 2-1.2)上將該位置之樣品以「╳」紀錄之，同一測線樣品採樣完成後平移測線至下一個測線位置，繼續採樣直至收集數量超過 100 個後，該測線即為最後一條測線。

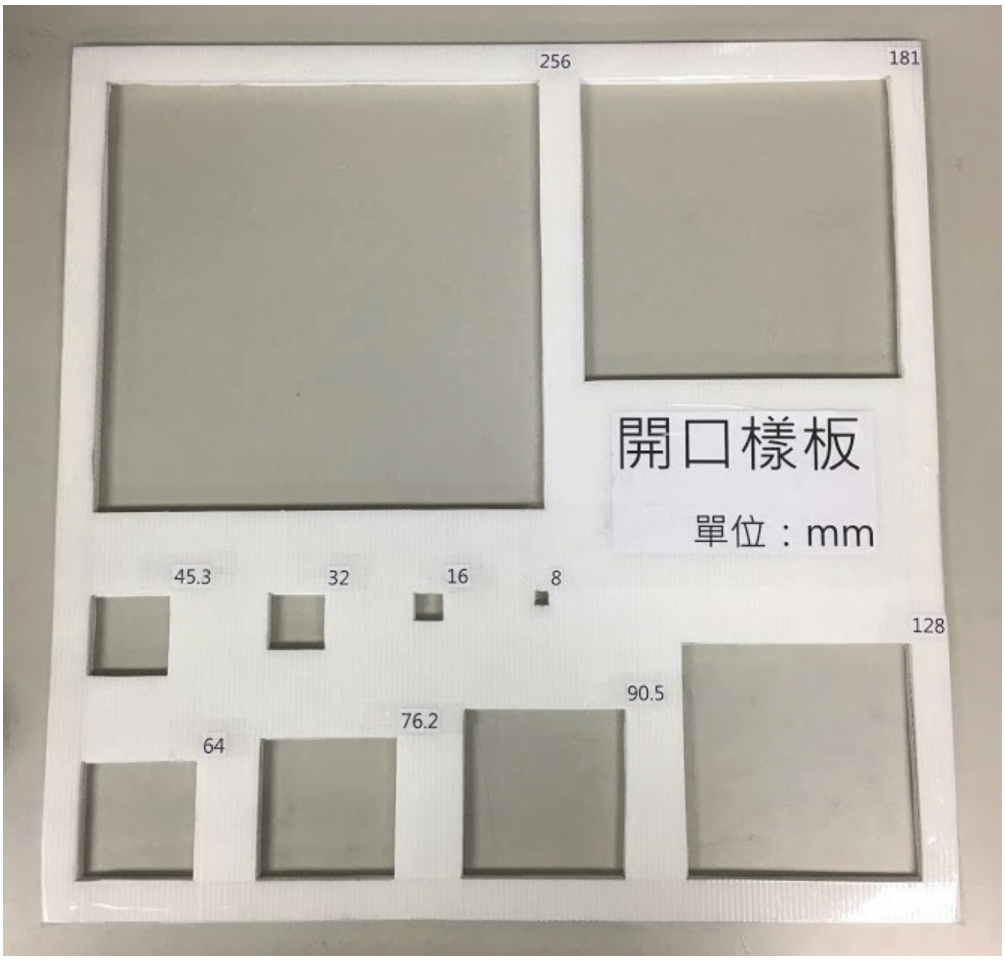


圖 2-1.6 開口樣板

8.開口樣板最大中值粒徑為 256 毫米，但由於實際現地可能有許多中值粒徑超過 256 毫米之巨礫，所以粒徑上限可增加 362 毫米以及 512 毫米兩個級別，由於巨礫不易以開口樣版加以量測，所以採用 B 軸量測方式加以記錄並納入後續粒徑分析中。

9.當施做完該組網格法後，於該網格法範圍中間處進行 GPS 定位，並拍攝該網格法施作範圍內之照片。

10.由以上步驟進行即可完成一組網格法之試驗，現場試驗後再將紀錄之數據帶回室內進行分析並繪製粒徑分布曲線圖即可完成試驗。

11.網格法分析之方式是以各粒徑撿拾數量為基礎。

註：於淺水地區施做網格法時，由於採樣繩會受到水流帶動，所以涉水時可改採用步伐測距方式施做，撿拾每一步伐腳尖碰觸到之樣品。

表 2-1.2 網格法現場採樣記錄表

施作位置		編號		日期		天候	
測線 / 位置	一	二	三	四	五	六	七	八	九	十	十一	座標 TM2_97	X	施做位置描述	小計
1												512	362		128
2															
3															
4															
5															
6												256	181		128
7															
8															
9												90.5	76.2		32
10															
11															
12												16	8	未拾取	
13															
14															
15												調查單位			
16												調查人員			

第二節　現場調查成果說明

本計畫於 109 年 3 月 19 日 ~ 27 日進行表層粒徑現場調查工作，調查地點位於高雄市六龜區寶來里寶來一橋上游約 600 公尺處之荖濃溪河床，現場調查作業如圖 2-2.1，調查地點位置如圖 2-2.2 所示。

調查範圍為圖 2-2.2 紅色框線範圍內約 65m x 65m 之正方形範圍，測線縱向及橫向皆採用 0.5 公尺之採樣間距，總撿拾河床材料粒徑數約為 16,900 顆。在 65m x 65m 之正方形調查範圍進一步劃分 25 個 13m x 13m 之樣區網格，樣區網格分布如圖 2-2.3，各樣區之撿拾粒徑數約為 676 顆，即使為 1 公尺之採樣間距，撿拾粒徑數亦有 169 顆，皆已遠大於 Wolman (1954)建議之現場撿拾取樣值 100 顆。兩種採樣間距之河床表層粒徑現場調查成果統計分別如表 2-2.1 及表 2-2.2 所示，兩種採樣間距分別分析獲得之四種指標粒徑 (D_{16}、D_{50}、D_{84}、D_{90})整理如表 2-2.3，表中顯示利用 1 公尺採樣間距調查分析獲得之四種指標粒徑尺寸，與 0.5 公尺分析結果之誤差值比較可知，25 個調查樣區共 100 個誤差值數值，其中 91 個誤差值絕對值皆在 10%以內，7 個誤差值絕對值介於 10% ~ 15%之間，僅有 2 個誤差值絕對值介於 15%~20%之間。

綜合上述兩種採樣間距之比較分析可知，依據 Wolman (1954)建議之 1 公尺採樣間距，以及至少 100 顆採樣數目應該即足以獲得具現地代表性之調查成果。



(a)

圖 2-2.1 河床表層粒徑現場調查作業圖



(b)



(c)

圖 2-2.1 河床表層粒徑現場調查作業圖(續)

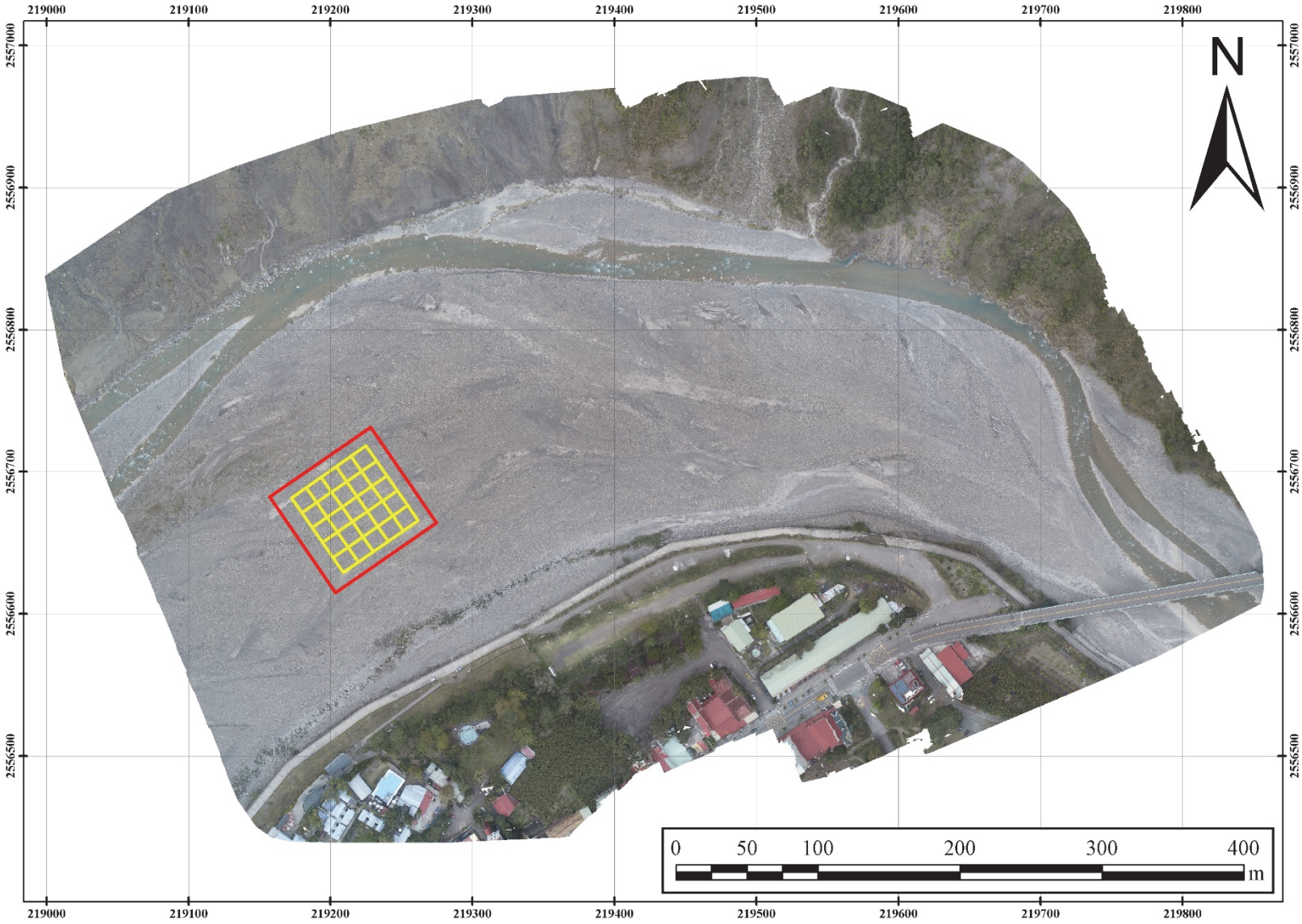


圖 2-2.2 河床表層粒徑現場調查位置圖

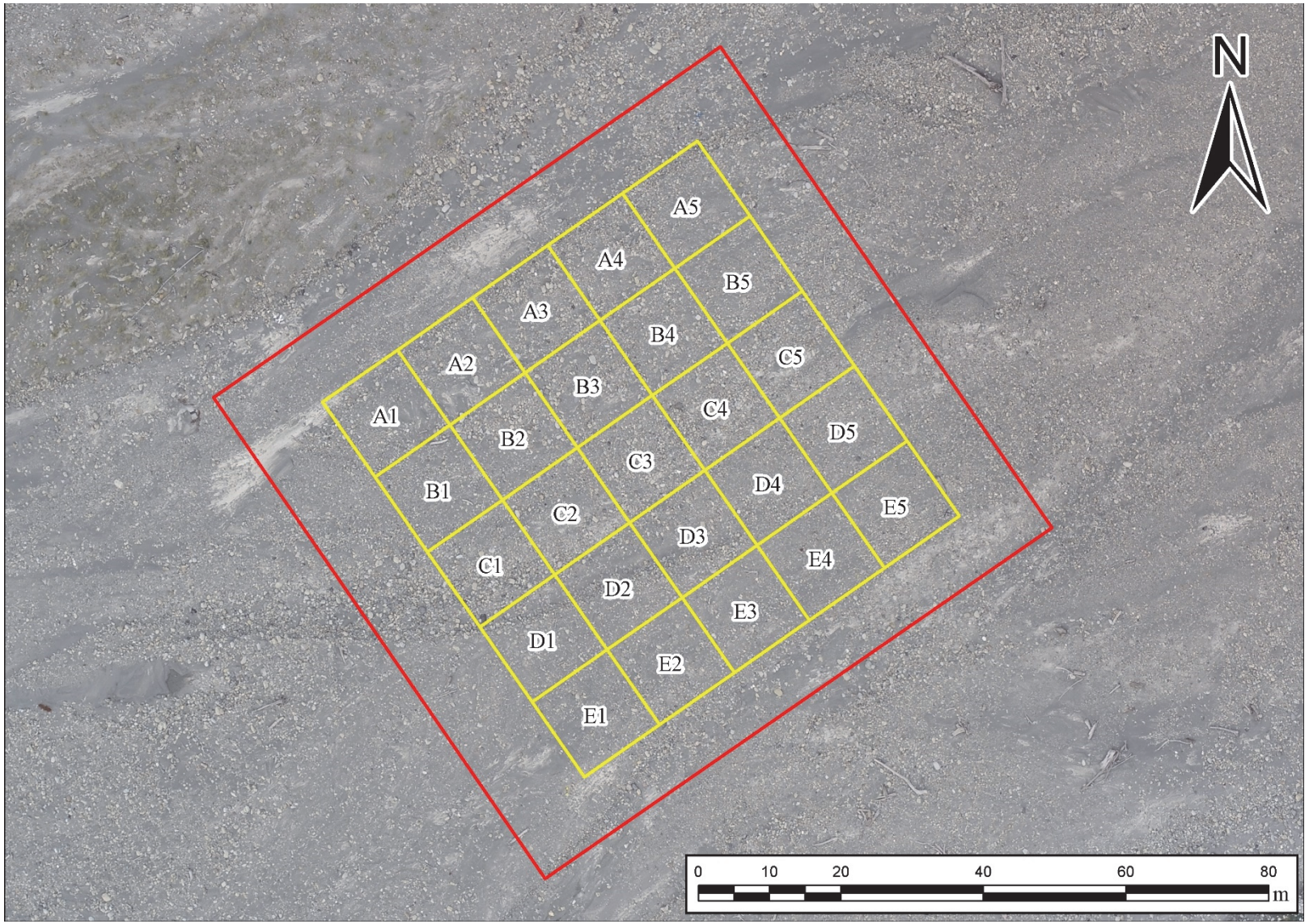


圖 2-2.3 河床表層粒徑現場調查樣區網格分布圖

表 2-2.1 0.5m 採樣間距之河床表層粒徑現場調查成果統計表(1/3)

粒徑分級 (mm)	樣區										累積過篩百分比(%)
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	
724	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	
512	98.62	98.15	95.21	98.73	98.77	99.35	93.92	94.17	97.01	98.21	
362	96.14	93.21	89.58	95.18	95.82	96.96	88.62	89.32	93.38	96.43	
256	92.29	86.11	80.28	85.28	88.94	86.33	79.63	80.10	85.47	87.76	
181	85.40	75.31	73.24	72.34	79.36	74.19	70.90	74.76	75.43	78.83	
128	77.69	67.28	65.63	61.17	68.55	57.70	60.58	64.08	63.46	60.20	
90.5	73.83	61.42	60.00	52.79	61.67	47.94	52.65	57.04	52.56	51.28	
76.2	69.70	55.56	52.96	43.40	56.27	39.70	44.71	47.57	46.58	39.54	
64	57.58	47.84	37.46	31.98	45.95	25.81	32.28	36.41	32.69	26.79	
45.3	45.73	37.35	23.66	22.34	30.22	15.18	23.28	26.21	21.58	20.66	
32	20.94	17.59	7.32	10.91	15.48	5.21	10.58	11.65	7.69	10.71	
16	6.61	4.01	1.13	4.57	5.65	1.52	3.17	2.67	1.50	2.04	
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

表 2-2.1 0.5m 採樣間距之河床表層粒徑現場調查成果統計表(2/3)

粒徑分級 (mm)	樣區										累積過篩百分比(%)
	C1	C2	C3	C4	C5	D1	D2	D3	D4	D5	
724	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	
512	93.68	95.93	95.23	96.95	96.32	97.75	97.72	96.43	98.51	99.83	
362	82.86	87.65	84.62	87.79	87.88	91.00	91.63	91.43	96.20	98.02	
256	71.73	78.46	74.31	73.74	76.69	78.94	79.85	84.46	88.76	91.25	
181	55.79	66.27	60.31	60.46	62.12	67.89	67.30	73.57	78.02	80.69	
128	44.66	54.37	46.00	47.18	45.55	56.03	51.71	60.89	65.29	67.00	
90.5	33.68	43.52	35.85	34.35	34.20	46.22	40.68	49.64	54.55	57.26	
76.2	25.71	38.10	28.31	26.41	27.61	40.08	35.55	42.68	43.97	47.52	
64	19.25	24.85	18.46	14.50	16.26	29.04	24.14	30.89	31.40	31.85	
45.3	12.93	15.21	11.54	8.24	9.05	19.22	16.92	20.71	17.69	17.82	
32	7.22	5.57	4.00	2.60	3.83	8.79	8.17	9.11	8.76	7.26	
16	1.65	1.81	0.92	0.61	2.15	3.07	2.47	2.14	1.65	0.33	
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

表 2-2.1 0.5m 採樣間距之河床表層粒徑現場調查成果統計表(3/3)

粒徑分級 (mm)	樣區					累積過篩百分比(%)
	E1	E2	E3	E4	E5	
724	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	
512	97.93	98.51	98.87	99.57	99.81	
362	96.54	96.60	97.30	98.48	99.24	
256	91.47	88.72	91.44	93.51	92.40	
181	83.18	81.49	86.94	84.85	85.74	
128	74.19	76.17	80.18	73.59	75.86	
90.5	68.20	70.64	73.20	65.58	65.02	
76.2	63.13	65.96	68.24	54.55	55.32	
64	53.46	59.15	60.36	43.29	40.30	
45.3	46.08	49.79	43.92	30.09	26.24	
32	29.95	35.53	20.72	14.50	9.13	
16	10.60	10.00	4.28	2.81	1.71	
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

表 2-2.2 1.0m 採樣間距之河床表層粒徑現場調查成果統計表(1/3)

粒徑分級 (mm)	樣區										累積過篩百分比(%)
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	
724	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	
512	98.29	98.77	94.48	98.95	98.05	99.58	92.47	92.79	98.74	97.30	
362	96.57	93.83	87.29	95.29	94.15	97.90	87.10	88.46	93.70	95.14	
256	94.29	88.27	77.90	85.86	86.34	86.97	78.49	79.81	85.71	87.57	
181	89.14	80.25	71.27	74.35	77.07	74.79	69.35	74.52	77.73	77.84	
128	81.14	69.75	62.98	62.83	66.83	60.50	60.75	64.42	64.71	61.08	
90.5	76.57	63.58	56.35	52.88	59.51	50.42	53.23	55.77	53.78	53.51	
76.2	72.00	57.41	49.72	43.98	52.68	44.12	45.16	48.08	49.16	40.54	
64	57.71	49.38	37.02	31.94	40.00	29.41	34.95	36.06	35.71	27.57	
45.3	45.14	39.51	23.76	24.08	25.85	14.71	29.03	25.48	21.85	21.62	
32	21.71	20.37	6.63	12.04	12.68	5.46	11.29	12.98	5.88	11.89	
16	6.29	5.56	0.55	6.28	5.85	1.68	3.76	3.37	0.84	2.16	
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

表 2-2.2 1.0m 採樣間距之河床表層粒徑現場調查成果統計表(2/3)

粒徑分級 (mm)	樣區										累積過篩百分比(%)
	C1	C2	C3	C4	C5	D1	D2	D3	D4	D5	
724	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	
512	94.31	96.41	95.06	96.35	97.26	98.32	97.36	97.06	98.73	99.68	
362	81.14	87.13	84.26	87.23	89.06	90.34	90.94	91.91	96.50	98.38	
256	69.76	77.54	73.46	74.77	78.42	78.57	79.25	84.56	88.85	92.21	
181	55.09	68.56	58.33	60.18	64.44	67.23	66.04	72.79	79.94	81.17	
128	44.01	58.38	43.52	49.54	47.42	57.14	51.32	59.93	66.88	66.56	
90.5	32.63	45.51	33.64	35.87	38.30	45.38	40.00	51.10	56.37	57.79	
76.2	24.85	38.92	26.85	27.66	30.09	40.76	34.34	43.75	44.90	46.43	
64	18.86	25.75	16.67	15.81	16.11	28.99	22.64	31.99	31.85	31.49	
45.3	12.28	15.27	9.88	9.12	8.21	19.33	16.98	22.06	18.15	18.51	
32	7.19	5.09	3.70	3.34	3.95	9.24	8.30	8.46	8.60	9.09	
16	1.50	2.10	0.31	0.61	2.43	2.52	2.64	1.84	1.59	0.32	
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

表 2-2.2 1.0m 採樣間距之河床表層粒徑現場調查成果統計表(3/3)

粒徑分級 (mm)	樣區					累積過篩百分比(%)
	E1	E2	E3	E4	E5	
724	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	
512	98.65	97.86	99.10	100.00	100.00	
362	97.31	96.15	97.31	98.74	99.25	
256	93.27	90.17	90.13	93.72	91.76	
181	85.65	82.48	85.65	82.85	85.02	
128	77.58	76.92	78.92	71.97	76.40	
90.5	70.85	71.37	71.30	63.60	64.04	
76.2	66.82	64.53	67.71	53.56	55.81	
64	54.71	58.12	60.09	42.26	40.45	
45.3	46.64	48.72	46.19	28.03	28.46	
32	30.04	34.19	18.39	13.39	7.87	
16	10.76	9.83	4.04	2.93	2.62	
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

表 2-2.3 0.5m 採樣間距之河床表層特徵粒徑現場調查成果

單位：mm

特徵粒徑	D_{10}	D_{16}	D_{20}	D_{30}	D_{40}	D_{50}	D_{60}	D_{65}	D_{75}	D_{84}	D_{90}	D_{95}	D_{max}	D_n
A1	20	26	31	37	42	52	66	71	102	171	231	331	320	98
A2	23	30	34	40	50	67	87	113	179	241	314	416	347	133
A3	34	39	42	54	66	74	91	124	200	298	373	506	461	158
A4	30	38	43	60	73	86	123	146	196	249	307	360	320	142
A5	23	32	36	45	57	69	86	109	160	217	272	349	323	121
B1	38	47	54	68	77	98	135	151	186	242	293	342	305	144
B2	31	38	42	59	72	86	125	151	216	308	401	550	538	173
B3	29	36	40	52	68	80	106	133	184	301	383	542	510	163
B4	34	40	44	59	70	84	116	135	179	245	317	429	385	146
B5	31	39	44	67	77	89	127	142	170	224	283	345	315	137
C1	38	54	65	84	112	153	201	224	287	378	461	556	525	218
C2	38	47	55	69	81	113	153	175	235	320	405	495	450	182
C3	43	57	66	79	106	143	180	206	263	356	438	509	482	204
C4	51	66	70	83	107	139	179	207	266	333	398	480	420	198
C5	48	63	68	81	110	142	174	196	247	325	400	489	440	195
D1	34	41	47	65	76	105	146	168	229	300	353	451	420	168
D2	35	44	53	70	89	122	156	173	227	293	347	445	435	171
D3	33	40	44	62	73	92	125	145	191	253	340	469	410	156
D4	34	43	48	62	72	84	110	127	168	223	274	345	320	133
D5	35	43	48	62	70	80	101	120	159	204	247	315	300	124
E1	16	20	24	32	40	55	72	81	133	188	243	330	303	103
E2	16	20	22	29	36	46	66	74	120	207	273	341	316	104
E3	22	27	31	37	43	52	64	71	100	158	232	320	308	97
E4	26	33	37	45	59	71	83	90	135	177	226	288	270	106
E5	33	37	40	50	64	72	83	90	125	172	229	296	282	108

表 2-2.4 1.0m 採樣間距之河床表層特徵粒徑現場調查成果

單位：mm

特徵粒徑	D_{10}	D_{16}	D_{20}	D_{30}	D_{40}	D_{50}	D_{60}	D_{65}	D_{75}	D_{84}	D_{90}	D_{95}	D_{max}	D_n
A1	20	26	30	37	42	53	66	70	78	147	194	289	270	88
A2	25	29	32	39	46	65	82	99	155	216	289	398	362	123
A3	35	39	42	54	67	76	98	139	223	325	419	523	510	170
A4	26	36	41	59	72	82	92	138	185	244	303	359	325	137
A5	26	35	39	49	64	74	92	119	170	237	306	374	355	132
B1	39	47	52	64	67	89	126	145	182	238	285	334	300	139
B2	29	36	39	48	70	85	124	154	227	324	443	412	375	166
B3	27	35	39	53	68	80	109	131	188	307	415	408	350	155
B4	35	40	44	56	68	78	112	129	170	240	313	401	380	140
B5	29	38	43	66	76	87	123	140	172	229	290	360	305	138
C1	39	56	66	86	115	157	206	232	305	395	463	380	340	208
C2	38	47	54	68	79	104	136	162	235	327	408	489	440	179
C3	46	62	68	83	115	151	187	214	271	359	442	511	475	209
C4	48	64	68	80	80	130	180	206	258	334	408	490	460	196
C5	50	64	67	76	98	136	167	184	238	312	379	471	433	187
D1	33	41	47	65	75	105	143	169	232	305	359	450	410	169
D2	35	44	55	72	91	124	159	177	232	299	353	457	432	175
D3	34	39	43	60	72	86	128	149	195	252	334	452	420	154
D4	34	42	48	61	72	83	103	121	161	215	272	341	311	129
D5	33	42	47	62	71	81	100	121	159	200	241	304	287	122
E1	15	20	24	32	40	53	69	70	111	165	224	301	265	94
E2	16	20	23	29	37	48	68	77	115	196	253	342	330	102
E3	23	29	34	38	42	50	64	72	109	168	254	328	290	101
E4	27	34	38	47	61	72	85	92	143	187	230	283	265	108
E5	33	37	40	48	63	72	83	92	124	175	236	302	285	109

表 2-2.5 兩種採樣間距之河床表層粒徑現場調查成果比較

特徵粒徑	D_{16} (mm)			D_{50} (mm)			D_{84} (mm)			D_{90} (mm)		
樣區	0.5m	1.0m	誤差(%)	0.5m	1.0m	誤差(%)	0.5m	1.0m	誤差(%)	0.5m	1.0m	誤差(%)
A1	26	26	-1.56	52	53	0.93	171	147	-14.27	231	194	-16.27
A2	30	29	-3.85	67	65	-3.68	241	216	-10.47	314	289	-7.99
A3	39	39	0.55	74	76	3.51	298	325	8.86	373	419	12.13
A4	38	36	-4.09	86	82	-4.58	249	244	-1.90	307	303	-1.32
A5	32	35	8.87	69	74	7.02	217	237	9.09	272	306	12.27
B1	47	47	0.45	98	89	-9.63	242	238	-1.61	293	285	-2.46
B2	38	36	-5.69	86	85	-1.11	308	324	5.31	401	443	10.47
B3	36	35	-2.11	80	80	-0.11	301	307	2.16	383	415	8.44
B4	40	40	1.18	84	78	-8.12	245	240	-2.09	317	313	-1.21
B5	39	38	-3.71	89	87	-2.61	224	229	1.80	283	290	2.34
C1	54	56	2.74	153	157	2.10	378	395	4.44	461	463	0.42
C2	47	47	-0.49	113	104	-8.25	320	327	2.36	405	408	0.97
C3	57	62	8.39	143	151	5.86	356	359	1.06	438	442	0.83
C4	66	64	-2.03	139	130	-6.46	333	334	0.32	398	408	2.32
C5	63	64	0.65	142	136	-4.35	325	312	-4.19	400	379	-5.11
D1	41	41	-0.68	105	105	0.27	300	305	1.47	353	359	1.64
D2	44	44	-0.24	122	124	1.18	293	299	1.96	347	353	1.77
D3	40	39	-1.31	92	86	-6.41	253	252	-0.14	340	334	-1.71
D4	43	42	-1.13	84	83	-2.13	223	215	-3.41	274	272	-0.65
D5	43	42	-2.90	80	81	1.08	204	200	-2.08	247	241	-2.47
E1	20	20	-0.58	55	53	-3.88	188	165	-12.55	243	224	-7.78
E2	20	20	1.48	46	48	4.65	207	196	-5.41	273	253	-7.40
E3	27	29	7.06	52	50	-3.43	158	168	6.35	232	254	9.37
E4	33	34	3.28	71	72	1.52	177	187	5.44	226	230	2.08
E5	37	37	-0.24	72	72	-0.40	172	175	1.79	229	236	3.24

第三節　調查樣區粒徑特性分類

本計畫進一步依據粒徑級配及顆粒尺寸特性針對 25 處樣區網格分類，其中均勻係數(Coefficient of uniformity)定義如下：

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \tag{2-1}$$

當 C_u 介於 1 ~ 4 時為均勻土壤(Uniform soil)；C_u 介於 5 ~ 8 時為級配好之土壤(Graded soil)；C_u 大於或等於 9 為級配良好之土壤(Well-graded soil)。

樣區網格粒徑特性分類結果如表 2-3.1 所示，其中 12 區屬於均勻土壤類別：A1、A3、B1、B4、C2、C3、C4、C5、D4、D5、E3、E5、；13 區屬於級配好類別：A2、A4、A5、B2、B3、B5、C1、D1、D2、D3、E1、E2、E4。

表 2-3.1 調查樣區粒徑特性分類結果

樣區	D_{60} (mm)	D_{50} (mm)	D_{30} (mm)	D_{10} (mm)	C_u	分群名稱
A1	49	37	22	10	4.96	Uniform
A2	73	51	26	12	6.35	Graded
A3	76	60	38	19	4.09	Uniform
A4	89	73	43	15	5.96	Graded
A5	72	53	32	12	6.28	Graded
B1	96	79	51	24	4.04	Uniform
B2	89	72	42	15	5.82	Graded
B3	82	67	37	15	5.66	Graded
B4	86	71	42	19	4.61	Uniform
B5	90	75	50	15	5.88	Graded
C1	142	108	71	24	5.97	Graded
C2	108	85	53	23	4.64	Uniform
C3	127	101	67	29	4.43	Uniform
C4	127	98	70	36	3.55	Uniform
C5	123	101	68	34	3.65	Uniform
D1	103	82	47	18	5.77	Graded
D2	110	88	55	19	5.71	Graded
D3	89	77	44	17	5.19	Graded
D4	83	71	44	18	4.58	Uniform
D5	80	67	44	20	3.98	Uniform
E1	58	39	16	8	7.68	Graded
E2	48	32	14	8	5.95	Graded
E3	45	37	22	11	4.17	Uniform
E4	70	56	32	13	5.42	Graded
E5	70	57	36	17	4.16	Uniform

第三章　無人載具 UAV 航拍

第一節　無人飛行載具介紹

無人飛行載具 (Unmanned Aerial Vehicle，UAV) 或稱無人飛機系統 (Unmanned Aircraft System，UAS)，最早運用於軍事用途上，近年來也逐漸推廣到民間或政府的相關研究上。現在 UAV 整合了 GPS、慣性導航系統 (Inertial Navigation System，INS)，操控方式能夠由手動操控變為自動駕駛，大幅降低整體操控的難度，並且增加了飛行安全性與穩定性，使得所拍攝的影像更加清楚。

