



國立臺灣大學工學院土木工程學系

碩士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master's Thesis

即時影像萃取土石流表面流速

Real-Time Surface Velocity Extraction of Debris Flows Using
Image-Based Analysis

張正力

Cheng-Li Chang

指導教授：劉格非 博士

Advisor: Ko-Fei Liu, Ph.D.

中華民國 114 年 7 月

July, 2025

致謝



本論文的完成，凝聚了許多人的幫助與支持。在此，謹向所有曾給予我指導與協助的師長、家人及朋友，致上最誠摯的謝意。

首先，衷心感謝指導教授劉格非老師。在整個研究期間，老師不僅於學術上給予我嚴謹的指導，更在論文撰寫與研究方向上提供了寶貴的建議。儘管我資質駑鈍，常需花費許多時間才能理解並跟上老師的步伐，仍由衷感謝老師始終耐心教導。老師一貫嚴謹的研究態度，使我在研究歷程中獲益良多，對學術工作有了更深層的體悟。

感謝口試委員詹錢登老師、周憲德老師與魏士超老師撥冗參與本論文之口試，並提出寶貴的建議與指教，使本論文內容更加完善。

此外，也誠摯感謝研究過程中曾提供協助的實驗室學長與學弟，尤其是 Sudhan、陳世霖、鄭宇文、劉偉辰、蔡賜晏、陳麒森等人，在數據蒐集、程式撰寫與課業討論方面，皆給予我幫助與鼓勵，讓我在研究過程中深感支持與激勵。

最後，感謝我的家人與親友長期以來的理解與陪伴。是您們的支持與包容，使我得以無後顧之憂地專注於學業與研究。您們的愛與信任，是我堅持走到最後的最大動力。

謹以此論文，獻給所有在我學術旅程中給予我支持與幫助的人。衷心感謝你們的陪伴。

Just like an engineer—find the problem and fix it.

中文摘要



台灣山區地勢陡峭，河道坡陡流急，極易在強降雨事件中引發土石流災害。由於土石流具突發性與高速流動等特性，對鄰近居民與基礎設施造成極大威脅，因此即時監測與流速偵測技術之發展，為提升災害預警效能之關鍵課題。

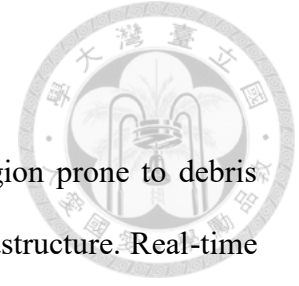
本研究提出一套以即時影像為基礎之土石流表面流速萃取方法，利用影像中兩個感興趣區域（Region of Interest, ROI）之平均灰階值與其時間變化特徵作為分析依據。透過影像灰階化、平均灰階值平滑處理與斜率計算，建構兩組時間序列，並進行時間延遲分析。進一步結合均方根誤差（Root Mean Square Deviation, RMSD）進行最佳時間平移量判定，據以估算事件於兩 ROI 間之平均表面流速。此外，本研究引入浮動式門檻值以排除環境雜訊干擾，並輔助判斷事件進出 ROI 之時段。

本研究分別透過人造數值影像、室內水槽實驗與現地監測影像三種方式進行驗證。數值實驗結果顯示，在理想條件下，本方法可準確估算流速，誤差約小於 1.4%。室內水槽實驗中，由於光源變化與相機 ISO 及光圈設定為自動模式，導致影像亮度不一致，產生約 20.22% 的誤差。至於現地土石流影像，受限於天候因素與設備限制，影像多處於模糊或沾附水滴、霧氣等情形，雖部分案例誤差可低至 15.13%，惟整體誤差偏高，亦存在多起誤判狀況。

整體而言，本研究所提出之方法可應用於土石流流速之初步推估，但於現地實務應用上，影像品質受環境與氣候條件限制，仍為其準確性之主要影響因素，後續尚需針對此部分進行改善與強化。

關鍵字：影像處理、灰階值、時間延遲分析、土石流表面流速、即時監測

ABSTRACT



Taiwan's mountainous terrain and rapid streams make the region prone to debris flows during heavy rainfall, posing serious risks to people and infrastructure. Real-time monitoring and velocity detection are crucial for early warning.

This study presents an image-based method to extract debris flow surface velocity in real time. Two Regions of Interest (ROIs) are analyzed by tracking average grayscale values and their changes over time. Using smoothed grayscale time series and slope data, a time delay analysis with Root Mean Square Deviation (RMSD) determines the optimal shift to estimate surface velocity. A floating threshold mechanism filters environmental noise and detects event timing within ROIs.

This study was validated using synthetic images, indoor flume experiments, and field debris flow video. In ideal conditions, the method showed high accuracy with an error below 1.4%. In flume experiments, lighting variation and automatic camera settings caused brightness inconsistency, leading to an error of about -20.22%. Field images were affected by poor visibility, water droplets, and mist, resulting in higher errors, though some cases achieved a minimum error of 15.13%.

Overall, the proposed method is effective for preliminary surface velocity estimation. However, its accuracy in field applications is limited by environmental and weather-related image quality issues, highlighting the need for further improvements.

Keywords: image processing, grayscale, time delay analysis, debris flow surface velocity, real-time monitoring

目次



致謝	i
中文摘要	ii
ABSTRACT	iii
目次	iv
圖次	vii
表次	xiv
Chapter1 緒論.....	1
1.1 研究背景及目的	1
1.2 文獻回顧	2
1.3 論文架構	6
Chapter2 研究方法.....	8
2.1 基本定義	8
2.1.1 數位影像	8
2.1.2 解析度	8
2.1.3 灰階化	9
2.1.4 感興趣區域	10
2.2 方法概述	11
2.2.1 分析概念與研究假設	11
2.2.2 灰階變化特性觀察	12
2.2.3 分析考量	15
2.3 平均灰階值與斜率計算	16
2.3.1 平均灰階值計算	16
2.3.2 時間序列平滑處理	16
2.3.3 斜率計算	17

2.3.4	平均灰階值與斜率計算流程.....	18
2.4	環境雜訊門檻值計算.....	19
2.4.1	斜率門檻值計算.....	19
2.4.2	灰階值門檻值計算.....	19
2.4.3	物體運動情形判別.....	20
2.4.4	門檻值計算流程.....	21
2.5	延遲時間(ΔT)分析:.....	23
2.5.1	灰階值平移.....	23
2.5.2	以單一值配對.....	24
2.5.3	以資料群組配對:RMSD 分析.....	25
2.5.4	以資料群組配對:互相關分析.....	29
2.5.5	RMSD 與互相關分析結果比較.....	31
2.5.6	延遲時間分析流程.....	32
2.6	數據後處理與延遲時間轉換為流速.....	34
2.6.1	數據異常值處理.....	34
2.6.2	流速計算公式應用.....	35
Chapter3	數值實驗.....	36
3.1	人為影像生成方式.....	36
3.2	分析速度方法驗證.....	38
3.2.1	圓半徑不變速度改變.....	40
3.2.2	速度不變圓半徑改變.....	41
3.2.3	等加速度運動.....	42
3.2.4	背景添加雜訊.....	43
3.3	小結.....	45
Chapter4	室內水槽實驗.....	46

4.1	保麗龍球流動實驗	46
4.1.1	實驗器材與配置	46
4.1.2	實驗步驟	47
4.1.3	以本研究方法分析單顆保麗龍球實驗速度	48
4.1.4	以肉眼判別單顆保麗龍球實驗速度	50
4.1.5	單顆保麗龍球實驗誤差比較	52
4.1.6	以本研究方法分析多顆保麗龍球實驗速度	54
4.1.7	以肉眼判別多顆保麗龍球實驗速度	57
4.1.8	多顆保麗龍球實驗誤差比較	59
4.2	砂石流動實驗	63
4.2.1	實驗器材與配置	63
4.2.2	實驗步驟	65
4.2.3	以本研究方法分析速度	65
4.2.4	以肉眼判別速度	68
4.2.5	誤差比較	69
Chapter5	現地影像分析	72
5.1	案例一:2004 年敏督利颱風	72
5.1.1	肉眼判別速度	73
5.1.2	數據分析與結果	73
5.2	案例二:2024 年凱米颱風	77
5.2.1	肉眼判別速度	77
5.2.2	數據分析與結果	79
Chapter6	結論與建議	81
	參考文獻	83

圖次



圖 1-1 LSPIV 影像處理演算法示意圖.....	3
圖 1-2 STIV 影像處理演算法示意圖.....	5
圖 2-1 數位影像示意圖.....	8
圖 2-2 現地土石流彩色、灰階、紅、藍和綠影像.....	10
圖 2-3 影像 ROI 之資訊擷取(a)原始影像；(b)影像遮罩；(c)選取 ROI 範圍後影像	11
圖 2-4 影像中 ROI 範圍及平均灰階值(a)ROI 選取範圍(b)平均灰階值隨時間的變 化.....	12
圖 2-5 在不同情況下 ROI ₁ 和 ROI ₂ 平均灰階值隨時間的變化圖.....	14
圖 2-6 研究方法概念流程圖.....	15
圖 2-7 2004 年 7 月 2 愛玉子溪土石流影像平均灰階值隨時間的變化圖.....	16
圖 2-8 資料平均示意圖.....	17
圖 2-9 流程圖-平均灰階值與斜率計算.....	18
圖 2-10 物體在 ROI 內移動的情況灰階值和斜率相對應的位置示意圖.....	21
圖 2-11 流程圖-平均灰階值門檻值計算.....	22
圖 2-12 流程圖-斜率門檻值計算.....	22
圖 2-13 單顆保麗龍球水槽實驗原始灰階值及平移後的灰階值；(a)原始灰階值、 (b)平移後灰階值.....	23
圖 2-14 線性內插法示意圖.....	24
圖 2-15 均方根誤差計算範圍；以 T=5.583 秒時為例，此時 ROI ₂ 灰階值的前後 2 幀(共 5 個資料點)與 ROI ₁ 的 5 個資料點計算均方根誤差。ROI ₁ 的 5 個 資料點以 ROI ₂ 所對應的延遲幀數 Δf_g 為中心，於 ROI ₁ 中向前與向後各 4 幀當作各別的候選點，分別以每個候選點的前後 2 幀(共 5 個資料點) 與 ROI ₂ 的 5 個資料點計算均方根誤差。.....	26

圖 2-16 均方根誤差計算點；ROI ₁ 的 5 個資料點以 ROI ₂ 所對應的延遲幀數 Δf_g 為中心，於 ROI ₁ 中向前與向後各 4 幀當作各別的候選點，分別以每個候選點的前後 2 幀(共 5 個資料點)與 ROI ₂ 的 5 個資料點計算均方根誤差。	28
圖 2-17 數據擬合；(a)藍點為 ROI ₁ 不同位置與 ROI ₂ 計算的均方根誤差；(b)黑線為四次曲線擬合結果，紅點為擬合曲線最小值位置。	28
圖 2-18 數據擬合；(a)藍點為 ROI ₁ 不同位置與 ROI ₂ 計算的互相關係數；(b)黑線為四次曲線擬合結果，紅點為擬合曲線最大值位置。	30
圖 2-19 人造數位影像	31
圖 2-20 流程圖-延遲時間分析	33
圖 2-21 數據後處理示意圖；在 T=5.617 秒時，其左右 2 幀皆有值，且此 4 點的延遲幀數 Δf 皆在誤差正負 1 幀內，保留 T=5.617 秒時的點。	34
圖 3-1 影像座標定義	36
圖 3-2 像素圓邊界示意圖	37
圖 3-3 人造數位影像	38
圖 3-4 人造影像（等速移動）在不同時間下，圓球於 ROI 中的位置變化。	38
圖 3-5 人造影像（等速移動）之平均灰階值與斜率與環境雜訊門檻值分析結果；(a)灰階值時間序列；(b)斜率時間序列。	39
圖 3-6 人造影像（等速移動）下本研究所提出方法分析之速度與理論速度比較；(a)橫軸為時間，主縱軸為速度，紅色叉號為本研究方法分析之速度，黑色點為理論速度；次縱軸為灰階值，藍色實線與紅色實線分別為 ROI ₁ 與 ROI ₂ 的平均灰階值。(b)本研究方法所分析速度與理論速度之相對誤差。	40
圖 3-7 不同速度條件下，圓球半徑為 20 pixel 時本研究方法所估算速度與理論速度之最大相對誤差。	41

圖 3-8 速度為 70 pixel/s 時，不同圓球半徑條件下本研究方法所估算速度與理論速度之最大相對誤差。	41
圖 3-9 人造影像（等加速度移動）之平均灰階值與斜率與環境雜訊門檻值分析結果；(a)灰階值時間序列；(b)斜率時間序列。	42
圖 3-10 人造影像（等加速度運動）下本研究所提出方法分析之速度與理論速度比較：(a)橫軸為時間，主縱軸為速度，紅色叉號為本研究方法分析之速度，黑色點為理論速度；次縱軸為灰階值，藍色實線與紅色實線分別為 ROI ₁ 與 ROI ₂ 的平均灰階值。(b)本研究方法所分析速度與理論速度之相對誤差。	43
圖 3-11 人造數位影像(背景添加雜訊)	44
圖 3-12 人造影像（背景添加雜訊）之平均灰階值與斜率與環境雜訊門檻值分析結果；(a)灰階值時間序列；(b)斜率時間序列。	44
圖 3-13 人造影像（背景添加雜訊）下本研究所提出方法分析之速度與理論速度比較：(a)橫軸為時間，主縱軸為速度，紅色叉號為本研究方法分析之速度，黑色點為理論速度；次縱軸為灰階值，藍色實線與紅色實線分別為 ROI ₁ 與 ROI ₂ 的平均灰階值。(b)本研究方法所分析速度與理論速度之相對誤差。	45
圖 4-1 保麗龍球流動實驗-實驗器材配置以及實驗材料；(a)水槽俯視圖(b)實驗保麗龍球(c)水槽側視圖(d)相機拍攝影像	47
圖 4-2 單顆保麗龍球實驗 ROI 位置	48
圖 4-3 單顆保麗龍球水槽實驗原始灰階值及平移後的灰階值；(a)原始灰階值、(b)平移後灰階值.....	48
圖 4-4 單顆保麗龍球實驗之平均灰階值與斜率與環境雜訊門檻值分析結果；(a)灰階值時間序列；(b)斜率時間序列。	49

圖 4-5 單顆保麗龍球實驗下本研究所提出方法分析之速度:橫軸為時間，主縱軸為速度(單位：cm/s 與 pixel/s)，次縱軸為灰階值。紅色叉號代表本研究所估算之速度結果；藍線與紅線則分別對應於 ROI ₁ 與 ROI ₂ 的灰階值變化。	49
圖 4-6 圓球最外緣四個點示意圖	50
圖 4-7 不同時間下保麗龍球判別中心位置；藍線為 ROI ₁ ，紅線為 ROI ₂ 範圍，黑點為肉眼判別保麗龍球的中心點。	51
圖 4-8 單顆保麗龍球之肉眼判別結果：(a)時間區間 $t = 5.65$ 至 $t = 6.27$ 秒間，球體圓心位置所構成之運動軌跡；(b)依據每 10 幀時間間隔所計算之沿 ROI 平行方向的速度變化。	51
圖 4-9 單顆保麗龍球實驗之速度誤差比較圖。橫軸為時間，主縱軸為速度(單位：cm/s 與 pixel/s)，次縱軸為 ROI 灰階值。圖中紅色叉號表示本研究所方法所分析之速度，黑色點為人工肉眼判別之速度。藍色與紅色實線分別代表 ROI ₁ 與 ROI ₂ 的灰階值變化；灰色陰影區域表示相對誤差 5% 以內之範圍。	52
圖 4-10 多顆保麗龍球實驗 ROI 位置	54
圖 4-11 多顆保麗龍球實驗之影像畫面。藍色與紅色框線分別標示 ROI ₁ 和 ROI ₂ ；藍線和紅線分別為位置，兩區域大小均為 880×200 pixel，彼此間距為 50 pixel；(a)至(d)為顯示保麗龍球前緣進入 ROI 的過程；(e)至(h) 為保麗龍球充滿整個 ROI 區域之時段；(i)至(l)則顯示保麗龍球後緣逐漸離開 ROI。	55
圖 4-12 單顆保麗龍球水槽實驗原始灰階值及平移後的灰階值；(a)原始灰階值、(b)平移後灰階值.....	55
圖 4-13 多顆保麗龍球實驗之平均灰階值與斜率與環境雜訊門檻值分析結果；(a)灰階值時間序列；(b)斜率時間序列。	56

圖 4-14	多顆保麗龍球實驗球實驗下本研究所提出方法分析之速度:橫軸為時間， 主縱軸為速度(單位：cm/s 與 pixel/s)，次縱軸為灰階值。藍色叉號為 採用 5 筆資料分析所得之速度，橘色叉號為 15 筆資料，綠色叉號為 31 筆資料，紅色叉號為 61 筆資料；藍線與紅線則分別對應於 ROI ₁ 與 ROI ₂ 的灰階值變化。	56
圖 4-15	各保麗龍球在第 626 幀中心位置	57
圖 4-16	各保麗龍球在第 636 幀中心位置	57
圖 4-17	人眼判別的各保麗龍球面積範圍	58
圖 4-18	多顆保麗龍球肉眼判別速度	59
圖 4-19	多顆保麗龍球實驗誤差比較；橫軸為時間，左縱軸為速度其單位分別以 cm/s 和 pixel/s 表示，右縱軸為灰階值，紅色叉號與黑色點分別為偵測 速度及肉眼判別速度，藍線和紅線為 ROI ₁ 和 ROI ₂ 灰階值，灰色區間 表示相對誤差 21%範圍，黃色區間表示相對誤差 13%範圍。	60
圖 4-20	實驗水槽；尺寸為長 10 公尺、寬 0.5 公尺、高 0.5 公尺。	64
圖 4-21	相機架設配置；圖片上方為水槽俯視圖，下方為水槽側視圖。	64
圖 4-22	試驗使用之砂石材料；圖片中網格尺寸為 1 公分，(a)以篩砂時停留於 10 號篩(2mm)的石頭做為小粒徑材料，其平均粒徑為 3.34mm，(b)停留於 3/8inch(9.5mm)篩網上的石頭做為大粒徑材料，其平均粒徑為 11.65mm。	65
圖 4-23	砂石流動實驗 ROI 位置	66
圖 4-24	砂石流動實驗影像畫面；藍線和紅線分別為 ROI ₁ 和 ROI ₂ 位置，ROI 大 小為 200 × 300pixel，彼此間距 100pixel；(a)至(d)為石流前鋒進入 ROI 的時段；(e)至(h) 為整個畫面皆被持續流動之土石流覆蓋；(i)至(l) 為 土石流逐漸減速並趨於停止的階段。	66

圖 4-25 砂石流動實驗原始灰階值及平移後的灰階值；(a)原始灰階值、(b)平移後灰階值	67
圖 4-26 砂石流動實驗之平均灰階值與斜率與環境雜訊門檻值分析結果；(a)灰階值時間序列；(b)斜率時間序列。	67
圖 4-27 砂石流動實驗下本研究所提出方法分析之速度:橫軸為時間，主縱軸為速度(單位：cm/s 與 pixel/s)，次縱軸為灰階值。紅色叉號代表本研究所估算之速度結果；藍線與紅線則分別對應於 ROI ₁ 與 ROI ₂ 的灰階值變化。	68
圖 4-28 肉眼標記顆粒位置-砂石流動實驗.....	68
圖 4-29 砂石流動實驗肉眼判別速度.....	69
圖 4-30 砂石流動實驗分析速度比較；橫軸為時間，左縱軸為速度其單位分別以 cm/s 和 pixel/s 表示，右縱軸為灰階值，紅色叉號與黑色點分別為偵測速度及肉眼判別速度，藍線和紅線為 ROI ₁ 和 ROI ₂ 灰階值。	70
圖 5-1 愛玉子溪影像(2004 年 7 月 2 日).....	73
圖 5-2 案例一肉眼標示特定土石顆粒.....	73
圖 5-3 案例一原始灰階值及平移後的灰階值；(a)原始灰階值、(b)平移後灰階值	74
圖 5-4 案例一之平均灰階值與斜率與環境雜訊門檻值分析結果；(a)灰階值時間序列；(b)斜率時間序列。	74
圖 5-5 案例一分析速度比較；橫軸為時間，左縱軸為速度其單位以 pixel/s 表示，右縱軸為灰階值，紅色叉號與黑色點分別為本研究方法分析速度及肉眼判別速度，藍線和紅線為 ROI ₁ 和 ROI ₂ 灰階值。	75
圖 5-6 玉穗溪影像(2024 年 7 月 24 日)；ROI 大小為150 × 80pixel	77
圖 5-7 案例二肉眼標示前鋒位置(綠色實線).....	78
圖 5-8 案例二土石流前鋒座標.....	78

圖 5-9 案例二原始灰階值及平移後的灰階值；(a)原始灰階值、(b)平移後灰階值

.....79

圖 5-10 案例二之平均灰階值與斜率與環境雜訊門檻值分析結果；(a)灰階值時間

序列；(b)斜率時間序列。.....79

圖 5-11 案例二分析速度比較；橫軸為時間，左縱軸為速度其單位以 pixel/s 表

示，右縱軸為灰階值，紅色叉號與黑色點分別為本研究方法分析速度

及肉眼判別速度，藍線和紅線為 ROI_1 和 ROI_2 灰階值。藍線和紅線為

ROI_1 和 ROI_2 灰階值。.....80

表次



表 1-1 LSPIV 誤差來源.....	4
表 2-1 斜率和灰階值判別物體在 ROI 內移動狀況.....	20
表 2-2 不同人造影像偵測速度誤差比較.....	32
表 3-1 不同人造影像偵測速度誤差比較.....	45
表 4-1 保麗龍球流動實驗的相機參數.....	47
表 4-2 單顆保麗龍球實驗之速度誤差比較.....	53
表 4-3 各編號保麗龍球中心位移.....	58
表 4-4 各編號保麗龍球中心速度.....	58
表 4-5 各編號保麗龍球面積大小.....	58
表 4-6 多顆保麗龍球實驗之速度誤差比較.....	61
表 4-7 砂石流動實驗的相機參數.....	63
表 4-8 個顆粒位移(第 320 幀至 321 幀)-砂石流動實驗.....	68
表 4-9 個顆粒移動速度(第 320 幀至 321 幀)-砂石流動實驗.....	69
表 4-10 砂石流動實驗之速度誤差比較.....	70
表 5-1 案例一之速度誤差比較.....	75
表 5-2 案例二之速度誤差比較.....	80

Chapter1 緒論



1.1 研究背景及目的

台灣位於兩個板塊的交界上，東南方有菲律賓板塊，西北方則是歐亞板塊。兩個板塊相互碰撞擠壓使台灣形成特殊的地形風貌，在 3.6 萬平方公里土地的面積上，分布了 284 座海拔 3000 公尺以上的高山。近年來臺灣受極端氣候、颱風、短延時強降雨及地震等自然因素影響，且位處環太平洋地震帶上，導致山區經常發生土石流與邊坡崩塌等自然現象。

根據《水土保持手冊》(2017)[23]，「土石流是一種飽含泥、砂、礫及巨石等物質與水之混合物，以重力作用為主，水流作用為輔的一種高濃度且流動快速的兩相流(two-phase flow)」，其破壞力極強。土石流事件常夾帶大量土砂，其事件總土砂量可達數百萬立方公尺，且流速可達 5m/s，甚至高達 10m/s 以上(Arattano 和 Marchi, 2008)[1]。臺灣因地狹人稠，山區有各種人類活動與開發行為，當土石流發生時，往往對鄰近的基礎設施與居民安全構成嚴重威脅，甚至造成重大災害。因此，如何準確監測土石流的流動特性，並進行有效的預警與防範，已成為防災減災領域的重要課題。

台灣農業部農村發展及水土保持署從民國 91 年起陸續辦理土石流觀測站建置及相關科技的研發工作。在各處土石流潛勢溪流及其集水區範圍架設土石流觀測站。觀測站設有各種量測儀器和高效率傳輸系統，如鋼索檢知器、地聲檢知器、CCD 攝影機、雨量計、衛星天線、資料接收中心等設備，以便即時追蹤回報土石流發生及其動態資訊。雨量計常用於土石流事件的事前預警，藉由設定雨量參數(降雨強度，累積雨量或歷史雨量)警戒值來發布預警；鋼索檢知器、地聲檢知器、雷達或超聲波感測器等可用於土石流事件的監測，甚至可藉由設置兩台相隔距離的感測器，由監測土石流的時間差估算流速；攝影機影像除了由原先為觀測視覺化土石流資訊，逐漸發展出由影像處理的演算法來計算流深、流速、流量和粒徑大小等土石

流相關參數(Marchi 等人, 2001 ; Itakura 等人, 2005; Arattano 和 Marchi, 2008)[13][7][1]。

隨著感光元件、數位儲存裝置及資料傳輸技術的發展，影像分析技術在環境監測與災害防治領域的應用日益廣泛。影像監測透過遠距攝影機擷取高解析度影像，結合數位影像處理與數據分析，已成為土石流監測與分析的重要工具。本研究嘗試以影像處理做為土石流表面流速的分析方法，並建立一個低計算量的流程來達到即時速度分析的系統。

1.2 文獻回顧

藉由影像為基礎來分析河川流速的方法至經以發展許久。早期常用兩種方法應用於試驗水槽及水工模型試驗中，用以觀察流況變化、量測表面流速及三維水理。分別為質點影像測速法(Particle image velocimetry, PIV)與影像質點追蹤法(Particle tracking velocimetry, PTV)的方法。PIV 是分析群體顆粒(區域)的運動情況，而 PTV 則是追蹤單一顆粒的運動情況。

1994 年起由日本神戶大學(Kobe University)、美國愛荷華大學(The University of Iowa)的 IIHR-Hydroscience and Engineering 和法國格勒諾布爾理工學院(Institute National Polytechnique Grenoble)三個研究單位對 PIV 進行多項研究。基於 PIV 的概念，發展出應用於現場河川之監測的大尺度質點影像測速法(Large-scale particle image velocimetry, LSPIV)。Fujita 等人(1998)[2]應用 LSPIV 量測河川表面流速，建立了 PIV 在水文應用的方法基礎。其方法主要為藉由兩幀連續的影像，由第一幀影像畫設一個分析區域(Interrogation Area, IA)並在第二幀影像中的搜尋區域(Search Area, SA)進行互相關分析(Cross-Correlation)，以最大互相關的位置當作 IA 的位移，由位移除以兩幀的相隔時間即可求得速度，影像中每個 IA 都計算後即可得到一個瞬時的二維速度場，如圖 1-1 所示。Hu 等人(1998)[6]建議 IA 大小至少要是為預期最大位移的 2 倍；Raffel 等人(2018)[16]建議 SA 大小要是為預期最大位移的 3 倍以上。

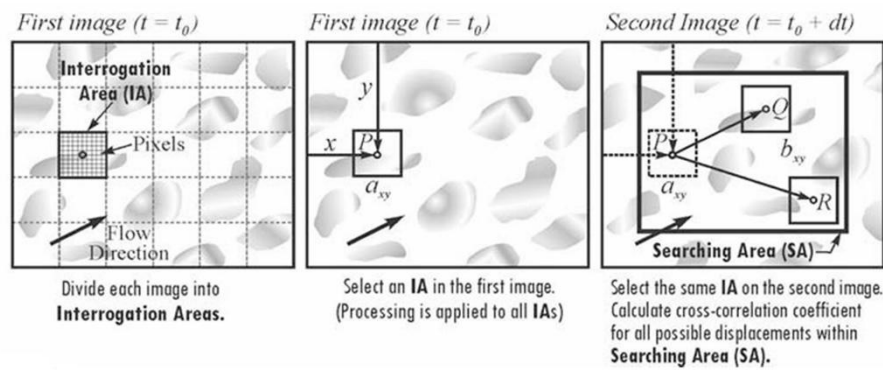


圖 1-1 LSPIV 影像處理演算法示意圖

引自 Muste、Fujitac 和 Hauet, 2008[14]

Muste、Fujita 及 Hauet(2008)[14]回顧了 2008 年以前 LSPIV 在水文及水力方面的研究及其未來可以發展的空間，以都卜勒流剖儀(ADCP)所測量之流速與 LSPIV 方法比較，其平均誤差 $<10\%$ ，最大誤差 35% ；以流量站水位流量律定曲線(rating curve)測量之流量與 LSPIV 方法比較，其誤差在 3.5% 至 5.6% 之間。Coz 等人(2010)[12]應用 LSPIV 方法於法國東南部河川計算其洪水流速與流量，其事件流量以水文站水位流量律定曲線量測為 300 至 $2500\text{m}^3/\text{s}$ ，平均流速以 ADCP 量測為 1m/s 至 2.9m/s ，在較低流量($Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$)狀況下與 LPIV 方法比較流速誤差為 $\pm 10\%$ ，流量誤差 $<20\%$ ；而在影像條件較差及流況較不穩定的情況下，誤差達到 30% 至 80% 。由於網路社群媒體的普及，在發生洪水等災害時，許多人會拍攝影片並上傳網路媒體(如 Youtube 等)，提供了許多災害資訊，這些影片也可以提供我們事件後的分析，幫助了解洪水等災害過程。Boursicaud 等人(2016)[11]分析了 YouTube 上他人拍攝之洪水影片，並對晃動與解析度的影響進行分析，有晃動與無晃動影像速度誤差 $<2\%$ ，而將晃動影像進行對齊後其速度誤差 $<0.4\%$ ；低解析度影像(320p 和 240p)與高解析度 1080p 相比，速度誤差 $<5\%$ 。Kim(2006)[8]找出了 27 個由 LSPIV 計算流速所產生誤差的因子如表 1-1 所示，分別由六個部分所組成:光照、追蹤粒子、資料紀錄、座標轉換、計算處理和後處理過程，並以水槽實驗進行各誤差因子不確定性分析。

表 1-1 LSPIV 誤差來源

引自 Kim(2006)[8]



