



應用 UAV 空拍影像 和 BASEGRAIN 軟體 分析 河道泥沙粒徑分布 之研究

Research on Analyzing Riverbed Sediment Particle Size Distribution Using UAV Aerial Imagery and Basegrain Software

陳祥偉 / 國立成功大學水利及海洋工程系 碩士

賴東暘 / 國立成功大學水利及海洋工程系 博士候選人

詹錢登* / 國立成功大學水利及海洋工程系 特聘教授

泥沙是河床的重要組成物質，泥沙的顆粒大小與分布會影響河道水流及輸沙特性，進而影響河道形貌及生態環境，因此瞭解河道泥沙顆粒大小與分布對於河道環境管理具有重要意義。傳統河道泥沙調查方法需要大量時間和人力去執行，成本高昂，無法進行大範圍及高頻率的調查。本研究探討使用無人機空拍技術和 BASEGRAIN 顆粒判釋軟體進行河床泥沙顆粒尺寸調查的適宜性。首先進行礫石顆粒的 BASEGRAIN 影像判釋室內試驗，並將結果與人工線採樣方法所取得的粒徑分布進行比較，選取合適之 BASEGRAIN 影像分析參數以獲取較佳的判釋結果。然後進行現地河道的無人機空拍，取得河道高解析度照片及正射影像，使用 BASEGRAIN 軟體判釋河床顆粒粒徑大小與分布。研究結果顯示合理的參數設定是提升 BASEGRAIN 判釋結果的重要因素，室內試驗的分析對象及工作環境較為單純，可取得比較好的結果。河道現地試驗的結果顯示因為河道現場環境較為複雜，BASEGRAIN 影像判釋和人工線採樣法所得河床粒徑差異較大，其相對差異約在 $\pm 70\%$ 以內。

關鍵詞：泥沙粒徑、BASEGRAIN 軟體、影像判釋、粒徑分布

ABSTRACT

Sediment is a crucial component of riverbeds, and the size and distribution of sediment particles can impact the flow dynamics and sediment transport of rivers, thereby influencing river morphology and ecological environment. Therefore, understanding the sediment-size distribution is of significant importance for riverine environmental managements. Traditional methods for sediment investigation in riverbeds require a substantial amount of time and manpower, resulting in high costs, making it challenging to conduct large-scale and high-frequency surveys. This study explores the suitability of utilizing unmanned aerial vehicle (UAV) aerial imaging technology and the BASEGRAIN software for assessing riverbed sediment. Initially, indoor experiments

were conducted using BASEGRAIN interpretation for gravel particle analysis, and the results were compared with that obtained by a manual line-sampling method, so as to determine appropriate BASEGRAIN parameters. Subsequently, UAV aerial imaging was carried out in the field to obtain high-resolution photographs and orthoimages of the riverbed, and the BASEGRAIN was used to interpret sediment-size distribution of riverbed. The research findings indicate that appropriate parameter settings are a crucial factor in improving BASEGRAIN interpretation results. Indoor experiments, with simpler analysis subjects and environments, yielded better interpretation results. Field investigations showed that due to the complexity of the riverine environment, there were significant differences in sediment size distributions by the BASEGRAIN interpretation and the manual line sampling, with a relative difference within $\pm 70\%$.

* 通訊作者，cdjan@ncku.edu.tw

Keywords: Sediment size, BASEGRAIN software, Image interpretation, Size distribution

前言

河床粒徑為河道內地形的最小尺度，粒徑之分布影響了水流阻力、底床剪應力和河床質傳輸，且為數值模擬的重要參數—粗糙度，瞭解其大小的分布與變異將有助於釐清水流流動與泥沙運輸與堆積^[1-3]，亦可用於土石流變參數之推估。因此，河床質粒徑分佈對於河道流況理解、河流調控和管理極為重要。

河床質調查主要目的在於了解河床粒徑大小及分布。篩分析是泥沙粒徑分布分析常用的方法。河道的中、上游河段，常為礫石河段，河床泥沙粒徑分布廣泛，細顆粒泥沙可以現地取樣之後帶回實驗室進行篩分析，但是過大的礫石顆粒常超出人力可操作範圍，無法現地取樣進行篩分析。依據前人之研究，礫石河床取樣方法大致可區分為體積取樣法、網格取樣法與面積取樣法^[4-7]。因調查目的不同，河床質調查取樣應有表層與底層分別。當需要取樣底層樣品時，僅能採用體積取樣法，表層樣品可以用網格法與面積法進行取樣。

目前台灣較常使用的河床質採樣方法為體積採樣法，採取 1.0 m 長 × 1.0 m 寬 × 1.0 m 深的試體進行分析，相當費時費力。由於河道又寬又大，使用體積採樣法常出現取樣範圍過小，或是取樣區顆粒過大，無法採樣的問題。對於礫石河床，網格取樣法是一種選擇，例如卵石取樣法 (Pebble count)，取得河床表面的礫石顆粒大小及分布。近年來無人飛行載具 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 空拍技術及正射影像的處理技術的快速發展，以及粒徑判釋軟體的出現，例如 BASEGRAIN 粒徑判釋軟體，使得大範圍河道泥沙粒徑的調查，出現了嶄新的機會^[8-11]。

有鑑於此，為了探討 BASEGRAIN 粒徑判釋軟體適用性，本研究首先進行室內礫石粒徑判釋實驗，用以檢測 BASEGRAIN 軟體對於顆粒粒徑判釋結果的準確度。然後再進行河道泥沙卵石取樣法現地調查，以及進行 UAV 空拍取得河道表面顆粒影像，運用 BASEGRAIN 軟體判釋河道粒徑分布，判釋結果與卵石取樣法^[12,13] 現地調查相比較，分析其間之差異。研究流程圖如圖 1 所示^[14]。

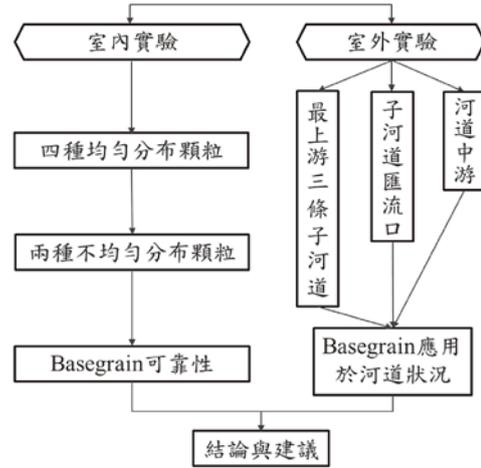


圖 1 影像粒徑判釋室內與現地實驗流程圖

粒徑判釋 BASEGRAIN 軟體

本研究使用 BASEGRAIN Version 2.2.0.4 版進行泥沙粒徑判釋分析。BASEGRAIN 是種以 MATLAB 為基礎的自動目標檢測軟體，應用於河道無黏性礫石底床的俯視圖照片進行粒徑分析。該軟體由瑞士蘇黎世聯邦理工學院水利、水文及冰河工程實驗室所開發出來的影像判釋軟體^[15]。本研究使用 BASEGRAIN Version 2.2.0.4 版。其特色如下：

1. 以數位相機拍攝照片，可進行大面積拍攝，資料收集迅速，且如果照片有標記經緯度，若於 GoogleEarth 開啟粒徑分布結果則會自動進行地理位置標記。
2. 此軟體免費且源代碼開放。軟體中有五步驟，其中有許多參數可進行調整，讓影像中不同顆粒狀況可以有對應參數組合，進而得到較佳結果。
3. 在參數調整完後，可透過圖形用戶介面 (Graphical User Interface, GUI) 進行手動後處理，調整判釋不完整之顆粒，最後粒徑分布結果可用 Excel 或 KML 檔進行輸出。

BASEGRAIN 藉由圖形用戶界面進行預處理及後處理。是應用雙灰度閾值進行確認間隙和預估可能間隙，接著應用底帽濾波器將噪聲去除。利用 Canny 和 Sobel 方法判斷強邊緣以及弱邊緣，降低噪聲對邊緣判定的干擾。以分水嶺方法確認顆粒切割是否會過度切割。使用 BASEGRAIN 軟體進行顆粒粒徑影像判釋流程如圖 2 所示。

各步驟簡述如下：

影像拍攝

相機以垂直地面方式拍攝，照片與照片之間重疊



圖 2 使用 BASEGRAIN 粒徑判釋流程

率保持 75%。在室內實驗，以 1.0 m × 1.0 m 方框為實驗區域，拍攝高度約為 20 cm。室外現地調查以 1.0 m × 1.0 m 河道表面為調查區域，拍攝高度約為 20 m，地面解析度約為 0.55 cm/px。