目前市面上有許多種無人飛行載具，從外觀與飛行特性可分為定翼型與旋翼型。旋翼型又分單旋翼系統與多旋翼系統。定翼型的 UAV 續航力比旋翼型好、飛行穩定性較佳，可拍攝的範圍較廣，但起降時需要有一定空間限制。旋翼型則可垂直起降，較容易學習操控，具有較高的機動性，還具備有停懸能力，適合小範圍定點拍攝，各具應用特色。旋翼型又可以分為單翼與多翼，單翼直升機 (圖 3-1.1(a))，為一個水平旋翼旋轉產生上升力帶動飛行的飛行器，其擁有載重量大、能垂直起降與定點旋停之優點，但有耗電 (油) 量大、航行速度慢、自動飛行技術不純熟與操控較不易之限制。多翼型具有兩個以上之旋翼 (圖 3-1.1(b))，雖載重量較小卻有著直升機的優點，且操縱難度較低、自動飛行技術較純熟。在緊急情況下，若發生部份動力失效或斷槳的情形下，現今的飛控系統可自行修正飛行姿態，因此現今市面上也發展了許多種多軸旋翼型無人飛行載具。



(a)單翼型無人飛行載具　　(b)(六軸)多旋翼型無人飛行載具

圖 3-1.1 無人飛行載具-旋翼型

考量本計畫之拍攝需求，主要位於山區河床，需針對拍攝範圍定點滯空，因此本計畫使用可搭載較高階相機之多旋翼型無人飛行載具 Microdrones MD4-1000 (如圖 3-1.2)，搭載 SONY QX1 APSC 等級片幅相機，表 3-1.1 為 MD4-1000 飛行載具基本資料。



圖 3-1.2 多旋翼型無人載具 Microdrones MD4-1000 外觀

表 3-1.1 Microdrones MD4-1000 無人飛行載具基本資料

機身尺寸	1.03m(對角機電軸距)，展開直徑：1750mm，儲存直徑：700mm
最大荷載	1200g (2000g)
機身自重	2650g
最大起飛重量	5550g (6500g)
飛行時間	約 25-30 分鐘 (空載時≥75 分鐘，800g 任務載重時≥42 分鐘，2000g 任務載重時：≥20 分鐘)
最大巡航速度	12m/s
最大爬升速率	7.0m/s
抗風情況	12m/s
工作海拔	達 4000m 以上
遙控距離	5000m
環境溫度	-30℃~55℃
相對飛行高度	≥ 1000m
抗雨能力	防水等級 IP3，可在暴雨（24 小時降雨量 50.0～99.9 毫米）下可持續安全飛行
抗強電場干擾能力	距離 220kV 高壓輸電線 3 米距離時，飛行器控制、通訊線路不受影響
飛行半徑	≥ 5000m

第二節　UAV 航拍任務規劃

無人飛行載具使用專用航線規劃軟體(圖 3-2.1)，設計拍攝範圍與生成航線，能調整像片前後與左右重疊度需求、飛行高度與速度、相機拍攝狀態等，亦有安全設定如低電壓返航、GPS 收訊遺失、緊急返航、自動降落等緊急狀況之應對與處理方式，亦能在飛行任務途中即時進行任務的修改與航點拖曳等安全與方便之功能，於飛行任務中所有飛行狀況包括速度、電壓、姿態等情況等資訊能即時傳送回地面站進行監控。飛行手由熟悉該 UAV 飛行特性者操控起飛及降落，也能使用 GPS 導航自動模式執行航線任務，在自動模式時隨時注意 UAV 飛行狀態以便緊急狀況轉換為手動控制，每趟任務結束於現場初步比對拍攝像片數量與品質，確保資料內容取得完整。航線規劃設計之要點為目標區域地形，地形高程影響無人飛行載具飛行航高，因此航高與安全性的搭配取捨尤其重要。航線規劃地圖資料來源為 Google map，其中難免有地形高程的錯誤，所有飛行高度需經過再三的確認，比對每條飛行航線的航高與地形高度剖面，確保飛行安全。

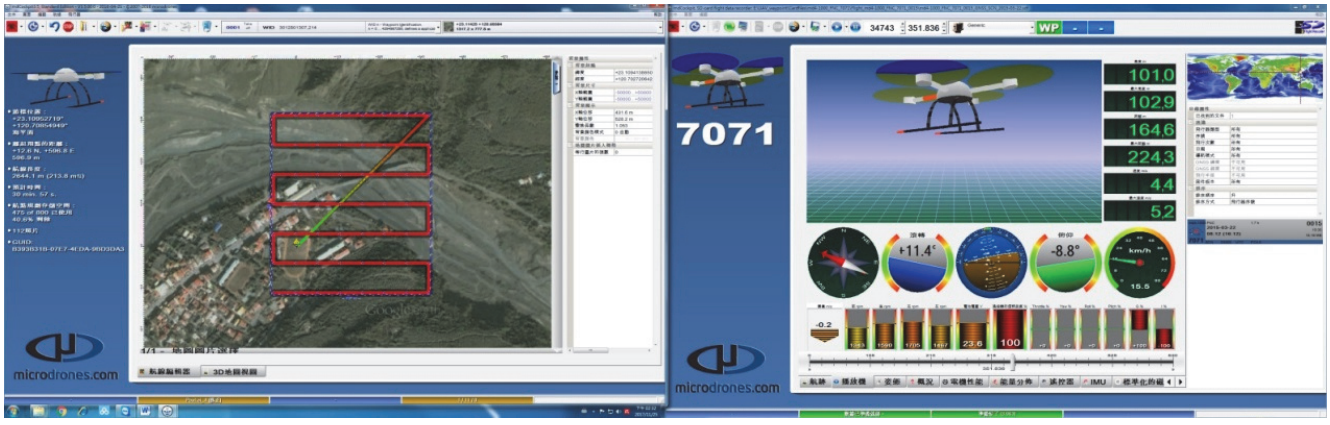


圖 3-2.1 無人機飛航監控及任務規劃程序流程

選定拍攝日期後亦須密切注意天氣狀況，天候狀況也是影響拍攝安全性與成果的重要因素，事前設備的準備與器材狀況都需要經過仔細檢查，到現場周遭環境植生情形與高壓電塔或人工高凸建物等都需再次確認評估。除此之外，現場光線、風向、風速、周邊地形地物狀況與 GPS 接收狀態皆良好狀況下才能執行飛行任務，使整個飛行計畫與測量工作安全順利的進行。圖 3-2.2 為無人飛機航拍規劃程序之完整流程，其中主要有以下要點需考量；圖 3-2.3 中紅色框線為初擬無人飛機航拍範圍(80m x 80m)，位於荖濃溪寶來部落後方大河彎處。

1.作業範圍與飛行空域：確認作業範圍後，了解作業區之地形地物，以及周邊空域狀況來評估空域的相關作業。

2.飛行航線規劃：使用無人機性能、效能、酬載、可飛行時間，另外相機酬載的選用以考量飛行高度與拍攝，以上因素需一併考量，以決定飛行任務之規劃。

3.作業目標區天氣狀態變化與交通：天氣狀態的初步觀察跟出勤時間預估，也需初步掌握，以利於任務的時程安排。

4.UAV 任務執行：執行 UAV 飛行任務包含任務前準備、現場佈署、任務執行，撤收階段等四項作業，以落實完成飛行任務。

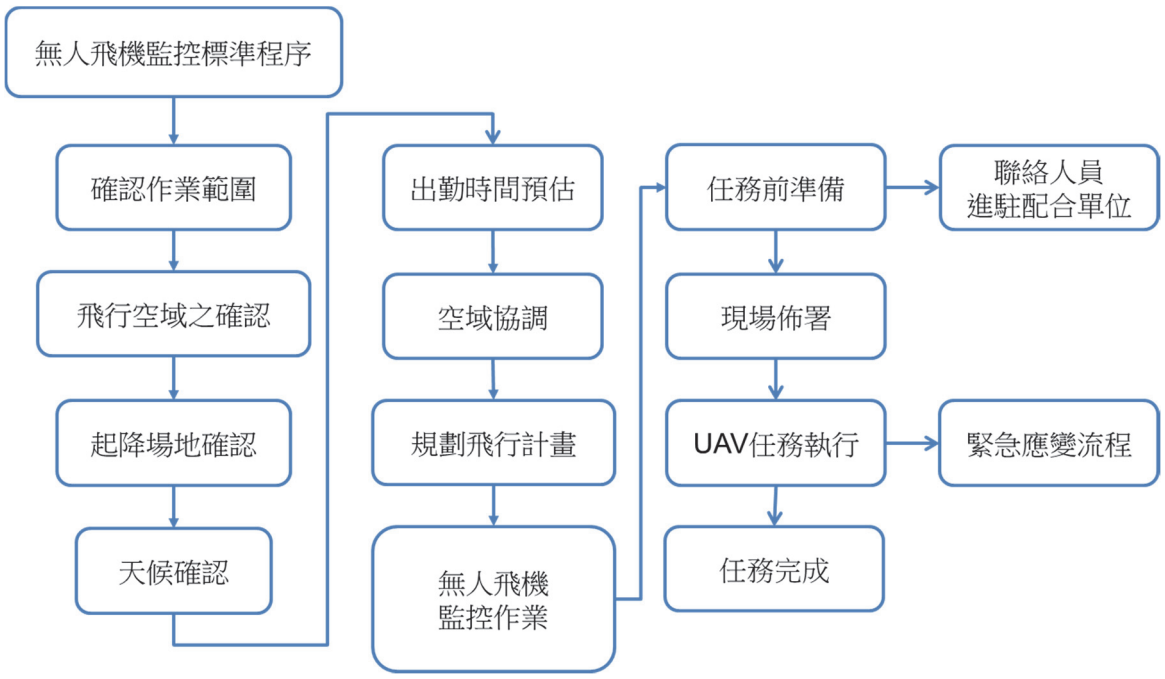


圖 3-2.2 無人飛機航拍規劃程序流程

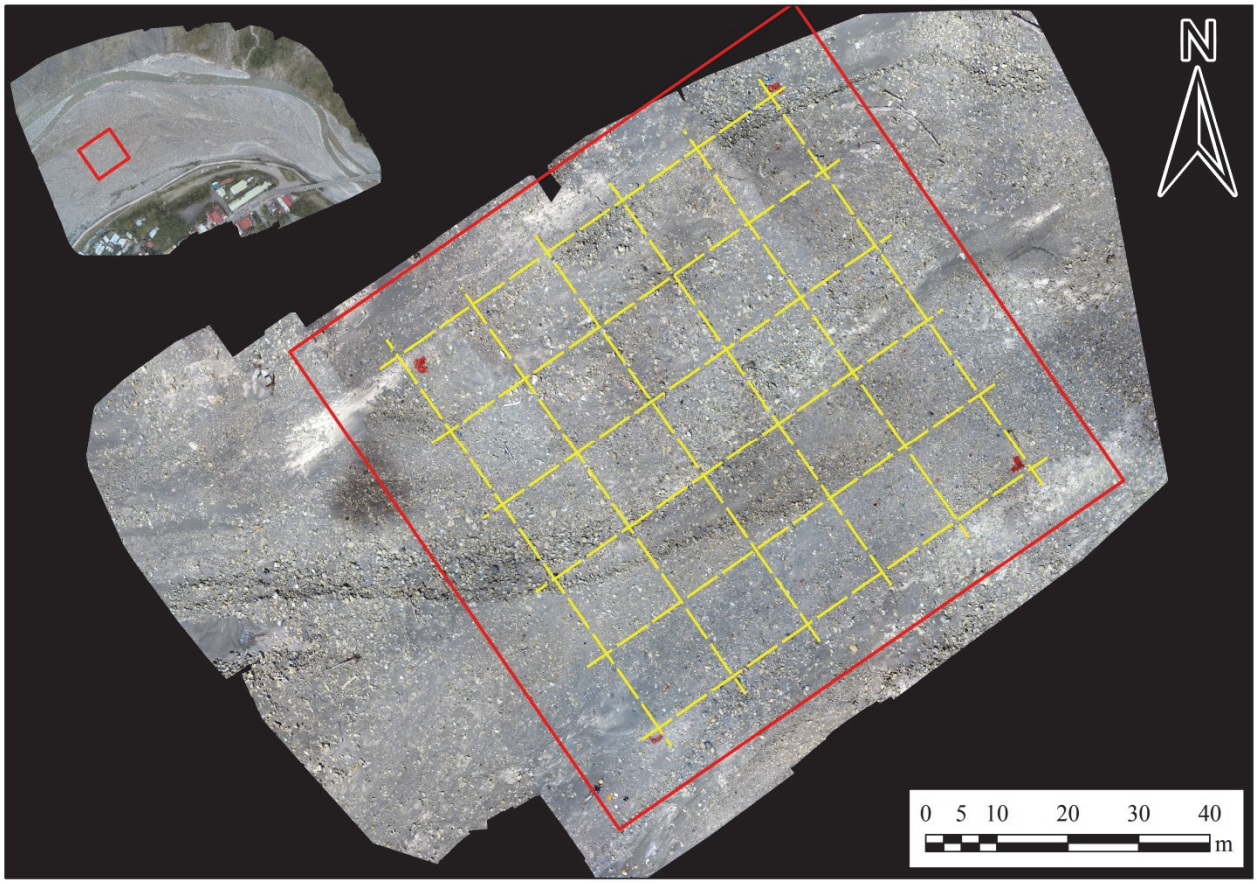


圖 3-2.3 無人飛機航拍規劃拍攝範圍

第三節　正射影像及三維點雲產製

航空攝影測量即指利用飛行機具上裝載高精密度之攝影器具，在預定的航帶上以特定的高度飛行，針對目標區域來拍攝航空像片，藉由處理航空像片來取得現地的資料。有別於傳統量測方法，需要花費大量的人力、資源及時間到現地進行量測，一些人員機具難以到達的地方，也可以利用航空攝影測量輕易的取得其資訊。人的雙眼之所以能對物體產生立體感及距離感，係因為視差角的關係，航空攝影測量就是利用此原理，以不同之 2D 航空像片，針對像片中相同之涵蓋區域，利用程式進行空中三角計算，修正照相時所產生之誤差，即可產生立體之數值地形模型 (DTM)，並將航空照片進行正射，給予坐標系統。相鄰的兩張航空像片，相同航帶的左右兩張重疊範圍至少需要超過 60%，而相鄰航帶的上下兩張重疊範圍至少超過 25%，像片中只有重疊的部份可以產製三維點雲及數值地形模型。在航空攝影測量中經常提到三種坐標系統：

一、像片坐標系統：

一般在影像的四周會有框標點，而坐標原點通常在像片的中心，利用各框標點來計算像片上各點的點位，為一已知值；內方位參數包含了相機率定參數(例如框標與像主點之像片座標、焦距、鏡頭畸變率參數等)，如圖 3-3.1 所示，乃是決定由攝影機中心到物點之距離，即為此坐標系統。

二、影像坐標系統：

影像坐標系統是採用像素 (Pixel) 來當作量度單位，一般其坐標原點在左上方，或影像的中心點。

三、地面坐標系統：

即是實境的坐標系統，台灣通常採用 TWD67、TWD97、WGS84；外方位參數即為相機在地面坐標系統上之 X、Y、Z 值及相機在空中對地面之三方向之轉角 ω、φ、κ，如圖 3-3.2 所示。

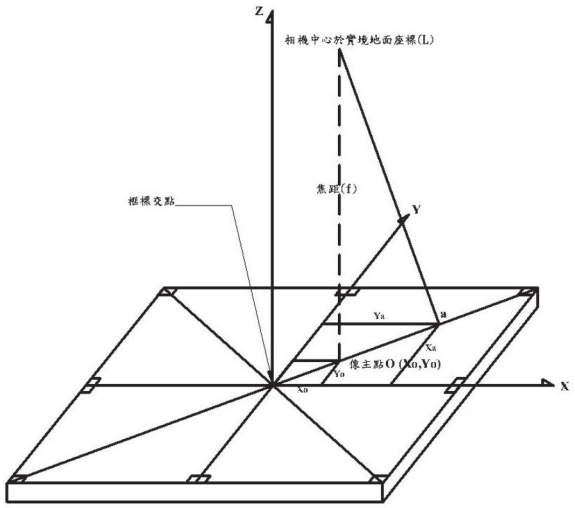


圖 3-3.1 內方位坐標系統示意圖

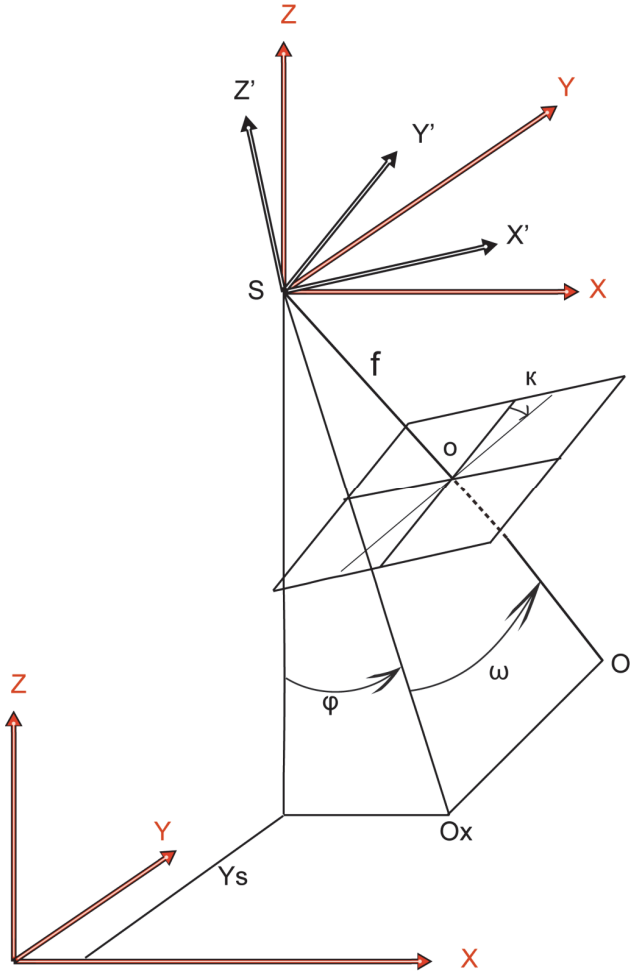


圖 3-3.2 外方位坐標系統示意圖

無人飛行載具在拍攝影像同時也紀錄每張像片拍攝瞬間之位置 (X、Y、Z)與飛機姿態 (ω、φ、κ)，省去了傳統航空像片在建置模型時必須先設置相機參數、外方位參數，並花大量時間對照片點選控制點反算出每張照片的位置與姿態角的煩雜步驟。一方面除了節省時間外，也減少了點選控制點時可能造成的人為誤差，在匹配點位眾多情況下甚至會造成人為誤差累積放大。像片與記錄下之位置姿態訊息經過整理，確保每張照片與其對應參數是一致且符合軟體所需的格式。再給予軟體所需訊息，如輸出之坐標系統，與地面控制點位，經由計算匹配並建置出點雲、數值地表模型與正射影像。數值地形模型解析度受原始像片影響，模型解析度可因 UAV 像片重疊度增加提升像片解析度，其正射影像是航空像片經過幾何修正與拼接的真實地表資訊，含有地理資訊座標資訊，看起來就和一般像片相同，方便使用、容易辨識，能依所需在地理資訊系統平台進行疊圖、量測與分析，若配合三維的數值地形模型能進行更多應用。由於正射影像以像片為基礎拼接再修正，像片解析度大大影響了正射影像的細緻度。

點雲(point cloud)為物體表面資訊以點的形式記錄，每個點都含有 X、Y、Z 座標，部份資料並具備顏色、強度等屬性資訊。點雲一詞主要來自於空載光達(airborne LiDAR)技術掃瞄地表資訊時產生龐大的數據時，因密集的空間資料點呈雲霧狀而得名。現今因無人載具及影像的普及，透過立體影像對特徵點的匹配，而可以求取匹配點之點位空間位置，從而建立密集的點雲，特徵點匹配如圖 3-3.3 所示。運用密匹配的點雲，再由密點雲分類處理之後，並能進行數值高程模型(Digital elevation model, DEM)的製作。圖 3-3.4 及圖 3-3.5 分別為正射影像及三維點雲之產製流程及產製成果範例。

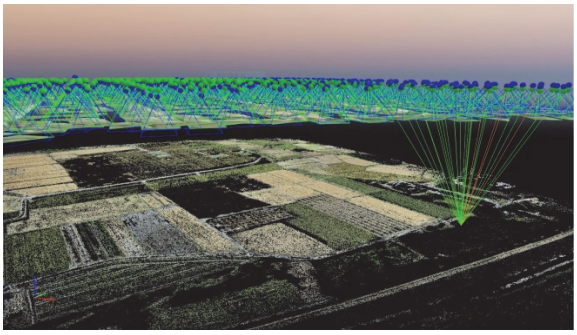
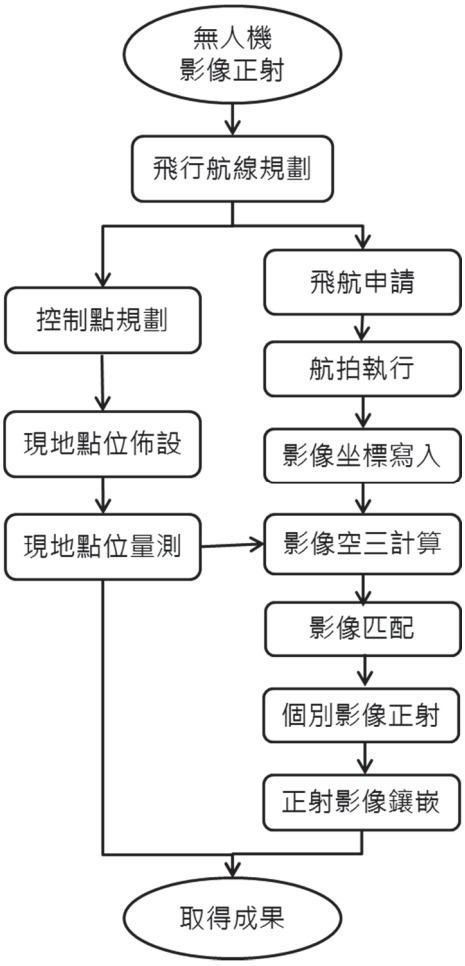
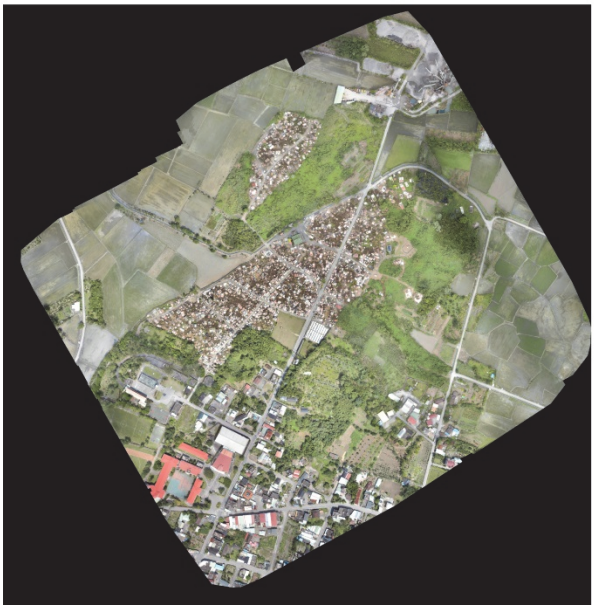


圖 3-3.3 特徵點匹配示意圖

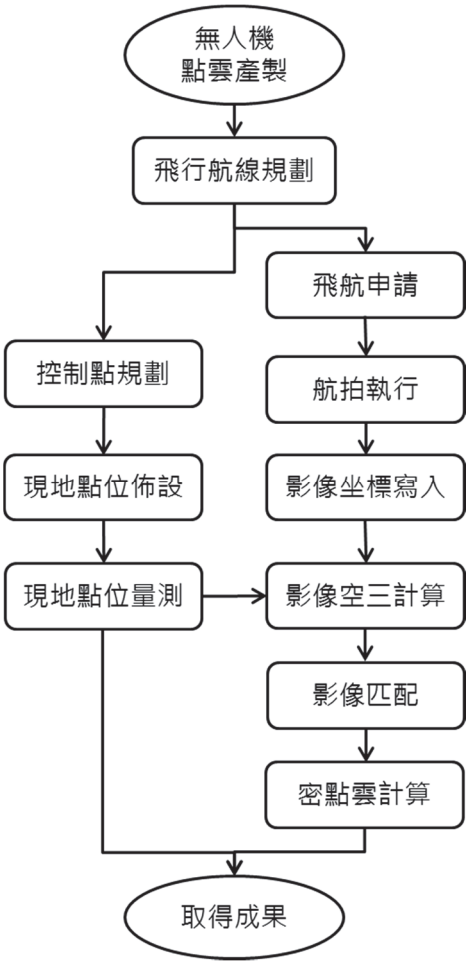


(a) 產製流程

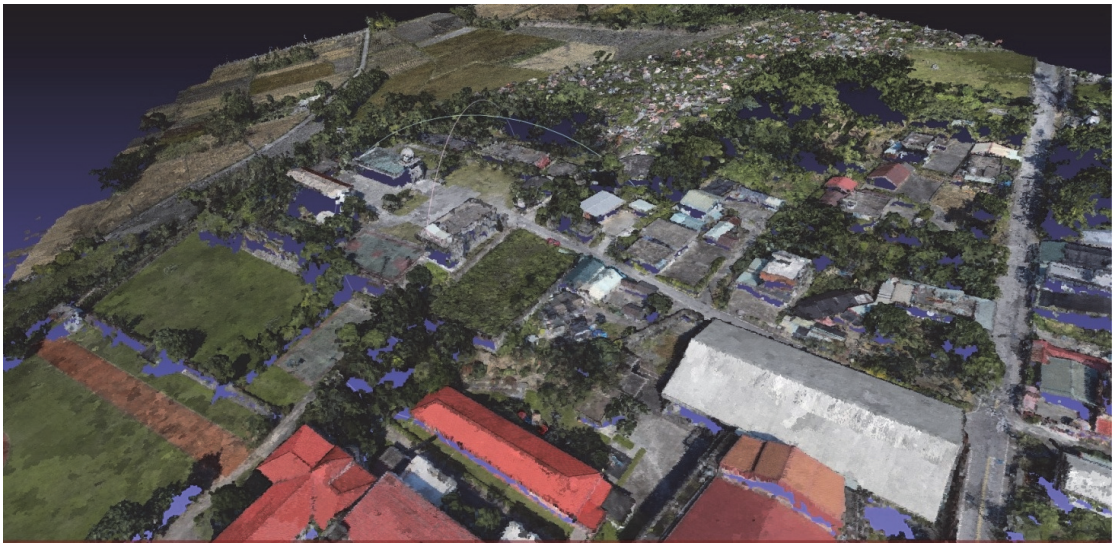


(b) 產製範例

圖 3-3.4 正射影像之產製流程及範例成果



(a) 產製流程



(b) 產製範例

圖 3-3.5 三維點雲之產製流程及範例成果

本計畫於 109 年 3 月 7 日 ~8 日進行航拍，一共規劃四種不同陽光光源 (8 時、11 時、14 時、17 時)，航高則規劃為 25 公尺。四種光源之航拍正射影像產製成果如圖 3-3.6 ~ 3-3.9 所示，影像地面解析度(Ground Sample Distance, GSD)分別為 0.68 公分 (8 時)、0.63 公分 (11 時)、0.62 公分 (14 時)及 0.68 公分 (17 時)。圖 3-3.10 ~ 3-3.13 為四種光源之三維點雲產製成果，航拍範圍之產製點雲數量約為 9,076,515 點，點雲密度每平方公尺約為 2,148 點，呈現優異之水平密度。

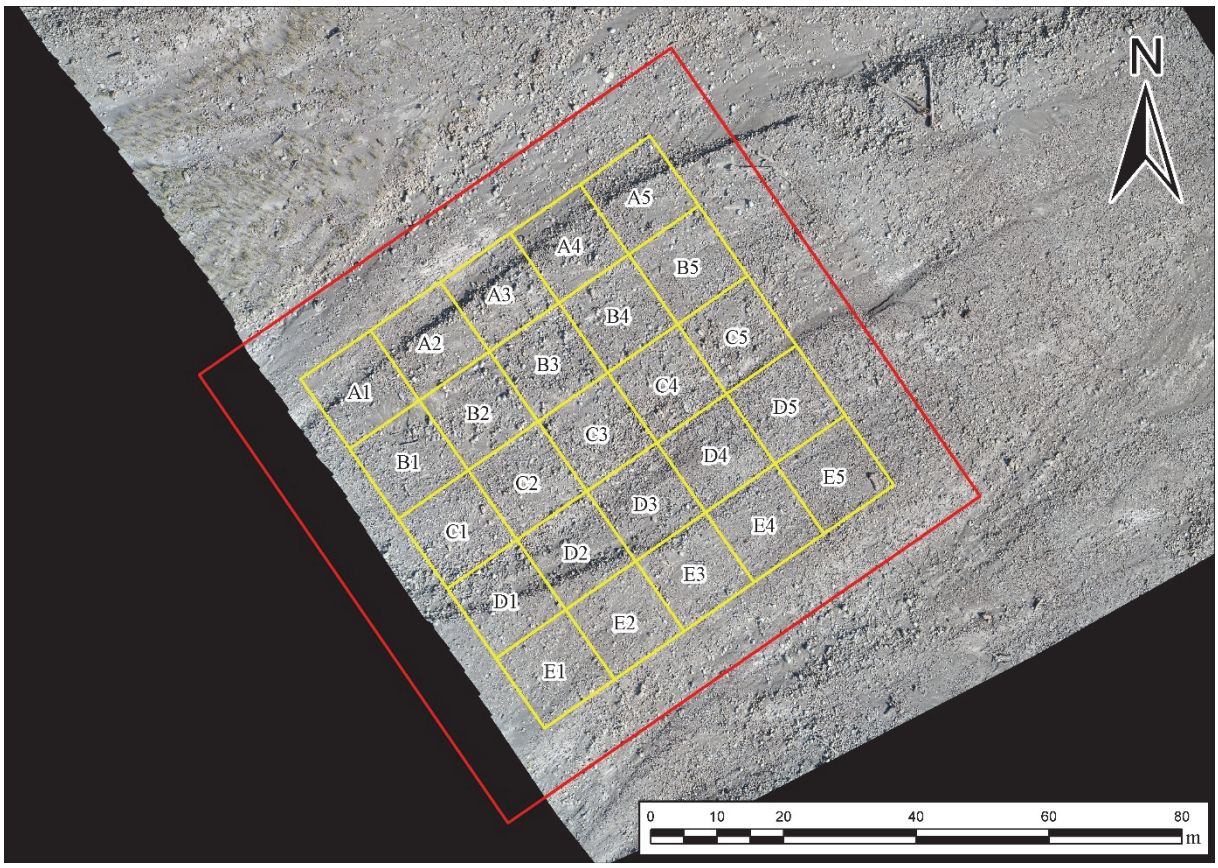


圖 3-3.6 無人飛機航拍正射影像產製成果 (8 時)