Uncertainty	
Code	Estimated error (Components*)
Illumination	
Ui11	Global illumination (B, P, G)
Ui12	Local illumination non-uniformity (P, L)
Seeding	
Us1	Grouping (B, L)
Us2	Tracing (e.g., wind) (B, P, L)
Recording	
Ur1	Image resolution (B, G)
Ur2	Time interval between images (B, P, G)
Ur3	Sampling time (B, P, G)
Ur4	Camera movement (B, P, G)
Transformation	
Ut1	Distance (B, P, G)
Ut2	Marker point identification (P, G)
Ut3	Brightness allocation (B, P, L)
Ut4	Camera positioning and orientation (B, N/A)
Ut5	Magnification (B, N/A)
Processing	
Up1	Peak finding (B, P, G)
Up2	Background noise (P, G)
Up3	Velocity gradient error (P, L)
Up4	Interrogation area (P, G)
Up5	Searching area (P, N/A)
Up6	Windows offset (P, N/A)
Up7	Out of plane motion (P, N/A)
Up8	Image displacement (P, G)
Up9	Image quantization (P, G)
Up10	Seeding density (B, P, G)
Up11	Seed size (B, P, G)
Up12	Seed brightness & contrast (B, P, G)
Post-Processing	
Mpp1	Velocity filtering (P)
Wpp2	Minimum correlation coeff. (P)
*B= bias error, P = precision error G= Global errors, constant over image L= Local errors, varies from a grid point to other over image. N/A= Not active error for present configuration	

Fujita 等人(2007)[3]提出了有別於 LSPIV 計算流速的方法，稱之為空間-時間影像測速法(Space-time image velocimetry, STIV)，其方法為在與主流平行的方向上選取一條搜尋線，此搜尋線隨時間的變化在 y 軸方向上排列，形成一個空間-時間影像(Space-time image, STI)。X 軸單位為距離，Y 軸單位為時間，藉由計算區域內較明顯之斜率(θ)，即為此區域內短時間內的平均速度，如圖 1-2 所示。由水槽和現地影像與 LSPIV 方法比較，其計算出的速度與 LSPIV 相吻合，且計算速度比 LSPIV 快 10 倍。

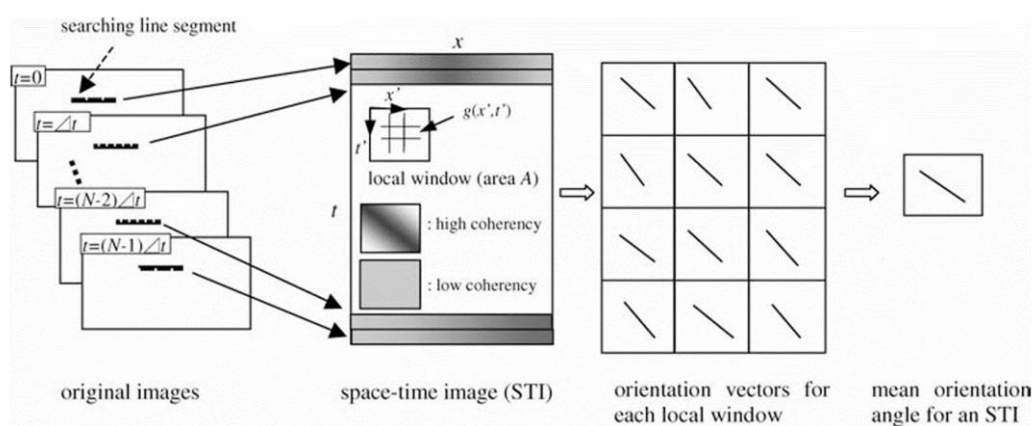


圖 1-2 STIV 影像處理演算法示意圖

引自 Fujita 等人(2007)[3]

速度為位移除以時間，LSPIV 計算速度方式是由已知兩幀影像的時間，並藉由互相關分析空間上的位移。Jacquemart(2017)[8]利用 LSPIV 想法，應用於兩台雷射剖面儀來計算瑞士阿爾卑斯山附近的土石流事件，其速度計算方式為由已知兩雷射剖面儀的距離，藉由互相關分析時間上的延遲。由地聲與雷達偵測比較，速度誤差在 4.1%至 41.5%之間。Theule(2018)[18]首次將 LSPIV 應用於現場土石流事件(義大利阿爾卑斯山)中，選取了某特定斷面由 LSPIV 計算平均流速。與人眼辨別特徵物比較，誤差約為 28%；與雷達感測器比較，誤差約為 16%。

近年來人工智慧(AI)、機器學習(Machine Learning)和深度學習(Deep Learning)的快速發展，在影像識別上有許多研究及發展出不同類型的模型。Kim 等人(2022)[10]將深度學習引入 STIV 演算法中，使模型學習不同雜訊(陰影、光反射、



震動和白噪音)產生的 STI 影像，使計算有雜訊或較差品質影像的速度時能更為準確。在室內渠道(長 500cm、寬 10cm、高 10cm)土石流實驗，由人眼辨識與模型計算比較，速度誤差介於 4.4%至 10%之間。Pham 和 Kim(2022)[15]建立一個基於 You Only Look Once(YOLO)演算法的卷積神經網路(Convolutional Neural Network, CNN)模型，以四個現場土石流事件、五個小型渠道實驗(長 0.4m、寬 0.15m、高 0.4m)和 3 個大型渠道實驗(長 96m、寬 2m、高 1.2m)影片，共 5950 幀影像訓練模型識別土石流前鋒。由小型與大型渠道試驗測試，模型偵測的速度與人眼辨識前鋒誤差為 2.7%至 12.9%。在 CPU: Intel Core i5 9600K@3.7GHz、記憶體:64GB RAM 和 GPU: NVIDIA GeForce RTX2060 SUPER(8G)作業系統下，每秒可處理計算 16 幀 3840×2160 的影像或 39 幀 1920×1080 的影像。

本研究以攝影機影像資料並藉由影像處理分析做為即時分析土石流表面流速的方法，採用影像的灰階值來做為研究方向。郭亭妤(2020)[21]以影像灰階值偵測土石流前鋒的時間差計算流速，求得前鋒進入 ROI 後的一個速度。結合其想法與改進，本研究利用影像中所選取的兩個感興趣區域 (Region of Interest, ROI) 內的灰階值變化來估算流速。透過分析兩個 ROI 在連續影像中灰階值變化的時間序列，並以均方根誤差 (Root-Mean-Square Deviation, RMSD) 評估其變化趨勢的相似性，作為延遲時間分析的方法，進而估算土石流表面隨時間變化之流速。

1.3 論文架構

本論文分為六章節，分別為緒論、研究方法、數值實驗、室內水槽實驗、現地影像分析和結論與建議。「緒論」說明研究背景與動機。「研究方法」介紹影像分析流程，包括影像平均灰階值及斜率計算、環境雜訊門檻值計算、延遲時間分析與速度計算方法。「數值實驗」透過模擬影像進行數值測試，分析不同條件下（物體大小、移動速度、背景雜訊等）的影響。「室內水槽實驗」於可控環境下設計水槽實驗，使用保麗龍球與砂石模擬土石流的流動行為。「現地影像分析」選取實際土石流事件（如 2004 年敏督利颱風與 2024 年凱米颱風案例）進行影像數據分析。「結

論與建議」總結研究成果，討論本研究影像分析方法在土石流表面流速監測上的可行性與準確性。



Chapter2 研究方法



2.1 基本定義

2.1.1 數位影像

數位影像(Digital Image)是以數字形式所表示的視覺資訊，由一系列具有有限大小與位置的像素(pixel)所組成。數位影像通常以矩陣形式呈現，其中每個像素包含了紅(Red)、綠(Green)、藍(Blue)三個色彩通道(channel)的亮度資訊。各通道的亮度值範圍通常介於 0 至 255 之間，分別對應從最暗到最亮的亮度變化。如圖 2-1 所示，數位影像的座標系統一般以影像左上角作為原點，向下為 X 軸方向，向右為 Y 軸方向。

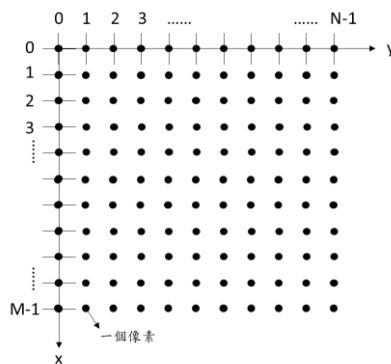


圖 2-1 數位影像示意圖

2.1.2 解析度

解析度是描述數位影像品質與資訊密度的重要指標，依其特性區分為影像解析度 (Image Resolution)、時間解析度 (Temporal Resolution) 與空間解析度 (Spatial Resolution) 三種。

影像解析度 (Image Resolution) 係用以描述數位影像中所包含像素的總數，通常以「水平像素×垂直像素」的形式表示，例如解析度為 1920×1080 的影像是由 1920 個水平像素和 1080 個垂直像素所組成。影像解析度反映影像所能呈現的細節數量，解析度越高，單位面積內所包含的像素越多，影像所能表現的視覺細節也越豐富。

時間解析度 (Temporal Resolution) 則係指影像資料於時間維度上的取樣頻率，即單位時間內擷取影像的次數，常以「影格率 (Frame Rate)」表示。在影片或連續影像分析中，時間解析度通常以每秒影格數 (frames per second, fps) 表示。例如，30 fps 表示每秒擷取 30 張影像。高時間解析度代表較短的取樣間隔，可更細緻地捕捉目標隨時間變化的動態過程，提升事件偵測與運動追蹤之準確性。然而，較高的時間解析度也伴隨資料量與運算負擔的增加，實務應用上需依分析目的與系統效能權衡取捨。

空間解析度 (Spatial Resolution) 則用以描述影像中每一像素對應於實際地面上的範圍大小，常以公尺/像素 (m/pixel) 或公分/像素 (cm/pixel) 表示。舉例而言，空間解析度為 10 cm/pixel 時，代表影像中每一個像素涵蓋地面上 10 公分×10 公分的區域。空間解析度越小，代表感測器能捕捉的空間細節越精細，有助於辨識微小地物。在應用於地表觀測或流場分析時，空間解析度為影響空間精度與計算準確度的重要因素。

2.1.3 灰階化

土石流是由水、大量泥沙、石塊和巨礫所組成的流動體，其本身並沒有特定的顏色，通常呈現灰階色彩，因此無法依賴特定顏色來做為判別土石流的標準。將彩色影像轉換為灰階影像，可以僅保留亮度資訊，簡化紅、綠、藍(RGB)三個顏色通道的數據處理，進而減少計算量，便利於後續的影像分析。

本研究使用國際電信聯盟(International Telecommunication Union, ITU)所訂定之公式將彩色影像轉換至灰階影像，該公式考慮了 RGB 三個顏色通道對人眼感知亮度的不同影響，並採用不同的加權係數進行轉換，計算方式如式(2-1)所示。圖 2-2(a)為 2004 年 7 月 2 號愛玉子溪上游現場監測攝影機彩色影像，圖 2-2(c)、(d)、(e)分別為紅、綠、藍三個顏色通道的影像，圖 2-2(b)為以式(2-1)計算之灰階影像。

$$f(x, y) = 0.299 \times R(x, y) + 0.587 \times G(x, y) + 0.114 \times B(x, y) \quad (2-1)$$

其中 x 和 y 為影像的二維座標， f ， R ， G 和 B 分別為影像座標 (x, y) 的灰階值、紅色、綠色及藍色的亮度值，其值皆介於 0-255 之間其對應的亮度由暗至亮。

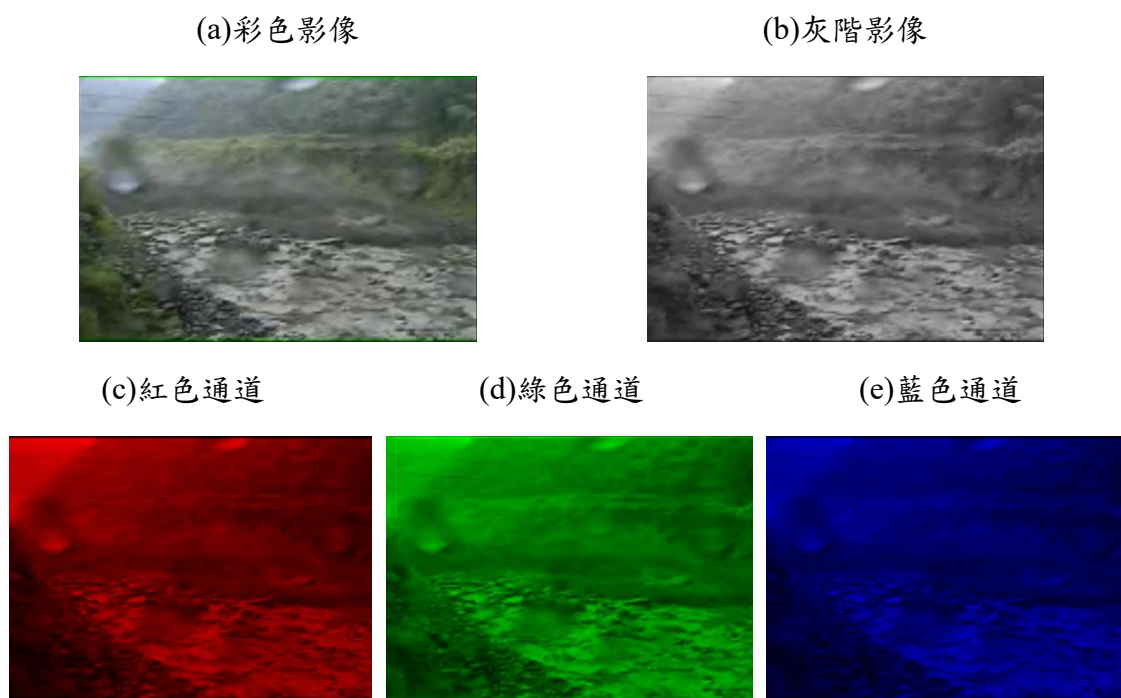


圖 2-2 現地土石流彩色、灰階、紅、藍和綠影像

2.1.4 感興趣區域

感興趣區域 (Region of Interest, ROI) 係指在影像中選取某特定區域，供後續進行分析與處理的範圍。在本研究之影像分析流程中，我們主要關注影像中的河道區域，並透過選取 ROI 的方式，有效排除影像中如雜草、樹叢及天空等非河道區域。此作法使得分析僅需針對 ROI 內之像素進行處理，除能降低整體計算量外，亦可避免因雜草與樹叢之擺動或天空亮度變化所造成的干擾，提升分析結果之準確性與穩定性。

實務上，ROI 之資訊擷取通常透過影像遮罩 (mask) 方式實現。遮罩為一與原始影像尺寸相同之二值影像，其中像素值為 1 (或 255) 者代表屬於 ROI 的區域，將進行後續分析處理；像素值為 0 者則表示背景區域，於分析中予以排除。

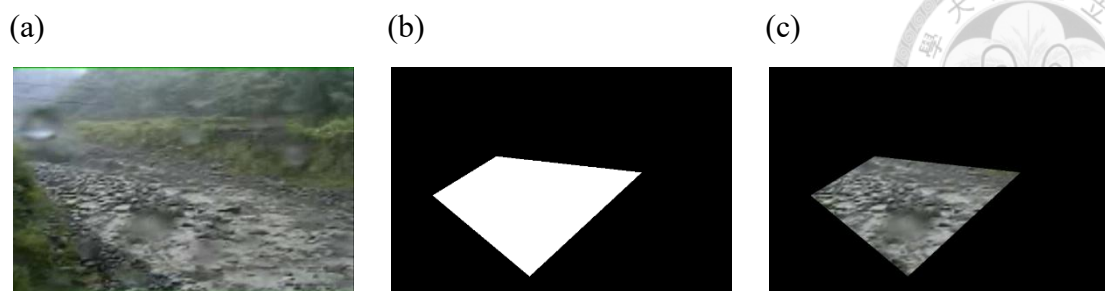


圖 2-3 影像 ROI 之資訊擷取(a)原始影像；(b)影像遮罩；(c)選取 ROI 範圍後影像

2.2 方法概述

2.2.1 分析概念與研究假設

為分析土石流表面流速，本研究於同一時間點所拍攝之影像中，選取兩個大小相同且相距為 L 的感興趣區域(ROI)，如圖 2-4(a)所示。其中定義藍色區域為 ROI_1 ，紅色區域為 ROI_2 ，兩者之間的距離為已知 L ，土石流主要流向由 ROI_1 向 ROI_2 移動。

針對每一幀影像，分別計算 ROI_1 與 ROI_2 區域內所有像素之灰階值總和，並除以該區域像素數量，以取得該區域之平均灰階值 (Average Gray Level)，並以「平均灰階值」作為該區域之影像特徵。此方法意指將 ROI 區域內所有土石流顆粒視為一個整體，透過整體亮度變化來反映區域性顆粒流動的集體行為。

如圖 2-4(b)所示，將連續影像中所擷取之 ROI 平均灰階值建立為兩組時間序列，分別對應於 ROI_1 與 ROI_2 。進一步分析兩組時間序列之間的延遲時間 (Time Delay, ΔT)，並以公式 $V = L/\Delta T$ 來估算土石流表面流速。

本研究於進行土石流表面流速之時間延遲分析前，針對影像中之 ROI 選取與灰階變化特性，建立以下研究假設：

1. 假設於分析時段內，土石流流況相對穩定，從 ROI_1 流動至 ROI_2 之短時間內無顯著劇烈變化，所分析之時間延遲主要由流體運動造成。
2. 假設 ROI 區域內像素之平均灰階值可作為反映土石流的特徵。

3. 假設同一流動事件於經過 ROI_1 與 ROI_2 時，所造成之灰階變化趨勢具一致性，且可藉由時間延遲方式建立對應關係。
4. 假設 ROI_1 與 ROI_2 間具有高重疊率，背景環境一致，因此灰階變化主要由土石流進入 ROI 區域所造成。

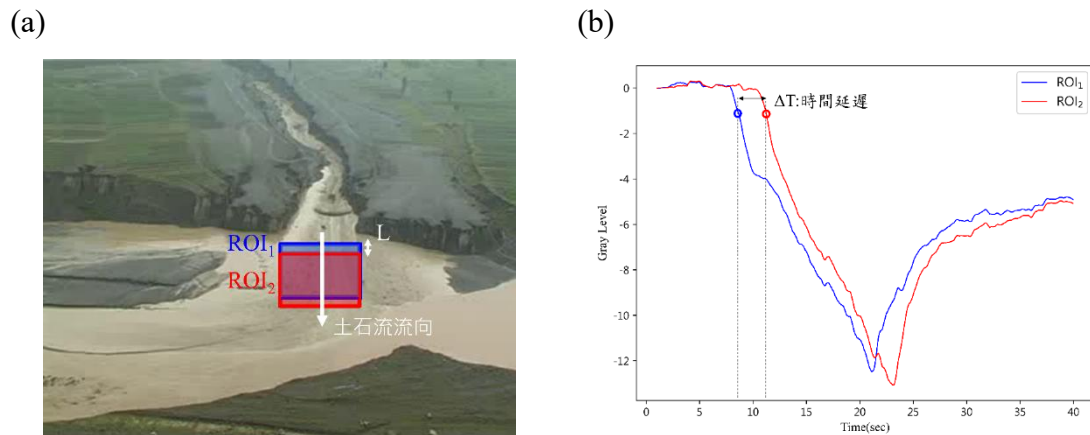


圖 2-4 影像中 ROI 範圍及平均灰階值(a)ROI 選取範圍(b)平均灰階值隨時間的變化

2.2.2 灰階變化特性觀察

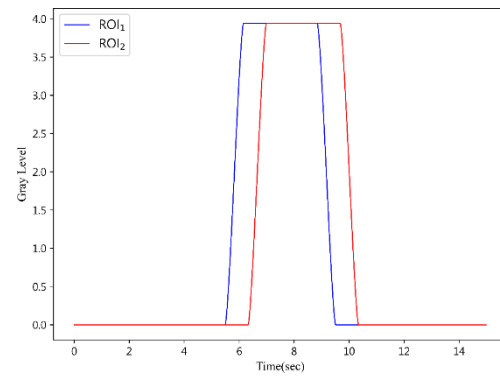
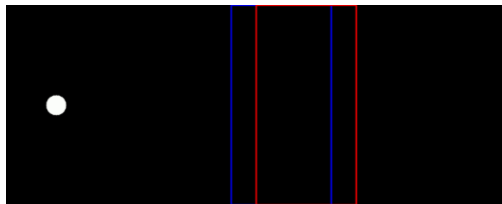
為驗證本方法在不同條件與情境下之適用性，本研究進一步觀察各事件案例中 ROI_1 與 ROI_2 平均灰階值隨時間變化之對應關係，如圖 2-5 所示。其中， ROI_1 位於上游， ROI_2 位於下游。圖中以藍色實線表示 ROI_1 ，紅色實線則表示 ROI_2 。圖 2-5(a)至圖 2-5(f)分別對應以下六種情境:解析圓球影片、單顆保麗龍球水槽實驗、多顆保麗龍球水槽實驗、2004 年 7 月 2 號敏督利颱風愛玉子溪上游、2024 年 7 月凱米颱風玉穗溪上游和中國泥石流事件。

圖 2-5(a)、(b)、(c)為白色物體通過 ROI 之實驗影像，觀察其平均灰階值時間序列可發現，在物體進入 ROI 後，平均灰階值出現明顯上升趨勢，顯示該區域整體亮度隨時間增加。此現象是因所流動之物體表面亮度高於背景，進而提高 ROI 內部之整體灰階值。相較於圖 2-5(d)、(e)、(f)為實際土石流影像，其平均灰階值於土石流進入 ROI 後反呈現下降趨勢。此一亮度降低的現象，與土石流主要成分有

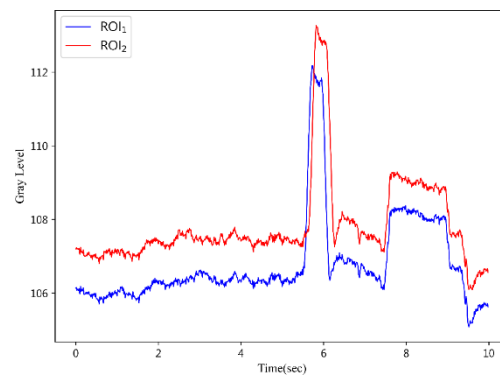
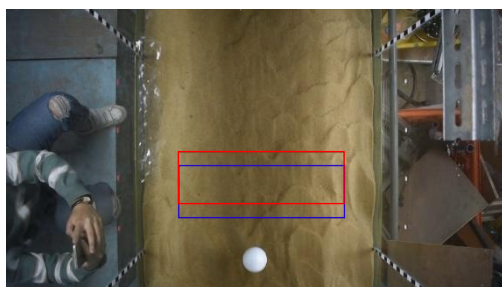
關，包含水體、泥砂、石塊與巨礫等亮度偏低之物質，導致 ROI 內整體影像灰階值降低。



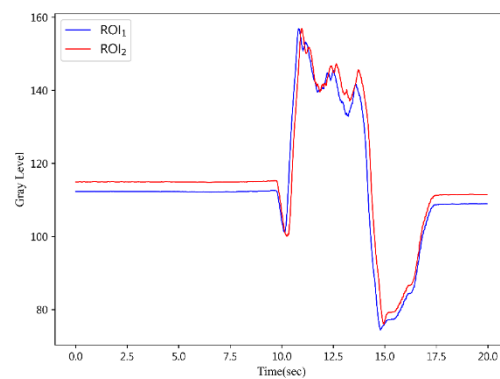
(a) 解析圓球影片



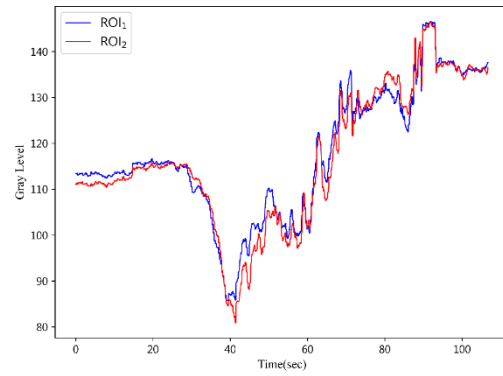
(b) 單顆保麗龍球水槽實驗



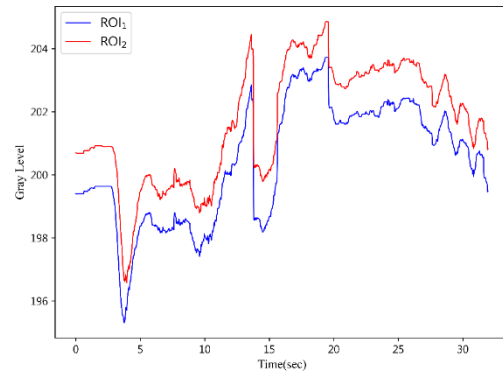
(c) 多顆保麗龍球水槽實驗



(d) 愛玉子溪上游



(e) 玉穗溪上游



(f) 中國泥石流

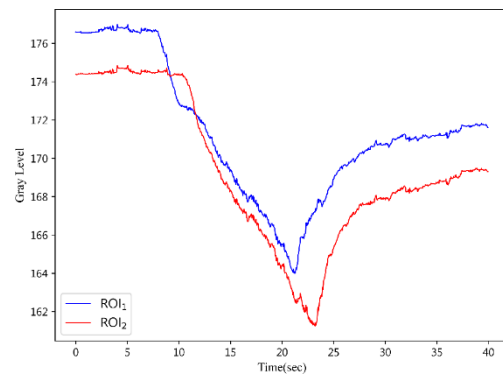


圖 2-5 在不同情況下 ROI₁ 和 ROI₂ 平均灰階值隨時間的變化圖

由圖 2-5 中不同案例下的 ROI_1 和 ROI_2 平均灰階值時間序列可歸納以下特徵：

1. 延遲時間現象明顯：

將 ROI_1 的平均灰階值時間序列平移 ΔT 後，與 ROI_2 的時間序列呈現出相似性，反映事件自上游向下游傳遞的時間差。

2. 背景條件差異顯著：

於事件尚未發生前，即可觀察到 ROI_1 和 ROI_2 之初始平均灰階值存在差異，顯示兩者背景亮度不同，須進行修正以提升延遲時間分析的準確性。

2.2.3 分析考量

綜合不同情境之平均灰階值變化觀察，為提升延遲時間分析之準確性，本研究設計以下兩項調整機制：

1. **環境雜訊濾除：**在土石流進入 ROI 之前，影像的灰階值可能會因環境因素(如光照變化、天氣影響等)而產生微幅變動，其變化幅度通常低於土石流本身所引起的變化。為避免環境雜訊干擾延遲時間分析，本研究設計門檻值機制，過濾此類非事件造成的微幅變化。
2. **背景差異調整：**由於兩個 ROI 的背景因環境條件差異，可能存在顯著灰階差異。因此，需進行背景修正，以確保分析平均灰階值時間序列上延遲時間的準確性。

後續小節將依研究流程依序介紹影像平均灰階值與斜率計算，環境雜訊門檻值計算，延遲時間(ΔT)分析及數據後處理與延遲時間轉換為流速。

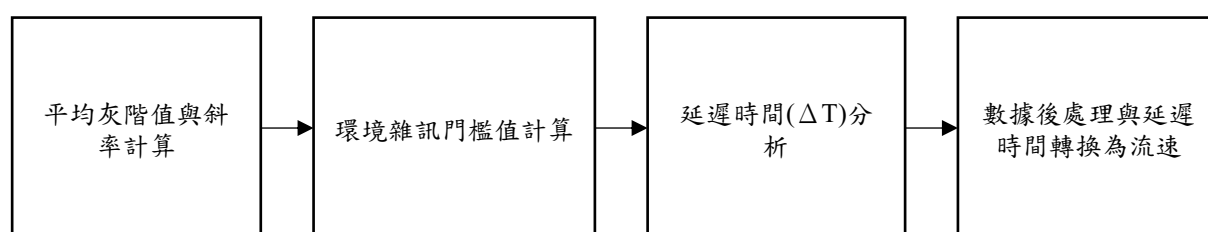


圖 2-6 研究方法概念流程圖



2.3 平均灰階值與斜率計算

2.3.1 平均灰階值計算

將彩色影像轉換成灰階影像後，加總 ROI 內每個像素的灰階值，除以 ROI 內總像素量可得平均灰階值，平均灰階值由式(2-2)計算。在後續章節中，為了簡化表述並避免重複說明，若未特別註明，「灰階值」均指 ROI 內影像的「平均灰階值」。

$$\bar{f}(t) = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x, y, t)}{MN} \quad (2-2)$$

其中 t 為時間， x 和 y 為影像的二維座標， $\bar{f}(t)$ 為第 t 秒時的平均灰階值， M 為 ROI 內 x 座標方向的像素量， N 為 ROI 內 y 座標方向的像素量。

以 2004 年 7 月 2 號發生於南投縣神木村愛玉子溪的土石流事件影片為例，ROI 範圍為圖 2-7(a)紅色框線，將影像灰階化後以式(2-2)計算平均灰階值，圖 2-7(b)為該場事件平均灰階值隨時間的變化圖。

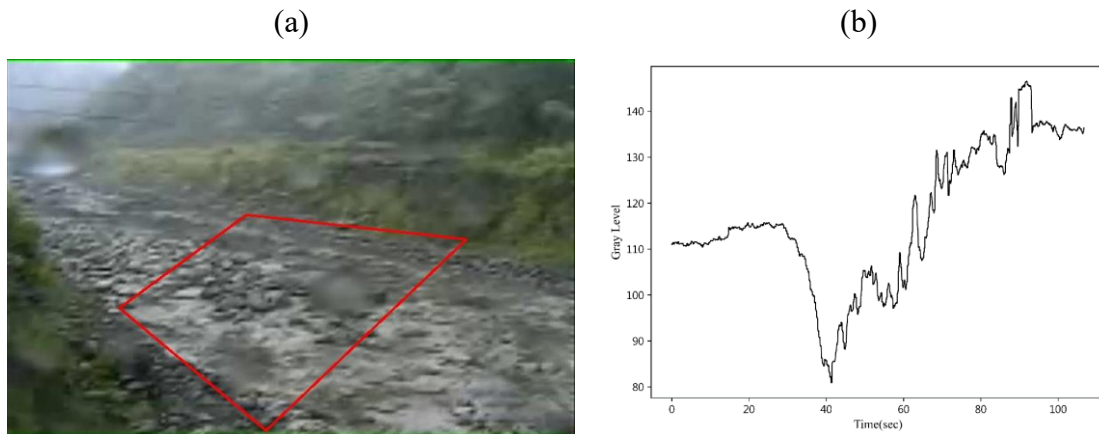


圖 2-7 2004 年 7 月 2 愛玉子溪土石流影像平均灰階值隨時間的變化圖

2.3.2 時間序列平滑處理

由圖 2-7(b)平均灰階值隨時間的變化圖可以觀察到，該訊號中存在微小且快速上下波動的短期變化。為了消除此類短期波動並突顯出平均灰階值隨時間變化的長期趨勢，採用中央移動平均法對此時間序列資料進行平滑處理。