組建正射影像

將拍攝照片匯入 pix4D 軟體，以運動恢復結構 (Structure from Motion, SfM) 輸出稀疏點雲，再接著以 Clustering Multi-View Stereo (CMVS) 進行照片聚類以及密集匹配算法 (Patch-based Multi-View Stereo, PMVS) 輸出稠密且質量較高的點雲，產製正射影像。再搭配控制點矯正空間誤差。接著利用地理資訊系統 (Arcgis) 將目標影像以 600 dpi (dot per inch) 輸出，將此結果進行影像判釋。

影像匯入 BASEGRAIN

將正射影像匯入 BASEGRAIN 進行判釋分析，處理過程如圖 3 所示。不同步驟負責處理不同圖像特性，尤其雙灰度閾值以及分水嶺切割法尤為重要。

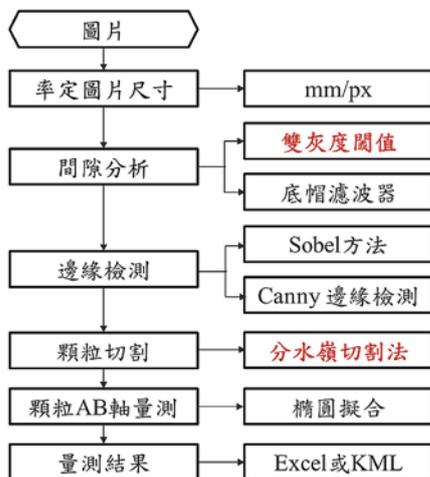


圖 3 BASEGRAIN 影像判釋處理過程

BASEGRAIN 判釋處理過程說明：

間隙分析 (步驟一、二)

第一個步驟是使用雙灰度閾值做間隙的分割，如大津演算法 (Otsu's method) 做二值化的閾值分割，大津算法也稱為最大方差法，是一種用於自動圖像閾值處理的有效算法，Otsu's method 的目標是找到一個最佳的閾值，將灰階影像分為目標和背景兩類。閾值的選擇是使得目標和背景區域內的方差最大化，而區域與區域之間的方差最小化。使用此方法來確認真正間隙，以及預估可能間隙。接著是底帽濾波器 (Bottom-hat transformation) 處理，它是圖像形態學中的方法。意指在原始圖像中應用一個結構元素，並將與其原始圖像進行差分。對原始圖像進行膨脹，而後將膨脹後的圖像減去原始圖像。底帽轉換可以用來增強圖像中小尺度的細節。

邊緣檢測 (步驟三)

在 BASEGRAIN 模式中邊緣檢測採用的是 Canny 邊緣檢測法。使用高斯濾波器於邊緣檢測前平滑圖像，減少噪聲 (noise) 以及不必要的邊緣檢測。計算圖像中每個像素的梯度大小和方向。Sobel 算子是一種用於圖像處理中的梯度計算算子，其能在圖像中找到梯度變化最大的位置，進而檢測出圖像中的邊緣。使用非極大值抑制提取圖像中的邊緣，再來應用雙閾值來將強邊緣與弱邊緣分開，最後一步是將弱邊緣連接到強邊緣。若發現弱邊緣連接於強邊緣，則將其視為邊緣的一部分。此過程重複進行，直到所有弱邊緣都連接到強邊緣或被刪除為止。

顆粒切割 (步驟四)

分水嶺變換 (Watershed Transform) 是一種基於圖像強度或梯度的分割方法，可用於將圖像分割成不同的區域，從而提取圖像中的對象或邊界 [16]。分水嶺變換的基本概念是將圖像看作一個地形圖，其高度表示像素的強度或梯度值。通過將高度較低的區域看作「山谷」，高度較高的區域看作「山峰」，則可以在圖像中找到「分水嶺」，使得水從這些分水嶺流下去，並最終流入「匯聚盆地」，形成不同的分割區域。

顆粒 AB 軸量測 (步驟五)

以正交化二階中心矩方式，橢圓擬合目標顆粒俯視圖。而短軸即 b 軸是顆粒特徵直徑，最後在消除未完全包含在邊界內顆粒，避免統計特徵粒徑時產生誤差。

量測結果

軟體是以線採樣法 Fehr [17] 統計顆粒數量，進而去計算影像中顆粒的特徵粒徑。粒徑分布結果以 Excel 檔案或帶有地理標記之 KML 檔案輸出，KML 檔案可由 Google Earth 開啟。

BASEGRAIN 參數檢定

BASEGRAIN 在影像處理過程大致上可以分為五個步驟。分析時需要進行相關參數的選擇與調整。雖然有預設參數值，但是不同情況需要不同參數組合，才能達到較好的判釋結果。其中確認灰度閾值乘數 (facgrayhr1) 以及分水嶺橋最小允許長度 (areaCutWW [px]) 對於影像判釋結果的影響最為明顯。其次是中值濾波器參數 (medfiltsize10 [px])、灰度閾值的大小 (bloSizG [px])、無法檢測細粒料比例 (Corrfine1) 及影像線採樣間距 (distFehr [px]) 等參數。

接下來對確認灰度閾值乘數、分水嶺橋最小允許長度、與中值濾波器大小進行介紹。由於步驟二、三及五的參數變動對判釋結果不顯著，本研究採用預設值。影像判釋中須注意目標顆粒內判釋情況以及目標顆粒和背景 (細粒料區域，如泥沙區域) 判釋狀況，以下說明兩情況。首先是顆粒內判釋情況，圖 4 上方判釋圖設置 facgrayhr1 (0.8)。facgrayhr1 (0.8) 較大時對於顏色深淺分割的較細，對於確認間隙 (圖中黑色區域為確認間隙區域，非綠色區域為可能間隙區域) 較為敏感。若單顆顆粒表面因凹凸不平導致有陰影遮擋，顆粒中顏色差異較大區域，就會導致判讀結果將單一顆粒分成不同的顆粒。圖 4 下方判釋圖設置 facgrayhr1 (0.4)，facgrayhr1 (0.4) 數值較小的時候可以改善大顆粒因為表面凹凸造成的過度切割。

再來觀察目標顆粒和背景，圖 5 上方判釋圖設置 facgrayhr1 (1)。當 facgrayhr1 (1) 較大時，可以觀察到一些較為平坦無顆粒的區域被較正確的判釋出來，並沒有因為背景顏色相近而被判釋成一個大顆粒。圖 5 下方判釋圖設置 facgrayhr1 (0.6)，當 facgrayhr1 (0.6) 較小時雖然大顆粒被判釋的較符合真實顆粒輪廓且過度分割情況有較為減少，可是一些本該不是顆粒的區域，因為背景顏色相同，所以被判釋為一顆大顆粒。

如圖 6 所示，調整分水嶺橋最小允許長度 (areaCutWW [px]) 可以檢測其顆粒的噪聲 (noise)，避免顆粒過度分割，或是避免將多顆顆粒判釋為單顆顆粒的錯誤判釋情況。圖 6 上方及下方判釋圖分

