

傳統與 UAV 表面粒徑調查差異對水理參數推估之影響

劉益誠^{[1]*} 顏川舜^[2] 連惠邦^[3]

摘 要 河床表面粒徑分佈 (Grain Size Distribution, GSD) 為影響河道水力特性、河床穩定性及水土保持工程設計之重要參數。傳統人工粒徑採樣方法雖具高精度，惟施作費時且受限於地形與安全條件。近年無人飛行載具 (UAV) 影像式粒徑分析逐漸受到關注，然其於細粒辨識上仍存在精度限制。本研究以嘉義縣阿里山鄉新美大橋上下游普亞汝溪河段為研究區域，結合現地顆粒統計採樣與 UAV 影像分析方法進行比較驗證。現地於上下游各設置 2 m × 2 m 採樣區，累計取得 1,303 顆粒徑資料作為地面真值；UAV 影像則以高解析度正射影像(本研究採用 Pix4Dmapper 進行多重影像拼接與幾何校正以生成正射影像)配合 BASEGRAIN 軟體進行粒徑判釋，並分析影像解析度與粒徑判釋能力之關係。研究結果顯示，未經修正之 UAV 影像分析因細粒辨識不足，導致粒徑分佈曲線右移， D_{50} 誤差最高達 50 %。透過濾除 3 cm 以下細粒之修正策略後， D_{50} 與 D_{84} 誤差分別收斂至 10 %~20 %，顯著提升影像式粒徑分析之工程參考價值。研究結果顯示，經適當修正後之 UAV 粒徑分析具備應用於水土保持工程調查之可行性。

關鍵詞：無人飛行載具 (UAV)、河床表面粒徑、地面解析度 (GSD)、曼寧糙率係數。

Differences Between Traditional and UAV-Based Surface Grain Size Surveys and Their Implications for Hydraulic Parameter Estimation

Yi-Cheng Liu^{[1]*} Chuan-Shun Yen^[2] Hui-Pang Lien^[3]

ABSTRACT Surface grain-size distribution (GSD) is a key factor controlling river hydraulics, bed stability, and soil and water conservation design. Traditional field sampling provides high accuracy but is labor-intensive and limited by terrain and safety constraints. UAV-based image analysis has emerged as an alternative approach, although fine-particle detection remains challenging. This study evaluates UAV-derived surface grain-size analysis in the Puya River near Xinmei Bridge, Taiwan, using 1,303 ground-truth measurements collected from upstream and downstream sampling plots. High-resolution UAV orthophotos were processed with BASEGRAIN software and compared with field data. Uncorrected UAV results show systematic underestimation of fine particles, leading to D_{50} errors up to 50 %. Excluding particles smaller than 3 cm reduced D_{50} and D_{84} errors to approximately 10-20 %, significantly improving engineering applicability.

Key Words: UAV-based image analysis, Surface grain size distribution, Manning's n

一、前 言

河床表面粒徑分佈 (Grain Size Distribution, GSD) 為影響野溪水力特性、河床穩定性及水流數值模式設定之關鍵指標，亦為水土保持工程規劃與設計中不可或缺的基礎資料。河道底床由不同尺寸之底床質所組成，其粒徑分佈不僅直接決定河床粗糙度，進而影響水流阻力、流速分布與輸砂能力，亦左右河道之沖淤變化與穩定狀態。相關研究指出，河床粗糙度會增強紊流動能、降低邊界層平均流速，並改變泥砂輸

送行為 (Nezu and Nakagawa, 1993 ; Giménez and Govers, 2001)，顯示精確掌握河床粒徑特性對於水理分析與河道治理具有重要意義。

除水理層面外，河床粒徑分佈亦深刻影響溪流生態環境。底床顆粒大小與排列方式可形塑多樣化之棲地條件，許多大型無脊椎動物偏好棲息於較大粒徑顆粒周圍，以利用其形成之低流速微棲地 (Pedersen and Friberg, 2007)。此外，底床表面附著之藻類生長亦與底床粒徑條件密切相關，藻類繁衍會影響水體營養鹽濃度，進而改變水質特性 (Downes et

[1] 逢甲大學營建及防災研究中心

Assistant Researcher, of Construction and Disasters Prevention Research Center, Feng Chia University, Taichung, Taiwan, R.O.C.

[2] 農業部農村發展及水土保持署

Agency of Rural Development and Soil and Water Conservation, MOA

[3] 逢甲大學水利工程與資源保育學系

Professor, Dept. of Water Resources Engineering and Conservation, Feng Chia University, Taichung, Taiwan, R.O.C.

* Corresponding Author. E-mail: kenji700808@gmail.com.tw

al., 2000)。因此，快速且有效獲取河床粒徑分佈資訊，為河道水理分析、生態棲地評估及整體水土保持規劃之重要課題。

傳統河床粒徑調查多採用人工採樣坑法，透過現地開挖、逐顆量測方式建立粒徑分佈資料。此方法具備量測精度高、細粒辨識能力佳等優點，長期以來被視為粒徑分析之標準作業方式。然而，人工採樣坑法作業耗時費力，且受限於河道安全、地形條件及人力資源，難以在大範圍或高頻率調查中有效應用。

近年隨著無人飛行載具 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 技術及數位影像處理方法之快速發展，結合影像辨識之河床粒徑分析技術 (Photo-Sieving) 逐漸成為替代性調查工具。Photo-Sieving 技術透過拍攝河床表面影像，並結合影像分割、邊界辨識及統計分析演算法，可在非接觸、低擾動條件下快速取得大量粒徑資訊，具備高效率、高空間覆蓋率與良好重現性等優勢。相關研究顯示，在影像品質控制及尺度校正條件適當之情況下，Photo-Sieving 所推估之中位粒徑 (D_{50})、特徵粒徑 (如 D_{16} 、 D_{84}) 及整體粒徑分佈趨勢，與傳統實體篩分析結果具有相當程度之一致性，顯示其於河床粒徑分析上具有相當應用潛力。近年國際文獻對此技術之研究進展尤為迅速。Vázquez-Tarrio et al. (2017) 率先以 UAV 結合 Structure-from-Motion (SfM) 攝影測量技術，系統性建立法國阿爾卑斯嶺狀河道之全河段表面粒徑分布圖，驗證高解析度正射影像在礫石河床粒徑判釋上的可行性。Woodget and Austrums (2017) 進一步提出以 UAV-SfM 點雲地形粗糙度 (Topographic Roughness) 作為粒徑替代指標，拓展影像法在粗礫床之應用範疇；Woodget et al. (2018) 則系統性探討從載人航空器轉換至小型無人機 (sUAS) 之影像粒徑映射方法適應策略，指出飛行高度與地面解析度之對應關係對判釋精度具決定性影響。此後，Mair et al. (2022) 針對低空近拍 (飛行高度 5-7 m，地面解析度約 1.5 mm) 之 UAV 粒徑影像進行不確定性量化分析，指出影像拼接 (Mosaicking) 過程中因視角變化與幾何校正誤差所引入的系統偏差，是影響粒徑判釋準確性的關鍵不確定性來源之一，並建議在精度要求高的應用場景中優先使用單張原始影像而非正射拼圖。Miazza et al. (2024) 更針對三種主流基於物件的自動粒徑分析方法 (BASEGRAIN、PebbleCounts 及 Deep learning 分割法) 進行系統性評測，指出各方法在不同地面解析度與河床岩性條件下的適用範圍與精度瓶頸，為使用者提供方法選用依據。此外，Lang et al. (2021) 提出以卷積神經網路 (CNN) 為基礎之 GRAINet 模型，實現從 UAV 正射影像全自動回歸粒徑分布，在 25 個礫石河床測試中達到平均絕對誤差 (MAE) 僅 1.1 cm 的高精度表現，展示深度學習技術在克服傳統影像分割演算法對光影與顆粒形狀敏感之問題上的巨大潛力。