在一個時間序列影像資料中，以第 n 幀資料為起點，以此筆資料前後相同幀數的資料組成一個資料集合，並將此資料集合的平均值作為第 n 幀資料的新值。隨後依次更新其資料集合，計算每下一幀資料的新值，由公式(2-3)計算。

$$\bar{f}(t) = \frac{1}{m} \left[\sum_{i=-(m-1)/2}^{(m-1)/2} \bar{f}(t-i\Delta t) \right] \quad (2-3)$$

其中 $\bar{f}(t)$ 為資料平滑化後的平均灰階值， $\bar{f}(t)$ 為第 t 秒時的平均灰階值， Δt 為每兩幀影像之間的時間間格， m 為資料筆數(每 m 幀影像平均一次)。

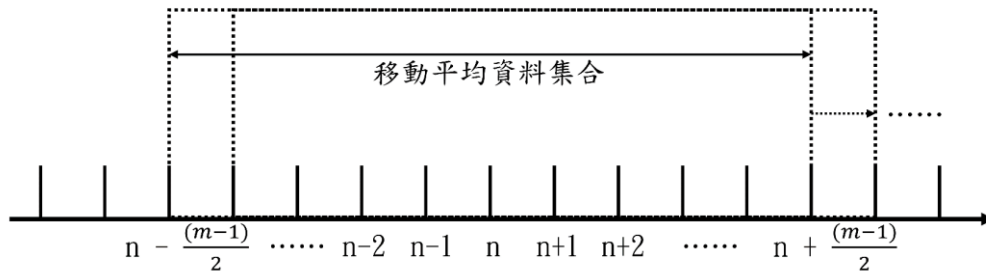


圖 2-8 資料平均示意圖

2.3.3 斜率計算

由於土石流流況變化劇烈，僅以平均灰階值作為 ROI 之空間特徵仍不足以全面描述其隨時間的變化特性。因此，本研究除以平均灰階值反映 ROI 在空間上的集體亮度特徵外，亦引入一項時間變化特徵。利用二階中央差分法計算平均灰階值隨時間變化的速率，並將該變化率視為該區域之時間梯度，即「平均灰階值隨時間變化的斜率」，其公式如式(2-4)所示。

$$S(t) = \frac{-1\bar{f}(t-\Delta t) + 1\bar{f}(t+\Delta t)}{2\Delta t} \quad (2-4)$$

其中 $S(t)$ 為第 t 秒時的斜率，單位為灰階值/秒， $\bar{f}(t)$ 為資料平滑化後的平均灰階值， Δt 為每兩幀影像之間的時間間格。



2.3.4 平均灰階值與斜率計算流程

當程式收到第 k 幀影像訊號後，將擷取 ROI 範圍內的紅、綠、藍三個通道的影像資訊，利用式(2-1)將彩色影像轉換成灰階值。以式(2-2)分別計算 ROI_1 和 ROI_2 平均灰階值。為降低影像中短期波動對分析結果之影響，進一步利用式(2-3)將時間序列資料進行平滑處理，以每 11 筆資料為一組計算其平均值，並以該平均值作為更新後之平均灰階值。最後透過式(2-4)計算平滑後時間序列中平均灰階值的斜率。本研究以「平均灰階值」及其「斜率」作為代表 ROI 區域影像變化的主要特徵指標，作為後續環境雜訊門檻值計算與延遲時間分析之依據。

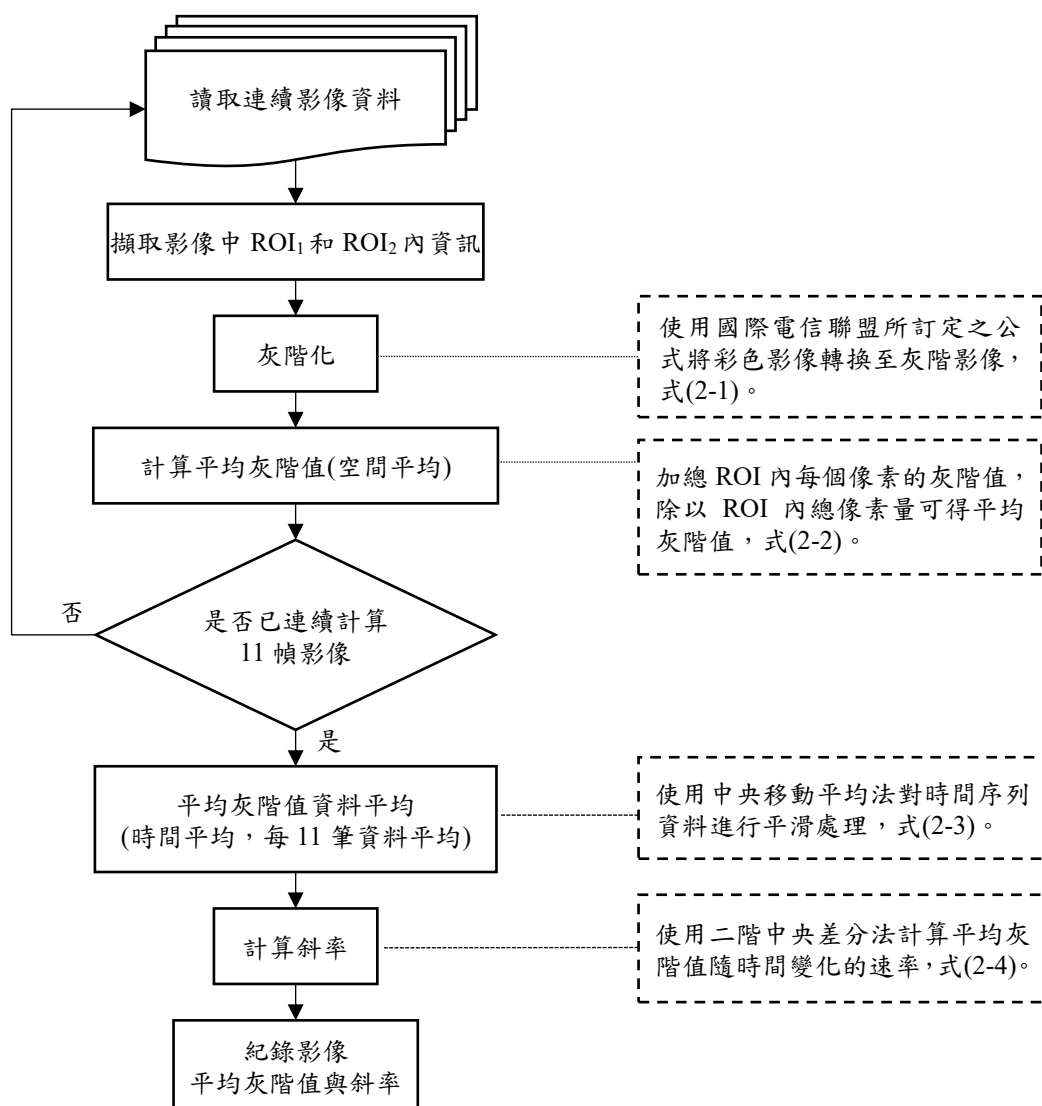


圖 2-9 流程圖-平均灰階值與斜率計算



2.4 環境雜訊門檻值計算

於自製解析影片中，研究者可依需求調整背景之灰階值，例如設定為固定值，或人工加入特定類型之雜訊，以模擬不同環境條件。在室內水槽實驗中，由於光源與環境因素可控，背景灰階值相對穩定，有利於目標物體之辨識與追蹤。然而，於野外所拍攝之影像，背景灰階值常因外部環境變化（如光照強度改變、天氣變化等）而產生不規則波動。

本研究將此類非目標事件所導致的灰階值變化統一視為環境雜訊或背景雜訊。為有效濾除此類背景變動所造成之干擾，本文採用斜率門檻值作為過濾機制，排除非事件造成之微幅變化。此外，結合斜率與灰階值之門檻判斷方式，用以偵測物體的進入、停留與離開感興趣區域（ROI）等運動行為。

2.4.1 斜率門檻值計算

當有物體進入或離開 ROI 時，其影像斜率相較於環境背景的斜率將顯著增加。因此，本研究以斜率因子作為判斷依據，用以識別物體是否進入或離開 ROI。當瞬時斜率 $s(t)$ 在環境背景斜率的平均值加減五倍標準差範圍外時，即判定為有物體進出 ROI。

由於野外環境中背景雜訊會隨時間變化，固定門檻值難以適應動態變化，故本研究採用浮動式門檻值（floating threshold）進行動態調整。浮動式門檻值的計算為在每一時間點 t ，以向前回溯 Δt 之時間窗口（即過去一段時間內的斜率資料）作為樣本，計算該區段內斜率的平均值 $\mu_s(t)$ 與標準差 $\sigma_s(t)$ ，再以式(2-5)計算門檻值。當時間 t 對應之斜率 $s(t)$ 超過此動態門檻值 $s_t(t)$ ，即判斷為有物體進入或離開 ROI。

$$s_t(t) = \mu_s(t) \pm 5\sigma_s(t) \quad (2-5)$$

2.4.2 灰階值門檻值計算

當物體進入 ROI 後，其所對應之灰階值會因遮蔽背景而產生持續變化，導致斜率明顯改變。然而，當物體完全進入並穩定移動於 ROI 內部時，其灰階值變化

趨於平緩，斜率的變化也隨之變小。根據此現象，本研究進一步以灰階值為判斷依據，搭配浮動式門檻值，用以辨識物體是否位於 ROI 之中。在每一時間點 t ，以往前回溯 Δt 之時間窗口內的灰階值資料，計算其平均值 $\mu_g(t)$ 與標準差 $\sigma_g(t)$ ，並以式(2-6)設定門檻值。當時間 t 對應之灰階值 $g(t)$ 在此門檻值範圍外時，即判定為有物體存在於 ROI 內。

$$g_t(t) = \mu_g(t) \pm 5\sigma_g(t) \quad (2-6)$$

2.4.3 物體運動情形判別

藉由斜率與灰階值門檻值之雙重判斷機制，可辨識物體於 ROI 區域內的運動情形。表 2-1 詳列了各類運動狀態之判別條件與對應結果。圖 2-10 則顯示物體於 ROI 內移動過程中，其灰階值與斜率變化之對應關係，藍色實線表示灰階值，藍色虛線表示灰階值門檻值，紅色實線表示斜率，紅色虛線表示斜率門檻值。

- 區域 A：平均灰階值與斜率超出門檻範圍，表示有物體正在進入或離開 ROI，導致亮度快速變化。
- 區域 B：斜率位於門檻範圍內，惟平均灰階值高於門檻值，顯示有物體穩定存在於 ROI 中並持續移動，可能為等速或加速狀態。
- 區域 C：斜率與平均灰階值皆低於門檻值，代表該時刻內 ROI 中未有顯著物體進入，亦無亮度變化，判斷為無物體通過。

表 2-1 斜率和灰階值判別物體在 ROI 內移動狀況

	斜率於門檻值外	斜率於門檻值內
灰階值於門檻值外	物體進入或離開 ROI *圖 2-10 的 A 區	物體在 ROI 內移動(等速或加速) *圖 2-10 的 B 區
灰階值於門檻值內		物體在 ROI 外 *圖 2-10 的 C 區

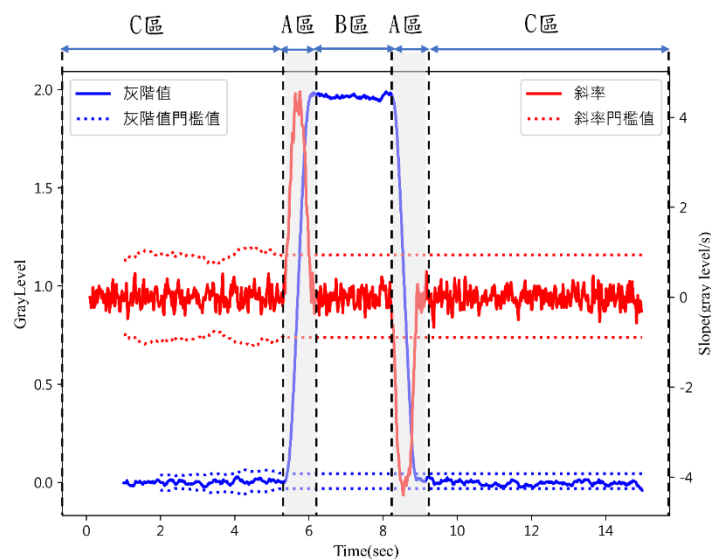


圖 2-10 物體在 ROI 內移動的情況灰階值和斜率相對應的位置示意圖

2.4.4 門檻值計算流程

由 2.3.4 節流程計算出影像平均灰階值與斜率，並由浮動式門檻值計算方式，以往前 2 時間內的平均灰階值與斜率資料作為樣本計算該區段內平均灰階值與斜率的平均值 $\mu(t)$ 與標準差 $\sigma(t)$ ，以其平均值加減五倍標準差範圍作為環境雜訊門檻值。當平均灰階值與斜率超出門檻值範圍，此時表示有大於環境雜訊之事件進入 ROI，門檻值固定不再持續更新。

為進行連續事件的分析，本研究設定一項條件，用以判定事件是否已結束，當門檻值固定（即不再更新）之後，若連續 m 幀影像中，其平均灰階值與斜率皆未超出固定門檻值範圍，則可判定該事件已結束。此時，將重新開啟門檻值之動態更新機制，以利分析後續可能發生的新事件。

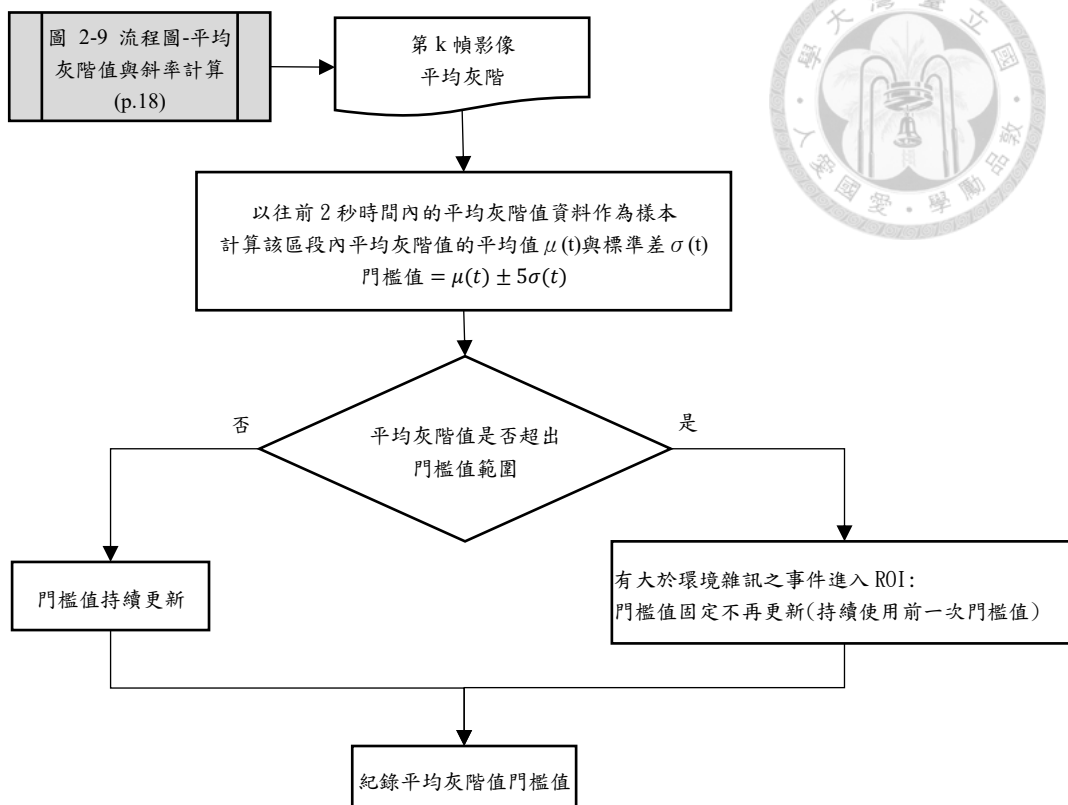


圖 2-11 流程圖-平均灰階值門檻值計算

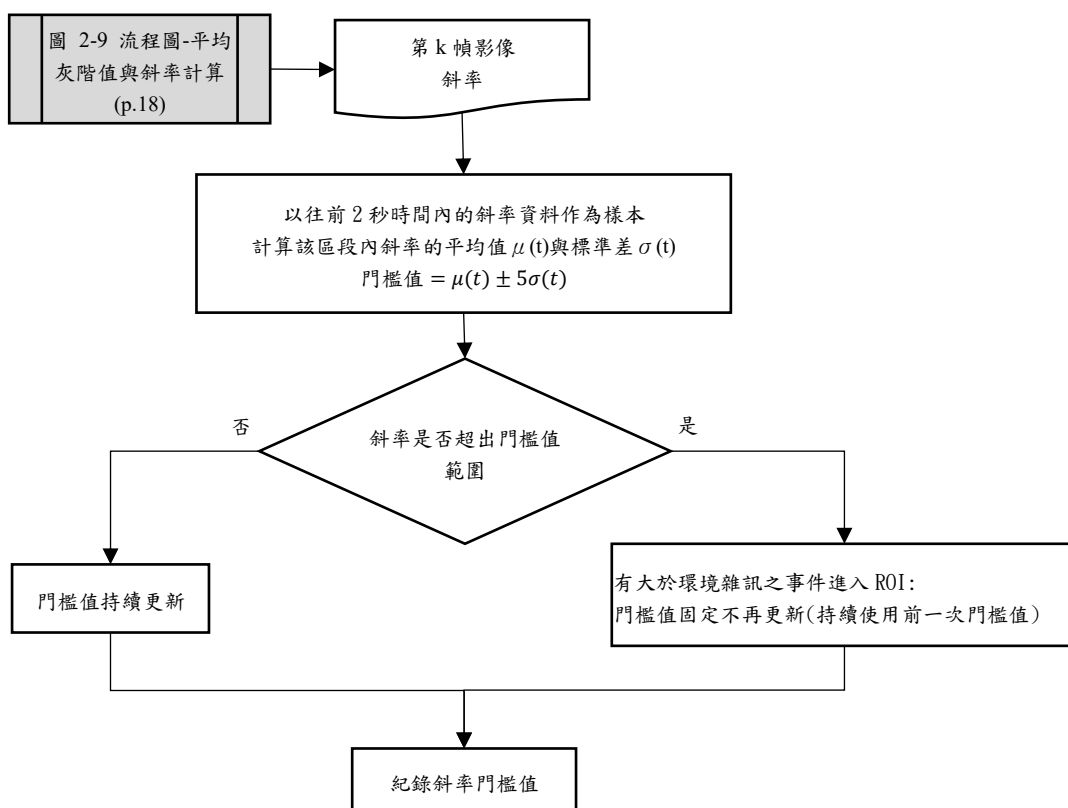


圖 2-12 流程圖-斜率門檻值計算



2.5 延遲時間(ΔT)分析:

2.5.1 灰階值平移

於 2.2 節提及，ROI₁ 和 ROI₂ 的背景灰階值可能因為環境影響而有所差異。為確保後續分析的一致性與準確性，我們需對灰階值進行平移處理，將兩個 ROI 的灰階值調整至相同基準，以消除背景環境對灰階值的干擾。選取向前回溯 Δt 之時間窗口（即過去一段時間內的灰階值資料）作為樣本，計算該時間區段內灰階值的平均值 $\mu_s(t)$ ，再以原始灰階值 $G(t)$ 減去此平均值，完成灰階值的平移校正。

$$\bar{G}(t) = G(t) - \mu_s(t) \quad (2-7)$$

其中 $\bar{G}(t)$ 為平移後的灰階值， $G(t)$ 為在時間 t 時的原始灰階值， $\mu_s(t)$ 表示在時間 t 時向前回溯 Δt 時間區段內灰階值的平均值。

圖 2-13 為單顆保麗龍球水槽實驗原始灰階值及平移後的灰階值，藍線和紅線分別表示 ROI₁ 和 ROI₂ 的灰階值。圖 2-13(a) 為原始灰階值，其中黑色實線表示平移值，該平移量是以前 1 秒內的資料作為時間窗口，計算其平均值。圖 2-13(b) 為平移後兩個 ROI 的灰階值。

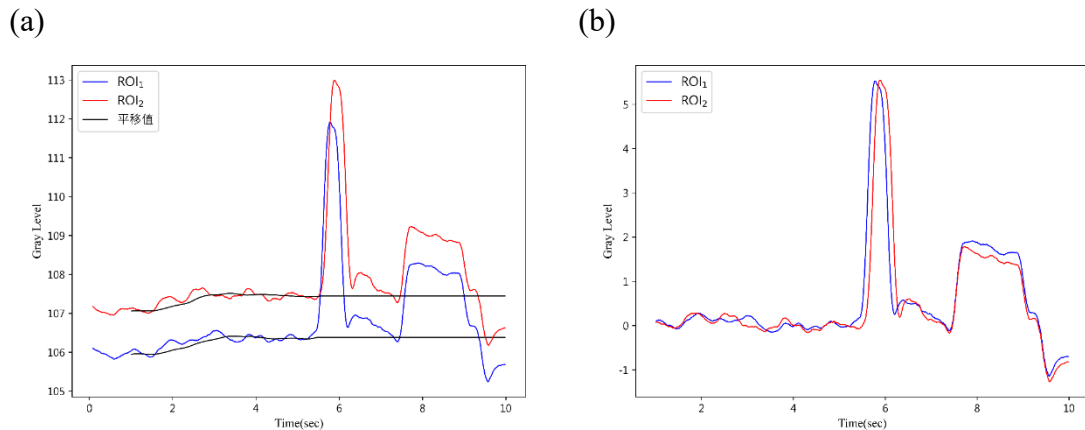


圖 2-13 單顆保麗龍球水槽實驗原始灰階值及平移後的灰階值；(a)原始灰階值、(b)平移後灰階值



2.5.2 以單一值配對

根據 2.3.4 節影像平均灰階值與斜率計算流程，本研究可得各 ROI 之影像平均灰階值與斜率。透過比對 ROI₂ 之平均灰階值時間序列，尋找與 ROI₁ 平均灰階值時間序列對應之最佳匹配時間，進而計算出延遲時間 ΔT (或對應之延遲幀數 Δf)。其中，以灰階值配對所求得之延遲幀數記為 Δf_g ，以斜率配對所求得者則記為 Δf_s 。

以灰階值配對為例，本研究針對 ROI₂ 於當下時間點 T 之灰階值 G ，向前搜尋 ROI₁ 灰階值時間序列中與之相對應之位置。若於 ROI₁ 時間序列中找到兩個鄰近數據點 (t_a, g_a) 和 (t_b, g_b) ，其中 t_a 和 t_b 為時間， g_a 和 g_b 為相對應之灰階值，且 G 介於 g_a 和 g_b 之間。則可利用式 (2-8) 之線性內插公式，估算該灰階值 G 對應於 ROI₁ 之時間位置 t 。進而，以 ROI₂ 當下時間 T 減去所內插之 ROI₁ 時間位置 t ，即可求得事件自 ROI₁ 傳遞至 ROI₂ 所需之延遲時間 ΔT ，或延遲幀數 Δf 。

$$t = t_a + \frac{G - g_a}{g_b - g_a} (t_b - t_a) \quad (2-8)$$

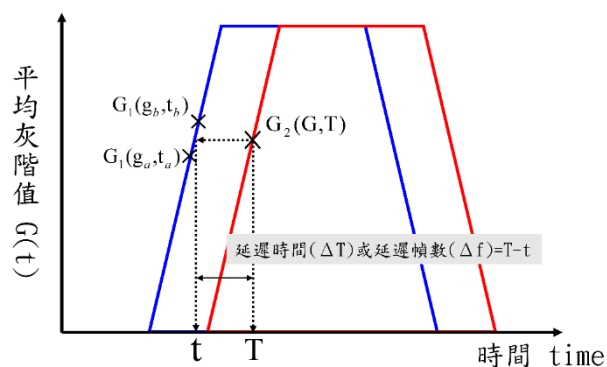


圖 2-14 線性內插法示意圖



2.5.3 以資料群組配對:RMSD 分析

為提升事件判識的準確性，本研究進一步由單點配對擴展至資料群組配對。雖然灰階值與斜率配對皆可透過單一資料點進行延遲分析，惟僅依賴單點資訊易受雜訊影響，可能導致錯誤配對。為確保事件由 ROI_1 傳遞至 ROI_2 的連續性與一致性，本文導入區段式資料比對方法，並應用以均方根誤差（Root-Mean-Square Deviation, RMSD）為基礎之相似度檢定，以進行配對結果之修正與確認。

本研究以 ROI_2 中之灰階值時間序列為參考值，並在 ROI_1 中比對對應時間區段，評估不同延遲幀數 Δf 下的對應性。比對指標採用均方根誤差 RMSD，用以量化 ROI_1 與 ROI_2 兩筆資料群之間的相似程度。RMSD 值越低，表示兩者相似性越高，亦即越可能為相同事件的對應區段。透過計算不同延遲幀數下的 RMSD，取其最小值所對應的 Δf 作為兩個 ROI 間事件傳遞的延遲時間。RMSD 計算公式如式 (2-9) 所示。

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n-1} \left\{ \left(\overline{f}_2(t_i) \right) - \left(\overline{f}_1(t_i - \Delta t) \right) \right\}^2}{n}} \quad (2-9)$$

其中 $\overline{f}_1(t_i)$ 為第 t_i 秒時 ROI_1 的灰階值， $\overline{f}_2(t_i)$ 為第 t_i 秒時 ROI_2 的灰階值， n 為比較的資料點數量， Δt 為不同延遲幀數。

以 ROI_2 當下時間點的前後 2 幀共 5 筆灰階值作為比較參考值，並與 ROI_1 中對應時間序列進行均方根誤差（RMSD）計算。如圖 2-15 所示，計算時會以 ROI_2 所對應的延遲幀數 Δf_g 為中心，於 ROI_1 中向前與向後各比對 4 幀，形成一個共 8 個候選時間點的比對範圍。針對每一候選延遲時間，皆計算 RMSD。

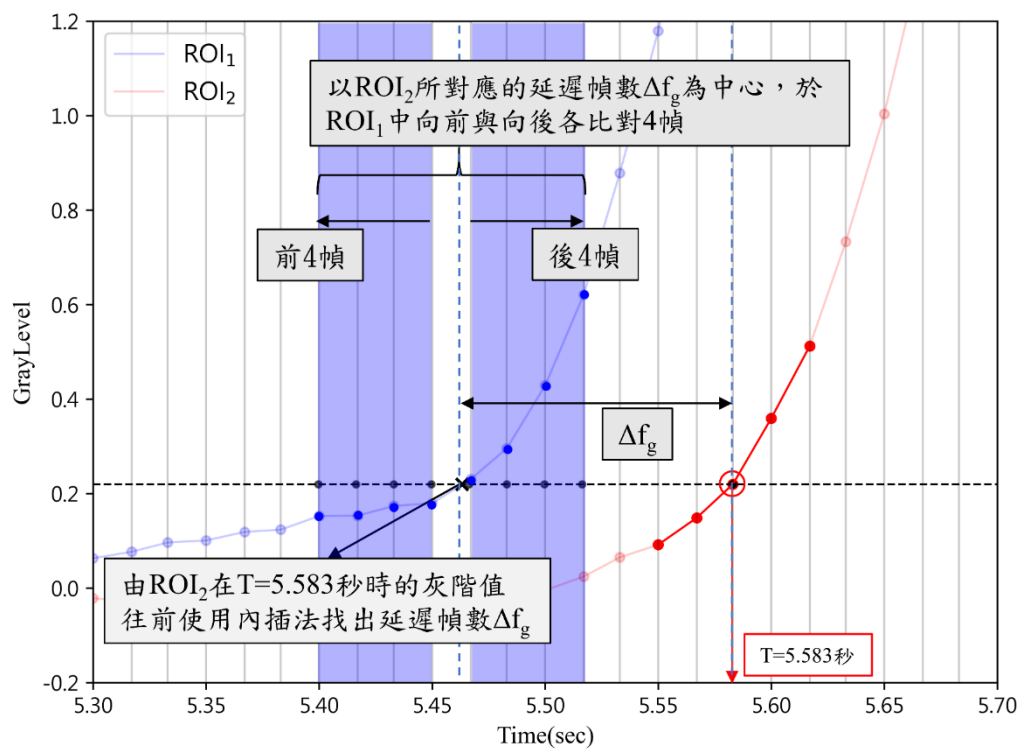
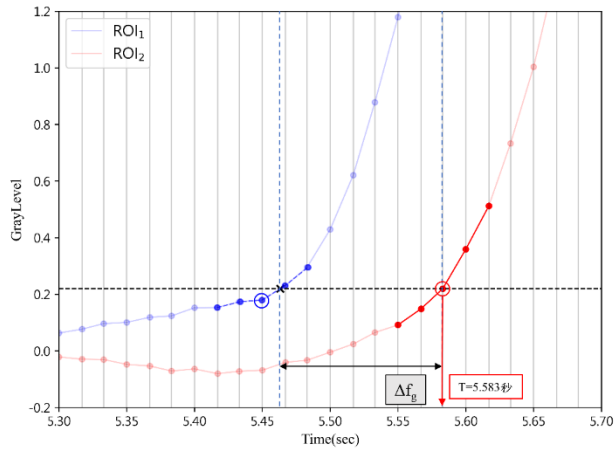