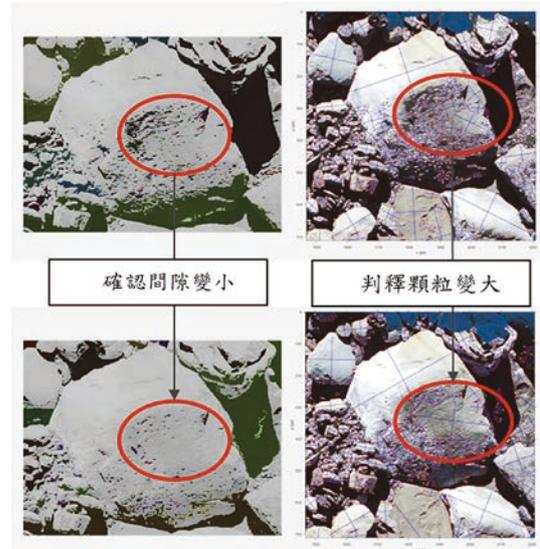


圖 4 調整灰度閾值乘數 (facgrayhr1) 提升判釋結果

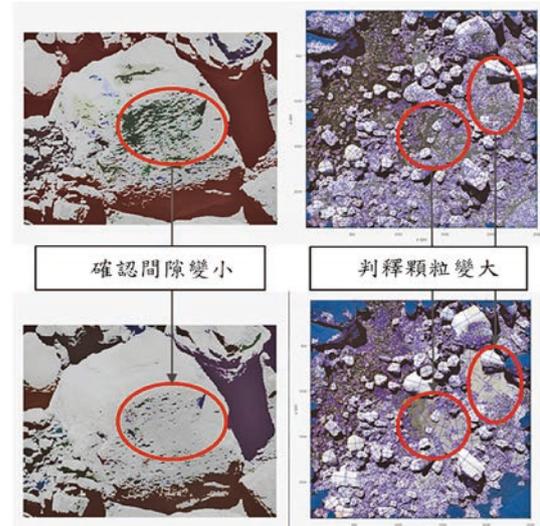


圖 5 調整灰度閾值乘數 (facgrayhr1) 提升判釋結果

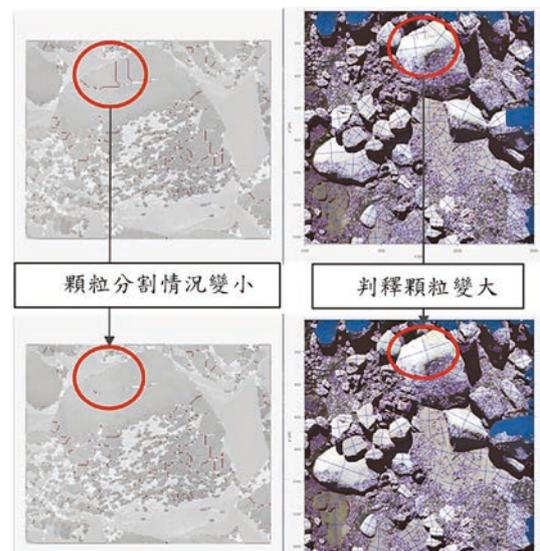


圖 6 調整分水嶺橋最小允許長度提升顆粒判釋結果

別設置 areaCutWW (80) 及 areaCutWW (40)。當 areaCutWW (80) 較大時，較適合在確認 facgrayhr1 較小時的情況，可以去判讀因為背景顏色差異較小所導致沒有被完整分割的顆粒。當 areaCutWW (40) 較小時，會將所被判讀的顆粒盡量不被過度切割，較適合在 facgrayhr1 較大時的情況，去避免因為背景顏色差異而被過度分割的顆粒。

粒徑判釋室內試驗

判釋試驗材料及流程

本研究室內粒徑判釋試驗採用的礫石材料，包含不同大小、表面紋理、顏色的白卵石、中白石、黑卵石、黑扁石，如圖 7 所示，其中白卵石表面較為光滑，紋理較一致，而中白石與黑扁石次之，黑卵石紋理較複雜。以白卵石為例，它的粒徑介於 8.5 mm 至 30.5 mm 之間。試驗時，如圖 8 所示，將礫石顆粒以單層緊密排列在 1.0 m × 1.0 m 的灰色方框內，單層緊密排列為顆粒緊密靠著相鄰粒徑，但不堆疊在一起。圖 8 中顯示紅色點為相機拍照點位。以相機離地約 20 公分



圖 7 室內粒徑判釋試驗所採用的礫石材料

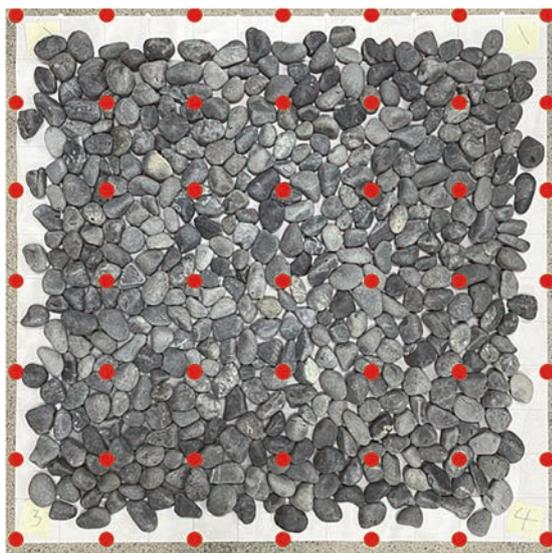


圖 8 礫石緊密排列在 1.0 m × 1.0 m 的方框內

且垂直俯視對準紅點拍攝總共 49 張照片，相鄰兩張照片的重疊率約 75%。將照片輸入 pix4D 軟體組建正射影像，照片重疊率達 75%，較容易取得效果較好的正射影像。將正射影像匯入 BASEGRAIN 軟體進行顆粒的判釋，影像判釋結果以人工方式檢視，並手動做必要之調整（切割、合併、消除）已取得較佳之粒徑判釋結果，最後將判釋結果輸出，進行粒徑分布分析。

接著，如圖 9 所示，以網格採樣法進行人工粒徑採樣，將採樣繩對準外框之直線，每隔 10 公分取樣一次，採樣基準為採樣繩正下方，輔以繫帶往正下方對準顆粒並採樣。總共取樣 121 顆顆粒，並以量測每顆顆粒的 a 軸（長軸）、b 軸（中軸）及 c 軸（短軸）。最後以顆粒 b 軸為代表粒徑，計算分析所有取樣顆粒粒徑的累積分布，並將此粒徑分布與影像判釋結果的粒徑分布做比較。室內試驗，每一組試驗所需時間大約三個小時，本研究室內顆粒粒徑判釋試驗流程圖如圖 10 所示。

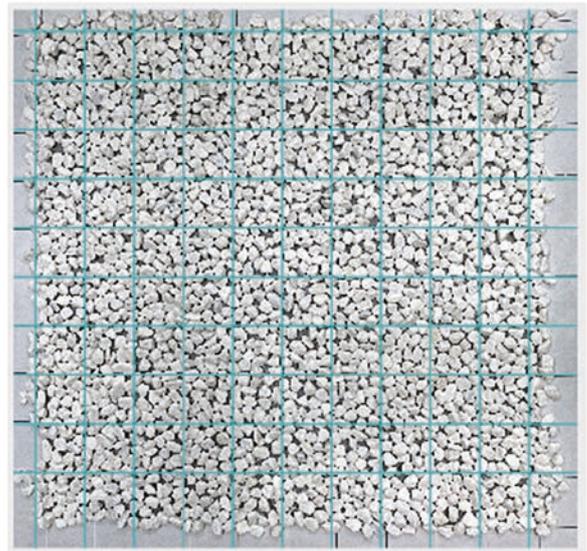


圖 9 網格採樣法進行人工粒徑採樣

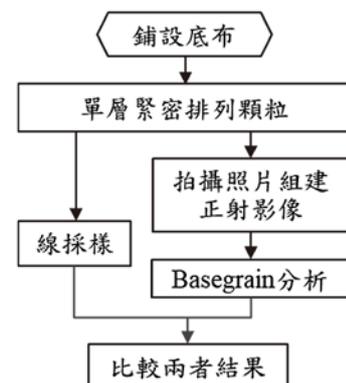


圖 10 顆粒粒徑判釋室內試驗流程圖

判釋結果與分析

首先對白卵石進行三次試驗，以了解試驗結果的一致性。白卵石的大小，大致均勻，平均 a 軸約 30 mm、b 軸約 23 mm、c 軸約 17 mm。每次試驗顆粒材料都是以單層、緊密、不堆疊的原則排列在 1.0 m × 1.0 m 的灰色方框內，如圖 11 所示。使用 BASEGRAIN 影像判釋分析結果如圖 12 所示，圖中藍線十字符號代表顆粒的長軸和短軸。三次試驗結果列於表 1 及圖 13，三次試驗結果的粒徑分布與其平均值的差異相當小，在 -5.03% 至 4.25% 之間，顯示相同材料顆粒判釋結果相當一致，具有很好的重複性。

表 2 顯示白卵石三次粒徑判釋試驗平均結果比較，由表中可知 BASEGRAIN 影像判釋出來的粒徑大小相對於人工網格線採樣法所得粒徑，細顆粒有低估現象，粗顆粒有高估現象（圖 13）。如表中所列，在中值粒徑 D_{50} 方面，前者約高估 7.94%；在細顆粒方面，

如 D_{16} ，前者約低估 6.83%；在粗顆粒方面，如 D_{84} ，前者約高估 15.45%。

圖 14 為中白石粒徑判釋試驗結果比較圖，中白石粒徑大小相似，平均 a 軸約 27 mm、b 軸約 18 mm、c 軸約 10 mm。圖中也顯示 BASEGRAIN 影像判釋出來的粒徑大小相對於人工網格線採樣法所得粒徑，細顆粒有低估現象。在中值粒徑 D_{50} 方面，前者約低估 1.0%；在細顆粒 D_{16} ，前者約低估 15%；但是在粗顆粒方面，如 D_{84} ，前者和後者大致相同，沒有顯著差異。

表 2 室內白卵石三次粒徑判釋試驗平均結果比較

代表粒徑 (mm)	影像判釋平均 (mm)	人工線採樣平均 (mm)	相對差異 (%)
D_{10}	17.50	19.67	-11.02
D_{16}	18.63	20.00	-6.83
D_{30}	21.33	21.67	-1.54
D_{50}	24.47	22.67	7.94
D_{60}	26.00	23.33	11.43
D_{84}	29.63	25.67	15.45

