

國立臺灣大學工學院應用力學研究所



博士論文

Institute of Applied Mechanics

College of Engineering

National Taiwan University

Doctoral Dissertation

整合物聯網感測與人工智慧於智慧型災防系統之研究

A Study on the Integration of IoT Sensing and Artificial

Intelligence in Smart Disaster Prevention Systems

歐宗樺

Tsung-Hua Ou

指導教授：張培仁 博士

Advisor: Pei-Zen Chang, Ph.D.

中華民國 114 年 6 月

June, 2025

國立臺灣大學博士學位論文
口試委員會審定書

DOCTORAL DISSERTATION ACCEPTANCE CERTIFICATE
NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY

整合物聯網感測與人工智慧於智慧型災防系統之研究

A Study on the Integration of IoT Sensing and Artificial Intelligence
in Intelligent Disaster Prevention Systems

本論文係歐宗樺 (D00543005) 國立臺灣大學應用力學研究所完成之博士學位論文，於民國 114 年 6 月 24 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明。

The undersigned, appointed by the Institute of Applied Mechanics on 24th June, 2025 have examined a Doctoral Dissertation entitled above presented by OU, TSUNG-HUA (D00543005) candidate and hereby certify that it is worthy of acceptance.

口試委員 Oral examination committee:

張培仁 張培仁 (指導教授 Advisor)

楊尊華 楊尊華

吳映昕 吳映昕

洪啟耀 洪啟耀

趙韋安 趙韋安

所長 Director: 陳瑞琳

陳瑞琳

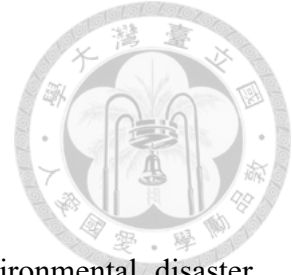
中文摘要



本研究旨在建構一套整合物聯網感測技術、先進通訊介面與人工智慧模型之智慧型環境災防系統。系統涵蓋多模組感測裝置，包括人工坡地監測模組、氣象盒子、水利智慧粒子、空氣盒子與智慧水井，能即時監測微氣象、水文參數、有害氣體與空氣品質及物件相對變形量等多元環境資訊，並結合 GNSS 定位、三軸加速度計與影像辨識技術，以提升異常事件偵測的精度與空間解析度。進一步，本系統融合大型語言模型 (Large Language Models, LLMs) 與通訊平台 (如 LINE 與 Messenger)，實現防災資訊的自動化傳遞、即時互動與個人化溝通，強化社區層級的風險感知與應變能力。透過實地部署與多場域測試驗證，本系統展現出優異的擴充彈性與即時反應效能，能有效支援區域性災害預警與風險傳遞，具高度應用潛力，有助於建構具韌性的智慧城市與社區。

關鍵詞：大型語言模型；感測物聯網；智慧災防；社群反應；智慧終端通訊；

ABSTRACT



This study presents the development of an intelligent environmental disaster prevention system that integrates Internet of Things (IoT) sensing technologies, advanced communication interfaces, and artificial intelligence models. The proposed system comprises a suite of modular sensing units, including slope monitoring modules, weather boxes, smart hydrological particles, air quality monitors, and intelligent well deformation sensors. These modules are designed to conduct real-time monitoring of diverse environmental parameters such as microclimate conditions, hydrological metrics, concentrations of hazardous gases, ambient air quality, and structural deformation indicators. To enhance anomaly detection accuracy and spatial resolution, the system incorporates GNSS positioning, triaxial accelerometry, and computer vision-based image recognition techniques.

In addition, the system integrates large language models (LLMs) with popular communication platforms such as LINE and Messenger, enabling automated dissemination, real-time interaction, and personalized delivery of disaster-related information. This fusion significantly strengthens community-level risk awareness and emergency response capabilities. Field deployments and multi-site validations demonstrate the system's high scalability, responsiveness, and operational robustness, underscoring its substantial potential for regional early warning applications and resilient urban planning. The findings suggest that such integrative systems can serve as a foundational infrastructure for future smart cities and disaster-resilient communities.

Keywords: large language models; IoT sensing; intelligent disaster prevention; community-level response; real-time communication systems

誌謝



在本論文完成之際，首先要誠摯感謝我的指導教授，國立臺灣大學應用力學研究所張培仁教授。張教授於研究方向上的啟發與宏觀視野，使我得以在研究中持續精進。特別感謝張教授對於我一邊工作一邊求學的體諒與極力配合，使我能夠在漫長的修業歷程中持續堅持並順利完成學業。此外，張老師更曾多次協助我處理人生的重要轉折與課題，帶給我深刻的人生觀與價值思維，對我而言不僅是學術上的良師，更是人生路上的明燈。教授不僅在學術上給予我深刻的指導，在思維訓練與研究態度上亦是我學習的典範，令我受益匪淺。

謹向本論文口試委員國立陽明交通大學土木工程學系楊尊華博士、京都大學防災研究所吳映昕博士、國立中興大學水土保持學系洪啟耀博士，以及國立陽明交通大學土木工程學系趙韋安博士致上誠摯感謝。感謝各位委員撥冗審閱本論文，並提供寶貴意見與建議，使本研究內容得以更加周延與成熟。

本研究亦感謝冰山科技股份有限公司的資源與協助，提供實務場域、感測設備與技術支援，使本論文所建構之系統能於真實環境中驗證與應用，促使理論與實務得以緊密結合。

最後，我要特別感謝我的妻子徐宛鴻。在我求學與研究的歷程中，妳始終是我最堅強的後盾。感謝妳的體諒、支持與陪伴，和妳那常常有的天馬行空的聰明點子，讓我能無後顧之憂地專注於研究，也讓這段漫長的學術旅程充滿溫暖與力量。也謝謝兩位寶貝兒子歐岱駕和歐岳鵠的陪伴和關懷，在這漫長時光中增添趣味以及給我勇氣。

論文完成的這一刻，承載著眾人的支持與祝福，謹以此篇獻給曾在這條路上給予我幫助與鼓勵的所有師長、同儕與摯親。

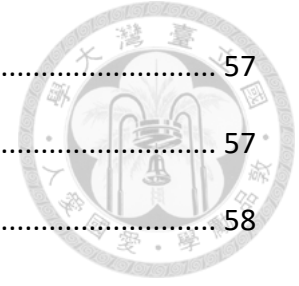
目次



中文摘要	i
ABSTRACT	ii
誌謝	iii
目次	iv
表次	viii
圖次	ix
第一章 緒論	1
1.1 研究背景與動機	1
1.2 研究目的	2
1.3 研究問題與挑戰	4
1.4 研究架構與貢獻	6
1.5 研究方法與流程	8
1.6 本論文架構	9
第二章 文獻回顧	11
2.1 現有的智慧感測技術	11
2.2 人工智慧與大型語言模型在防災領域的應用	13
2.3 現有智慧防災系統比較與本研究的創新定位	15
第三章 系統設計與模組架構	17
3.1 系統整體架構設計概述	17
3.1.1 系統功能需求與設計原則	18
3.1.2 系統整體架構與資料流程	19
3.1.3 五大核心模組與功能分工	20

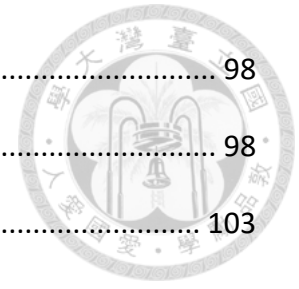


3.2 人工坡地監測系統模組設計	22
3.2.1 設計動機與應用場景	22
3.2.2 模組架構與感測組成	23
3.2.3 資料處理與通訊機制	28
3.2.4 系統功能與特色摘要	30
3.2.5 系統設計小結	31
3.3 水利智慧粒子模組設計	33
3.3.1 設計動機與應用場景	33
3.3.2 模組架構與感測組成	33
3.3.3 資料處理與通訊機制	35
3.3.4 系統功能與特色摘要	35
3.3.5 系統設計小結	37
3.4 環境複合式監測模組設計	38
3.4.1 設計動機與應用場景	38
3.4.2 模組架構與感測組成	39
3.4.3 資料處理與通訊機制	43
3.4.4 系統功能與特色摘要	45
3.4.5 系統設計小結	46
3.5 智慧水井變形模組設計	47
3.5.1 設計動機與應用場景	47
3.5.2 模組架構與感測組成	48
3.5.3 資料處理與通訊機制	51
3.5.4 系統功能與特色摘要	53
3.5.5 系統設計小結	55



3.6 災防通訊平台與 LLM 整合設計	57
3.6.1 設計動機與應用場景	57
3.6.2 模組架構	58
3.6.3 大型語言模型(LLMs)之防災訊息生成策略	61
3.6.4 系統功能與特色摘要	62
3.6.5 系統設計小結	63
3.7 系統設計總結	64
第四章 各模組實驗與部署成果	65
4.1 實驗與部署總覽表	65
4.2 人工坡地監測系統模組場域實驗與成果	66
4.2.1 測試場域與部署配置	66
4.2.2 監測數據分析與人工坡地行為關聯	73
4.2.3 模組性能與數據準確性評估	78
4.2.4 場域實驗總結	80
4.3 水利智慧粒子模擬實驗	81
4.3.1 實驗設計與場域說明	81
4.3.2 資料紀錄與粒子行為分析	84
4.3.3 實驗成果與技術驗證	86
4.3.4 實驗小結	87
4.4 環境複合式監測模組場域實驗與成果	88
4.4.1 測試場域與部署配置	88
4.4.2 監測數據分析與環境關聯	91
4.4.3 模組性能與數據準確性評估	95
4.4.4 場域實驗總結	96

4.5 智慧水井變形實驗與圖像分析	98
4.5.1 實地部署條件與配置說明	98
4.5.2 影像處理流程與資料擷取機制	103
4.5.3 初步觀測成果與模組運作情形	105
4.5.4 分析結論與後續應用潛力	105
4.6 災防通訊平台實測	107
4.6.1 測試情境與資料來源	107
4.6.2 模型生成災情狀態及提示工程	108
4.6.3 LLM 產生應變訊息準確性及可靠度	110
4.6.4 實驗小結	113
4.7 小結	115
第五章 結論與未來展望	117
5.1 研究成果回顧	117
5.2 實務應用貢獻	118
5.3 研究限制	118
5.4 後續擴充與未來研究建議	119
參考文獻	121



表次



表格-1 系統核心功能敘述.....	18
表格-2 軟硬體設計主題及設計原則.....	18
表格-3 核心模組內容.....	20
表格-4 本研究各模組部署總覽.....	65
表格-5 智慧粒子實驗結果一覽.....	84
表格-6 環境複合式監測部署一覽.....	89
表格-7 水情災害劇本[29].....	109
表格-8 基於各類劇本，LLM 產生之回應[29].....	110
表格-9 災防通訊優劣比較[29].....	114

圖次



圖-1 系統規劃示意	17
圖-2 系統分層討論	20
圖-3 超聲波測距示意[26]	23
圖-4 裂縫儀模組測試件集成外觀	23
圖-5 裂縫儀 3D 列印外殼(左)	24
圖-6 裂縫儀模組 3D 列印外殼(右)	24
圖-7 裂縫儀模組集成示意	24
圖-8 坡面運動監測儀外觀	25
圖-9 坡面運動監測儀核心晶片 MPU-6050	25
圖-10 轉軸定義	26
圖-11 氣象盒子模組細節	26
圖-12 氣象盒子模組集成於固定板	27
圖-13 氣象盒子內容	27
圖-14 氣象盒子外觀	28
圖-15 氣象盒子 HTTP 引數編碼方式	29
圖-16 氣象盒子 HTTP 引數編排方式	29
圖-17 智慧粒子模組示意	34
圖-18 智慧粒子外觀	34
圖-19 資料傳輸介面示意	35
圖-20 防水 IP 試驗	36
圖-21 多感測器集成電路需求	40

圖-22 多感測器 PCB 設計圖	41
圖-23 環境複合式監測模組外觀	42
圖-24 環境複合式監測模組內容	42
圖-25 環境複合式監測模組之 HTTP 引數編排	44
圖-26 環境複合式監測模組三軸加速度引數壓縮	44
圖-27 水井監控平台示意	47
圖-28 電腦視覺用圖形設計	48
圖-29 浮球水尺電路集成	50
圖-30 浮球水尺外觀	50
圖-31 壓力式水位計外觀	51
圖-32 浮球水尺資料傳輸示意	52
圖-33 市售壓力式水位計展示平台	52
圖-34 市售壓力式水位計數據展示	53
圖-35 圖形辨識示意	53
圖-36 圖形辨識以及角度定義	54
圖-37 本研究開發平台	55
圖-38 災防通訊平台整合 LLM 流程圖[29]	59
圖-39 裂縫計安裝方式[27]	67
圖-40 人工坡地監測系統安裝地圖(一)[27]	68
圖-41 公訓處 1 實照[27]	68
圖-42 公訓處 2 實照[27]	69
圖-43 公訓處部署細節[27]	69
圖-44 人工坡地監測系統安裝地圖(二) [27]	70
圖-45 政治大學六期運動場實照[27]	70

圖-46 政治大學自強九舍實照[27]	71
圖-47 政治大學部署細節[27]	71
圖-48 人工坡地監測系統安裝地圖(三) [27].....	72
圖-49 中山北路七段擋土牆實照[27]	72
圖-50 中山北路七段擋土牆部署細節[27]	73
圖-51 公訓處 1 裂縫計(2018/07-2018/10) [27].....	74
圖-52 政大六期運動場裂縫計(2018/07-2018/10) [27].....	74
圖-53 政大六期運動場溫度差(2018/07-2018/10) [27].....	75
圖-54 政大六期運動場 X 向傾度(2018/07-2018/10) [27]	75
圖-55 政大六期運動場 Y 向傾度(2018/07-2018/10) [27]	76
圖-56 公訓處 1 之 X 向傾度(2018/07-2018/10) [27]	76
圖-57 公訓處 1 之 Y 向傾度(2018/07-2018/10) [27]	77
圖-58 公訓處 2 之 X 向傾度(2018/07-2018/10) [27]	77
圖-59 公訓處 2 之 Y 向傾度(2018/07-2018/10) [27]	78
圖-60 整合傾度儀入氣象盒子	79
圖-61 惠蓀林場壩體	82
圖-62 磁簧觸發測試	82
圖-63 智慧粒子部署示意	83
圖-64 壩體與埋設位置	83
圖-65 智慧粒子獲取位置資訊之點位	85
圖-66 智慧粒子運動軌跡，藍色為 9993，紅色為 9992，綠色為 9995.	86
圖-67 環境複合式監測架設 12 測站位置圖(竹山管理處及下坪植物園不 在本圖範圍中)[28]	90
圖-68 下坪植物園、環保署竹山站以及竹山管理處位置圖[28]	92

圖- 69 本研究與環保署測站 PM _{2.5} 及 PM ₁₀ 比對[28]	92
圖- 70 本研究(綠線)與環保署測站(紅線)PM _{2.5} 及 PM ₁₀ 隨時間軸比對[28]	92
圖- 71 三軸加速度資料壓縮示意	93
圖- 72 三軸加速度資料壓縮級距	94
圖- 73 藍色為 2019/04/18 地震前之直方圖，紅色為地震中，黃色為地震 後	94
圖- 74 2019/04/18 中央氣象局地震報告	95
圖- 75 幼葉林水井壁面展開圖以及部署位置，右圖黃色虛線為樣態標 記，紅色框為攝影機位置	99
圖- 76 集水井俯視	100
圖- 77 智慧水井一號攝影機	100
圖- 78 智慧水井二號攝影機	101
圖- 79 智慧水井三號攝影機	101
圖- 80 智慧水井四號攝影機	102
圖- 81 智慧水井五號攝影機	102
圖- 82 智慧水井六號攝影機	103
圖- 83 智慧水井資訊視覺化展示平台	104
圖- 84 智慧水井樣態標記位置 3D 圖	104



第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

近年全球氣候變遷日益劇烈，導致極端天氣事件(如強颱、超大豪雨、旱澇交替等)的發生頻率與強度顯著上升。此類災害不僅對人類生命安全構成重大威脅，也對基礎設施、生態系統及社會經濟造成嚴重衝擊。然而，傳統的災害應變方式多依賴事後的被動式應急處理與歷史資料回溯分析，難以應付災害的即時變化與複雜情境，特別是在山區或偏遠地區，基礎設施薄弱、通訊中斷風險高，資訊傳遞的延遲與缺失更進一步放大了災害風險與脆弱性。

在此背景下，物聯網(Internet of Things, IoT)技術的迅速發展與普及，為災害防救領域帶來嶄新契機。IoT 可實現多點、多模組感測裝置之即時資料收集與分散部署，並搭配嵌入式系統與邊緣運算，有效提升資料處理效率與節能表現。進一步，人工智慧(Artificial Intelligence, AI)，特別是機器學習與深度學習在預測模型與異常偵測方面的應用，也已逐漸成熟，成為災害預警系統的重要技術。

然而，傳統系統多著重於單一災種或單一技術面向，缺乏跨模組感測數據的整合機制，也未能解決「最後一哩路」的資訊傳遞問題，也就是如何將感測與分析結果，轉化為民眾可理解、具備行動導向的個人化警示內容。尤其在災害發生初期，警報資訊的可讀性、時效性與接收率，將直接影響民眾行為與生命財產安全。

大型語言模型(Large Language Model, LLM)在自然語言理解與生成上的進展，提供了嶄新的解決方向。LLM 不僅能將結構化或複雜資訊轉譯為具體可行的語句，也可與使用者進行互動式溝通，實現災防資訊的智慧化回應與個人化推播，進一步提升使用者參與及資訊回應效率。

本研究也觀察到傳統防災監測系統存在諸多問題，包括設備規格非標準化、



通訊與儲存成本高昂、感測節點客製化困難、能源系統不穩定，以及量產與系統化推展量能不足等。這些問題使得傳統系統難以規模化部署，無法支撐多元災防應用及客製化防災之需求。

基於以上挑戰與技術演進的契機，本研究提出一套融合物聯網感測技術、智慧運算平台與語言模型之智慧型環境災防系統。透過感測模組個體運算、互聯網格、協同資料處理機制，搭配 LLM 驅動之災防溝通平台，建立即時、互動、具情境理解能力的災防應變架構。此系統將有助於強化社區層級的災害韌性、提升警示傳達效能，並彌補現有災防技術整合與溝通不足之缺口，為面對未來災害挑戰提出一個可行且具前瞻性的解決方案。