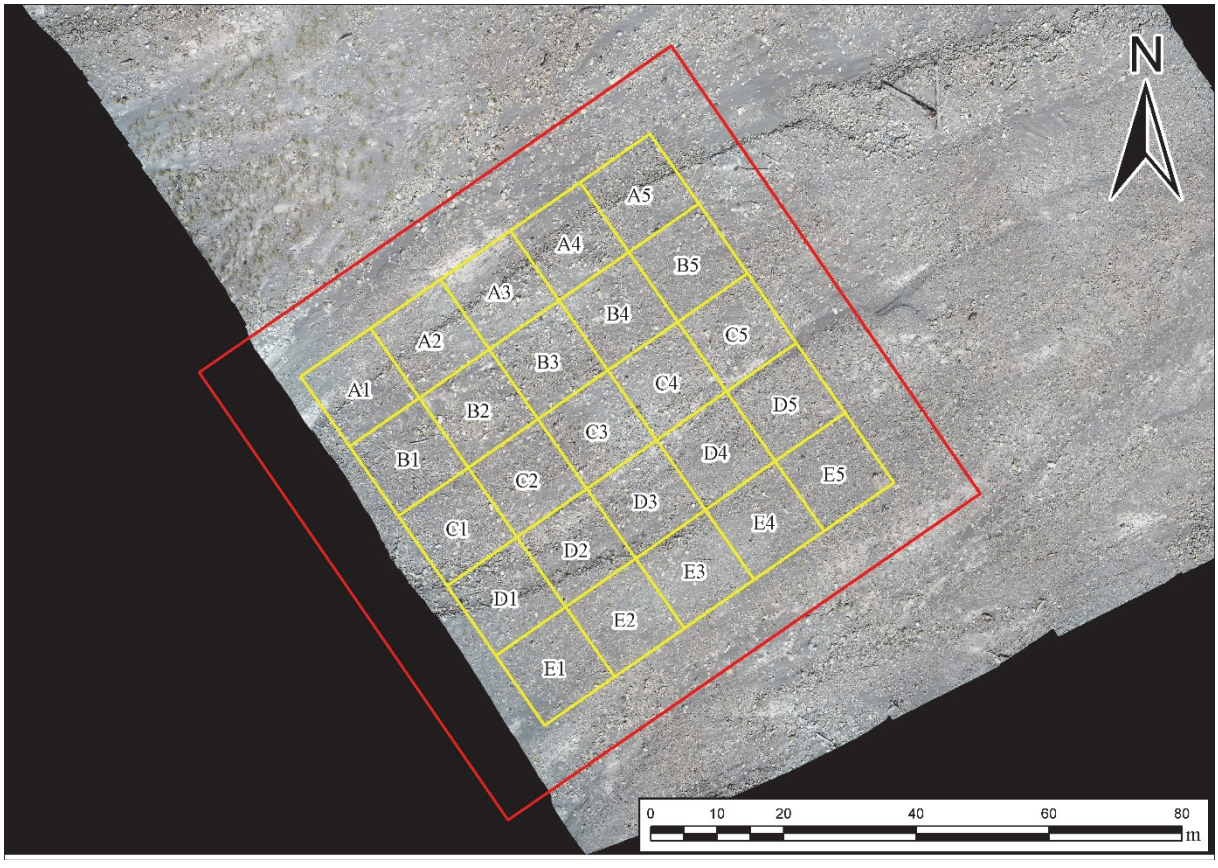


圖 3-3.7 無人飛機航拍正射影像產製成果 (11 時)

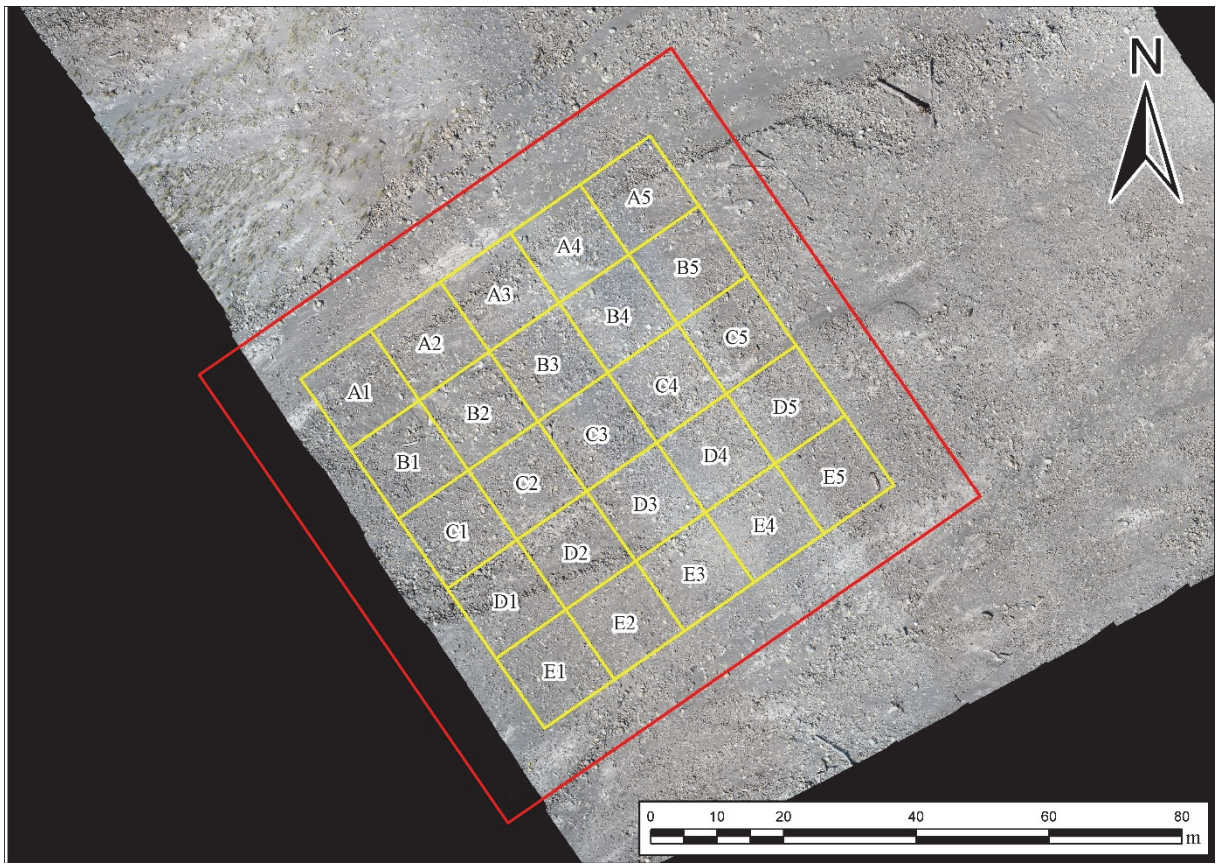


圖 3-3.8 無人飛機航拍正射影像產製成果 (14 時)

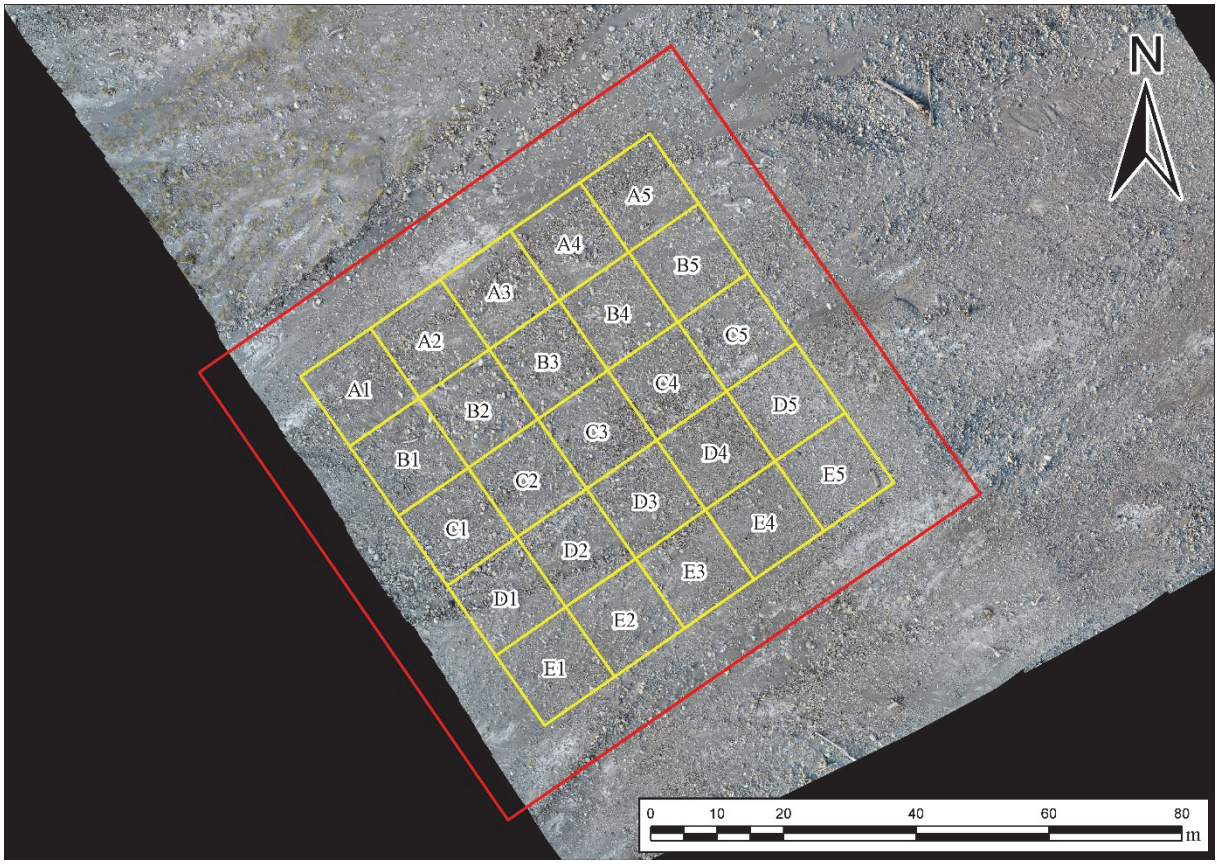


圖 3-3.9 無人飛機航拍正射影像產製成果 (17 時)

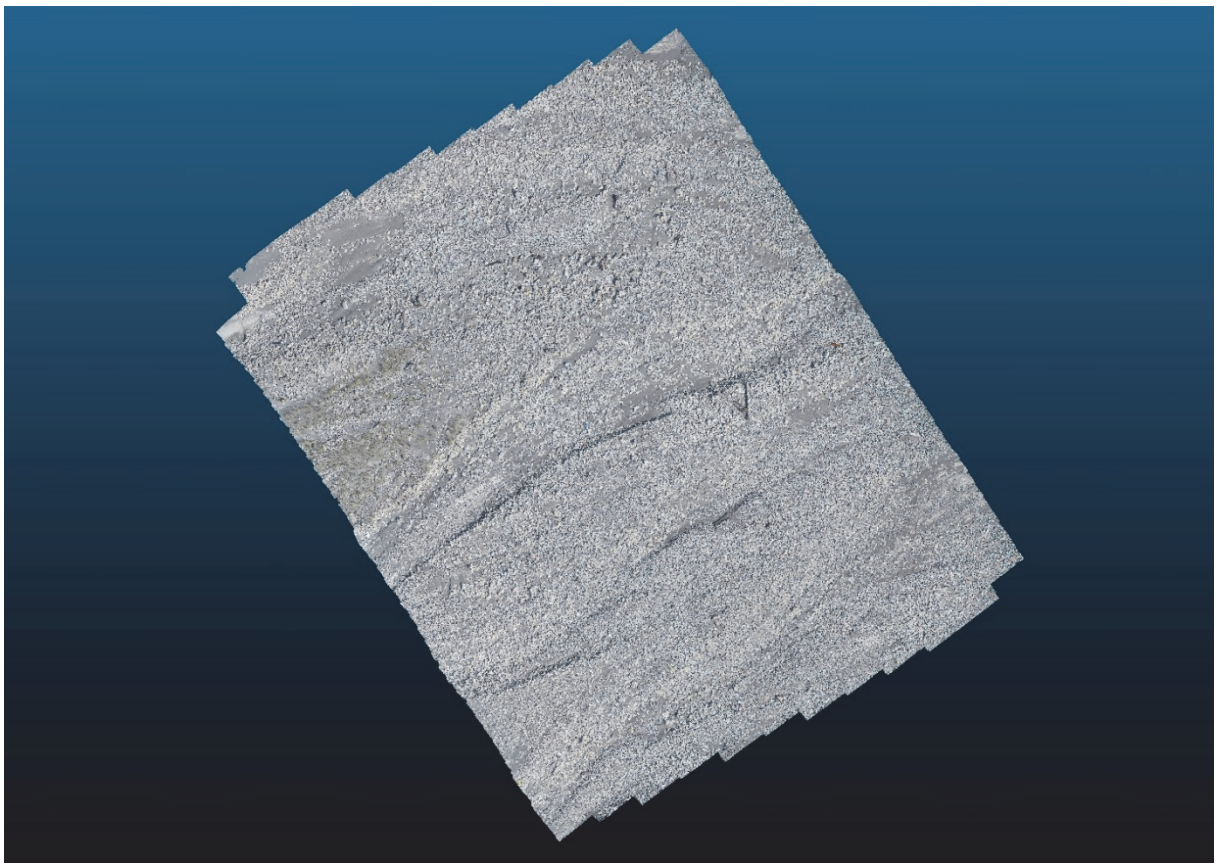


圖 3-3.10 無人飛機航拍三維點雲產製成果 (8 時)

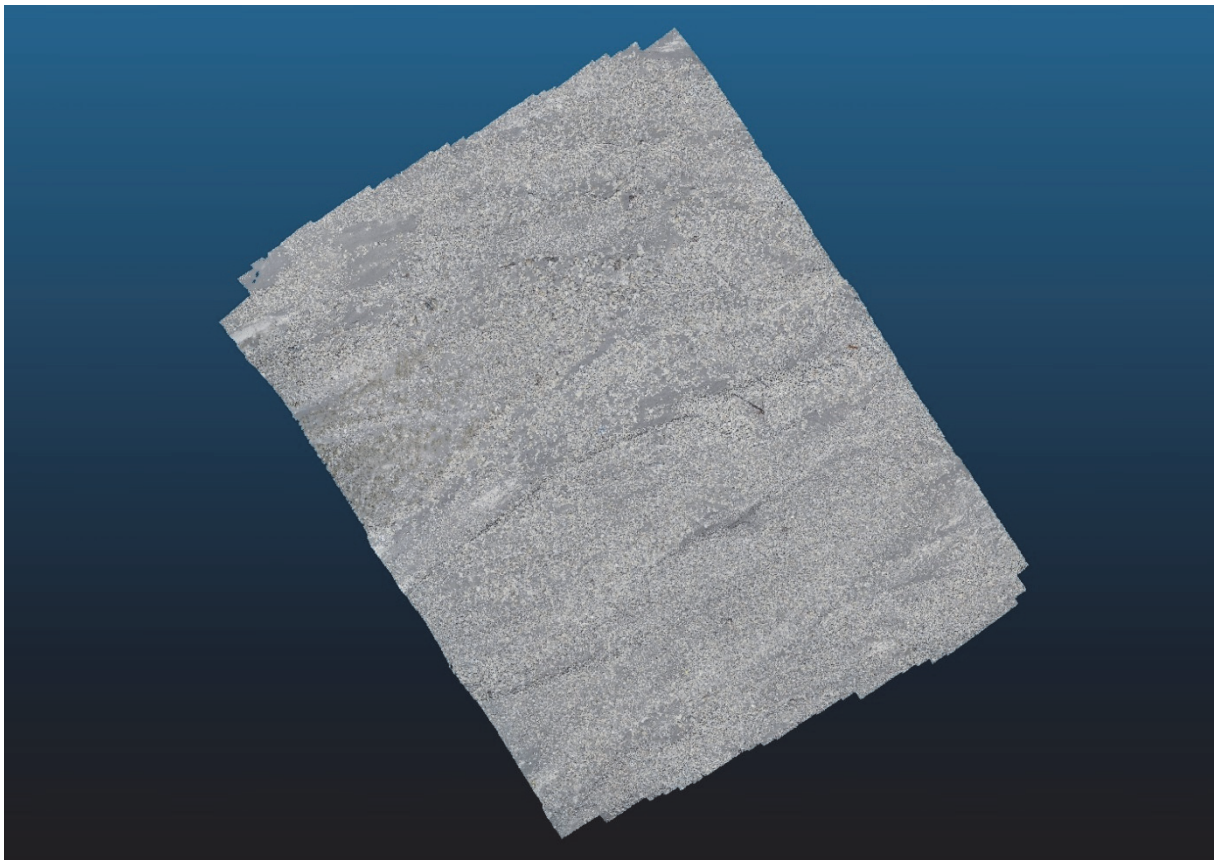


圖 3-3.11 無人飛機航拍三維點雲產製成果 (11 時)

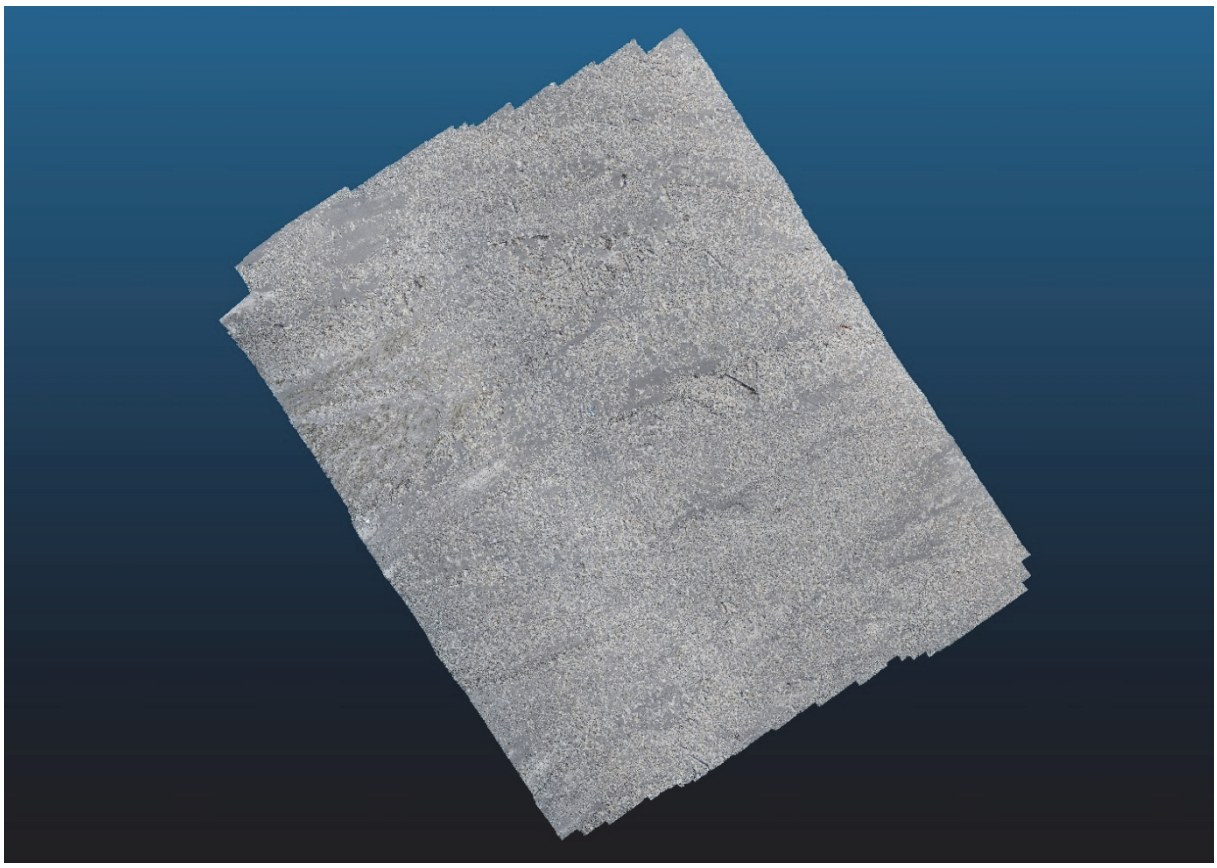


圖 3-3.12 無人飛機航拍三維點雲產製成果 (14 時)

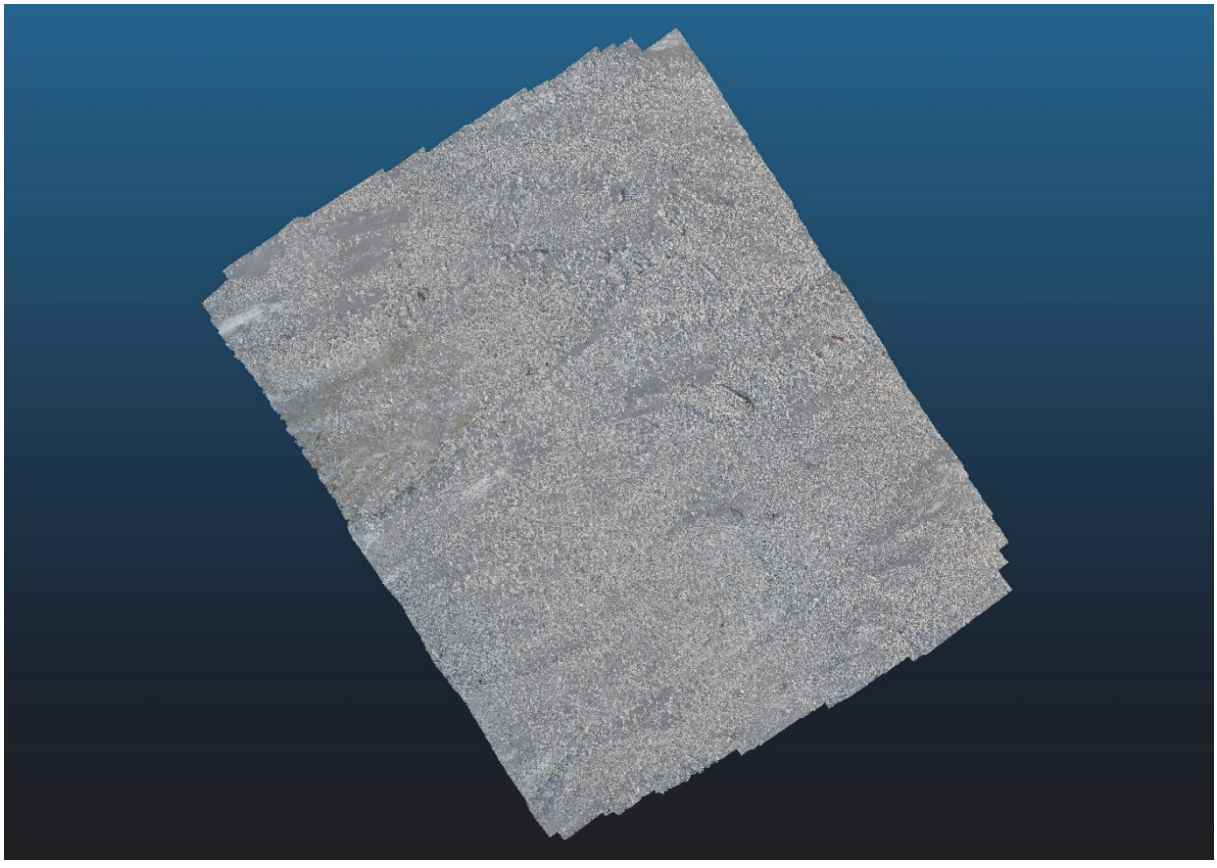


圖 3-3.13 無人飛機航拍三維點雲產製成果 (17 時)

第四章　粒徑影像判釋

第一節　粒徑影像判釋軟體比較分析

本計畫團隊於 108 年度分別利用瑞士蘇黎世聯邦理工學院(ETH Zurich)之 M. Detert & V. Weitbrecht 於 2012 年發表之免付費影像判釋軟體 BASEGRAIN，以及 2005 年由英國拉夫堡大學地理系的 David Graham 博士，Ian Reid 教授和 Stephen Rice 博士研發之影像判釋軟體 Digital Gravelometer 來進行研究區 UAV 航拍正射影像之河床表層粒徑判釋。為釐清兩套軟體(BASEGRAIN 與 Digital Gravelometer)的基本判釋能力，以寶來區荖濃溪某處河床樣區(圖 4-1.1)為例，針對兩套軟體判釋成果進行比較分析。此樣區位於河道中心偏左岸的淺灘上，有較多卵礫石未覆蓋的空洞區域，又因位處於淺水地區，因此沙洲含較多水份以及水灘，導致影像會呈現水波紋以及反光。



圖 4-1.1 河床樣區範例影像

BASEGRAIN 之判釋結果如圖 4-1.2 所示，其中標記為十字的部分，為軟體自動判釋卵礫石的粒徑分布所在位置，對照原始影像後可知，影像中間水灘的部分，伴隨著反光與水波紋，軟體將其判斷為細小卵礫石分布，以及影像右側以及左側沙洲的部分，則誤判為大顆礫石；軟體內建手動修正判釋結果與重新計算輸出的功能，若求更精進的判釋成果，可進行單張影像各別修正，避免輸出錯誤的結果。

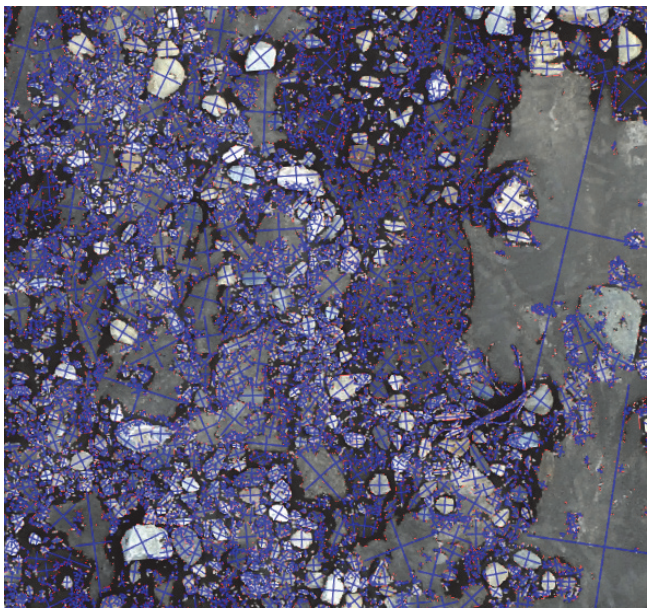


圖 4-1.2 BASEGRAIN 軟體之河床樣區判釋成果

Digital Gravelometer 軟體之判釋成果如圖 4-1.3 所示，對照圖 4-1.1 之原始影像可知，影像右側沙洲的部分，Digital Gravelometer 在判釋的過程中，已將該區域進行覆蓋避免誤判；而影像中央水灘的部分，即便影像上伴隨著反光與水波紋，但是軟體在進行自動判釋卵礫石的粒徑分布時，亦無將其判釋為卵礫石分佈，兩套軟體交叉比較分析，結果顯示 Digital Gravelometer 比 BASEGRAIN 有更佳的影像自動判釋能力與可信賴度。因此，本計畫以 Digital Gravelometer 軟體進行後續粒徑影像判釋分析。

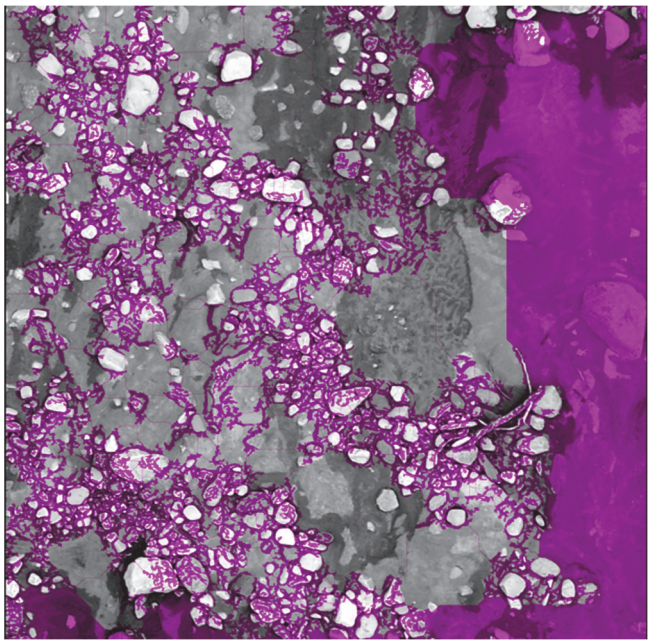


圖 4-1.3 Digital Gravelometer 軟體之河床樣區判釋成果

第二節 Digital Gravelometer 軟體簡介

Digital Gravelometer 由英國拉夫堡大學地理系的 David Graham 博士，Ian Reid 教授和 Stephen Rice 博士開發。Digital Gravelometer 能夠從數位影像中，快速地分析礫石沉積物。使用 Digital Gravelometer，可以快速的獲得與使用傳統現地調查測量技術類似的粒徑分布資訊。收集樣本與拍攝數位影像照片只需遵循一些簡單的原則和步驟。除了基本的尺寸分佈參數外，Digital Gravelometer 還可生成自行定義的報告，其中包含大量統計參數以及圖形顆粒尺寸分佈曲線和直方圖，使後續樣本的分析更加快速。系統畫面如圖 4-2.1 所示，此軟體基本操作程序說明如下：