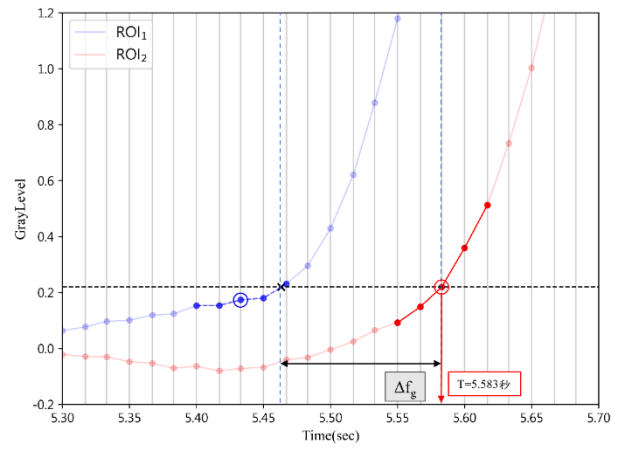
圖 2-15 均方根誤差計算範圍；以 $T=5.583$ 秒時為例，此時 ROI_2 灰階值的前後 2 幀(共 5 個資料點)與 ROI_1 的 5 個資料點計算均方根誤差。 ROI_1 的 5 個資料點以 ROI_2 所對應的延遲幀數 Δf_g 為中心，於 ROI_1 中向前與向後各 4 幀當作各別的候選點，分別以每個候選點的前後 2 幀(共 5 個資料點)與 ROI_2 的 5 個資料點計算均方根誤差。



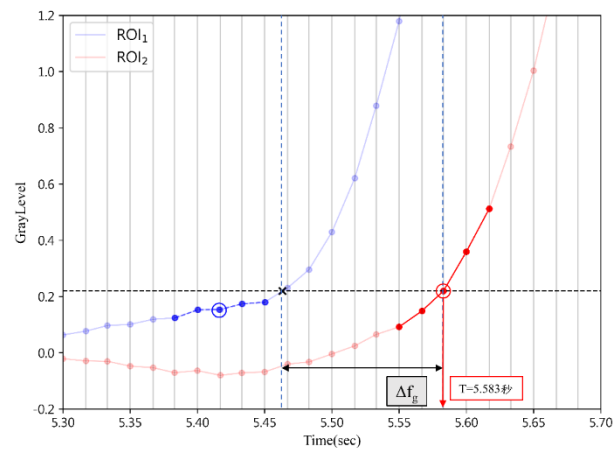
(a)以前 1 幀為候選點



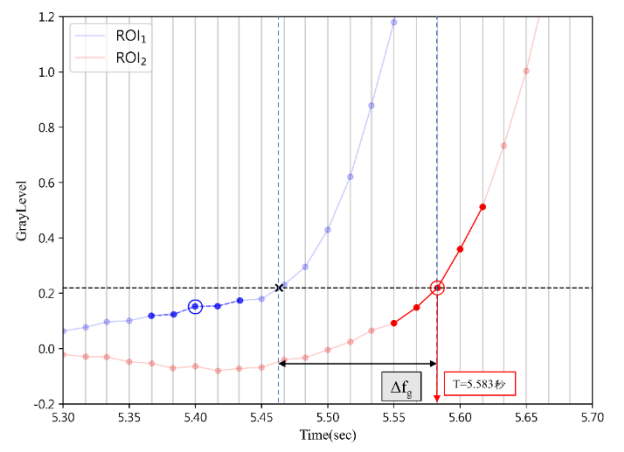
(b)以前 2 幀為候選點



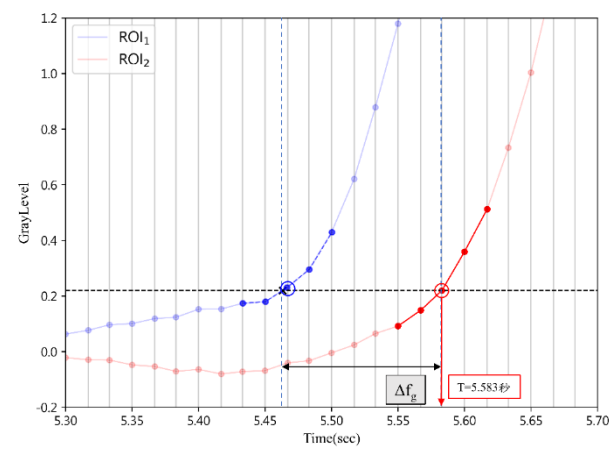
(c)以前 3 幀為候選點



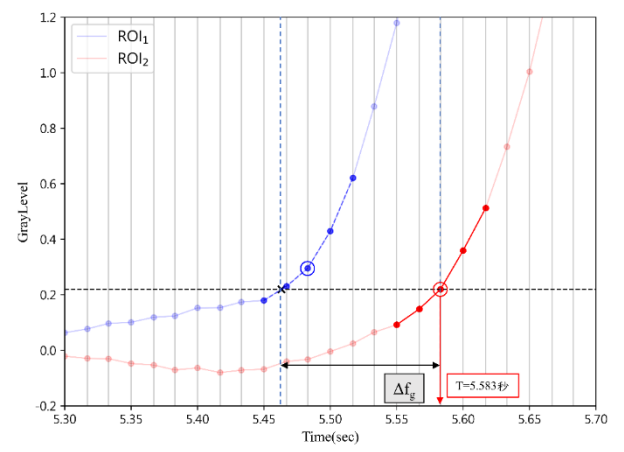
(d)以前 4 幀為候選點



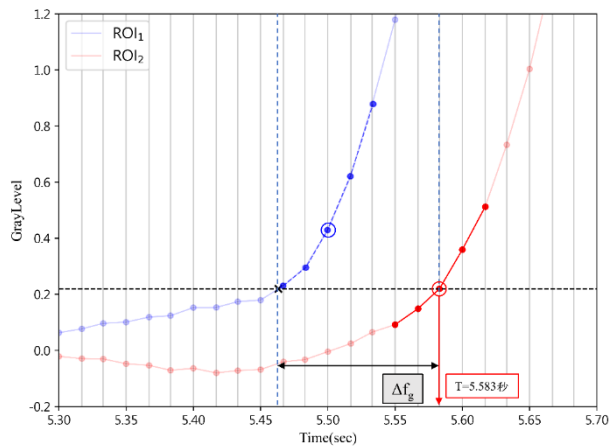
(e)以後 1 幀為候選點



(f)以後 2 幀為候選點



(g)以後 3 幀為候選點



(h)以後 4 幀為候選點

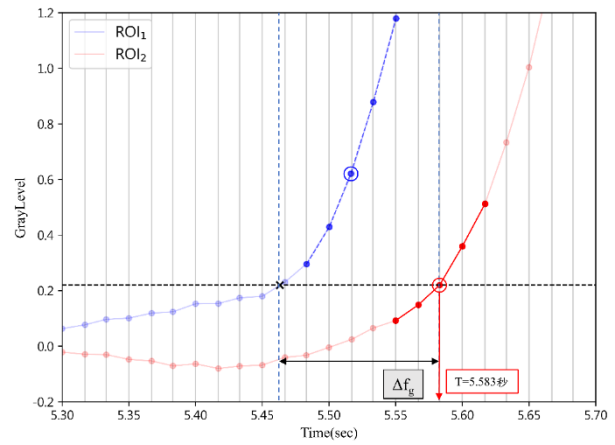
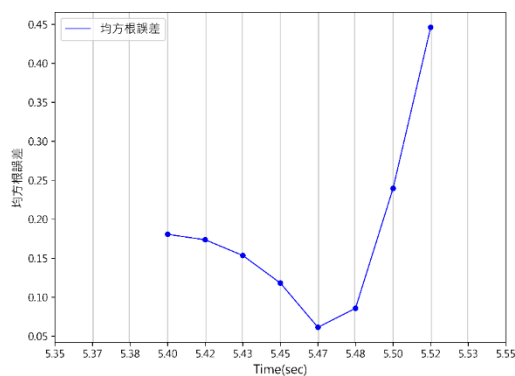


圖 2-16 均方根誤差計算點；ROI₁ 的 5 個資料點以 ROI₂ 所對應的延遲幀數 Δf_g 為中心，於 ROI₁ 中向前與向後各 4 幀當作各別的候選點，分別以每個候選點的前後 2 幀(共 5 個資料點)與 ROI₂ 的 5 個資料點計算均方根誤差。

在完成此八組候選延遲時間之 RMSD 計算後，本研究採用四次多項式曲線對這八個 RMSD 值進行擬合，並取該擬合曲線之最小值對應的時間點(t)，與 ROI₂ 所對應之時間(T)相減，以此作為基於群組配對所分析之延遲幀數，記為 Δf_{RMSD} 。

(a)均方根誤差



(b)四次曲線擬合

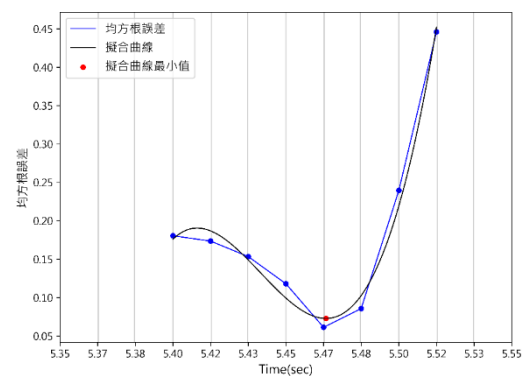


圖 2-17 數據擬合；(a)藍點為 ROI₁ 不同位置與 ROI₂ 計算的均方根誤差；(b)黑線為四次曲線擬合結果，紅點為擬合曲線最小值位置。



2.5.4 以資料群組配對:互相關分析

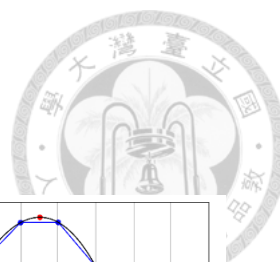
本研究亦採用基於互相關 (cross-correlation) 之相似度檢定方法, 進一步探討不同分析方式對時間延遲結果之影響。本研究以 ROI₂ 中之灰階值時間序列為參考值, 並在 ROI₁ 中比對對應時間區段, 評估不同延遲幀數 Δf 下的對應性。比對指標採用互相關係數, 量化 ROI₁ 與 ROI₂ 兩筆資料群之間的相似程度。以正歸化後的資料作互相關分析, 其值會介於-1 至 1 之間, 越接近 1, 表示兩者相似性越高。透過計算不同延遲幀數下的互相關係數, 取其最大值所對應的 Δf 作為兩個 ROI 間事件傳遞的延遲時間。互相關計算公式如式(2-10)所示。

$$R_{\bar{f}_2 \bar{f}_1}(\Delta t) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \left(\frac{\bar{f}_2(t_i) - \mu_{\bar{f}_2}}{\sigma_{\bar{f}_2}} \times \frac{\bar{f}_1(t_i - \Delta t) - \mu_{\bar{f}_1}}{\sigma_{\bar{f}_1}} \right) \quad (2-10)$$

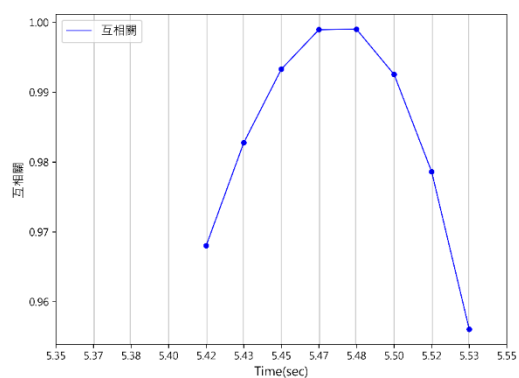
其中 $\bar{f}_1(t_i)$ 為第 t_i 秒時 ROI₁ 的灰階值, $\bar{f}_2(t_i)$ 為第 t_i 秒時 ROI₂ 的灰階值, $\mu_{\bar{f}_1}$ 與 $\mu_{\bar{f}_2}$ 為 ROI₁ 及 ROI₂ 資料群的平均值, $\sigma_{\bar{f}_1}$ 與 $\sigma_{\bar{f}_2}$ 為 ROI₁ 及 ROI₂ 資料群的標準差, n 為比較的資料點數量, Δt 為不同延遲幀數。

以 ROI₂ 當下時間點的前後 2 幀共 5 筆灰階值作為比較參考值, 並與 ROI₁ 中對應時間序列進行互相關計算。計算時會以 ROI₂ 所對應的延遲幀數 Δf_g 為中心, 於 ROI₁ 中向前與向後各比對 4 幀, 形成一個共 8 個候選時間點的比對範圍。針對每一候選延遲時間, 皆計算互相關係數。

在完成此八組候選延遲時間之 RMSD 計算後, 本研究採用四次多項式曲線對這八個 RMSD 值進行擬合, 並取該擬合曲線之最大值對應的時間點(t), 與 ROI₂ 所對應之時間(T)相減, 以此作為基於群組配對所分析之延遲幀數, 記為 Δf_{cc} 。



(a)均方根誤差



(b)四次曲線擬合

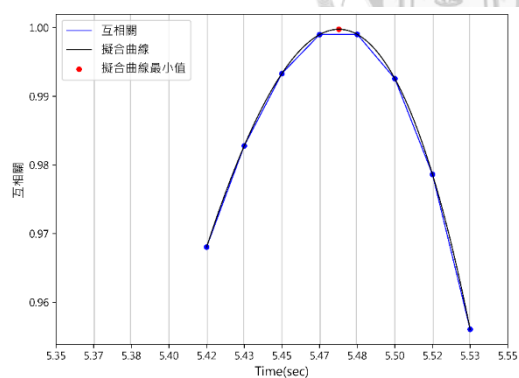


圖 2-18 數據擬合；(a)藍點為 ROI_1 不同位置與 ROI_2 計算的互相關係數；(b)黑線為四次曲線擬合結果，紅點為擬合曲線最大值位置。



2.5.5 RMSD 與互相關分析結果比較

為分析 ROI_2 相對於 ROI_1 在平均灰階值變化上的時間延遲，採用兩種相似性檢定方法，以探討不同方法對時間延遲分析結果。方法一為均方根誤差(Root-Mean-Square Deviation, RMSD)；方法二則為互相關(cross-correlation)。

本小節使用人為製造之影像進行分析。測試影像中包含一顆白色圓球，於全黑背景中移動，影像幀率設定為每秒 60 幀 (fps)。分析過程中選取兩個 ROI，每個 ROI 尺寸為 200×400 像素，兩者之間相距 50 像素，如圖 2-19 所示。

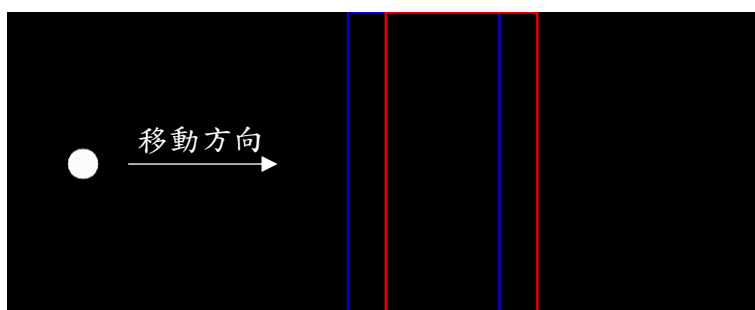


圖 2-19 人造數位影像

分別設計多種模擬情境進行測試，包括：圓球以等速移動（並改變其半徑與速度）、以等加速度移動，以及在影像背景中加入隨機雜訊等情況。其中，等速運動之速度範圍設定為 50 至 70 pixel/s，並以每 1pixel/s 為間距進行分析；另設一組情境中，白色圓球以固定速度 70pixel/s 進行直線運動，並調整其半徑由 20 至 30 pixel，每次以 1 pixel 為間距遞增。等加速度運動情境中，圓球半徑固定為 20 pixel，初速度設定為 50 pixel/s，並以固定加速度 2pixel/s^2 持續加速向前運動。雜訊模擬情境中，圓球半徑同樣設為 20pixel，並以固定速度 70 pixel/s 向右移動，為模擬自然環境中感測器雜訊或外在干擾所造成之影像變動，於背景區域加入高斯雜訊，其灰階平均值為 60，標準差為 5。

表 2-2 彙整各種人造影像情境之測試結果，並以 RMSD 與互相關兩種分析方法所估算之速度，與理論速度進行比較，計算其相對誤差以進行評估。結果顯示，

使用 RMSD 方法所估得之速度誤差均小於互相關方法，因此本研究後續分析皆採用 RMSD 作為時間延遲之判別方法。

表 2-2 不同人造影像偵測速度誤差比較

物體移動方式	影像背景情況	最大誤差(%) (使用 RMSD)	最大誤差(%) (使用互相關)
等速移動	無雜訊	1.25	4.62
等加速度移動	無雜訊	-1.41	2.86
等速移動	高斯雜訊	1.1	9.89

2.5.6 延遲時間分析流程

根據 2.3.4 節影像平均灰階值與斜率計算流程，本研究可取得各影像之平均灰階值與斜率；另依據第 2.4.4 節環境雜訊門檻值計算流程，求得灰階值與斜率之門檻值。當 ROI_2 斜率超過門檻值時，表示有事件進入 ROI_2 區域，且推定事件是由 ROI_1 傳遞至 ROI_2 。

首先，將灰階值進行平移。接續，分別計算單一值配對所獲得的延遲幀數 Δf_g (灰階值配對)和 Δf_s (斜率配對)。透過兩者差值 $|\Delta f_g - \Delta f_s|$ 用以辨識是否為同一事件之延續，若差值小於 3 幀，則可認定該事件為從 ROI_1 延續至 ROI_2 之同一事件。

進一步，以資料群組配對方式進行確認與修正。首先檢查均方根誤差，若 Δf_{RMSD} 所對應之均方根誤差小於 2，表示 ROI_1 與 ROI_2 各自五筆灰階值資料群之平均誤差低於 2 個灰階值，則視此兩群資料具有高度相似性。接著，檢驗 Δf_g 與 Δf_{RMSD} 的差值，若兩者的差值 $|\Delta f_g - \Delta f_{RMSD}|$ 小於 1 幀，則進一步確認為同一事件，並以 Δf_{RMSD} 作為該事件自 ROI_1 傳遞至 ROI_2 之最終延遲幀數估計值。

此外，本流程亦結合 2.4.3 小節所述之斜率與灰階值門檻值判斷機制，以分析事件於 ROI 區域內的運動情形。

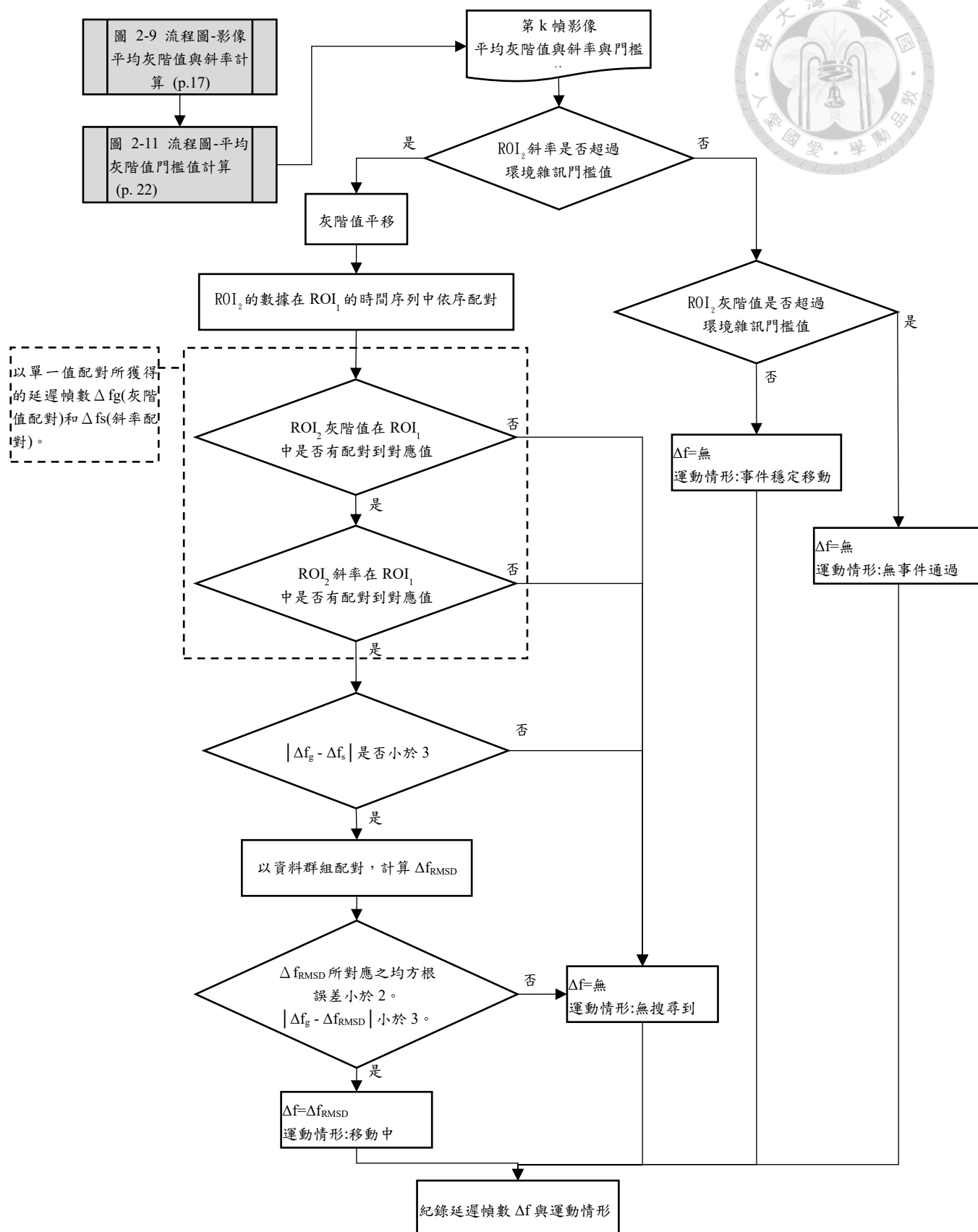


圖 2-20 流程圖-延遲時間分析



2.6 數據後處理與延遲時間轉換為流速

2.6.1 數據異常值處理

承接第 2.5.4 小節中「延遲時間分析流程」之結果，當獲得連續多筆延遲時間後，本研究進一步進行資料後處理，主要針對數據中之異常值進行剔除與平滑化處理。為提升時間延遲分析之穩定性與準確性，本研究對時間序列中可能出現之異常值進行篩選，藉由條件式判斷法去除不合物理特性之異常點，使整體序列更符合時間連續性與流場變化平穩性之特性。

本研究將分析所得之延遲值 Δf 視為一組隨時間變化的序列，其中橫軸為時間（以幀數表示），縱軸為對應之延遲幀數 Δf 。為確保數據之連續性與穩定性，本研究設置兩項條件作為異常值排除準則，以篩選出有效資料點。

首先，在時間的連續性方面，橫向需滿足 5 個點連續，連續 5 幀內皆有分析到值，即這 5 幀的資料中，沒有出現缺失或不連續的情況。其次，為了確保縱向變化的平穩性，對於連續 5 幀的分析值 Δf ，其縱向變化（ Δf 的大小）需要在正負 1 內，及每幀加速度不超過 $1\text{pixel}/\text{frame}^2$ 。若某些資料點不滿足以上條件（橫向連續或縱向平穩），則將這些資料予以剔除。如圖 2-21 數據後處理示意圖，在 $T=5.617$ 秒時，其左右 2 幀皆有值，且此 4 點的平移幀數 Δf 皆在誤差正負 1 幀內，保留 $T=5.617$ 秒時的點。

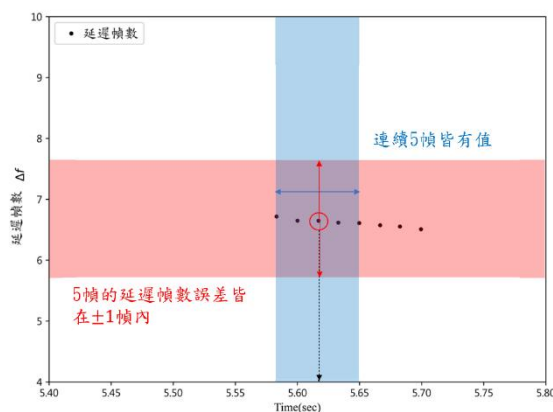


圖 2-21 數據後處理示意圖；在 $T=5.617$ 秒時，其左右 2 幀皆有值，且此 4 點的延遲幀數 Δf 皆在誤差正負 1 幀內，保留 $T=5.617$ 秒時的點。

2.6.2 流速計算公式應用

利用式(2-11)計算出土石流表面流速。

$$V = \frac{L}{\Delta f / \text{fps}} \quad (2-11)$$

其中 V 為速度，單位為 pixel/s，L 為兩個 ROI 的距離， Δf 為延遲幀數，其表示事件從 ROI₁ 傳遞到 ROI₂ 所花費的時間幀數，fps 為影片幀率(每秒幾幀影像)。



Chapter3 數值實驗



3.1 人為影像生成方式

本章節以人為生成之影像資料作為研究對象，模擬單一白色圓形物體於全黑背景中移動之情境。假設於二維影像座標 $f(x, y)$ 中，存在一個隨時間變化而移動之圓形物體，其影像座標定義如圖 3-1 所示。影像尺寸設為 $N \times M$ 像素，背景灰階值固定為 0（代表黑色），而圓形物體的灰階值則為 255（代表白色）。每一像素邊長皆設為單位 1 之長度，以利後續分析與計算。

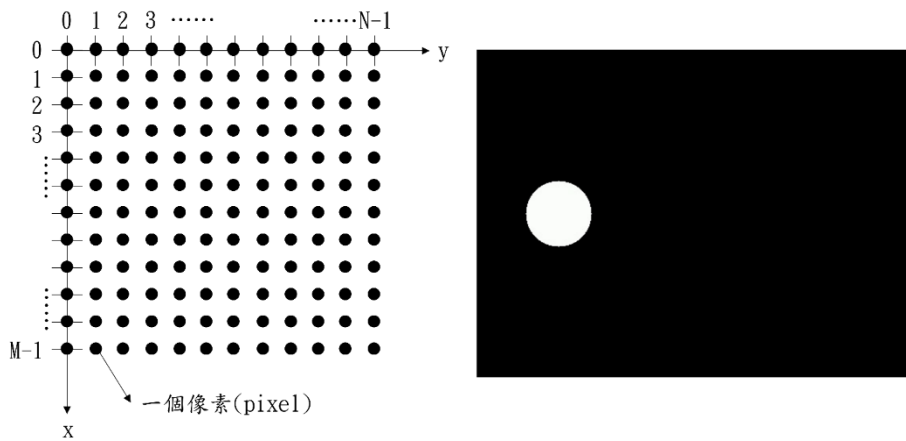


圖 3-1 影像座標定義

在數位影像中，所有目標物皆由離散像素所構成，像素為影像中最小的單位。為模擬實際拍攝過程中物體於感光元件上的成像方式，本研究以「像素圓」作為模擬基礎，重現理論圓形物體在數位影像上的表示。然而，當理論上連續且理想的圓形物體轉換為數位圖像時，會遭遇像素化（digitization）所導致的對應誤差問題，特別是在物體邊界處理上更為顯著。圖 3-2 顯示像素圓邊界之示意圖，其中紅色輪廓代表理論上的圓形物體，黑色方格則為經離散化後的像素圓。針對圓形邊界的處理方式，有許多不同的演算法可供選擇，本研究採用最直觀且簡單的方式處理像素圓的問題。透過計算各個像素與圓心的距離來判斷該像素是否屬於圓形內部，若該像素到圓心的距離小於或等於圓半徑 r ，則該像素即被視為像素圓的一部分。影像任一像素點至圓心的距離可由式(3-1)表示。



$$L_{xy} = \sqrt{[x - x_0]^2 + [y - y_0]^2} \quad (3-1)$$

其中 x 和 y 為像素二維座標， $L_{xy}(t)$ 為位於像素座標 (x, y) 像素點至圓心的距離，

x_0 和 y_0 分別為理論圓形物體圓心在 x 方向與 y 方向的座標。

$$f_{xy}(t) = \begin{cases} 0 & \text{if } L_{xy}(t) > r \\ 255 & \text{if } L_{xy}(t) \leq r \end{cases} \quad (3-2)$$

其中 x 和 y 分別代表影像中水平方向與垂直方向之像素座標， $f_{xy}(t)$ 表示位於位置 (x, y) 之像素的灰階值。若該位置不位於圓形物體範圍內，則其灰階值設為 0（即黑色）；若該位置屬於圓形物體內部，則灰階值設為 255（即白色）。

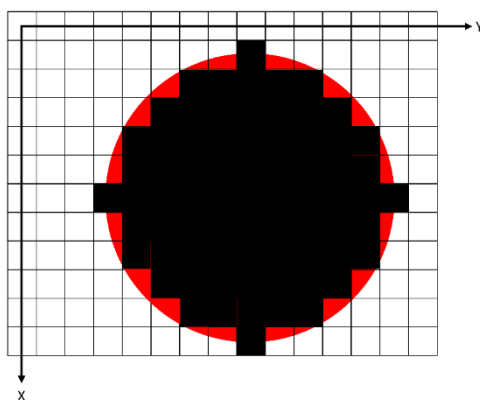


圖 3-2 像素圓邊界示意圖



3.2 分析速度方法驗證

本節首先將應用本研究所提出之方法，對一組人為生成之影像進行速度分析之驗證。如圖 3-3 所示，此人造影像包含一白色圓球，半徑為 20 像素(pixel)，以固定速度 60 pixel/s 於全黑背景中移動。該影片之幀率為 60 幀每秒，背景無雜訊干擾。影像中選取兩個感興趣區域(ROI)，其中藍色框線標示為 ROI₁ 位置，紅色框線標示為 ROI₂。兩個 ROI 大小皆為 200 × 400 pixel，並且他們之間相距 50 pixel。

