



應用無人載具高解析影像及三維點雲 於山區河床表層粒徑之判釋研究

曾志民* / 國立成功大學水利及海洋工程學系 教授

曾仁彥 / 長榮大學土地管理與開發學系 碩士

張國楨 / 國立臺北科技大學土木工程學系 教授

黃美甄 / 國立臺北科技大學土木工程學系 碩士

陳振宇 / 農村發展及水土保持署減災監測組 組長兼技術研究發展平台 組長

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，利用航拍影像產製高階析度正射影像，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。本研究選取一處山區河段作為研究區域進行表層粒徑現場調查分析，其次利用無人載具 UAV 於研究區域以不同日照光源條件下進行航拍，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。研究成果顯示，在數公分之較小粒徑且接近正射光源時，影像點雲分析成果明顯優於影像判釋分析結果，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。不同光源角度對於數公分等級之較小粒徑影響較為明顯，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%。

關鍵詞：山區河川、粒徑調查、無人載具、高解析影像、點雲

前言

廣域山區河床表面粒徑資料對於集水區降雨逕流、泥砂運移及土砂收支分析等相關數值模擬之曼寧 n 值訂定非常重要，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，由於颱風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。

本研究以高雄寶來荖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及日照光源進行航拍，產製高解析度正射影像及三維密點雲，進一步分別利用

* 通訊作者，cmtseng@gs.ncku.edu.tw

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。

研究區域

本文研究區域位於高雄市寶來區荖濃溪寶來部落後方大河彎處，河床顆粒材料以卵礫石為主，材料粒徑約介於 $(10 \sim 1000) \times n \text{ mm}$ ，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。

研究方法與材料

河床表層粒徑現場調查

依據「河床質調查方法之比較研究」^[1] 及「河道曼寧 n 值與河床質粒徑關係之研究 (2/2)」^[2] 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^[3] 提及 Wolman^[4] 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，簡要說明如下：

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。本研究採用採樣繩測距採樣方式，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^[4] 建議之 100 顆為主。網格式採樣作業程序^[5]：

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 $1 \sim 2$ 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。
5. 於灘地或砂洲時，在採樣位置上開始拉設採樣繩，採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作過程產生之誤差

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. 將撿取之樣品以開口樣版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，並在紀錄表將該位置之樣品以「X」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。

本研究之調查範圍為圖 1 紅色框線範圍內約 $65 \text{ m} \times 65 \text{ m}$ 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 $65 \text{ m} \times 65 \text{ m}$ 之正方形調查範圍進一步劃分 25 個 $13 \text{ m} \times 13 \text{ m}$ 之樣區網格式，樣區網格式分布如圖 2，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^[4] 建議之現場撿拾取樣值 100 顆。