1.建立一個專案項目，如圖 4-2.2 所示。

2.選擇載入預設影像及點選四個控制點，如圖 4-2.3 所示。

3.查看及確認影像相關信息，如圖 4-2.4 所示。

4.粒徑影像判釋，如圖 4-2.5 所示。

5.查看粒徑影像判釋報告，如圖 4-2.6 所示。

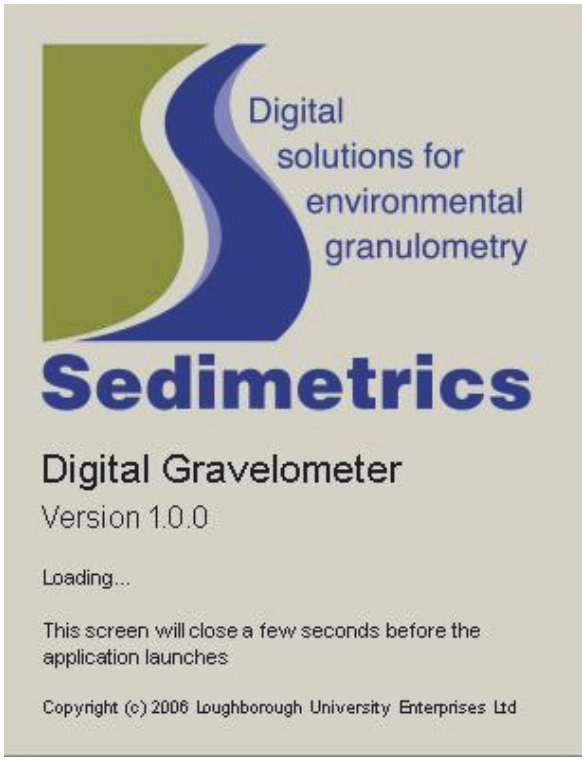


圖 4-2.1 Digital Gravelometer 影像判釋軟體系統畫面

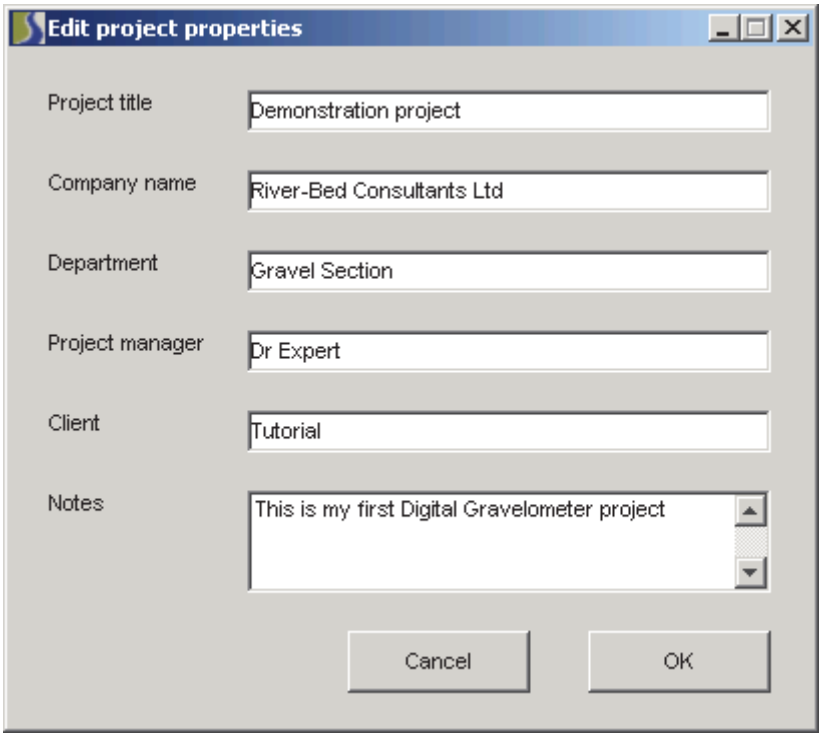


圖 4-2.2 專案項目建立範例畫面

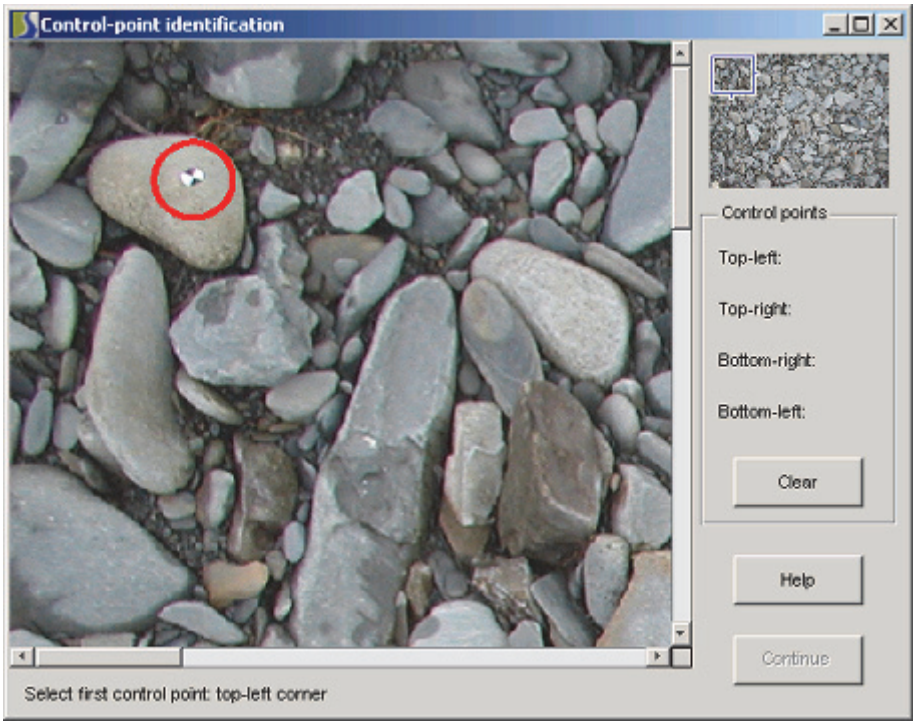
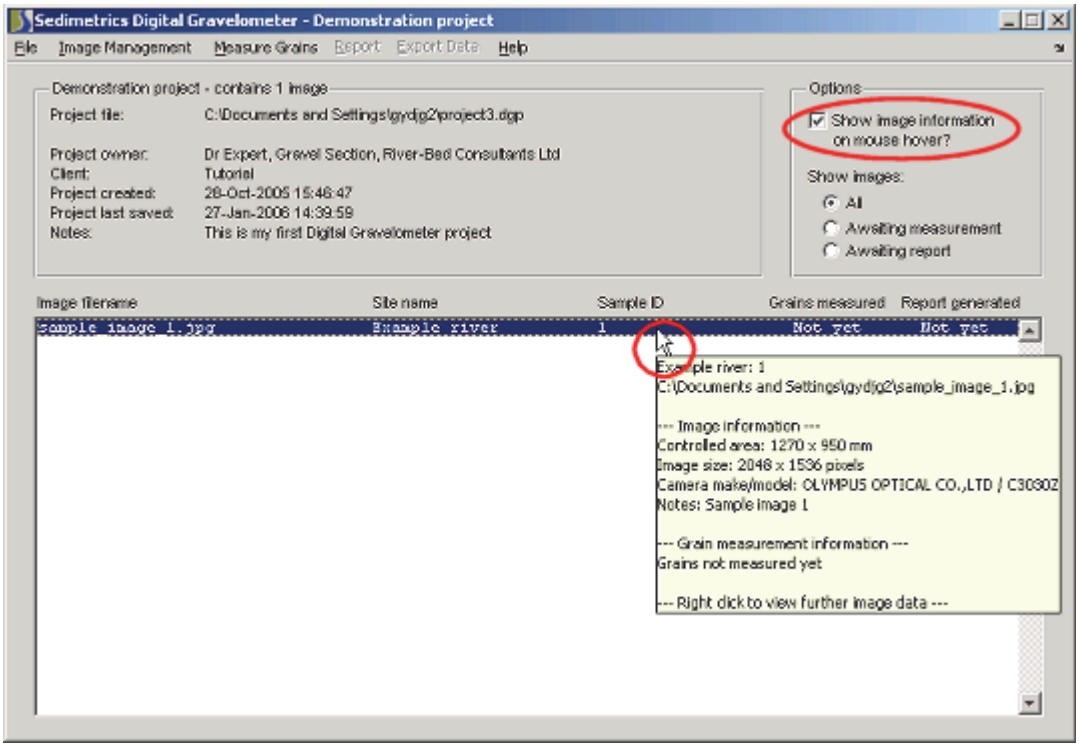


圖 4-2.3 載入預設影像及點選四個控制點



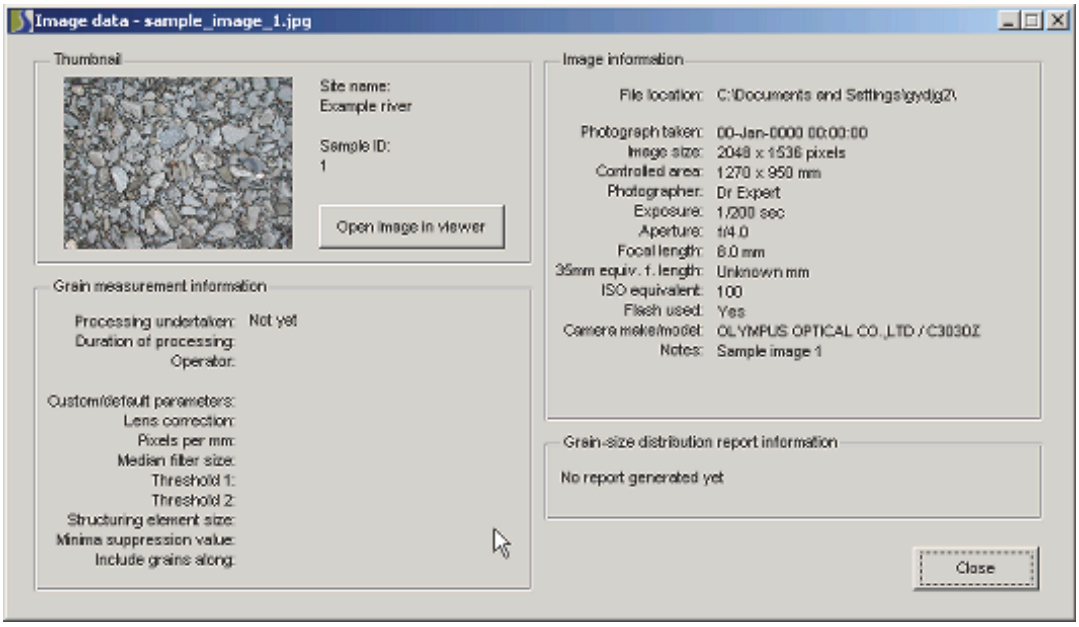


圖 4-2.4 查看及確認影像相關訊息

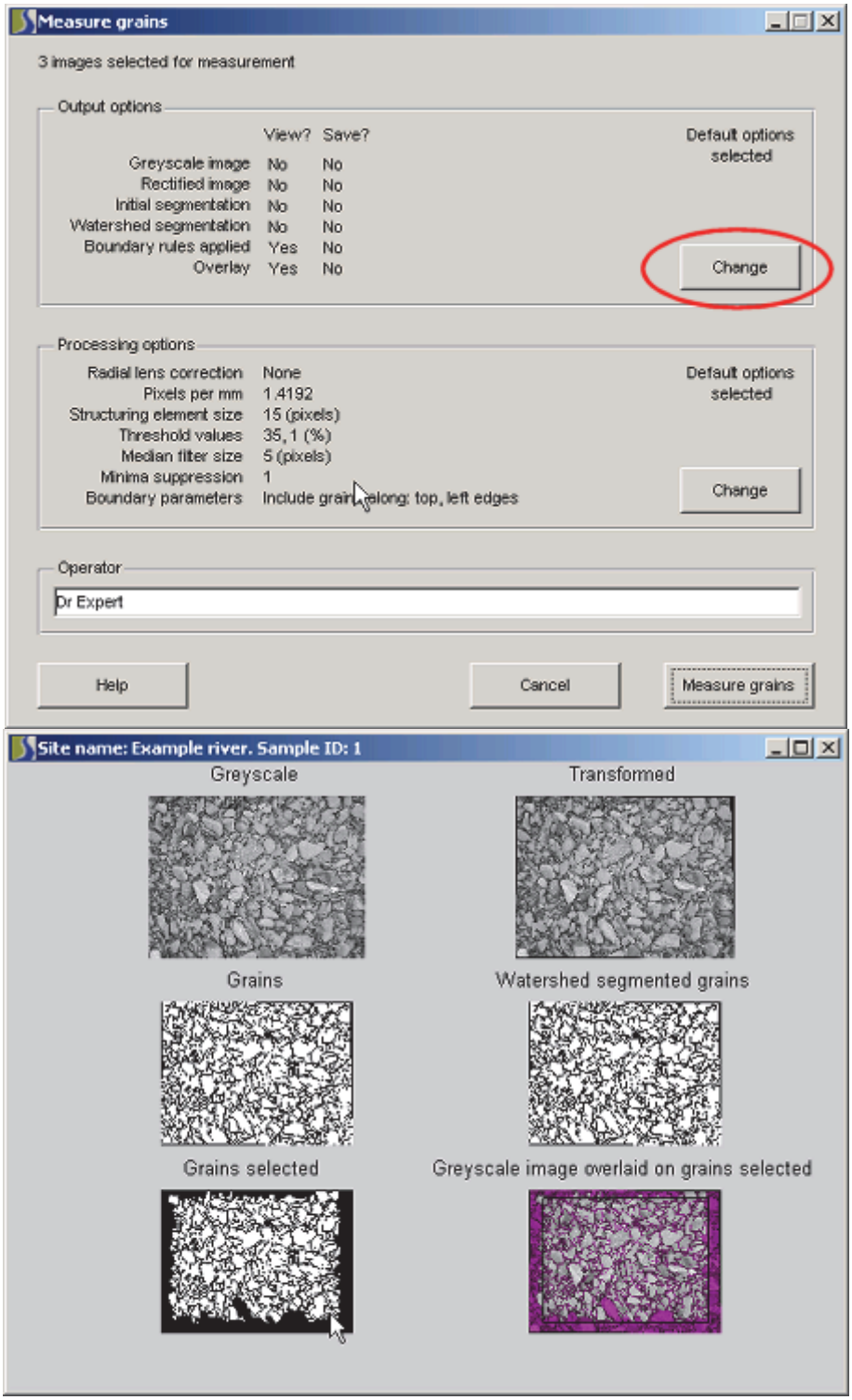
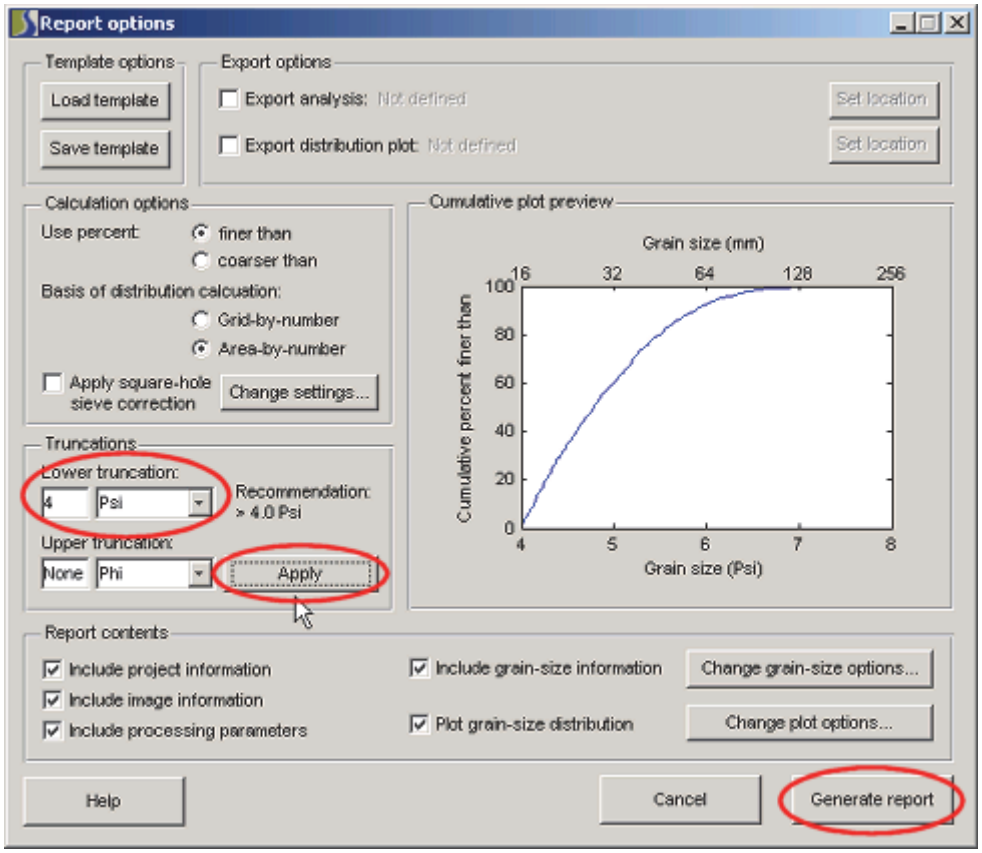

Measure grains
3 images selected for measurement
Output options
View? Save?
Default options selected
Greyscale image No No
Rectified image No No
Initial segmentation No No
Watershed segmentation No No
Boundary rules applied Yes No
Overlay Yes No
Change
Processing options
Radial lens correction None
Pixels per mm 1.4192
Structuring element size 15 (pixels)
Threshold values 35, 1 (%)
Median filter size 5 (pixels)
Minima suppression 1
Boundary parameters Include grains along: top, left edges
Default options selected
Change
Operator
Dr Expert
Help
Cancel
Measure grains
Site name: Example river. Sample ID: 1
Greyscale
Transformed
Grains
Watershed segmented grains
Grains selected
Greyscale image overlaid on grains selected

圖 4-2.5 粒徑影像判釋



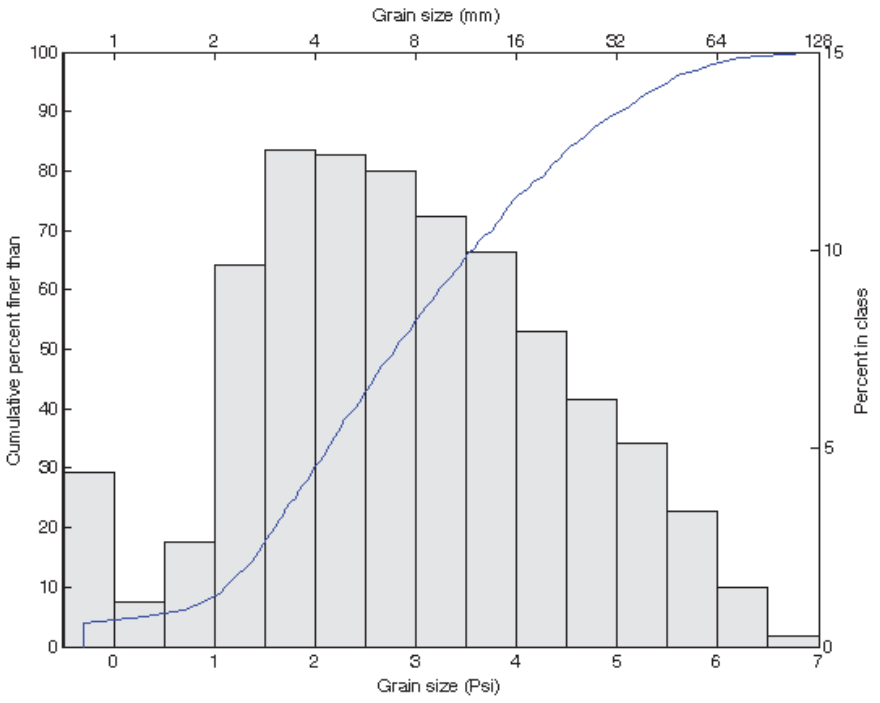


圖 4-2.6 粒徑影像判釋報告

Digital Gravelometer 軟體影像處理之程序流程如圖 4-2.7 所示 (Graham et al., 2005a)，軟體內主要 5 個參數為：中值濾波(Median filter)矩陣大小值 m (預設值 m=3 pixels)、底帽轉換(Bottom-hat)結構元素大小值 s (預設值 s=15 pixels)、影像二元化門檻值 T1 (預設值 T1=35%)、影像二元化門檻值 T2 (預設值 T2=1%)、分水嶺最小深度門檻值 w (預設值 w=1)。

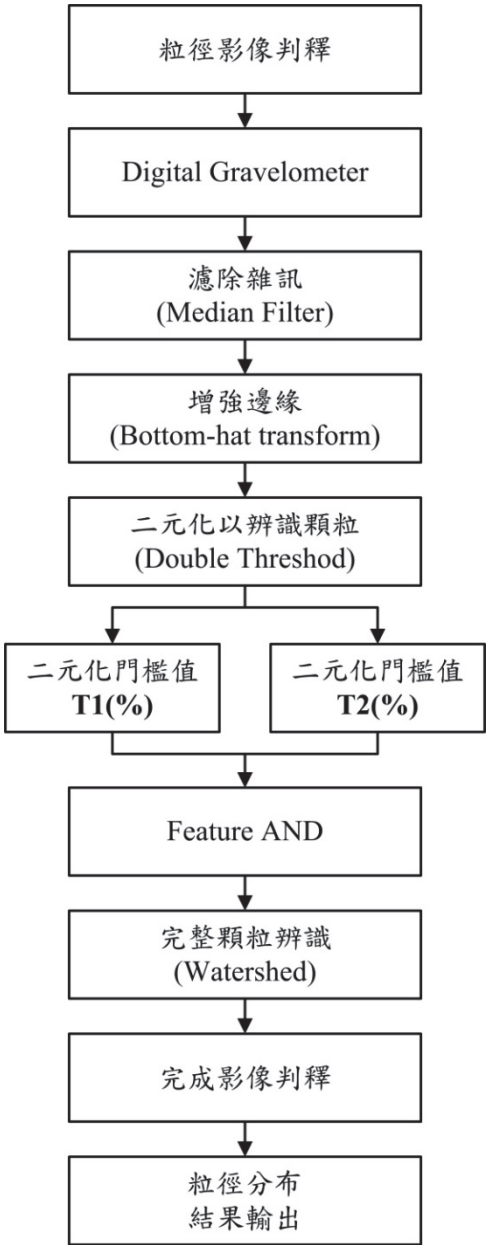


圖 4-2.7 Digital Gravelometer 影像處理流程

第三節　粒徑影像判釋成果說明

本計畫團隊於 108 年度針對不同航高之最小可判釋粒徑進行分析比較，圖 4-3.1 為判釋結果比較，以航高 25 公尺為例，最小可判釋粒徑大約為 3 公分，約略為影像解析度(0.81 公分)之 3.7 倍；航高 50 公尺時，最小可判釋粒徑大約為 8 公分，約略為影像解析度(1.62 公分)之 5 倍；至於航高 100 公尺時，最小可判釋粒徑大約為 15 公分，大約為影像解析度(2.92 公分)之 5.1 倍；航高 200 公尺時，最小可判釋粒徑大約為 28 公分，約略為影像解析度(5.53 公分)之 5.1 倍。綜合上述，在本計畫 108 年度的航高範圍(25m～200m)內，利用影像分析之最小判釋粒徑大致為影像解析度之 3～5 倍。

整體來說，影像粒徑分析之判釋正確性雖明顯受到不同航高產製影像解析度影響外，航拍時之環境光源條件是否能讓粒徑顆粒與周邊物體形成較明顯之色差對比亦為影像判釋品質之關鍵因素。因此，本計畫 109 年度進行四種不同日照光源角度 (8 時、11 時、14 時、17 時)之 UAV 產製影像河床材料判釋分析。採用之影像判釋參數則依據 108 年度研究成果，均勻細顆粒群(Uniform fine soil)最佳參數為：m=5 pixels，s=15 pixels，T1=35%，T2=1%，w=1；均勻粗顆粒群(Uniform coarse soil)最佳參數為：m=9 pixels，s=8 pixels，T1=35%，T2=2%，w=3；級配好(Graded soil)類別最佳參數為：m=9 pixels，s=8 pixels，T1=35%，T2=2%，w=3；級配良好(Well-graded soil)類別最佳參數為：m=9 pixels，s=8 pixels，T1=35%，T2=2%，w=3，4 個土壤特性分群中除均勻細顆粒群外，其他 3 群類別皆可以採用同一組最佳參數。

表 4-3.1～ 表 4-3.4 分別為 8 時、11 時、14 時、17 時不同光源之影像判釋成果，表 4-3.1 顯示若檢視個別指標粒徑之誤差率，則大、小顆粒判釋結果有所差異，在屬於較小顆粒之 D_{16} 方面，25 個調查樣區有 7 個樣區誤差率大於 50%，誤差率略為偏高，原因應係現場調查之 D_{16} 粒徑值大抵介於 1 ～ 4 公分，約略在最小可判釋粒徑值附近，其中 25 個調查樣區有 19 個樣區 D_{16} 小於最小可判釋粒徑值，因此 D_{16} 之判釋誤差率略高； D_{50} 方面，25 個調查樣區僅有 2 個誤差率大於

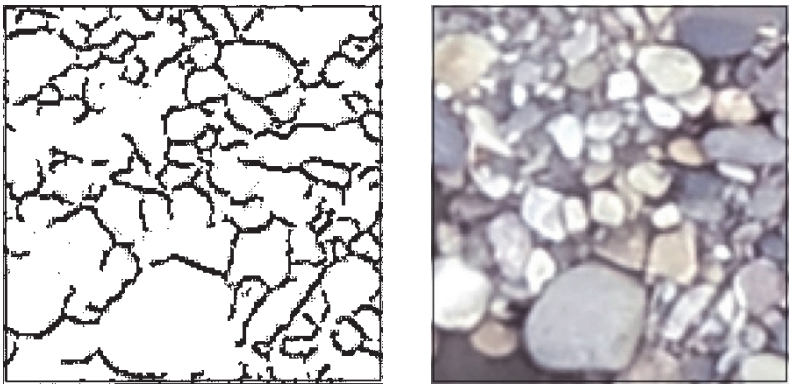
50%，判釋誤差率明顯較D_{16}成果為佳；在D_{84}及D_{90}方面，則 25 個調查樣區全數誤差率皆小於 50%。整體來說，判釋誤差率隨粒徑尺寸增加而下降，D_{16}誤差平均值為 51.16%，D_{50}誤差平均值為 28.56%，D_{84}誤差平均值為 17.63%，D_{90}誤差平均值為 10.51%。表 4-3.2 呈現近午光源 11 時之判釋結果，D_{16}方面，25 個調查樣區有 6 個樣區誤差率大於 50%；D_{50}方面，25 個調查樣區僅有 1 個誤差率大於 50%；在D_{84}及D_{90}方面，25 個調查樣區全數誤差率皆小於 50%。整體來說，判釋誤差率同樣隨粒徑尺寸增加而下降，D_{16}誤差平均值為 44.41%，D_{50}誤差平均值為 24.02%，D_{84}誤差平均值為 12.47%，D_{90}誤差平均值為 6.08%。表 4-3.3 呈現 14 時之判釋結果，D_{16}方面，25 個調查樣區有 7 個樣區誤差率大於 50%；D_{50}方面，25 個調查樣區有 3 個誤差率大於 50%；在D_{84}及D_{90}方面，25 個調查樣區全數誤差率皆小於 50%。整體判釋誤差率同樣隨粒徑尺寸增加而下降，D_{16}誤差平均值為 44.75%，D_{50}誤差平均值為 27.64%，D_{84}誤差平均值為 11.03%，D_{90}誤差平均值為 9.49%。表 4-3.4 呈現接近傍晚 17 時之判釋結果，D_{16}方面，25 個調查樣區有 13 個樣區誤差率大於 50%，判釋成效不佳；D_{50}方面，25 個調查樣區有 1 個誤差率大於 50%；在D_{84}及D_{90}方面，25 個調查樣區全數誤差率皆小於 50%。整體判釋誤差率同樣隨粒徑尺寸增加而下降，D_{16}誤差平均值為 61.91%，D_{50}誤差平均值為 30.76%，D_{84}誤差平均值為 14.04%，D_{90}誤差平均值為 15.29%。

整體來說，4 種光源以接近正午前後(11 時及 14 時)呈現相對較佳的判釋成果，D_{16}誤差平均值由 51.16% (8 時)及 61.91% (17 時)降為 44.41% (11 時)及 44.75% (14 時)；D_{50}誤差平均值由 28.56% (8 時)及 30.76% (17 時)降為 24.02% (11 時)及 27.64% (14 時)；D_{84}誤差平均值由 17.63% (8 時)及 14.04% (17 時)降為 12.47% (11 時)及 11.03% (14 時)；D_{90}誤差平均值由 10.51% (8 時)及 15.29% (17 時)降為 6.08% (11 時)及 9.49% (14 時)。正午前後(11 時及 14 時)日照較接近正射光源，8 時(接近日出)及 17 時(接近日落)則為斜射光源，陽光斜照時，顆粒周邊之陰影遮蔽面積較大，小粒徑容易受到周遭陰影的遮蔽影響造成誤判，正射光

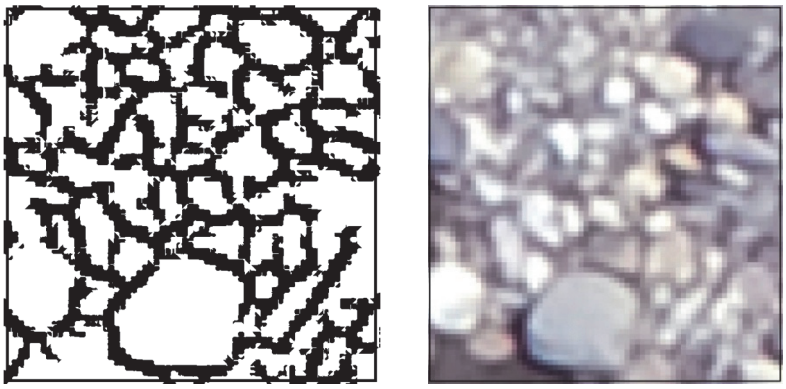
源對於小顆粒間之區隔對比有明顯助益。



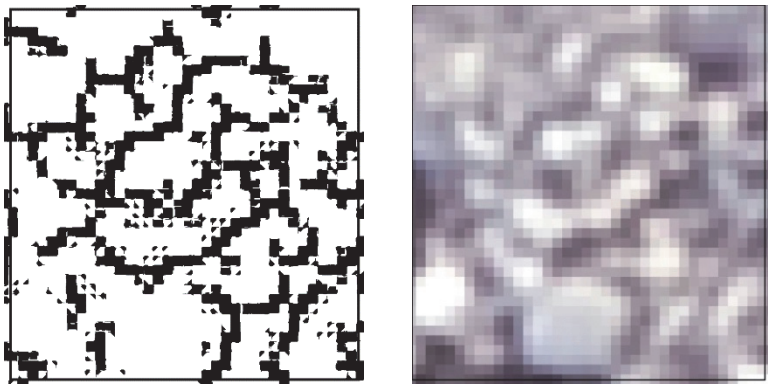
(a) 25m



(b) 50m



(c) 100m



(d) 200m

圖 4-3.1 不同航高影像之粒徑判釋成果比較

表 4-3.1 影像判釋指標粒徑之分析成果(光源 8 時)

特徵粒徑	D_{16} (mm)			D_{50} (mm)			D_{84} (mm)			D_{90} (mm)		
樣區	現調	影像(08)	誤差百分比%	現調	影像(08)	誤差百分比%	現調	影像(08)	誤差百分比%	現調	影像(08)	誤差百分比%
A1	13	16	24.02	37	47	28.61	121	135	11.20	163	192	17.77
A2	15	23	55.33	51	35	-30.12	171	136	-20.39	222	204	-8.08
A3	24	29	17.72	60	66	8.89	211	217	3.00	264	206	-22.03
A4	23	29	26.89	73	43	-40.36	176	201	14.62	217	238	9.58
A5	17	27	62.57	53	30	-42.58	154	142	-7.89	193	158	-17.70
B1	33	47	42.69	79	98	23.10	171	147	-13.90	207	228	10.03
B2	23	43	89.25	72	38	-47.89	217	180	-17.43	284	238	-16.19
B3	21	30	46.15	67	39	-42.58	213	121	-43.11	271	268	-0.87
B4	26	30	16.72	71	68	-3.60	173	193	11.64	224	201	-10.10
B5	25	31	26.99	75	58	-22.59	159	136	-14.21	200	182	-8.94
C1	38	46	19.53	108	68	-37.34	267	149	-44.27	326	358	9.71
C2	33	42	28.31	85	132	55.36	226	132	-41.62	286	254	-11.15
C3	41	57	41.66	101	131	29.40	252	217	-13.53	310	290	-6.43
C4	48	62	29.16	98	141	42.89	236	199	-15.78	282	308	9.50
C5	45	56	25.85	101	158	57.55	230	249	8.46	283	259	-8.31
D1	27	40	49.41	82	51	-37.14	212	164	-23.04	250	211	-15.48
D2	30	40	33.26	88	53	-39.64	207	233	12.12	246	198	-19.42
D3	26	43	67.63	77	66	-13.68	179	136	-24.17	241	224	-6.92
D4	29	35	19.25	71	78	9.49	158	137	-12.72	194	164	-15.09
D5	29	34	17.98	67	78	16.32	145	125	-13.35	175	152	-13.00
E1	10	30	190.50	39	42	7.07	133	102	-23.60	172	185	7.80
E2	10	28	181.32	32	37	15.84	146	107	-26.81	193	190	-1.76
E3	14	18	27.84	37	48	29.06	112	103	-7.46	164	169	3.02
E4	18	37	111.85	56	51	-9.34	125	131	5.00	160	166	3.87
E5	22	29	27.10	57	71	23.45	121	108	-11.41	162	178	9.93
誤差平均值			51.16			28.56			17.63			10.51

