

結合數位孿生與視覺化技術之山區閃洪系統

楊鈞宏¹、張子瑩¹、陳偉柏²、李士強²

¹ 國家災害防救科技中心 災防資訊組

² 國家災害防救科技中心 坡地洪旱組

摘要

近年來，氣候變遷推升極端降雨頻率與強度，山區聚落成為防災熱點。2024 年 7 月凱米颱風挾帶西南季風豪雨，短短一週高雄茂林區多納林道累積雨量達 1,944 毫米，造成山洪與土石流災害，數千人撤離，交通設施嚴重受損，凸顯山區防災亟需即時防災情資。在前瞻計畫支持下，國家災害防救科技中心(以下簡稱災防科技中心)建置「山區閃洪災害熱點三維展示系統」，結合數位孿生(Digital Twin)、物聯網(Internet of Things, IoT)與三維視覺化技術，打造高精度的模擬與即時監測平台。山區閃洪系統可在短時間內完成未來兩天的積淹水推估，迅速掌握潛勢地區，並針對災害熱點建置高風險河段模型。透過整合即時水位數據與立體河道資訊，協助掌握水位變化與潛在影響範圍，強化決策判斷與防救資源調度，實踐智慧防災。

一、 簡介

臺灣山區地形陡峭、河川短促，降雨集中且地質脆弱，颱風與豪雨常在短時間內引發山洪與土石流，對聚落安全與基礎設施造成嚴重威脅(Chiang et al., 2020)。現行防災作業中，各單位雖已建置水位、雨量、土石流潛勢等監測系統，但資訊分散於不同平台，且多以二維方式呈現，缺乏整合性與即時性，導致災害發生時，決策與應變部署仍需耗費時間進行資料比對與情境判讀(Zlatanova & Fabbri, 2009)。此外，山區因為閃洪造成的災情，反應時間往往以分鐘計算，若無法即時掌握河川水位變化、聚落影響範圍及人口分布，將難以即時完成疏散與資源調度(Borga et al., 2014)。雖然過去都會區已建立積淹水模擬與推估的都會區預報模式(Chang et al., 2021；Huang et al., 2020)，但山區因地形複雜、資料來源多元，仍缺乏能快速整合並視覺化的決策輔助工具(Li et al., 2021)。

基於此需求，災防科技中心在前瞻計畫支持下，開發「山區閃洪災害熱點三維展示系統」(以下簡稱山區閃洪系統)，系統整合預報及監測多來源，快速反應河道水位變化，提出警戒點位與災情範圍，為決策者與應變單位提供即時、直觀的情境判讀，輔助颱風、洪水等災害的應對與資源配置，有效提升整體防災效能。

二、 建置山區閃洪展示系統

(一) 即時數據整合與加值，打造山區淹水模擬情境

系統運用視覺化技術與地理資訊系統(GIS)，結合災防科技中心研發的水動力模式(Chang et al., 2021)，建立山區閃洪衝擊分析。透過整合氣象預報、降雨逕流與水位模擬等資料，自動更新預測結果，每 6 小時依據最新降雨資料重新運算，提供未來 48 小時的水位變化趨勢與潛在影響範圍，協助防災人員提前因應與決策。

在運算過程中，山區閃洪系統除了以水動力模式為基礎，納入水位、雨量、雷達回波、土石流與淹水感測等監測資訊，使水情、雨情與地形變化能即時反映現況；並藉由即時天氣與環境資料的支撐，動態呈現易致災溪流與聚落周邊之環境變化，協助進行情境判讀與重點區域研判。