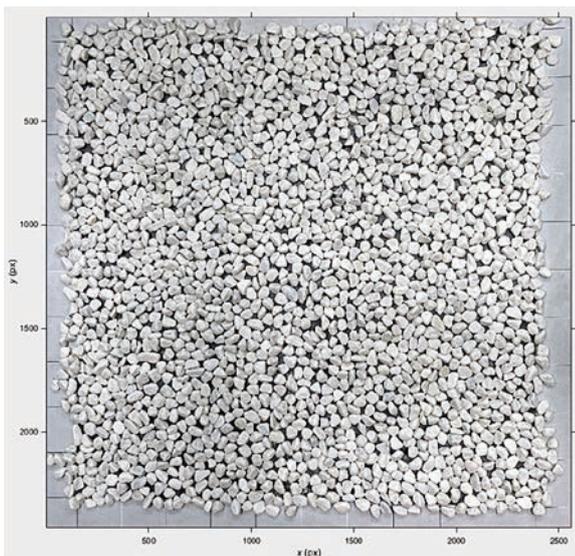


圖 11 白卵石材料鋪設在 1.0 m × 1.0 m 的方框內

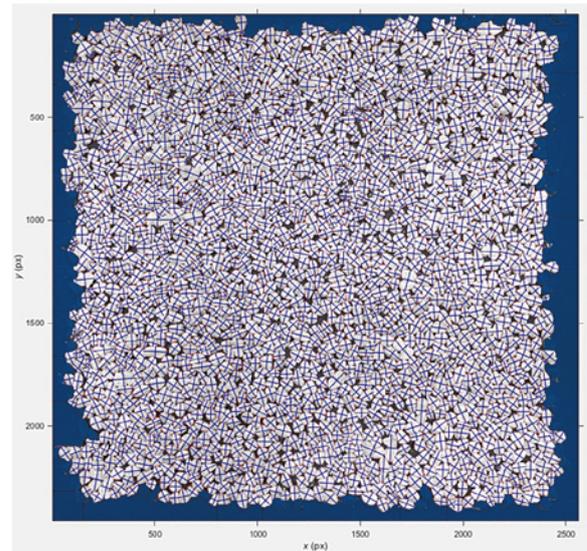


圖 12 使用 BASEGRAIN 影像判釋分析結果

表 1 室內白卵石三次試驗 BASEGRAIN 影像粒徑判釋結果及比較

累積機率 (%)	第 1 次 A (mm)	第 2 次 B (mm)	第 3 次 C (mm)	平均 D (mm)	(A-D)/D (%)	(B-D)/D (%)	(C-D)/D (%)
99	31.99	31.85	31.91	31.92	0.23	-0.21	-0.02
98	31.81	31.71	31.77	31.76	0.15	-0.17	0.02
95	31.30	31.27	31.35	31.31	-0.02	-0.12	0.14
90	30.45	30.54	30.66	30.55	-0.33	-0.03	0.36
84	29.42	29.66	29.83	29.64	-0.73	0.08	0.65
65	26.18	26.88	27.20	26.75	-0.14	0.47	1.67
50	23.62	24.68	25.13	24.48	-0.50	0.83	2.67
35	21.09	22.45	23.06	22.20	-0.00	1.13	3.87
30	20.25	21.49	22.23	21.32	-0.03	0.78	4.25
16	17.90	18.82	19.20	18.64	-0.97	0.97	3.00
10	16.90	17.67	17.91	17.49	-0.39	1.01	2.38

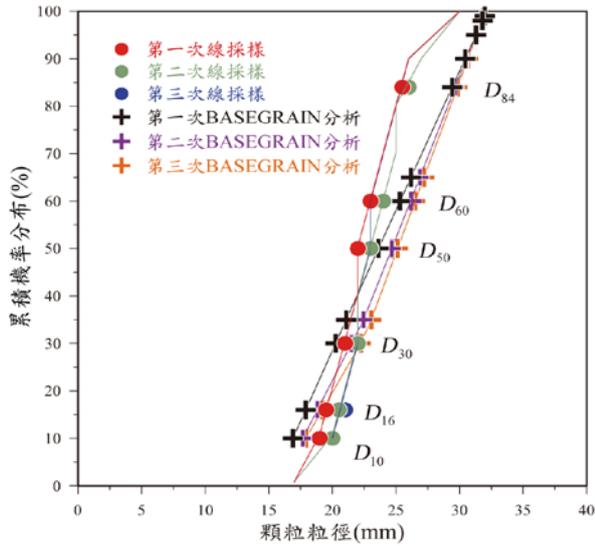


圖 13 白卵石三次粒徑判釋試驗結果比較圖

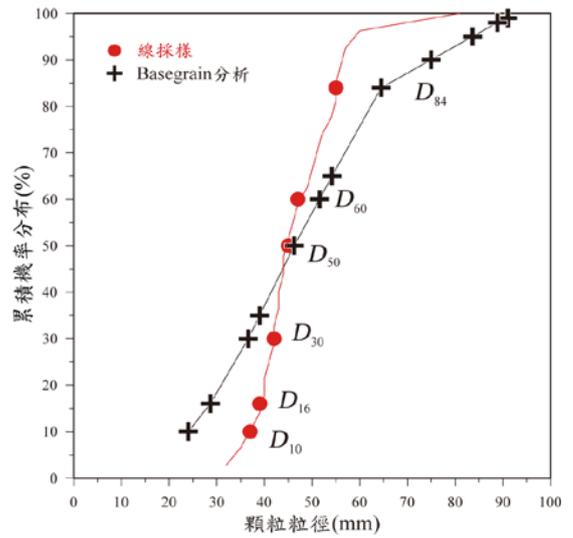


圖 15 黑卵石粒徑判釋試驗結果比較圖

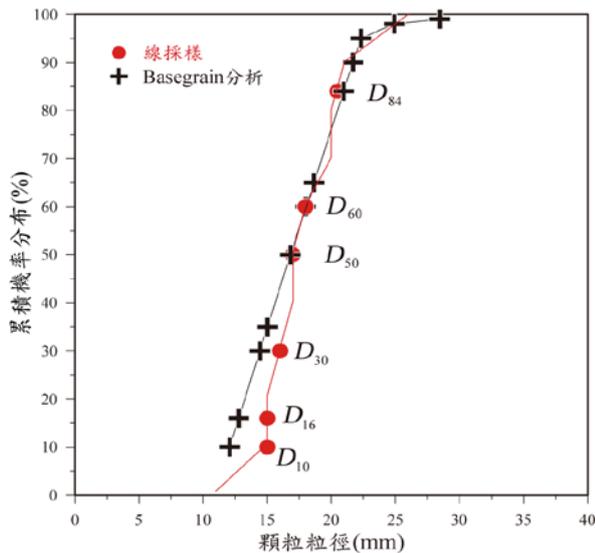


圖 14 中白石粒徑判釋試驗結果比較圖

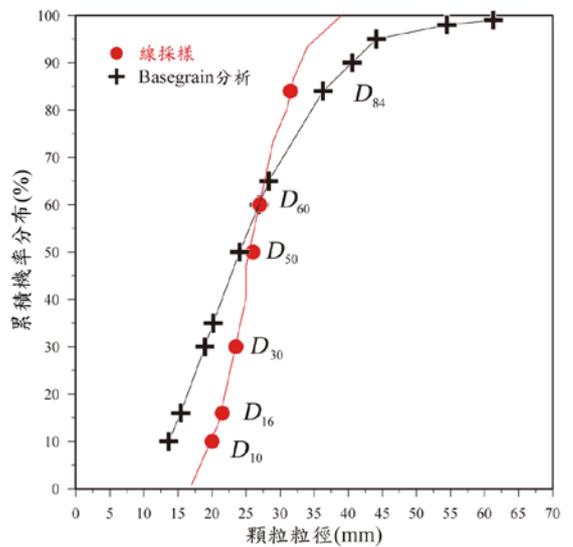


圖 16 黑扁石粒徑判釋試驗結果比較圖

圖 15 為黑卵石粒徑判釋試驗結果比較圖，黑卵石粒徑大小相似，平均 a 軸約 67 mm、b 軸約 47 mm、c 軸約 35 mm，相較於其他試驗材料，試驗採用的黑卵石比較大。圖中也顯示 BASEGRAIN 影像判釋出來的粒徑大小相對於人工網格線採樣法所得粒徑，細顆粒有低估現象，而粗顆粒有高估現象。在中值粒徑 D_{50} 方面，前者約高估 3.0%；在細顆粒 D_{16} ，前者約低估 27%；在粗顆粒方面，如 D_{84} ，前者約高估 17%。黑卵石表面紋理為四種石頭中最为複雜之顆粒，BASEGRAIN 分析參數調整不好調整，小顆粒有過度分割的現象，而較大顆粒也有些許兩顆合併為一顆現象，導致細顆粒低估而粗顆粒高估的現象更為明顯。所幸，中值粒徑的判釋結果相當接近。