然而，UAV 影像分析仍受限於影像解析度與細粒判識能力，對於細顆粒之辨識易產生低估情形，進而影響粗粒比例與中位粒徑 (D_{50}) 之推估結果。此一系統性偏差若未加以釐清與校正，恐影響其於工程設計及規範應用之可靠性。

基於上述背景，本研究以水土保持工程應用為核心，綜述河床粒徑分佈分析方法之演進，並聚焦於 Photo-Sieving

技術在河流地貌與工程實務中的應用表現。透過比較 UAV 影像分析與傳統人工採樣坑法於粒徑精度、作業效率及工程適用性等面向之差異，進一步驗證其成果是否能有效對應《水土保持技術規範》對河床質調查之要求，期能建立一套兼具工程可行性與標準化潛力之河床粒徑分析作業模式，作為未來水土保持調查與工程設計之參考依據。

本研究之創新性體現於以下三個層面。首先，在研究設計層面，本研究為國內少數以實際山區野溪環境為驗證場址，系統性對照傳統顆粒統計採樣法 (共計 1,303 顆地面真值資料) 與 UAV 影像分析成果，並在同一研究架構內同時探討防砂壩上下游不同水力條件對粒徑判識差異之影響；此與既往研究多偏重單一方法驗證或室內模擬之研究取向有所不同，具較高的現地代表性。其次，在誤差修正層面，本研究針對 BASEGRAIN 軟體之物理判識下限 (約 2-3 cm)，提出以「濾除 3 cm 以下細粒」作為系統性修正門檻，並以實測誤差量化驗證該策略在 D_{50} 及 D_{84} 上的修正效果，為 UAV 粒徑分析在水土保持工程調查中的標準化操作提供具體依據。第三，在工程參數傳遞層面，本研究進一步建立粒徑誤差與曼寧糙率係數 (Manning's n) 推估偏差之定量連結，透過幕次壓縮效應分析揭示粒徑不確定度在水理計算鏈中的傳遞機制，並具體評估其對設計流量與洪水位推算之潛在影響，填補現有文獻在「UAV 粒徑誤差及水理參數推估誤差」定量評估環節上的不足。

二、研究區域

本研究選定嘉義縣阿里山鄉新美大橋上下游之普亞汝溪河段作為研究區域，屬於曾文溪流域上游卓武山北部集水區，總面積 1,956.8 公頃，如圖 1 所示。該集水區位處中央山脈西南側山區，地形起伏劇烈，河道坡度陡峭，屬典型山區型河川環境，水文與輸砂條件受短延時強降雨及颱風事件影響顯著。採樣河段鄰近新美大橋，上下游河道受地形侷限及防砂壩構造物影響，河床寬度與流況呈現明顯變化，河床材料以礫石及卵石為主，粒徑分佈具高度非均質性。洪水期間常伴隨粗顆粒搬運、細料淘刷與局部淤積現象，使河床形態與表層粒徑組成呈現動態調整特性，對水理條件及河道穩定性具有重要影響。



圖 1 地理位置

Fig.1 Geographical location

由於研究區域地勢陡峭、河道進入不易，傳統河床粒徑調查方法在現地執行上易受人力、安全與採樣代表性限制。爰此，選擇該河段作為數位影像辨識技術 (Photo-Sieving) 之應用與驗證場址，藉由防砂壩上下游不同水力與地形條件之對照，評估影像式河床粒徑分析方法於山區水土保持工程中的適用性與可靠性。

三、研究方法

本研究同步採用傳統人工採樣法與 UAV 航拍粒徑分析方式進行比較。傳統法具現場精度高、細粒辨識良好等特性；而 UAV 具作業快速、安全性高與空間代表性佳等優勢。為探討影像解析度與粒徑判識下限對成果的影響，比較「UAV 表面粒徑調查」與「UAV 濾除 3 公分以下粒徑」兩組結果，分析其與傳統法之差異與相關性，整體架構流程如圖 2 所示。

1. 傳統人工採樣法

傳統人工粒徑採樣作業主要目的在於建立具代表性的河床粒徑分佈基準資料，採樣細節與規格如表 1 所示，作為後續數位影像辨識技術 (Photo-Sieving) 成果比對與驗證之依據，採樣方式分述如下。

(1) 採樣點配置與區域劃設

採樣位置分別設置於新美大橋上游與下游河段，共計 2 處採樣點，以反映橋梁上下游不同水理與沉積條件下之粒徑分佈差異。於每一採樣點，劃定固定 2 公尺 × 2 公尺之分析區域，確保採樣範圍一致，並降低空間尺度差異對粒徑統計結果之影響。

表 1 傳統人工採樣細節與規格

Table 1 Specifications of Conventional Manual Grain Size Sampling

項目	執行細節與規格
採樣工程名稱	62嘉129線新美大橋上下游普亞汝溪整治工程
採樣目的	獲取高精度、可供比對的粒徑分佈基準，特別是針對影像法難以準確辨識的細粒範圍。
採樣地點與數量	採樣分布於上游與下游河段，共計2處採樣點。
採樣區域範圍	每個採樣點均劃定2公尺 × 2公尺的固定分析區域。
分析方法	採取顆粒統計採樣分析 (Particle Counting and Statistical Analysis)，透過實際量測與過篩方式選取粒徑範圍。
粒徑篩選範圍	涵蓋多達 11 種尺寸，包括 #8, #16, #32, #45.3, #64, #76.2, #90, #128, #181, #256, 及 #362 (單位為毫米, mm) 等尺寸。
總採集數量	上、下游2處採樣區總計共採集1,303顆粒徑數據，確保統計結果具有足夠的代表性。