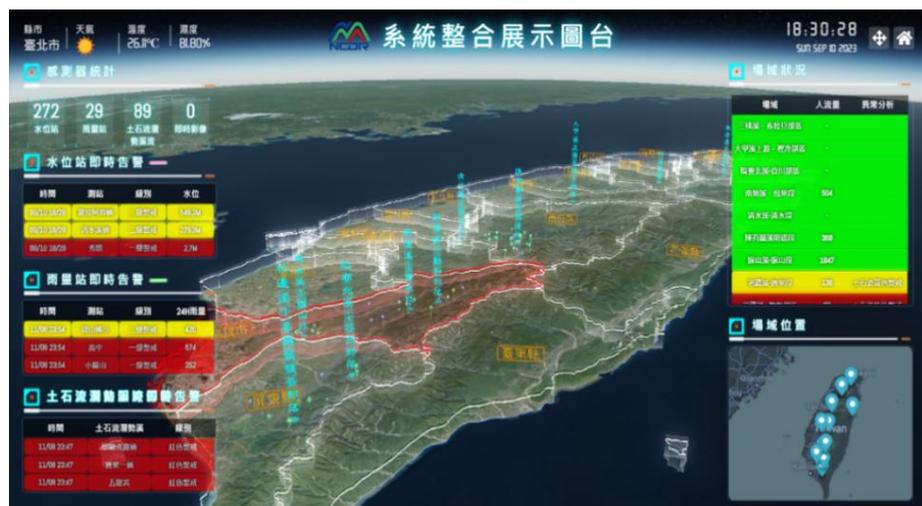


圖 1 山區閃洪系統整合展示圖台一告警資訊整合分析

(二) 數位化真實世界縮影，打造天氣情境視覺化

為提升山區降雨情境可以呈現精度與判讀效率，系統以三維模擬與視覺化技術為基礎，重建降雨過程及其對周邊環境之樣貌。透過多種來源資訊以動態呈現易致災溪流與聚落周邊之環境變化，並針對山區高風險聚落提供較高解析度的區域氣象情境展示，使降雨影響範圍與變化歷程能更為清楚且具體。

1. 轉換回波強度為擬真降雨情境

在降雨情境建構上，系統介接中央氣象署之氣象雷達回波資料，將雷達回波強度轉換為具物理意義之降雨量資訊，以描繪降雨結構及其時空變化特性。氣象雷達係透過發射電磁脈衝並接收雨滴所反射之能量，依據回波訊號的強度與時間分布，可推估雷達涵蓋範圍內不同位置的降水特性。相較於僅反映單點資訊的雨量站觀測，雷達回波資料具備良好的空間連續性，對於地形起伏大、降雨變化快速之山區環境，能提供更完整的降雨分布參考。雷達回波強度通常以 dBZ 表示，為描述反射率大小之指標，亦是推估降雨強度的重要基礎。氣象應用中，常透過 Z-R 關係式將雷達回波因子(Z)轉換為降雨率 R ，惟其轉換結果易受雨滴粒徑分布、降雨型態及天氣系統特性影響。因此在考量降雨型態具高度不確定性，且山區環境易受極端值干擾，本研究採用單一雷達變數之轉換方式，將雷達回波強度轉換為降雨量，以降低不同降

雨型態對推估結果所造成的影響（圖 2）。

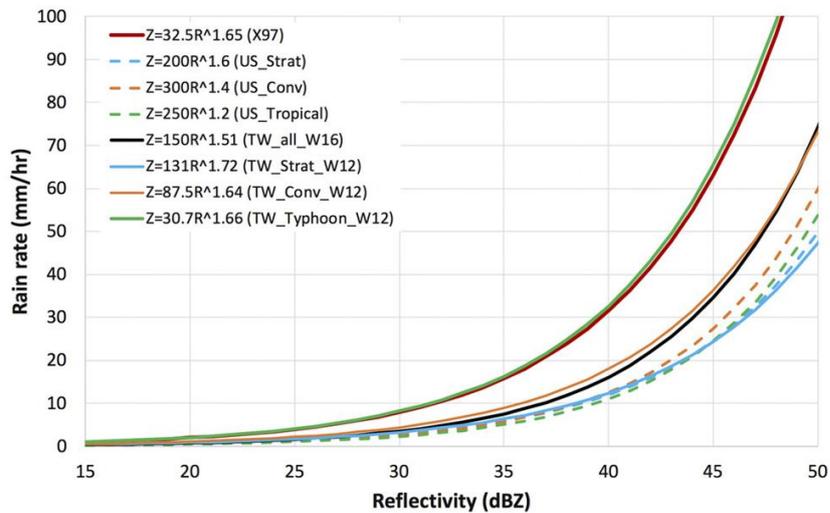


圖 2 降雨率及雷達回波因子關係圖

2. 透過雲圖灰階值轉化三維空間雲量分布

除降雨量的轉換外，系統亦結合三維視覺化技術，將衛星雲圖資料立體呈現，以補充降雨情境之氣象背景資訊。過去二維衛星雲圖雖能提供雲系分布概況，但在雲層高度與立體結構呈現上仍有其限制。為克服上述不足，本研究透過解析衛星雲圖之灰階值，將其轉換為三維空間中的雲量分布圖，呈現雲層在不同高度與空間位置的結構。透過三維雲量分布之呈現方式，使用者可從多角度觀察雲層發展與移動情形，進一步理解雲系與降雨分布之關聯性。立體化且視覺的呈現，有助於提升天氣系統判讀的直觀性，並作為山區降雨情境分析與研判之輔助(圖 3)。



圖 3 三維雲量空間分布示意

3. 整合雷達與三維視覺化成果，強化情境判讀

透過前述回波轉換與雲量建構流程，系統可將雷達回波與衛星雲圖資訊轉化為具空間連續性的降雨與雲量情境資料，作為後續降雨情境展示與分析之基礎。進一步以此為核心，結合三維圖台呈現降雨強度與雲系分布之空間關係，使用者能直觀掌握雨勢變化及其影響範圍，(如圖 4)。