圖 16 為黑扁石粒徑判釋試驗結果比較圖，黑扁石粒徑大小相似，平均 a 軸約 39 mm、b 軸約 26 mm、c 軸約 19 mm。圖中也顯示 BASEGRAIN 影像判釋出來的粒徑大小相對於人工網格線採樣法所得粒徑，細顆粒有低估現象，而粗顆粒有高估現象。在中值粒徑 D_{50} 方面，前者約低估 8.0%；在細顆粒 D_{16} ，前者約低估 32%；在粗顆粒方面，如 D_{84} ，前者約高估 17%。由黑扁石粒徑判釋試驗結果可知，細顆粒低估而粗顆粒高估的現象更為明顯，可能是由於黑色卵石上的顏色分布較不一致。所幸，中值粒徑的判釋結果大致相近。

綜整前述室內粒徑判釋試驗有白卵石（三組）、中白石、黑卵石及黑扁石共 6 組試驗。比較人工網格線採樣結果及 BASEGRAIN 影像分析結果，如圖 17 所

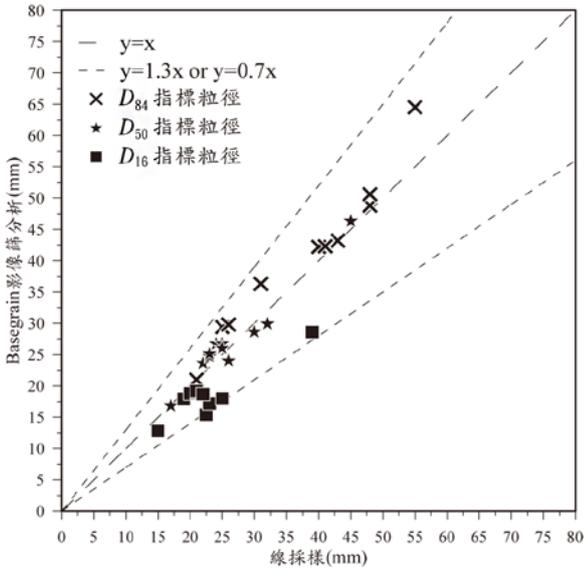


圖 17 本研究人工網格線採樣及 BASEGRAIN 影像分析結果之比較

示。BASEGRAIN 影像判釋出來的粒徑大小相對於人工網格線採樣法所得粒徑，細顆粒有低估現象，而粗顆粒有高估現象。在細顆粒 D_{16} ，前者約低估達 32%；在粗顆粒方面，如 D_{84} ，前者約高估達 17%。細顆粒的差異高於粗顆粒的差異，所幸，中值粒徑的判釋結果大致相近，差異在 8% 以內。

根據本研究在參數調整方面所得經驗，若欲判釋影像中有部分大塊細粒料區域（如細沙），則參數設定範圍 medfiltsize10 (3)、facgrayhr1 (0.8 ~ 1)、blocSizG (32)、areaCutWW (0 ~ 20)，較能將大塊細粒料區域不被判釋出來，且顆粒分割較完整盡量不被過度分割。若判釋影像中顆粒佈滿影像且無部分大塊細粒料區域（如細沙），參數設定範圍為 medfiltsize 10 (8 ~ 12)、facgrayhr1 (0.5 ~ 0.7)、blocSizG (32)、areaCutWW (20 ~ 40)，有利粒徑判釋、確認間隙，避免過度分割。我們的經驗 facgrayhr1 與 areaCutWW 是影響影像判釋結果最為顯著的兩個參數。

此外，本研究室內試驗 BASEGRAIN 影像判釋經過測試最終採用的主要分析參數 medfiltsize10、blocSizG、facgrayhr1、areaCutWW、corrfinel 及 distFehr 分別列於表 3。其餘參數採用軟體預設值。表 3 中 A 代表軟體預設值，B、C 及 D 代表白卵石三組（3 次）試驗採用值，E 代表中白石試驗採用值，F 代表黑卵石試驗採用值，及 G 代表黑扁石試驗採用值。這些參數值的設定會影響到 BASEGRAIN 影像判釋結

果，表中僅是本研究室內試驗 BASEGRAIN 影像判釋採用的較佳參數值。在實際應用時，這些參數除了參考採用軟體所提供的預設值之外，需要看影像及辨識主體的特性，調整較佳的參數以獲得較佳的 BASEGRAIN 影像判釋結果。

表 3 室內試驗四種材料採用 BASEGRAIN 影像判釋參數彙整表

參數	A	B	C	D	E	F	G
medfiltsize10	3	3	3	3	3	10	8
blocSizG	32	32	32	32	32	32	8
facgrayhr1	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.5	0.8
areaCutWW	40	40	40	40	40	50	40
corrfinel	0.25	0	0	0	0	0	0
distFehr	50	224	227	233	220	100	290

現地河道粒徑採樣及空拍影像

河道礫石粒徑採樣及影像拍攝規劃

河道現地礫石粒徑採樣及影像拍攝地點在南投縣信義鄉神木村和社溪上游之三條子河道上，如圖 18 所示。河道粒徑採樣點位分別在愛玉子溪 A1 及 A2 處、在霍薩溪 B1 及 B2 處、在出水溪 C1 及 C2 處、以及在河道匯流口 D1 及 D2 處、在匯流口下游 E1、E2、E3 及 E4 處、以及在和社溪中游 F1 及 F2 處。這裡的河道

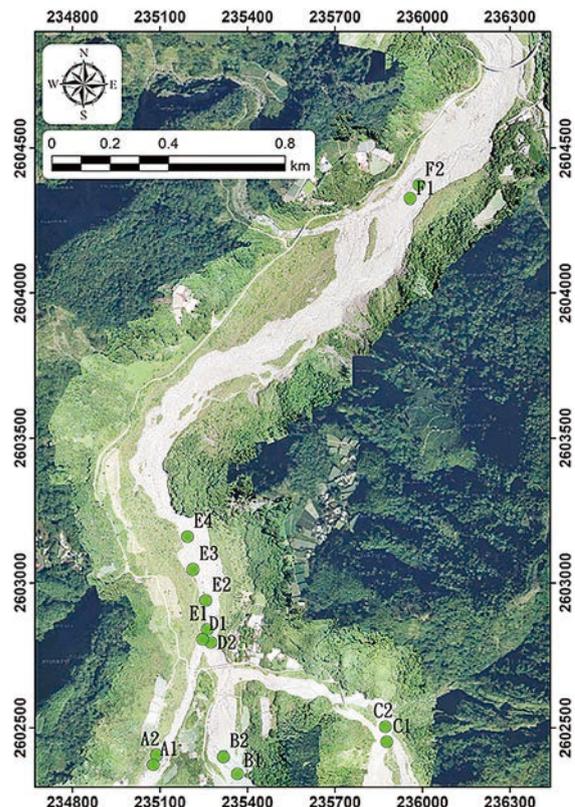


圖 18 本研究河床表面粒徑採樣及空拍位置

屬於土石流好發區域，河道粒徑大小分布較廣。每個點位採樣範圍為 1.0 m × 1.0 m，採用網格採樣法循線採樣，以取得人工採樣粒徑資料。本文僅呈現前述 A1、A2、B1、B2、C1、C2、D1 及 D2 等 8 處之結果。

本研究以 Phantom 4 Pro V2.0 無人飛行載具 (UAV) 進行空拍及使用 BASEGRAIN 進行影像分析。河道粒徑採樣及影像判釋作業流程如圖 19 所示。現地河道空拍作業，首先在調查區域設控制點，以利後續正射影像矯正空間誤差。規畫調查區域 UAV 飛行任務，飛行高度約 20 公尺，垂直拍攝高精度河道照片，以利建置之地面解析度介於 0.57 公分至 0.79 公分之高精度影像。

人工粒徑採樣方面，在採樣點處劃設 10 m × 10 m 正方形區域，鋪上 10.3 m × 10.3 m 白色方框，在方框內執行網格線採樣。避免不同操作者誤差，及同一採樣人員於不同採樣區域之誤差，在網格線上每間隔 1.0 m 綁上尼龍繩繫帶，使用開口採樣版 (如圖 20) 採取繫帶正下方顆粒。最後統計出人工採樣所得的礫石顆粒數量、粒徑與其分布。將正射影像輸入到地理資訊系統 ArcGIS，圈選出人工粒徑採樣選定的採樣區域，以 600dpi (dot per inch) 的精度輸出，進行後續 BASEGRAIN 影像判釋。最後比較人工網格線採樣粒徑結果以及 BASEGRAIN 判釋結果兩者之差異。