1.2 研究目的

本研究旨在設計、開發並驗證一套整合物聯網感測技術與人工智慧模型之智慧型環境災防系統，透過多模組感測裝置、高效資料處理架構與語言模型驅動的通訊機制，提升災害監測、預警與通報的全面性與即時性。此系統不僅能即時蒐集多源環境數據，進行智能化的異常辨識與風險評估，亦能透過大型語言模型 (Large Language Model, LLM) 結合即時通訊平台 (如 LINE、Messenger)，提供民眾個人化、語意導向且具行動指示的防災資訊，為銜接科技端與社會端之有效溝通橋梁。

具體而言，本研究將達成以下目標：

1. 開發多模組智慧感測裝置

設計並實現包含氣象盒子、水利智慧粒子、空氣盒子與智慧水井等具備高穩定性、低功耗與易部署特性的感測模組，全面蒐集微氣象、水文、結構變形與空氣品質等環境參數，支援災害潛勢之即時監控。



2. 建構高效數據處理與整合平台

建立一套具備資料接收、處理、儲存與多源異質整合能力之後端系統，支援邊緣計算與雲端運算分工，確保感測資料流的即時性、完整性與可用性。

3. 整合 LLM 與即時通訊平台，實現個人化災防溝通

開發防災通訊機器人，整合 LLM 語意分析與社群平台 API，針對不同使用者身分、地理位置與災情特徵以及客觀數據，推送具語意理解與行動導向的個人化警示訊息。

4. 進行實地測試與系統效益評估

分別於特定場域部署上述系統元件，進行系統穩定性、感測準確度及資訊通訊到達率等效能評估，驗證本研究系統在真實情境中的應用潛力與限制。

透過上述目標之逐步實現，本研究不僅將個別展示智慧型災防系統整合設計之可行性，更將為未來智慧災害管理體系的建構與技術升級，提供具實證基礎與應用價值之參考架構。



1.3 研究問題與挑戰

雖然物聯網、人工智慧與大型語言模型在防災應用領域展現出高度潛力，但在系統建置與實地部署過程中，仍面臨許多關鍵技術瓶頸與實務挑戰。這些挑戰不僅影響系統的穩定性與可行性，也關係到系統整體效益的實現程度。本研究聚焦於以下幾項主要問題：

1. 感測設備於戶外環境下的耐候性與穩定性

部署於山區、河道與都市邊緣地帶等高風險場域的感測模組，須面對長時間暴露於極端氣候(如高溫、強降雨、強風、濕氣與沙塵)下之耐用性挑戰。如何在控制成本的同時確保感測元件、通訊模組與電力系統的長期穩定性與可靠性，是系統設計須克服的工程難題。

2. 多源異質感測資料的即時整合與融合

本系統包含氣象、水文、空氣品質、形變與影像等多類型感測器，其資料格式、解析度與頻率皆具高度異質性。如何透過統一的傳訊管道融合演算法，實現跨模組資料的即時演算、時序同步與校準整合，以建立準確的即時數據傳輸。

3. 通訊穩定性於災害環境中的維持

在偏遠或受災嚴重地區，行動網路訊號不穩或中斷風險高，嚴重影響感測資料的上傳與警示訊息的發送。如何選擇並整合多種通訊技術(如 4G、NB-IoT、Wi-Fi Mesh)，並設計具容錯及暫存回傳機制的通訊協定，是維持資料傳輸穩定性的核心議題。

4. 大型語言模型應用於防災溝通之風險控管

LLM 在產生個人化警示訊息時具有高彈性與自然語言表達力，但若未妥善控

制生成邏輯，易產生錯誤資訊(即幻覺現象)，恐引發不必要的恐慌或誤導民眾行動。如何建構可靠的語意控制機制、加強輸出內容的驗證機制與風險監控，是防災通訊安全性的核心要素。



5. 防災通訊平台之互動設計與使用者接受度

設計一個能涵蓋各年齡層、不同科技操作能力使用者的簡潔易用介面，並鼓勵民眾回報災情、提供意見，是提高平台實用性與社區參與度的關鍵。如何從使用者回饋中萃取有效資訊，並快速迭代優化系統功能，屬於系統營運層面之重要挑戰。

綜合上述問題，本研究不僅需進行跨領域技術整合，也須在實務導入前進行不同的場域測試與實驗驗證，以提升系統的實用性、穩定性與可持續性。解決這些技術與應用挑戰，將是本研究邁向成功部署與實際應用的關鍵。



1.4 研究架構與貢獻

本研究提出一套創新的智慧型環境災防系統框架，整合物聯網感知技術、人工智慧分析與預測、以及基於大型語言模型(Large Language Model, LLM)驅動的社群通訊模組，從資料採集到警訊推播構成一個封閉且具彈性的災害管理流程，具備跨感測、跨系統、跨媒介的資料與應對整合能力。

整體研究系統可區分為下列三大核心模組：

1. 智慧感測模組

涵蓋氣象盒子、水利智慧粒子、空氣盒子與智慧水井等設備，分別負責蒐集微氣象、水文變化、空氣污染與井體變形等資訊，並整合 GNSS 定位、加速度感測與影像辨識技術，提升環境感知之即時性與空間解析度。

2. 智能分析與預測模組

應用機械學習及影像辨識技術進行資料異常偵測、災害趨勢辨識與風險熱區分析，建立自動預警與模型學習迴圈，提高系統對潛在災害的敏感度與回應能力。

3. 災防通訊平台

以 Webhook 架構部署於無伺服器雲端平台(如 Heroku)，整合 LLM 模型與即時通訊應用(如 LINE、Messenger)，實現災情訊息的自動化生成、語意理解與個人化推播，並支援互動式查詢與雙向溝通。

綜合而言，本研究在技術創新面上，災防系統中同時導入多元智慧感測、AI 模型分析與 LLM 語意生成，建構具有高度整合訊息、多向推播與互動學習能力的系統架構，促成智慧市場域中各技術層的深度融合。應用實務方面，所開發之感測模組與通訊平台具備低功耗、模組化與現地部署可行性，並成功整合 LINE 與

Messenger 作為警示通道，強化災情資訊傳遞之效率與使用者接受度。系統整合上，透過標準化與模組化的設計手法，構建可擴展與場域適應性高的系統架構，能應對不同空間尺度與災害類型的部署需求。

本研究整體架構與貢獻不僅回應現今災害管理的挑戰與技術缺口，更提供一個具體可行的智慧災防整合模型，為未來提升區域災害應變能力、促進社區韌性與落實智慧城市目標奠定實務基礎。



1.5 研究方法與流程

為實現本研究所設定之目標與系統架構，並有效克服前述技術挑戰，整體研究採取系統化的方法與分階段流程，結合理論探討與工程實作，逐步推進智慧型環境災防系統之建構與驗證。

首先進行災防系統功能與應用場景之需求分析，確認系統於環境監測、異常預警、通訊互動等方面的技術規格與操作邏輯。同時針對潛在部署場域進行現地評估分析，包括地形地貌、氣候條件、網路涵蓋、電源供應穩定性等，以作為後續感測模組設計與場域部署策略之依據。

再者依據需求分析，開發包含氣象盒子、水利智慧粒子、空氣盒子與智慧水井等多款感測模組，進行硬體挑選組裝、電路設計與韌體撰寫。於實驗環境下完成初步功能測試與校正作業，確保各感測元件之數據準確性與系統穩定性。然而選定具代表性的實驗場域(如人工坡地、河川、郊區)部署各感測模組，進行連續性資料蒐集作業，實地驗證模組之耐候性、感測穩定度、資料傳輸成功率與電源續航表現。

另一方面整合選定之大型語言模型(如 ChatGPT)與通訊平台 API(LINE Messaging API、Facebook Messenger API)，開發災防通訊機器人。設計提示工程(Prompt Engineering)策略，根據感測資料、AI 分析結果與使用者所在位置自動生成語意清楚、具行動指引的個人化警示訊息，並支援互動式查詢與災情回報。

最後為實務應用分析與結果討論。在綜合場域測試與系統效能數據，分析系統在實際災害應變與社區應用中的價值，並討論各模組與整體平台於部署過程中遭遇之問題與調整對策，作為未來系統升級與大規模應用之依據。系統性整理整體研究內容與成果，撰寫博士論文，全面呈現研究動機、架構、方法、實作結果與學術貢獻，並針對未來技術發展與延伸應用提出具體建議。

透過上述流程，本研究將理論分析、技術實作與場域驗證三者緊密結合，建構一套具備實務部署可行性與研究潛力之智慧型環境災防系統。



1.6 本論文架構

本論文共分為五個章節，依照研究邏輯、系統開發流程及結果呈現，系統性地展示本研究於智慧型環境災防系統方面之設計、實作與驗證成果。各章節內容安排如下：

- 第一章 緒論

本章說明本研究的背景與動機，明確提出研究目的與所面對的技術與應用挑戰，並進一步介紹研究架構、預期貢獻、研究方法與實施流程。最後概述論文的整體內容安排，作為全文導引。

- 第二章 文獻回顧


本章整理國內外與本研究相關之學術與實務文獻，探討物聯網感測技術在防災領域之應用發展、IoT 系統架構與資料整合策略、人工智慧與大型語言模型於災害預測與資訊生成方面的實務應用，並分析社區型防災通訊與使用者參與機制之研究趨勢。藉此釐清現有研究之不足與關鍵挑戰，凸顯本研究之創新性與定位。

- 第三章 系統設計與模組架構

本章詳細說明本研究所建構之智慧型環境災防系統架構，涵蓋感測模組(氣象盒子、水利智慧粒子、空氣盒子、智慧水井等)、資料流程及通訊方法(無線模組、Webhook 串接架構)、與終端應用(AI 影像模型、LLM 語意生成與通訊平台整合)。並就各模組之硬體設計、通訊協定、電源管理、資料格式與後端資料平台整合進行技術說明，闡述系統的整合與互動邏輯。

- 第四章 各模組實驗與部署成果

本章呈現本研究開發之感測模組與平台於實驗室環境與實地場域之測試結果。



包括氣象盒子與空氣盒子之感測方法及實證、水利智慧粒子與智慧水井模組之部署可行性分析、AI 影像模型之辨識能力探索、以及 LLM 驅動之通訊平台互動性能與潛在使用者接收到的行動指示。透過各模組測試數據與系統整體效能分析，驗證系統實用性並討論可能優化方向。

● 第五章 結論與未來展望

本章總結本研究在智慧型災防系統開發上的主要成果與技術貢獻，檢視研究目標達成情況，並指出系統開發與部署過程中仍待克服的挑戰與限制。同時針對未來研究方向，包括系統模組擴充、跨災種應用、模型效能優化與長期場域營運等，提出具體建議與發展藍圖。

透過上述章節安排，本論文將演繹從理論基礎、系統設計、模組開發、場域驗證到成效評估的研究歷程與成果，期望能對強化區域災防能力、推動智慧城市建設與促進社區韌性、建構貢獻可行之技術方案與實證經驗。

第二章 文獻回顧



2.1 現有的智慧感測技術

智慧感測技術已成為臺灣防災體系中不可或缺的核心，並廣泛應用於水情監測、地震預警與環境感知等關鍵領域。首先，地方政府與中央水利單位通力合作，建構高密度物聯網(IoT)監測網絡。例如，臺南市政府水利局於淹水熱區部署智慧雨量與水位感測器，並結合大數據與人工智慧技術於「智慧防汛網」，提供即時資料蒐集、風險預測與平台整合服務，以支援災前、災中與災後的全流程防災應變[1]。於此基礎上，經濟部水利署於「水災智慧防災計畫」中承諾投資 30.9 億元，擴增至超過 1200 個智慧感測站，並透過 AI、5G 及 IoT 技術優化未來 6 小時洪水預報準度，強化數位防汛體系[2]。

其次，「民生公共物聯網」透過集成氣象、水文及災害感測設備，建立跨機關即時資料整合與共享平台，並透過行動應用或 LINE BOT 向一線人員與民眾發送即時警訊，提升社區防災響應能力[3]。該整合架構亦支持政策制定與調度決策，有效縮短從資料蒐集至行動之間的反應時效。這些智慧感測和物聯網的應用，不僅提高了公共安全和應急響應的效率[4]，也促進了城市災害管理中的傳感器技術發展[5]。

第三，針對地震預警與災害即時通報，中央氣象署已建立強震即時警報(EEW)與災防告警細胞廣播系統(PWS)，透過地震 P 波檢測與細胞廣播資訊發布，平均 17.3 秒內完成地震速報，再加上行動通知可在數秒內送達市民，極大提升地震初期防災能力[6]。此外，「P-Alert 觀測網」作為地震 P 波之現地型感測系統，可於震央附近提供 1 至數秒的即時預警，為地震強震預警體系提供雙層安全保障[7]。這些新興的傳感技術和設備對於應急響應和災害管理至關重要[8]，而 AI 在災害管理中的預測分析和優化應急響應也扮演了重要角色[9]。在尼泊爾等地的災害風險管理

中，智慧系統、AI、大數據分析及物聯網等技術的應用也日益增加[10]。

綜觀而言，臺灣現有智慧感測技術具備三項特質：其一是高密度 IoT 感測網涵蓋淹水與氣候多樣場域；其二是 AI 與通訊整合能力，運用於精準預報與應變通知；其三是多技術平台協同操作(如 EEW、PWS 與 P-Alert)，實現多層快速預警體系。未來應聚焦資料整合標準化、通信抗斷及邊緣 AI 模型穩定度，進一步強化智慧感測技術於防災領域之韌性、可靠性與擴展性。


2.2 人工智慧與大型語言模型在防災領域的應用

人工智慧(AI)與大型語言模型(Large Language Model, LLM)已逐步成為臺灣防災策略中不可或缺的元素，應用範疇涵蓋知識問答、生成式預警與專案協助等面向。國家災害防救科技中心(NCDR)在「災害防救智能知識平台」中使用生成式 AI，特別是大型語言模型，以提供問答式知識支援與應變建議，該平台能解析使用者查詢並生成應對策略，彰顯 LLM 在災害情境推理的應用潛力[11]。

為強化 AI 應用之在地化與可信度，行政院國科會於 2023 年啟動「TAIDE(Trustworthy AI Dialogue Engine)計畫」，打造臺灣本土大型語言模型，以繁體中文為基底，聚焦於公部門問答、行政支援與農業、教育等領域之專屬場域應用。TAIDE-7B 可商用、TAIDE-13B 學研用模型已進入實際部署，包括公務服務(如法規、補助資訊)、農業知識與 AI 客服等，未來亦將導入防災專用模組[12]。此計畫強調模型透明度與文化貼近性，解決通用模型常見的偏差與誤導風險，並落實在政府治理應用之中。

另一方面，國立臺灣海洋大學及工研院等單位亦運用 AI 演算法處理極端氣候下之邊坡壓力和地質變化。相關研究指出，AI 模型結合氣象預報與土壤、坡度等多模態資料，可即時預測邊坡滑動或崩塌風險，供地方政府提前調度災害因應措施[13]。這類技術應用代表著 AI 非純推論用途，更朝向結合實地感測與災害風險判斷的實用應用。

目前臺灣在防災 AI 的實務應用尚集中於知識層級與技術平台。國際間對於大型語言模型在災害管理中的應用，已有廣泛的探討，包括在災害減輕、準備、響應和恢復各階段的潛力[14]，以及利用 LLM 和機器學習算法分析災害相關的社交媒體內容[15]。此外，LLM 在危機管理和災害響應中的應用也展現了提供實時決策支持、多語言通信和快速數據合成的能力[16]。綜合來看，大型語言模型在災害管理中的應用具有跨學科的重大意義[17]。未來機會正逐漸浮現，包含：

- 
1. 利用 LLM 結合即時災害通報或感測資料，協助災害研判與公眾溝通；
 2. 將 TAIDE 或公測框架嵌入災害資訊系統，如易淹水區預警、避難指引自動化生成等；
 3. 推動 AI 模型可解釋性與多模態感知，以建立民眾信任與政策透明度。

為確保這些應用具備可持續性，政府應持續強化資料治理、模組倫理與系統安全，並將 LLM 與多元數據整合納入智慧防災體系中，促進技術從生產力工具轉化為防災決策支援之核心。

2.3 現有智慧防災系統比較與本研究的創新定位

目前臺灣已建構多項智慧防災系統，涵蓋災前預警、災中應變與災後復原，但大多以特定情境或單一技術發展為主，如「智慧防火防災科技關鍵技術」聚焦建築物火災偵測與人員引導系統、AI 消防無人機等應用[18]；另「都市智慧防災策略藍圖」強調即時通訊平台 LINE 與跨部會資訊互通[19]；亦有人工坡地社區智慧防災系統，利用 IoT 感測器與雲端平台進行邊坡傾斜監測[20]。這些系統雖各有所長，但仍存在技術與應用層級分散、資料格式不一致、缺乏整合性大型語言模型(LLMs)與自主通訊平台等限制。國際上也有整合式的減災智慧服務系統旨在解決災害信息的綜合感知、定位、融合等關鍵技術[21]。

相較之下，本研究旨在建構一套具完整整合性之智慧型環境災防系統，突破現有系統的功能侷限。本系統裝配多模組感測裝置，包括人工坡地監測模組、氣象盒子、水利智慧粒子、空氣盒子與智慧水井，以即時蒐集微氣象、水文、有害氣體、空氣品質及移動變形資訊，並支援 GNSS 定位、三軸加速度計與影像辨識技術，確保異常偵測的高精度與高空間解析度。相比目前多為單一功能感測與局部監控的系統，如人工坡地 IoT 方案[20]與建築物內部構想[18]，本研究具備跨領域、多環境差異感測之能力。此外，為了提高智慧城市的災害韌性，綜合利用各種新興技術和工具已成為重要的趨勢[22]。

另一方面，現行通訊機制多依賴 LINE 官方帳號或災防 APP 進行單向通知[19]；本系統進一步引入大型語言模型(LLMs)結合即時通訊平台，打造雙向交互式資訊溝通機制，提升個人化與即時互動能力。此外，透過實地部署與多場域測試驗證，本系統展現出優異的擴充彈性與即時反應效能，能針對區域性災害提供快速預警與風險傳遞支持。相較於現有以單一主題或單一災別為重點之系統，如火災偵測集中於建築物內部監控[18]或 P-Alert 地震系統專注地震預警，本系統可同時應用於多重環境災防場域，展現跨域整合之能力。國際間對於動態災害監測和早期預警

的研究熱點與政策發展亦值得參考[23]，且各國在災害風險管理系統的獨特性和實踐經驗也有助於本研究的借鑒[24]。數位技術，如接觸者追蹤應用程式、智能管理系統和基於機器學習的工具，正在推動災害管理的數位轉型[25]。



本研究之創新定位表現在：

1. 多模組感測整合多災別環境；
2. AIoT 與 LLM 雙技術整合提升互動品質；
3. 通訊平台即時雙向互動及個人化；
4. 兼具精度、彈性與擴充性的部署模式。