(2) 現地粒徑採集作業

於各分析區域內，採取顆粒統計採樣分析方法 (Particle Counting and Statistical Analysis)，透過人工量測與實體過篩方式進行粒徑資料蒐集。採樣過程中，逐顆辨識並量測河床表層顆粒，涵蓋自細礫至粗卵石等不同尺寸級距，以完整反映河床表層粒徑組成特性，涵蓋多達 11 種尺寸，包括#8, #16, #32, #45.3, #64, #76.2, #90, #128, #181, #256 及 #362 (單位為毫米, mm) 等尺寸。所拾取之河床顆粒係以標準化開口樣板 (aperture template) 進行粒徑分級與判定，如圖 3 所示。

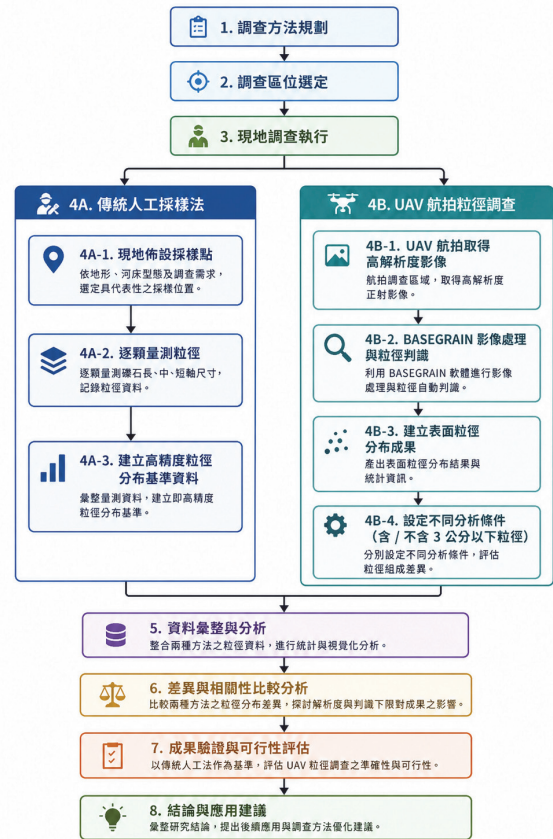


圖 2 粒徑採樣分析方法

Fig.2 Grain Size Sampling and Analysis Methods

各顆粒之代表性粒徑尺寸於量測後予以紀錄，作為後續粒徑分佈統計分析之基礎資料。為確保粒徑資料之辨識精度與分析一致性，當顆粒尺寸小於 16 mm 時，因其粒徑已低於本研究採樣與分析之下限解析尺度，該類顆粒不納入採樣與統計範圍。每個採樣點以 2 m × 2 m 的固定分析區域為框選範圍，總面積為 4 平方公尺。本研究於上、下游兩處採樣區域共計採集 1,303 顆顆粒粒徑資料，詳細位置如圖 4 所示，確保樣本數量足以反映河床表層粒徑分佈之統計特性，採樣過程如圖 5 所示。



圖 3 標準化開口樣板

Fig.3 Standardized Aperture Template for Grain Size Classification



圖 4 採樣位置圖 (新美大橋粒徑採樣點)

Fig.4 Map of Sampling Locations at Xinmei Bridge

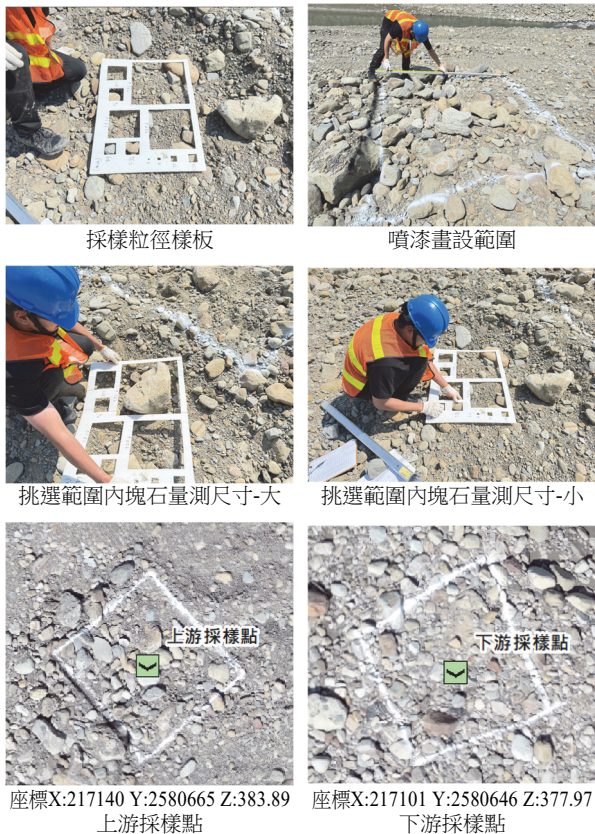


圖 5 粒徑採樣過程

Fig.5 Field Procedure of Grain Size Sampling

(3) 資料統計與特徵粒徑推估 (Statistical Analysis)

完成現地粒徑採樣後，將各粒徑級距之顆粒數量進行彙整與統計分析，建立各採樣點之粒徑分佈曲線。進一步依據累積頻率分佈，推估特徵粒徑指標，包括 D_{16} 、 D_{50} 與 D_{84} 等代表性粒徑參數，以作為河床粒徑組成描述及後續水理分析之基礎。

2. 無人機採樣流程

無人機採樣必須確定作業範圍及其環境限制條件外，包括航測布標、控制點測量、飛行作業計畫等亦為重要的作業內容，如圖 6 所示。

(1) 航高設定

根據「應用 UAV 空拍影像和 BASEGRAIN 軟體分析河道泥沙粒徑分佈之研究」(陳祥偉、賴東陽與詹錢登, 2023) 之研究成果，無人飛行載具 (UAV) 應用於溪床表面粒徑調查時，其飛行高度與影像解析度為影響粒徑判釋精度之關鍵因素。該研究指出，當 UAV 飛行高度控制於約 20 公尺以內時，可獲得具備足夠空間解析度之高品質影像，使最小可判釋粒徑約為影像解析度之 3 至 5 倍，進而滿足 BASEGRAIN 軟體對顆粒邊界辨識與粒徑分析之需求。在此飛行高度與解析度範圍內，影像清晰度足以辨識顆粒輪廓與顆粒間隙，能有效提升粒徑判釋與粒徑分佈推估之準確性與穩定性。相對而言，當 UAV 飛行高度提高至 100 公尺以上時，受限於地面解析度顯著降低，所獲得之影像畫質將不足以清楚呈現顆粒邊界，易造成細粒與顆粒間隙無法有效分辨，導致粒徑判釋結果偏差，甚至降低整體分析之可靠性。因此，該研究建議於進行 UAV 影像式河床粒徑分析時，應妥善控制飛行高度與影像解析度，以確保 Photo-Sieving 技術在河床泥砂粒徑分布分析上的適用性與精度，並降低因影像品質不足所引致之系統性誤差。