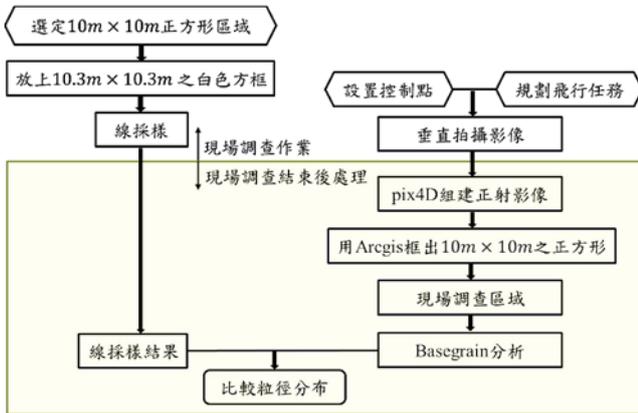


圖 19 河床粒徑採樣及影像判釋作業流程圖

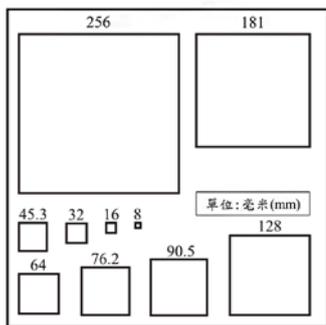


圖 20 不同尺寸的開口採樣版

河床礫石採樣及影像判釋結果

研究區域河道上游為崩塌及土石流好發區，底床質粒徑尺寸範圍極廣，有小於開口採樣版最小開口 8 mm 之泥沙，也有許多礫石及巨石，最大巨石粒徑達 7,239 mm。圖 21a、圖 21b 及圖 22a、圖 22b 分別呈現愛玉子溪 A1 (愛 1) 及 A2 (愛 2) 兩處的河床表面空拍照片及使用 BASEGRAIN 軟體進行影像粒徑判釋的成果。影像判釋出來的顆粒標記有藍色的十字線，十字線的長短代表顆粒的長短軸長度。



圖 21a 愛玉子溪 A1 處河床空拍照片

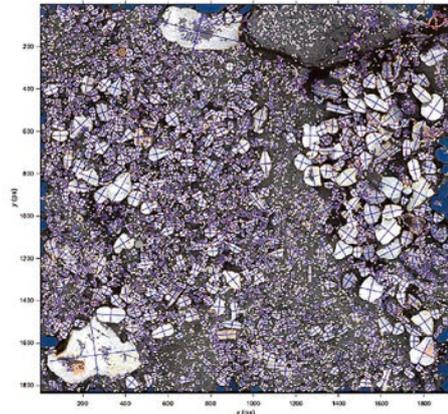


圖 21b 愛玉子溪 A1 處 BASEGRAIN 判釋成果



圖 22a 愛玉子溪 A2 河床空拍照片

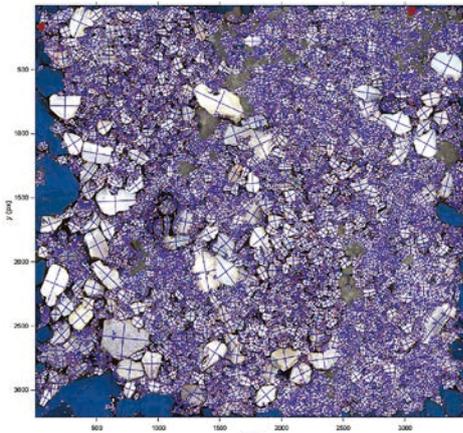


圖 22b 愛玉子溪 A2 處 BASEGRAIN 判釋成果

表 4 列出愛玉子溪 A1 及 A2、霍薩溪 B1 (霍 1) 及 B2 (霍 2)、出水溪 C1 (出 1) 及 C2 (出 2)、以及匯流口 D1 (匯 1) 及 D2 (匯 1) 等 8 處 BASEGRAIN 粒徑判釋成果。由表中可知此 8 處現場河床泥沙粒徑大小分布相當寬闊。以愛玉子溪 A1 處為例，較細粒徑 $D_{10} = 3.3 \text{ mm}$ ，中值粒徑 $D_{50} = 75.2 \text{ mm}$ ，而較大粒徑 $D_{84} = 213.4 \text{ mm}$ ，而極大粒徑 $D_{99} = 727.7 \text{ mm}$ ，均勻係數 $C_u = D_{60}/D_{10} = 101.9/3.3 = 30.9$ ，顯示泥沙粒徑大小差異很大。其他 7 處的粒徑分布有相似情形，都顯示泥沙粒徑大小差異很大。

表 5 列出 BASEGRAIN 影像粒徑判釋成果與人工網格線採樣法所得結果之比較。此結果顯示兩者之差異相當大。在愛玉子溪 A1 處，影像判釋所得河床粒徑比人工線採法所得河床粒徑明顯偏小，如圖 23 所示，以 D_{10} 、 D_{16} 、 D_{30} 、 D_{50} 、 D_{60} 及 D_{84} 而言，它們的相對差異分別為 -68.6% 、 -53.6% 、 -32.1% 、 -18.5% 、 -22.0% 及 -57.1% 。然而，在愛玉子溪 A2 處，影像判釋所得河床粒徑比人工線採樣法所得河床粒徑大許多，如圖

24 所示，以 D_{10} 、 D_{16} 、 D_{30} 、 D_{50} 、 D_{60} 及 D_{84} 而言，它們的相對差異分別為 46.2% 、 7.8% 、 40.2% 、 32.4% 、 36.0% 及 24.5% 。這一點與前面章節室內試驗結果有明顯差異。顯然現場環境較為複雜，無論是 BASEGRAIN 影像判釋或是人工線採法所得河床粒徑具有較大的不確定性。

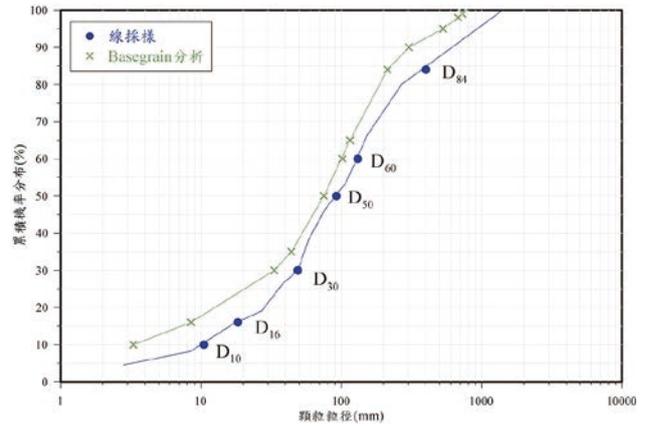


圖 23 愛玉子溪 A1 處影像判釋與人工線採法所得河床粒徑之比較

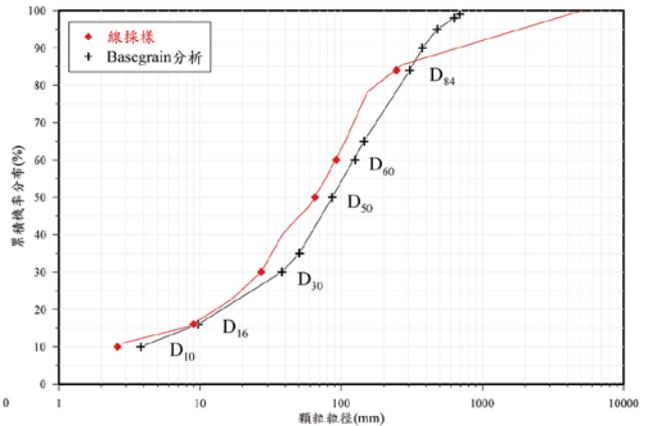


圖 24 愛玉子溪 A2 處影像判釋與人工線採法所得河床粒徑之比較

表 4 使用 BASEGRAIN 進行河道現地影像粒徑判釋成果彙整表

累積機率 (%)	愛玉子溪 A1 (mm)	愛玉子溪 A2 (mm)	霍薩溪 B1 (mm)	霍薩溪 B2 (mm)	出水溪 C1 (mm)	出水溪 C2 (mm)	匯流口 D1 (mm)	匯流口 D2 (mm)
99	727.7	690.7	605.8	499.6	894.1	897.7	913.5	560.5
98	678.2	631.4	485.0	456.3	788.3	795.3	827.0	434.1
95	529.6	479.0	360.7	371.0	614.6	478.5	660.7	295.5
90	302.9	376.0	251.9	289.4	419.5	370.6	463.9	238.1
84	213.4	305.8	185.6	224.2	324.8	283.5	299.9	188.1
65	115.3	145.2	91.4	111.3	155.6	154.6	124.8	102.6
50	75.2	86.2	54.7	62.6	82.1	87.6	67.4	67.7
35	44.1	50.5	32.9	38.0	37.0	41.7	38.4	41.8
30	33.3	38.0	25.3	31.3	27.3	31.1	29.1	32.8
16	8.5	9.7	6.6	7.0	7.6	8.6	7.8	8.5
10	3.3	3.8	2.6	2.7	3.0	3.4	3.0	3.3