這樣的設計不僅具有跨部門應用價值，也為建構智慧韌性城市與社區提供具體參考樣板，並有助於整體防災架構往高度整合與科技驅動前進。

第三章 系統設計與模組架構



3.1 系統整體架構設計概述

本研究提出一套模組化、可擴展之智慧型環境災防系統架構，整合多元感測技術、異質資料處理、無線通訊與語言模型驅動的災防訊息推播機制，實現環境監測、異常預警與災情通訊的自動化流程。系統整體架構分為感測模組、資料流程及通訊方法與終端應用三個邏輯層級，構成由資料蒐集、傳輸、分析到回饋的完整循環。



圖-1 系統規劃示意



3.1.1 系統功能需求與設計原則

本系統旨在即時、精確地感知環境狀態並進行災害預警與資訊傳遞，核心功能需求如下：

表格-1 系統核心功能敘述

核心功能	敘述
環境參數監測	穩定且即時地採集微氣象、水文、空氣品質等關鍵環境數據。
結構行為監測	針對井體、壩體等設施進行視覺與運動感測。
資料可靠傳輸與儲存	建構通訊穩定與本地容錯的資料傳輸架構。
多樣化通訊支援	保留彈性支援 4G、NB-IoT、Wi-Fi、LoRaWAN 等無線通訊技術。
災害預警與資訊發布	結合分析模組與通訊平台，發送個人化警示。
雙向互動與回報	支援民眾主動查詢與災情回報，促進系統調校。

模組設計則遵循以下原則：

表格-2 軟硬體設計主題及設計原則

軟硬體設計主題	設計原則
高整合與模組化設計	各感測模組具有獨立運算與通訊功能，並可彈性擴充。

超低功耗與能源自主	支援太陽能等再生能源，延長運作時間。
無線通訊穩定與資料容錯	提供本地端暫存與自動補傳機制。
戶外環境適應性	具備耐候、防水與抗衝擊能力，適用多樣場域部署。

3.1.2 系統整體架構與資料流程

本系統架構可劃分為以下三層討論：

- 感測模組：

由氣象盒子、水利智慧粒子、空氣盒子、智慧水井模組等構成，分別採集濕度、雨量、空氣污染指標、水位與結構變形資訊。部分模組具備即時處理(格式化)與本地儲存能力，並支援定時或觸發式資料回傳。

- 資料流程及通訊方法：

支援多樣無線傳輸技術(Wi-Fi、4G-LTE、NB-IoT、LoRaWAN)，多採用 HTTP 協定以達資料庫簡易部署。部分模組具備離線容錯設計，能在網路中斷時本地儲存資料，並於連線恢復後完成補傳，確保資料完整性。

- 終端應用：

部署於雲端平台或終端裝置，整合資料庫與分析模組，包括異常判斷、趨勢分析、圖像辨識、姿態與座標推算等功能。核心災防通訊模組整合大型語言模型(LLMs)，根據分析結果自動生成客製化語句，並透過 LINE、Messenger 等平台即時推播給特定區域、族群或身分的使用者，同時支援民眾回報與系統回饋機制，形

成雙向互動。

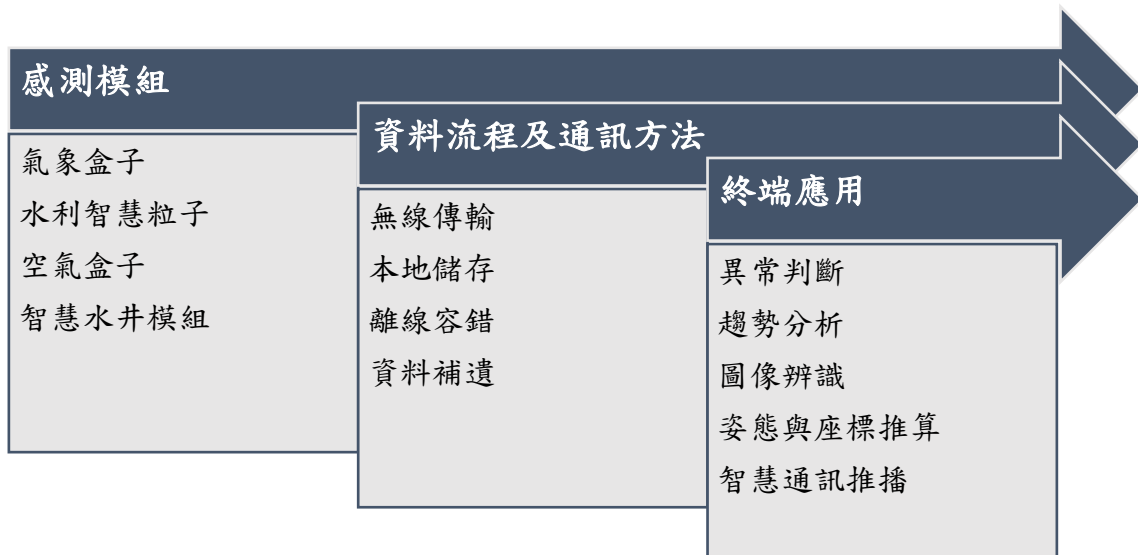


圖-2 系統分層討論


資料流自感測模組起，經資料流程及通訊方法傳輸至終端應用，並在資料分析後再次經通訊平台傳達至民眾。整體系統具備即時性、延展性與高度彈性，可依據不同場域與災種調整感測模組與訊息策略。

3.1.3 五大核心模組與功能分工

本系統整合以下五大模組，各模組功能如下：

表格-3 核心模組內容

核心模組	內容
------	----



人工坡地監測系統模組	整合裂縫儀、傾斜感測器與氣象盒子，用於 監控人工坡地穩定性與潛在災害前兆。
水利智慧粒子模組	具備防水、定位與觸發感測功能之可漂浮粒 子，用於河川沖刷與淹水路徑追蹤。
環境複合式感測模組	整合空氣品質、溫濕壓與震動等多源感測功 能於單一集合模組，提供全面性環境監測。
智慧水井變形模組	透過電腦視覺與浮球尺標檢測井體變形與內 部水位變化，評估地下結構風險。
災防通訊與 LLM 整合平台	以 LINE/FB Chatbot 為人機介面，整合災情 數據、語言生成與使用者互動，實現警示推 播與即時查詢功能。

透過上述模組間之資料串聯與功能協作，本研究所建構之系統不僅能即時掌握環境變化，更能主動、精準地完成災情預警與使用者溝通任務，形成一個具備自主感知、智慧演繹與人機互動能力的完整災防生態系統。



3.2 人工坡地監測系統模組設計

本節詳細闡述智慧型人工坡地安全監測系統核心模組的設計理念、功能組成與關鍵技術選用。本系統主要針對人工坡地災害的致災因子與潛勢進行監測，透過整合多元感測技術，旨在建構一個能夠即時監測坡體結構變形與運動的網絡。有鑑於降雨等氣象因子與人工坡地不穩定性密切相關，本系統輔以氣象盒子模組，提供現地微氣候數據，以期有坡體行為與環境因子之間更全面的關聯分析。本人工坡地監測系統模組的設計強調低功耗運作、無線通訊、環境耐候性及部署的彈性與簡易性。

本人工坡地監測系統的核心感知層由兩種主要的監測模組組成，分別針對人工坡地的不同監測需求為超聲波式裂縫儀(用於監測既有或潛在裂縫的形變)和坡面運動監測儀(用於監測坡體的整體運動)。這些模組與其計算核心、通訊單元及電源系統整合，構成具備自主功能的監測節點。

3.2.1 設計動機與應用場景

人工坡地災害為台灣地區常見且高風險的天然災害之一，特別在強降雨後易引發土石滑動、邊坡崩塌等事件，對社區安全造成重大威脅。傳統人工巡檢與定期監測方式往往受限於地形與人力資源，無法即時掌握坡體狀況。因此，本研究提出一套可長期部署之智慧型人工坡地監測模組，透過 IoT 感測器與低功耗設計，實現坡體異常行為的即時偵測與遠端回報。

本系統適用於人工邊坡、道路沿線、高風險住宅區周邊等場域，可針對裂縫位移、坡體運動與環境氣候進行多層次的整合式監測，強化災前預警能力與災後輔助判釋功能。



3.2.2 模組架構與感測組成

人工坡地監測模組由三類主要感測單元構成，分別為：

- 超聲波式裂縫儀(Ultrasonic Crack Meter)：

藉由 HC-SR04 類型模組測距感知結構裂縫之張裂變化，搭配反射板與溫度補償機制，實現 $\pm 0.3\text{mm/cm}$ 解析度之量測效能。外殼為 3D 列印的 ABS 材質，並有預留 O-Ring 所需要的防水縫。

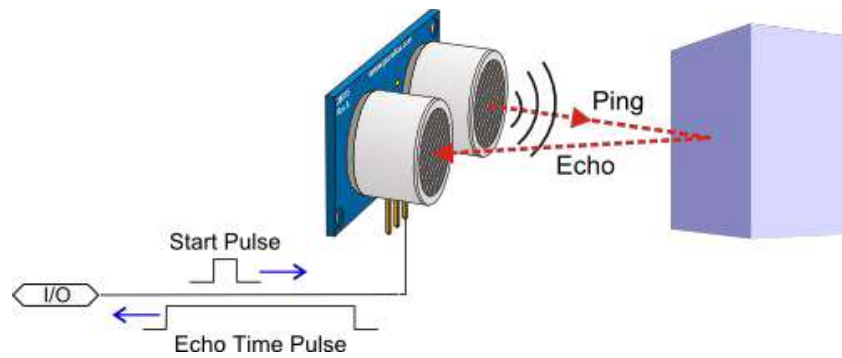


圖-3 超聲波測距示意[26]



圖-4 裂縫儀模組測試件集成外觀

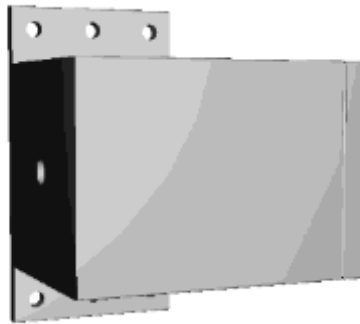


圖-5 裂縫儀 3D 列印外殼(左)

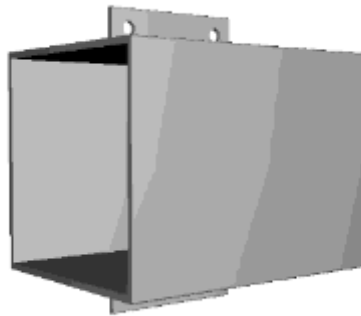


圖-6 裂縫儀模組 3D 列印外殼(右)



圖-7 裂縫儀模組集成示意



- 坡面運動監測儀(Slope Movement Sensor)：

內建 MPU-6050 三軸加速度計與傾斜儀，透過卡爾曼濾波演算法，精準偵測坡體平移與旋轉行為，解析度達 $\pm 0.01g$ 、 ± 0.01 度。

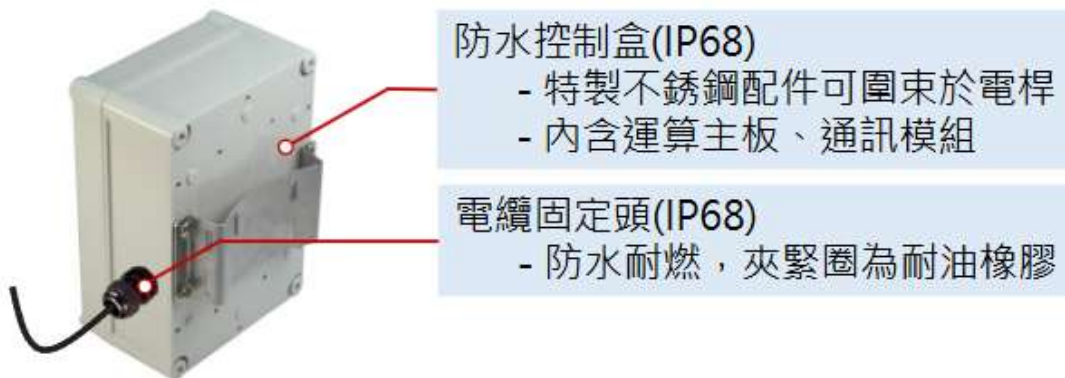


圖-8 坡面運動監測儀外觀



圖-9 坡面運動監測儀核心晶片 MPU-6050

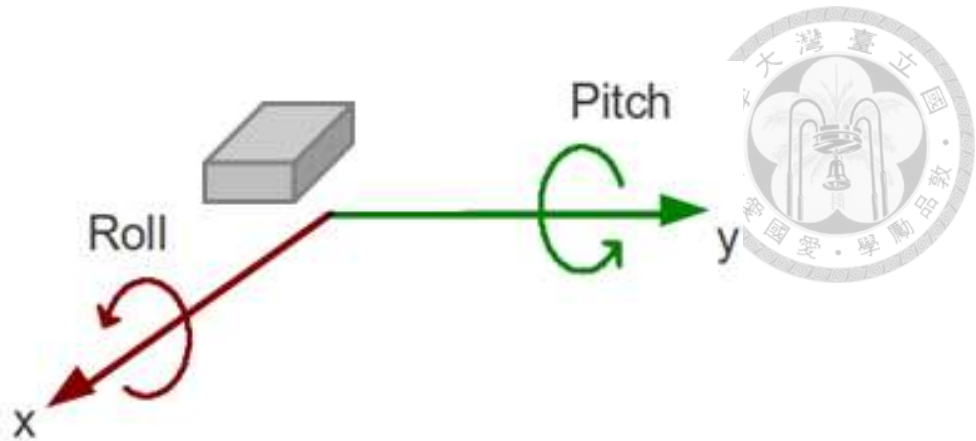


圖-10 轉軸定義

- 氣象盒子(Weather Box)：

提供微氣象背景資料，整合 SHT31 溫濕度、BMP280 氣壓感測器與傾斗式雨量計，有效支援降雨致災關聯性分析。



圖-11 氣象盒子模組細節



圖-12 氣象盒子模組集成於固定板

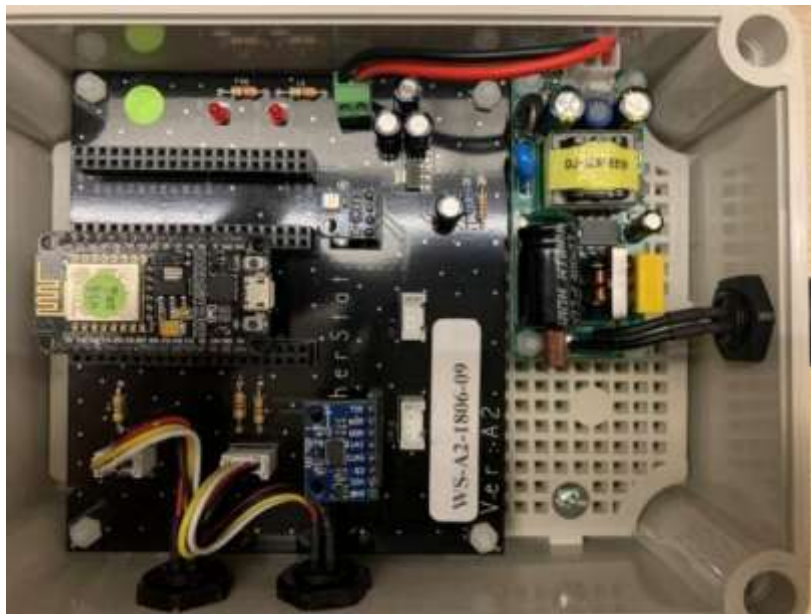


圖-13 氣象盒子內容



圖- 14 氣象盒子外觀

所有模組皆整合於高防水等級(如 IP67)外殼中，具備耐候、抗 UV、防塵防水特性。整合計算核心單元(如 NodeMCU 或 Raspberry Pi)、通訊模組與感測器於緊湊設計的封裝內，並預留標準通訊擴充介面，提升後續擴充彈性。

3.2.3 資料處理與通訊機制

人工坡地監測系統中，可靠的無線通訊為偏遠場域數據傳輸至後端平台之關鍵環節。本系統為因應多元部署環境，支援多種無線通訊技術，詳述如下：

- 低功耗廣域網路(LPWAN)：

主要選用 NB-IoT(Narrow Band Internet of Things)與 LoRaWAN 等 LPWAN 技術作為備援方案。此類技術具備低頻寬小封包數據傳輸能力，能有效延長設備電池續航力。

- 蜂巢式網絡：

支援 4G/LTE 和 4G Lite 通訊，適用於對傳輸速率要求較高或 LPWAN 覆蓋不足的區域。4G 提供較高的上行速率，適合傳輸較大量的數據或需要更即時的應用。SIMCOM 系列等晶片模組可提供穩定的 4G 連網方案。



3.2.4 系統功能與特色摘要

人工坡地監測設備的電力自主能力對於確保系統長期穩定運作至關重要。本系統為達成此目標，整合了低功耗設計與分散式再生能源供電方案，詳述如下：

- 低功耗元件與韌體策略：

系統選用低功耗感測元件與微處理器。韌體層面支援深度睡眠模式(Deep Sleep)，在非數據採集與傳輸期間顯著降低功耗，僅由即時時鐘(RTC)維持時序，並定時喚醒主系統執行必要任務。

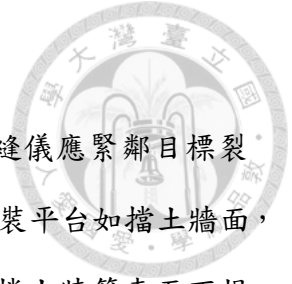
- 太陽能與電池供電：

系統主要採用太陽能板作為能量來源，將光能轉換為電能。太陽能充電 USB 穩壓板負責管理太陽能板對內建鋰電池組(例如日本製 18650 鋰電池)的充電過程。鋰電池作為儲能單元，可在夜間或陰雨天氣提供穩定電力，使整個供電系統實現電源自主，降低對外部電源的依賴。

- 電源管理與監控：

系統內建電力監控管理模組，可透過外部微控制器(MCU)進行控制，實時監測太陽能充電狀態、電池電量，並根據需求調整充放電排程，甚至能提前預警電池更換需求。電路設計亦包含穩壓電路與多重保護措施(如自復式保險絲、電力漣波濾波)，以確保供電的穩定性與安全性。若監測場域具備市電條件，亦可透過防水電箱實現可靠的市電接入。

人工坡地監測系統的實際部署，需縝密規劃並依循特定安裝規範，方能確保監測數據的有效性與設備運行的穩定性。部署前，必須進行詳細的現場勘查，評估人



工坡地現況、潛在危險區域以及通訊與電源條件。

感測模組的安裝位置應選擇平坦且無植被遮蔽之區域。裂縫儀應緊鄰目標裂縫安裝，而坡面運動儀則需分散部署於坡面具代表性之位置。安裝平台如擋土牆面，須平整、堅固，並具備足夠寬度以容納設備。對於漿砌卵(塊)石擋土牆等表面不規則或結構脆弱者，應審慎評估其施工可行性。