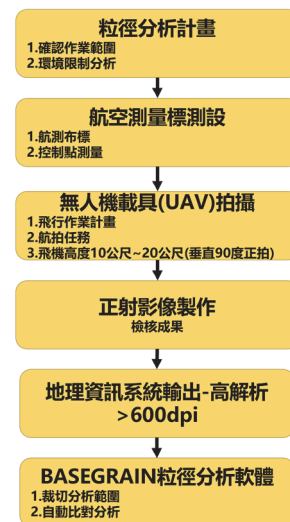


圖 6 航拍河床質採樣流程圖

Fig.6 Workflow of UAV-Based Riverbed Grain Size Survey

(2) UAV 空拍與表面粒徑採樣設計 (UAV Imagery and Surface Grain Sampling)

本研究選用非中國製 UAV，以美國品牌四軸多旋翼飛行器 Autel Robotics EVO II Pro 6K Rugged Bundle V3 進行河床表面影像拍攝，如圖 7 所示。由於研究區表層粒徑多半大於 10 cm，為確保粒徑分析精度，本研究飛行高度介於 8-10m，影像解析度控制於 0.13 cm 以內，以取得精確的空間資料，並作為後續影像式粒徑分析之基礎。

值得注意的是，上述飛行高度設定 (8-10 m) 係針對本研究下游堆積段之河床粒徑條件所制定。於普亞汝溪下游河床以細礫至中礫堆積為主 (D_{50} 約介於 5-15 cm)，細粒佔比相對較高，為影像法最易產生系統性低估之河床類型，因此維持較低飛行高度以確保細粒判識能力有其必要性。然而，集水區縱向上各河段之泥砂粒徑組成差異懸殊，若將相同的飛行高度設定直接套用至上游或中游河段，其適切性須重新評估。就上游陡坡段而言，河床通常以粗礫、卵石乃至巨礫為主體 (D_{50} 可達 20-50 cm 以上)，顆粒尺寸遠大於 BASEGRAIN 軟體之最小判識下限 (約 2-3 cm)，即便適度提高飛行高度至 10-20 m (GSD 約 0.2-0.5 cm)，仍可確保絕大多數顆粒輪廓清晰可辨，影像判釋精度所受影響有限；在此條件下，適度提高飛行高度反而有助於拓展單次任務之影像覆蓋範圍，提升作業效率。就中游過渡段而言，河床粒徑組成介於上下游之間 (D_{50} 約 10-25 cm)，建議維持本研究所採用之 8-10 m 飛行高度作為基準，並視現場地形開闊度與影像品質狀況彈性調整；若影像拼接後仍可清楚辨識細礫輪廓 (>3 cm)，則現行方案即屬適用。綜合而言，建議調查人員於任務規劃前，先行評估目標河段之概估 D_{50} 或主體粒徑範圍，再依「 $GSD \leq \text{最小目標粒徑} / 5$ 」之原則換算對應飛行高度，以確保影像法在不同河段類型下均能維持可靠的粒徑判釋精度。



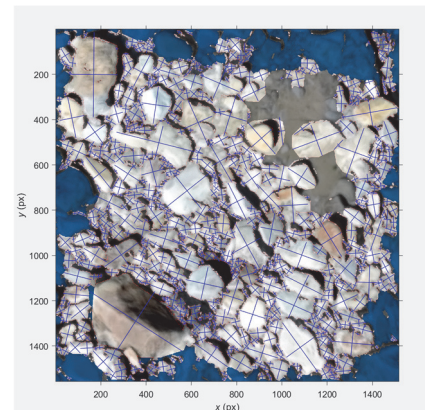
圖 7 美國品牌四軸多旋翼飛行器

Fig.7 U.S.-Manufactured Quadrotor UAV Used in This Study

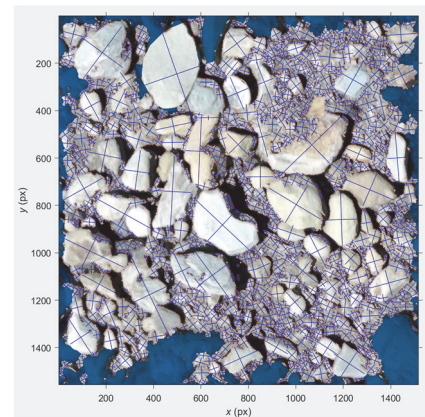


圖 8 河床表面粒徑採樣及空拍位置

Fig.8 Locations of Surface Grain Size Sampling and UAV Aerial Survey



採樣1(下游)



採樣2(上游)

圖 9 泥砂粒徑判釋分析成果

Fig.9 Sediment particle size interpretation analysis results

(3) 泥砂粒徑判釋分析 (Grain Size Analysis using BASEGRAIN)

在本研究中，泥砂粒徑分析採用 BASEGRAIN Version 2.2.0.4 軟體進行處理。BASEGRAIN 是一款基於 MATLAB 平台之自動目標檢測軟體，專門用於河道無黏性礫石底床的俯視影像分析。該軟體對於現地拍攝之河床表面影像進行分析，將各顆粒之大小與形

狀自動量測並分類，生成粒徑級配資料，並與現場實體採樣所得之基準粒徑資料 (ground truth) 進行比對。透過此流程，能有效補足影像法在細粒區段判識精度不足的潛在問題，並提供高效率、大面積覆蓋的河床粒徑分析結果。BASEGRAIN 軟體於河床表面粒徑判釋之最小可辨識粒徑約為 2-3 cm(陳祥偉、賴東暘與詹錢登, 2023)。當無人飛行載具 (UAV) 飛行高度過高 (約 100 m 以上) 時，受限於地面解析度降低，所獲影像之顆粒邊界與顆粒間隙不易清楚辨識，易導致粒徑判釋誤差增加，甚至無法進行有效分析。本研究影像解析度控制於 0.13 cm 以內，粒徑判釋分析成果如圖 9 所示。

四、結果與討論

本研究主題可區分三項主題，(1) UAV 影像解析度與粒徑判釋能力；(2) 差異與相關性比較分析；(3) UAV 河道粒徑分析推估河床曼寧 n 值；(4) 應用限制提供後續研究與實務參考，各分析成果分述如下：