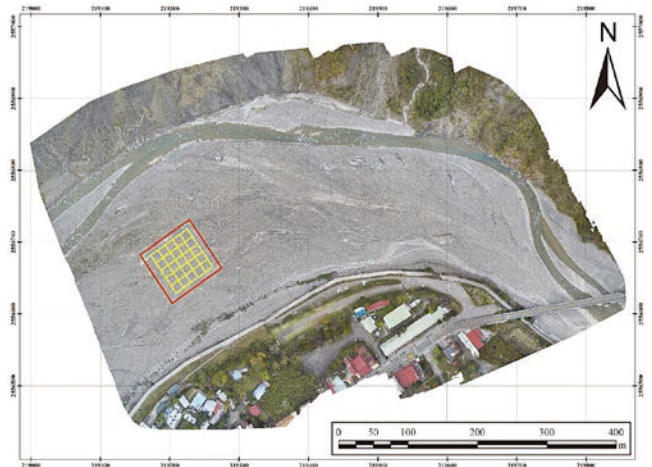


圖 1 研究範圍

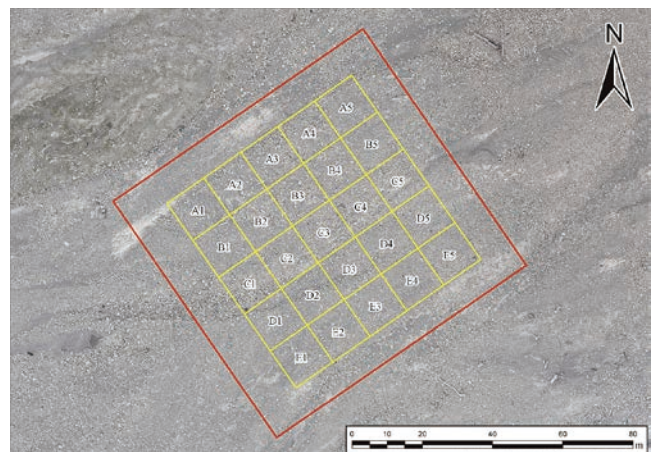


圖 2 河床表層粒徑現場調查之樣區網格式分布

表 1 為兩種採樣間距 (0.5 公尺及 1 公尺) 分別獲得之四種指標粒徑 (D_{16} 、 D_{50} 、 D_{84} 、 D_{90}) 比較, 表中顯示 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。綜合兩種採樣間距之比較分析可知, 依據 Wolman [4] 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。

本研究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:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

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 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 1 兩種採樣間距之河床表層粒徑現場調查成果比較

指標 粒徑	D_{16} (mm)			D_{50} (mm)			D_{84} (mm)			D_{90} (mm)		
	0.5 m	1.0 m	誤差 (%)	0.5 m	1.0 m	誤差 (%)	0.5 m	1.0 m	誤差 (%)	0.5 m	1.0 m	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

無人載具 UAV 航拍及密點雲產製

本研究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), 搭載 SONY QX1 APSC 等級片幅相機, 表 3 為 MD4-1000 飛行載具基本資料, 無人飛機航拍範圍 (80 m × 80 m) 為圖 1 之紅色框線區位。

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) 技術掃描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。本研究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 25 公尺、50 公尺、100 公尺及 200 公尺四種。四種光源之航拍正射影像產製成果如圖 4 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 5 則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

表 2 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	分類名稱
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



圖 3 多旋翼型無人載具 Microdrones MD4-1000 外觀

表 3 Microdrones MD4-1000 無人飛行載具基本資料

機身尺寸	1.03 m (對角機電軸距), 展開直徑: 1,750 mm, 儲存直徑: 700 mm
最大荷載	1,200g (2,000 g)
機身自重	2,650 g
最大起飛重量	5,550 g (6,500 g)
飛行時間	約 25 ~ 30 分鐘 (空載時 ≥ 75 分鐘, 800 g 任務載重時 ≥ 42 分鐘, 2,000 g 任務載重時: ≥ 20 分鐘)
最大巡航速度	12 m/s
最大爬升速率	7.0 m/s
抗風情況	12 m/s
工作海拔	達 4,000 m 以上
遙控距離	5,000 m
環境溫度	-30°C~55°C
相對飛行高度	≥ 1,000 m
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 220 kV 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	≥ 5,000 m

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。

河床表層粒徑影像判釋

本研究利用英國拉夫堡大學地理系的 David Graham、

Ian Reid 及 Stephen Rice 共同開發之 Digital Gravelometer 軟體進行河床表層粒徑影像判釋，Digital Gravelometer 能夠從數位影像中，快速地分析礫石沉積物。使用 Digital Gravelometer，可以獲得與使用傳統現地調查測量技術類似的粒徑分布資訊^[6]。Digital Gravelometer 軟體影像處理之程序流程如圖 6 所示^[7]，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 $w = 1$)。

點雲精度特性粒徑分析

原始點雲在進行精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 7 及圖 8 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，本研究利用綠度指數 (Greenness) 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：