坡面運動監測儀安裝時，建議平行或垂直於地面，並明確標記三軸指向，例如水平安裝時 Y 軸方向應指向人工邊坡牆外，垂直安裝時 Z 軸方向應指出人工邊坡牆外，以利後續數據分析。雨量筒的承雨面上方必須保持無遮蔽，確保準確集雨。通訊與電源佈設亦是重要環節。安裝點位需確認 Wi-Fi 或 4G/LTE 訊號強度足夠穩定，例如 Wi-Fi 訊號強度應大於 -65dBm，4G 上傳速率應大於 0.1Mbps。若訊號微弱，可藉由無線訊號強波器改善。

電源方面，優先利用現有市電並安裝防水電箱進行保護；若無市電，則需佈設太陽能板與電池組，以確保電源自主。電力線路佈設應符合安全規範，並採用防水接頭。

現場安裝施工需考量環境條件與施工安全。例如，在私人場域部署時，應與屋主或社區管理委員會協調。鑽孔數量應滿足設備固定需求，對於不適合鑽孔之表面，可考慮使用工業用黏膠固定。同時，須避免儀器安裝位置影響人員通行。

3.2.5 系統設計小結

本章節提出一套整合性的智慧型人工坡地安全監測系統模組設計，有效應對台灣地區常見的人工坡地災害。系統設計理念著重於低功耗運作、無線通訊、環境耐候性與部署彈性，目標是建構一個能即時監測坡體結構變形與運動，並結合現地微氣候數據的智能監測網絡。

系統的核心感知層包含超聲波式裂縫儀和坡面運動監測儀，分別針對裂縫形

變和坡體整體運動進行高精度監測。同時，氣象盒子模組提供溫濕度、氣壓和雨量等微氣候數據，以利分析坡體行為與環境因子間的關聯。所有模組皆採用 IP67 高防水等級設計，確保在惡劣環境下的耐候性。

在數據傳輸方面，系統支援多種無線通訊技術。針對低功耗需求，選用 LPWAN(NB-IoT, LoRaWAN)；對傳輸速率要求較高或覆蓋不足區域，則支援 4G/LTE 蜂巢式網路；若有 Wi-Fi 網路，亦可便捷連接。通訊模組將數據編碼後依 HTTP 協定傳送至雲端，並具備主動式訊號偵測功能。

電力自主能力是系統長期穩定運行的關鍵。系統整合低功耗元件與韌體策略，並主要透過太陽能板與內建鋰電池組實現電源自主。完善的電源管理與監控模組則確保供電穩定與安全。

系統的實際部署需嚴謹規劃，從場域勘查、點位選擇、安裝平台要求、方向指向、通訊與電源佈設，到施工安全，各環節皆須周詳考量。透過此模組設計與部署策略，本系統期望為人工坡地災害預防與應變提供高效、可靠且可長期運作的智慧型監測解決方案。



3.3 水利智慧粒子模組設計

水利智慧粒子模組(亦稱智慧追蹤粒子、智慧軌跡粒子)主要設計目的是針對河道與壩體沖刷進行即時監測與資料蒐集，具備防水、定位與資料傳輸功能，能夠應用於各類水文實驗與實地部署。其核心理念為結合感測、定位與通訊於一體，使粒子能在特定環境下穩定運作，並能將關鍵水文資訊即時回傳至資料平台供後續分析。

3.3.1 設計動機與應用場景

本模組的核心為內建 GNSS 定位功能的系統單晶片(SoC)，可在啟動後定時紀錄位置座標，並配合時間戳記同步記錄漂流歷程。定位精度約為 1 公尺，搭配 10 秒回傳一次之設定，可重建完整的漂流軌跡。為因應不同場域應用，本模組提供多種啟動機制，如磁簧開關脫離即啟動，適用於壩體埋設型應用；或是即時感測觸發的電路開關設計，適合突發洪水或堰塞湖破壞模擬場景。定位晶片可於首次啟動後快速獲得穩定訊號，提高追蹤效率。

3.3.2 模組架構與感測組成

智慧粒子支援多項低功耗長距通訊協議，包含 4G LTE、NB-IoT 與 LoRaWAN，其中 4G LTE 適用於訊號充足地區，可提供較高資料回傳頻寬；NB-IoT 則能於偏遠山區仍維持穩定通訊。資料內容主要包含時間戳記、經緯度座標、電量狀態、模組溫度等資訊，可進一步擴充感測資料欄位(如加速度或溫濕度)。資料上傳可設定觸發式(如首次定位後每 10 秒一次)，亦可視場域網路狀況進行調整。為確保資料完整性，模組具備本地快閃儲存功能，於網路不穩時可暫存資料並於恢復後一次上傳。



圖-17 智慧粒子模組示意



圖-18 智慧粒子外觀



3.3.3 資料處理與通訊機制

水利智慧粒子內建微控制單元負責感測資料的即時處理與通訊傳輸控制。當粒子經由磁簧開關剝落後啟動，系統即進入工作模式，開始記錄時間戳記與 GNSS 定位資訊，作為水流軌跡之參考依據。通訊方面，本模組採用支援 4G LTE 網路的 SIMCOM 系列通訊晶片(如 SIM7000 系列)，可即時將粒子啟動資訊與定位座標透過 HTTP 協定回傳至遠端雲端平台。為降低功耗，模組預設於非觸發狀態下進入深度睡眠模式，僅由磁簧感測事件喚醒，確保整體運作效能與電力持續性。通訊模組並具備回傳狀態監控與異常重連機制，提升在野外水域部署下之通訊穩定性與資料完整性。

```
GNU nano 3.2                               20200122111408 GNSS record.txt
-----Start record-----
20200122111408,25.034145,121.535169,33.5,18,6,
20200122111408,25.034145,121.535169,33.5,18,6,
20200122111410,25.034092,121.535499,35.5,18,6,
20200122111411,25.034074,121.535583,36.0,18,6,
20200122111412,25.034121,121.535649,35.9,18,6,
20200122111413,25.034082,121.535676,37.4,18,6,
20200122111414,25.034,121.535676,36.3,18,6,
20200122111415,25.033995,121.535655,36.6,18,6,
20200122111416,25.033977,121.535662,37.9,18,6,
20200122111417,25.033986,121.535652,38.7,18,6,
20200122111418,25.034051,121.535526,39.5,18,6,
20200122111419,25.034121,121.535463,40.5,18,6,
20200122111420,25.034153,121.535358,38.4,18,6,
20200122111421,25.034117,121.535311,38.2,18,6,
20200122111422,25.034127,121.535191,37.3,18,6,
20200122111423,25.034112,121.535131,37.4,18,6,
20200122111424,25.034057,121.535112,37.8,18,6,
20200122111425,25.034035,121.5352,41.2,18,6,
```

圖- 19 資料傳輸介面示意

3.3.4 系統功能與特色摘要

粒子外殼以高強度工業塑膠或複合材料製成，外徑約 8 公分，具備 IP68 防水等級，可承受長時間水下運作與物理撞擊。根據測試結果，在水深 0.8 公尺環境中連續浸泡超過 120 小時未有滲水情形。模組整體具備抗腐蝕、抗 UV 與抗摔設計，能夠應用於高濕、強流與沙石衝擊環境下。內部電路設計上採低功耗方案，支援鋰

電池模組或太陽能輔助供電，平均可連續運作數日，若搭配間歇通訊模式，可延長電力使用壽命達數週以上。



圖-20 防水 IP 試驗

智慧粒子可依場域需求區分為「漂流型」與「埋設型」，前者主要應用於河川流速模擬、洪水行進軌跡研究及漂流物行為分析；後者則埋設於壩體或堤防內部，偵測結構破壞與沖刷起始。部署策略可根據現場情境選擇自動啟動機制，漂流型粒子可於觸水後自動啟動並漂浮，埋設型則在遭沖刷釋放時瞬間觸發開機。過去案例顯示，粒子能有效紀錄水中流速變化、漂流時間與地點，有助於重建災害事件發展歷程。應用場域涵蓋實驗水槽、天然河川、堰塞湖與橋墩下游區域，並具備後續資料視覺化分析潛力。

3.3.5 系統設計小結

綜上所述，本模組以水動力驅動與磁簧開關作為觸發條件，結合 GNSS 定位與 4G LTE 通訊功能，實現一種可即時回傳位移資訊之自主感測粒子。透過低功耗設計與模組化封裝，水利智慧粒子可適應多樣水域環境，協助掌握流域內水體運動軌跡與潛在沖刷路徑，對於橋梁沖刷預警與河川動態監控具備實質應用價值。未來可進一步擴充感測器種類與資料密度，以強化水文災害監測之完整性與精度。





3.4 環境複合式監測模組設計

本章節詳細闡述本研究開發之環境複合式監測模組的設計理念、功能組成與關鍵技術選用。此模組旨在提供一個全面性的環境感知能力，整合了對空氣品質(懸浮微粒與多種氣體)、微氣候參數(溫濕度、氣壓、雨量)以及環境振動或加速度的監測。透過將這些多源感測功能整合於單一平台，旨在提供更豐富的環境數據，以支援空氣污染分析、微氣候研究、環境異常偵測，乃至於潛在的地震或結構振動監測應用。本模組的實現形式為一個具備多功能感測能力的戶外型監測裝置，設計上著重於感測器的整合與校準、低功耗運作、可靠的無線通訊及環境耐候性。

環境複合式監測模組的設計核心是整合不同種類的感測元件，並透過一個強固且適應戶外環境的硬體平台實現數據採集、處理與傳輸。模組具備自主運作能力，適合在缺乏基礎設施的區域進行廣泛部署。

3.4.1 設計動機與應用場景

為實現環境複合式監測功能，模組整合了以下多種關鍵感測元件：

- 懸浮微粒感測器：

量測環境空氣中不同粒徑的懸浮微粒濃度，包括 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.0}$ 。這類感測器通常利用光散射原理來估算微粒濃度。

- 氣體感測器陣列：

用於偵測空氣中多種氣體濃度，包括氨氣(NH_3)、一氧化碳(CO)、氫氣(H_2)、甲烷(CH_4)、乙醇(C_2H_5OH)、丁烷(C_4H_{10})和苯(C_6H_6)。這些感測器多為金屬氧化物半導體(MOS)感測器，能感知特定氣體引起的電導率變化。



- 溫濕度與氣壓感測器：

量測環境的溫度、相對濕度和大氣壓力。高精度的數位感測器(如整合溫濕度與氣壓功能的晶片或獨立的溫濕度感測器及氣壓感測器)被用於提供精確的微氣候數據。

- 雨量感測器：

透過翻斗式雨量筒機制，精確記錄累積降雨量。雨量數據對於分析降雨對空氣污染物濃度和分佈的影響至關重要。

- 三軸加速度感測器：

量測模組在 X、Y、Z 三個軸向的加速度，可用於偵測環境振動、設備狀態變化，並具備潛在的地震事件偵測能力。常用的加速度晶片如 ADXL345，具有可設定的量測範圍和解析度。

這些感測器通過微處理器的數位或類比接口進行數據讀取。採集到的原始數據在模組內部進行初步處理，包括感測器校準、單位轉換、數據平滑或濾波。特別是對於三軸加速度數據，可以在邊緣端執行初步的振動分析或地震事件判斷演算法，例如計算每秒最大加速度值並濾除背景雜訊。

3.4.2 模組架構與感測組成

環境複合式監測模組的硬體設計旨在整合多種感測器與核心功能，並在戶外環境中穩定運作。

- 核心處理與控制單元：



採用低功耗且具備足夠處理能力的微控制器(如基於 ESP8266 或 ESP32 的模組)。此單元協調各感測器數據採集、執行邊緣計算、管理通訊模組和電源。

● 多感測器接口集成：

電路板設計需要整合多種類型感測器的接口，包括 I²C、SPI、類比輸入、數位 GPIO 等，以確保所有感測器都能順利連接與讀取數據。此設計與廠商合作設計 PCB，達成多感測器接口集成。

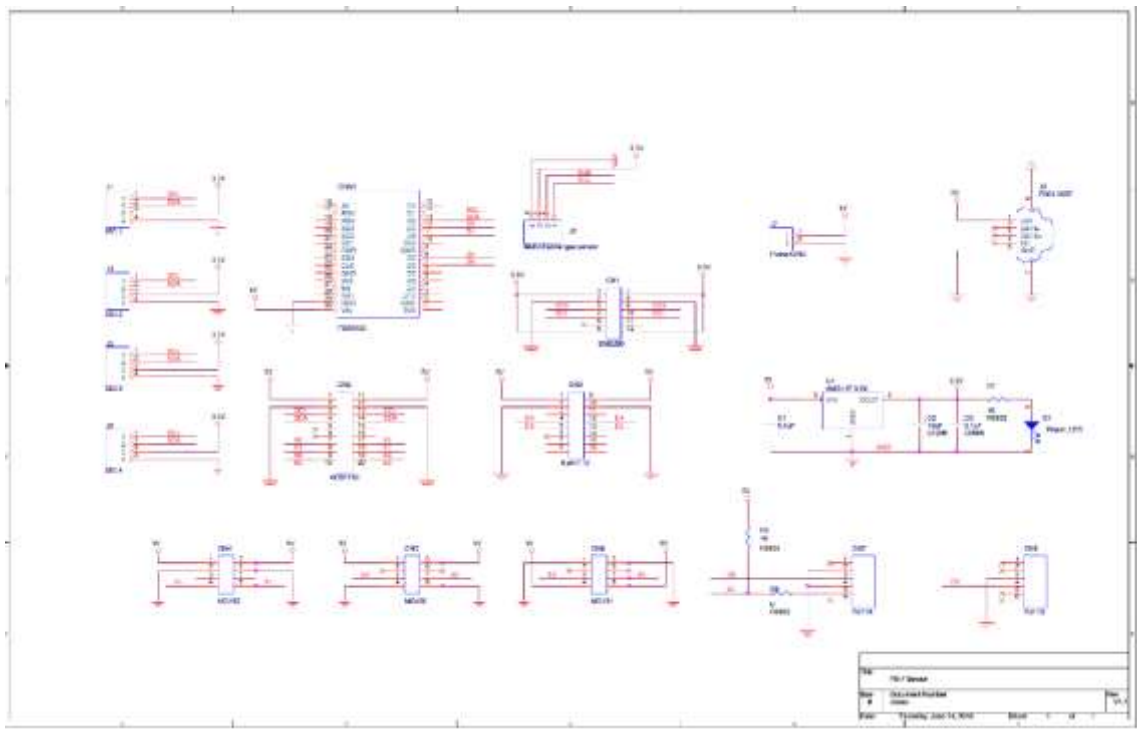


圖- 21 多感測器集成電路需求

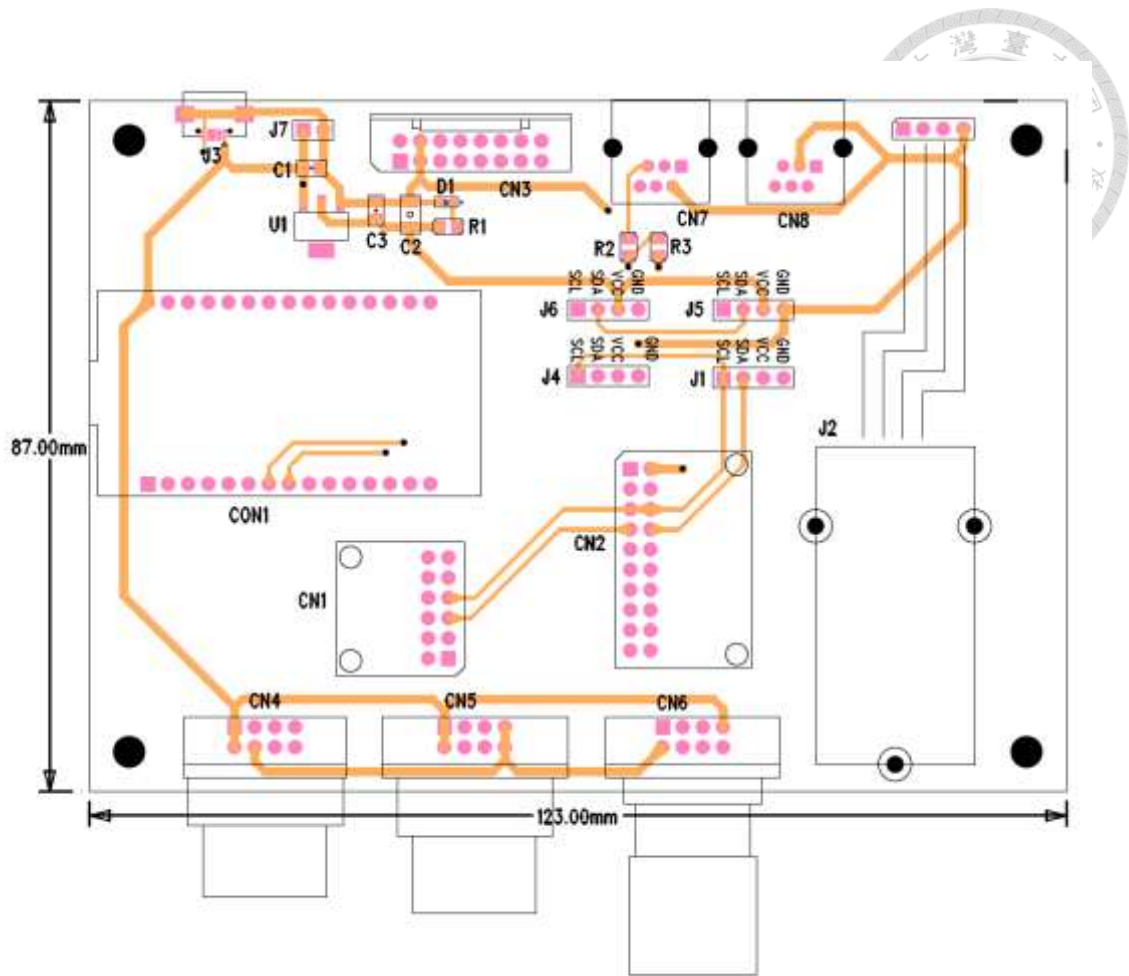


圖-22 多感測器 PCB 設計圖

- 外殼與耐候性：

模組外殼採用高強度、抗紫外線的材料製造，並具備 IP67 或更高的防水防塵等級，能夠承受戶外雨水、灰塵、極端溫濕度等環境條件。外殼設計考量了不同感測器的需求，例如氣體和懸浮微粒感測器需要有良好的空氣流通開口，雨量筒需要開放的頂部，而溫濕度感測器需避免陽光直射。加速度感測器安裝位置應盡量靠近模組重心，並確保安裝平台的穩固性。