表 5 愛玉子溪 A1 及 A2 兩處影像判釋與人工採樣河床粒徑結果之比較

代表粒徑 (mm)	愛玉子溪 A1 處			愛玉子溪 A2 處		
	影像判釋 (mm)	人工採樣 (mm)	相對差異 (%)	影像判釋 (mm)	人工採樣 (mm)	相對差異 (%)
D_{10}	3.3	10.5	-68.6	3.8	2.6	46.2
D_{16}	8.5	18.3	-53.6	9.7	9.0	7.8
D_{30}	33.3	49.1	-32.1	38.0	27.1	40.2
D_{50}	75.2	92.3	-18.5	86.2	65.1	32.0
D_{60}	101.9	130.6	-22.0	125.5	92.3	36.0
D_{84}	213.4	496.9	-57.1	305.8	245.7	24.5

在霍薩溪 B1 處影像判釋與人工線採法所得河床粒徑之比較如圖 25 所示，以 D_{10} 、 D_{16} 、 D_{30} 、 D_{50} 、 D_{60} 及 D_{84} 而言，它們的相對差異分別為 -66.2%、-42.6%、17.7%、48.2%、41.4% 及 60.0%，此顯示影像判釋對於小粒徑泥沙顆粒的判釋結果有偏小現象，但是對於較粗泥沙的判釋有高估現象，與先前室內試驗結果相似。然而，在霍薩溪 B2 處，影像判釋所得河床粒徑卻是整體性的比人工線採法所得河床粒徑小一些，如圖 26 示，以 D_{10} 、 D_{16} 、 D_{30} 、 D_{50} 、 D_{60} 及 D_{84} 而言，它們的相對差異分別為 -64.9%、-53.6%、-28.4%、-24.4%、-5.1% 及 -1.6%。這

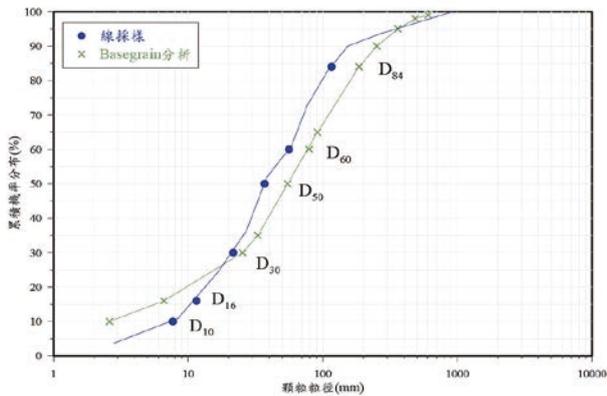


圖 25 霍薩溪 B1 處影像判釋與人工線採法所得河床粒徑之比較

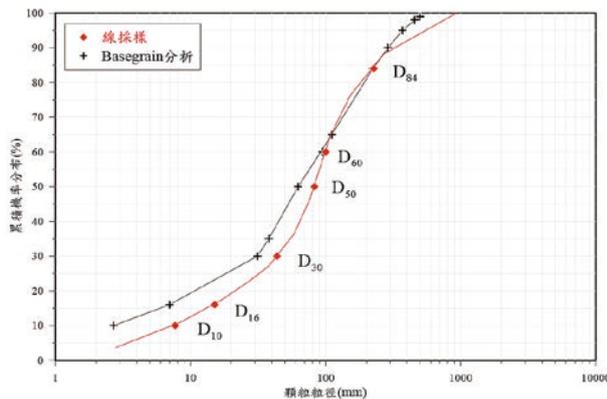


圖 26 霍薩溪 B2 處影像判釋與人工線採法所得河床粒徑之比較

一點與愛玉子溪 A1 處相似。這再次顯示現場環境較為複雜，BASEGRAIN 影像判釋與人工線採法所得河床粒徑具有較大的不確定性，它們的差異較大。

圖 27、圖 28 及圖 29 呈現前述 A1、A2、B1、B2、C1、C2、D1 及 D2 等 8 處之結果之比較，為了方便連結點位在溪流位置，它們圖中分別又稱愛 1、愛 2、霍 1、霍 2、出 1、出 2、匯 1 及匯 2。此 3 個圖分別比較影像判釋與人工線採法所得河床粒徑 D_{30} 、 D_{50} 及 D_{84} 。比較此 3 圖結果顯示中值粒徑 D_{50} 的差異較小一些，其差異大致在 $\pm 30\%$ 內。圖 27 顯示對於較細顆粒 D_{30} 而言，BASEGRAIN 影像判釋大致偏小，其中匯流口 D1 處（匯 1）偏小 50.4%。圖 29 顯示愛 1 和匯 1 兩處 BASEGRAIN 影像判釋偏小程度達 57.1% 及 50.7% 其中匯 1 處有水流區，如圖 30 所示，增加判釋困難，須以手動消除方式消除水流流經區域，降低誤差。