$$\text{Greenness} = \frac{G + R}{G - R} \quad (2)$$

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。

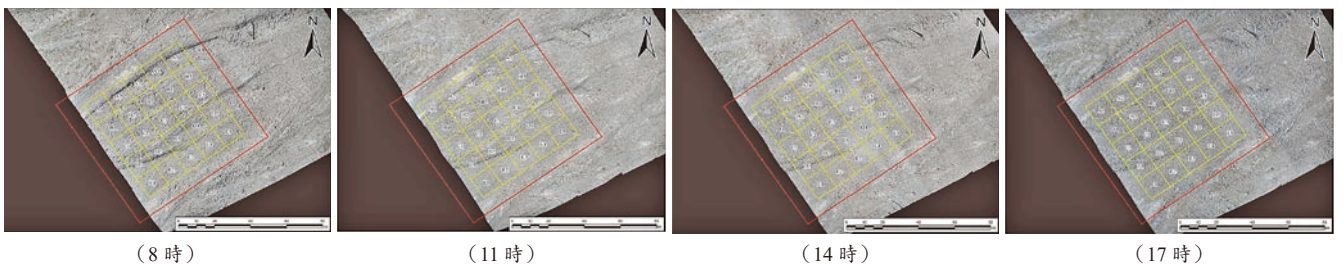


圖 4 無人飛機航拍正射影像產製成果

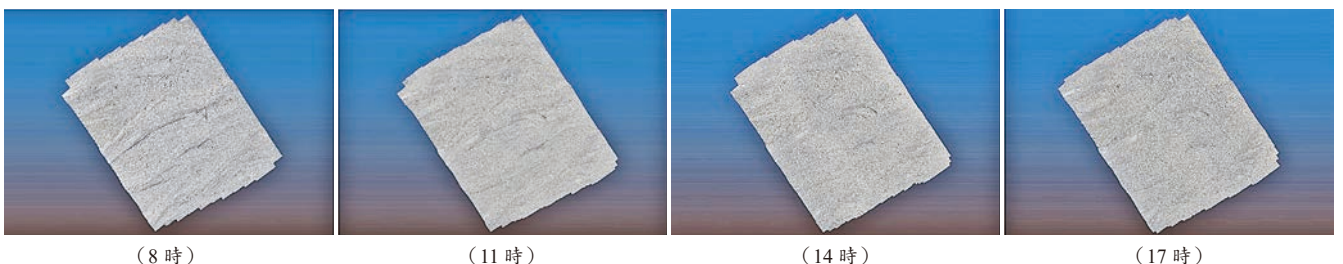


圖 5 無人飛機航拍三維點雲產製成果

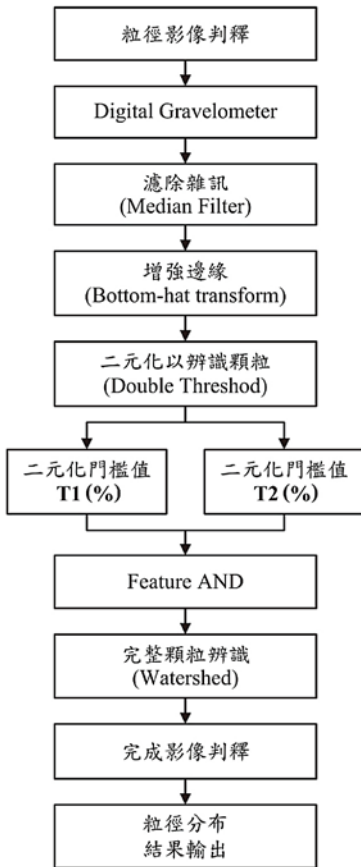


圖 6 Digital Gravelometer 影像處理流程

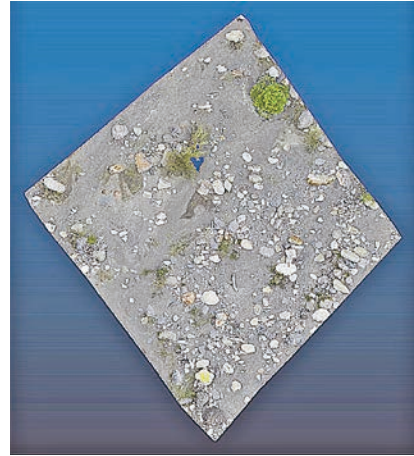


圖 7 河床調查樣區之點雲平面分布

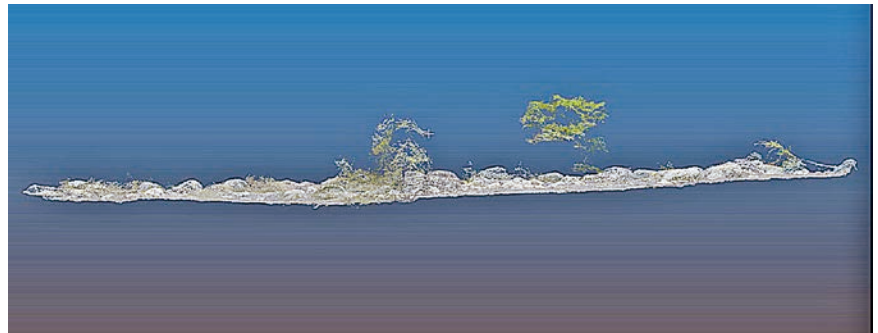


圖 8 河床調查樣區之點雲側視分布

針對點雲之糙度特性，本研究主要分析在一特定區域內之點雲高程偏差 σ_z [8]，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 9 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 10 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 [9-11]，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} 。