表 4-3.2 影像判釋指標粒徑之分析成果(光源 11 時)

特徵粒徑	D_{16} (mm)			D_{50} (mm)			D_{84} (mm)			D_{90} (mm)		
樣區	現調	影像(11)	誤差百分比%	現調	影像(11)	誤差百分比%	現調	影像(11)	誤差百分比%	現調	影像(11)	誤差百分比%
A1	13	15	14.20	37	36	-2.89	121	127	4.69	163	162	-0.89
A2	15	18	22.74	51	41	-18.36	171	143	-16.12	222	216	-2.82
A3	24	21	-13.49	60	74	23.01	211	203	-3.78	264	233	-11.64
A4	23	27	15.34	73	40	-44.34	176	198	12.78	217	227	4.77
A5	17	35	109.43	53	37	-29.06	154	134	-12.67	193	189	-1.95
B1	33	45	35.17	79	92	15.57	171	131	-23.09	207	202	-2.51
B2	23	42	82.03	72	95	31.53	217	208	-4.30	284	230	-18.82
B3	21	29	37.93	67	38	-44.05	213	262	23.27	271	265	-2.04
B4	26	27	5.97	71	67	-5.86	173	154	-11.21	224	249	11.02
B5	25	29	16.51	75	65	-12.94	159	188	18.28	200	212	5.55
C1	38	44	13.40	108	49	-55.22	267	221	-17.25	326	372	14.09
C2	33	40	21.49	85	125	47.10	226	258	13.95	286	276	-3.63
C3	41	56	39.26	101	129	27.29	252	213	-15.45	310	292	-5.62
C4	48	61	27.24	98	123	24.57	236	243	2.93	282	297	5.34
C5	45	58	29.36	101	141	40.35	230	255	10.92	283	302	6.75
D1	27	38	39.01	82	52	-36.36	212	249	17.20	250	216	-13.53
D2	30	39	27.02	88	44	-49.80	207	219	5.78	246	261	6.11
D3	26	45	77.45	77	61	-20.05	179	145	-19.07	241	258	7.30
D4	29	21	-26.09	71	68	-3.60	158	159	0.67	194	183	-5.61
D5	29	27	-5.96	67	67	-0.36	145	139	-3.60	175	177	1.52
E1	10	28	172.38	39	34	-14.18	133	109	-17.96	172	167	-2.95
E2	10	24	138.31	32	36	10.45	146	115	-21.47	193	201	4.20
E3	14	11	-17.93	37	36	-3.10	112	128	14.16	164	155	-5.42
E4	18	37	109.00	56	41	-27.96	125	115	-7.88	160	155	-2.68
E5	22	25	13.42	57	65	12.52	121	138	13.34	162	154	-5.17
誤差平均值			44.41			24.02			12.47			6.08

表 4-3.3 影像判釋指標粒徑之分析成果(光源 14 時)

特徵粒徑	D_{16} (mm)			D_{50} (mm)			D_{84} (mm)			D_{90} (mm)		
樣區	現調	影像(14)	誤差百分比%	現調	影像(14)	誤差百分比%	現調	影像(14)	誤差百分比%	現調	影像(14)	誤差百分比%
A1	13	16	23.10	37	38	4.51	121	133	9.69	163	164	0.29
A2	15	19	28.03	51	41	-19.45	171	132	-22.52	222	237	6.56
A3	24	20	-16.89	60	78	28.93	211	226	7.16	264	275	4.05
A4	23	26	12.71	73	37	-49.70	176	205	16.66	217	233	7.32
A5	17	37	121.81	53	36	-32.44	154	188	22.32	193	203	5.41
B1	33	47	40.85	79	93	17.45	171	134	-21.43	207	206	-0.54
B2	23	46	99.68	72	97	35.08	217	253	16.29	284	240	-15.47
B3	21	27	28.32	67	34	-49.17	213	271	27.59	271	264	-2.45
B4	26	26	2.20	71	63	-11.16	173	177	2.35	224	260	16.02
B5	25	31	27.15	75	65	-12.60	159	186	17.14	200	217	8.35
C1	38	48	24.51	108	50	-54.00	267	276	3.48	326	373	14.51
C2	33	38	15.88	85	132	56.27	226	263	16.23	286	290	1.34
C3	41	58	42.02	101	148	46.53	252	264	4.90	310	279	-9.89
C4	48	67	40.03	98	132	34.49	236	258	9.52	282	272	-3.29
C5	45	64	43.79	101	144	42.75	230	274	19.16	283	302	6.98
D1	27	46	70.36	82	51	-38.00	212	262	23.48	250	211	-15.54
D2	30	37	20.83	88	43	-51.47	207	226	8.99	246	272	10.60
D3	26	48	89.28	77	60	-21.50	179	198	10.54	241	279	15.86
D4	29	19	-34.97	71	66	-7.45	158	165	5.00	194	239	23.35
D5	29	29	-1.11	67	66	-1.54	145	157	8.57	175	238	36.07
E1	10	26	154.70	39	33	-14.61	133	159	19.20	172	261	52.31
E2	10	26	165.53	32	38	17.19	146	140	-4.62	193	209	8.22
E3	14	12	-11.11	37	40	7.28	112	133	18.79	164	186	13.25
E4	18	37	109.06	56	41	-28.22	125	148	18.12	160	198	24.31
E5	22	28	22.99	57	66	15.60	121	169	39.21	162	210	29.59
誤差平均值			44.75			27.64			11.03			9.49

表 4-3.4 影像判釋指標粒徑之分析成果(光源 17 時)

特徵粒徑	D_{16} (mm)			D_{50} (mm)			D_{84} (mm)			D_{90} (mm)		
樣區	現調	影像(17)	誤差百分比%	現調	影像(17)	誤差百分比%	現調	影像(17)	誤差百分比%	現調	影像(17)	誤差百分比%
A1	13	18	33.89	37	52	41.39	121	145	19.98	163	207	26.56
A2	15	28	82.98	51	30	-41.29	171	129	-24.14	222	219	-1.54
A3	24	37	53.05	60	62	2.15	211	234	11.03	264	218	-17.36
A4	23	26	12.93	73	46	-36.85	176	207	17.51	217	255	17.59
A5	17	28	67.22	53	47	-10.24	154	139	-9.65	193	165	-14.15
B1	33	47	41.93	79	104	31.50	171	152	-11.29	207	240	16.21
B2	23	45	98.23	72	41	-43.04	217	182	-16.46	284	250	-11.73
B3	21	37	78.50	67	45	-32.54	213	125	-41.32	271	287	6.04
B4	26	38	47.48	71	73	2.60	173	204	17.50	224	220	-1.62
B5	25	37	50.96	75	60	-19.88	159	137	-13.44	200	195	-2.66
C1	38	48	24.26	108	71	-34.32	267	159	-40.59	326	378	16.03
C2	33	48	45.96	85	146	72.84	226	143	-36.85	286	279	-2.39
C3	41	68	66.90	101	144	43.02	252	227	-9.61	310	326	5.16
C4	48	67	41.37	98	146	47.88	236	202	-14.17	282	343	21.79
C5	45	58	28.51	101	149	47.70	230	254	10.46	283	378	33.67
D1	27	37	35.67	82	56	-32.05	212	164	-22.97	250	282	12.98
D2	30	36	20.00	88	55	-37.74	207	235	13.10	246	274	11.41
D3	26	49	92.29	77	63	-17.62	179	148	-17.29	241	266	10.71
D4	29	49	70.29	71	82	15.40	158	145	-8.26	194	214	10.37
D5	29	31	7.32	67	84	25.50	145	128	-11.32	175	201	15.16
E1	10	27	159.85	39	50	26.90	133	108	-18.63	172	209	21.60
E2	10	26	166.39	32	42	31.19	146	117	-20.36	193	257	32.99
E3	14	18	31.51	37	49	31.92	112	108	-3.05	164	213	29.85
E4	18	37	112.92	56	59	4.27	125	135	7.47	160	263	65.10
E5	22	40	77.42	57	80	39.29	121	123	1.29	162	285	75.93
誤差平均值			61.91			30.76			14.04			15.29

第五章　點雲糙度特性粒徑分析

應用無人飛機航拍正射影像進行表層粒徑影像判釋分析，仍有可能受到影像色調、對比或解析度之影響而呈現判釋偏差。因此本計畫於 108 年度嘗試以無人飛機航拍透過立體影像對特徵點匹配後建立之密集點雲，進行空間統計分析，利用點雲糙度特性來推估調查樣區之指標粒徑。

第一節　點雲資料前處理

原始點雲在進行糙度特性分析之前需先將點雲之離群值(outlier values)及植生範圍之點雲濾除，圖 5-1.1 ~ 圖 5-1.2 分別為調查樣區點雲平面分布及側視分布，圖中可明顯看出植生區域之點雲分布，這部分植生區點雲在進一步進行粒徑判釋分析前應先加以濾除。離群值可透過設定河床表層點雲高度之合理分布範圍加以濾除，至於植生範圍之點雲資料，本計畫利用綠度指數(Greeness)作為初步篩選植生覆蓋區域之依據,綠度指數係以可見光波段的綠光與紅光來計算，計算公式如下：

$$Greeness = \frac{G + R}{G - R} \tag{5-1}$$

其中 R 為紅光波段影像灰值，G 為綠光波段影像灰值。完成初步植生覆蓋區域濾除後，再輔以人工檢核確認濾除之正確性與合理性。

第二節　點雲糙度分析指標粒徑

針對點雲之糙度特性，本計畫主要分析標準偏差 σ_z，標準偏差係指在一特定區域內之點雲高程偏差(Heritage and Milan, 2009)，首先劃分特定尺寸網格，然後分析落於每個網格內點雲之高程標準偏差，分析示意如圖 5-2.1 所示。然而當點雲分布於非平坦河床時，標準偏差可能受到地形坡度影響而未能合適反映河床糙度特性，因此在標準偏差分析過程中需去除地形坡度趨勢之影響(detrend)。分析方法係透過計算點雲中每個點與指定大小核心距離(kernel)最近鄰域內的最

小二乘最佳擬合平面(least-squares best-fitting plane)之間的高程差異而得，分析示意如圖 5-2.2 所示，然後得到在特定範圍內去除平均坡度趨勢後之標準偏差高度(Aberle and Smart, 2003; Brasington et al., 2012; Storz-Peretz and Laronne, 2013)，進一步以 ToPCAT (Topographic Point Cloud Analysis Toolkit)來推估 4 種指標粒徑：D_{16} 、D_{50} 、D_{84} 、D_{90} 。

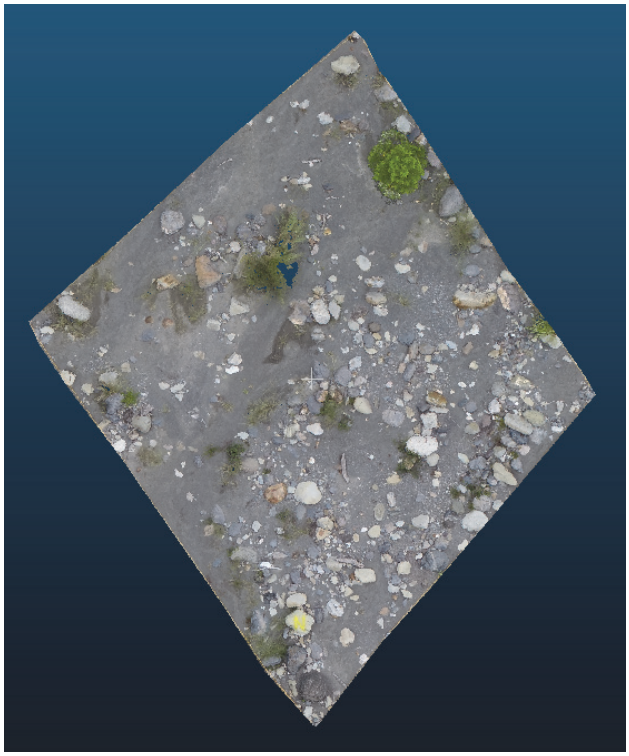


圖 5-1.1 河床調查樣區之點雲平面分布

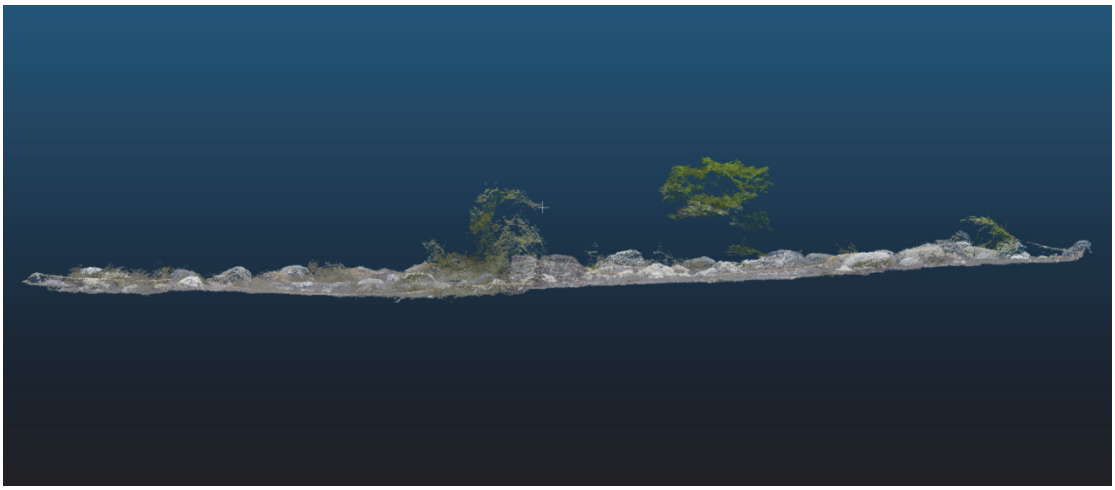
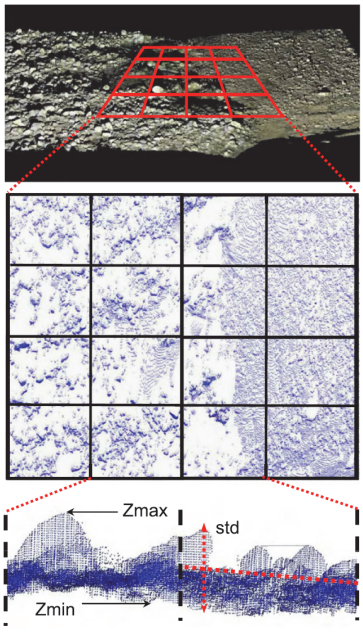
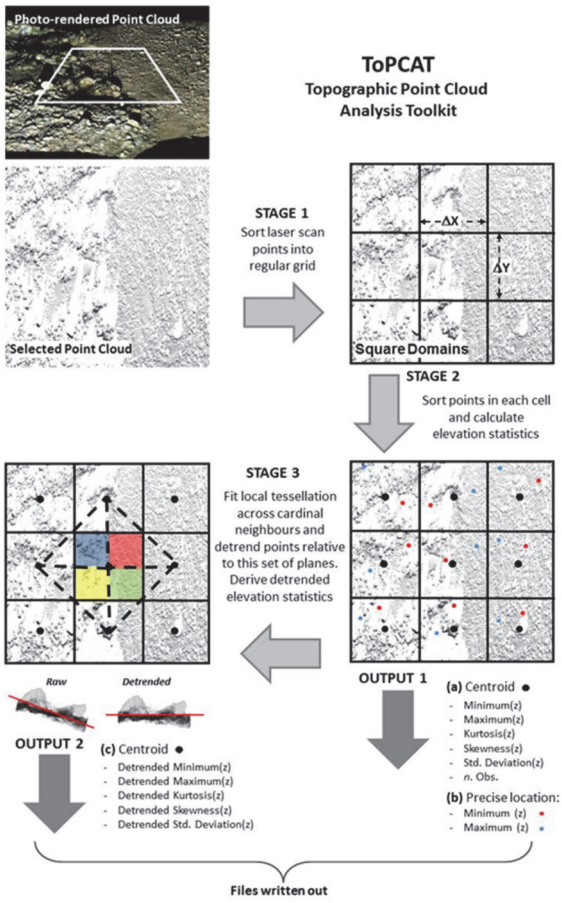


圖 5-1.2 河床調查樣區之點雲側視分布



資料來源：Rychkov et al., 2012

圖 5-2.1 點雲標準偏差之分析示意圖



資料來源：Brasington et al., 2012.

圖 5-2.2 點雲高程偏差分析示意圖

表 5-2.1～ 表 5-2.4 分別為 8 時、11 時、14 時、17 時不同光源之影像點雲分析成果，與第四章影像判釋結果類似，不同光源之影像點雲分析成果也有明顯差異，光源對點雲分析成果之影響明顯大於影像判釋分析。表 5-2.1 呈現 8 時之分析結果，在屬於較小顆粒之D_{16}方面，25 個調查樣區有 8 個樣區誤差率大於 50%，誤差率略為偏高；D_{50}方面，25 個調查樣區僅有 1 個誤差率大於 50%，判釋誤差率明顯較D_{16}成果為佳；在D_{84}及D_{90}方面，則 25 個調查樣區全數誤差率皆小於 50%。整體來說，判釋誤差率隨粒徑尺寸增加而下降，D_{16}誤差平均值為 46.50%，D_{50}誤差平均值為 21.76%，D_{84}誤差平均值為 16.13%，D_{90}誤差平均值為 11.77%。表 5-2.2 呈現近午光源 11 時之判釋結果，D_{16}方面，25 個調查樣區僅有 2 個樣區誤差率大於 50%；D_{50}方面，25 個調查樣區全數小於 50%；在D_{84}及D_{90}方面，25 個調查樣區全數誤差率皆小於 50%。整體來說，判釋誤差率同樣隨粒徑尺寸增加而下降，D_{16}誤差平均值為 22.09%，D_{50}誤差平均值為 17.84%，D_{84}誤差平均值為 13.85%，D_{90}誤差平均值為 13.15%。表 5-2.3 呈現 14 時之判釋結果，D_{16}方面，25 個調查樣區有 5 個樣區誤差率大於 50%；D_{50}方面，25 個調查樣區僅有 1 個誤差率大於 50%；在D_{84}及D_{90}方面，25 個調查樣區全數誤差率皆小於 50%。整體判釋誤差率同樣隨粒徑尺寸增加而下降，D_{16}誤差平均值為 27.06%，D_{50}誤差平均值為 16.87%，D_{84}誤差平均值為 14.92%，D_{90}誤差平均值為 15.18%。表 5-2.4 呈現接近傍晚 17 時之判釋結果，D_{16}方面，25 個調查樣區有 11 個樣區誤差率大於 50%，判釋成效不佳；D_{50}方面，25 個調查樣區有 1 個誤差率大於 50%；在D_{84}及D_{90}方面，25 個調查樣區全數誤差率皆小於 50%。整體判釋誤差率同樣隨粒徑尺寸增加而下降，D_{16}誤差平均值為 51.93%，D_{50}誤差平均值為 24.72%，D_{84}誤差平均值為 16.95%，D_{90}誤差平均值為 15.42%。整體來說，4 種光源以接近正午前後(11 時及 14 時)呈現相對較佳的判釋成果，D_{16}誤差平均值由 46.50% (8 時)及 51.93% (17 時)降為 22.09% (11 時)及 27.06% (14 時)；D_{50}誤差平均值由 21.76% (8 時)及 24.72% (17 時)降為 17.84% (11 時)及 16.87%

(14 時)；D_{84} 誤差平均值由 16.13% (8 時)及 16.95% (17 時)降為 13.85% (11 時)及 14.92% (14 時)；D_{90} 誤差平均值由 11.77% (8 時)及 15.42% (17 時)降為 13.15% (11 時)及 15.18% (14 時)。

圖 5-2.3 為 25 個調查樣區 4 種指標粒徑(D_{16}、D_{50}、D_{84}、D_{90})影像判釋分析與影像點雲分析成果在 4 種光源下之整體誤差平均值比較，圖中顯示在中小粒徑(D_{16}、D_{50})分析成果方面，影像點雲分析明顯優於影像判釋分析，且小顆粒 D_{16} 更為明顯，以 11 時光源為例，影像點雲分析之整體誤差平均值(22.09%)約僅為影像判釋分析成果(44.41%)之一半；在較大粒徑(D_{84}、D_{90})方面，影像點雲分析(13.85%、13.15%)與影像判釋分析成果(12.47%、6.08%)約略有相近之整體誤差平均值。至於不同光源對分析結果之影響程度也有所差異，光源對點雲分析成果之影響明顯大於影像判釋分析，此影響程度也因粒徑大小而異，光源對於較小粒徑 D_{16} 影響最為明顯，若航拍採用近午之正射光源，影像判釋分析之誤差平均值可改善約 28.3%，影像點雲分析之誤差平均值則可改善達 57.5%。至於 D_{50}、D_{84}、D_{90} 等指標粒徑，不論影像判釋分析或點雲糙度分析兩種方式皆僅略為受到不同光源之影響。

表 5-2.5 為 11 時影像點雲進一步結合光達點雲後之點雲糙度分析成果，其中光達點雲密度每平方公尺約為 420 點。若與單獨 11 時之影像點雲分析成果相比(表 5-2.2)，在結合光達點雲後，整體分析品質未見明顯改善，反而在較小粒徑 D_{16} 及 D_{50} 誤差率略為增加，其原因可能在於原本影像點雲已有極佳之點雲密度 2,148 pts/m^2，而在融合加入光達點雲後反而因兩組點雲資料產製來源不同，因而對於河床較小顆粒之區隔判別反而造成干擾，而且 25 個調查樣區並無明顯植生覆蓋，因此無人機航拍影像產製之高密度點雲對於河床表面之卵礫石顆粒即有極佳之區隔判別效果。

表 5-2.1 點雲糙度指標粒徑之分析成果(光源 8 時)

特徵粒徑	D_{16} (mm)			D_{50} (mm)			D_{84} (mm)			D_{90} (mm)		
樣區	現調	點雲(08)	誤差百分比%	現調	點雲(08)	誤差百分比%	現調	點雲(08)	誤差百分比%	現調	點雲(08)	誤差百分比%
A1	13	16	20.17	37	46	24.81	121	126	3.77	163	190	16.30
A2	15	23	50.60	51	44	-13.53	171	139	-18.54	222	205	-7.83
A3	24	32	30.51	60	64	6.07	211	218	3.31	264	246	-6.83
A4	23	28	19.88	73	54	-25.94	176	199	13.01	217	229	5.83
A5	17	25	51.23	53	43	-17.82	154	152	-0.95	193	167	-13.01
B1	33	44	33.64	79	93	17.09	171	148	-13.32	207	223	7.99
B2	23	40	74.77	72	44	-39.58	217	195	-10.29	284	243	-14.35
B3	21	25	20.57	67	43	-35.55	213	147	-30.81	271	273	0.97
B4	26	29	12.95	71	69	-2.86	173	183	5.52	224	212	-5.46
B5	25	31	27.92	75	59	-20.72	159	143	-10.16	200	193	-3.64
C1	38	46	19.38	108	71	-34.63	267	156	-41.70	326	354	8.62
C2	33	42	27.53	85	121	42.21	226	151	-33.17	286	263	-8.00
C3	41	55	35.69	101	113	12.16	252	197	-21.60	310	297	-3.97
C4	48	62	30.05	98	104	5.67	236	192	-18.60	282	299	6.11
C5	45	53	17.53	101	134	32.94	230	255	10.88	283	265	-6.33
D1	27	42	55.13	82	64	-21.60	212	168	-20.97	250	214	-14.39
D2	30	40	31.59	88	63	-28.31	207	235	13.33	246	213	-13.33
D3	26	43	67.53	77	74	-3.79	179	143	-20.21	241	229	-4.66
D4	29	33	12.79	71	74	3.86	158	179	13.64	194	205	5.79
D5	29	34	16.71	67	58	-13.93	145	158	9.31	175	189	8.40
E1	10	31	206.30	39	39	0.76	133	98	-26.76	172	140	-18.34
E2	10	25	155.36	32	32	-1.73	146	153	4.69	193	61	-68.45
E3	14	17	23.43	37	71	92.10	112	121	8.12	164	198	20.73
E4	18	36	105.65	56	44	-22.60	125	134	7.19	160	164	2.61
E5	22	26	15.54	57	71	23.62	121	170	39.85	162	198	22.31
誤差平均值			46.50			21.76			16.13			11.77

表 5-2.2 點雲糙度指標粒徑之分析成果(光源 11 時)

特徵粒徑	D_{16} (mm)			D_{50} (mm)			D_{84} (mm)			D_{90} (mm)		
樣區	現調	點雲 (11)	誤差 百分比%	現調	點雲 (11)	誤差 百分比%	現調	點雲 (11)	誤差 百分比%	現調	點雲 (11)	誤差 百分比%
A1	13	15	14.91	37	44	18.92	121	146	20.64	163	187	14.52
A2	15	18	18.94	51	62	23.08	171	201	17.88	222	241	8.53
A3	24	32	30.51	60	76	25.87	211	192	-9.04	264	214	-18.99
A4	23	26	12.30	73	90	24.10	176	192	9.20	217	214	-1.36
A5	17	19	13.03	53	64	21.09	154	186	20.80	193	209	8.77
B1	33	25	-24.65	79	59	-25.60	171	143	-16.40	207	178	-14.08
B2	23	27	19.16	72	84	15.78	217	201	-7.49	284	220	-22.35
B3	21	30	43.86	67	77	14.11	213	205	-3.60	271	223	-17.71
B4	26	22	-13.70	71	54	-24.35	173	152	-12.16	224	204	-9.06
B5	25	21	-15.22	75	66	-11.63	159	125	-21.26	200	192	-4.40
C1	38	35	-9.82	108	84	-22.85	267	249	-6.80	326	305	-6.51
C2	33	42	27.53	85	96	12.71	226	201	-11.07	286	220	-23.03
C3	41	46	13.21	101	107	6.11	252	228	-9.53	310	270	-12.99
C4	48	53	11.34	98	101	2.83	236	197	-16.36	282	217	-22.78
C5	45	29	-36.01	101	84	-16.78	230	179	-22.17	283	205	-27.56
D1	27	32	18.17	82	104	27.35	212	192	-9.67	250	214	-14.39
D2	30	35	15.62	88	113	28.30	207	197	-4.93	246	217	-11.45
D3	26	32	25.37	77	94	22.71	179	192	7.38	241	214	-11.14
D4	29	33	12.93	71	94	32.12	158	186	17.84	194	209	8.22
D5	29	26	-11.38	67	70	4.20	145	170	17.41	175	198	13.35
E1	10	15	50.13	39	34	-13.00	133	127	-4.89	172	162	-5.52
E2	10	13	32.08	32	30	-6.72	146	90	-38.33	193	165	-14.56
E3	14	21	52.62	37	43	16.26	112	140	25.13	164	198	20.73
E4	18	21	21.69	56	49	-12.55	125	118	-6.06	160	140	-12.17
E5	22	24	8.00	57	48	-17.00	121	134	10.10	162	155	-4.50
誤差 平均值			22.09			17.84			13.85			13.15

表 5-2.3 點雲糙度指標粒徑之分析成果(光源 14 時)

特徵粒徑	D_{16} (mm)			D_{50} (mm)			D_{84} (mm)			D_{90} (mm)		
樣區	現調	點雲 (14)	誤差百分比%	現調	點雲 (14)	誤差百分比%	現調	點雲 (14)	誤差百分比%	現調	點雲 (14)	誤差百分比%
A1	13	16	18.42	37	37	-0.27	121	131	8.09	163	205	25.28
A2	15	19	24.04	51	44	-13.53	171	154	-9.75	222	205	-7.83
A3	24	32	30.51	60	71	17.65	211	218	3.31	264	246	-6.83
A4	23	23	-1.74	73	94	29.18	176	186	5.61	217	209	-3.40
A5	17	25	51.23	53	53	1.17	154	177	15.32	193	217	12.96
B1	33	44	33.64	79	88	10.77	171	158	-7.47	207	189	-8.45
B2	23	30	30.96	72	87	21.22	217	205	-5.69	284	223	-21.41
B3	21	32	54.96	67	46	-32.20	213	201	-5.44	271	220	-18.70
B4	26	24	-5.64	71	68	-4.53	173	178	2.78	224	189	-15.44
B5	25	31	27.92	75	69	-7.36	159	178	11.90	200	140	-30.09
C1	38	46	19.38	108	56	-48.45	267	270	0.96	326	198	-39.24
C2	33	32	-2.69	85	129	51.66	226	201	-11.07	286	220	-23.03
C3	41	55	35.69	101	113	12.16	252	197	-21.60	310	217	-29.79
C4	48	62	30.05	98	104	5.67	236	192	-18.60	282	214	-24.07
C5	45	49	8.61	101	134	32.94	230	179	-22.17	283	205	-27.56
D1	27	42	55.13	82	64	-21.60	212	192	-9.67	250	214	-14.39
D2	30	30	-1.40	88	63	-28.81	207	205	-1.13	246	223	-9.26
D3	26	32	25.37	77	64	-16.43	179	192	7.38	241	214	-11.14
D4	29	29	-1.02	71	74	3.86	158	179	13.64	194	205	5.79
D5	29	24	-17.49	67	69	2.46	145	158	9.31	175	189	8.40
E1	10	17	66.79	39	36	-8.64	133	125	-6.06	172	164	-4.60
E2	10	14	44.03	32	32	-1.73	146	55	-62.25	193	61	-68.45
E3	14	21	52.62	37	38	2.71	112	170	51.98	164	198	20.73
E4	18	21	21.69	56	39	-30.27	125	98	-22.03	160	140	-12.17
E5	22	26	15.54	57	67	16.64	121	170	39.85	162	198	22.31
誤差平均值			27.06			16.87			14.92			15.18

表 5-2.4 點雲糙度指標粒徑之分析成果(光源 17 時)