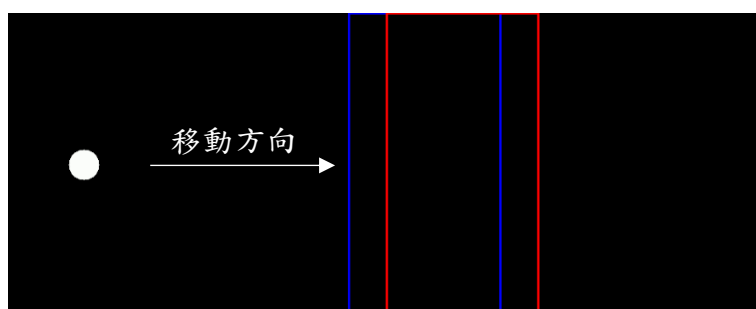
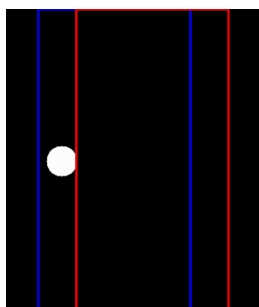
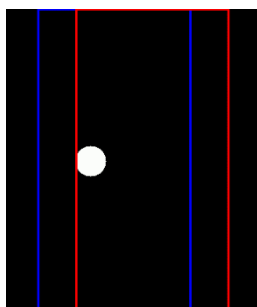


圖 3-3 人造數位影像

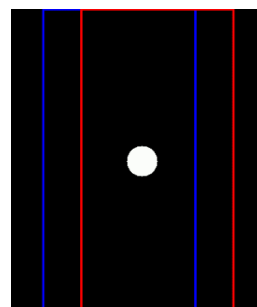
(a) $t = 6.35$ 秒



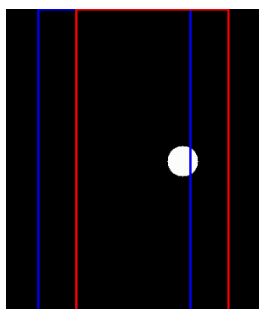
(b) $t = 6.98$ 秒



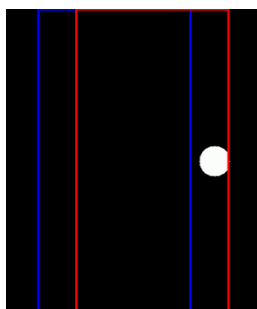
(c) $t = 8$ 秒



(d) $t = 9$ 秒



(e) $t = 9.7$ 秒



(f) $t = 10.33$ 秒

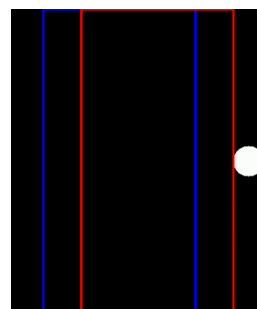
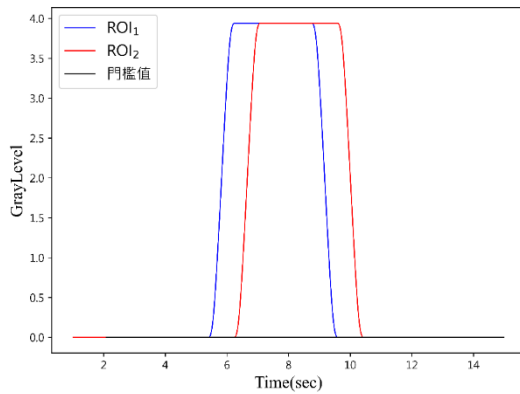


圖 3-4 人造影像（等速移動）在不同時間下，圓球於 ROI 中的位置變化。

根據本研究 2.3.4 與 2.4.4 節計算流程，可計算出灰階值、斜率與門檻值時間序列，如圖 3-5 所示。由於該人造影像的背景無雜訊，因此其環境雜訊灰階值與斜率門檻值皆為 0。

(a)灰階值



(b)斜率

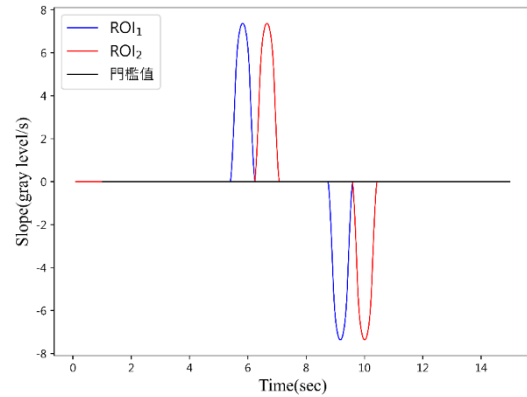


圖 3-5 人造影像（等速移動）之平均灰階值與斜率與環境雜訊門檻值分析結果；

(a)灰階值時間序列；(b)斜率時間序列。

以本研究所提出之時間延遲分析方法所計算之速度如圖 3-6(a)所示。為驗證分析結果之準確性，本研究進一步計算其與理論速度之相對誤差，其定義如式(3-3)所表示。圖 3-6(b)顯示相對誤差皆為 0%，此結果主要歸因於影像中模擬圓球的移動速度為 60 pixel/s，且影片幀率為 60 fps，因此每一幀中圓球恰好移動 1 個像素，未產生邊緣效應，圓球於影像中呈現之面積隨時間保持定值。因此，ROI₁ 與 ROI₂ 的平均灰階值與斜率時間序列僅相差一個延遲時間，彼此波形完全一致。

$$\text{相對誤差} = \frac{\text{本研究方法分析之速度} - \text{理論速度}}{\text{理論速度}} \times 100\% \quad (3-3)$$

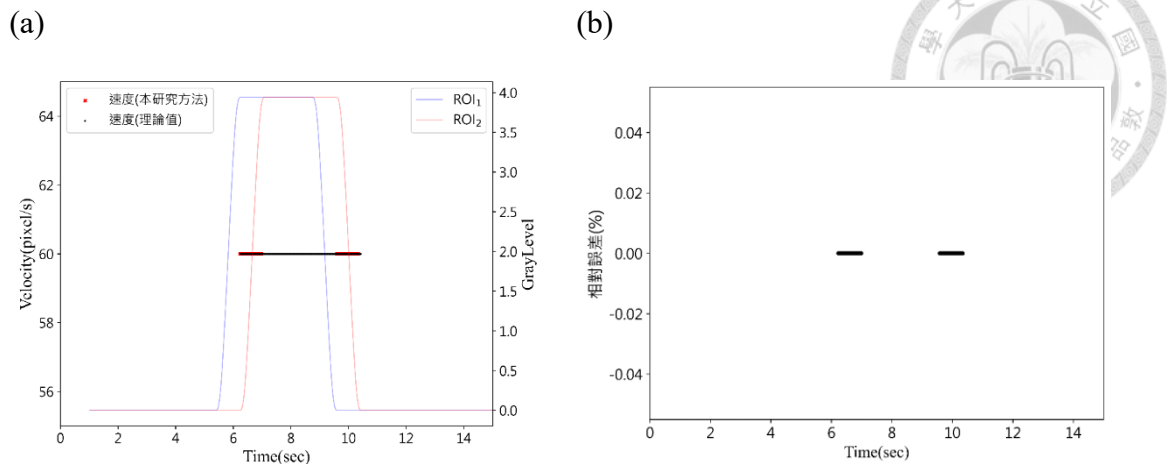


圖 3-6 人造影像（等速移動）下本研究所提出方法分析之速度與理論速度比較：

(a)橫軸為時間，主縱軸為速度，紅色叉號為本研究方法分析之速度，黑色點為理論速度；次縱軸為灰階值，藍色實線與紅色實線分別為 ROI₁ 與 ROI₂ 的平均灰階值。(b)本研究方法所分析速度與理論速度之相對誤差。

後續各小節將分別探討不同圓球半徑、等速移動速度、加速度運動模式，以及影像背景加入雜訊等情境下之分析結果，並進一步分析本方法所估算之速度與理論速度之最大相對誤差。

3.2.1 圓半徑不變速度改變

本小節探討不同移動速度對本研究所提方法於速度分析結果之影響。實驗使用一段人造影片，其內容為一顆白色圓球（半徑為 20 pixel）於影像中進行直線等速運動，速度範圍設定為 50 至 70 pixel/s，並以每 1 pixel/s 為間距進行分析。影片幀率為 60 fps，背景為全黑無雜訊，兩個 ROI 尺寸皆為 200×400 pixel，且兩者之間相距 50 pixel。

圖 3-7 顯示在不同速度條件下，本方法所估算之速度與理論速度之最大相對誤差。結果顯示，於固定圓球半徑且僅變化速度之情況下，本方法之速度估算誤差均低於 1.24%。當移動速度為 50 pixel/s 時，分析所得之速度誤差為 0。其主因在於兩個 ROI 之間的距離為 50 pixel，因此當圓球以等速運動進入 ROI₁ 與 ROI₂ 時，兩



區域所計算之平均灰階值與斜率時間序列在形狀上完全一致，僅存在一個固定的時間延遲，對應於圓球從 ROI_1 移動至 ROI_2 所需的時間。

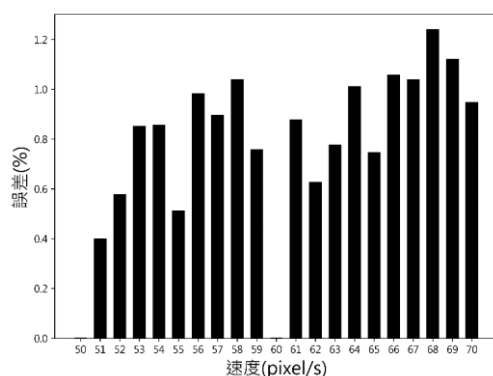


圖 3-7 不同速度條件下，圓球半徑為 20 pixel 時本研究方法所估算速度與理論速度之最大相對誤差。

3.2.2 速度不變圓半徑改變

本小節探討不同圓球半徑對本研究所提方法於速度分析結果之影響。實驗採用一段人造影片，內容為白色圓球以固定速度 70 pixel/s 進行直線運動，並調整圓球半徑由 20 至 30 pixel，每次以 1 pixel 為間距遞增。影片幀率為 60 fps，背景為無雜訊的全黑畫面。兩個 ROI 大小皆為 200×400 pixel，且兩者之間相距 50 pixel。

圖 3-8 顯示在不同圓球半徑條件下，本方法所估算之速度與理論速度之最大相對誤差。實驗結果顯示，當移動速度固定而圓球半徑改變時，本方法之速度估算誤差均低於 1.25%。

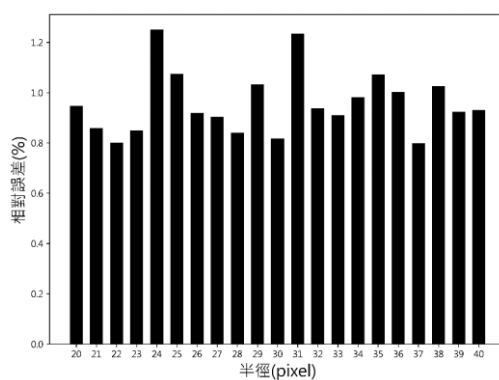


圖 3-8 速度為 70 pixel/s 時，不同圓球半徑條件下本研究方法所估算速度與理論速度之最大相對誤差。

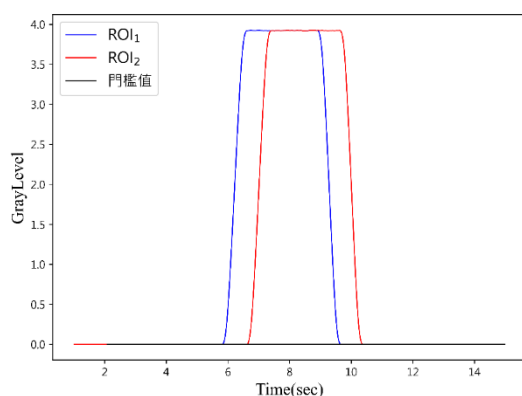


3.2.3 等加速度運動

本小節旨在驗證本研究所提出之速度分析方法於加速度運動情境下之適用性與準確性。測試影像中包含一顆白色圓球，半徑為 20 pixel，初速度為 50 pixel/s，並以固定加速度 2 pixel/s²向前運動。影像之背景為全黑，無任何雜訊干擾。影像幀率設定為每秒 60 幀。分析中選取兩個 ROI，兩個 ROI 大小為 200×400 pixel，兩者間距為 50 pixel。

根據本研究 2.3.4 與 2.4.4 節計算流程，可計算出灰階值、斜率與門檻值時間序列，如圖 3-9 所示。由於該人造影像的背景無雜訊，因此其背景灰階值與斜率門檻值皆為 0。

(a)灰階值



(b)斜率

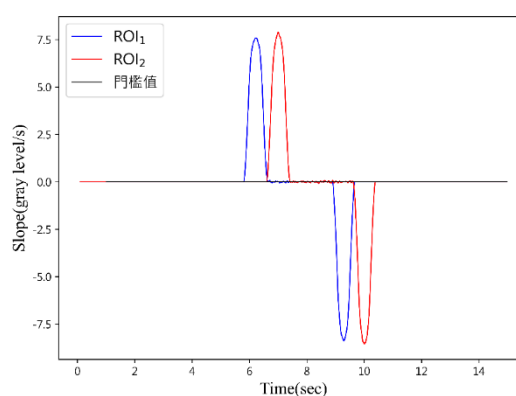


圖 3-9 人造影像（等加速度移動）之平均灰階值與斜率與環境雜訊門檻值分析結果；(a)灰階值時間序列；(b)斜率時間序列。

以本研究所提出之特徵值配對分析方法所計算之速度，如圖 3-10(a)所示。圖 3-10(b)則呈現偵測速度與理論速度的相對誤差，最大誤差為 1.41%。

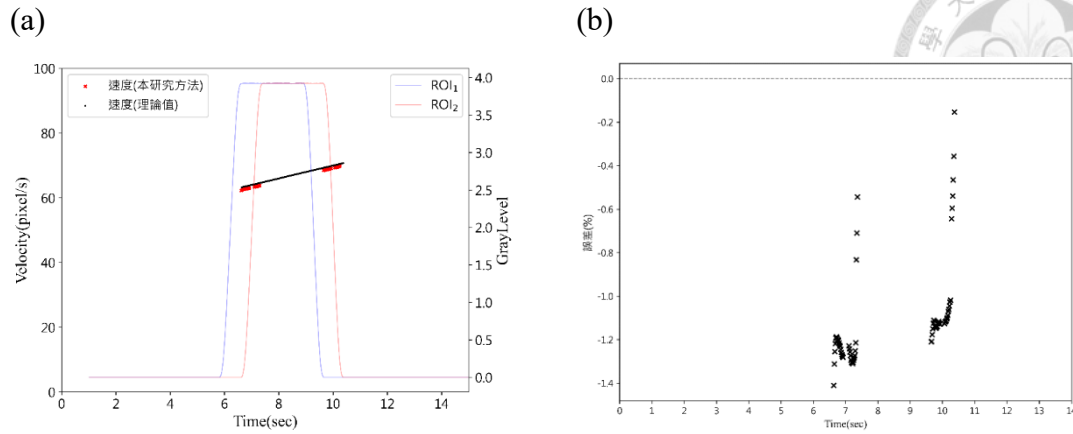


圖 3-10 人造影像（等加速度運動）下本研究所提出方法分析之速度與理論速度比較：(a)橫軸為時間，主縱軸為速度，紅色叉號為本研究方法分析之速度，黑色點為理論速度；次縱軸為灰階值，藍色實線與紅色實線分別為 ROI₁ 與 ROI₂ 的平均灰階值。(b)本研究方法所分析速度與理論速度之相對誤差。

3.2.4 背景添加雜訊

本小節旨在探討背景雜訊對本研究所提出之速度分析方法之影響，並以加入高斯雜訊（Gaussian noise）之方式進行模擬分析。模擬中，背景雜訊影像以影像空間座標 (x, y) 表示，如式(3-4)所示。高斯隨機變數 z 之機率密度函數（Probability Density Function, PDF）定義如式(3-5)，用以模擬不同雜訊強度下之背景變化，藉此評估本方法於雜訊環境中的適用性與準確性。

$$g(x, y) = f(x, y) + \eta(x, y) \quad (3-4)$$

其中 $g(x, y)$ 為添加雜訊後的影像， $f(x, y)$ 為原始影像， $\eta(x, y)$ 為雜訊。

$$p(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(z-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3-5)$$

其中 z 表示灰階值， μ 是平均值而 σ 是標準差。

測試影像中包含一顆白色圓球，半徑為 20pixel，以固定速度 70 pixel/s 向右移動，影片幀率為每秒 60 幀。為模擬自然環境中感測器雜訊或外在干擾造成之影像變動，背景區域添加高斯雜訊，其灰階平均值為 60，標準差為 5。如圖 3-11 所示，

影像中設置兩個 ROI，用以擷取目標物通過各區域時之影像特徵資訊。其中，藍色框線為 ROI₁，紅色框線為 ROI₂，兩者大小皆為 200×400 pixel，兩者間距為 50 pixel。

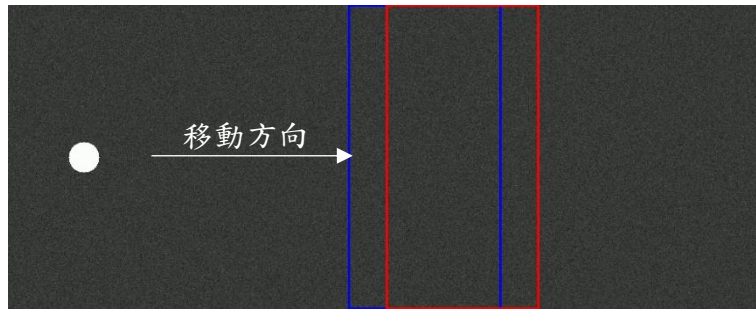
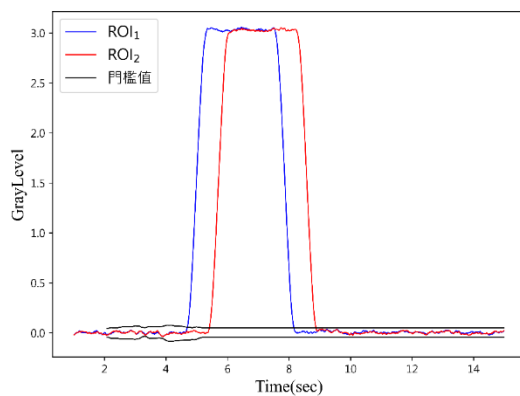


圖 3-11 人造數位影像(背景添加雜訊)

根據本研究 2.3.4 與 2.4.4 節計算流程，可計算出灰階值、斜率與門檻值時間序列，如圖 3-12 所示。

(a) 灰階值



(b) 斜率

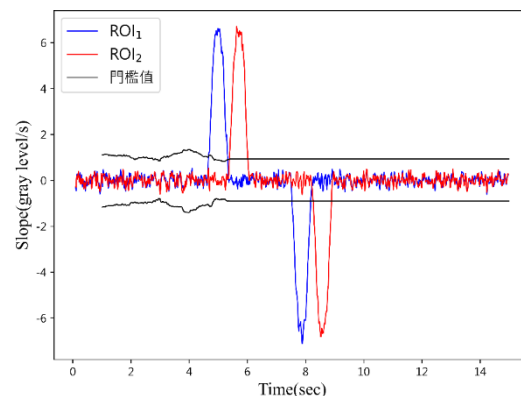


圖 3-12 人造影像 (背景添加雜訊) 之平均灰階值與斜率與環境雜訊門檻值分析結果；(a) 灰階值時間序列；(b) 斜率時間序列。

以本研究所提出之特徵值配對分析方法所計算之速度，如圖 3-13(a)所示。圖 3-13(b)則呈現偵測速度與理論速度的相對誤差，最大誤差為 1.1%。

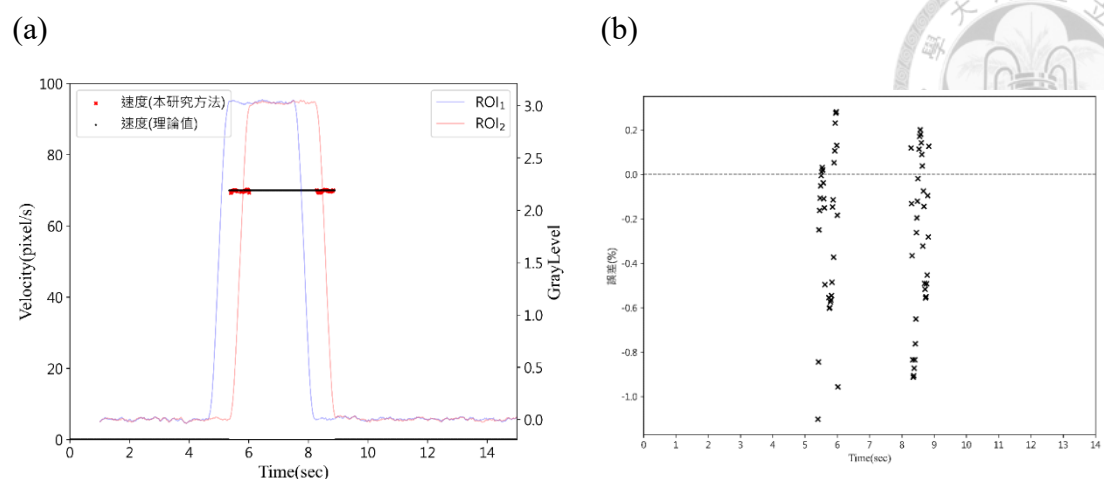


圖 3-13 人造影像（背景添加雜訊）下本研究所提出方法分析之速度與理論速度比較：(a)橫軸為時間，主縱軸為速度，紅色叉號為本研究方法分析之速度，黑色點為理論速度；次縱軸為灰階值，藍色實線與紅色實線分別為 ROI₁ 與 ROI₂ 的平均灰階值。(b)本研究方法所分析速度與理論速度之相對誤差。

3.3 小結

表 3-1 統整了本節所測試的不同人造影片，並以本研究的分析速度方法與理論速度的相對誤差來進行評估。結果顯示，該方法的誤差均在-1.41%至 1.25%以內，屬於可接受的範圍。該方法在理想環境下的影片偵測速度是可行的。

表 3-1 不同人造影像偵測速度誤差比較

物體移動方式	影像背景情況	最大誤差(%)
等速移動	無雜訊	1.25
等加速度移動	無雜訊	-1.41
等速移動	高斯雜訊	-1.1

Chapter4 室內水槽實驗



透過第三章數值模擬試驗的結果，本研究所提出之影像分析方法與處理流程已初步獲得驗證。本章將進一步利用室內實驗來驗證本研究方法的可行性，由於室內實驗的相機解析度和環境影響因素較現地條件更易於控制，因此能提供更穩定的測試環境。在第五章，則會以現地影像進行本研究方法的驗證與分析。

本章的室內實驗分為兩種類型：第一種使用白色圓形保麗龍球作為材料，以模擬土石流的表面顆粒運動；第二種則使用砂石作為材料，以模擬真實的土石流流動情況。所使用之影片來源於 2020 年，由郭亭妤[21]、Sudhan[22]及張智涵[20]等人共同進行實驗並拍攝。

4.1 保麗龍球流動實驗

本研究利用圓形保麗龍球模擬土石流前鋒流動情況，透過單顆與多顆保麗龍球流經水槽的實驗來驗證方法的可行性。此外，透過相對誤差比較本研究方法所分析出的速度與肉眼所判斷的真實速度，以評估其準確性。

4.1.1 實驗器材與配置

實驗水槽為一座矩形斷面人工渠道，尺寸長 5 公尺、寬 0.6 公尺，渠道坡度為 0 度，呈水平狀態。水流以固定流量流入水槽，以確保水槽內的流速保持一致。

實驗材料為直徑介於 1.5 公分至 10 公分不等的白色保麗龍球。實驗影片由 Nikon D5600 相機拍攝，其感光元件為 CMOS(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor)，尺寸為 23.5mm × 15.6mm，影像解析度為 1980 × 1080 像素，影格速率為 60 fps。

表 4-1 保麗龍球流動實驗的相機參數

參數	數值
感光元件 CMOS 尺寸	23.5mm × 15.6mm
解析度	1920 × 1080
影格速率(幀率)	60 fps

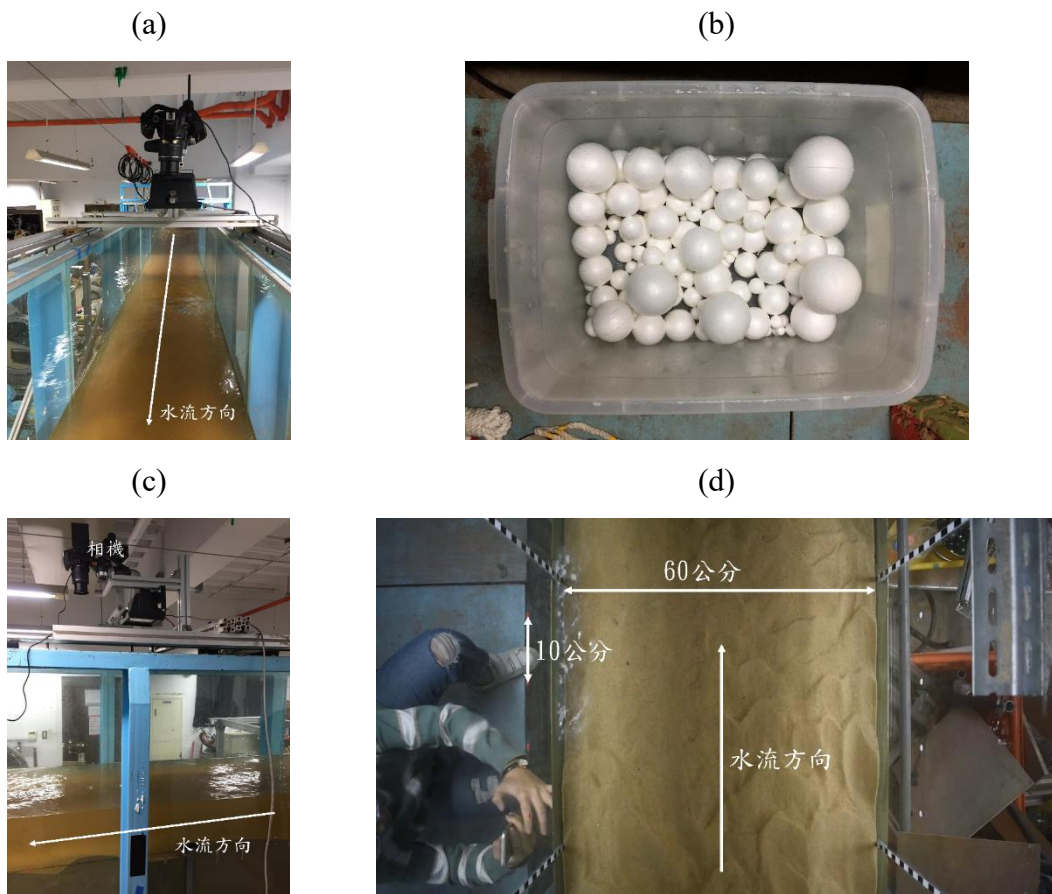


圖 4-1 保麗龍球流動實驗-實驗器材配置以及實驗材料；(a)水槽俯視圖(b)實驗保麗龍球(c)水槽側視圖(d)相機拍攝影像

4.1.2 實驗步驟

在固定水槽坡度後，開啟水槽流量開關並維持固定流量，靜置一段時間，直到水流達穩態且水流表面無明顯波動。接著，依序放入一顆至多顆保麗龍球，並使用相機進行拍攝與錄影，直到所有保麗龍球完全通過畫面後停止錄影拍攝。



4.1.3 以本研究方法分析單顆保麗龍球實驗速度

圖 4-2 顯示本實驗所選取之感興趣區域 (Region of Interest, ROI) 於影像中的空間配置。藍色框線標示 ROI_1 ，紅色框線標示 ROI_2 ，兩者分別設置於目標物運動軌跡上。兩個 ROI 的尺寸為 600×200 pixel，兩者間距為 50 pixel。根據影像標定結果，影像中每個像素對應實際距離為 0.05 公分，故兩 ROI 之實際距離為 2.5 公分。此距離將作為後續計算延遲時間所對應之運動速度的依據。

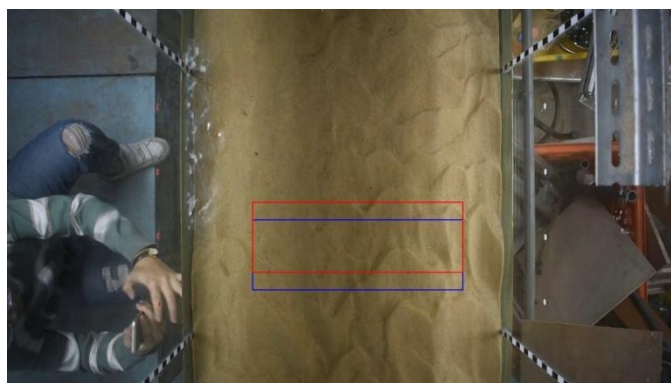


圖 4-2 單顆保麗龍球實驗 ROI 位置

圖 4-3 為單顆保麗龍球水槽實驗原始灰階值及平移後的灰階值，藍線和紅線分別表示 ROI_1 和 ROI_2 的灰階值。圖 4-3 (a) 為原始灰階值，其中黑色實線表示平移值，該平移量是以前 1 秒內的資料作為時間窗口，計算其平均值。圖 4-3 (b) 為平移後兩個 ROI 的灰階值。