研究成果說明

影像粒徑判釋成果

圖 11 為針對不同航高之最小可判釋粒徑分析比較，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

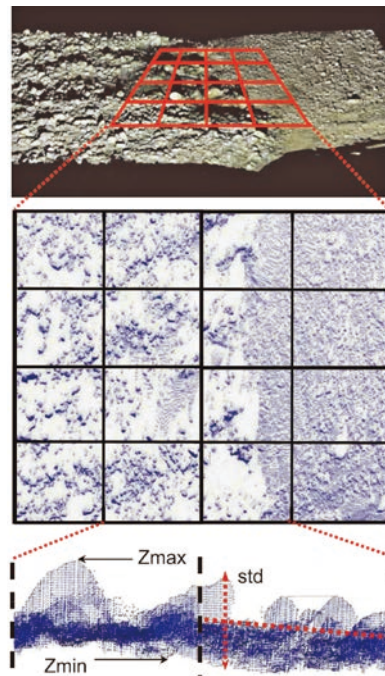


圖 9 點雲標準偏差之分析示意圖

資料來源：Rychkov *et al.* [8]

(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

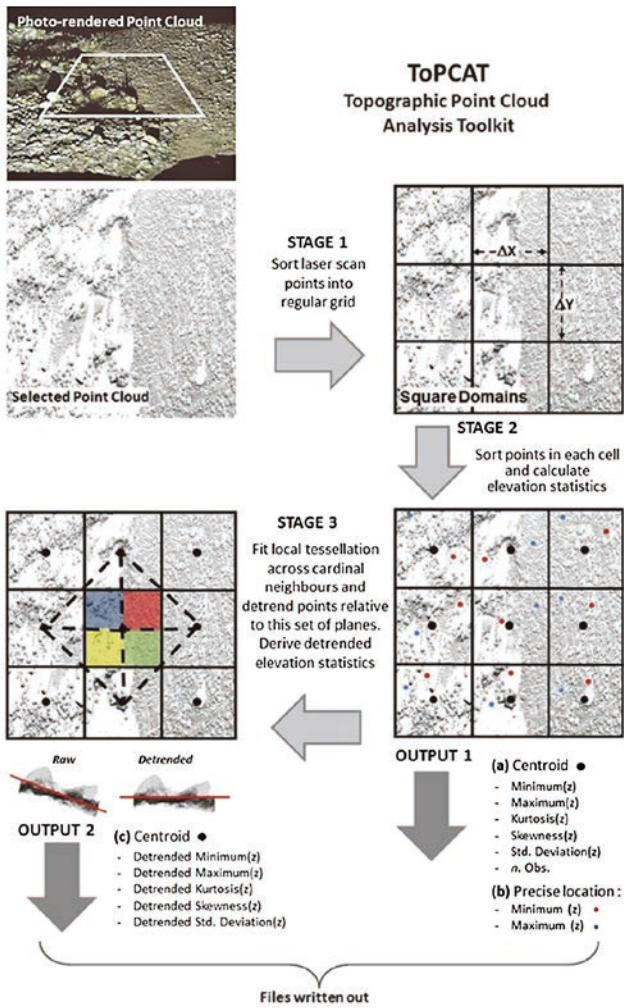


圖 10 濾除地形坡度趨勢影響之分析流程
資料來源：Brasington *et al.* [8]

公分，約略為影像解析度（5.53 公分）之 5.1 倍。綜合上述，在本研究之航高範圍（25 m ~ 200 m）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让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，本研究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 年度檢定成果 [12]，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 =