1. UAV 影像解析度與粒徑判釋能力

根據傳統與 UAV 表面粒徑調查方式進行實際調查採樣分析成果如圖 10 及圖 11 所示。其中傳統法 (黃色曲線)：代表地面真值或基準數據，涵蓋從細砂至卵石的完整粒徑範圍。UAV 全資料 (紅色曲線)：未經修正的 UAV 影像自動辨識結果。UAV 濾除 3 cm 以下 (藍色曲線)：將 UAV 辨識結果中直徑小於 3 cm 的顆粒剔除後的修正數據。

【上游】表面粒徑分布曲線

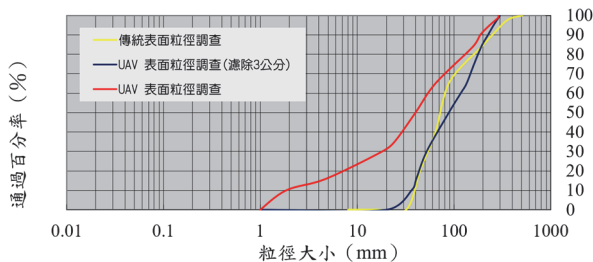


圖 10 上游表面粒徑分布曲線

Fig.10 Upstream Surface Grain Size Distribution Curve

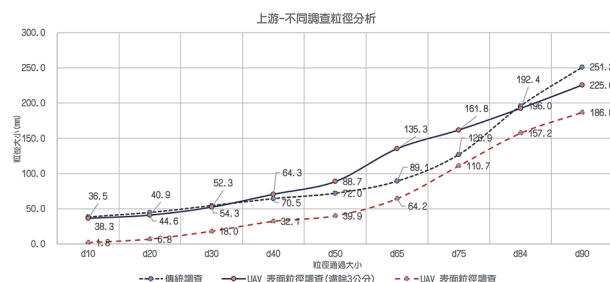


圖 11 上游表面不同大小粒徑分析

Fig.11 Surface Grain-Size Distribution at the Upstream Reach

【下游】表面粒徑分布曲線

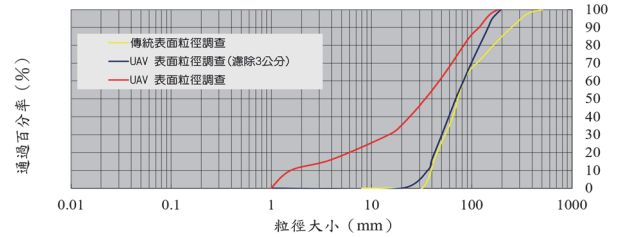


圖 12 下游表面粒徑分布曲線

Fig.12 Downstream Surface Grain Size Distribution Curve

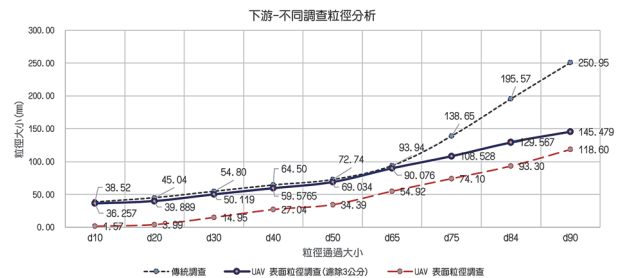


圖 13 下游表面不同大小粒徑分析

Fig.13 Surface Grain-Size Distribution at the Downstream Reach

探討無人機 (UAV) 影像技術應用於河床粒徑分析時的精確度偏差，並評估「濾除 3 cm 以下細粒」作為修正策略的實際成效。分析數據與觀察結果均基於使用者提供之資料，主要針對三組粒徑分布曲線進行比較分析：

(1) 粒徑分布曲線之圖形觀察

根據提供的粒徑分布曲線圖，可觀察到三種方法在形態上的顯著差異，反映了 UAV 影像分析的物理限制與修正效果：

- ① 傳統法(黃色線)呈現平滑且完整的 S 型分布曲線，顯示該河床樣區包含從細顆粒到大卵石的連續級配。
- ② UAV 全資料 (紅色線) 的粒徑分布曲線相較於傳統表面粒徑調查，整體呈現明顯向左偏移的現象。此結果顯示 UAV 影像在未進行粒徑門檻篩選時，可能受到影像解析度、表面紋理、陰影及影像分割誤判等因素影響，將部分紋理或破碎區塊辨識為細小顆粒，導致細粒資料數量偏多，使累積粒徑分布偏向細粒端，進而低估代表粒徑。當濾除小於 3 cm 的粒徑資料後，UAV 調查曲線 (深藍色線) 與傳統調查曲線 (黃色線) 明顯接近，顯示設定 3 cm 的最小有效辨識粒徑，可降低影像解析度及細粒誤判對粒徑分布結果的影響。
- ③ UAV 資料濾除 3 cm 以下顆粒後 (藍色線)，原先全資料中可能受到影像解析度、表面紋理及分割誤判影響的細粒資料已被排除，使粒徑分布曲線相較於 UAV 資料 (紅色線) 明顯向右移，並顯著接近傳統表面粒徑調查曲線 (黃色線)。此結果顯示，設定 3 cm 為最小有效辨識粒徑，可有效降低細粒誤判對

級配分布的干擾，提高 UAV 調查結果與傳統調查結果的一致性。然而，在主要粒徑分布區間內，藍色曲線相較於傳統調查仍略呈右移，表示 UAV 對部分中、粗粒徑可能仍有偏高估計的情形；至粗粒端，兩條曲線則逐漸接近，局部可能出現交會。

(2) 統計指標與誤差比較

統計結果比較 D_{16} (mm)、 D_{50} (mm)、 D_{84} (mm)、 D_{50} 誤差(相對傳統)、 D_{84} 誤差 (相對傳統)，各粒徑分布如圖 11 及圖 13 所示，量化 UAV 影像分析在粒徑辨識上的偏差，並評估「濾除 3 cm 以下細粒數據」的修正策略效果。成果分述如下：

① 未修正誤差：在未經任何粒徑下限過濾或校正的情況下，UAV 影像式粒徑調查呈現高度顯著且一致的系統性低估現象，且該問題在細顆粒比例較高的河床環境中尤為嚴重。由粒徑分布結果可明確觀察到，在小粒徑端 D_{10} - D_{30} 區段，未修正之 UAV 推估值幾乎皆低於 20 mm，而傳統表面粒徑調查對應之代表粒徑則約落在 36-54 mm 範圍，兩者相比之相對誤差普遍高達-60% 以上，顯示 UAV 原始影像在細顆粒辨識上存在根本性限制。此一低估現象進一步反映於中位粒徑 D_{50} 的統計結果中。無論於上游或下游河段，未修正 UAV 粒徑分析對 D_{50} 之誤差皆超過-44%，顯示細顆粒未能被正確納入分布計算，已嚴重扭曲整體粒徑結構。由於 D_{50} 為多數河床阻力、糙度與輸砂相關經驗公式之核心參數，此等程度的低估將直接導致曼寧係數被嚴重低估，進而在水理計算中產生流速高估、水位低估等不安全結果。