圖 4 氣象情境視覺化(荖濃溪-勤和部落)

(三) 雙視窗二/三維情境比對，掌握災情全貌

在山區等地形起伏明顯的地區，僅以二維資訊往往難以完整

呈現洪水的流動與擴散情形。為此，系統導入三維展示功能，透過立體視角展現地形高低起伏，讓使用者更直觀理解地勢對水流路徑的影響。當結合洪水模擬時，三維畫面能更真實地呈現水流受地形引導的動態變化，協助研判可能的淹水範圍與方向。

此外，立體的視覺呈現也能提升資訊可讀性，即使是不熟悉地理資訊的使用者，也能直覺了解洪水可能造成的風險，進而提升防災意識與應變能力。



圖 5 雙視窗二維及三維比對 (2024/07/23 凱米颱風)

(四) 山區洪水模型，已累積完成 23 處

透過前述模組的整合應用，系統可於河道立體模型中即時顯示水情資訊，提供更直觀的情境判讀。自 2021 年起至 2025 年，已分階段完成 23 處山區河道及部落場域的三維展示模型建置。這些場域涵蓋多樣的流域與地形條件，不僅展現各年度的重要成

果里程碑，也全面支援山區閃洪情境的即時監測與展示，如圖 6 所示。



圖 6 累計共 23 處山區閃洪模擬成果

山區閃洪系統已導入情資研判作業流程，並建置自動化情境推演機制。透過淹水模式運算，於特定降雨條件下即時產出積淹水潛勢與河川溢淹情境，協助防災人員掌握潛在風險情勢（圖 7 梅花颱風情境示意）。



圖 7 作業化情境結合天氣及晝夜情境

本研究亦配合政府資料開放政策，並推動防災智慧化應用、提

升防救災產業加值效益，目前已上線 23 處山洪與閃洪模擬資料之網路 API 服務；截至目前 2026 年 1 月，整體服務累計連線次數達 56,758 次。

三、 實際應用案例

在 2024 年凱米颱風影響期間，山區閃洪系統即時針對豪雨影響顯著之山區流域，系統透過三維熱力圖方式呈現累積雨量的空間分布，協助防救災人員快速辨識降雨集中區域與可能受影響之聚落範圍。而在實際應用過程中，山區閃洪系統亦將所呈現之洪水情境與新聞畫面回傳之現地影像進行對照(圖 8)，比較系統情境展示與實際災況之空間位置與發展趨勢，作為檢視情境推演合理性與調整研判重點之輔助依據，進一步支援災時應變判斷與決策作業。



圖 8、凱米颱風情境(資料來源：原住民族電視台 TITV 新聞網，2024)

在本次應變過程中，山區閃洪系統針對颱風影響區域內的易致災聚落，如臺中市和平區、花蓮縣秀林鄉與高雄市美濃區，結合三維地形模擬與即時氣象資料，動態呈現河道水情與降雨情境，並即時追蹤颱風雲雨帶的移動與降雨強度變化。如圖 9 所示，山區閃洪系統以三個區域為例，顯示豪雨影響範圍與河川水位上升情形，並輔以三維降雨模擬畫面與雷達回波序列圖，協助研判可能的溢堤與淹水風險。系統更將晝夜差異相結合，提升情境展示的真实感與判讀效果。協助防災單位提前發布警戒與疏散命令，減少人員傷亡與財產損失，並強化區域性天氣預測與應變能力。

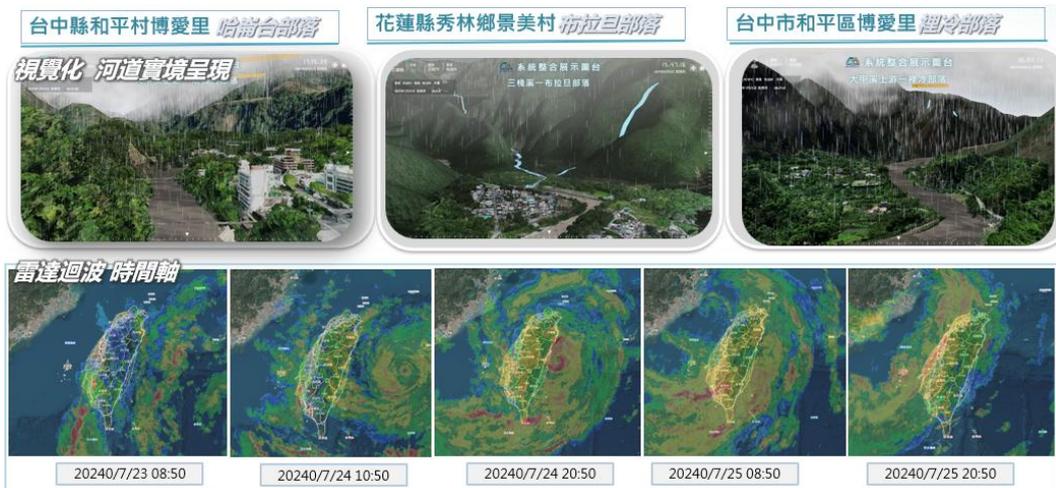


圖 9、作業化結合天氣及晝夜情境(2024/07/23 凱米颱風)