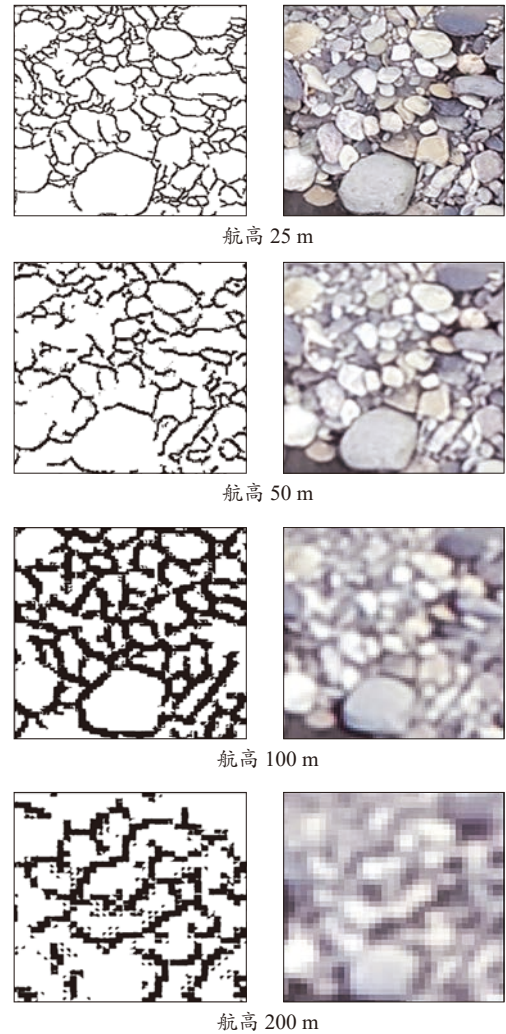


圖 11 不同航高影像之粒徑判釋成果比較

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 3 為不同光源之影像判釋結果與現調結果之整體誤差率分析，其中大、小顆粒判釋結果有所差異，在屬於較小顆粒之 D_{16} 方面，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。整體而言，判釋誤差率隨粒徑尺寸增加而下降，在上午 8 時光源時， 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%；近午光源 11 時， 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%；下午 14 時光源時， 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%；接近傍晚 17 時之光源時， 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%。

表 3 影像判釋指標粒徑之誤差率 (%) 分析成果

光源 \ 指標粒徑	D_{16} (mm)	D_{50} (mm)	D_{84} (mm)	D_{90} (mm)
8 時	51.16	28.56	17.63	10.51
11 時	44.41	24.02	12.47	6.08
14 時	44.75	27.64	11.03	9.49
17 時	61.91	30.76	14.04	15.29

整體來說，4 種光源以接近正午前（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（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。

點雲粒徑分析成果

表 4 為不同光源之點雲粒徑分析結果與現調結果之整體誤差率分析，與影像判釋結果類似，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。整體而言，判釋誤差率同樣隨粒徑尺寸增加而下降，在上午 8 時光源時， 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%；近午光源 11 時， 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%；下午 14 時光源時， 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%；接近傍晚 17 時之光源時， D_{16} 誤差平均值為 51.93%， D_{50} 誤差平均值為

表 4 點雲糙度指標粒徑之誤差率 (%) 分析成果

光源 \ 指標粒徑	D_{16} (mm)	D_{50} (mm)	D_{84} (mm)	D_{90} (mm)
8 時	46.50	21.76	16.13	11.77
11 時	22.09	17.84	13.85	13.15
14 時	27.06	16.87	14.92	15.18
17 時	51.93	24.72	16.95	15.42

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（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 12 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。

結論與建議

本研究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 65 m × 65 m 之正方形範圍，並進一步劃分 25 個 13 m × 13 m 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。依據不同航高產製正射影像之粒徑區隔效果比較，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；最大航高 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。在本計畫的航高範圍（25 m ~ 200 m）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。依據影像判釋分析與影像點雲