② 修正後的改善：透過濾除 3 公分 (30 mm) 以下顆粒作為校正門檻，UAV 表面粒徑調查之統計表現獲得顯著且具體的改善，有效克服原始影像對細顆粒辨識能力不足所造成的系統性偏差。在中位粒徑 D_{50} 的表現上，校正效果尤為明確。於上游河段，未校正之 UAV 粒徑分析對 D_{50} 呈現高達-44% 的低估誤差，顯示細顆粒誤判對中位粒徑推估造成嚴重扭曲；經濾除 3 公分以下顆粒後，誤差修正為+23.19%。雖仍略呈高估趨勢，但已成功將誤差由「不可用等級」收斂至工程分析可接受範圍，顯示校正策略具實質成效。在下游河段，校正成效更為顯著。原始 UAV 結果對 D_{50} 之誤差高達-52.72%，幾乎喪失代表性；經校正後，誤差大幅降至-5.10%，修正後之 D_{50} 值 69.03 mm 與傳統調查所得 72.74 mm 幾乎一致，兩者差距極小，展現出極高的準確度與方法可靠性。此結果充分證明，於細顆粒含量較高的河段中，適當設定 UAV 粒徑分析下限，能有效重建真實的中位粒徑特性。在粗顆粒端 D_{84} 的表現上，校正後的 UAV 結果與傳統調查呈現高度一致性。以上游河段為例，修正後 D_{84} 的相對誤差僅-1.84%，兩者分布曲線幾乎完全重合，顯示 UAV

技術在辨識與量化粗顆粒方面具備極高可信度。此一結果亦說明， D_{84} 作為常用之河床阻力與曼寧係數推估指標，經校正後可由 UAV 調查結果可靠取得。

綜合統計指標來看，「濾除 3 公分」校正法 成功將原先高達 50 %以上的系統性偏誤，修正至平均 10 %~20 %的可接受範圍內。在細顆粒較多的環境下，此校正步驟是使 UAV 調查具備實際參考價值的關鍵。

然而，修正後仍存在的殘餘誤差 (D_{50} 高估 23 %) 與曲線的輕微右移，可能源於以下因素：

- ① 影像解析度限制：即便在>3 cm 區間，邊緣模糊仍可能影響分割精度。
- ② 顆粒遮蔽與重疊：二維影像無法完全解析三維堆疊結構，導致部分顆粒尺寸被誤判或漏判。
- ③ 分割演算法誤差：演算法可能將相鄰的兩顆石頭誤判為一顆大石頭 (Over-segmentation failure)，導致整體粒徑分布偏粗。

2. 差異與相關性比較分析

UAV 影像分析雖然具備大範圍快速調查的優勢，但受限於物理成像與演算法特性，其結果與傳統篩分析存在本質上的差異。以下針對造成數據偏差的六大主因及其工程影響進行深入剖析：

(1) 解析度限制

本次 UAV 影像之地面取樣距離 (GSD) 約為 0.13 cm/pixel，其中 3 cm 與 16 mm 為性質不同的粒徑門檻：3 cm 係考量顆粒短軸約需達 20 個像素以上 (3 cm 約為 23 pixels)，並綜合影像清晰度、陰影、表面紋理及 BASEGRAIN 分割穩定性所設定的 UAV 實用辨識門檻；16 mm 則為傳統人工調查所採用的最小納入粒徑，屬於採樣及統計規範，並非 UAV 成像限制所致。由粒徑分布曲線可知，UAV 全資料因可能將紋理、陰影或破碎區塊誤判為細粒，使曲線向細粒端偏移；濾除 3 cm 以下資料後，曲線明顯接近傳統調查結果，顯示此處理可降低細粒誤判並提升兩種方法的一致性，惟 UAV 曲線在主要粒徑區間仍略向粗粒端偏移，代表部分粒徑可能存在偏高估計；因此，後續比較宜採用一致的共同粒徑範圍，並依實際 D_{50} 、 D_{84} 計算結果評估其差異。

(2) 光照與濕潤影響

河床現場環境複雜，表面濕潤的礫石在陽光下會產生強烈鏡面反射 (Glare)，而背光處的陰影則導致紋理資訊遺失。這些光學干擾會嚴重降低邊緣檢測演算法的準確性，增加顆粒輪廓的誤判機率。工程影響：建議選擇漫射光時段 (如陰天或清晨、傍晚) 進行拍攝作業，並在影像處理階段導入對比度增強與陰影抑制技術以提升辨識率。就本研究實際作業條件而言，UAV 影像拍攝作業於 2025 年 9 月 13 日進行，作業時

段為上午 09:00-11:00；當日天候為晴天多雲，現場光照條件為直射陽光。採樣時河面水位為低水位，礫石灘面充分曝露，礫石表面大致乾燥。上述拍攝環境之揭露，有助於未來參採具體掌握本研究影像品質之背景條件，並得以評估光照干擾對粒徑判釋結果之潛在影響程度；亦可作為後續類似研究於作業時段規劃與影像品質管控上之參考依據。

(3) 演算法偏差

自動化粒徑辨識高度仰賴顆粒間的紋理對比與輪廓分割。在顆粒重疊、堆疊或紋理相近的區域，演算法常發生「過度合併」(Under-segmentation)，將相鄰的多顆小石誤判為一顆大石。此偏差進一步加劇分布曲線的右移現象，使粗粒比例被高估。在工程影響上需針對不同河床岩性與堆疊特性，進行分割參數的最佳化校正，避免單一參數套用造成系統性誤差。

(4) 採樣層差異

傳統篩分析通常涉及挑選取樣，測量結果包含表層與次表層結構（體積/重量分布）；而 UAV 僅能捕捉可視表層（面積分布）。由於天然河床常存在粗化表層 (Armor Layer)，表層粒徑本即大於底層，故 UAV 數據天生傾向於反映較粗的表層特性。工程影響上應用數據時需明確區分「表層粒徑」與「整體級配」的物理意義差異，UAV 數據不應直接取代需深層級配資訊的工程計算。

(5) UAV 數據的限制

若不經修正直接使用原始 UAV 數據，因細粒缺失與上述偏差導致的粒徑高估（如本案 $D_{50} + 50\%$ ）將嚴重扭曲河床特性評估，產生工程風險。

3. 曼寧係數敏感性分析與誤差探討

在河川水理分析中，曼寧糙率係數 (Manning's n) 是影響水位與流速演算的關鍵參數。根據經驗公式如表 2 所示，曼寧係數與河床代表粒徑（如 D_{50} 或 D_{90} ）之間存在幕次關係，其一般形式為：

$$n \propto D^{1/6} \quad (1)$$

（實務計算常用各種經驗式，指數約為 1/6 或相近值。）

表 2 曼寧 n 值經驗公式一覽表

Table 2 Summary of Empirical Formulas for Manning's Roughness Coefficient (n)