特徵粒徑	D_{16} (mm)			D_{50} (mm)			D_{84} (mm)			D_{90} (mm)		
樣區	現調	點雲(17)	誤差百分比%	現調	點雲(17)	誤差百分比%	現調	點雲(17)	誤差百分比%	現調	點雲(17)	誤差百分比%
A1	13	17	26.28	37	54	46.08	121	146	20.15	163	209	28.15
A2	15	27	77.15	51	34	-33.32	171	139	-18.54	222	205	-7.83
A3	24	35	43.54	60	64	6.21	211	222	5.05	264	247	-6.44
A4	23	26	11.24	73	54	-25.94	176	186	5.61	217	209	-3.40
A5	17	26	57.27	53	53	1.17	154	143	-6.80	193	217	12.96
B1	33	44	33.64	79	108	36.02	171	158	-7.47	207	189	-8.45
B2	23	45	96.67	72	51	-29.17	217	205	-5.69	284	223	-21.41
B3	21	37	79.03	67	56	-17.30	213	140	-34.12	271	220	-18.70
B4	26	35	37.37	71	76	6.74	173	197	13.75	224	189	-15.44
B5	25	35	44.25	75	63	-15.38	159	138	-13.31	200	140	-30.09
C1	38	45	16.18	108	84	-22.85	267	162	-39.37	326	205	-37.19
C2	33	44	33.58	85	131	54.02	226	155	-31.41	286	220	-23.03
C3	41	65	60.34	101	143	41.87	252	231	-8.08	310	217	-29.79
C4	48	68	42.65	98	144	46.29	236	210	-10.97	282	214	-24.07
C5	45	55	21.99	101	144	42.88	230	244	6.10	283	205	-27.56
D1	27	36	32.95	82	61	-25.27	212	178	-16.26	250	214	-14.39
D2	30	36	18.39	88	59	-33.21	207	225	8.51	246	223	-9.26
D3	26	47	84.19	77	64	-16.43	179	163	-8.85	241	214	-11.14
D4	29	45	54.20	71	84	17.95	158	155	-1.59	194	205	5.79
D5	29	31	5.72	67	71	5.69	145	132	-8.87	175	198	13.35
E1	10	25	147.66	39	49	26.35	133	98	-26.76	172	140	-18.34
E2	10	20	106.09	32	34	5.23	146	57	-61.25	193	62	-67.85
E3	14	17	23.43	37	45	21.67	112	170	51.98	164	198	20.73
E4	18	32	84.41	56	59	5.16	125	98	-22.03	160	140	-12.17
E5	22	36	60.13	57	78	35.82	121	170	39.85	162	198	22.31
誤差平均值			51.93			24.72			16.95			15.42

表 5-2.5 光達點雲結合影像點雲之指標粒徑分析成果

特徵粒徑	D_{16} (mm)			D_{50} (mm)			D_{84} (mm)			D_{90} (mm)		
樣區	現調	光達點雲	誤差百分比%	現調	光達點雲	誤差百分比%	現調	光達點雲	誤差百分比%	現調	光達點雲	誤差百分比%
A1	13	15	14.55	37	48	29.76	121	192	58.36	163	214	30.85
A2	15	18	20.84	51	67	32.04	171	186	8.78	222	209	-5.71
A3	24	27	8.51	60	78	29.40	211	209	-0.79	264	239	-9.30
A4	23	26	13.82	73	93	28.46	176	186	5.61	217	209	-3.40
A5	17	27	61.23	53	67	26.41	154	197	28.34	193	217	12.96
B1	33	35	5.26	79	42	-46.67	171	158	-7.47	207	189	-8.45
B2	23	34	50.59	72	89	23.65	217	205	-5.69	284	223	-21.41
B3	21	29	40.90	67	82	22.27	213	201	-5.44	271	220	-18.70
B4	26	25	-3.87	71	50	-29.19	173	170	-2.01	224	198	-11.58
B5	25	25	0.64	75	62	-17.63	159	98	-38.51	200	140	-30.09
C1	38	39	1.79	108	66	-39.04	267	179	-33.00	326	205	-37.19
C2	33	42	27.53	85	110	29.91	226	197	-12.82	286	217	-23.98
C3	41	51	26.23	101	118	16.70	252	197	-21.60	310	217	-29.79
C4	48	57	19.29	98	112	13.70	236	197	-16.36	282	217	-22.78
C5	45	43	-3.33	101	112	11.79	230	192	-16.55	283	214	-24.34
D1	27	39	43.37	82	128	56.69	212	197	-7.19	250	217	-12.93
D2	30	37	21.32	88	129	45.89	207	205	-1.13	246	223	-9.26
D3	26	39	51.41	77	108	40.47	179	186	3.85	241	209	-12.97
D4	29	29	0.32	71	98	38.22	158	179	13.64	194	205	5.79
D5	29	29	-1.83	67	77	15.33	145	158	9.31	175	189	8.40
E1	10	22	111.26	39	31	-21.27	133	125	-6.06	172	164	-4.60
E2	10	18	85.20	32	28	-13.61	146	98	-33.34	193	140	-27.47
E3	14	16	17.35	37	49	33.66	112	179	60.26	164	205	24.79
E4	18	29	65.34	56	43	-23.80	125	143	14.09	160	178	11.42
E5	22	25	10.71	57	41	-28.38	121	143	17.64	162	178	9.77
誤差平均值			28.26			28.56			17.21			16.72

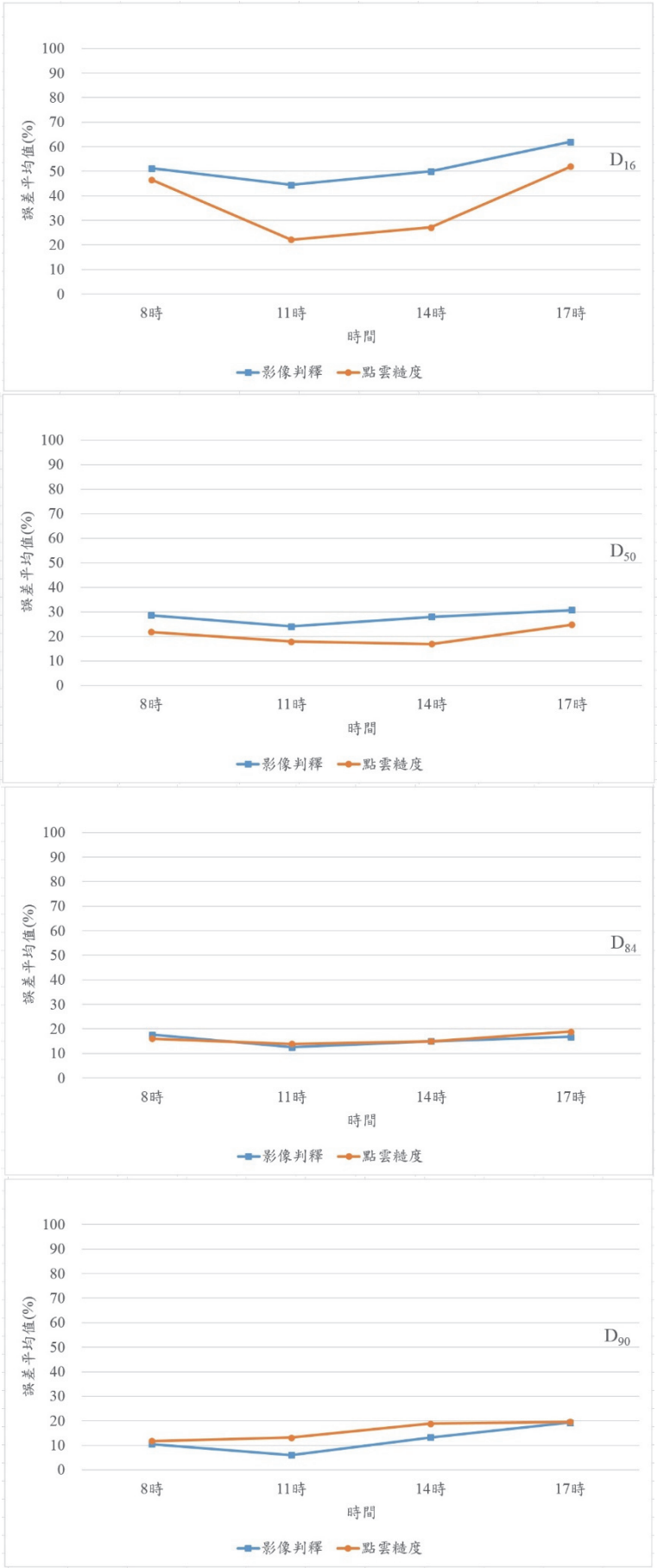


圖 5-2.3 影像判釋分析與影像點雲分析在 4 種光源之整體誤差平均值比較

第三節　無人機在河床表層粒徑分析之作業手冊草案初擬

本計畫綜合 108 年度及本年度有關無人機產製正射影像及三維密點雲在河床表層指標粒徑判釋分析之工作經驗與成果，進一步研擬無人機在河床表層粒徑分析之作業手冊草案，期能提供作為相關業務單位之應用參考。作業手冊草案整理於附錄。

第六章　結論與建議

1. 本計畫於 109 年 3 月 19 日 ~ 27 日於高雄市六龜區寶來里寶來一橋上游約 600 公尺處之荖濃溪河床完成兩種採樣間距 (0.5 公尺及 1.0 公尺)之表層粒徑現場調查工作，調查範圍約為 65m x 65m 之正方形範圍，並進一步劃分 25 個 13m x 13m 之樣區網格，作為影像粒徑判釋及點雲粒徑判釋之比較基礎。
2. 依據 0.5 公尺及 1.0 公尺兩種採樣間距分別分析獲得之四種指標粒徑 (D_{16}、D_{50}、D_{84}、D_{90})誤差比較可知，25 個調查樣區共 100 個誤差值數值，其中 91 個誤差值皆在 10%以內，7 個誤差值絕對值介於 10%～15%之間，僅有 2 個誤差值絕對值介於 15% ~ 20%之間。因此依據 Wolman (1954)建議之 1.0 公尺採樣間距，以及至少 100 顆採樣數目應該即足以獲得具現地代表性之調查成果。
3. 本計畫於 109 年 3 月 7 日 ～8 日完成無人載具航拍，一共規劃四種不同陽光入射光源 (8 時、11 時、14 時、17 時)，航高則規劃為 25 公尺。四種光源之正射影像地面解析度約介於 0.62～0.68 公分，航拍範圍之產製點雲數量約為 9,076,515 點，點雲密度每平方公尺約為 2,148 點，呈現優異之水平密度。
4. 依據影像判釋分析與影像點雲分析成果在 4 種光源下之整體誤差平均值比較，在中小粒徑(D_{16}、D_{50})分析成果方面，影像點雲分析明顯優於影像判釋分析，且小顆粒 D_{16} 更為明顯，以 11 時光源為例，影像點雲分析之整體誤差平均值約僅為影像判釋分析成果之一半；在較大粒徑(D_{84}、D_{90})方面，影像點雲分析與影像判釋分析成果約略有相近之整體誤差平均值。
5. 不同光源對點雲分析成果之影響明顯大於影像判釋分析，此影響程度也因粒徑大小而異，光源對於較小粒徑 D_{16} 影響最為明顯，若航拍採用近午之正射光源，影像判釋分析之誤差平均值可改善約 28.3%，影像點雲分析之誤差平均值則可改善達 57.5%。至於 D_{50}、D_{84}、D_{90} 等指標粒徑，不論影像判釋分析或點雲糙度分析兩種方式皆僅略為受到不同光源之影響。

6. 本計畫利用 11 時影像點雲進一步結合光達點雲後之點雲糙度分析成果顯示，整體分析品質未見明顯改善，反而在較小粒徑 D_{16} 及 D_{50} 誤差率略為增加，其原因可能在於原本影像點雲已有極佳之點雲密度 2,148 pts/m^2，而在融合加入光達點雲後反而因兩組點雲資料產製來源不同，因而對於河床較小顆粒之區隔判別反而造成干擾所致。
7. 本研究建議未來針對表層粒徑介於數公分至數十公分之山區河床，可採用無人機航拍產製影像點雲來分析表層粒徑，在兼顧廣域作業效率及可判釋粒徑條件下，可採用約 20 公尺 ~25 公尺之航拍高度，航拍時間則儘量選擇接近正午前後之正射日照，可得到最佳之粒徑判釋成果。

參考文獻

1. Aberle, J., Smart, G.M. (2003). The influence of roughness structure on flow resistance in mountain streams. J. Hydraul. Res., 41(3), 259–269.
2. Brasington, J., Vericat, D., Rychov, I. (2012). Modeling river bed morphology, roughness, and surface sedimentology using high resolution terrestrial laser scanning. Water Resour. Res., 48, W11519.
3. Bunte, K., Abt, S.R. (2001). Sampling surface and subsurface particle-size distributions in wadable gravel- and cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics, and streambed monitoring. General Technical Report RMRS-GTR-74. Fort Collins, Colo.; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 428.
4. Chang F.J. and Chung C.H. (2012). Estimation of riverbed grain-size distribution using image-processing techniques. Journal of Hydrology, 440–441, 102–112.
5. Daniel V., Laurent B., Frédéric L., Alain R. (2017). Using UAS optical imagery and SfM photogrammetry to characterize the surface grain size of gravel bars in a braided river (Vénéon River, French Alps). Geomorphology, 285, 94–105.
6. Detert, M., Weitbrecht, V. (2012). Automatic object detection to analyze the geometry of gravel grains – a free stand-alone tool. River Flow 2012 – Murillo (Ed.), 595-600.
7. Detert, M., Weitbrecht, V. (2013). User guide to gravelometric image analysis by BASEGRAIN. Advances in River Sediment Research – Fukuoka et al. (eds), 1789-1796.
8. Gomez, B. (1993). Roughness of stable, armored gravel beds. Water Resour. Res. 29 (11), 3631–3642.
9. Graham, D.J., Reid, I., Rice, S.P. (2005a). A transferable method for the automated grain sizing of river gravels. Water Resour. Res., 41, W07020, doi:10.1029/2004WR003868.
10. Graham, D.J., Reid, I., Rice, S.P. (2005b). Automated sizing of coarse grained

sediments: Image-processing procedures. Math. Geol., 37, 1 – 28.

11. Harada, M., Arakawa, T., Ooi, T., Suzuki, H., Sawada, K. (2016). Development of bed topography survey technique by underwater imaging process for UAV photogrammetry. 河川技術論文集, 第 22 卷, 67-72.
12. Heritage, G., Milan, D.J. (2009). Terrestrial laser scanning of grain roughness in a gravel bed river. Geomorphology, 113(1), 4–11.
13. McNeil, W.J., Ahnell, W.H. (1964). Success of pink salmon spawning relative to size of spawning bed materials. US Fish and Wildlife Service Special Scientific Report, Fisheries No. 469.
14. Storz-Peretz, Y., Laronne, J. (2013). Morphotextural characterization of dryland braided channels. Geol. Soc. Am. Bull., 125(9–10), 1599–1617.
15. TERADA, Y., FUJITA, I., ASAMI, K., WATANABE, Y. (2015). Measurement of grain size distributions of a cobble bar before and after a flood by using images taken from an UAV. 土木学会論文集 B1(水工学), 71(4), I_919-I_924.
16. Weichert, R., Wickenhäuser, M., Bezzola, G.R., Minor, H.E. (2004). Grain size analysis for coarse river beds using digital imagery processing. Proc. RF 2004, Naples, Italy, 753–760.
17. Wohl, E.E., Anthony, D.J., Madsen, S.W., Thompson, D.M. (1996). A comparison of surface sampling methods for coarse fluvial sediments. Water Resources Research, 32 (10), 3219-3226.
18. Wolman, M.G. (1954). A method of sampling coarse river bed material. Transactions of the American Geophysical Union, v35, n6, 951-956.
19. 王驥魁，陳嘉欣，邵允銓，吳富春(2008)，「河床質粒徑分布之數位影像光篩分析」，農業工程學報，第 54 卷，第 4 期，16-32。
20. 經濟部水利署水利規劃試驗所(2006)，「河床質調查方法之比較研究」。
21. 經濟部水利署水利規劃試驗所(2007)，「河床質調查作業參考手冊」。
22. 經濟部水利署水利規劃試驗所(2009)，「河道曼寧 n 值與河床質粒徑關係之研究(2/2)」。

23. 鍾昌翰，張斐章(2009)，「影像處理應用於河床粒徑分佈之研究」，台灣水利，第57卷，第2期，12-23。

附錄

附錄一、期初報告書審查意見暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
一、研究內容補充說明：		
1.	本計畫擬利用高解析影像及光達點雲資料來分析河川表層泥砂粒徑的大小及分布，研究成果有利於河床表面粗顆粒之泥砂大小及數量的判釋，具有應用性。	感謝委員肯定。
2.	有關本年度擬採不同日照角度拍攝UAV之工項，請補充說明UAV拍攝如何控制光源亮度、角度之不同影響、有無系統性之規劃航線等；規劃預計分成多少種角度、進行方式等請補充說明。	本計畫選取上午 8 時、近午 11 時、下午 2 時及下午 5 時四個航拍時間分別代表不同之光源，藉此探討入射光線對於影像判釋成果的影響。
3.	網格式與方型網格之採樣方法有無差別，宜於方法論上詳加說明，以免誤解。	網格式採樣係採固定間距，採集預定數量的顆粒，適用於較大面積之採樣；至於方型網格採樣，則是採集網框所有格點的樣品，採樣面積相對小範圍，約 1~10m^2。
4.	點雲資料處理之離群值該如何設定方為合理? 宜詳加說明。	離群值篩選可依據現場調查範圍之植生高度及卵石高度作為訂定離群值篩選條件之參考依據。
5.	使用UAV光達固然可得到較佳之密點雲及分析指標粒徑，惟UAV光達現階段仍未普及，建議宜以本年度比較之結果，導出以傳統UAV拍攝成果製作之點雲分析指標粒徑之校正方式。	感謝委員提醒建議，本計畫將朝此方向努力。

項次	審查意見	回覆辦理情形
6.	現地調查之時間點位是否配合張國楨教授之UAV 同步調查，以驗證該等影像之精度?	本計畫於109年3月7日～8日進行UAV航拍，航拍前已於河床調查範圍噴漆標定；現場調查則於109年3月19日～27日期間完成，因此兩者可呈現相同時間背景之分析成果。
7.	此為延續性計畫，已知成果利用航拍25公尺高的高解析影像的判別技術，目前可達到判識最小的泥砂粒徑為3 公分。建議未來能訂出航拍高程標準及最小判別粒徑之參照表，以利後續應用者參考。	感謝委員建議，本計畫將朝此方向努力。
8.	有關無人機河床表層粒徑分析作業手冊工項，因手冊著重在利用無人機提供高效率空間及時間尺度之資料判粒河床質粒徑，對表面粒徑調查提供新方法，可將團隊於現場調查之方法或國內外調查方法比較摘入，對於基本資料蒐集則可以參考水土保持技術手冊提供之方法，建議將第二章基本資料蒐集改為河床表面粒徑調查方法。	遵照委員建議辦理。
二、報告撰寫建議說明：		
1.	P2-24，文中「影像右側左側砂洲的部份」一句，語意不明。	已於期中報告書第四章第一節更正，P.4-2。
2.	計畫(含核定本)審查意見及回覆情形，請增列於各期報告書之附錄。	遵照辦理，已增列於期中報告書之附錄，P.附-1。

附錄

附錄二、期中報告書審查意見暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
一、研究內容補充說明：		
1.	P2-22及表2-3.1，將粒徑d50=22mm的礫石稱為uniform fine soil 不是很洽當，建議再考慮。另外 uniform coarse soil 亦是不妥。	遵照委員建議辦理，已修正於期末報告書之第二章第三節，P.2-24、P.2-25。
2.	均勻係數反應粒徑大小之均勻度，就按其分類"Uniform"、"Graded"及"Well-graded"即可。	遵照委員建議辦理，已修正於期末報告書之第二章第三節，P.2-24、P.2-25。
3.	P4-9頁說明，航高25公尺，最小可判釋泥砂粒徑為3公分，但本研究現調資料(P2-23)，D_{10}都小於3公分，也就是說影像判釋無法辨識D_{10}以下之粒徑大小及含量。	依本計畫研究成果，最小可判釋泥砂粒徑約為影像解析度之 3 ~ 5 倍。今年度航高 25 公尺時影像解析度約為 0.65 公分，因此最小可判釋泥砂粒徑約為 2 公分，因此應仍可辨識 D_{10} 以下之粒徑大小。
4.	航高50公尺以上，影像判釋粒徑大小，效果就非常不好了。是否可以考慮航高小於25公尺，例如航高10公尺，看看能否提升判釋精度。	航高 10 公尺確有可能提升最小可判釋粒徑條件，然而此種航高較不具廣域航拍效率可行性，判釋範圍類似現地調查仍僅限於局部河床範圍，本計畫研究目標希望能透過無人機航拍有效率地獲得廣域河段之代表性河床表層粒徑分布。
5.	P2-3，內文圖4應為圖2-1.3，請修正。	遵照辦理，已修正於期末報告書之第二章第一節，圖 2-1.3，P.2-4。
6.	今年於航高25公尺，地面解析度0.62~0.68公分條件下，近中午光源之判釋誤差率改善良好，顯示光源對影像判釋具一定影響，再請團隊分析下午光源對粒徑判釋成果差異，以探討光源特性對影像判釋影響，以作為後續分析作業手冊之建議操作準測。	本計畫研究成果顯示，接近正午前後之日照較接近正射光源，正射光源對於小顆粒間之區隔對比有明顯助益。而接近日出或日落時，日照光線斜射角度大，顆粒周邊陰影遮蔽面積較大，小粒徑容易受到周遭陰影的遮蔽影響造成誤判。

項次	審查意見	回覆辦理情形
二、報告撰寫建議說明：		
1.	現場粒徑調查成果,請依本局規定之格式,於期末審查前交付本局承辦同仁，以匯入本局資料平台。	遵照辦理。
2.	承上，本局目前河床質調查成果係以 D_{10}, D_{16}, D_{20}, D_{30}, D_{40}, D_{50}, D_{65}, D_{75}, D_{84}, D_{90}, D_{95}, D_{max}, D_n(平均粒徑)呈現，本研究現地調查成果表格(如表 2-2.3、表 2-3.1、表 4-3.1、表 4-3.2 等)及圖 1-2.1 建議以上揭欄位呈現。	遵照辦理，已修正於期末報告書之第二章第二節，表 2-2.3，P.2-24 與表 2-2.4，P.2-25。

附錄

附錄三、期末報告書審查意見暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
一、研究內容補充說明：		
1.	使用影像點雲進行粒徑分析，仍是使用Digital Gravelometer 這套軟體，或是需其他方式?	本計畫於108年度曾進行同屬免付費軟體BASEGRAIN及Digital Gravelometer兩套軟體之判釋能力比較，其中Digital Gravelometer判釋軟體對於河床卵礫石以外之漂流木、水潭及沙洲之自動剃除能力較佳，因此本計畫繼續沿用此模式。
2.	完整顆粒判釋精準度是否會受飛行高度影響，其對表層粒徑分析是否有粒徑之限制？	依據本計畫研究成果，最小可判釋粒徑大約為影像地面解析度(GSD)之3~5倍。以本計畫航高25公尺為例，影像解析度約為0.65公分。因此，最小可判釋粒徑約為2公分左右。若航高更低，雖可產製更高解析度影像並判釋更小之河床粒徑，然較不具廣域作業效率。
3.	本計畫為整合型計畫之一，宜說明本子計畫目標和其他子計畫間之相關性及貢獻。	本計畫主要目的在於應用多元之無人機產製高解析度影像及三維密點雲在河床粒徑之判釋分析，研究成果可與其他子計畫在坡面同樣應用相同多元無人機產製資訊進行精度比較。
4.	使用影像點雲進行粒徑分析，是否有點雲密度的限制？	點雲密度類似於影像地面解析度(GSD)，航高越低則影像地面解析度及點雲密度越高。以本計畫航高25公尺為例，點雲密度可達約每平方公尺2,148點，對於數公分尺度之河床礫石有極佳之判釋能力。

項次	審查意見	回覆辦理情形
二、報告撰寫建議說明：		
1.	目前水保手冊對於河床質表面粒徑採樣方式的說明較為簡略，本計畫所提之採樣方式建議未來可規劃採用。	感謝肯定。
2.	研究成果可提供河川粒徑量化之工具。	感謝肯定。
3	研究亦提出成果展製方法與限制，可供實務使用。	感謝肯定。
4	本研究以無人載具高解析影像及光達點雲進行河川表層粒徑分析，創新性甚高。	感謝肯定。
5	本研究計畫成果明確，應用性及技術性強，建議進一步研究如何提升判釋效率及經濟性。	感謝建議。

遙控無人機
河床表層粒徑分析
作業手冊草案

行政院農業委員會
水土保持局

遙控無人機
河床表層粒徑分析
作業手冊(草案)



2020年11月13日 第1版

目次

第 1 章　前言 1
1.1　手冊編撰緣起與目的 1
1.2　作業手冊適用範圍 1
1.3　專有名詞定義 1
第 2 章　河床表層粒徑調查方法 3
2.1　前置作業 3
2.2　現地作業程序 3
2.3　調查資料彙整 8
第 3 章　無人載具 UAV 航拍 9
3.1　飛航載具規劃 9
3.2　飛航計畫規劃 10
第 4 章　正射影像及密點雲產製 13
4.1　資料產製流程 13
4.2　資料產製方法 16
第 5 章　河床指標粒徑之影像判釋 19
5.1　判釋做業流程 19
5.2　影像資料前處理 20
5.3　影像判釋分析 20
5.4　判釋成果輸出 24
第 6 章　河床指標粒徑之點雲分析 25
6.1　分析做業流程 25
6.2　點雲資料前處理 26
6.3　點雲特性分析 27
6.4　分析成果輸出 27
參考文獻 29

第 1 章 前言

1.1 手冊編撰緣起與目的

河床質之調查資料，廣泛應用於河川管理規劃之相關工作，河床粒徑資訊之調查依賴局部河段開挖進行篩分析，或進行現地表層粒徑調查，惟受限於人力及時間成本，現地調查分析仍僅限於部分局部河段，分析成果資訊無法有足夠之空間及時間頻率代表性。

近年無人載具 UAV 航拍技術快速發展演進，利用無人載具 UAV 產製高解析度正射影像及三維密點雲，進一步分別利用影像判釋表層粒徑分布，以及點雲糙度特性分析進而推估表層指標粒徑，將是未來河床表層粒徑調查方法之應用趨勢，鑑於國內利用遙控無人機進行河床質調查作業目前並無適當之作業程序可資參考應用，故編撰此參考手冊作為參考之依據。

1.2 作業手冊適用範圍

本手冊適用於利用無人載具 UAV 航拍，沖積型河道之河川管理規劃調查。利用河川基本資料進行特性分類，以作為調查作業之依據。卵礫砂石之沖積特性為重要基礎，故適用於沖積型河道之河川管理規劃調查。過度受到人為整治開發之河川，如全水泥斷面河道或缺乏河床質材料供應來源之河川及排水渠道，已不具有卵礫砂石之沖積特性，故不適用於本參考手冊建議之調查規劃原則。

1.3 專有名詞定義

無人飛行載具：

無人飛行載具 (Unmanned Aerial Vehicle，UAV) 或稱無人飛機系統 (Unmanned Aircraft System，UAS)，整合了 GPS、慣性導航系統 (Inertial Navigation System，INS)，操控方式能夠由手動操控變為自動駕駛，大幅降低整體操控的難度，並且增加了飛行安全性與穩定性，使得所拍攝的影像更加清楚。

航空攝影測量：

利用飛行機具上裝載高精密度之攝影器具，在預定的航帶上以特定的高度飛行，針對目標區域來拍攝航空像片，藉由處理航空像片來取得現地的資料。

正射影像：

經過幾何糾正的航攝像片，與未糾正的航攝像片不同，人們可以使用正射影像量測實際距離，因為它是通過像片糾正後得到的地球表面的真實描述。

點雲(point cloud)：

物體表面資訊以點的形式記錄，每個點都含有 X、Y、Z 座標，部份資料並具備顏色、強度等屬性資訊。點雲一詞主要來自於空載光達(airborne LiDAR)技術掃瞄地表資訊時產生龐大數據，因密集空間資料點呈雲霧狀而得名。

地面解析度：

地面採樣距離（Ground sample distance，簡稱 GSD）也稱地面採樣間隔，在攝影測量與遙感中，指數字影像中用地面距離單位表示的像素大小，單位為米/像素，地面採樣距離是衡量影像解析度的重要指標。

河床質：

沈積於河道上的顆粒性材料，包含泥(silt)、砂(sand)、礫石(gravel)、卵石(cobble)、巨礫(boulder)等，不包含懸浮載(suspended load)。

網格法採樣：

河床質表面採樣方法之一，調查之原則在於利用採樣繩的輔助，採樣繩上固定距離有記號標示，在採樣地點處依固定方式拉設採樣繩，採拾採樣繩記號正下方之礫石並加以量測粒徑，樣品至少應採集 100 顆以上後進行粒徑分析。

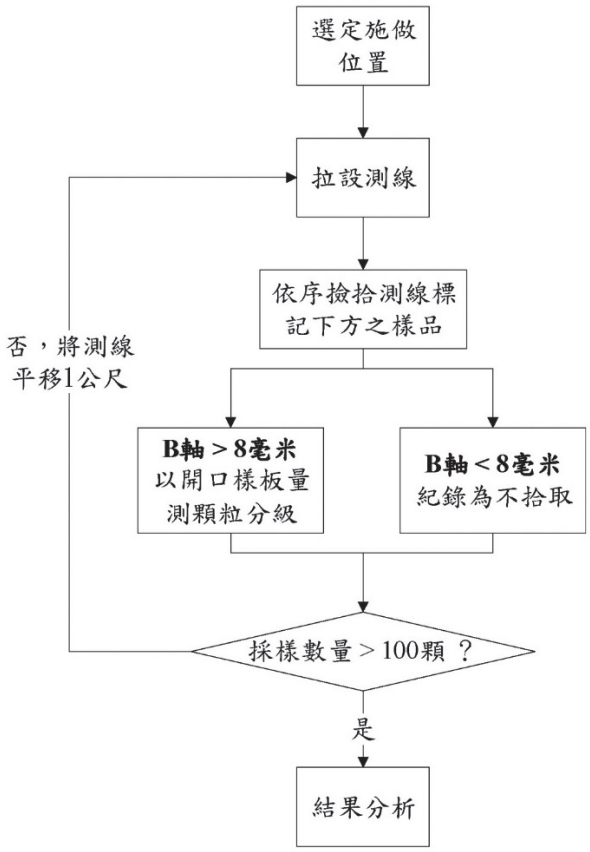
第 2 章 河床表層粒徑調查方法

2.1 前置作業

前置準備作業包含調查目的之考慮、河床質採樣調查方法之選擇、調查位置選擇分配、調查數量決定、現地調查樣區之交通可及性與進入河床作業之可行性與安全等工作。依據「河床質調查方法之比較研究」(2006)及「河道曼寧 n 值與河床質粒徑關係之研究(2/2)」(2009)所述，眾多調查方法中一般較傾向採用標準方法(standard method)，如 Bunte and Abt (2001)提及 Wolman (1954)之 100 顆粒網格式卵石採樣方法(pebble counts)常被當成是表面顆粒採樣之標準方法。

2.2 現地作業程序

現地作業網格法採樣流程如圖 2-1 所示，作業程序說明茲摘錄如下：



資料來源：修改自「河床質調查方法之比較研究」，(2007)。

圖 2-1 現地作業網格法採樣程序

1.設備：採樣繩、開口樣版、捲尺、工作手套、採樣記錄表、筆、照相機、GPS。

2.人員：2 人一組。

3.選定採樣位置，進行放樣，以噴漆或其他方式標示採樣範圍。

4.決定採樣間距，以 1～2 倍 D_{max}，同一顆粒不重複採樣為原則。於採樣繩上依據採樣間距做記號標示，採樣繩（圖 2-2）的材質需使用剛性較佳之材質，可降低伸縮性而避免操縱上的誤差。



圖 2-2 採樣繩(採樣標記間隔為 1 公尺)

5.於灘地或砂洲時，在採樣位置上開始拉設採樣繩(圖 2-3)，採樣樣繩之放置方向以平行河流流向為準，並固定由左岸往右岸方向施作，固定之採樣順序可降低施做過程產生之誤差，測線之分佈依據現地可施做區域進行調整，以組成矩形或方形區域為佳；建議各網格法測線之組合採用相同形狀，以降低後續試驗結果比較之變異性。