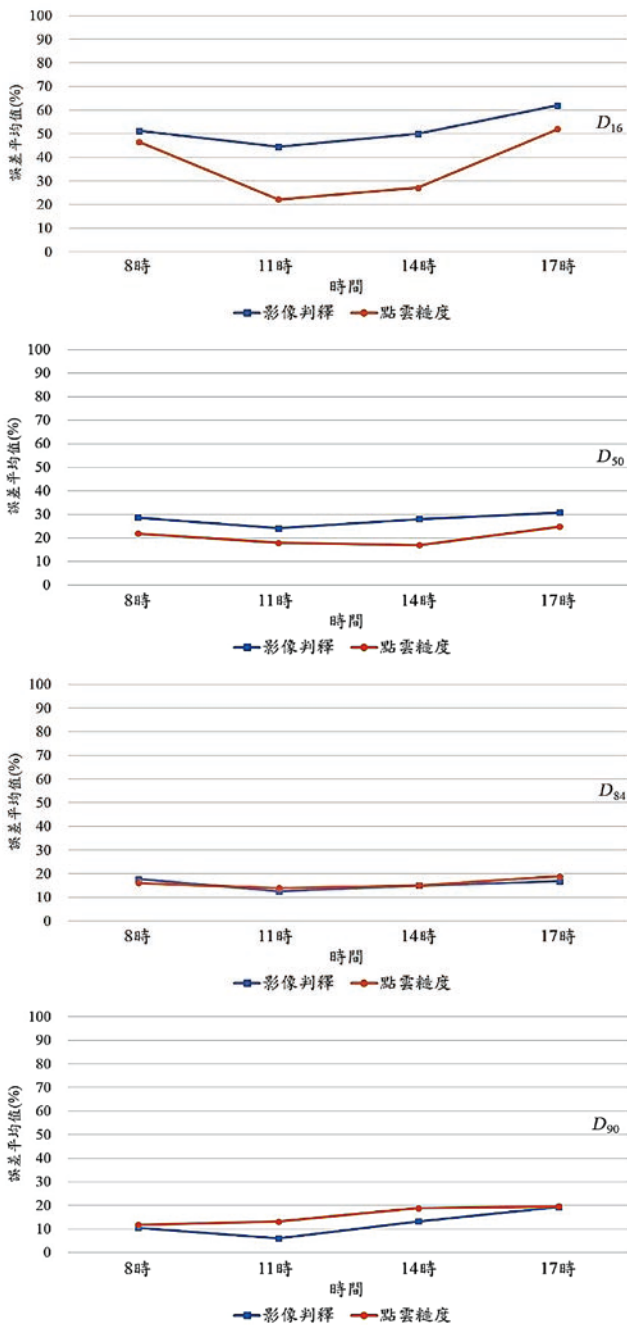


圖 12 影像判釋分析與影像點雲分析在 4 種光源之整體誤差平均值比較

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之整體誤差平均值兩者大致相近。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精度分析兩種方式受到不同光源之影響並不明顯。

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之正射日照，可得到最佳之粒徑判釋成果。

誌謝

本研究為 108 及 109 年度農村發展及水土保持署創新研究計畫 (計畫編號：108 保發 -10.1- 保 -01-06-001(42)；109 保發 -11.1- 保 -01-06-001(28)) 之部分成果，承蒙農村發展及水土保持署經費補助使本研究得以順利完成。

參考文獻

1. 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」。
2. 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)」。
3. Bunte, K. and 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. Wolman, M.G. (1954). A method of sampling coarse river bed material. Transactions of the American Geophysical Union, Vol. 35, No. 6, 951-956.
5. 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」。
6. Graham, D.J., Reid, L., and Rice, S.P. (2005b), Automated sizing of coarse grained sediments: Image-processing procedures. Math. Geol., 37, 1-28.
7. Graham, D.J., Reid, L., and Rice, S.P. (2005a), A transferable method for the automated grain sizing of river gravels. Water Resour. Res., 41, W07020, doi:10.1029/2004WR003868.
8. Heritage and Milan (2009), Terrestrial laser scanning of grain roughness in a gravel bed river. Geomorphology, 113(1), 4-11.
9. Aberle, J. and Smart, G.M. (2003), The influence of roughness structure on flow resistance in mountain streams. J. Hydraul. Res., 41(3), 259-269.
10. Brasington, J., Vericat, D., and Rychov, I. (2012), Modeling river bed morphology, roughness, and surface sedimentology using high resolution terrestrial laser scanning. Water Resour. Res., 48, W11519.
11. Storz-Peretz, Y. and Laronne, J. (2013), Morphotextural characterization of dryland braided channels. Geol. Soc. Am. Bull., 125(9-10), 1599-1617.
12. 農委會水土保持局 108 年度創新研究計畫 (2019), 「無人載具高解析影像及點雲於山區河川表層粒徑分析之可行性研究」。