學者	公式	粒徑單位
Meyer-Peter and Müller (1948)	$n = 0.0385d_{90}^{1/6}$	m
Lane and Carlson (1953)	$n = 0.0256d_{75}^{1/6}$	in
Raudkivi (1976)	$n = 0.013d_{65}^{1/6}$	mm
Garde and Raju (1978)	$n = 0.039d_{50}^{1/6}$	ft
Bray (1979)	$n = 0.0593d_{50}^{0.179}$	m
	$n = 0.0561d_{65}^{0.179}$	
	$n = 0.0495d_{90}^{0.16}$	
Subramanya (1982)	$n = 0.047d_{50}^{1/6}$	m

由於幕次 $1/6 \approx 0.1667$ 數值甚小，這意味著粒徑 D 的相對變化在轉換為曼寧係數 n 時，會被顯著「壓縮」，降低

了參數誤差的傳遞效應。

(1) 量化敏感性分析

若定義粒徑的相對誤差為 ϵ (例如高估 20 % 則 $\epsilon = +0.20$)，則曼寧係數的相對變化率可表示為 $(1 + \epsilon)^{1/6} - 1$ 。當 ϵ 較小時，此變化率可近似為 $\epsilon/6$ 。以下為數值試算範例：

① 誤差+20 %情境：若 UAV 測得粒徑高估 20 % ($\epsilon = +0.20$)，曼寧係數僅增加約 3.09 % (計算式： $1.2^{1/6} - 1$)。

② 誤差+40 % 情境：即使粒徑高估幅度達 40 % ($\epsilon = +0.40$)，曼寧係數的增幅亦僅約 5.77 % (計算式： $1.4^{1/6} - 1$)。

此結果顯示，即便 UAV 影像分析造成 20-40 % 的系統性粒徑偏差，對曼寧係數的直接影響僅約 +3 % 至 +6 %。

(2) 對水理模擬(實務影響)

依據曼寧公式，在均一斷面與穩定流條件下，流量 Q 與曼寧係數 n 呈反比關係：

$$Q = (1/n)A \times R^{2/3} \times S^{1/2} \quad (2)$$

在其它條件固定時：

① 若 n 值因粒徑高估而增加 5 %，在相同水位下的估計流量將低估約 5 %。

② 若以設計流量反算水位，水位可能因此上升，其上升幅度將取決於斷面幾何與能量梯度。

雖然 n 對粒徑誤差的敏感性較小（壓縮效應），但在設計流量與洪水風險評估中仍需審慎面對，尤其在淺寬或平緩的河道斷面，微小的係數變化仍可能對模擬結果產生非線性的顯著影響。

4. 應用限制提供後續研究與實務參考

為釐清本研究成果於後續研究推展及實務應用上之適用範圍，並避免研究成果於不同情境下產生過度推論或不當套用之情形，茲就本研究之應用限制加以說明，俾供後續研究者、工程規劃單位及實務執行人員參考，分述如下：

(1) 研究場址單一性：本研究所有現地驗證資料均來自嘉義縣普亞汝溪新美大橋上下游河段，屬中央山脈西南側山區型礫石河床，地質條件與粒徑組成具高度特殊性。所建立之「濾除 3 cm 以下細粒」修正門檻，係基於該場址之影像解析度與河床粒徑特性所率定；此門檻值是否可直接移植至砂質河床、高坡降礫狀河道或含大量板岩片理礫石之河段，尚待進一步驗證，不宜逕行類推。

(2) 地面真值樣本量之限制：本研究地面真值採樣區域僅涵蓋上、下游各一處 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 之固定樣方（合計 1,303 顆），空間代表性雖具一定信度，但樣方數量有限，難以完整呈現整體河段粒徑之空間異質性；若研究區域粒徑分佈呈現顯著橫向或縱向分布不均時，以少數樣方推估代表值之統計可靠性將受到制約。

(3) 影像分析軟體之固有限制：本研究採用 BASEGRAIN

軟體係針對非黏性礫石底床設計，其邊緣偵測演算法對顆粒形狀具隱含假設（近似橢圓形）；對於板岩片理所形成之扁平薄片礫石或高度稜角形粗礫，軟體判釋準確度可能低於一般文獻所述校正水準，應用者須注意岩性差異之潛在影響。

- (4) 曼寧公式之不確定性：本研究採用之各經驗公式本身在率定時存在地域與水理條件限制，若採用不同公式，誤差壓縮係數與最終水理影響之評估結果可能有所出入。使用者應綜合考量上述限制，在實務應用中搭配傳統採樣驗核，以確保粒徑分析成果之工程可靠性。

五、結論與建議

本研究以無人機 (UAV) 影像技術應用於河道表面粒徑分析為核心，系統性探討其不同河床環境下之適用性、限制與工程意涵，並透過實際調查資料，分別就 (1) UAV 影像解析度與粒徑判釋能力、(2) 與傳統調查之差異與相關性、(3) 河床粒徑推估曼寧糙率係數之敏感性與誤差影響三項主題結論如下。

- (1) 在 UAV 影像解析度與粒徑判釋能力方面，研究結果清楚顯示，UAV 影像對細顆粒之辨識能力受限於影像解析度與物理成像條件。在未經任何修正的情況下，UAV 粒徑分析於 D_{10} - D_{30} 等細顆粒區段出現顯著系統性低估，誤差普遍超過 -60%，並進一步導致中位粒徑 D_{50} 在上、下游河段皆出現超過 -44% 的嚴重偏差。此結果證實，若直接使用未修正之 UAV 粒徑資料，將完全無法反映真實河床顆粒結構，亦不具任何水理或工程應用價值。
- (2) 在差異與相關性比較分析方面，本研究證實「濾除 3 公分 (30 mm) 以下顆粒」為一項關鍵且有效的校正策略。經由此校正後，UAV 粒徑分布曲線明顯向傳統調查結果回歸，並在 D_{50} 與 D_{84} 等重要工程指標上展現高度一致性。尤其在下游細顆粒含量較高之河段中， D_{50} 誤差由 -52.72% 大幅修正至 -5.10%，修正後之 D_{50} (69.03 mm) 與傳統調查結果 (72.74 mm) 幾乎重合，顯示校正後之 UAV 粒徑分析已具備高度準確度與可靠性。在粗顆粒端 D_{84} 的表現上，校正後誤差更可控制於 $\pm 2\%$ 以內，證實 UAV 技術在辨識與量化粗顆粒方面具有良好可信度。
- (3) 於 UAV 河道粒徑分析推估曼寧糙率係數之敏感性分析中，本研究指出，雖然粒徑誤差在轉換為曼寧係數時，會因幕次關係 (約 1/6) 而產生顯著的「誤差壓縮效應」，使得 20-40% 的粒徑偏差僅對 n 值造成約 3-6% 的直接影響，但此等差異在實際水理模擬中仍不可忽視。特別是在以設計流量反算水位或進行洪水風險評估時，即便小幅度的糙率誤差，仍可能於淺寬或坡度平緩之河段引發非線性放大的水位差異。因此，確保粒徑分析結果之合理性，仍是避免水理計算系統性