6.放置好採樣繩即開始由上游方向往下游方向撿拾採樣繩標記正下方之樣品。

7.將拾取之樣品以開口樣板(圖 2-4)進行樣品粒徑分級並紀錄各取樣繩標記下樣品之粒徑大小，當標記下之樣品粒徑尺寸小於 8 毫米時則不取樣，並在紀錄表(表 2-1)上將該位置之樣品以「╳」紀錄之，同一測線樣品採樣完成後平移測線至下一個測線位置，繼續採樣直至收集數量超過 100 個後，該測線即為最後一條測線。



圖 2-3 河床表層粒徑現場調查作業圖

8.開口樣板最大中值粒徑為 256 毫米，但由於實際現地可能有許多中值粒徑超過 256 毫米之巨礫，所以粒徑上限可增加 362 毫米、512 毫米、724 毫米等粒徑級別，由於巨礫不易以開口樣版加以量測，所以採用 B 軸量測方式加以記錄並納入後續粒徑分析中。

9.當施做完該組網格法後，於該網格法範圍中間處進行 GPS 定位，並拍攝該網格法施作範圍內之照片。

10.由以上步驟進行即可完成一組網格法之試驗，現場試驗後再將紀錄之數據帶回室內進行分析並繪製粒徑分布曲線圖即可完成試驗。

11.網格法分析之方式是以各粒徑撿拾數量為基礎。

註：於淺水地區施做網格法時，由於採樣繩會受到水流帶動，所以涉水時可改採用步伐測距方式施做，撿拾每一步伐腳尖碰觸到之樣品。

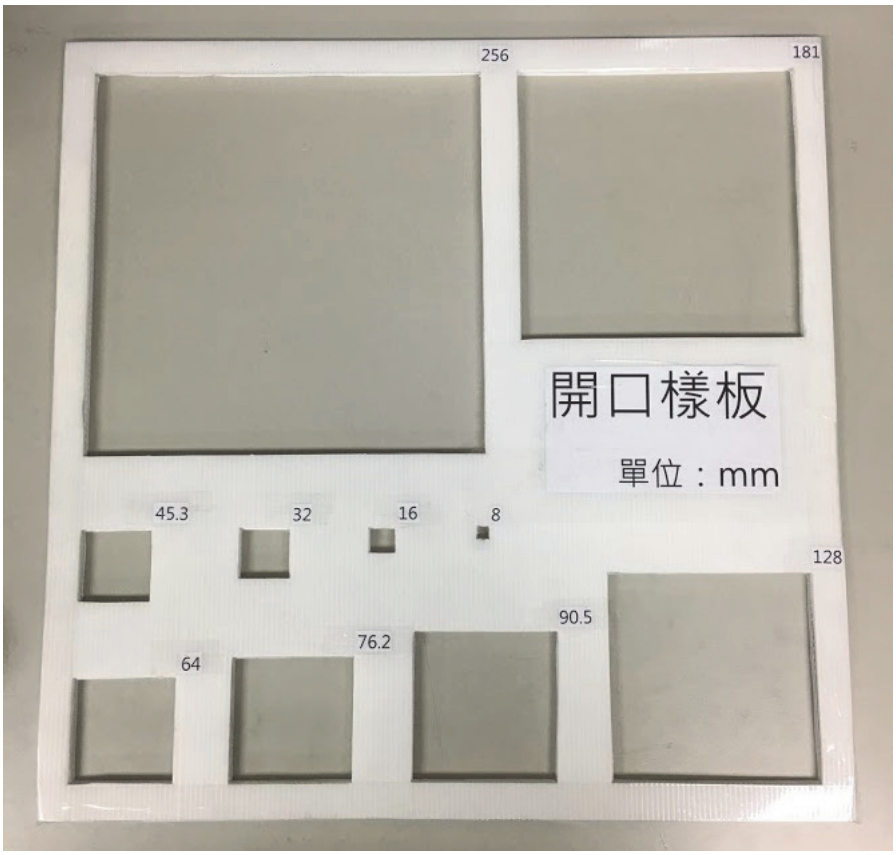


圖 2-4 開口樣板

表 2-1 網格法現場採樣記錄表

施作位置																			天候	
																			座標 TM2_97	X
																				Y
																			施做位置描述	
																			小 計	
																			128	512
																			181	362
																			256	256
																			32	90.5
																			45.3	76.2
																			64	64
																			未拾取	8
																				16
																			調查單位	
																			調查人員	
施作位置																			日期	
																			編號	
測線 / 位置	一	二	三	四	五	六	七	八	九	十	一									
1																				
2																				
3																				
4																				
5																				
6																				
7																				
8																				
9																				
10																				
11																				
12																				
13																				
14																				
15																				
16																				

2.3 調查資料彙整

依據現地作業之現場採樣紀錄表，計算各粒徑分級之重量百分率、累計重量百分率，如圖 2-5 所示；將各粒徑分級對應之過篩重量百分比繪製於半對數座標上，連接各點所得粒徑分佈曲線。為配合工程或規劃上之需要，由繪製完成之河床質顆粒累積曲線圖，檢出各種特徵粒徑，俾供後續應用。建議以常用試算表軟體，對各特徵粒徑對應通過之粒徑百分比進行內差計算。

粒徑分級	撿拾個數	百分比,%	累積過篩百分比,%	代表粒徑	粒徑
512.0				D90	126.13
362.0				D84	112.34
256.0				D75	91.67
181.0			100.00	D65	81.90
128.0	9	9.18	90.82	D50	67.25
90.5	16	16.33	74.49	D25	38.65
76.2	13	13.27	61.22	D16	29.35
64.0	15	15.31	45.92	D5	17.03
45.3	14	14.29	31.63		
32.0	13	13.27	18.37		
16.0	14	14.29	4.08		
8.0	4	4.08	0.00		
總拾取個數	98	100.00		粒徑單位	毫米
未拾取個數	14	12.50			

圖 2-5 粒徑分析成果

第 3 章 無人載具 UAV 航拍

3.1 飛航載具規劃

市面上有許多種無人飛行載具,從外觀與飛行特性可分為定翼型與旋翼型。旋翼型又分單旋翼系統與多旋翼系統。定翼型的 UAV 續航力比旋翼型好、飛行穩定性較佳，可拍攝的範圍較廣，但起降時需要有一定空間限制。旋翼型則可垂直起降，較容易學習操控，具有較高的機動性，還具備有停懸能力，適合小範圍定點拍攝,各具應用特色。旋翼型又可以分為單翼與多翼,單翼直升機 (圖 3-1(a))，為一個水平旋翼旋轉產生上升力帶動飛行的飛行器，其擁有載重量大、能垂直起降與定點旋停之優點，但有耗電 (油) 量大、航行速度慢、自動飛行技術不純熟與操控較不易之限制。多翼型具有兩個以上之旋翼 (圖 3-1(b))，雖載重量較小卻有著直升機的優點，且操縱難度較低、自動飛行技術較純熟。在緊急情況下，若發生部份動力失效或斷槳的情形下，現今的飛控系統可自行修正飛行姿態，因此現今市面上也發展了許多種多軸旋翼型無人飛行載具。



(a)單翼型無人飛行載具　　(b)(六軸)多旋翼型無人飛行載具

圖 3-1 無人飛行載具-旋翼型

考量河床表層粒徑現地調查樣區，主要位於山區河床，需針對拍攝範圍定點滯空，可選擇搭載較高階相機之多旋翼型無人飛行載具進行航拍作業

3.2 飛航計畫規劃

無人飛行載具使用專用航線規劃軟體(圖 3-2)，設計拍攝範圍與生成航線，能調整像片前後與左右重疊度需求、飛行高度與速度、相機拍攝狀態等，亦有安全設定如低電壓返航、GPS 收訊遺失、緊急返航、自動降落等緊急狀況之應對與處理方式，亦能在飛行任務途中即時進行任務的修改與航點拖曳等安全與方便之功能，於飛行任務中所有飛行狀況包括速度、電壓、姿態等情況等資訊能即時傳送回地面站進行監控。飛行手由熟悉該 UAV 飛行特性者操控起飛及降落，也能使用 GPS 導航自動模式執行航線任務，在自動模式時隨時注意 UAV 飛行狀態以便緊急狀況轉換為手動控制，每趟任務結束於現場初步比對拍攝相片數量與品質，確保資料內容取得完整。航線規劃設計之要點為目標區域地形，地形高程影響無人飛行載具飛行航高，因此航高與安全性的搭配取捨尤其重要。航線規劃地圖資料來源為 Google map，其中難免有地形高程的錯誤，所有飛行高度需經過再三的確認，比對每條飛行航線的航高與地形高度剖面，確保飛行安全。

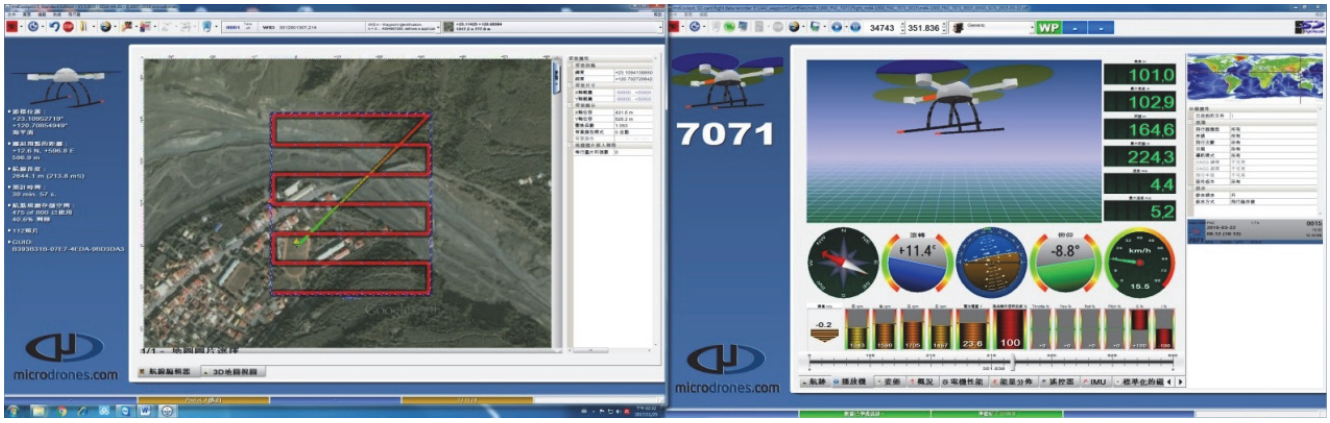


圖 3-2 無人機飛航監控及任務規劃程序流程

選定拍攝日期後亦須密切注意天氣狀況，天候狀況也是影響拍攝安全性與成果的重要因素，事前設備的準備與器材狀況都需要經過仔細檢查，到現場周遭環境植生情形與高壓電塔或人工高凸建物等都需再次確認評估。除此之外，現場光線、風向、風速、周邊地形地物狀況與 GPS 接收狀態皆良好狀況下才能執行飛行任務，使整個飛行計畫與測量工作安全順利的進行。圖 3-3 為無人飛機航拍規劃程序之完整流程，其中主要有以下要點需考量。

1.作業範圍與飛行空域：確認作業範圍後，了解作業區之地形地物，以及周邊空域狀況來評估空域的相關作業。

2.飛行航線規劃：使用無人機性能、效能、酬載、可飛行時間，另外相機酬載的選用以考量飛行高度與拍攝，以上因素需一併考量，以決定飛行任務之規劃；建議飛行高度為 25 公尺、建議飛行時間選擇介於 11 時至 14 時之間，可取得較佳之無人載具航拍影像，以利後續進行河床表層粒徑分析。

3.作業目標區天氣狀態變化與交通：天氣狀態的初步觀察跟出勤時間預估，也需初步掌握，以利於任務的時程安排。

4.UAV 任務執行：執行 UAV 飛行任務包含任務前準備、現場佈署、任務執行，撤收階段等四項作業，以落實完成飛行任務。

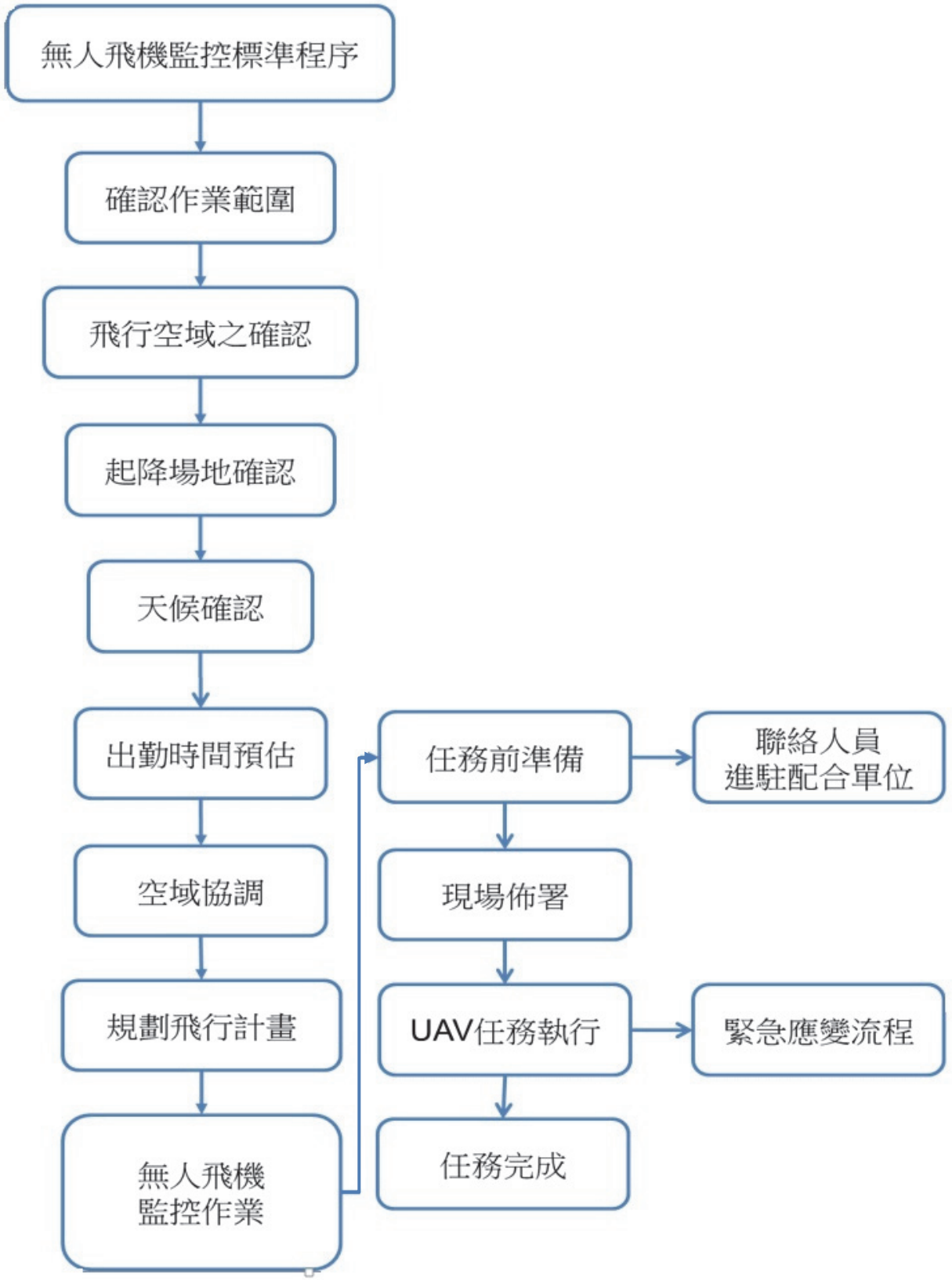


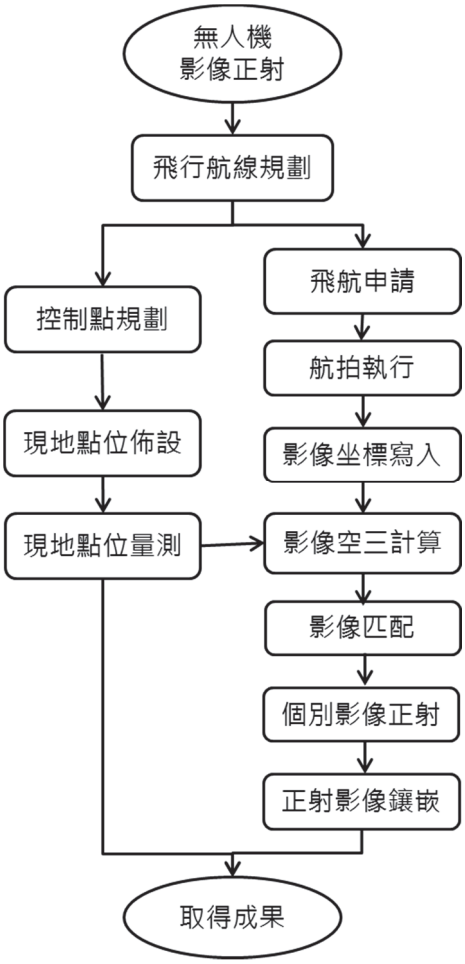
圖 3-3 無人飛機航拍規劃程序流程

第 4 章 正射影像及密點雲產製

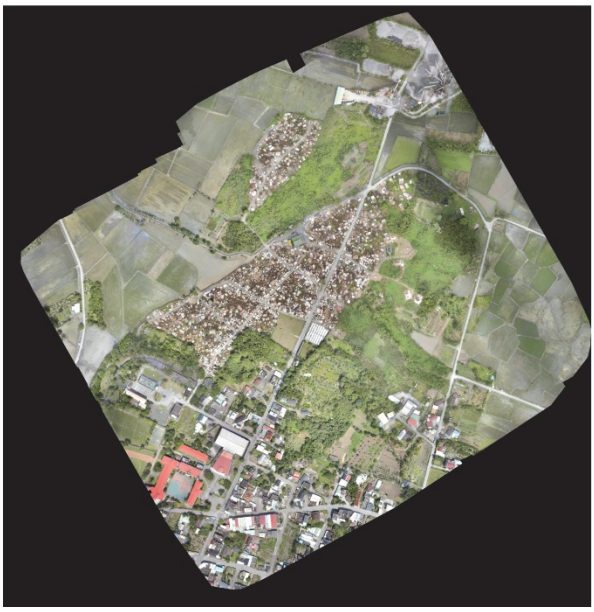
4.1 資料產製流程

航空攝影測量即指利用飛行機具上裝載高精密度之攝影器具，在預定的航帶上以特定的高度飛行，針對目標區域來拍攝航空像片，藉由處理航空像片來取得現地的資料。

無人飛行載具在拍攝影像同時也紀錄每張像片拍攝瞬間之位置 (X、Y、Z) 與飛機姿態 (ω、φ、κ)，省去了傳統航空像片在建置模型時必須先設置相機參數、外方位參數，並花大量時間對照片點選控制點，反算出每張照片的位置與姿態角的煩雜步驟。像片與記錄下之位置姿態訊息經過整理，確保每張照片與其對應參數是一致且符合軟體所需的格式。再給予軟體所需訊息，如輸出之坐標系統，與地面控制點位，經由計算匹配並建置出點雲、數值地表模型與正射影像。數值地形模型解析度受原始相片影響，模型解析度可因 UAV 相片重疊度增加提升像片解析度，其正射影像是航空像片經過幾何修正與拼接的真實地表資訊，含有地理資訊座標資訊，看起來就和一般像片相同，方便使用、容易辨識，能依所需在地理資訊系統平台進行疊圖、量測與分析，若配合三維的數值地形模型能進行更多應用。由於正射影像以像片為基礎拼接再修正，像片解析度大大影響了正射影像的細緻度。點雲(point cloud)為物體表面資訊以點的形式記錄，每個點都含有 X、Y、Z 座標，部份資料並具備顏色、強度等屬性資訊。點雲一詞主要來自於空載光達(airborne LiDAR)技術掃瞄地表資訊時產生龐大的數據時，因密集的空間資料點呈雲霧狀而得名。現今因無人載具及影像的普及，透過立體影像對特徵點的匹配，而可以求取匹配點之點位空間位置，從而建立密集的點雲。運用密匹配的點雲，再由密點雲分類處理之後，並能進行數值高程模型(Digital elevation model, DEM)的製作。圖 4-1 及圖 4-2 分別為正射影像及三維點雲之產製流程及產製成果範例。

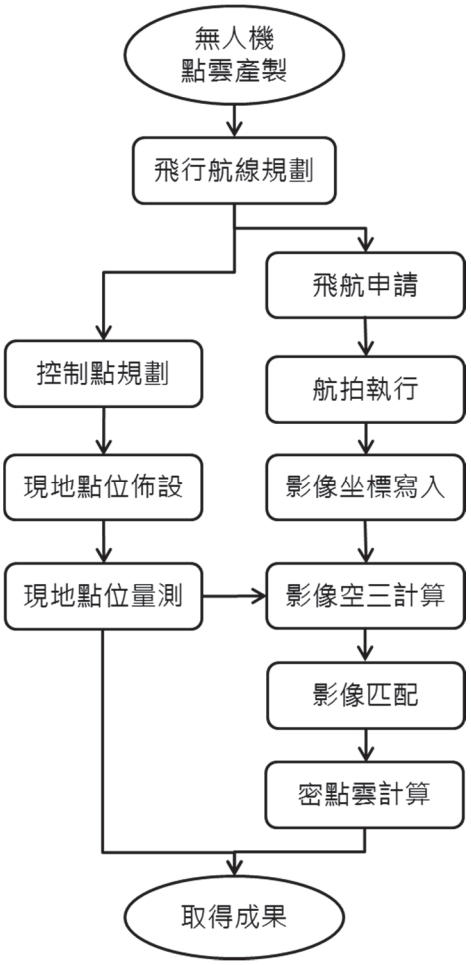


(a) 產製流程

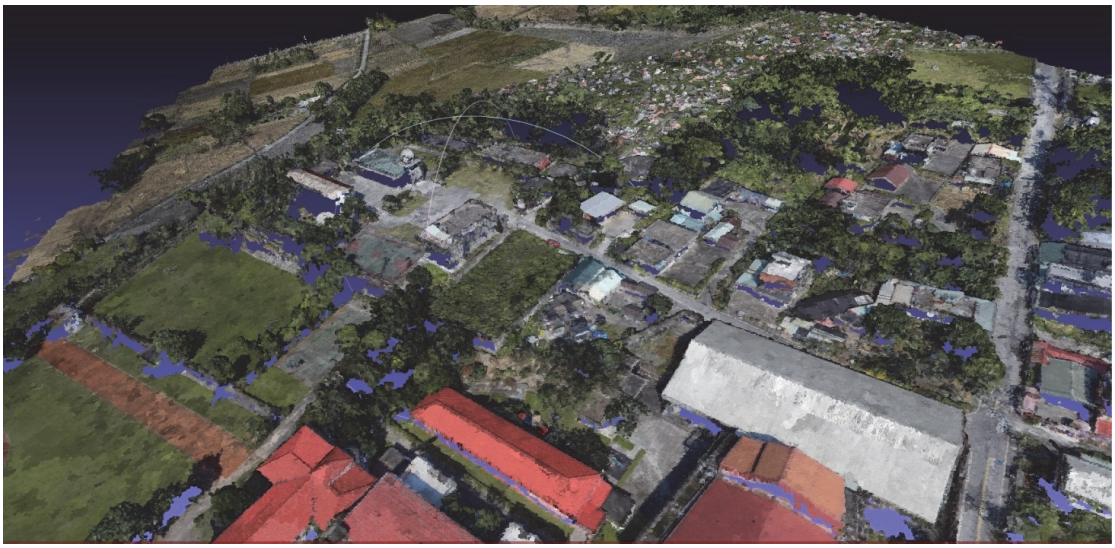


(b) 產製範例

圖 4-1 正射影像之產製流程及範例成果



(a) 產製流程



(b) 產製範例

圖 4-2 三維點雲之產製流程及範例成果

4.2 資料產製方法

有別於傳統量測方法，需要花費大量的人力、資源及時間到現地進行量測，一些人員機具難以到達的地方，也可以利用航空攝影測量輕易的取得其資訊。人的雙眼之所以能對物體產生立體感及距離感，係因為視差角的關係，航空攝影測量就是利用此原理，以不同之 2D 航空相片，針對相片中相同之涵蓋區域，利用程式進行空中三角計算，修正照相時所產生之誤差，即可產生立體之數值地形模型 (DTM)，並將航空照片進行正射，給予坐標系統。相鄰的兩張航空相片，相同航帶的左右兩張重疊範圍至少需要超過 60%，而相鄰航帶的上下兩張重疊範圍至少超過 25%，相片中只有重疊的部份可以產製三維點雲及數值地形模型。在航空攝影測量中經常提到三種坐標系統：

一、相片坐標系統：

一般在影像的四周會有框標點，而坐標原點通常在相片的中心，利用各框標點來計算相片上各點的點位，為一已知值；內方位參數包含了相機率定參數(例如框標與像主點之相片座標、焦距、鏡頭畸變率參數等)，如圖 4-3 所示，乃是決定由攝影機中心到物點之距離，即為此坐標系統。

二、影像坐標系統：

影像坐標系統是採用像素 (Pixel) 來當作量度單位，一般其坐標原點在左上方，或影像的中心點。

三、地面坐標系統：

即是實境的坐標系統，台灣通常採用 TWD67、TWD97、WGS84；外方位參數即為相機在地面坐標系統上之 X、Y、Z 值及相機在空中對地面之三方向之轉角 ω、φ、κ，如圖 4-4 所示。

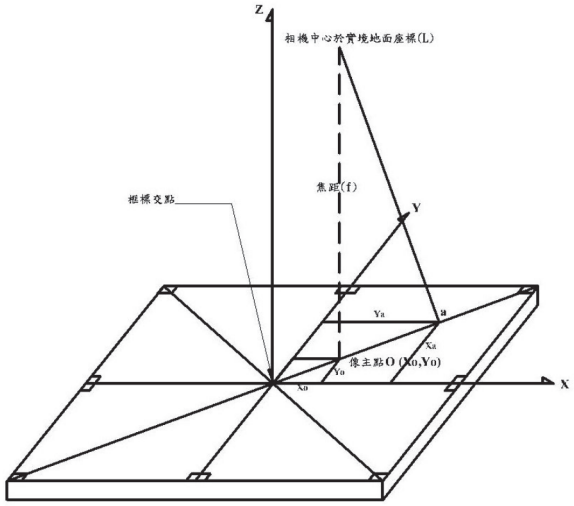


圖 4-3 內方位坐標系統示意圖

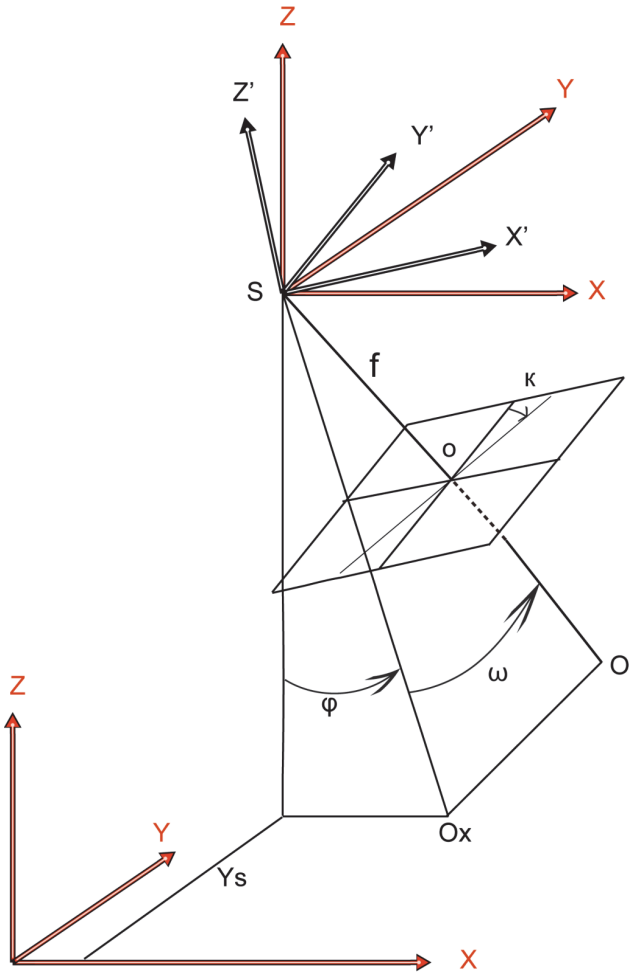


圖 4-4 外方位坐標系統示意圖

第 5 章 河床指標粒徑之影像判釋

5.1 判釋作業流程

Digital Gravelometer 由英國拉夫堡大學地理系的 David Graham 博士，Ian Reid 教授和 Stephen Rice 博士開發。Digital Gravelometer 能夠從數位影像中，快速地分析礫石沉積物。使用 Digital Gravelometer，可以快速的獲得與使用傳統現地調查測量技術類似的粒徑分布資訊，影像判釋流程如圖 5-1 所示。

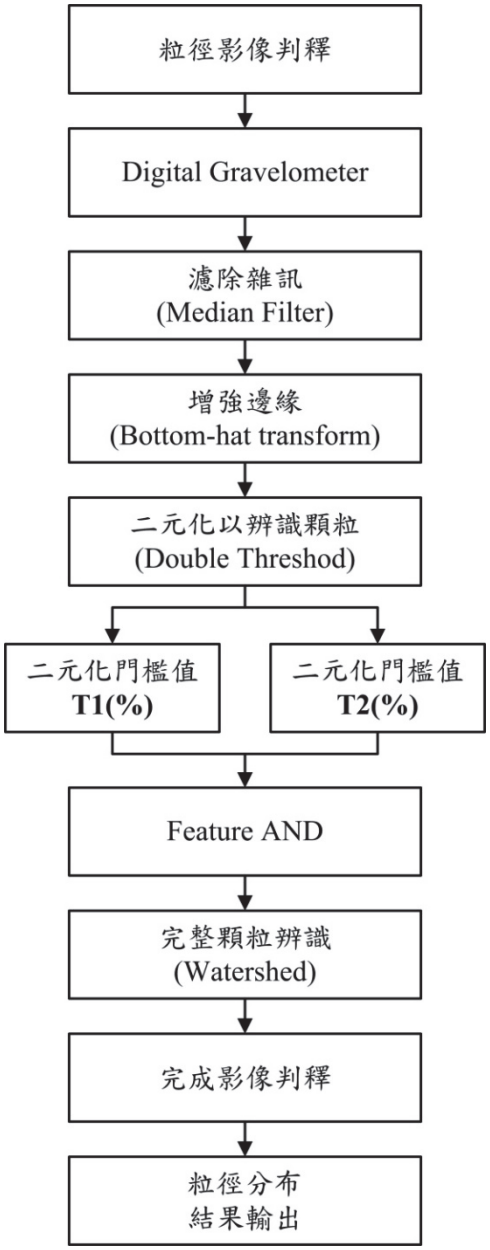


圖 5-1 Digital Gravelometer 影像判釋流程

5.2 影像資料前處理

無人飛機航拍所產製而成的正射影像，資料格式為網格式影像，在進行粒徑影像軟體判釋之前，需進行檔案格式轉換之前處理作業，方可輸入至 Digital Gravelometer 進行影像判讀，建議將無人機正射影像成果轉換為 600dpi 之高解析度影像，以利後續影像判釋分析作業。