圖- 23 環境複合式監測模組外觀

- 內部結構與散熱：

外殼內部設計需合理佈局各元件，考慮電路板、電池、天線、感測器等空間。被動散熱設計對於長時間運作的穩定性也很重要。



圖- 24 環境複合式監測模組內容



3.4.3 資料處理與通訊機制

確保環境複合式監測數據能夠從分散的部署點穩定、即時地傳輸至後端平台是系統運作的基礎。

- 多樣化通訊支援：

模組支援多種無線通訊技術，以適應不同場域的網絡環境。常見選項包括 Wi-Fi(適用於有現有網絡覆蓋的區域)、4G/LTE(提供廣域覆蓋，適合偏遠地區)以及潛在的 LPWAN 技術(如 NB-IoT 或 LoRaWAN，適用於低數據量、超長距離和超低功耗場景)。模組會內建相應的通訊晶片或模組。

- 資料傳輸協議：

採用標準化的物聯網通訊協議 HTTP。這些協議輕量且適用於資源受限的邊緣設備。數據通常以結構化格式(如 JSON)打包，包含所有感測器的讀數、時間戳記、設備識別碼等資訊。



台。系統韌體管理通訊連接，具備自動重連和訊號強度監測功能。

- 近端資料儲存容錯：

模組內建本地資料儲存功能(如使用快閃記憶體或 MicroSD 卡)。當無線通訊暫時中斷時，採集到的所有感測數據會暫存於本地。一旦網絡恢復，系統會自動將儲存的離線數據補傳至雲端，確保數據的完整性與連續性，這對於高頻率採集的加速度數據尤為重要。

3.4.4 系統功能與特色摘要

環境複合式監測模組的部署需仔細規劃，以獲取有效的監測數據並確保設備穩定運行。

- 場域選擇：

選擇能夠代表監測目標的場域進行部署。對於空氣品質監測，需考量潛在污染源和地形對空氣擴散的影響；對於微氣候監測，需選擇開闊且無遮蔽的位置；對於振動或地震監測，則需選擇基座穩固、無人為干擾的位置。

- 安裝位置與方式：

模組應安裝在穩固且方便維護的位置。安裝高度需考量各感測器的最佳採樣點(例如，空氣感測器通常安裝在地面以上幾公尺)。雨量筒頂部需無任何遮蔽。加速度感測器應牢固固定於被監測物體或穩定的地面上，避免晃動影響讀數。

- 電源與通訊環境：

部署點需評估電源可用性，並選擇合適的供電方案(市電或太陽能)。需測試現

場無線通訊訊號強度，確保數據回傳穩定，並考慮使用訊號延伸器或更換通訊技術。



- 環境保護：

模組的耐候外殼能夠抵禦大多數戶外環境因素。安裝時應進一步考慮局部環境對感測器的影響，例如加裝簡單的遮陽或防鳥網(需不影響感測器正常工作)。

3.4.5 系統設計小結

綜合上述，此章節實現分散式感測數據的穩定傳輸與即時上傳，有效因應各類場域在網路可及性與電力供應上的差異。同時，內建的近端資料儲存機制可於通訊中斷時暫存感測資料，待訊號恢復後自動補傳，確保高頻資料的完整性與連續性。為提升部署效率與監測準確度，模組安裝亦強調場域條件評估、感測器安裝角度與高度之調整，並依據監測對象選擇最佳化點位。電源方面，系統支援市電與太陽能雙模式，適應不同環境長期穩定運作。模組本體具備耐候外殼，搭配遮蔽與保護設計，強化感測穩定性與使用壽命。整體而言，環境複合式監測模組展現出高彈性與多功能整合等特性，能有效支援跨域環境資訊的即時採集與後端決策支援，具備實際部署與規模擴展的潛力。



3.5 智慧水井變形模組設計

隨著都市化推進與極端氣候事件增多，地下水文設施(如集水井、滯洪井等)在防災體系中扮演關鍵角色。然而，這些結構物常處於人力難以長期進入觀測的環境中，易於忽略其形變、下陷或內部積水異常，進而埋下結構損壞與排水系統失效的風險。因此，本研究設計一套整合電腦視覺技術、IoT 傳輸模組與資料同步架構的「智慧水井變形模組」，以達成低成本、長時間、高頻率、無人化的井體監測機制。

3.5.1 設計動機與應用場景

本模組的設計核心目標包含：

1. 即時辨識井壁三維變形(位移、傾斜、旋轉)
2. 融合多源水位資料以監控異常積水與內部壓力變化
3. 以無線模組回傳資料至雲端平台進行整合與視覺化

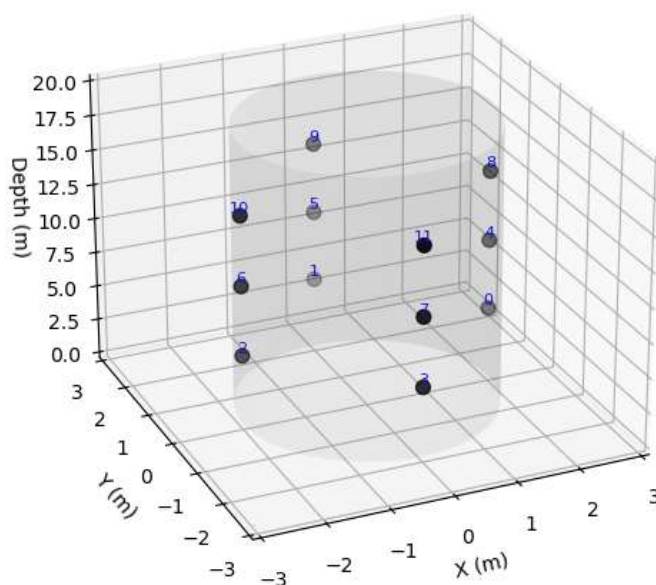


圖-27 水井監控平台示意



模組整體架構可分為以下幾個元件：

1. 電腦視覺標記系統(CV Markers)
2. 攝影與資料擷取設備(400 萬畫素夜視攝影機)
3. 水位感測模組(浮球水尺與壓力式水位計)
4. 通訊與電源系統(4G LTE Wi-Fi 分享器、鋰電池)
5. 遠端伺服器與儀表板平台

3.5.2 模組架構與感測組成

本模組採用 ARUCO 標記系統作為主體觀測工具，利用 OpenCV 套件實作辨識與姿態計算，具備以下標記類型與功能：

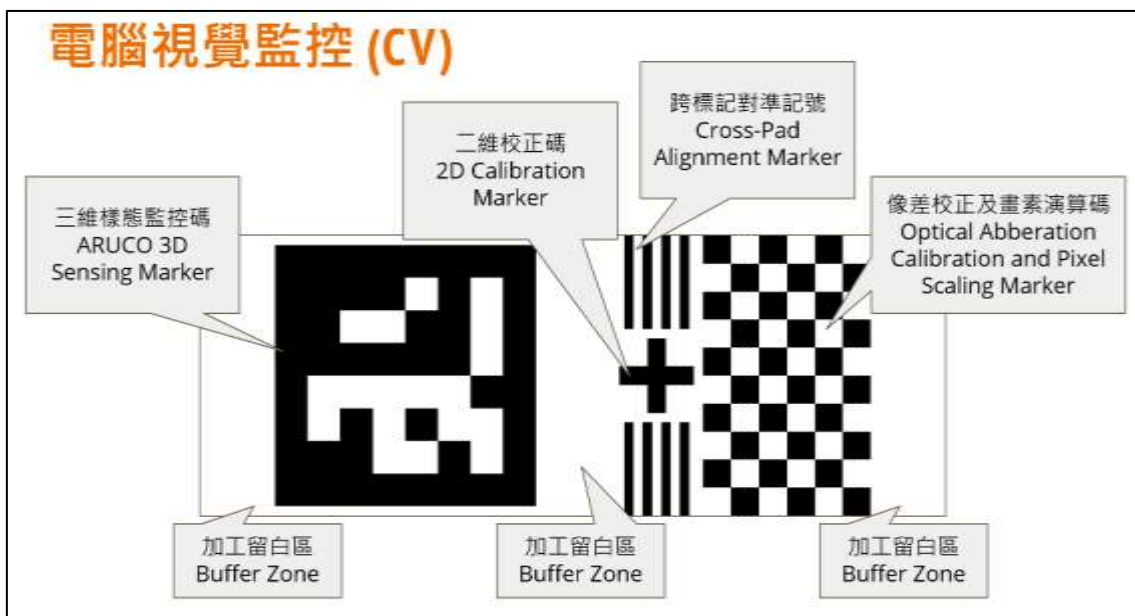



圖-28 電腦視覺用圖形設計

- ARUCO 三維樣態監控碼：



編碼型記號具獨立 ID，可由攝影機自動辨識其中心座標(X,Y,Z)及三軸旋轉角度(Pitch, Yaw, Roll)，提供量化的形變資料。利用 ARUCO Library 產生的記號，記號內容代表編號，記號設計可被程式碼取得其三維立體指向，以及縮放比例，用來監控記號所安裝的井壁三維位置及轉動變化。利用使標記做跨時距的影像差分，可以獲得監控記號演算的物理量隨時間變化。

- Cross-Pad 對準標記：

安裝於不同監控面間，可對應不同深度或扇區，計算標記對標記的橫向及縱向滑移。

- 2D Calibration Marker：

提供跨時間尺度的角度變異校正基準。

- 光學畸變與畫素比例校正圖案：

以標準棋盤格或交叉線網格進行像差與距離縮放比補正。利用擷取畫素，可以獲得推估的距離資訊。

這些標記統一製作並安裝於水井井壁(通常為混凝土或水泥磚構造)，每座井體依據其深度與觀測需求，設置 3~6 組標記。標記表面以防水護膜保護，並加強抗鏽與抗鹽霧處理，適應高濕與反光環境。

商用級夜視攝影機(解析度 $\geq 4MP$)負責擷取固定視角畫面，裝設於井口之上並朝下拍攝標記群。攝影機支援遠端控制、自動曝光與紅外補光，保證即便在夜間或無光環境下仍能清晰取像。使用市電為電源選項。

水位感測部分，本系統設計兩種互補型模組：



- 浮球水尺(Float Leveling Sensor)：

當水位上升至預定閾值，浮球向上浮動並觸發水銀傾倒開關，回傳訊號至中央伺服器。其特點為物理結構簡單、零耗電待機，適用於觸發式監控。防水等級達 IP68，可承受 40 公尺以上水深壓力。使用鋰電池為電源。

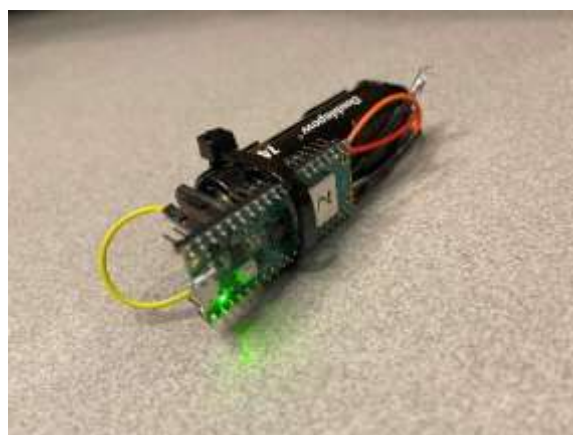


圖- 29 浮球水尺電路集成



圖- 30 浮球水尺外觀

- 壓力式水位計(Pressure Transducer)：

連續量測水壓並換算為水位高程，具備高解析度與長期穩定性，資料可每小時或每 10 分鐘上傳。設備置於井底，以鋼纜懸掛並連接至資料盒，透過 4G 傳輸

資料。使用市電。



圖-31 壓力式水位計外觀

此兩者可同步作業亦可分離運行。浮球可作為即時告警用，壓力式水位計則提供長期趨勢曲線。此外，兩者資料可交叉驗證，降低單一感測器故障風險。

3.5.3 資料處理與通訊機制

為了使監測數據能夠從深邃的結構體中穩定、即時地傳輸至後端平台，井口連結市電，架設了 4G LTE Wi-Fi 分享器，所有的設備都經由此設備傳輸數據。

各種模組的資料傳輸方式分別為：

- 商用級夜視網路攝影機(Webcam)：

商用級夜視網路攝影機有其自訂的應用程式、手機 APP 以及傳輸方式。此系統使用的是有 SD Card 備援、可回放、可下載影片、可即時播放的商用網路攝影機。

- 浮球水尺(Float Leveling Sensor)：

利用 Micropython 程式碼，直接將啟動時間戳記資料送上 Google Cloud。



Data on Cloud by Wireless			
WELL-01	M	FTL0008	20241108_121029 Float-Tilt-Level
WELL-01	M	FTL0008	20241108_120023 Float-Tilt-Level
WELL-01	M	FTL0008	20241108_115018 Float-Tilt-Level
WELL-01	M	FTL0008	20241108_115010 Float-Tilt-Level
WELL-01	M	FTL0009	20241108_114759 Float-Tilt-Level
WELL-01	M	FTL0009	20241108_114746 Float-Tilt-Level
WELL-01	M	FTL0009	20241108_103839 Float-Tilt-Level
WELL-01	M	FTL0008	20241107_204038 Float-Tilt-Level
WELL-01	M	FTL0004	20241107_204015 Float-Tilt-Level
WELL-01	M	FTL0001	20241107_204014 Float-Tilt-Level
WELL-01	M	FTL0003	20241107_203958 Float-Tilt-Level
WELL-01	M	FTL0009	20241107_203944 Float-Tilt-Level
WELL-01	M	FTL0006	20241107_203930 Float-Tilt-Level
WELL-01	M	FTL0001	20241107_203838 Float-Tilt-Level
WELL-01	M	FTL0005	20241107_203818 Float-Tilt-Level
WELL-01	M	FTL0007	20241107_203801 Float-Tilt-Level
WELL-01	M	FTL0002	20241107_203744 Float-Tilt-Level
WELL-01	M	FTL0010	20241107_203718 Float-Tilt-Level
WELL-01	M	FTL0001	20241107_005227 Float-Tilt-Level

圖-32 浮球水尺資料傳輸示意

- 壓力式水位計(Pressure Transducer)：

市售壓力式水位計(隼星科技)，有其個別傳輸方式及資料平台。



圖-33 市售壓力式水位計展示平台



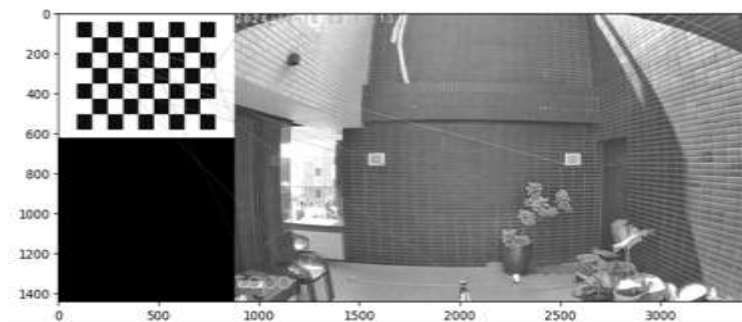
圖-34 市售壓力式水位計數據展示

3.5.4 系統功能與特色摘要

終端應用架構包含：

1. 自動影像辨識模組(以 Python/OpenCV 實作)

利用 Python OpenCV Lib 及 Pattern Recognition 完成，棋盤格在被準確認出在兩個不同的地方。



Script to detect the
checkerboard location
and its distortion

圖-35 圖形辨識示意



2. 姿態與座標計算模組

利用 Python OpenCV 和 ARUCO 模組完成，萃取 ARUCO 三維樣態監控碼的三個轉軸方向以及直線距離。

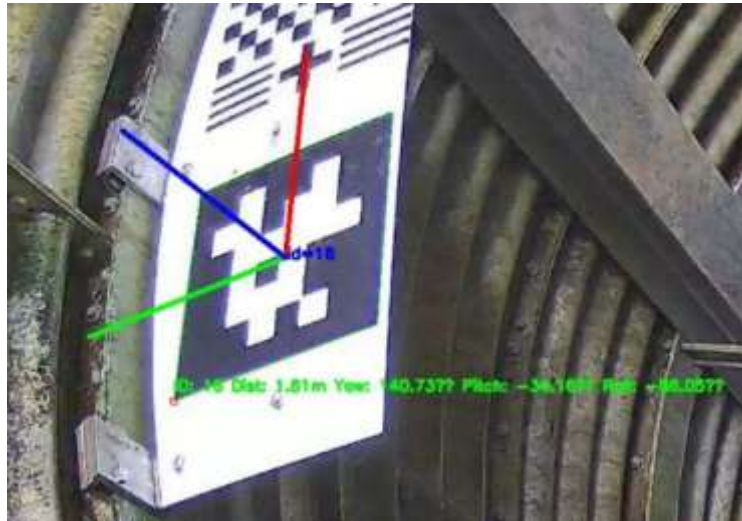


圖- 36 圖形辨識以及角度定義

3. 可視化儀表板(以 Plotly Dash 實作)

利用 Python Numpy 和 Plotly Dash Lib 實作完成互動式儀表板，這個應用可以讀入讀出 CSV 檔、手動增加、調整、移除井的參數以及 ARUCO 三維樣態監控碼的位置、三旋轉軸數值以及距離。並可以比較同位置的前後兩組數值以達成差分判斷井身的變化。