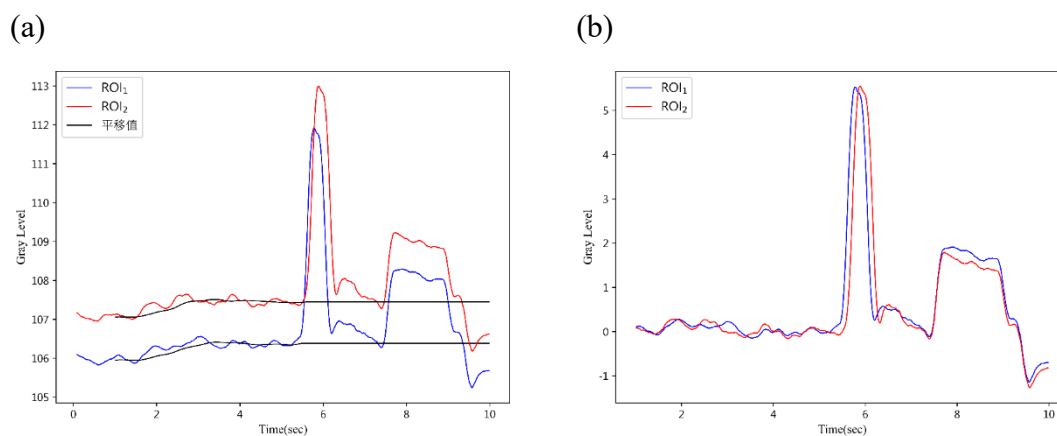
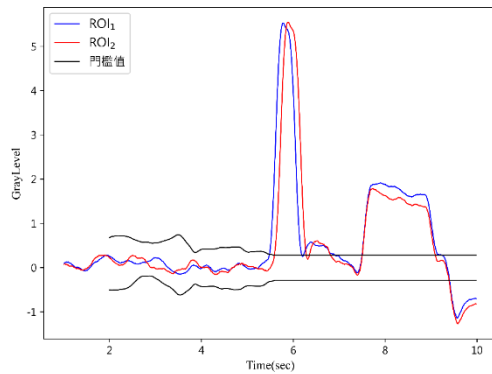


圖 4-3 單顆保麗龍球水槽實驗原始灰階值及平移後的灰階值；(a)原始灰階值、(b)平移後灰階值

根據本研究 2.3.4 與 2.4.4 節計算流程，可計算出灰階值、斜率與門檻值時間序列，如圖 4-4 所示。以本研究所提出之時間延遲分析方法所計算之速度，如圖 4-5 所示。

(a)灰階值



(b)斜率

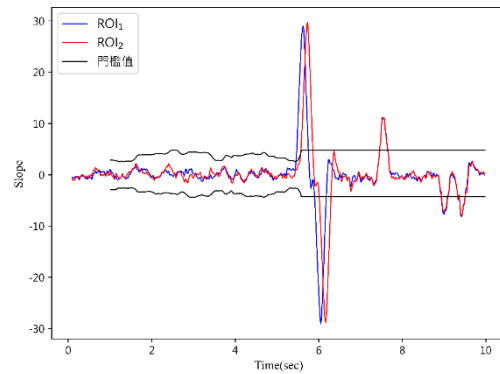


圖 4-4 單顆保麗龍球實驗之平均灰階值與斜率與環境雜訊門檻值分析結果；(a) 灰階值時間序列；(b)斜率時間序列。

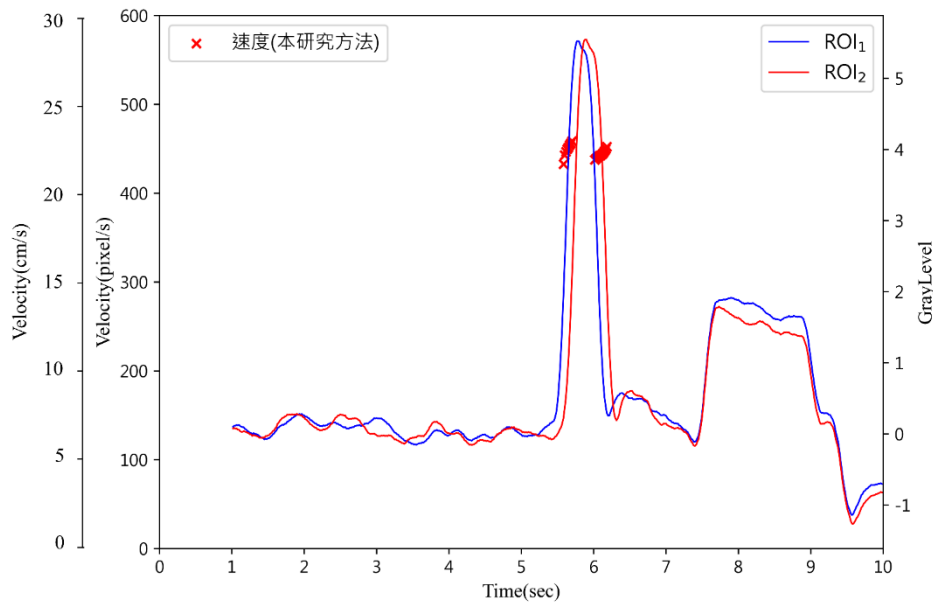


圖 4-5 單顆保麗龍球實驗下本研究所提出方法分析之速度:橫軸為時間，主縱軸為速度(單位：cm/s 與 pixel/s)，次縱軸為灰階值。紅色叉號代表本研究所估算之速度結果；藍線與紅線則分別對應於 ROI₁ 與 ROI₂ 的灰階值變化。



4.1.4 以肉眼判別單顆保麗龍球實驗速度

為了驗證本方法分析速度的準確性，本文另以人工方式追蹤保麗龍球之圓心位置作為對照依據，以圓球上下左右最外緣四個點計算圓球中心位置，並以式(4-1)與式(4-2)計算圓球中心 x 座標及 y 座標。當保麗龍球進入 ROI 時，透過肉眼逐幀辨識其圓心位置，並記錄相對應時間。圖 4-7 顯示於不同時間點下，人工標註之圓球圓心位置。圖 4-8(a)呈現於時間區間 $t = 5.65$ 至 $t = 6.27$ 秒間，保麗龍球圓心所形成之運動軌跡。其對應速度則依據每 11 幀之時間間隔與 ROI 平行方向之位移量計算而得。此人工判讀之速度將用以與本研究方法所得結果進行比較與誤差分析。由肉眼判別之平均速度為 23.2 cm/s 。

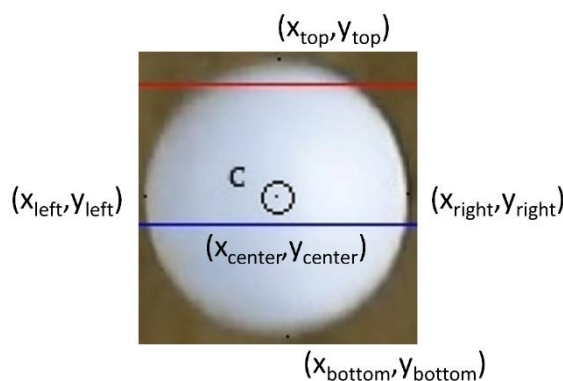
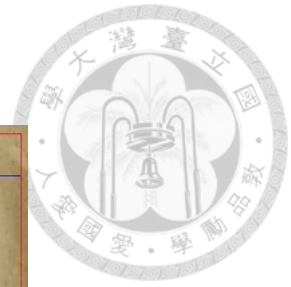


圖 4-6 圓球最外緣四個點示意圖

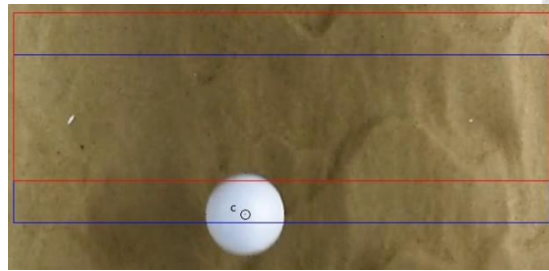
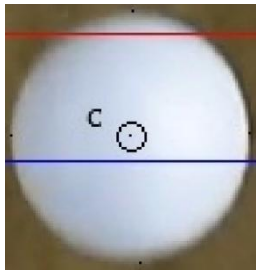
$$x_{center} = \frac{x_{left} + x_{right}}{2} \quad (4-1)$$

$$y_{center} = \frac{y_{top} + y_{bottom}}{2} \quad (4-2)$$

其中 x_{center} 和 y_{center} 為圓球中心座標， x_{left} 和 x_{right} 分別為圓球最外緣左右兩點的 x 座標， y_{top} 和 y_{bottom} 分別為圓球最外緣上下兩點的 y 座標。



(a)進入 ROI 時， $t = 5.65$ 秒



(b)在 ROI 中， $t = 5.867$ 秒



(c)離開 ROI 時， $t = 6.233$ 秒

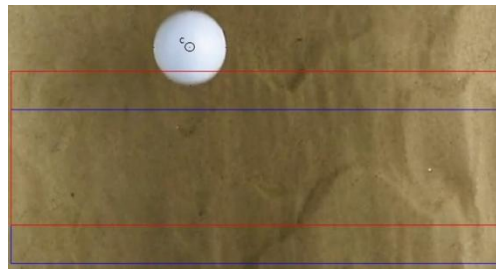
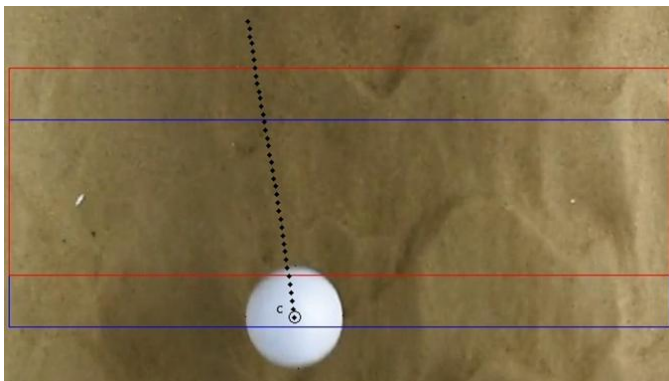


圖 4-7 不同時間下保麗龍球判別中心位置；藍線為 ROI_1 ，紅線為 ROI_2 範圍，黑點為肉眼判別保麗龍球的中心點。

(a)



(b)

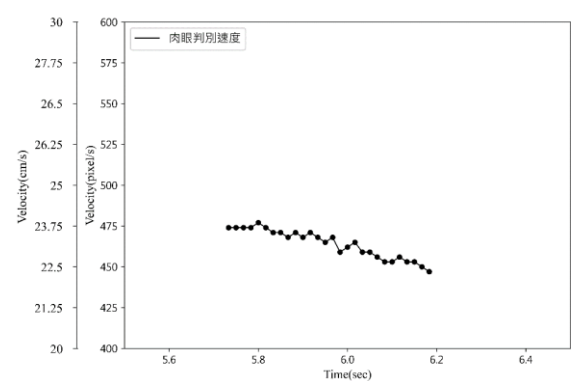


圖 4-8 單顆保麗龍球之肉眼判別結果：(a)時間區間 $t = 5.65$ 至 $t = 6.27$ 秒間，球體圓心位置所構成之運動軌跡；(b)依據每 10 幀時間間隔所計算之沿 ROI 平行方向的速度變化。



4.1.5 單顆保麗龍球實驗誤差比較

圖 4-9 顯示單顆保麗龍球實驗之速度誤差比較結果，表 4-2 單顆保麗龍球實驗之速度誤差比較則詳細列出各時間點之對應數值。整體而言，本研究所分析之速度與肉眼判別速度相當接近，誤差普遍低於 5%。然而，在第 5.583 至 5.617 秒期間，保麗龍球尚未實際進入 ROI，本研究方法卻已分析出速度，其主要原因為影像灰階值時間序列於計算過程中，採用了 11 筆資料的中央移動平均進行平滑化處理。此一處理方式導致事件發生時間在資料中出現提前表現的情形。因此，保麗龍球尚未完全進入 ROI 時，其造成的灰階變化已部分反映於平滑後的資料中，進而提早觸發速度估算。相較於保麗龍球在進入至離開 ROI 期間的平均速度 23.2cm/s 相比，最大誤差約為-6.77%。

與數值實驗所獲得的影片相比，實際實驗中的誤差較大，其主要原因來自於真實環境中的光照變化與物體移動時表面光影變化的影響。這些因素導致保麗龍球由 ROI1 移動至 ROI2 時，其原本應有的灰階變化延遲受到干擾，進而影響配對準確性並產生誤差。

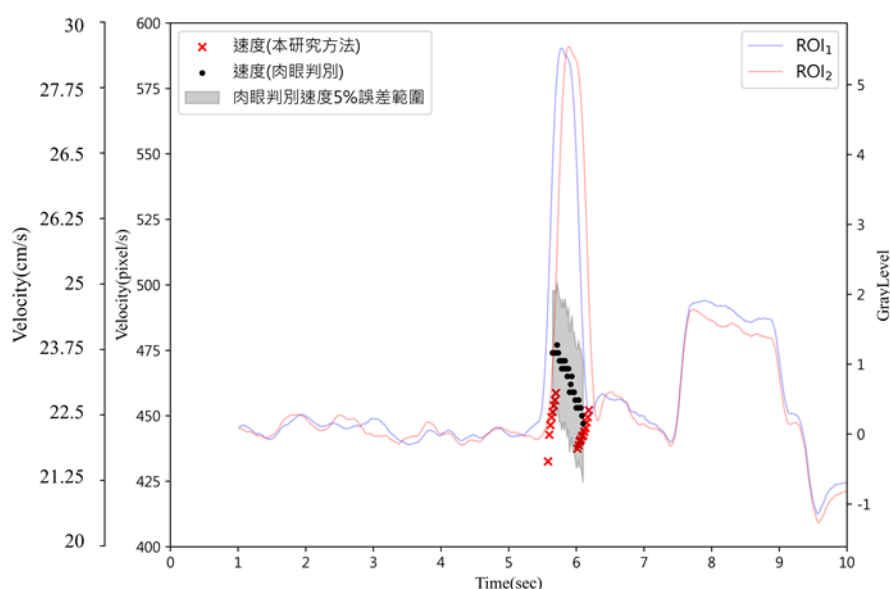


圖 4-9 單顆保麗龍球實驗之速度誤差比較圖。橫軸為時間，主縱軸為速度(單位：cm/s 與 pixel/s)，次縱軸為 ROI 灰階值。圖中紅色叉號表示本研究方法所分析之

速度，黑色點為人工肉眼判別之速度。藍色與紅色實線分別代表 ROI₁ 與 ROI₂ 的灰階值變化；灰色陰影區域表示相對誤差 5% 以內之範圍。



表 4-2 單顆保麗龍球實驗之速度誤差比較

時間(秒)	本研究方法分析速度(cm/s)	肉眼判別速度(cm/s)	差值(cm/s)	相對誤差(%)
5.583	21.63	無		
5.6	22.14	無		
5.617	22.32	無		
5.633	22.47	無		
5.65	22.57	23.70	-1.13	-4.77
5.667	22.70	23.70	-1.00	-4.22
5.683	22.79	23.70	-0.91	-3.84
5.7	22.93	23.70	-0.77	-3.25
6.017	21.87	22.65	-0.78	-3.44
6.033	21.94	22.80	-0.86	-3.77
6.05	22.01	22.65	-0.64	-2.83
6.067	22.05	22.65	-0.60	-2.65
6.083	22.10	22.50	-0.40	-1.78
6.1	22.13	22.35	-0.22	-0.98
6.117	22.19	無		
6.133	22.27	無		
6.15	22.37	無		
6.167	22.47	無		
6.183	22.61	無		



4.1.6 以本研究方法分析多顆保麗龍球實驗速度

圖 4-10 顯示本實驗所選取之感興趣區域 (Region of Interest, ROI) 於影像中的空間配置。藍色框線標示 ROI₁，紅色框線標示 ROI₂，兩者分別設置於目標物運動軌跡上。兩個 ROI 的尺寸為 880×200 pixel，兩者間距為 50 pixel。根據影像標定結果，影像中每個像素對應實際距離為 0.05 公分，故兩 ROI 之實際距離為 2.5 公分。此距離將作為後續計算延遲時間所對應之運動速度的依據。

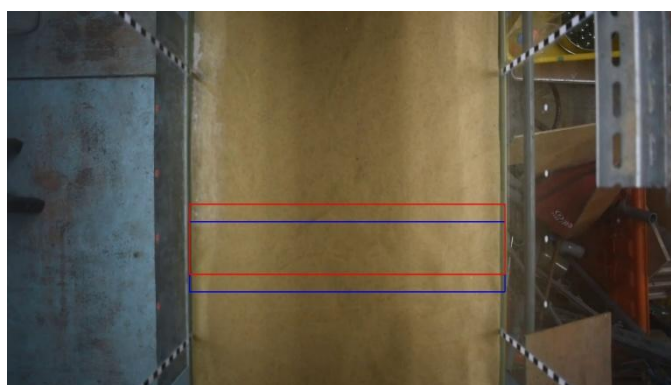


圖 4-10 多顆保麗龍球實驗 ROI 位置

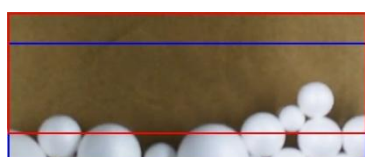
(a) 第 10.067 秒



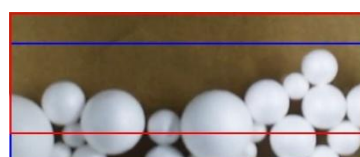
(b) 第 10.233 秒



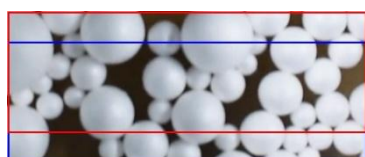
(c) 第 10.4 秒



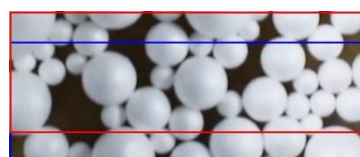
(d) 第 10.567 秒



(e) 第 11 秒

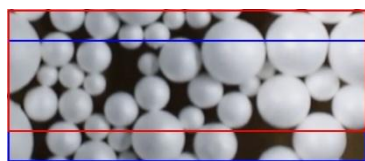


(f) 第 11.167 秒

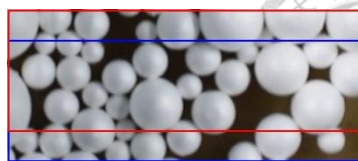


(g) 第 13 秒

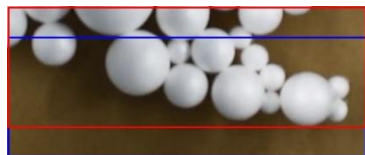
(h) 第 13.167 秒



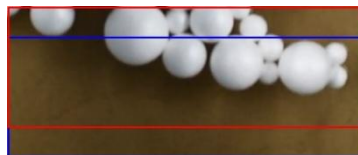
(i) 第 14.333 秒



(j) 第 14.5 秒



(k) 第 14.667 秒

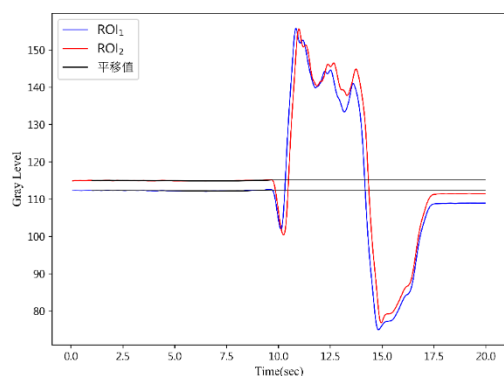


(l) 第 14.833 秒

圖 4-11 多顆保麗龍球實驗之影像畫面。藍色與紅色框線分別標示 ROI_1 和 ROI_2 ；藍線和紅線分別為位置，兩區域大小均為 880×200 pixel，彼此間距為 50 pixel；(a)至(d)為顯示保麗龍球前緣進入 ROI 的過程；(e)至(h) 為保麗龍球充滿整個 ROI 區域之時段；(i)至(l)則顯示保麗龍球後緣逐漸離開 ROI。

圖 4-12 為多顆保麗龍球水槽實驗原始灰階值及平移後的灰階值，藍線和紅線分別表示 ROI_1 和 ROI_2 的灰階值。圖 4-12 (a)為原始灰階值，其中黑色實線表示平移值，該平移量是以前 1 秒內的資料作為時間窗口，計算其平均值。圖 4-12 (b)為平移後兩個 ROI 的灰階值。

(a)



(b)

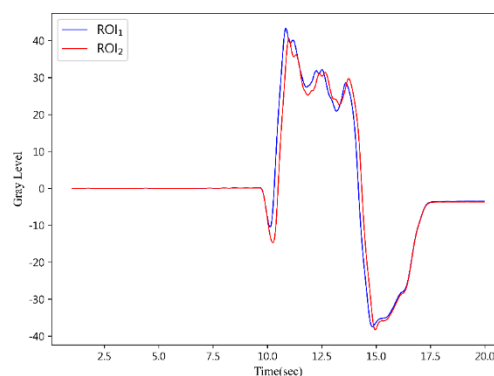


圖 4-12 單顆保麗龍球水槽實驗原始灰階值及平移後的灰階值；(a)原始灰階值、

(b) 平移後灰階值

根據本研究 2.3.4 與 2.4.4 節計算流程，可計算出灰階值、斜率與門檻值時間序列，如圖 4-13 所示。以本研究所提出之時間延遲分析方法所計算之速度，如圖 4-14 所示。

(a) 灰階值

(b) 斜率

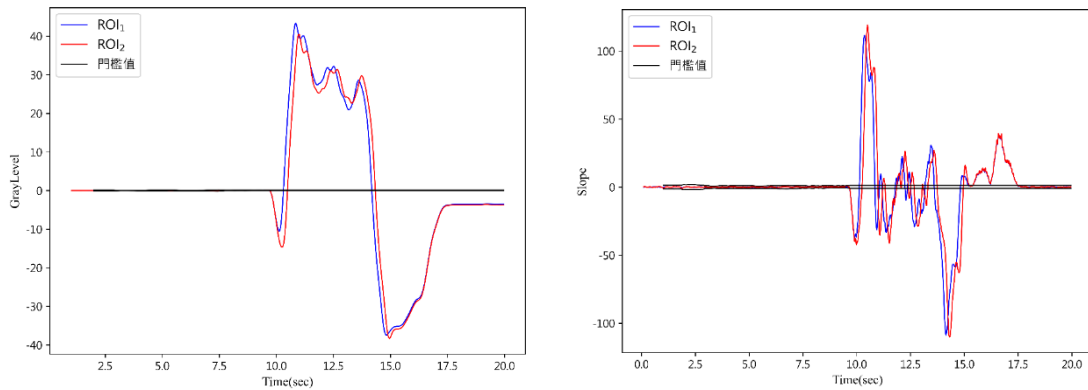


圖 4-13 多顆保麗龍球實驗之平均灰階值與斜率與環境雜訊門檻值分析結果；(a) 灰階值時間序列；(b) 斜率時間序列。

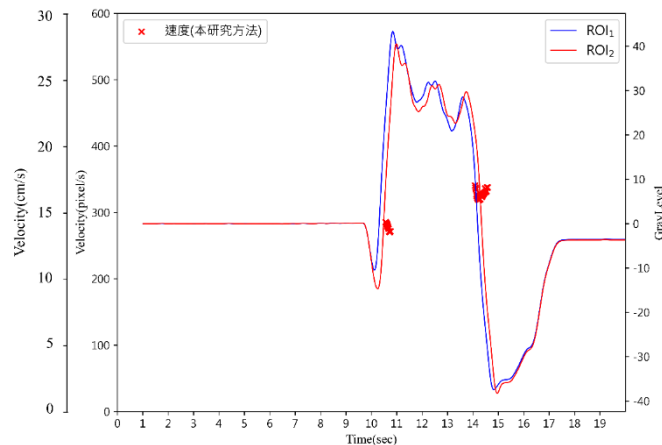


圖 4-14 多顆保麗龍球實驗球實驗下本研究所提出方法分析之速度：橫軸為時間，主縱軸為速度(單位：cm/s 與 pixel/s)，次縱軸為灰階值。藍色叉號為採用 5 筆資料分析所得之速度，橘色叉號為 15 筆資料，綠色叉號為 31 筆資料，紅色叉號為 61 筆資料；藍線與紅線則分別對應於 ROI₁ 與 ROI₂ 的灰階值變化。



4.1.7 以肉眼判別多顆保麗龍球實驗速度

當保麗龍球進入 ROI 區域時，本研究透過肉眼判別其圓心位置，並根據圓心於影格間的位移計算其瞬時速度。此外，為更精確反映多顆保麗龍球同時通過 ROI 的情形，針對不同面積之球體進行面積加權，以計算整體的平均速度。平均速度的計算依據式(4-3)所示，將各球體速度依其在畫面中所佔面積加權平均而得。

以下以第 626 幀之影像為例，說明加權平均速度的實際計算流程：

$$\text{平均速度} = \frac{\sum V_i \times A_i}{\sum A_i} \quad (4-3)$$

其中 V_i 表示編號第 i 顆保麗龍球中心速度， A_i 表示編號第 i 顆保麗龍球面積。

透過相隔 10 幀的影像，計算每顆保麗龍球中心的位移量，以分析其運動軌跡：

圖 4-15 和圖 4-16 分別為第 626 及 636 幀，各保麗龍球中心位置，並以黑點標示。

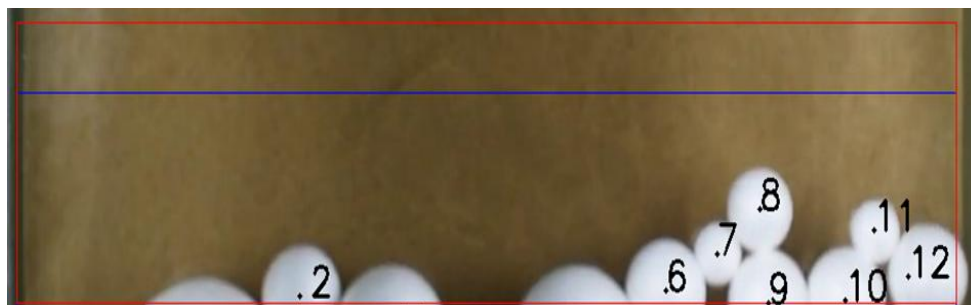


圖 4-15 各保麗龍球在第 626 幀中心位置

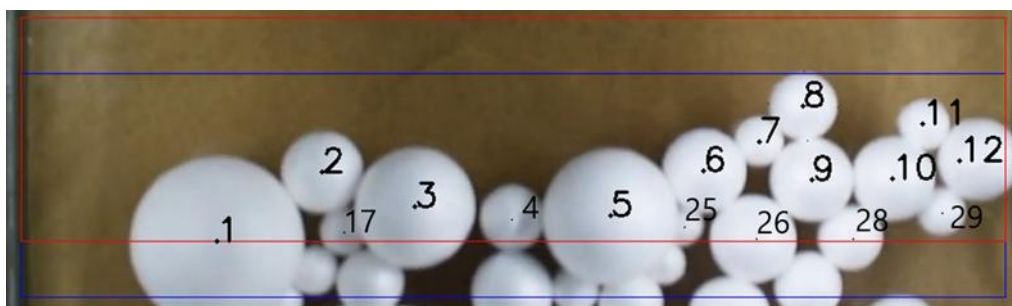


圖 4-16 各保麗龍球在第 636 幀中心位置

計算各顆保麗龍球在 ROI 平行方向上的位移，並將結果記錄於 $(626 + 636)/2 = 631$ 幀上。

表 4-3 各編號保麗龍球中心位移

球編號	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
中心位移(pixel)	58.5	56.5	57	56	56	54.5	54	54	55	54	53
球編號	12	17	25	26	28	29					
中心位移(pixel)	53	57	55	55	54.5	53					

速度計算方式為位移量除以每 10 幀的時間間格(10/60 秒)。

表 4-4 各編號保麗龍球中心速度

球編號	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
質心速度(pixel/s)	351	339	342	336	336	327	324	324	330	324	318
球編號	12	17	25	26	28	29					
質心速度(pixel/s)	318	342	330	330	327	318					

圖 4-17 顯示經由肉眼判別的各保麗龍球面積範圍，代表各編號保麗龍球的面積大小。



圖 4-17 人眼判別的各保麗龍球面積範圍

表 4-5 各編號保麗龍球面積大小

球編號	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
面積(pixel)	4580	9557	7958	2614	8508	4534	1748	3139	4752	4768	1866
球編號	12	17	25	26	28	29					
面積(pixel)	4064	922	742	2675	1619	1587					



最後，依據式(4-3)面積加權計算平均移動速度 $V = \frac{\sum V_i \times A_i}{\sum A_i} = 332.878 \text{ pixel/s}$ ，並

將結果記錄於第 631 幀上。

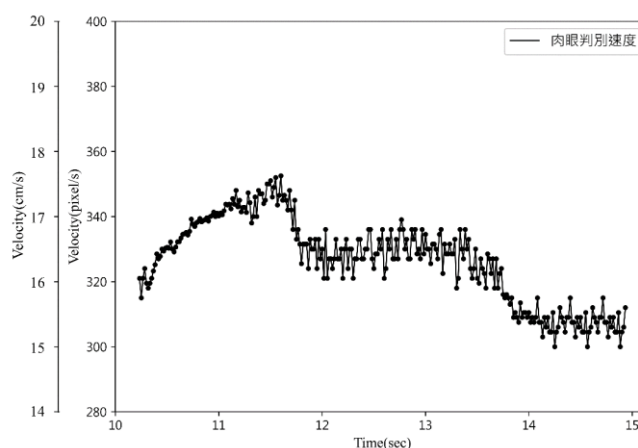


圖 4-18 多顆保麗龍球肉眼判別速度

4.1.8 多顆保麗龍球實驗誤差比較

圖 4-19 顯示多顆保麗龍球實驗中，不同時段之速度誤差比較結果；表 4-6 則列出各時間點的詳細誤差數值。本研究所估算之速度與肉眼判別速度之最大誤差約為-20.22%。從絕對誤差的觀點分析，最大速度誤差約為-3.43 cm/s。於第 10.567 至 10.75 秒期間，保麗龍球進入 ROI，該時段的速度誤差顯著高於第 14.083 至 14.583 秒保麗龍球離開 ROI 時段之誤差，後者誤差約在 13% 以內。