5.3 影像判釋分析

Digital Gravelometer 系統畫面如圖 5-2，此軟體基本操作程序說明如下：

1.建立一個專案項目，如圖 5-3 所示。

2.選擇載入預設影像及點選四個控制點，如圖 5-4 所示。

3.查看及確認影像相關信息，如圖 5-5 所示。

4.粒徑影像判釋，如圖 5-6 所示。

5.查看粒徑影像判釋報告。



圖 5-2 Digital Gravelometer 影像判釋軟體系統畫面

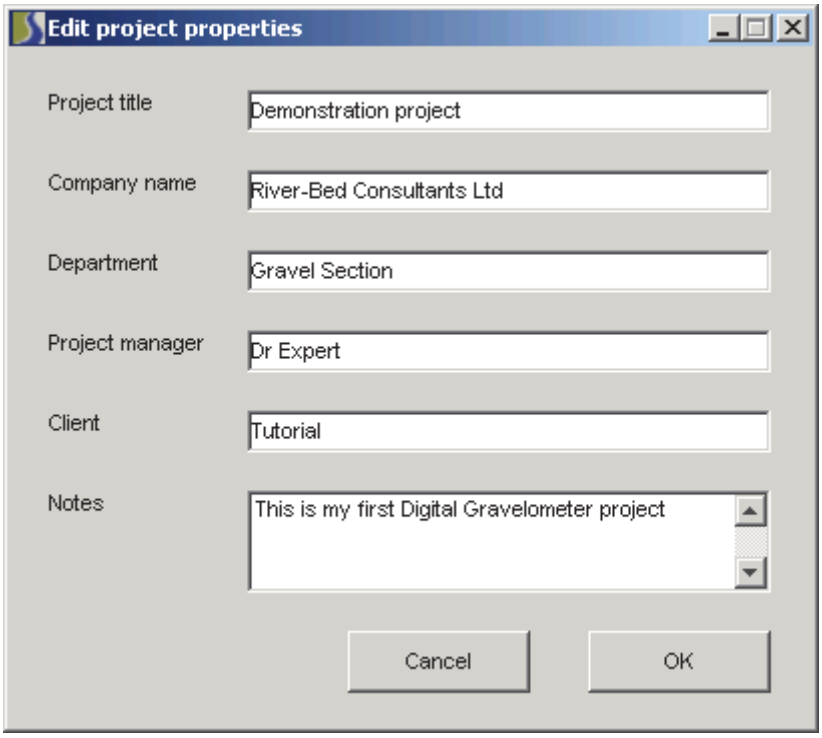


圖 5-3 專案項目建立範例畫面

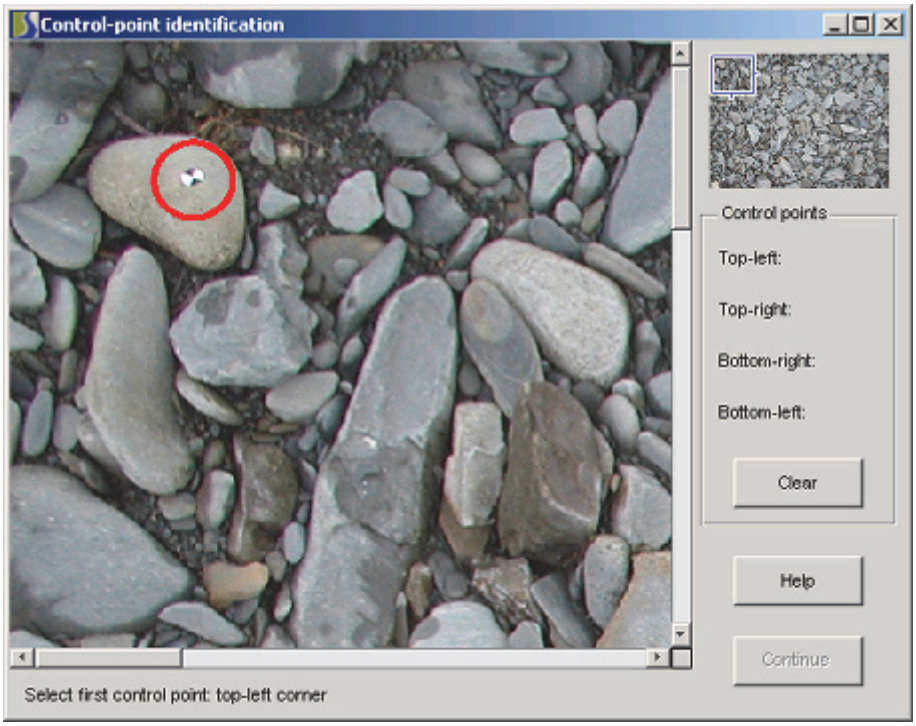
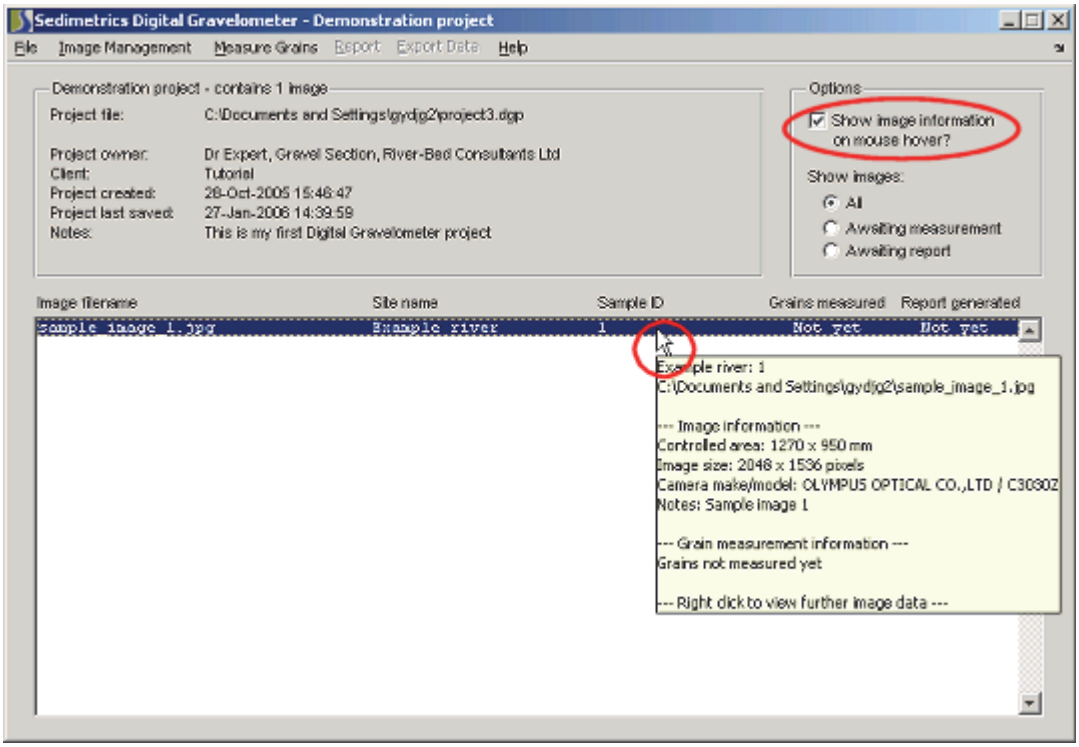


圖 5-4 載入預設影像及點選四個控制點



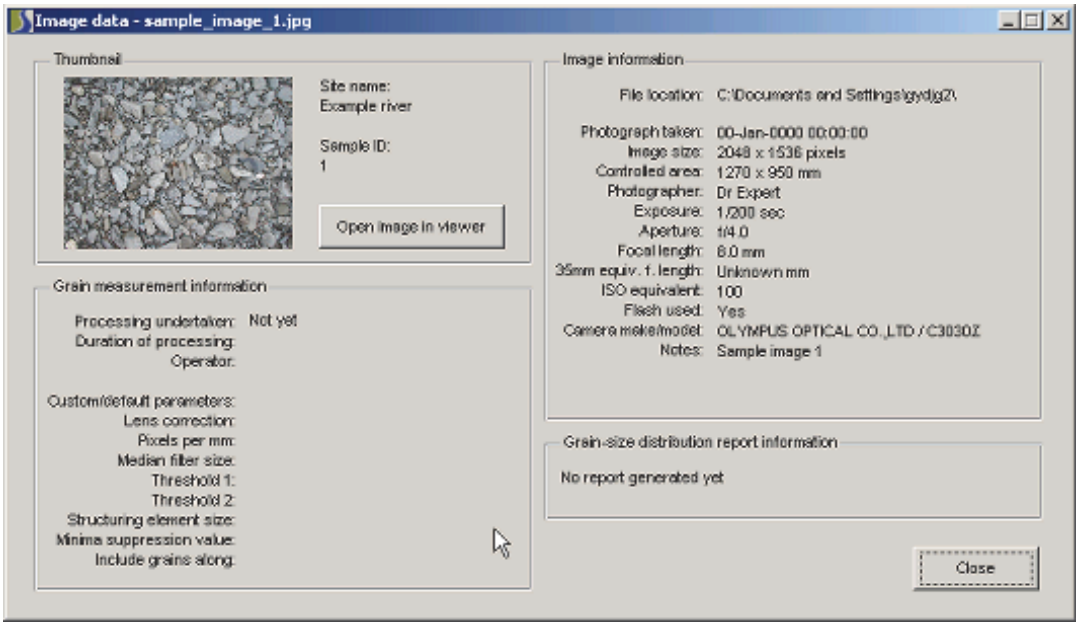
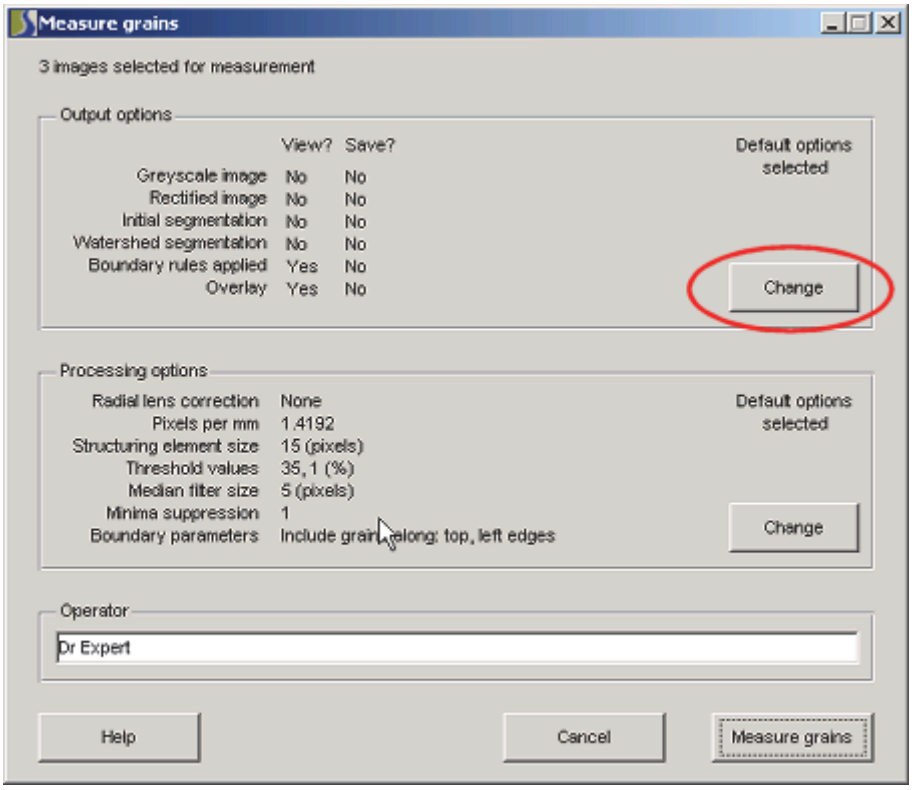


圖 5-5 查看及確認影像相關訊息


Measure grains
3 images selected for measurement
Output options
View? Save?
Default options selected
Greyscale image No No
Rectified image No No
Initial segmentation No No
Watershed segmentation No No
Boundary rules applied Yes No
Overlay Yes No
Change
Processing options
Radial lens correction None
Pixels per mm 1.4192
Structuring element size 15 (pixels)
Threshold values 35, 1 (%)
Median filter size 5 (pixels)
Minima suppression 1
Boundary parameters Include grains along: top, left edges
Default options selected
Change
Operator
Dr Expert
Help
Cancel
Measure grains

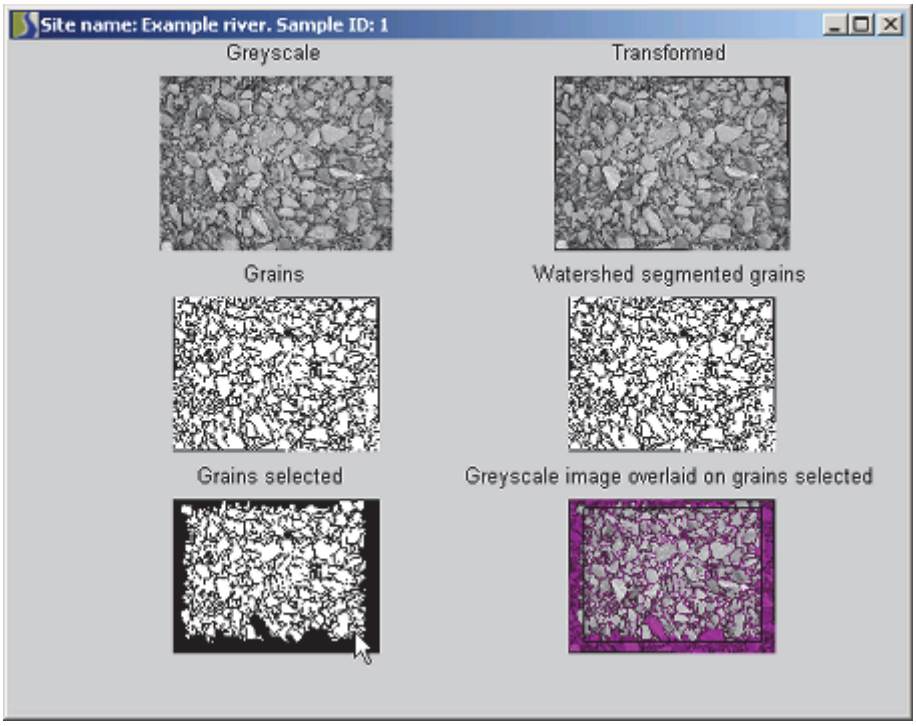

Site name: Example river. Sample ID: 1
Greyscale
Transformed
Grains
Watershed segmented grains
Grains selected
Greyscale image overlaid on grains selected

圖 5-6 粒徑影像判釋

5.4 判釋成果輸出

查看粒徑影像判釋報告(圖 5-7)，繪製影像判釋成果之河床質顆粒累積曲線圖，以常用試算表軟體，對各特徵粒徑對應通過之粒徑百分比進行內差計算。

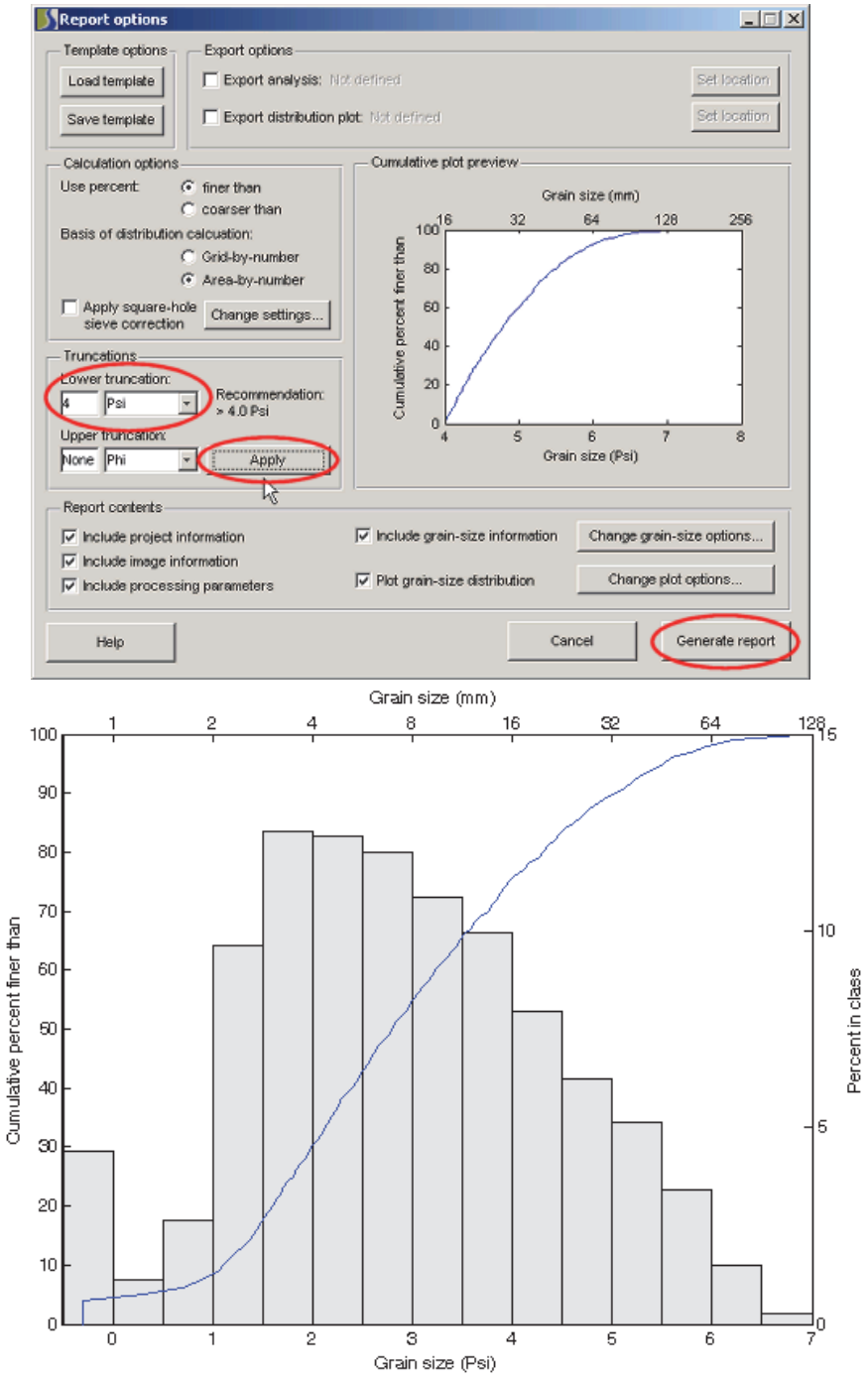


圖 5-7 粒徑影像判釋報告

第 6 章 河床指標粒徑之點雲分析

6.1 分析作業流程

以無人飛機航拍透過立體影像對特徵點匹配後建立之密集點雲，進行空間統計分析，利用點雲糙度特性來推估調查樣區之指標粒徑，分析作業流程如圖 6-1 所示：

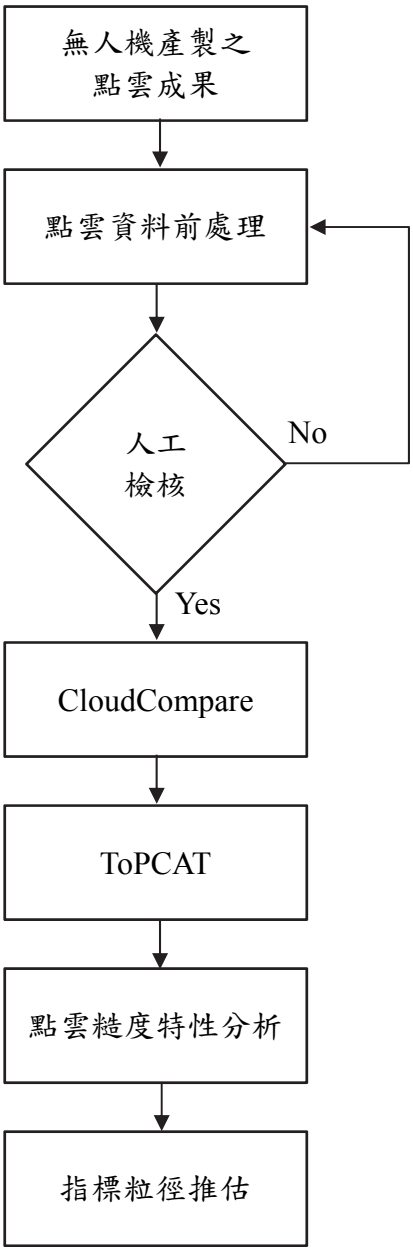


圖 6-1 點雲分析作業流程

6.2 點雲資料前處理

原始點雲在進行糙度特性分析之前需先將點雲之離群值(outlier values)及植生範圍之點雲濾除，圖 6-2~圖 6-3 分別為調查樣區點雲平面分布及側視分布，圖中可明顯看出植生區域之點雲分布，這部分植生區點雲在進一步進行粒徑判釋分析前應先加以濾除。離群值可透過設定河床表層點雲高度之合理分布範圍加以濾除，至於植生範圍之點雲資料，利用綠度指數(Greeness)作為初步篩選植生覆蓋區域之依據，綠度指數係以可見光波段的綠光與紅光來計算，計算公式如下：

$$Greeness = \frac{G - R}{G + R} \tag{1}$$

其中 R 為紅光波段影像灰值，G 為綠光波段影像灰值。完成初步植生覆蓋區域濾除後，再輔以人工檢核確認濾除之正確性與合理性。

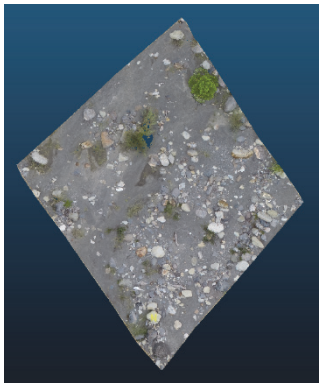


圖 6-2 河床調查樣區之點雲平面分布

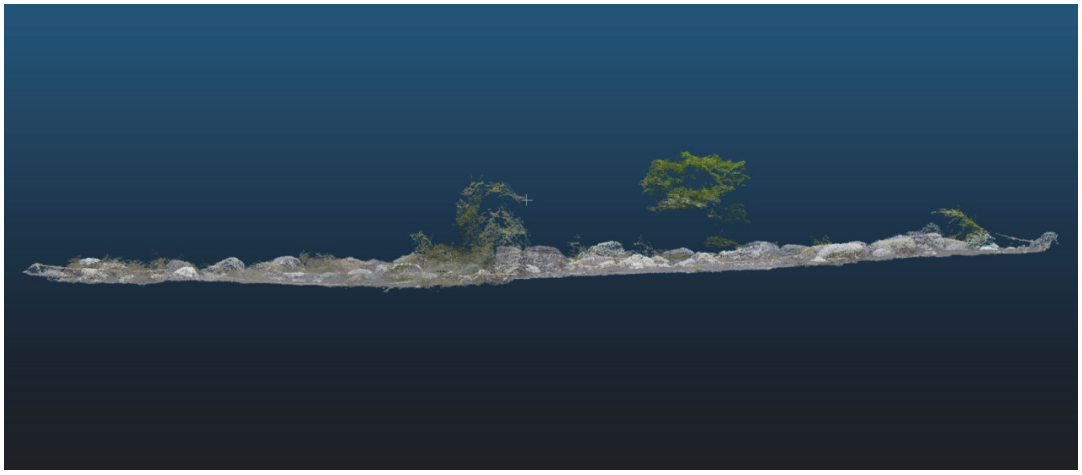


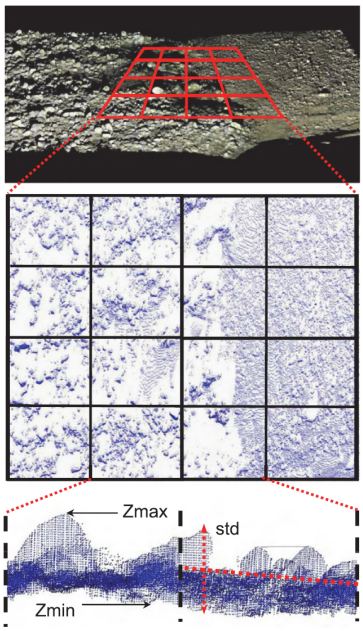
圖 6-3 河床調查樣區之點雲側視分布

6.3 點雲特性分析

針對點雲之糙度特性，主要分析標準偏差 σ_z，標準偏差係指在一特定區域內之點雲高程偏差(Heritage and Milan, 2009)，首先劃分特定尺寸網格，然後分析落於每個網格內點雲之高程標準偏差，分析示意如圖 6-4 所示。然而當點雲分布於非平坦河床時，標準偏差可能受到地形坡度影響而未能合適反映河床糙度特性，因此在標準偏差分析過程中需去除地形坡度趨勢之影響(detrend)。分析方法係透過計算點雲中每個點與指定大小核心距離(kernel)最近鄰域內的最小二乘最佳擬合平面(least-squares best-fitting plane)之間的高程差異而得，分析示意如圖 6-5 所示，

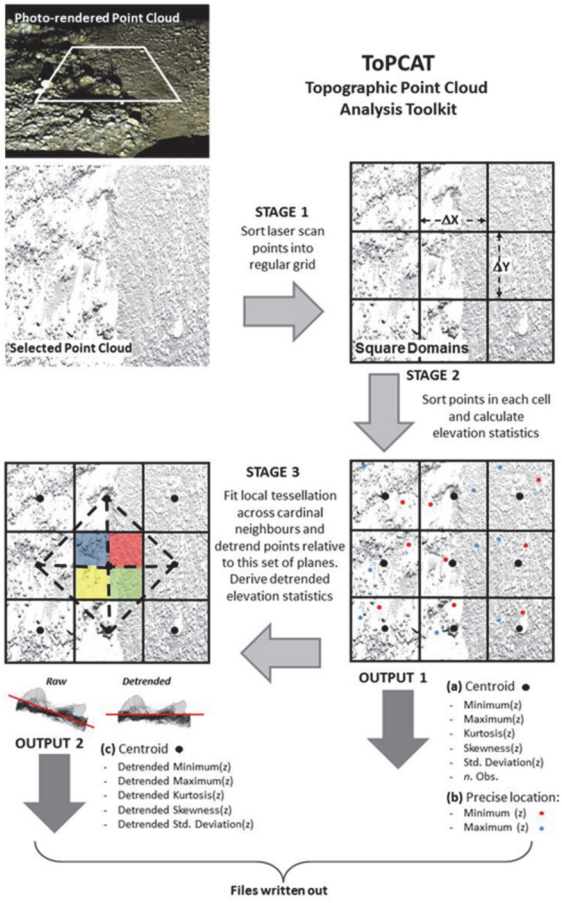
6.4 分析成果輸出

得到特定範圍內去除平均坡度趨勢後之標準偏差高度(Aberle and Smart, 2003; Brasington et al., 2012; Storz-Peretz and Laronne, 2013)，進一步以 ToPCAT (Topographic Point Cloud Analysis Toolkit)來推估 4 種指標粒徑：D_{16}、D_{50}、D_{84}、D_{90}。



資料來源：Rychkov et al., 2012

圖 6-4 點雲標準偏差之分析示意圖



資料來源：Brasington et al., 2012.

圖 6-5 點雲高程偏差分析示意圖

參考文獻

1. Aberle, J., Smart, G.M. (2003). The influence of roughness structure on flow resistance in mountain streams. J. Hydraul. Res., 41(3), 259–269.
2. Brasington, J., Vericat, D., Rychov, I. (2012). Modeling river bed morphology, roughness, and surface sedimentology using high resolution terrestrial laser scanning. Water Resour. Res., 48, W11519.
3. Bunte, K., Abt, S.R. (2001). Sampling surface and subsurface particle-size distributions in wadable gravel- and cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics, and streambed monitoring. General Technical Report RMRS-GTR-74. Fort Collins, Colo.; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 428.
4. Chang F.J. and Chung C.H. (2012). Estimation of riverbed grain-size distribution using image-processing techniques. Journal of Hydrology, 440–441, 102–112.
5. Daniel V., Laurent B., Frédéric L., Alain R. (2017). Using UAS optical imagery and SfM photogrammetry to characterize the surface grain size of gravel bars in a braided river (Vénéon River, French Alps). Geomorphology, 285, 94–105.
6. Detert, M., Weitbrecht, V. (2012). Automatic object detection to analyze the geometry of gravel grains – a free stand-alone tool. River Flow 2012 – Murillo (Ed.), 595-600.
7. Detert, M., Weitbrecht, V. (2013). User guide to gravelometric image analysis by BASEGRAIN. Advances in River Sediment Research – Fukuoka et al. (eds), 1789-1796.
8. Gomez, B. (1993). Roughness of stable, armored gravel beds. Water Resour. Res. 29 (11), 3631–3642.
9. Graham, D.J., Reid, I., Rice, S.P. (2005a). A transferable method for the automated grain sizing of river gravels. Water Resour. Res., 41, W07020,

doi:10.1029/2004WR003868.

10. Graham, D.J., Reid, I., Rice, S.P. (2005b). Automated sizing of coarse grained sediments: Image-processing procedures. Math. Geol., 37, 1 – 28.
11. Harada, M., Arakawa, T., Ooi, T., Suzuki, H., Sawada, K. (2016). Development of bed topography survey technique by underwater imaging process for UAV photogrammetry. 河川技術論文集, 第 22 卷, 67-72.
12. Heritage, G., Milan, D.J. (2009). Terrestrial laser scanning of grain roughness in a gravel bed river. Geomorphology, 113(1), 4–11.
13. McNeil, W.J., Ahnell, W.H. (1964). Success of pink salmon spawning relative to size of spawning bed materials. US Fish and Wildlife Service Special Scientific Report, Fisheries No. 469.
14. Storz-Peretz, Y., Laronne, J. (2013). Morphotextural characterization of dryland braided channels. Geol. Soc. Am. Bull., 125(9–10), 1599–1617.
15. TERADA, Y., FUJITA, I., ASAMI, K., WATANABE, Y. (2015). Measurement of grain size distributions of a cobble bar before and after a flood by using images taken from an UAV. 土木学会論文集 B1(水工学), 71(4), I_919-I_924.
16. Weichert, R., Wickenhäuser, M., Bezzola, G.R., Minor, H.E. (2004). Grain size analysis for coarse river beds using digital imagery processing. Proc. RF 2004, Naples, Italy, 753–760.
17. Wohl, E.E., Anthony, D.J., Madsen, S.W., Thompson, D.M. (1996). A comparison of surface sampling methods for coarse fluvial sediments. Water Resources Research, 32 (10), 3219-3226.
18. Wolman, M.G. (1954). A method of sampling coarse river bed material. Transactions of the American Geophysical Union, v35, n6, 951-956.
19. 王驥魁，陳嘉欣，邵允銓，吳富春(2008)，「河床質粒徑分布之數位影像光篩分析」，農業工程學報，第 54 卷，第 4 期，16-32。
20. 經濟部水利署水利規劃試驗所(2006)，「河床質調查方法之比較研究」。

21. 經濟部水利署水利規劃試驗所(2007)，「河床質調查作業參考手冊」。

22. 經濟部水利署水利規劃試驗所(2009)，「河道曼寧 n 值與河床質粒徑關係之研究(2/2)」。

23. 鍾昌翰，張斐章(2009)，「影像處理應用於河床粒徑分佈之研究」，台灣水利，第57卷，第2期，12-23。