誤判的關鍵前提。

綜合而言，本研究成果 UAV 影像河床粒徑分析若未進行適當修正，將因細顆粒遺失而產生嚴重系統性偏差，無法直接應用於水理與工程分析；然而，透過設定合理的粒徑下限 (如濾除 3 公分以下顆粒)，UAV 粒徑分析結果可有效重建河床主要粒徑特性，並在 D_{50} 與 D_{84} 等關鍵指標上達到與傳統調查高度一致的水準。在此條件下，UAV 技術具備作為河道大尺度、快速調查與長期監測工具之實務可行性，並可作為傳統調查方法的重要補充。

雖然修正後結果仍存在部分殘餘偏差，顯示影像法於複雜河床條件下仍受限於光影變化、顆粒遮蔽與粒形差異等因素，但整體分析精度已足以支援工程尺度之粒徑判釋與趨勢判讀。未來研究建議進一步結合影像增強與智慧型影像辨識技術，並擴充地面真值資料之空間與粒徑涵蓋範圍，以建立更具穩健性與可移轉性的自動化河床粒徑分析流程。

針對目前的誤差特性與技術限制，提出以下改善建議以進一步提升 UAV 粒徑分析的實用性：

- (1) 技術與流程優化：
 - ① 強化影像前處理：應用超解析度 (Super-resolution) 重構與陰影抑制技術，提升顆粒邊緣對比度。
 - ② 多尺度重建：結合低空與貼近飛行拍攝，或引入多視角三維重建，改善平面影像的重疊遮蔽問題。
 - ③ 未來研究可依照集水區縱剖面粒徑變化趨勢，建立「粒徑-飛行高度-修正門檻」三者之對應關係表，作為水土保持調查之標準化操作指引。
- (2) 數據管理與應用策略
 - ① 粒徑成果與水理模型之整合應用：建立從 UAV 粒徑分析到水理模型前處理的標準化串接流程，包含輸出 $D_{16}/D_{50}/D_{84}$ 信賴區間、換算糙率係數、蒙地卡羅模擬評估不確定度 (用大量隨機抽樣來估計不確定的結果)。
 - ② 粒徑修正係數之建立與管理：本研究已驗證「濾除 3 cm 以下細粒」可有效縮減 UAV 粒徑分析之系統性偏差，建議各研究單位或管理機關以本研究成果為基礎，針對不同河川地文條件 (包含坡降、岩性、集水區面積等) 建立在地化之修正係數資料庫。

參考文獻

- [1] 陳祥偉、賴東暘、詹錢登 (2023)。應用 UAV 空拍影像和 BASEGRAIN 軟體分析河道泥沙粒徑分布之研究。土木水利, 50(5), 78-90。Chen, H.W., Lai, T.Y., and Jan, C.D. (2023). "Research on analyzing riverbed sediment particle size distribution using UAV aerial imagery and BASEGRAIN software." *Journal of Civil and Hydraulic Engineering*, 50(5), 78-90.
[https://doi.org/10.6653/MoCICHE.202310_50\(5\).0011](https://doi.org/10.6653/MoCICHE.202310_50(5).0011) (in Chinese)
- [2] Bray, D.I. (1979). *Flow resistance in gravel-bed rivers*. *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, 105(HY5), 625-639.

- [3] Downes, B.J., Lake, P.S., Schreiber, E.S.G., and Glaister, A. (2000). "Habitat structure, resources and diversity: the separate effects of surface roughness and macroalgae on stream invertebrates." *Oecologia*, 123(4), 569-581.
- [4] Giménez, R., and Govers, G. (2001). "Interaction between bed roughness and flow hydraulics in eroding rills." *Water Resources Research*, 37(3), 791-799.
- [5] Garde, R.J., and Raju, K.G.R. (1978). *Hydraulic design of bed-material transport in alluvial channels*. Journal of the Hydraulics Division, ASCE.
- [6] Lane, E.W., and Carlson, E.J. (1953). *Some factors affecting the stability of canals constructed in coarse granular material*, US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 37-48.
- [7] Nezu, I., and Nakagawa, H. (1993). *Turbulence in Open-Channel Flows*, IAHR-Monograph, Balkema, Netherlands.
- [8] Pedersen, M.L., and Friberg N. (2007). "Two lowland stream riffles-linkages between physical habitats and macroinvertebrates across multiple spatial scales." *Aquatic Ecology*, 41, 475-490.
- [9] Raudkivi, A.J. (1976). *Loose boundary hydraulics* (2nd ed.), Pergamon Press.
- [10] Subramanya, K. (1982). *Flow in open channels*, Tata McGraw-Hill.
- [11] Vázquez-Tarrio, D., Borgniet, L., Liébault, F., and Recking, A. (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.
- [12] Woodget, A.S., and Austrums, R. (2017). "Subaerial gravel size measurement using topographic data derived from a UAV-SfM approach." *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(9), 1434-1443.
- [13] Woodget, A.S., Fyffe, C., and Carbonneau, P.E. (2018). "From manned to unmanned aircraft: Adapting airborne particle size mapping methodologies to the characteristics of sUAS and SfM." *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(4), 857-870.
- [14] Mair, D., Do Prado, A.H., Garefalakis, P., Lechmann, A., Whittaker, A., and Schlunegger, F. (2022). "Grain size of fluvial gravel bars from close-range UAV imagery - uncertainty in segmentation-based data." *Earth Surface Dynamics*, 10, 953-973.
- [15] Lang, N., Irniger, A., Rozniak, A., Hunziker, R., Wegner, J.D., and Schindler, K. (2021). "GRAINet: Mapping grain size distributions in river beds from UAV images with convolutional neural networks." *Hydrology and Earth System Sciences*, 25, 2567-2597.
<https://doi.org/10.5194/hess-25-2567-2021>
- [16] Miazza, R., Pascal, I., and Ancely, C. (2024). "Automated grain sizing from uncrewed aerial vehicles imagery of a gravel-bed river: Benchmarking of three object-based methods." *Earth Surface Processes and Landforms*, 49, 1503-1514.

2026 年 01 月 13 日 收稿

2026 年 05 月 15 日 修正

2026 年 07 月 03 日 接受