造成此差異的主要原因為，多顆白色保麗龍球同時進入畫面時，易產生明顯反光現象，導致 ROI₁ 與 ROI₂ 平均灰階值的時間延遲變化出現干擾，使得時間延遲配對不易準確反映實際流動速度。相對地，在離開 ROI 階段，反光程度降低，灰階變化較穩定，有助於提升速度推估的準確度。

此外，影片整體亮度的變化亦是一項關鍵因素。由於拍攝時相機的 ISO 值與光圈設定為自動模式，導致不同時間段影像亮度出現不一致情形，此變化亦可能進一步影響 ROI 區域灰階值之穩定性與延遲時間的判斷。

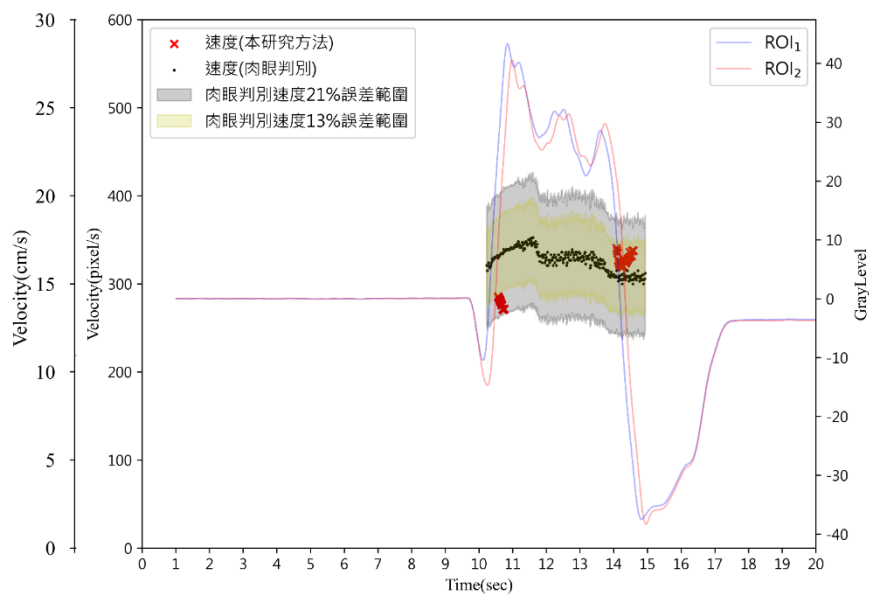
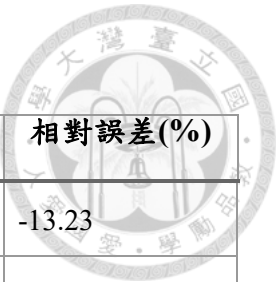
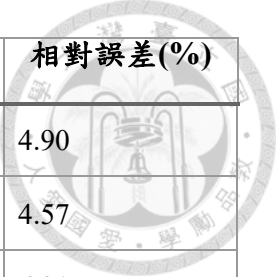


圖 4-19 多顆保麗龍球實驗誤差比較；橫軸為時間，左縱軸為速度其單位分別以 cm/s 和 pixel/s 表示，右縱軸為灰階值，紅色叉號與黑色點分別為偵測速度及肉眼判別速度，藍線和紅線為 ROI₁ 和 ROI₂ 灰階值，灰色區間表示相對誤差 21% 範圍，黃色區間表示相對誤差 13% 範圍。

表 4-6 多顆保麗龍球實驗之速度誤差比較



時間(秒)	本研究方法分析速度(cm/s)	肉眼判別速度(cm/s)	差值(cm/s)	相對誤差(%)
10.567	14.28	16.46	-2.18	-13.23
10.583	14.24	16.53	-2.29	-13.86
10.600	14.18	16.61	-2.43	-14.63
10.617	14.10	16.61	-2.51	-15.12
10.633	14.02	16.67	-2.65	-15.92
10.650	13.93	16.73	-2.80	-16.71
10.667	13.85	16.73	-2.88	-17.24
10.683	13.78	16.75	-2.98	-17.77
10.700	13.56	16.72	-3.16	-18.90
10.717	13.53	16.77	-3.24	-19.34
10.733	13.53	16.96	-3.43	-20.22
10.750	13.57	16.88	-3.31	-19.62
14.083	17.03	15.75	1.28	8.13
14.100	16.87	15.38	1.50	9.75
14.117	16.74	15.38	1.36	8.85
14.133	16.36	15.15	1.21	7.96
14.150	16.24	15.45	0.79	5.10
14.167	16.12	15.30	0.82	5.39
14.183	16.05	15.45	0.60	3.86
14.200	15.99	15.23	0.76	5.02
14.217	15.96	15.23	0.73	4.81
14.233	15.94	15.53	0.42	2.69
14.250	15.95	15.00	0.95	6.35



時間(秒)	本研究方法分析速度(cm/s)	肉眼判別速度(cm/s)	差值(cm/s)	相對誤差(%)
14.267	15.97	15.23	0.75	4.90
14.283	16.00	15.30	0.70	4.57
14.350	16.17	15.23	0.94	6.21
14.367	16.22	15.45	0.77	4.98
14.383	16.28	15.45	0.83	5.38
14.400	16.34	15.75	0.59	3.77
14.417	16.40	15.38	1.03	6.70
14.433	16.45	15.38	1.07	6.98
14.450	16.49	15.15	1.34	8.86
14.467	16.52	15.45	1.07	6.94
14.483	16.80	15.30	1.50	9.79
14.500	16.56	15.45	1.11	7.16
14.517	16.58	15.23	1.36	8.90
14.533	16.60	15.23	1.37	9.02
14.550	16.88	15.53	1.36	8.74
14.567	16.88	15.00	1.88	12.54
14.583	16.88	15.23	1.66	10.87



4.2 砂石流動實驗

透過室內水槽實驗模擬真實土石流流動情況。實驗中使用體積為 $0.2m^3 \pm 10\%$ 的小粒徑石頭作為原料，並混合適量的水。從一座長 10 公尺、坡度 24 度的矩形水槽釋放，並以相機記錄其流動過程。透過此實驗來驗證方法的可行性。此外，為評估方法的準確性，本研究比較該方法偵測出的流速與肉眼判斷的真實流速，並計算相對誤差進行分析。

4.2.1 實驗器材與配置

本次實驗使用了一座矩形人工斷面水槽，尺寸為長 10 公尺、寬 0.5 公尺、高 0.5 公尺，坡度調整為 24 度。水槽兩側採用透明強化玻璃，便於相機記錄土石流的側視影像。上方貼有黑白格比例尺，每格代表 10 公分的單位長度。

在距離水槽上游 2.9 公尺處設有氣壓控制閘門，將水槽分為「土石流料源儲存區」與「土石流流動區」。此外，為了模擬天然底床環境，水槽底部鋪設了厚度達 9 公分的鵝卵石與砂石，以提供更接近真實地形的流動條件。

表 4-7 砂石流動實驗的相機參數

參數	數值
感光元件 CMOS 尺寸	23.5mm × 15.6mm
解析度	1920 × 1080
影格速率(幀率)	25fps



圖 4-20 實驗水槽；尺寸為長 10 公尺、寬 0.5 公尺、高 0.5 公尺。

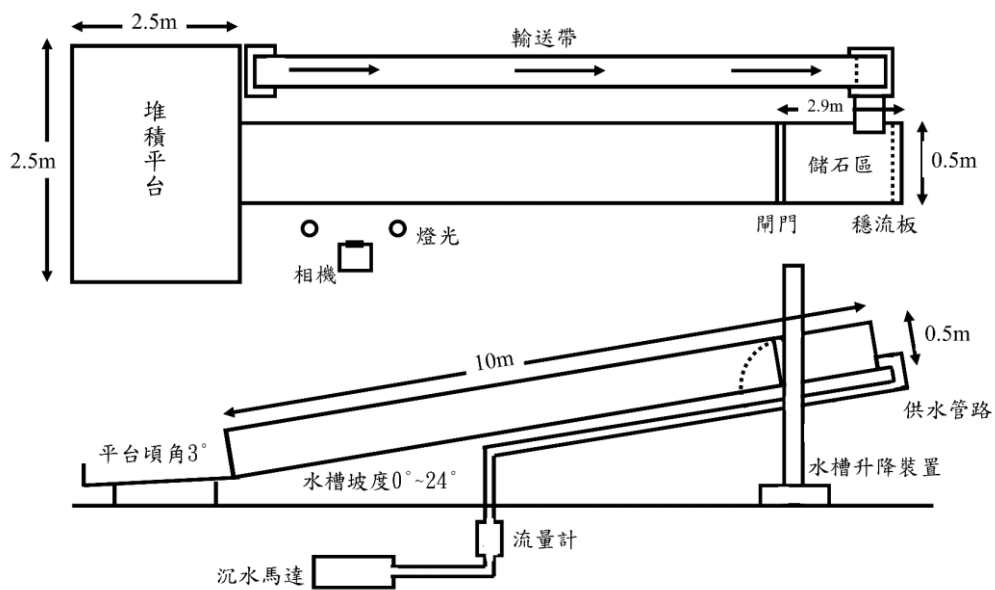


圖 4-21 相機架設配置；圖片上方為水槽俯視圖，下方為水槽側視圖。

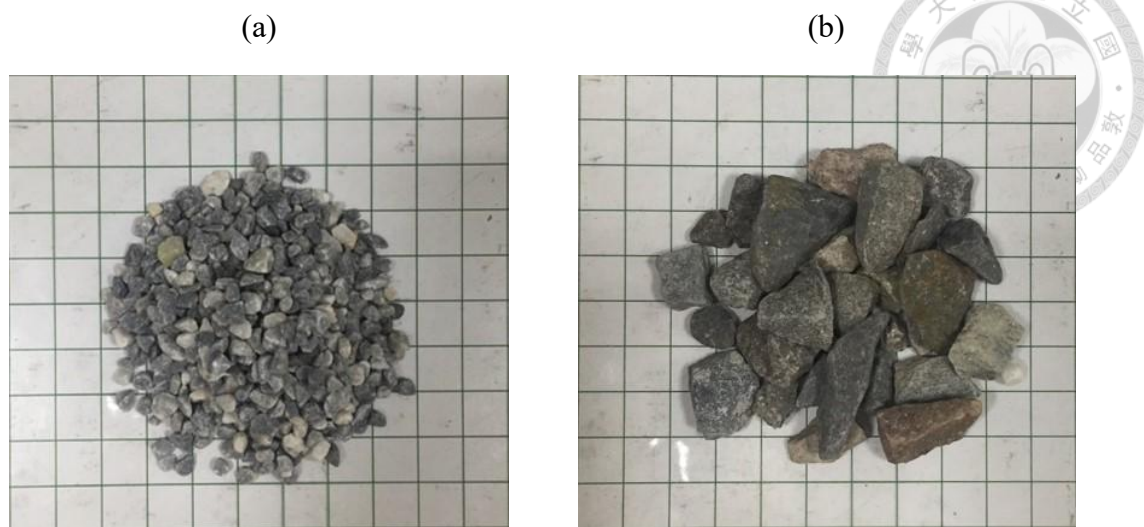


圖 4-22 試驗使用之砂石材料；圖片中網格尺寸為 1 公分，(a)以篩砂時停留於 10 號篩(2mm)的石頭做為小粒徑材料，其平均粒徑為 3.34mm，(b)停留於 3/8inch(9.5mm)篩網上的石頭做為大粒徑材料，其平均粒徑為 11.65mm。

4.2.2 實驗步驟

相機位置架設好後，將水槽坡度調整至 24° ，並先使用灑水方式濕潤槽底鵝卵石與砂石。接著，透過輸送帶將土石料運送至水槽頂部的土石料源儲存區，並開啟抽水馬達將水供應至土石料源儲存區，與土石粒料混合。待土石料源區的水開始溢出水槽後，開啟閘門，使其往下流動。當土石粒料完全流下水槽後，關閉抽水馬達，並結束錄影。

4.2.3 以本研究方法分析速度

圖 4-23 顯示本實驗所選取之感興趣區域 (Region of Interest, ROI) 於影像中的空間配置。藍色框線標示 ROI_1 ，紅色框線標示 ROI_2 。兩個 ROI 的尺寸為 $200 \times 300\text{pixel}$ ，兩者間距為 100 pixel。根據影像標定結果，影像中每個像素對應實際距離為 0.083 公分。

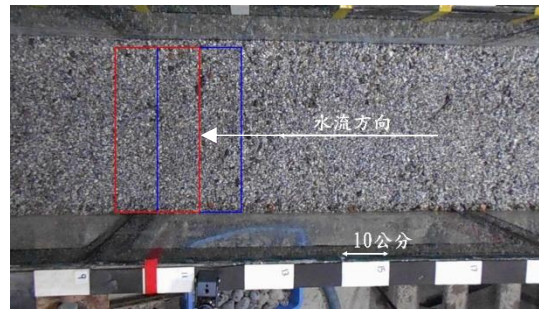
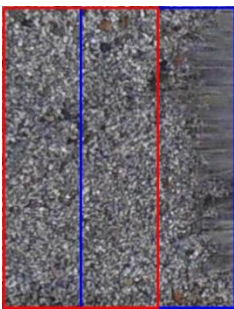
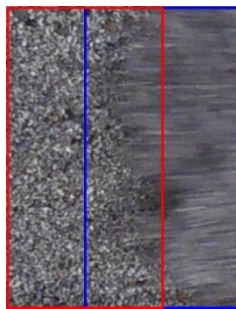


圖 4-23 砂石流動實驗 ROI 位置

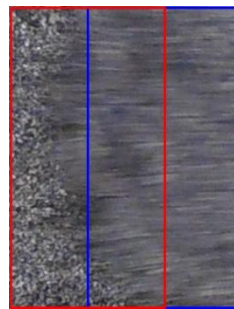
(a) 第 12.6 秒



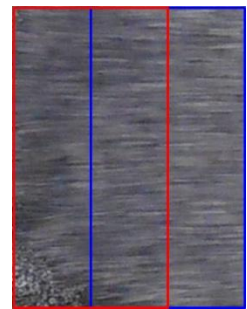
(b) 第 12.68 秒



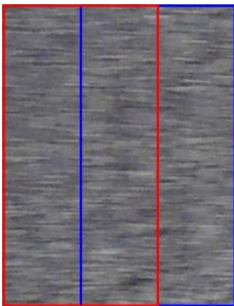
(c) 第 12.76 秒



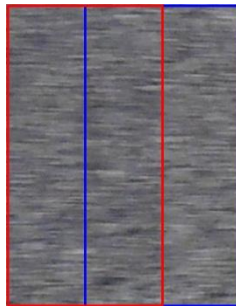
(d) 第 12.84 秒



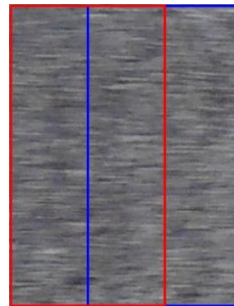
(e) 第 14.6 秒



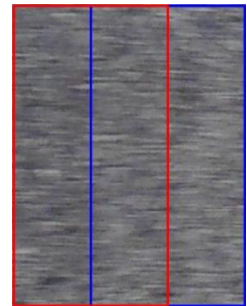
(f) 第 14.64 秒



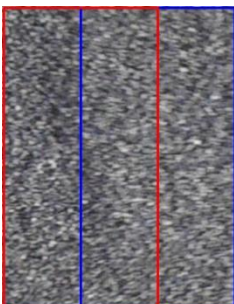
(g) 第 14.68 秒



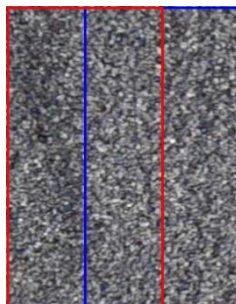
(h) 第 14.72 秒



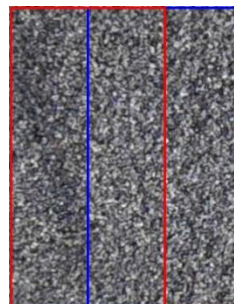
(i) 第 16 秒



(j) 第 16.2 秒



(k) 第 16.4 秒



(l) 第 16.6 秒

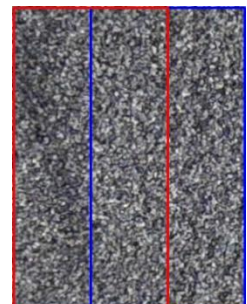


圖 4-24 砂石流動實驗影像畫面；藍線和紅線分別為 ROI₁ 和 ROI₂ 位置，ROI 大小為 $200 \times 300\text{pixel}$ ，彼此間距 100pixel ；(a)至(d)為石流前鋒進入 ROI 的時段；(e)至(h) 為整個畫面皆被持續流動之土石流覆蓋；(i)至(l) 為土石流逐漸減速並趨於停止的階段。

圖 4-25 為砂石流動實驗原始灰階值及平移後的灰階值，藍線和紅線分別表示 ROI₁ 和 ROI₂ 的灰階值。圖 4-25 (a) 為原始灰階值，其中黑色實線表示平移值，該平移量是以前 1 秒內的資料作為時間窗口，計算其平均值。圖 4-25 (b) 為平移後兩個 ROI 的灰階值。

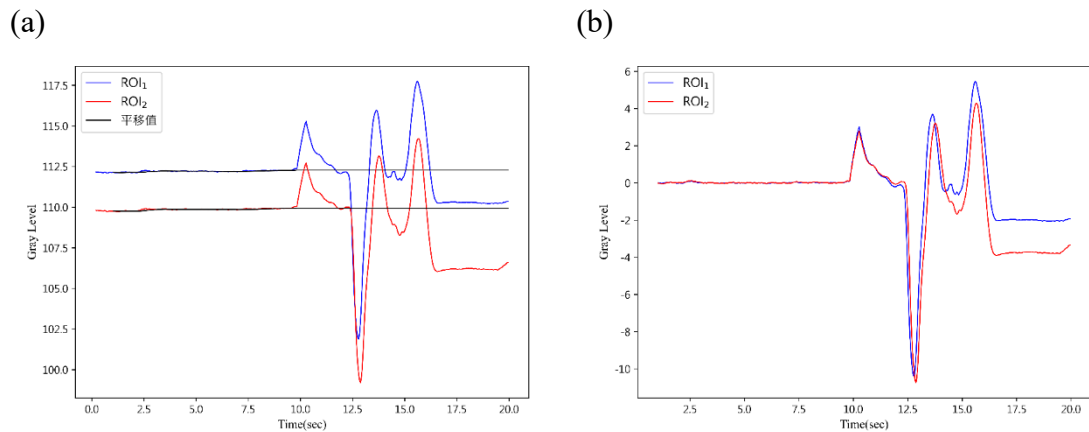


圖 4-25 砂石流動實驗原始灰階值及平移後的灰階值；(a)原始灰階值、(b)平移後灰階值

根據本研究 2.3.4 與 2.4.4 節計算流程，可計算出灰階值、斜率與門檻值時間序列，如圖 4-26 所示。以本研究所提出之時間延遲分析方法所計算之速度，如圖 4-27 所示。

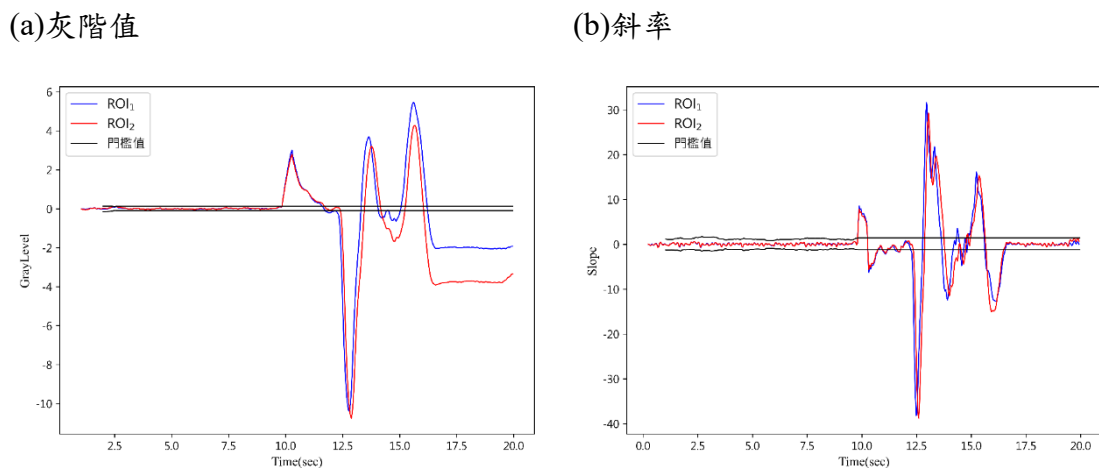


圖 4-26 砂石流動實驗之平均灰階值與斜率與環境雜訊門檻值分析結果；(a)灰階值時間序列；(b)斜率時間序列。

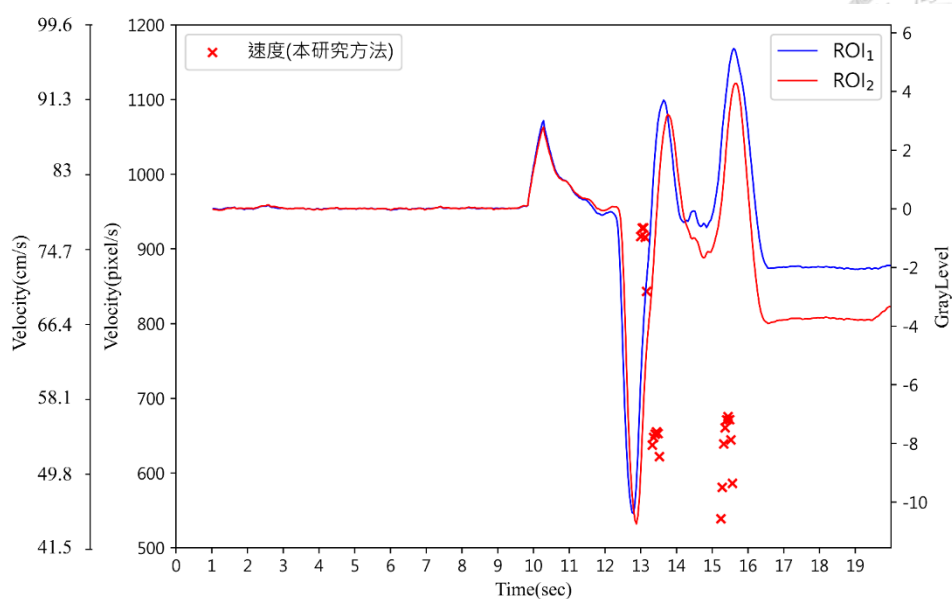


圖 4-27 砂石流動實驗下本研究所提出方法分析之速度:橫軸為時間，主縱軸為速度(單位：cm/s 與 pixel/s)，次縱軸為灰階值。紅色叉號代表本研究所估算之速度結果；藍線與紅線則分別對應於 ROI₁ 與 ROI₂ 的灰階值變化。

4.2.4 以肉眼判別速度

當土石流進入 ROI 時，透過肉眼追蹤特定土石顆粒的位移，並根據其變化計算移動速度。最後，對所有追蹤顆粒的速度進行加總並取平均，以獲得整體平均速度。以下以第 320 幀影像為例，說明平均速度的計算過程：

透過肉眼標記土石流顆粒，並計算顆粒移動位移，由相隔時間計算速度。圖 4-28 綠色點為標記的顆粒。

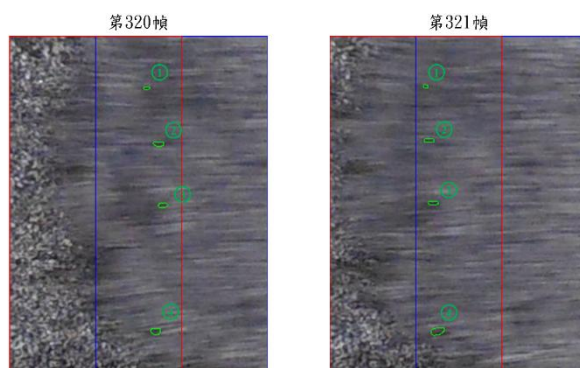


圖 4-28 肉眼標記顆粒位置-砂石流動實驗

表 4-8 個顆粒位移(第 320 幀至 321 幀)-砂石流動實驗

顆粒編號	1	2	3	4
位移(pixel)	49	57	60	44

速度計算方式為位移量除以每 1 幀的時間間格(1/25 秒)。

表 4-9 個顆粒移動速度(第 320 幀至 321 幀)-砂石流動實驗

顆粒編號	1	2	3	4
速度(pixel/s)	1225	1425	1500	1100

最後，進行加總並取平均。計算平均移動速度 $V=1312.5\text{pixel/s}$ ，並將結果記錄於第 321 幀上。

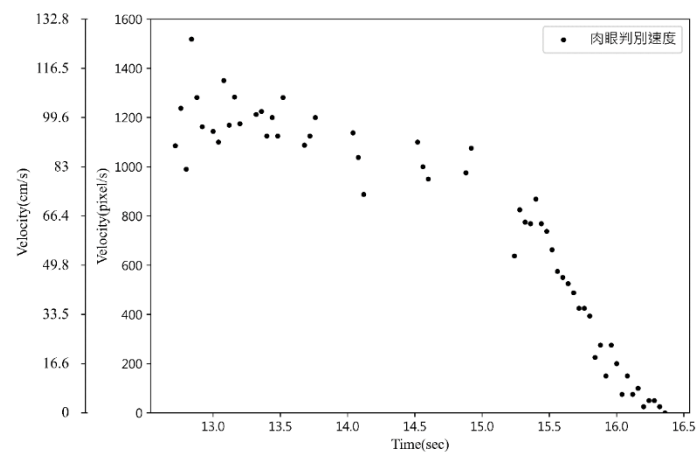


圖 4-29 砂石流動實驗肉眼判別速度

4.2.5 誤差比較

圖 4-30 顯示砂石流動實驗中，不同時段之肉眼判別速度與本研究方法所推估速度之比較結果；

表 4-10 則列出各時間點的詳細誤差數值。在第 10 至 11 秒期間，ROI 內之灰階值出現明顯上升，此現象與相機晃動所導致的整體影像亮度變化有關。於 13 至 13.52 秒期間，本研究方法所推估之速度與肉眼判讀結果之最大誤差達-51.46%(絕對誤差 54.73 cm/s)。此階段為砂石自水槽上方沖下初始階段，肉眼觀察速度約介於

93 至 107 cm/s。另在 15.24 至 15.48 秒期間，砂石流動速度趨緩，肉眼觀察約為 53 至 72 cm/s，觀察到速度誤差最大達-29.6%(絕對誤差 20.27 cm/s)。

從以上觀察推論，造成上述誤差的主要原因，與流況特性相關。砂石自水槽上方沖下的初始階段，流速較快，顆粒邊界模糊，且砂石表面夾帶水分，易產生反光現象，進而干擾 ROI 內灰階值的變化，影響延遲時間配對的準確性，導致本研究方法於此時段傾向低估實際流速。相對地，在砂石流動趨緩的時段，顆粒輪廓較為清晰，可提高延遲時間配對的準確性，使得整體誤差相對較小(誤差約-29.6%以內)。

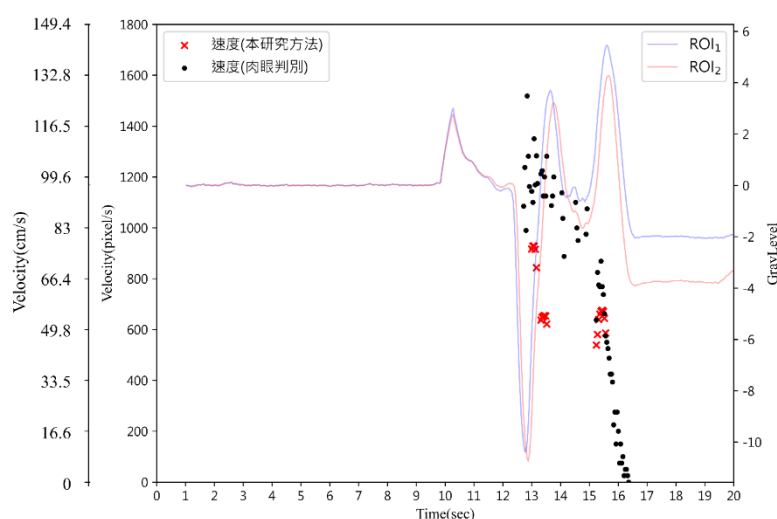
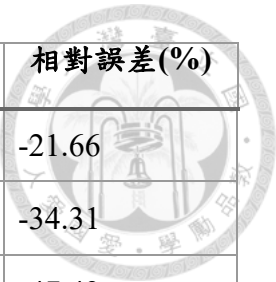


圖 4-30 砂石流動實驗分析速度比較；橫軸為時間，左縱軸為速度其單位分別以 cm/s 和 pixel/s 表示，右縱軸為灰階值，紅色叉號與黑色點分別為偵測速度及肉眼判別速度，藍線和紅線為 ROI₁ 和 ROI₂ 灰階值。

表 4-10 砂石流動實驗之速度誤差比較

時間(秒)	本研究方法分析速度(cm/s)	肉眼判別速度(cm/s)	差值(cm/s)	相對誤差(%)
13	76.07	94.93	-18.86	-19.87
13.04	77.03	91.30	-14.27	-15.63
13.08	77.04	112.05	-35.01	-31.25



時間(秒)	本研究方法分析速度(cm/s)	肉眼判別速度(cm/s)	差值(cm/s)	相對誤差(%)
13.12	75.99	97.01	-21.02	-21.66
13.16	69.98	106.52	-36.54	-34.31
13.32	52.91	100.64	-47.73	-47.43
13.36	53.77	101.68	-47.91	-47.12
13.4	54.11	93.38	-39.26	-42.05
13.44	54.38	99.60	-45.22	-45.40
13.48	54.19	93.38	-39.18	-41.96
13.52	51.61	106.34	-54.73	-51.46
15.24	44.73	52.91	-8.19	-15.47
15.28	48.20	68.48	-20.27	-29.60
15.32	53.03	64.33	-11.29	-17.56
15.36	54.84	63.81	-8.97	-14.06
15.4	55.70	72.11	-16.41	-22.76
15.44	56.08	63.81	-7.73	-12.11
15.48	55.73	61.21	-5.48	-8.96