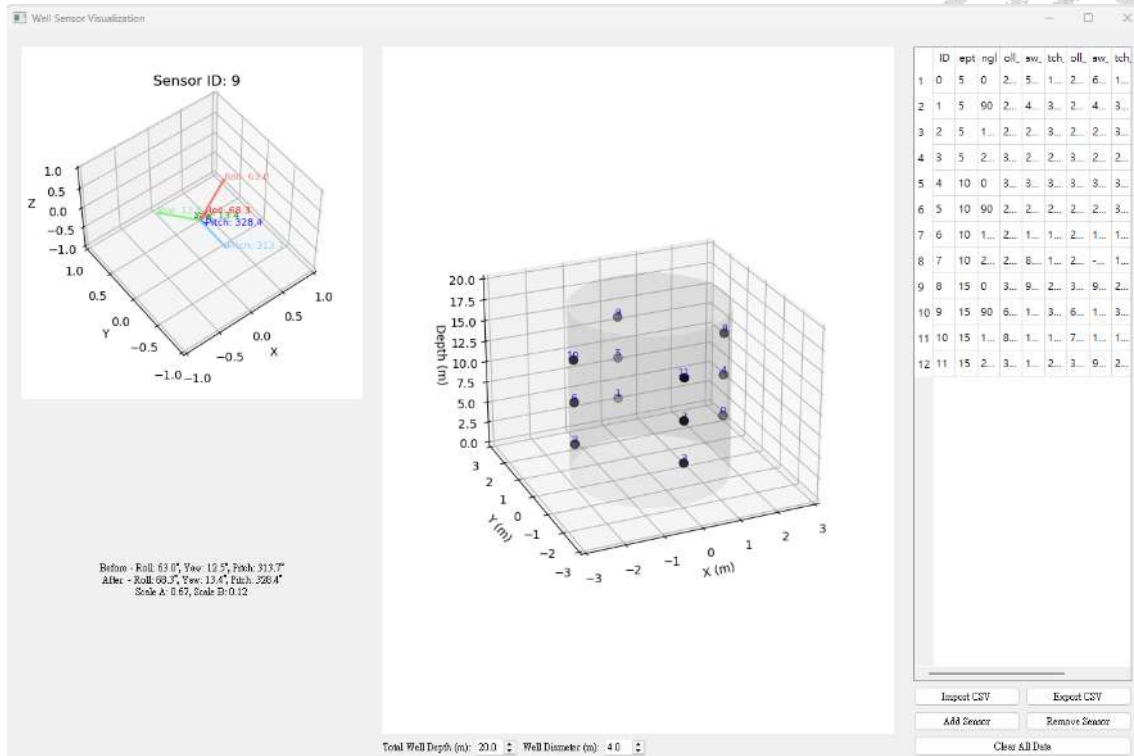


圖- 37 本研究開發平台

影像與感測資料可每日上傳、解析並繪圖呈現，並可設定警戒值觸發警報文字推播。

3.5.5 系統設計小結

智慧水井變形模組不僅可量測井壁的結構變化，其標記設計與鏡頭對位方式亦可延伸應用於以下結構行為觀測：

- 側向滑動：若不同深度之標記出現橫向距離差異，可推算出剪力或地基滑移。
- 傾斜變形：透過 Pitch/Roll 角度變化可推估井體傾倒趨勢。
- 扭轉行為：Yaw 角變化揭示井體發生旋轉位移，常見於地震或地層側推下。
- 下陷與隆起：Z 軸座標變化搭配水位上升，可評估井體基礎穩定性。

此模組架構具備模組化、可擴充、低成本、適應性強等特性，未來亦可應用於下列場域：



- 山區邊坡滯洪井與截水溝井體監控
- 都市排水系統箱涵或接水井結構行為監控
- 淹水潛勢區排水異常與積水警示平台
- 廠區地下管網、基樁沉陷等工程結構長期變異監測

本研究設計之智慧水井變形模組，成功整合電腦視覺技術與 IoT 感測傳輸，展現出於防災與基礎設施安全監控上的高度應用潛力。下一節將說明模組於實場部署下的表現與分析成果。



3.6 災防通訊平台與 LLM 整合設計

本研究智慧型災防系統在終端應用的核心創新之一，在於整合大型語言模型 (Large Language Model, LLM) 與主流社群通訊平台，旨在構建一個具備即時、自動與個人化特性的災害警訊推播與互動系統。傳統災害預警系統常採用單向、制式化的訊息傳遞方式，這類訊息往往未能充分考量接收者的情境差異與即時需求，可能導致預警資訊的低效應，甚至使民眾對重複且不具個人相關性的警告產生疲乏。為克服這些限制，本研究利用 LLM 強大的自然語言處理與生成能力，結合物聯網感測器收集的即時數據，以產生更具情境相關性、易於理解並包含具體行動指引的客製化災情訊息。這符合將感測器與民眾連結，並確保採取適當行動的目標。整個平台架構以 Webhook 為核心，部署於無伺服器雲端環境(例如 Heroku)，透過事件驅動方式與前端感測模組(如水利智慧粒子、氣象盒子、空氣盒子等)及後端語言模型進行即時互動。這種無伺服器架構有助於簡化系統部署、降低維護成本，並具備良好的擴展性以應對大規模數據處理需求，同時也能有效地整合感測器數據流與模型輸出。

3.6.1 設計動機與應用場景

為滿足台灣地區廣大使用者對即時通訊軟體的高度依賴，本研究選擇 LINE 作為重要的使用者互動介面，並透過建置 LINE BOT 帳號來實現災害資訊的傳遞與互動。LINE BOT 的核心架構基於 LINE Messaging API，此 API 提供了功能接口，允許第三方應用程式(即本研究的 Webhook 服務)接收來自 LINE 使用者的訊息，並主動向使用者推播訊息。當前端感測模組偵測到異常事件或後端分析模型產生新的預警結果時，相關資訊會被發送至雲端 Webhook 服務。Webhook 作為一個事件監聽器，接收到特定事件後會觸發相應的處理邏輯。



3.6.2 模組架構

在 LINE BOT 的模型架構中，使用者與系統的互動主要分為兩種模式：主動接收與主動查詢。在主動接收模式下，系統會根據使用者的地理位置與其訂閱的警戒層級，自動向其推送相關的氣象、淹水、空氣品質等災情警訊。這得益於後端數據處理系統對感測數據的即時分析與判斷。系統會將感測數據、模型預測結果(例如洪水模擬範圍)以及其他有效公開資訊整合，形成輸入資料提供給 LLM。在主動查詢模式下，使用者可以透過傳送特定關鍵字來查詢其所關心的災情資訊。當 Webhook 接收到使用者傳來的查詢訊息時，會解析關鍵字並結合系統中最新的感測數據與分析結果，組成一個針對性的提示指令提供給 LLM 模型。

LLM 模型接收到提示指令後，會生成易於理解且具行動指示的自然語言回應。這些回應會透過 LINE Messaging API 發送回使用者的 LINE 帳號，以文字訊息或結構化訊息的形式呈現。為了確保訊息的準確性和安全性，在 LLM 生成回應後發送給使用者之前，系統會進行驗證與過濾，包括關鍵字驗證和內容過濾，避免不恰當或不實資訊的傳播。整個 LINE BOT 模型架構的設計，旨在提供一個使用者介面友好、資訊即時且能支援基礎互動的社區級防災通訊渠道，有效提升民眾獲取災情資訊的便捷性與效率。系統運行在雲端平台，能夠保證服務的穩定性與可靠性，然而其性能也依賴於底層網絡的穩定性及 API 服務的可用性。

流程圖敘述實作程序：

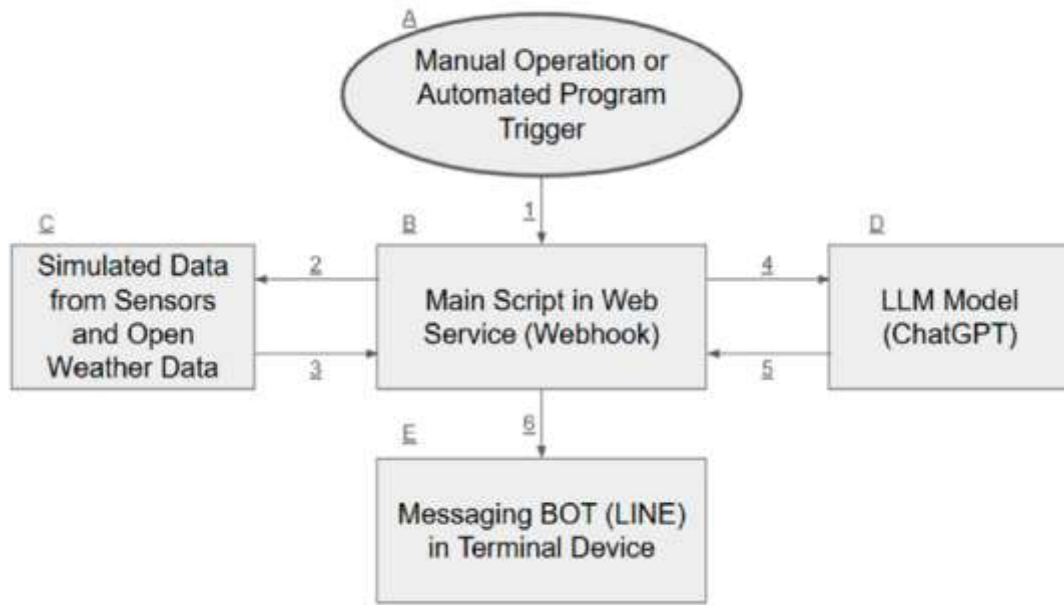


圖-38 災防通訊平台整合 LLM 流程圖[29]

- 區塊 A

手動操作或自動程式觸發：代表系統啟動的初始來源，可能來自人工操作或預先定義的自動排程機制。

- 區塊 B

網頁服務主腳本(Webhook 與 HEROKU)：位於網頁服務端的主要控制腳本，負責資料傳輸、接收、API 互動及資料處理邏輯之管理。此功能以 Python 撰寫，並整合所有 API 接口。

- 區塊 C

模擬感測器資料與開放氣象資料：包含來自社區部署之即時感測器資料與透過開放氣象服務取得的氣候資訊。透過 Python 中的 HTTP POST 與 GET 方法，系統可接收所有所需資料並處理 HTTP 回應內容。



- 區塊 D

大型語言模型(ChatGPT):本模組應用自然語言處理技術,利用如 OpenAI GPT 模型的 LLM,分析輸入資料並生成具情境脈絡的警示或資訊訊息。透過預設提示詞配置、固定提示內容與迭代驗證,可穩定提供輸入訊息至 API 端。

- 區塊 E

終端裝置上的通訊機器人(如 LINE):整合於通訊平台(例如 LINE)之訊息介面,將由 LLM 生成的訊息即時傳送至使用者,提供潛在災害事件的警示或更新。訊息在發送前經由關鍵字驗證、模式辨識與內容過濾後傳遞至用戶端。

- 步驟 1 與區塊 A:

以台灣常見的颱風警報與極端天氣事件為例,本系統首先根據警戒等級動態調整通知頻率:海上颱風警報採六小時一次推播,陸上颱風警報則縮短為十分鐘一次。目前系統仍由使用者手動啟動。

- 步驟 2 與 3, 區塊 B 與 C:

系統啟動後,透過 API 與無伺服器函式(Serverless Function)實現即時資料擷取與資料週期自動化,並以自訂腳本建構專屬資料集。Webhook 與 HEROKU 平台上的所有程式碼皆以 Python 3.10.15 撰寫。該網頁服務亦內建事件觸發機制,在關鍵時刻確保系統即時響應,支援災害即時更新與快速應變處置。系統同時強調資料隱私與錯誤管理機制,維持整體可靠性。

- 步驟 4 與 5, 區塊 D:

本架構可將開放與專屬資料集無縫整合,並透過 AI 驅動的文字生成能力強化資料處理與傳播效率。



- 步驟 6 與區塊 E：

災害通知自動化功能可傳遞具行動性且具情境脈絡的資訊，提升使用者在強降雨與淹水災害期間的應變準備、判斷能力與反應效率。

3.6.3 大型語言模型(LLMs)之防災訊息生成策略

本研究將大型語言模型(LLMs)視為災防通訊平台的核心智能化引擎，其主要作用是實現對複雜災情資訊的語意理解與生成具備行動指引的警示訊息。不同於傳統防災系統中預先編寫的固定式警示語句，LLM 能夠根據即時輸入的感測數據、分析結果及使用者查詢，動態生成高度情境化的自然語言回應。本研究選用 OpenAI 的 ChatGPT-4o-mini 模型，並透過其 API 接口進行功能串接。

LLM 的語意理解能力體現在其能夠解析來自感測器數據、模型預測結果以及使用者查詢中的關鍵信息。例如，系統會將感測器偵測到的具體數值(如洪水深度)、異常事件的判斷結果(如輕微淹水)、模型的預測狀態(如未來六小時的預測水位)等結構化或半結構化數據，轉換為 LLM 能夠理解的自然語言提示詞。這個轉換過程涉及數據的語意化，例如將「flood_depth=39cm」轉換為「目前觀測到洪水深度為 39 公分，屬於嚴重淹水」。

為了引導 LLM 生成符合防災需求且結構化的回應，本研究設計了一套標準化的提示詞母版規劃與語意分類策略。提示詞母版是一個預先定義的文本結構，其中包含需要由外部數據填充的佔位符(Placeholder)。標準化的 Prompt 格式包含多個關鍵元素，例如「觀測時間」、「過去狀態」、「目前狀態」、「預測狀態」與「指引行動」。例如，一個提示詞可能的開頭是「請根據以下資訊，生成一個不超過 150 字的災情警示訊息：觀測時間：{當前時間}；過去六小時狀態：{過去狀態描述}；目前狀態：{目前狀態描述}；未來六小時預測：{未來狀態預測}；請針對這些狀況，

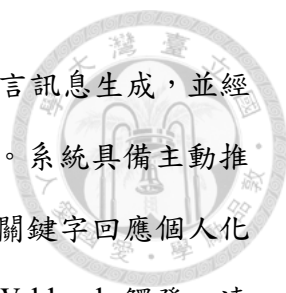
提供明確的行動指引。」系統會根據從感測器、模型及其他數據源獲取的即時資訊，自動填充這些佔位符。

語意分類策略主要由部署在 Webhook 的 Python 程式實作。當 Webhook 接收到來自各感測模組的感測資料、後端分析模組的異常判斷或模型預測結果時，會對這些數據進行分類處理。例如，根據洪水深度將淹水狀態分類為「無淹水」、「輕微淹水」、「嚴重淹水」。然後，這些分類結果會被用於組合標準化 Prompt Template 中的相應描述。例如，如果目前的洪水深度判斷為「嚴重淹水」，Prompt 中的「目前狀態」描述就會被填充為「嚴重淹水(洪水深度 39 公分)」。這個組合好的 Prompt 隨後會透過 API 發送至 OpenAI 的 ChatGPT 模型進行處理。

LLM 接收到 Prompt 後，會利用其訓練資料中的語言模式和知識，生成符合 Prompt 要求的自然語言回應。為了確保生成訊息的實用性與安全性，本研究還採用了 Prompt Engineering 技術對 LLM 的輸出進行優化，例如透過在 Prompt 中明確要求包含具體行動指引、限制訊息長度在 150 字以內，以及要求避免使用模糊或可能引起恐慌的詞語。此外，系統會對 LLM 的輸出進行後處理驗證，例如檢查是否包含關鍵字、模式識別以及內容過濾，確保最終推送給使用者的訊息準確、相關且安全。雖然 LLM 在自然語言生成方面表現出色，但其輸出可能受到訓練資料的限制，無法完全捕捉最新的即時信息或生成絕對權威的應急建議。因此，後處理驗證和結合其他可靠資訊來源是必要的保障機制。

3.6.4 系統功能與特色摘要

本系統的核心創新在於導入大型語言模型(Large Language Models, LLMs)與即時通訊平台(如 LINE)，建構一套具備情境理解能力與動態互動特性的災防推播架構。傳統災防訊息往往制式且缺乏彈性，難以因應民眾個別需求與場景差異，導致警示資訊失效或被忽視。本研究突破此限制，透過感測器資料、模型預測結果與



使用者查詢整合生成語意化提示詞，交由 LLM 模型進行自然語言訊息生成，並經驗證與過濾機制處理後，以 LINE BOT 形式傳遞至終端使用者。系統具備主動推播與被動查詢雙模式，能依據使用者位置、警戒層級或特定查詢關鍵字回應個人化災情資訊。平台建構上採無伺服器架構(如 Heroku)，核心透過 Webhook 觸發，連接即時資料(感測器、API 資料源)、Python 控制腳本與 LLM API，形成彈性強、維護簡便的系統流程。通訊與資料處理以 MQTT、HTTP 協定串接，支援近端容錯儲存與自動補傳機制，強化資料連續性與系統韌性。此整合模式不僅提升資訊傳遞的即時性與準確性，亦促進了使用者參與與應變行動的落實，是具實用性與擴展潛力之智慧型社區防災通訊解決方案。

3.6.5 系統設計小結

本系統以智慧災防為目標，整合物聯網感測模組、無伺服器架構與大型語言模型，實現即時、個人化且互動式的防災資訊推播流程。從前端的異常感測與事件觸發，到中段的資料彙整、語意分類與提示詞產生，再到後端的 LLM 自然語言生成與內容驗證，每一流程皆可自動化處理並因應不同場域需求動態調整。系統支援多通訊協定與資料格式，能有效整合社區部署感測器與外部資料來源，在資料中斷時亦具備容錯補傳機制。LINE BOT 作為使用者端介面，提供親民且高滲透率的互動通道，有助於擴大災防資訊觸達層級與使用者參與度。整體設計著重模組化與彈性擴充，無伺服器部署降低維運成本，適合應用於各類型社區或跨域系統整合場景。透過本平台之導入，可有效提升災情感知速度、警示資訊精準度與使用者行動效率，實現資料驅動之智慧防災決策支持。



3.7 系統設計總結

本章詳細闡述了智慧型災防系統的整體設計與各關鍵模組的架構。系統採用分層設計，包括負責數據採集的感測模組、確保數據可靠傳輸的資料流程及通訊方法，以及進行數據分析、決策與使用者互動的終端應用。

感測模組開發了多種針對不同災害面向的物聯網模組，包括用於氣象監測的氣象盒子、用於水文與結構沖刷監測的水利智慧粒子、用於空氣品質監測的空氣盒子，以及用於地下結構變形監測的智慧水井變形模組。這些模組在設計上均考量了戶外惡劣環境的適應性、低功耗運行與資料傳輸的可靠性。

資料流程及通訊方法整合了多種無線通訊技術，以適應不同部署場域的網絡條件，並透過 HTTP 協定實現高效的數據傳輸。本地資料儲存機制有效應對了網絡不穩定問題，確保數據的完整性。

終端應用是系統的智能核心，部署於雲端環境，提供彈性的數據處理與儲存能力。本研究的創新之處在於將大型語言模型整合至災防通訊平台，實現了更具情境相關性、個人化且易於理解的災害警示訊息生成與推送。透過與 LINE 和 Messenger 等主流通訊軟體的結合，擴大了資訊觸及範圍，並建立了使用者主動查詢與回報的雙向互動機制。此雙向互動機制利用公民科學的力量，補充了專業監測數據的不足，並透過使用者回饋持續優化 LLM 的訊息生成策略。

總體而言，本章提出的系統設計與模組架構，成功整合了物聯網感測、多模態通訊與人工智慧(LLMs)技術，建構了一個功能全面、具備環境適應性與智能化特性的智慧型災防系統原型。這為提升災害監測、預警及應急資訊傳遞的效率與精確性提供了可行的技術方案，展現了在防災領域的應用潛力。