除了模擬展示外，山區閃洪系統亦已投入實際颱風災害應變工作，於梅花、海葵及小犬等多起颱風事件中，協助地方政府進行情勢研判與警戒發布，逐步成為防救災作業的重要輔助工具。

四、 歷次獲獎殊榮

山區閃洪系統的開發，著重於空間資訊及數位孿生，更將近年來開發之成果，積極參與國內、外系統開發創新競賽及展覽，截至 2024 年底，山區洪水展示系統，已獲得虛擬實境及系統創新競賽，共計 5 項資訊類獎項之殊榮(入圍 2023 年第六屆總統創新獎、2023 年雲端傑出應用獎、2022 年日本雲端線上 3D/VR 冠軍、2021 年日本雲端線上 3D/VR 評審委員大獎、2019 年「未來科技館」最佳人氣獎)。

「第六屆總統創新獎」入圍(2023) 日本「雲端線上3D/VR模擬競賽」冠軍(2022) 日本東京「評審委員獎(2019)



圖10、累計共5座山區閃洪視覺化模組獲獎紀錄

五、 結論

本研究於 2021 至 2025 年間推動山區閃洪平台建置與資料服務機制完善，採用模組化架構整合水文、水理、氣象與地形等多源資料，提供情境化應用服務，有效提升山區災情掌握與決策支援能力。依據不同三維技術特性，山區閃洪系統導入立體視覺化展示功能，能

動態呈現降雨分布、水位變化與洪水傳播情境，完成山區閃洪情境模擬，並支援多種降雨與地形條件下的模擬，協助地方防救災人員進行實戰化演練，縮短災時決策時間，強化整體防災應變效能。

同時，本研究亦建立多元化資料流通與共享機制，整合水位、雨量、雷達回波、土石流監測及洪水模擬等資訊，並透過 API 即時提供動態與靜態防救災資料，促進跨單位資料交換與應用，減少政府資源重複投入，達成防災資訊快速傳遞與有效應用的目標。

透過上述成果，不僅可於災時提供即時、精準的態勢研判，亦能於平時作為防災演練、規劃與教育訓練的重要工具。未來，隨著資料來源與分析技術持續擴充，平台將具備更高的精準度與彈性，進一步強化山區防災韌性，降低災害衝擊，並為民眾安全提供更堅實的支援。

參考文獻

1. Borga, M., Anagnostou, E. N., Blöschl, G., & Creutin, J. D. (2014). Flash flood forecasting, warning and risk management: The HYDRATE project. *Environmental Science & Policy*, 14(7), 834–844.
2. Chang, T.-Y., Chen, H., Fu, H.-S., Chen, W.-B., Yu, Y.-C., Su, W.-R., & Lin, L.-Y. (2021). An operational high-performance forecasting system for city-scale pluvial flash floods in the southwestern plain areas of Taiwan. *Water*, 13(4), 405. <https://doi.org/10.3390/w13040405>
3. Chen, Y.-M. (2019). An operational forecasting system for flash floods in mountainous areas. *Water*, 11(10), 2100. <https://doi.org/10.3390/w11102100>
4. Chiang, S. H., Chang, C. H., & Chen, H. (2020). Landslide and debris flow susceptibility assessment in Taiwan: An integrated approach. *Natural Hazards*, 102(1), 1–20.
5. Huang, Q., Wang, C., & Li, Z. (2020). Real-time flood mapping using social media and remote sensing data: A case study of Hurricane Harvey. *International Journal of Digital Earth*, 13(12), 1524–1547.
6. Li, Z., Wang, Y., & Huang, Q. (2021). Integrated platform for mountain flood disaster monitoring and early warning. *Remote Sensing*, 13(9), 1732
7. 原住民族電視台 (TITV)。(2024)。凱米颱風重創南部山區報導影像資料。取自 <https://titvnews.tw>

致謝

本研究由國家科學委員會前瞻基礎建設計畫-民生公共物聯網數據應用及產業開展-分項五「數據政府災防決策應用」計畫提供相關研究經費。