Chapter5 現地影像分析



本章節擬透過兩場實際土石流事件之影像資料，驗證本研究所提出之以平均灰階值與斜率配對進行表面流速分析的方法。兩組案例分別為：2004 年敏督利颱風期間所拍攝之影像（以下簡稱案例一）與 2024 年凱米颱風事件影像（案例二）。

案例一拍攝地點位於南投縣信義鄉神木村之愛玉子溪，該溪為濁水溪流域其中的支流-陳有蘭溪的上游，影像由水保署固定式監測攝影機取得。案例二拍攝位置為高雄市桃源區玉穗溪，亦由固定式攝影機擷取，玉穗溪為荖濃溪主要支流之一。

本章將比較各案例中，藉由肉眼判別影像中土石流顆粒的移動速度與本研究方法所估算之流速做分析與討論。

5.1 案例一:2004 年敏督利颱風

此案例為 2004 年 7 月 2 日發生於愛玉子溪的土石流事件，圖 5-1 為監測影像，由右岸朝上游拍攝，ROI₁ 及 ROI₂ 分別為圖中藍色及紅色框線。影像尺寸為寬 720 個像素、高 480 個像素；影格速率為 30fps。土石流由影像左上方往右下方流動。

(a) 第 5 秒



(b) 第 10 秒



(c) 第 15 秒



(d) 第 30 秒



(e) 第 35 秒



(f) 第 40 秒



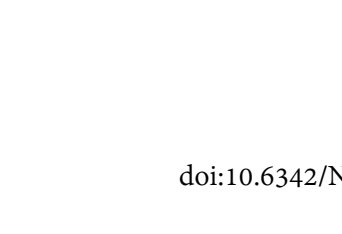
(g) 第 80 秒



(h) 第 90 秒



(i) 第 100 秒



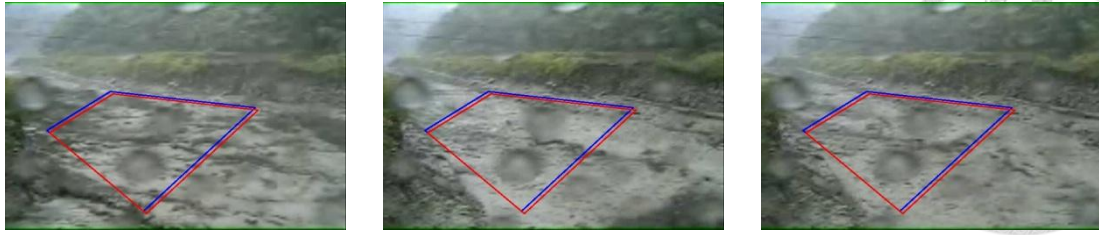


圖 5-1 愛玉子溪影像(2004 年 7 月 2 日)

5.1.1 肉眼判別速度

當土石流進入 ROI 時，透過肉眼追蹤特定土石顆粒的位移，並根據其變化計算移動速度。最後，對所有追蹤顆粒的速度進行加總並取平均，以獲得整體平均速度。以下以第 1370 幀影像為例，說明平均速度的計算過程：

以肉眼標示之土石流特定土石顆粒圖 5-2 綠色點所示。

(a)第 1370 幀

(b)第 1380 幀



圖 5-2 案例一肉眼標示特定土石顆粒

透過比較相隔 10 幀影像中各顆粒的差異，可獲得各顆粒的位移量，並以對應時間間隔（10 幀 = 10/30 秒）計算其速度。將所有顆粒之速度加總後取平均，即可求得整體平均速度，並作為本研究肉眼判別速度之參考標準。

5.1.2 數據分析與結果

圖 5-3 為案例一原始灰階值及平移後的灰階值，藍線和紅線分別表示 ROI₁ 和 ROI₂ 的灰階值。圖 5-3 (a)為原始灰階值，其中黑色實線表示平移值，該平移量是



以前 1 秒內的資料作為時間窗口，計算其平均值。圖 5-3 (b)為平移後兩個 ROI 的灰階值。

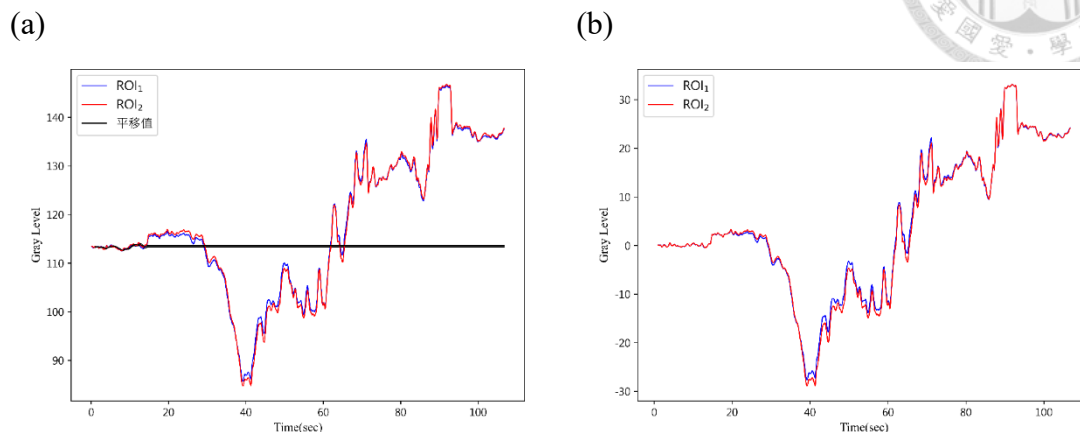


圖 5-3 案例一原始灰階值及平移後的灰階值；(a)原始灰階值、(b)平移後灰階值

根據本研究 2.3.4 與 2.4.4 節計算流程，可計算出灰階值、斜率與門檻值時間序列，如圖 5-4 所示。以本研究所提出之時間延遲分析方法所計算之速度與肉眼觀測速度比較，如圖 5 3 所示。

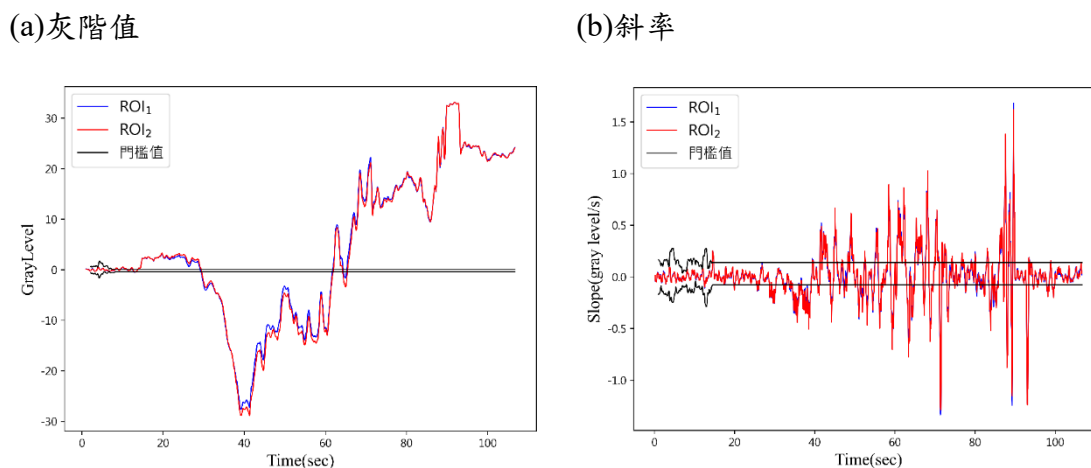


圖 5-4 案例一之平均灰階值與斜率與環境雜訊門檻值分析結果；(a)灰階值時間序列；(b)斜率時間序列。

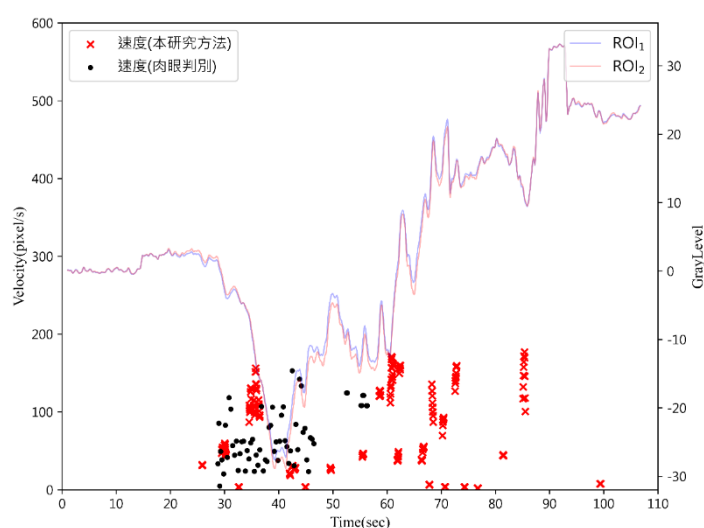
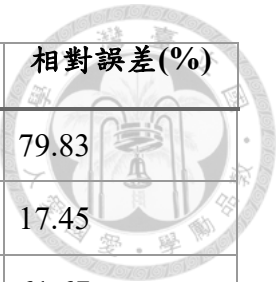


圖 5-5 案例一分析速度比較；橫軸為時間，左縱軸為速度其單位以 pixel/s 表示，右縱軸為灰階值，紅色叉號與黑色點分別為本研究方法分析速度及肉眼判別速度，藍線和紅線為 ROI₁ 和 ROI₂ 灰階值。

由於案例一之土石流事件中伴隨大量水花與土石顆粒翻滾，導致部分時段難以以肉眼明確判別顆粒流速。表 5-1 詳列其中 8 個可由肉眼判別流速，且可由本研究方法成功估算速度之時段，並比較兩者之速度誤差。其中，在第 42.833 秒之分析結果，其誤差為 17.45%，相較於其他時段為偏低，顯示此時土石流流況較為穩定，為前鋒通過河道區域後之狀態。相對地，於 30 至 40 秒間，土石流前鋒進入 ROI 區域，伴隨明顯水花濺起現象，可能對本研究之時間延遲配對準確性造成影響，進而導致部分分析結果出現誤判情形。

表 5-1 案例一之速度誤差比較

時間(秒)	本研究方法分析速度(pixel/s)	肉眼判別速度(pixel/s)	差值(pixel/s)	相對誤差(%)
29.5	38.36	51.26	-12.90	-33.64
30.167	82.85	48.69	34.15	41.23
34.833	60.43	130.84	-70.40	-116.50
35.5	23.51	105.82	-82.31	-350.17
36.5	51.32	96.05	-44.74	-87.18



時間(秒)	本研究方法分析速度(pixel/s)	肉眼判別速度(pixel/s)	差值(pixel/s)	相對誤差(%)
42.5	152.90	30.85	122.06	79.83
42.833	30.99	25.58	5.41	17.45
55.5	121.08	46.41	74.67	61.67

5.2 案例二:2024 年凱米颱風

此案例為 2024 年 7 月 24 日發生於玉穗溪的土石流事件，圖 5-6 為監測影像，由右岸朝中游拍攝，ROI₁ 及 ROI₂ 分別為圖中藍色及紅色框線。影像尺寸為寬 1280 個像素、高 720 個像素；影格速率為 25fps。土石流由影像左方流動至右方。

(a) 第 0 秒



(b) 第 2 秒



(c) 第 4 秒



(d) 第 5 秒



(e) 第 6 秒



(f) 第 7 秒



圖 5-6 玉穗溪影像(2024 年 7 月 24 日)；ROI 大小為 150×80 pixel

5.2.1 肉眼判別速度

當土石流進入 ROI 時，透過肉眼追蹤土石流的前鋒，並根據其變化計算計算各前鋒點在 ROI 平行方向上的移動速度。最後，對所有前鋒點的速度進行加總並

取平均，以獲得整體平均速度。以下以第 173 幀影像為例，說明平均速度的計算過程：

以肉眼標示之土石流前鋒位置如圖 58 綠色實線所示。圖 59 為第 421 與第 431 幀土石流前鋒各座標點位置。

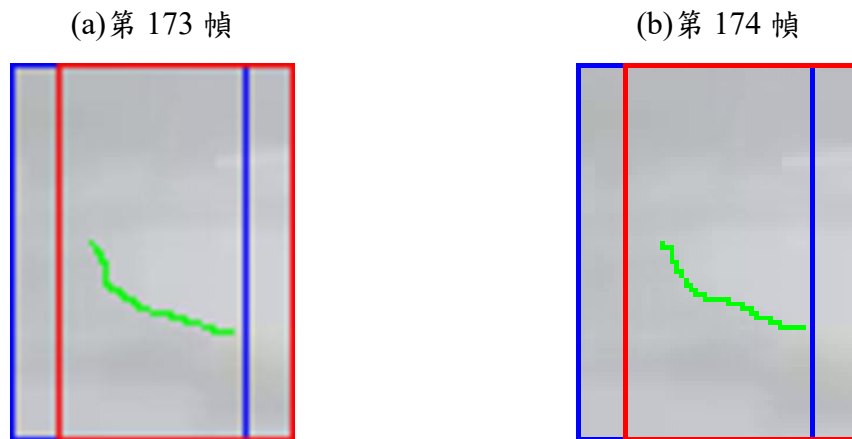


圖 5-7 案例二肉眼標示前鋒位置(綠色實線)

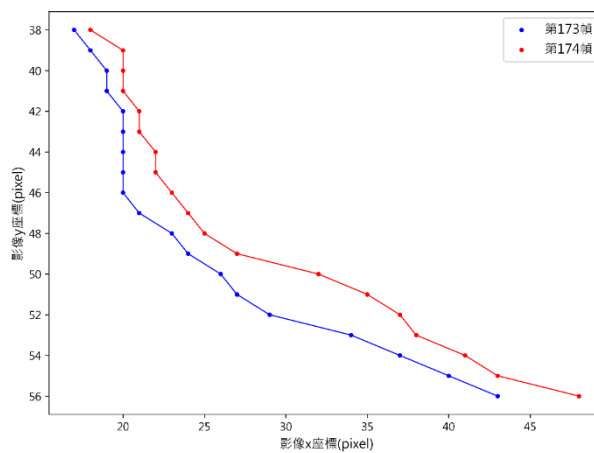


圖 5-8 案例二土石流前鋒座標

透過比較相隔 1 幀影像中前鋒位置的差異，可獲得各前鋒點於 ROI 平行方向上的位移量，並以對應時間間隔（1 幀 = 1/25 秒）計算其速度。將所有前鋒點之速度加總後取平均，即可求得整體平均速度，並作為本研究肉眼判別速度之參考標準。



5.2.2 數據分析與結果

圖 5-9 為案例二原始灰階值及平移後的灰階值，藍線和紅線分別表示 ROI₁ 和 ROI₂ 的灰階值。圖 5-9 (a) 為原始灰階值，其中黑色實線表示平移值，該平移量是以前 1 秒內的資料作為時間窗口，計算其平均值。圖 5-9 (b) 為平移後兩個 ROI 的灰階值。

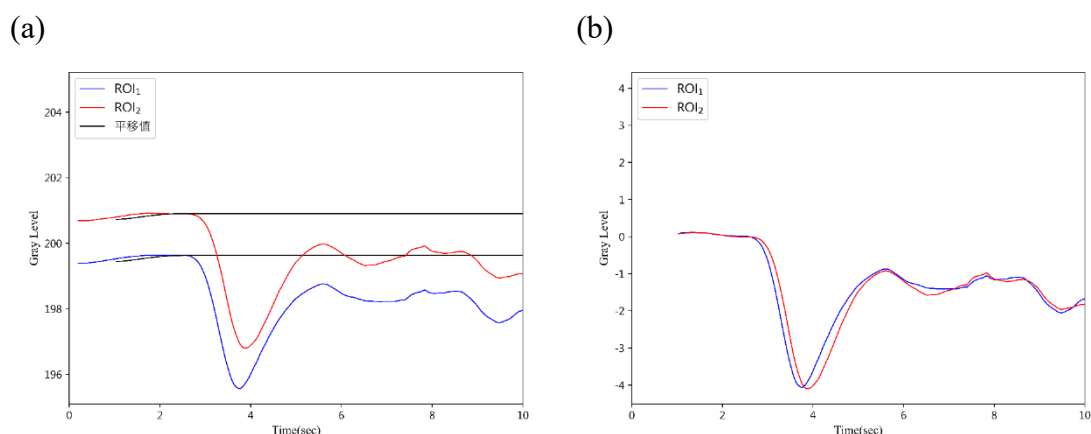


圖 5-9 案例二原始灰階值及平移後的灰階值；(a)原始灰階值、(b)平移後灰階值

根據本研究 2.3.4 與 2.4.4 節計算流程，可計算出灰階值、斜率與門檻值時間序列，如圖 5-10 所示。以本研究所提出之時間延遲分析方法所計算之速度與肉眼觀測速度比較，如圖 5-11 所示。

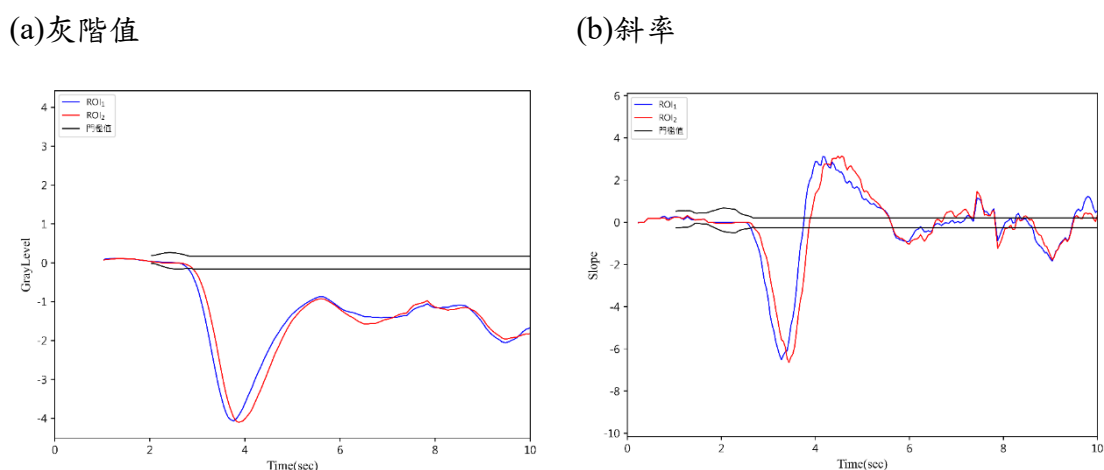


圖 5-10 案例二之平均灰階值與斜率與環境雜訊門檻值分析結果；(a)灰階值時間序列；(b)斜率時間序列。

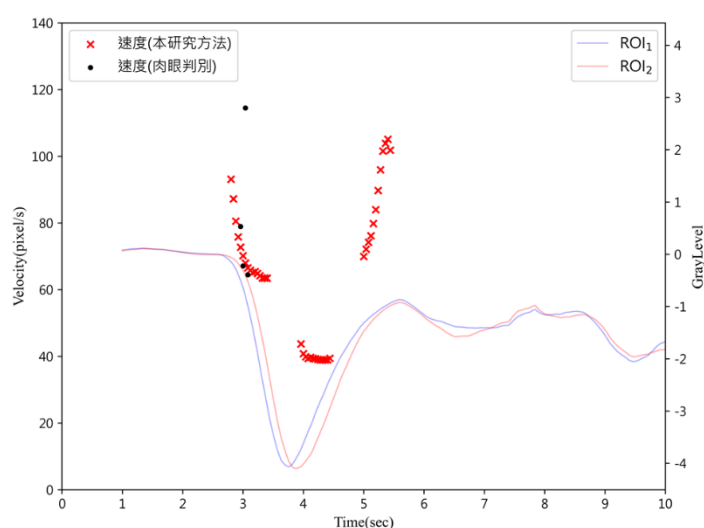


圖 5-11 案例二分析速度比較；橫軸為時間，左縱軸為速度其單位以 pixel/s 表示，右縱軸為灰階值，紅色叉號與黑色點分別為本研究方法分析速度及肉眼判別速度，藍線和紅線為 ROI₁ 和 ROI₂ 灰階值。藍線和紅線為 ROI₁ 和 ROI₂ 灰階值。

案例二中，攝影機所拍攝之河道範圍較小，且拍攝期間常有霧氣，增加了以肉眼觀察土石流移動速度的困難。表 5-2 列出四個可由肉眼辨識流速，且本研究方法亦成功估算速度的時段，並比較其速度誤差。約在第 3 秒時，土石流前鋒進入 ROI，誤差約為 30.69%。由於影像中河道僅寬約 45 個像素，土石流佔比有限，肉眼判別可能存在較大誤差，亦可能導致上述差異。

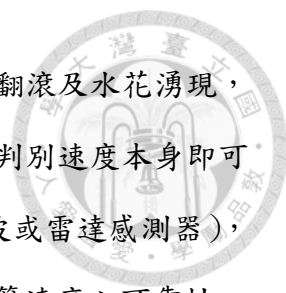
表 5-2 案例二之速度誤差比較

時間(秒)	本研究方法分析速度(pixel/s)	肉眼判別速度(pixel/s)	差值(pixel/s)	相對誤差(%)
2.96	90.89	78.95	11.94	15.13
3	87.70	67.11	20.59	30.69
3.04	84.95	114.47	-29.52	-25.79
3.08	83.17	64.47	18.7	29

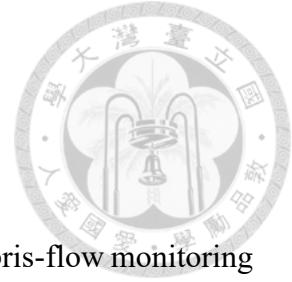
Chapter6 結論與建議



1. 本研究將感興趣區域(Region of Interest, ROI)內所有土石顆粒視為一個整體，並假設其於時間差 ΔT 內平均向下游發生整體位移 L (即 ROI_1 至 ROI_2)。即使顆粒之間可能存在個別加速度或不規則的運動行為，皆以區域內的平均運動進行處理與分析。因此，本研究重點在於分析特定區域(ROI 範圍)於特定時段(時間差 ΔT)內的平均表面流速。
2. 在理想狀況下進行之數值模擬實驗(無背景光影變化、物體表面亦不受光影干擾)，本研究方法可成功推估速度，其相對誤差低於-1.41%。此結果顯示，當事件由 ROI_1 傳遞至 ROI_2 時，灰階值與斜率的變化可有效代表該區域的特徵傳遞，並能透過本研究所提出之平均灰階值與斜率配對法，準確地估算流速。
3. 於保麗龍球水槽實驗中，球體邊界明顯，且顆粒無翻滾跳動，其相對誤差小於20.22%，相較於砂石流動實驗具有更高之準確性。而於砂石流動實驗中，由於砂石顆粒表面含水，常伴隨反光現象，且流動快速時顆粒邊界不明顯，導致最高誤差達-51.46%。整體而言，當顆粒輪廓清楚且流況穩定時，本研究方法可得較低之速度誤差。
4. 在案例一之現地影像中，最小誤差為17.45%；然而，由於影像中頻繁出現水滴、雨珠與水花濺起，並伴隨土石顆粒翻滾，雖然灰階值時間序列可呈現 ROI_1 與 ROI_2 間的時間延遲，但受環境條件與流況影響，導致延遲時間不易準確代表事件的實際傳遞，故出現多筆高誤差或誤判情形。
5. 案例二之現地影像雖可觀察到明顯的土石流前鋒，但受限於當地常見之霧氣影響，難以以肉眼準確判別其前鋒邊緣像素，導致以肉眼估算之流速可能存在較大誤差。相較之下，本研究方法所分析之流速與肉眼判別結果之誤差介於-25%至30%之間，整體表現優於案例一。

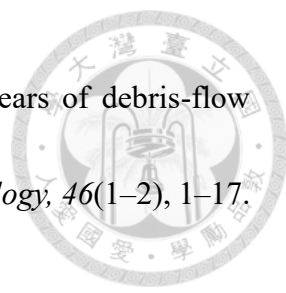
- 
6. 事實上，針對如案例一之真實土石流事件，由於土石顆粒翻滾及水花湧現，即使以肉眼亦難以準確判別個別顆粒運動狀況，因此肉眼判別速度本身即可能含有誤差。未來若能輔以其他監測設備（如地聲、超音波或雷達感測器），可作為速度資料比對依據，以進一步驗證本研究方法所估算速度之可靠性。
 7. 此外，本研究尚未針對輸入影像進行前處理操作，如影像增強、濾波處理和正射校正等。後續研究可探討引入上述影像處理程序是否有助於提升平均灰階值與斜率配對法在速度估算上的準確度與穩定性。
 8. 本研究方法於硬體規格為 CPU: Intel Core i5-10300H @ 2.5GHz、RAM: 16GB 及 GPU: NVIDIA GeForce GTX 1650 Ti (4GB)的系統上，每秒可處理約 38 幀解析度為 1920×1080 之影像，顯示其具備良好之處理效能與即時潛力。
 9. 本研究所提出之時間延遲分析方法雖在模擬影像中表現穩定，但應用於現地監測影像時，仍存在侷限性。首先，現地影像常受天候、光照變化與攝影設備設定（如曝光、ISO、自動白平衡）等因素影響，導致 ROI 區域中灰階值變化不僅來自物體運動，亦可能包含環境光源變動所造成之非目標雜訊，進而影響時間延遲判斷之準確性。其次，土石流等自然現象中，流體表面常包含高反光水面、漂浮物或不同粒徑之混合物，造成 ROI 灰階時間序列不穩定。此外，現地影像中常出現雜草、石塊與遮蔽物等干擾，若未能妥善排除，易導致 ROI 設定不準確，影響後續流速推估。

參考文獻



- [1] Arattano, M., & Marchi, L. (2008). Systems and sensors for debris-flow monitoring and warning. *Sensors*, 8(4), 2436–2452. <https://doi.org/10.3390/s8042436>
- [2] Fujita, I., Muste, M., & Kruger, A. (1998). Large-scale image velocimetry for flow analysis in hydraulic applications. *Journal of Hydraulic Research*, 36(3), 397-414. <https://doi.org/10.1080/00221689809498626>
- [3] Fujita, I., Watanabe, H., & Tsubaki, R. (2007). Development of a non-intrusive and efficient flow monitoring technique: The space-time image velocimetry (STIV). *International Journal of River Basin Management*, 5(2), 105–114. <https://doi.org/10.1080/15715124.2007.9635310>
- [4] Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2018). *Digital image processing* (4th ed.). Pearson.
- [5] Hearn, D., & Baker, M. P. (1997). *Computer graphics: C version* (2nd ed.). Prentice Hall.
- [6] Hu, H., Saga, T., Kobayashi, T., & Taniguchi, N. (1998). Evaluation of the cross correlation method by using PIV standard images. *Journal of Visualization*, 1(1), 87–94. <https://doi.org/10.1007/BF03182477>

- 
- [7] Itakura, Y., Inaba, H., & Sawada, T. (2005). A debris-flow monitoring devices and methods bibliography. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5(6), 971–977.
<https://doi.org/10.5194/nhess-5-971-2005>
- [8] Jacquemart, M., Meier, L., Graf, C., & McArdeell, B. W. (2017). 3D dynamics of debris flows quantified at sub-second intervals from laser profiles. *Natural Hazards*, 89(2), 785–800. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2993-1>
- [9] Kim, Y. (2006), Uncertainty analysis for non-intrusive measurement of river discharge using image velocimetry, Ph.D. thesis, Univ. of Iowa, Iowa City.
- [10] Kim, Y., Fujita, I., Hasegawa, M., & Yoon, J.-S. (2022). Measurement of debris flow velocity in flume using normal image by space-time image velocimetry incorporated with machine learning. *Measurement*, 199, 111218.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111218>
- [11] Le Boursicaud, R., Pénard, L., Hauet, A., Thollet, F., & Le Coz, J. (2015). Gauging extreme floods on YouTube: Application of LSPIV to home movies for the post-event determination of stream discharges. *Hydrological Processes*, 30(1), 90–105.
<https://doi.org/10.1002/hyp.10532>
- [12] Le Coz, J., Hauet, A., Pierrefeu, G., Dramais, G., & Camenen, B. (2010). Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers. *Journal of Hydrology*, 394(1–2), 42–52.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.05.049>

- 
- [13] Marchi, L., Arattano, M., & Deganutti, A. M. (2002). Ten years of debris-flow monitoring in the Moscardo Torrent (Italian Alps). *Geomorphology*, 46(1–2), 1–17.
[https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00162-3](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00162-3)
- [14] Muste, M., Fujita, I., & Hauet, A. (2008). Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. *Water Resources Research*, 44(W00D19).
<https://doi.org/10.1029/2008WR006950>
- [15] Pham, M. V., & Kim, Y. T. (2022). Debris flow detection and velocity estimation using deep convolutional neural network and image processing. *Landslides*, 19(12), 2473–2488. <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01931-6>
- [16] Raffel, M., Willert, C. E., Scarano, F., Kähler, C. J., Wereley, S. T., & Kompenhans, J. (2018). *Particle image velocimetry: A practical guide* (3rd ed.). Springer International Publishing.
- [17] Rao, S. S. (2001). *Applied numerical methods for engineers and scientists*. Prentice Hall.
- [18] Theule, J. I., Crema, S., Marchi, L., Cavalli, M., & Comiti, F. (2018). Exploiting LSPIV to assess debris-flow velocities in the field. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 1–13. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-1-2018>
- [19] 呂珍謀、李明靜、賴泉基、詹勳全、林國暉 (2008)。影像分析方法應用於土石流表面速度計算之研究。 *農業工程學報*，54(1)，13-23。

[20] 張智涵(2021)。以傅立葉轉換估算影像中顆粒位移的方法(碩士論文)。國立台灣大學土木工程學研究所。

[21] 郭亭妤 (2020)。以影像偵測土石流前鋒 (碩士論文)。國立台灣大學土木工程學研究所。

[22] 蘇得罕(2020)。以試驗探討土石流都卜勒效應 (碩士論文)。國立台灣大學土木工程學研究所。

[23] 行政院農業委員會水土保持局。(2017)。**水土保持手冊**。