第四章 各模組實驗與部署成果



4.1 實驗與部署總覽表

本章對智慧型災防系統各感測與通訊模組的實驗與部署成果進行了詳細闡述。

以下為各模組對應的場域、時間、測試目的與關鍵參數的總覽整理：

表格-4 本研究各模組部署總覽

模組名稱	合作單位	部署場域	部署數量
人工坡地監測系統	中興工程顧問社 台北市政府工務局 大地工程處	台北市	5 處
水利智慧粒子	中興水保系	惠蓀林場	6 顆
環境複合式監測	台大實驗林 台灣防災產業協會	鹿谷 竹山	12 組複合式監測
智慧水井	中興水保系	阿里山幼葉林	6 支攝影機 30 個量測點位 10 個浮球尺標

4.2 人工坡地監測系統模組場域實驗與成果

本節詳細報告本研究開發之智慧型人工坡地監測系統核心模組於實際場域的實驗過程、部署配置與觀測成果。透過在真實人工坡地環境下的長期監測，旨在全面評估超聲波式裂縫儀、坡面運動監測儀以及輔助氣象盒子模組的性能、穩定性、數據準確性，並分析其監測數據與實際人工坡地行為之間的關聯性。實驗同時評估了系統的通訊可靠性、電力自主性以及複雜戶外環境下的整體運作表現。

本研究協助財團法人中興工程顧問社於 107 年度臺北市山坡地人工邊坡巡勘檢查及資料維護與檢核計畫，擔任物聯網監測系統開發、部署安裝、MySQL 資料庫搭建、資料分析。本研究發表物聯網解決方案-以人工坡地監測為例於大地技術期刊第 17 期[26]。

4.2.1 測試場域與部署配置

為模擬真實人工坡地災害潛勢環境，我們選擇了具代表性的場域進行人工坡地監測系統模組的部署與測試。這些場域包括已識別出既有裂縫的擋土牆邊坡以及有潛在滑動風險的人工坡地。

- 擋土牆邊坡部署：

在擋土牆體表面選擇了數處存在明顯裂縫的位置。超聲波式裂縫儀安裝於裂縫兩側，通過膨脹螺絲固定反射板，感測器主體則安裝於穩定、平整的區域，確保超聲波探測軸線正交於裂縫方向，以精確量測裂縫寬度的變化。



圖- 39 裂縫計安裝方式[27]

- 輔助氣象盒子部署：

在各人工坡地監測點附近，且無明顯遮蔽的開闊區域，部署了氣象盒子模組。氣象盒子的安裝高度考慮了標準氣象觀測的規範，旨在獲取代表性的溫濕度、氣壓和降雨量數據。

在部署前，對各監測點的通訊訊號強度和電源條件進行了評估。通訊方面，測試了 Wi-Fi 和 4G/LTE 訊號強度，確保滿足模組的最低連接要求，並在訊號較弱的區域考慮了訊號延伸器的使用。電源方面，優先利用附近現有市電進行供電，若無市電則佈設太陽能板和電池組，以實現電源自主。所有外部電源接口和電纜連接均採用防水處理。監測系統設定為定時或在偵測到顯著變化時觸發數據採集與回傳。

部署點位於台北市五處，分別為文山區 4438-WS-PTA-0029(公訓處 1)、文山區 4438-WS-PTA-0031(公訓處 2)、文山區 4634-WS-PTA-0005(政治大學)、文山區 4634-WS-RCR-0049(政治大學)以及北投區 4061-BT-GSW-0002(中山北路七段)。

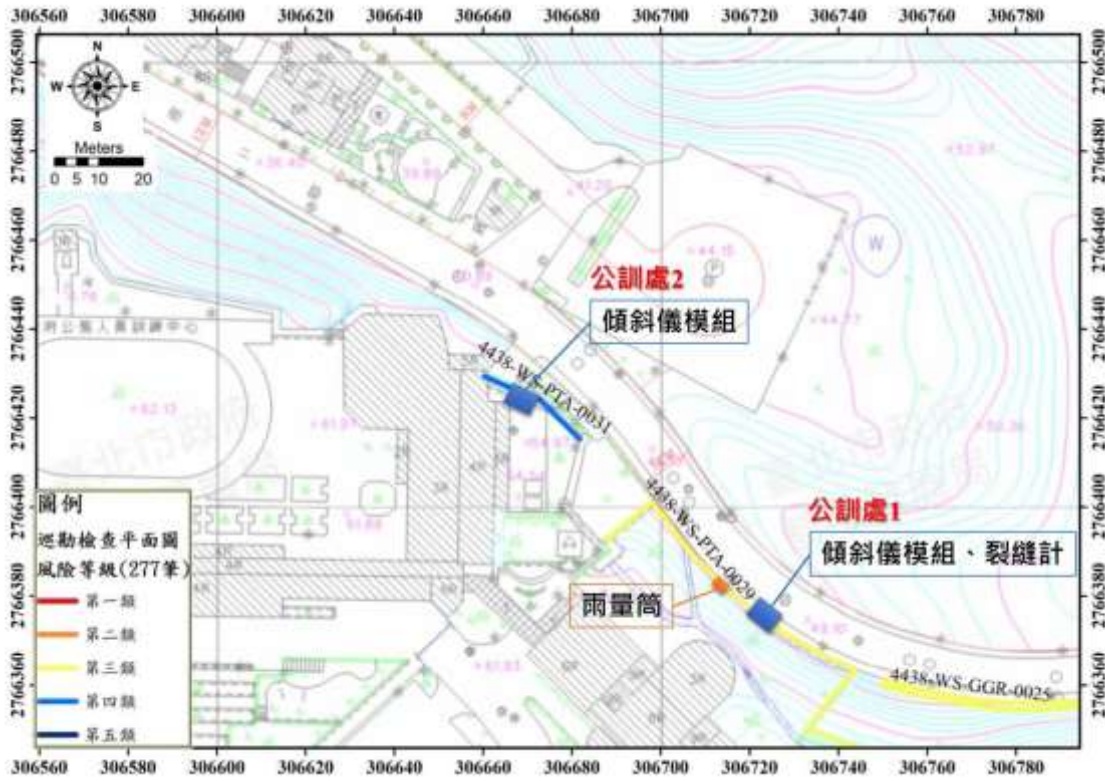


圖-40 人工坡地監測系統安裝地圖(一)[27]



圖-41 公訓處 1 實照[27]



圖-42 公訓處2實照[27]

<p>公訓處1：4438-WS-PTA-0029</p> <p>107/03/28完成佈建</p>  <p>✓ 傾斜儀整合模組 ✓ 雨量筒</p>	<p>公訓處2：4438-WS-PTA-0031</p> <p>107/06/28完成佈建</p> 
<p>107/06/28感測模組更新</p>  <p>✓ 裂縫計</p>	 <p>✓ 傾斜儀整合模組</p>
<ul style="list-style-type: none"> • 採用 4G-WIFI 傳輸 • 電源由公訓處提供 • 感測模組核心及傳輸模組外盒均使用 IP67 規格防水防塵標準 	

圖-43 公訓處部署細節[27]

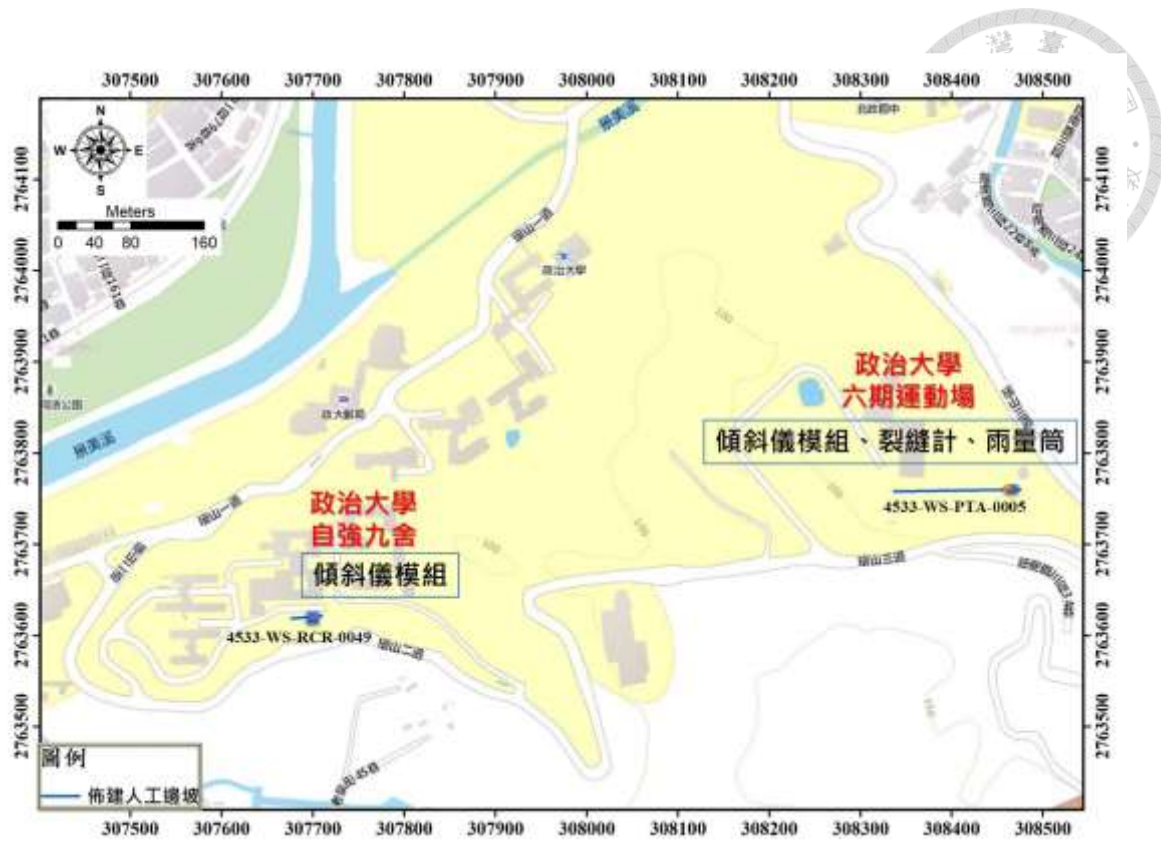


圖-44 人工坡地監測系統安裝地圖(二) [27]



圖-45 政治大學六期運動場實照[27]



圖-46 政治大學自強九舍實照[27]

<p>政治大學1：4634-WS-PTA-0005</p>	<p>政治大學2：4533-WS-RCR-0049</p>
<p>107/06/28完成佈建</p>	<p>107/09/25完成佈建</p>
<p>✓ 雨量筒、傾斜儀 整合模組</p>	
	<p>✓ 傾斜儀整合模組</p>
<p>✓ 裂縫計裝設情形</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 採用 4G-WIFI 傳輸 • 電源由政治大學提供 • 感測模組核心及傳輸模組外盒均使用 IP67 規格防水防塵標準

圖-47 政治大學部署細節[27]

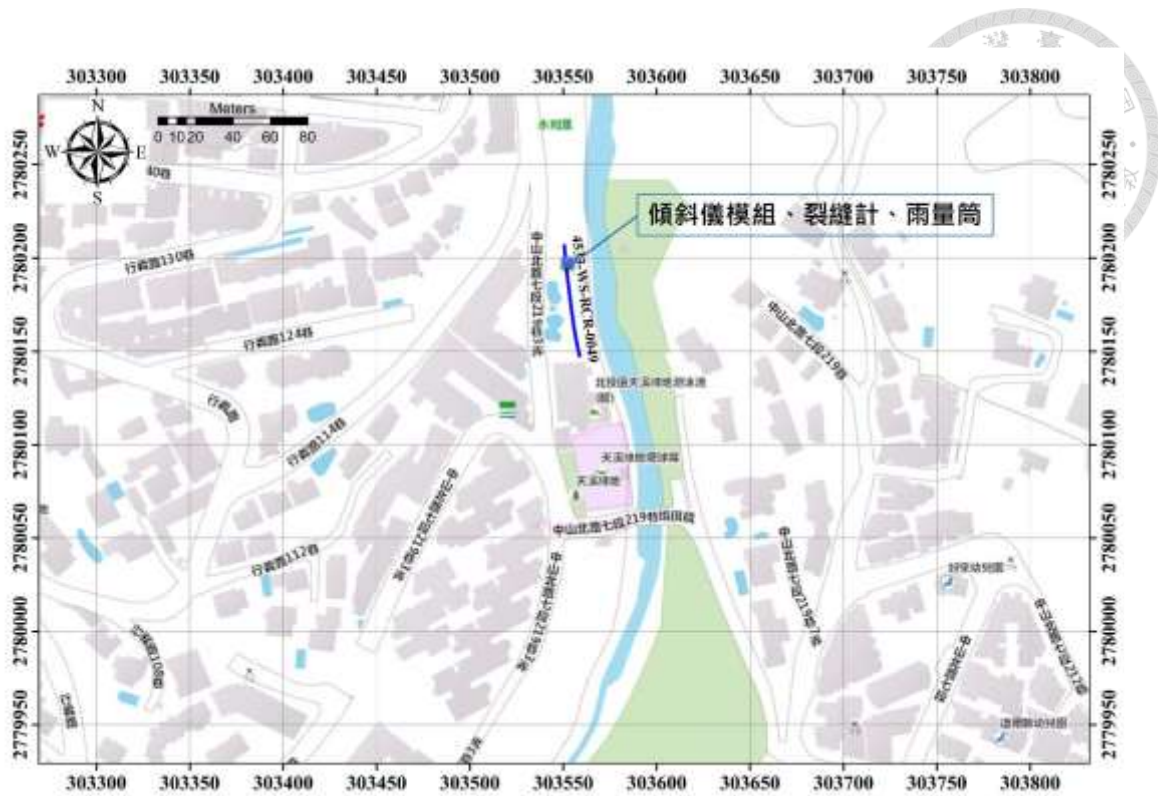


圖-48 人工坡地監測系統安裝地圖(三) [27]



圖-49 中山北路七段擋土牆實照[27]

中山北路七段 4061-BT-GSW-0002

107/09/26完成佈建



✓ 太陽能供電模組



✓ 裂縫計、傾斜儀整合模組



✓ 雨量桶

- 採用 4G-WIFI 傳輸
- 感測模組核心及傳輸模組外盒均使用 IP67 規格防水防塵標準

圖- 50 中山北路七段擋土牆部署細節[27]

4.2.2 監測數據分析與人工坡地行為關聯

場域實驗期間，系統持續採集超聲波裂縫儀的裂縫寬度數據、坡面運動監測儀的三軸加速度和傾斜度數據，以及輔助氣象盒子的溫濕度、氣壓和雨量數據。對這些數據進行時間序列分析，並探討不同監測數據之間的關聯性，以及與氣象因子的相互影響。

● 坡體結構變形分析

分析裂縫儀記錄的裂縫寬度數據，觀察其日變化、長期趨勢以及對特定事件(如降雨)的響應。記錄了毫米級別的裂縫擴張或收縮，這些變化可能反映了坡體應力狀態的改變或土體的膨脹收縮。

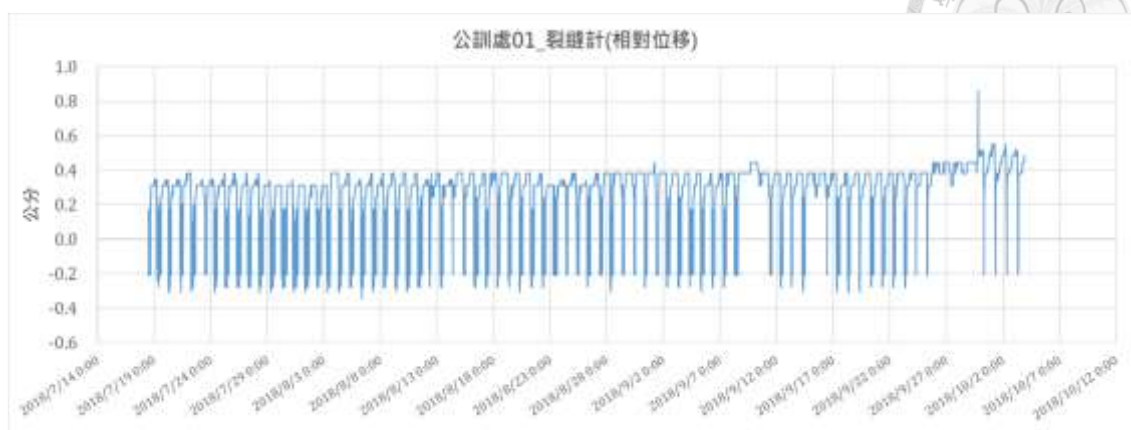
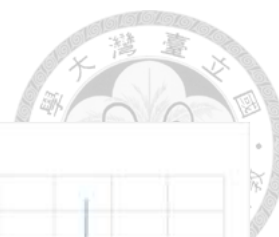


圖- 51 公訓處 1 裂縫計(2018/07-2018/10) [27]

1. 裂縫暫無變化趨勢
2. 具每日循環特性
3. 變異幅度約 0.6cm

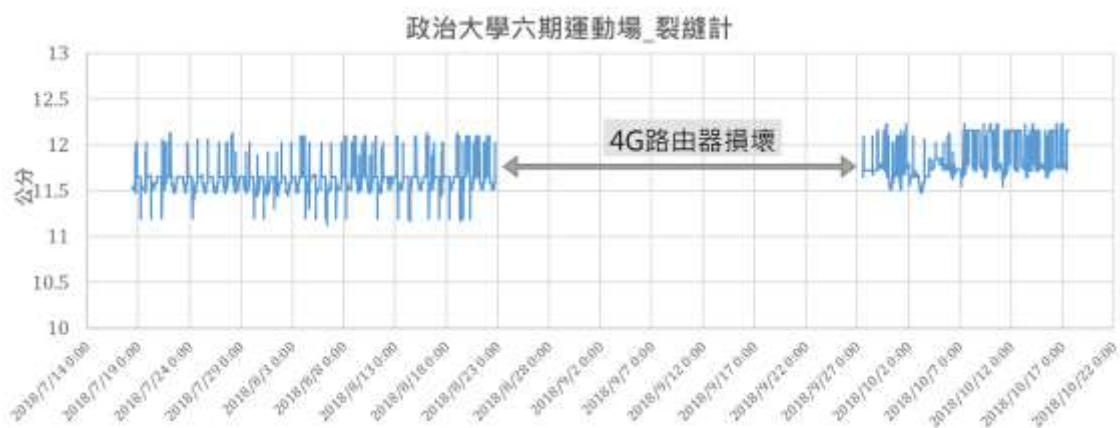


圖- 52 政大六期運動場裂縫計(2018/07-2018/10) [27]

1. 裂縫暫無變化趨勢
2. 具每日循環特性
3. 變異幅度約 0.8cm



- 坡體運動狀態分析

分析坡面運動監測儀採集的加速度數據，識別是否存在異常震動或瞬時加速度峰值，這可能與局部的土體移動或小規模崩落有關。傾斜度數據則提供了坡體整體位姿變化的信息，如緩慢的傾斜趨勢可能指示潛在的滑動。