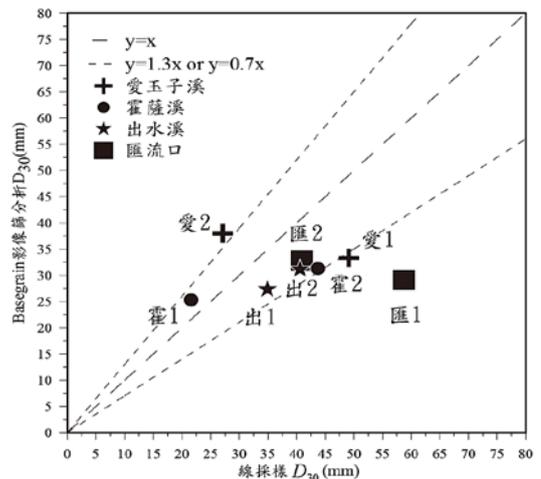


圖 27 比較 8 處影像判釋與人工線採法所得河床粒徑 D_{30} 之差異

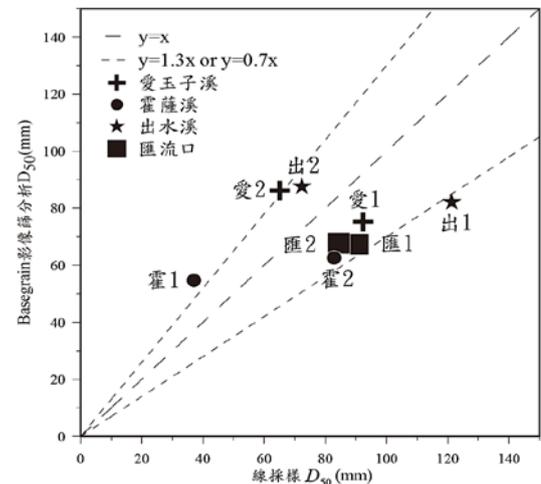


圖 28 比較 8 處影像判釋與人工線採法所得河床中值粒徑 D_{50} 之差異

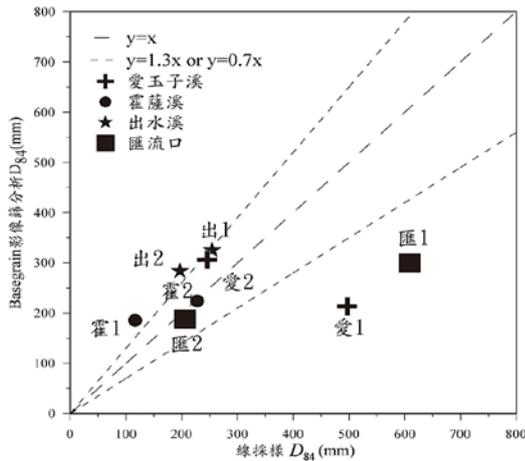


圖 29 比較 8 處影像判釋與人工線採法所得河床粒徑 D_{84} 之差異

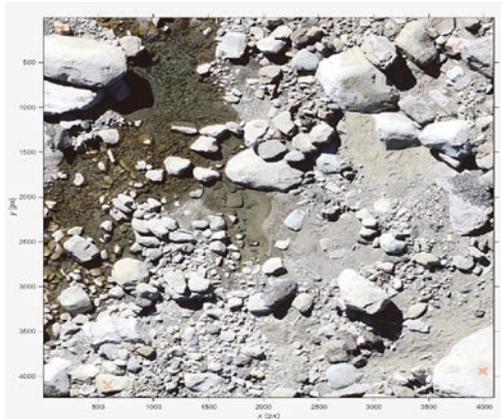


圖 30a 匯流口 D1 處河床空拍照片

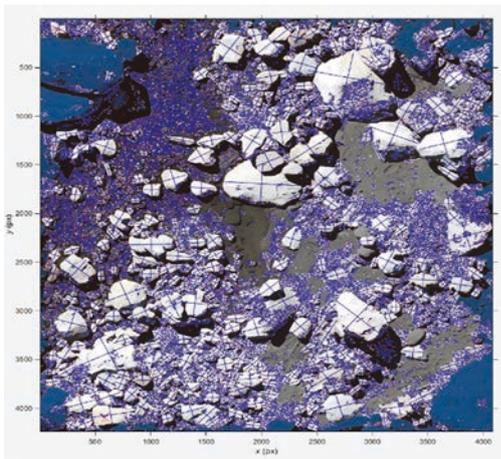


圖 30b 匯流口 D1 處河床影像判釋需增加手動消除方式消除水流流經區域來降低誤差

結論與建議

本研究探討使用無人機空拍技術和 BASEGRAIN 顆粒判釋軟體進行河床泥沙顆粒的適宜性。首先進行室內試驗，採用不同顏色及大小的礫石顆粒進行試驗，以驗證影像判釋軟體 BASEGRAIN 對於粒徑判釋結果的可信度，並

掌握軟體參數調整方法以提升粒徑判釋結果。然後在南投縣陳有蘭溪上游神木村河道進行現場試驗，用無人飛行載具拍攝河道表面高精度照片，組建高精度正射影像，進行 BASEGRAIN 影像粒徑判釋，並與人工線採樣所得粒徑分布進行比較。

研究結果顯示合理的參數設定是提升 BASEGRAIN 判釋結果的重要因素，室內試驗的分析對象及工作環境較為單純，可取得比較好的結果。BASEGRAIN 判釋軟體中灰度閾值乘數 (facgrayhr1) 及分水嶺橋最小允許長度 (areaCutWW [px]) 兩個參數值對於影像判釋結果影響最為明顯，其次是中值濾波器參數 (medfiltsize10 [px])、灰度閾值的大小 (bloSizeG [px])、無法檢測細粒料比例 (Corrfine1) 及影像線採樣間距 (distFehr [px]) 等參數，這些參數需要視實際需要做調整，以取得較佳的粒徑判釋結果。其他參數影響不顯著，可以採用軟體提供的預設值。

室內實驗對不同礫石進行人工線採樣及 BASEGRAIN 影像判釋以取得礫石粒徑分布，其中白卵石三次重複試驗結果所得粒徑分布大致相同，說明人工線採樣及 BASEGRAIN 影像判釋均具有可重複性。礫石顏色、大小及表面糙度會影響 BASEGRAIN 判釋結果。就 BASEGRAIN 判釋與人工線採樣法所得粒徑之相對差異而言，白卵石試驗為 $-11\% \sim 15\%$ ，中白石試驗為 $-19\% \sim 0\%$ ，黑卵石試驗為 $-35\% \sim 17\%$ ，黑扁石試驗為 $-32\% \sim 17\%$ 。BASEGRAIN 軟體對於判釋黑色細礫石的效果較差。室內試驗 BASEGRAIN 影像判釋出來的粒徑大小相對於人工網格線採樣法所得粒徑，細顆粒有低估現象，粗顆粒有高估現象，中值粒徑方面兩者大致相近。但是現地試驗沒有此趨勢，這可能是現地環境較為複雜，影響影像判釋結果所致。

本研究空拍機飛行高度設定為 20 m，現地試驗顯示所得到之影像解析度約為每像素 0.87 ~ 1.3 mm，於 BASEGRAIN 軟體可判釋出來的最小粒徑約為 20 ~ 30 mm。若無人飛行載具高度過高 (100 m 以上)，所得照片輸出影像畫質較低，可能會影響粒徑判釋結果，或者無法辨別顆粒間隙，造成無法判釋。建議河道空拍機飛行高度設定為 20 m 為宜。

現地試驗影響因素很多，例如：光照陰影、地形起伏、顆粒掩埋、顆粒傾斜等等皆會影響判釋結果。就 BASEGRAIN 判釋與人工線採樣法所得粒徑之相對差異而言，兩者相對差異大部分在 $\pm 45\%$ 以內，但有些達 $\pm 70\%$ 。現地河道環境及河床泥沙組成本來就很複雜，要精確掌握河床泥沙粒徑分布，本屬不易，影像判釋結果相對差異在 $\pm 70\%$ 以內，雖有改善空間，大致上應可接受。

誌謝

本研究承蒙國科會計畫經費補助 (111-2625-M-006-012)，現地調查工作承蒙國立成功大學水土保持研究中心的設備及人力支援，特此致謝。

參考文獻

1. Bunte, K. (2001), Sampling surface and subsurface particle-size distributions in wadable gravel-and cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics, and streambed monitoring, US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
2. 陳柏翰 (2006)，「河床質粒徑於河川縱、橫向之變化—以頭前溪與鳳山溪為例」，國立交通大學土木系碩士論文（指導教授：廖志中）。
3. 陳嘉欣、邵允銓、王驥魁、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，第 16-32 頁。
4. Kellerhals, R. and Bray, D. I. (1971). "Sampling procedures for coarse fluvial sediments." Journal of the Hydraulics Division 97.8 1165-1180.
5. Mosley, M.P. and Tindale, D.S. (1985). "Sediment variability and bed material sampling in gravel-bed rivers." Earth Surface Processes and Landforms 10(5), 465-482.
6. Diplas, P. and Sutherland, A.J. (1988). "Sampling techniques for gravel sized sediments." Journal of Hydraulic Engineering 114(5), 484-501.
7. 傅志偉 (2004)，「河床質調查的方法，位置與頻率—以頭前溪為例」，國立交通大學土木系碩士論文（指導教授：廖志中）。
8. Ibbeken, H. and Schleyer, R. (1986), "Photo-sieving: A method for grain-size analysis of coarse-grained, unconsolidated bedding surfaces." Earth Surface Processes and Landforms 11(1), 59-77.
9. Chardon, V., Piasny, G., and Schmitt, L. (2022), "Comparison of software accuracy to estimate the bed grain size distribution from digital images: A test performed along the Rhine River." River Research and Applications 38(2), 358-367.
10. 丁怡瑄 (2020)，「正射影像應用於河床質辨識與流路變化探討」，國立交通大學土木系碩士論文（指導教授：葉克家、廖達峻）。
11. 廖達峻、張國楨、曾志民、黃敏郎 (2017)，「應用無人飛行載具於山崩及河道變遷之量測分析—以來社溪為例」，土木水利，第 44 卷，第 2 期，第 67-73 頁。
12. Wolman, M.G. (1954), "A method of sampling coarse river-bed material." EOS, Transactions American Geophysical Union 35(6), 951-956.
13. Wohl, E.E., Anthony, D.J., Madsen, S.W., and Thompson, D.M. (1996), "A comparison of surface sampling methods for coarse fluvial sediments." Water Resources Research 32(10), 3219-3226.
14. 陳祥偉 (2023)，「應用 UAV 空拍影像和 BASEGRAIN 軟體進行河道泥沙粒徑分布之研究」，國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文（指導教授：詹錢登）。
15. Detert, M. and Weitbrecht, V. (2012), Automatic object detection to analyze the geometry of gravel grains—a free stand-alone tool. River flow, Taylor & Francis Group London.
16. Canny, J. (1986), "A computational approach to edge detection." IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence(6), 679-698.
17. Fehr, R. (1987), "Einfache bestimmung der korngrößenverteilung von geschiebmaterial mit Hilfe der Linienzahlanalyse." Schweizer Ingenieur und Architekt 105(38), 1104-1109.



慧築營建科技股份有限公司

營建施工 | 都更危老 | 創新整合 | 循環永續

對於工程技術、工程品質優化與跨領域整合上力求精益求精。

運用科技方法及專精營建技術在各施工階段導入永續循環的策略，以求達成環境友善與資源的有效運用為環境永續善盡企業之社會責任。