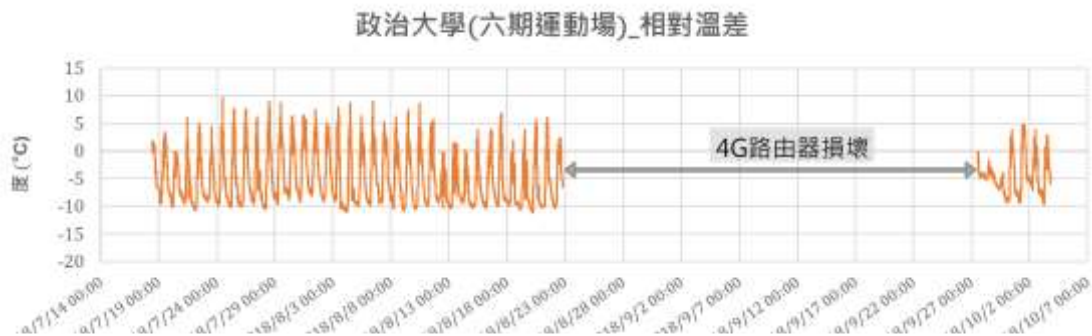


圖- 53 政大六期運動場溫度差(2018/07-2018/10) [27]

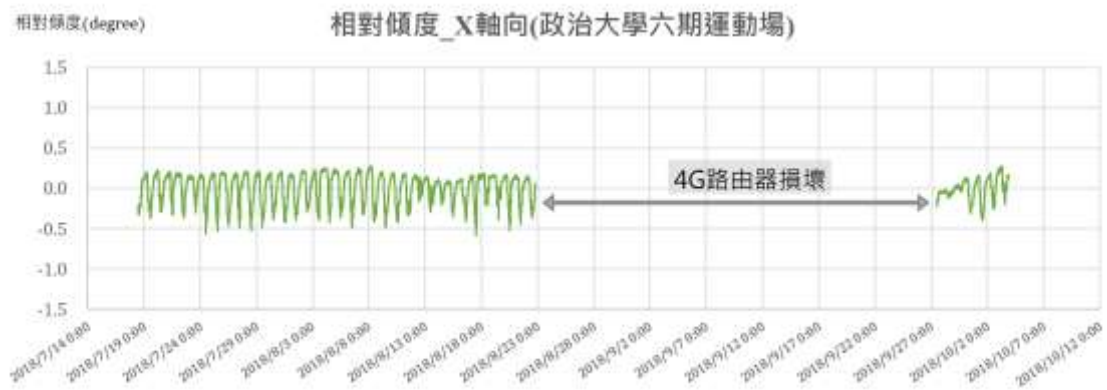


圖- 54 政大六期運動場 X 向傾度(2018/07-2018/10) [27]

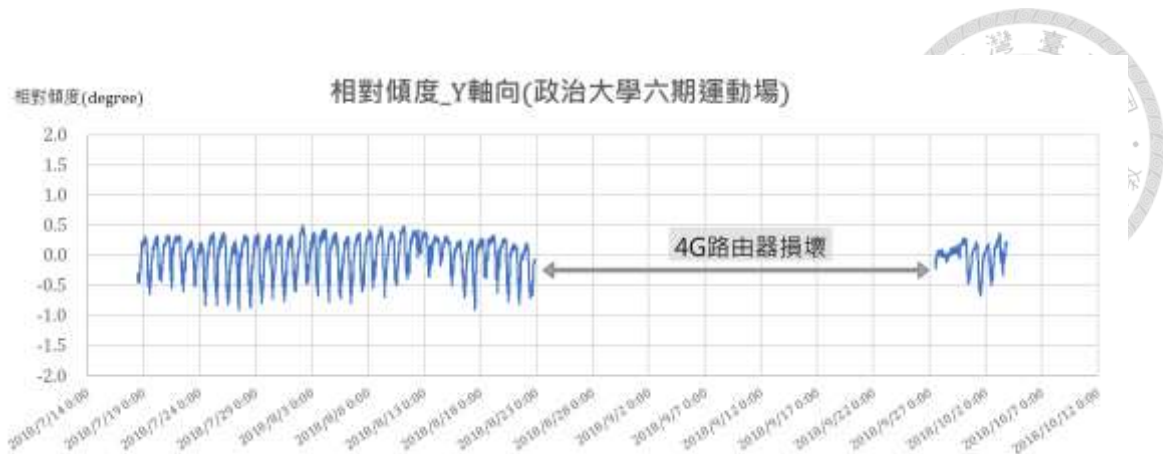


圖- 55 政大六期運動場 Y 向傾度(2018/07-2018/10) [27]

觀察政治大學六期運動場傾度歷線結果可發現，整體呈現出明顯的循環特性，變動趨勢與氣溫變化具高度關聯性。其中，X 軸向的傾度變化幅度約為 0.5 度，Y 軸向則約為 1 度，兩軸向皆未呈現明顯的長期變化趨勢，顯示坡面結構在觀測期間內整體穩定，主要變異源自於日夜溫差或季節性溫度變動所致之熱膨脹收縮效應。



圖- 56 公訓處 1 之 X 向傾度(2018/07-2018/10) [27]



圖- 57 公訓處 1 之 Y 向傾度(2018/07-2018/10) [27]

X 軸向傾向有持續增加的趨勢，為朝牆內傾，Y 軸向傾向較不明顯，初步判斷擋土牆變形型態為凸肚。



圖- 58 公訓處 2 之 X 向傾度(2018/07-2018/10) [27]

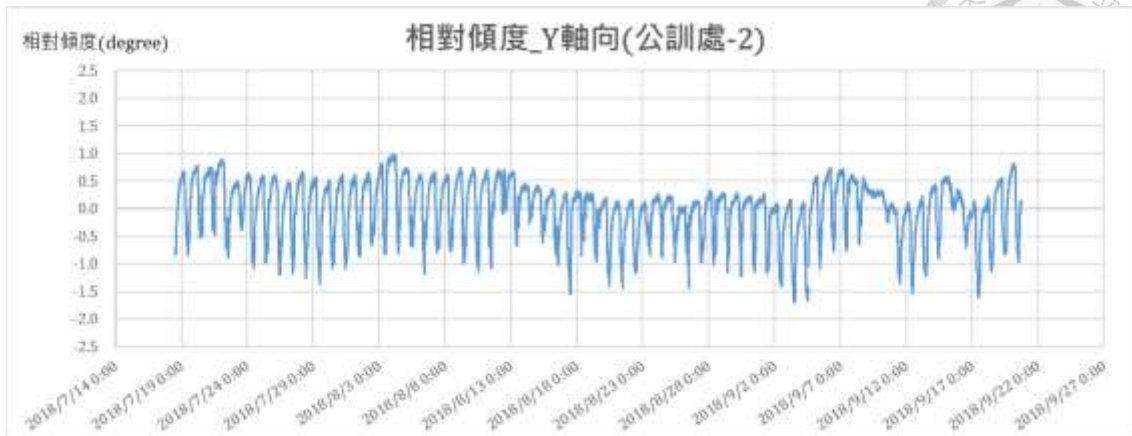


圖- 59 公訓處 2 之 Y 向傾度(2018/07-2018/10) [27]

X 軸向傾向，9 月之前朝牆內傾，9 月中開始趨緩。可能與新設地錨預拉力有關，需再持續觀察。Y 軸向傾向較不明顯。

- 氣象因子與人工坡地響應：

將坡體監測數據與同步的氣象數據進行對比分析。發現多數顯著的坡體變化(例如裂縫擴張速度加快、傾斜度變化增大)發生在連續降雨或強降雨事件之後。累積降雨量與坡體形變或運動之間呈現一定的相關性，驗證了降雨是誘發人工坡地不穩定的重要因素。氣象盒子提供的溫濕度數據也有助於理解土壤含水量的可能變化。

4.2.3 模組性能與數據準確性評估

場域實驗對人工坡地監測系統各模組的實際性能進行了評估。

- 超聲波裂縫儀性能：

現場量測數據的精度經過與人工量測或其他高精度儀器的比對，證實其在實際人工坡地環境下能達到 0.3mm 的量測精度，滿足監測微小裂縫變形的需求。其



工作距離與穩定性在戶外環境中表現良好。

- 坡面運動監測儀性能：

模組能夠敏感地捕捉到坡體微弱的加速度信號和細微的傾斜角度變化。其內建的濾波演算法有助於從嘈雜的環境信號中提取有效的運動信息。



圖-60 整合傾度儀入氣象盒子

- 氣象盒子性能：

氣象盒子提供的溫濕度、氣壓和雨量數據與附近標準氣象站數據進行了初步比對，結果顯示其基本準確度符合作為輔助監測的需求，能夠反映現場的微氣候特徵。溫度參數實際上應用於校正坡面運動監測儀。

實驗中也發現一些可能影響數據準確性的因素，例如超聲波裂縫儀可能受到裂縫表面狀況的影響，坡面運動監測儀的讀數可能受基座穩定性及溫度的影響，氣象盒子數據可能受安裝位置微環境的影響。這些發現為後續的數據校準和分析提

供了參考。



4.2.4 場域實驗總結

本研究透過實地場域部署與系統模組實驗，全面驗證了所提出智慧型人工坡地災防監測系統的可行性與效益。超聲波式裂縫儀與坡面運動監測儀在實際環境中展現穩定且高精度的變形與運動偵測能力，氣象盒子則提供關鍵微氣候背景資訊，協助釐清降雨與坡體不穩定性間的關聯機制。通訊模組與電力系統在複雜野外環境下仍維持良好運作，自主供電與模組化安裝設計則有效提升部署彈性，簡化施工與後續維護流程。

整體而言，本系統展現良好的成本效益與佈建優勢。單座擋土牆完整部署成本可控制於新台幣 10 萬元以下，系統年均用電量低於 12 度，具備長期營運的經濟可行性。相較傳統自計式監測，每筆即時監測資料之成本僅約 1 元，大幅優於傳統約 40 元之單筆成本，顯示其高性價比特性。在 5 個實驗場域中，已有 3 處進入穩定長期營運階段，系統整體穩定性隨部署規模擴大而逐步提升。

此外，本系統強調防災即時性與技術創新性。透過物聯網即時通訊與圖台整合架構，感測資料可即時回傳、展示與分析，配合雲端平台與視覺化工具，支援決策者快速掌握災害現況。未來並可結合人工智慧、深度學習、邊緣運算等技術進一步強化監測與預測功能。考量其低成本、低功耗、佈建密度高、操作便利與可延伸性佳等優勢，無論對政府部門或民間單位皆具高度推廣潛力。

最重要的是，系統導入大型語言模型結合通訊軟體聊天機器人平台，實現具互動性與情境適應能力的防災資訊服務。民眾可即時查詢監測結果，並透過自動化推播機制獲取個人化災害警示，提升整體社區層級的防災參與感知與行動力，展現物聯網監測系統在未來智慧災防應用中的整體價值與發展潛力。



4.3 水利智慧粒子模擬實驗

為驗證水利智慧粒子於漂流監測與壩體沖刷預警應用之可行性與效能，本研究於實驗水槽與堰塞湖場域進行模擬實驗。重點在於確認粒子在真實水文條件下能否穩定傳回資料、觸發正確啟動，以及軌跡資訊是否能完整重建漂流路徑。

本研究與中興大學水保系合作，擔任系統開發、部署安裝、資料分析以及技術轉移等工作內容。投放實驗日期為 2019/10/22，而實驗場域為惠蓀林場二號橋。

4.3.1 實驗設計與場域說明

實驗場域分為二：第一為水工實驗室內之觸發測試以及 IP 防水測試；第二為南投惠蓀林場堰塞湖實地模擬場域，規模大，具備堤體、溢流口與自然地形。實驗分別設計漂流型與埋設型兩種模式。漂流型由指定橋梁或斜坡將粒子投入水面，觀察其下游漂移軌跡與速度；埋設型則將粒子預先置入堤防內不同深度，模擬洪水上升造成的堤體破壞觸發粒子漂移。



圖- 61 惠蓀林場壩體

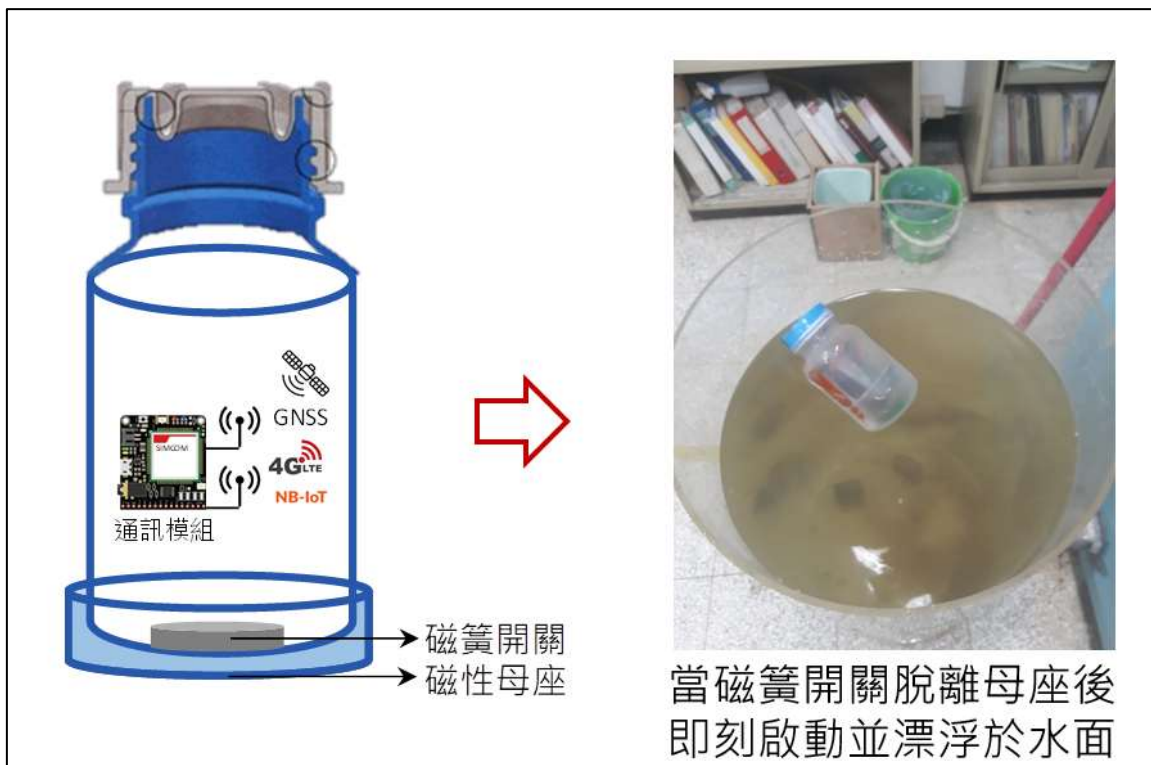
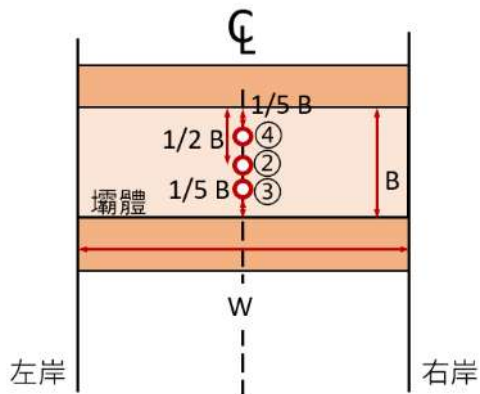
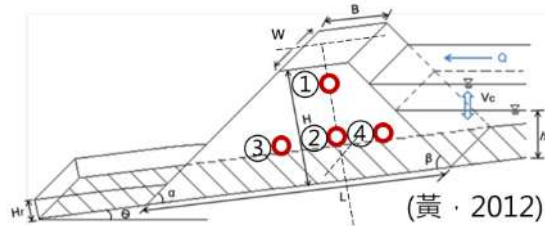


圖- 62 磁簧觸發測試

智慧軌跡粒子(沖刷監測用)：預計埋入壩體 4 顆。



$H = 3.0 \text{ m}$; $B = 2 \text{ m}$



預定埋設位置分別為：

- (1)第8層,1/2B中心軸(距堤頂0.5m)
- (2)第5層,1/2B中心軸(距堤頂1.25m)
- (3)第5層,1/5B(水平位置)
- (4)第5層,1/5B (水平位置)

智慧軌跡粒子(漂流監測用)：預計投入壩體蓄水區域 2 顆；待衛星定位完成後，即刻投入。

圖- 63 智慧粒子部署示意



圖- 64 壩體與埋設位置



4.3.2 資料紀錄與粒子行為分析

實驗記錄顯示，粒子觸發啟動後平均於 10 秒內傳回第一筆 GNSS 資料。以某次測試為例，編號 9992 粒子於 14:17:52 完成冷開機定位，並於 14:20:37 傳回首筆河道內資料，座標為(N24.081938, E121.012183)。資料中亦包含開機時刻、上傳時間、設備 ID、電量等訊息，並可透過 NTP 時間校準對應不同設備間事件同步。埋設型粒子則依據設計埋入不同深度(如 0.5m、1.0m、1.5m)，透過觸發機制(磁簧開關)判斷沖刷行為，並對應不同時間點傳回信號，可精確判讀沖刷起始深度與傳播時間。

表格-5 智慧粒子實驗結果一覽

編號	用途	位置	狀態	回收時狀態
9992	漂流監測	自二號橋中央上游端投放	14:17:52 開機定位 14:20:23 移至二號橋中央上游向下丟 14:20:37 第一筆河道內 GPS 資料	開機
9993	漂流監測	自二號橋中央上游端投放	14:17:52 開機定位 14:25:38 移至二號橋中央上游向下丟 14:25:47 第一筆河道內 GPS 資料	開機
9994	沖刷監測	於壩體中心線距堤頂 1.0m	觸動失敗(GPS 線脫落) 無紀錄沖出時間	開機
9995	沖刷監測	於 2u4 壩體中心線距堤頂 1.5m 水平中心線上游側 1.5m	觸動成功 有紀錄沖出時間：14:31:01 14:45:02 第一筆河道內 GPS 資料	開機

9996	沖刷監測	於壩體中心線 距堤頂 1.5m 水平中心線上	觸動失敗(GPS 線脫落) 無紀錄沖出時間	開機
9997	沖刷監測	於壩體中心線 距堤頂 1.5m 水平中心線右 岸 0.5m 下游 側 1.5m	觸動失敗(GPS 線脫落) 無紀錄沖出時間	開機

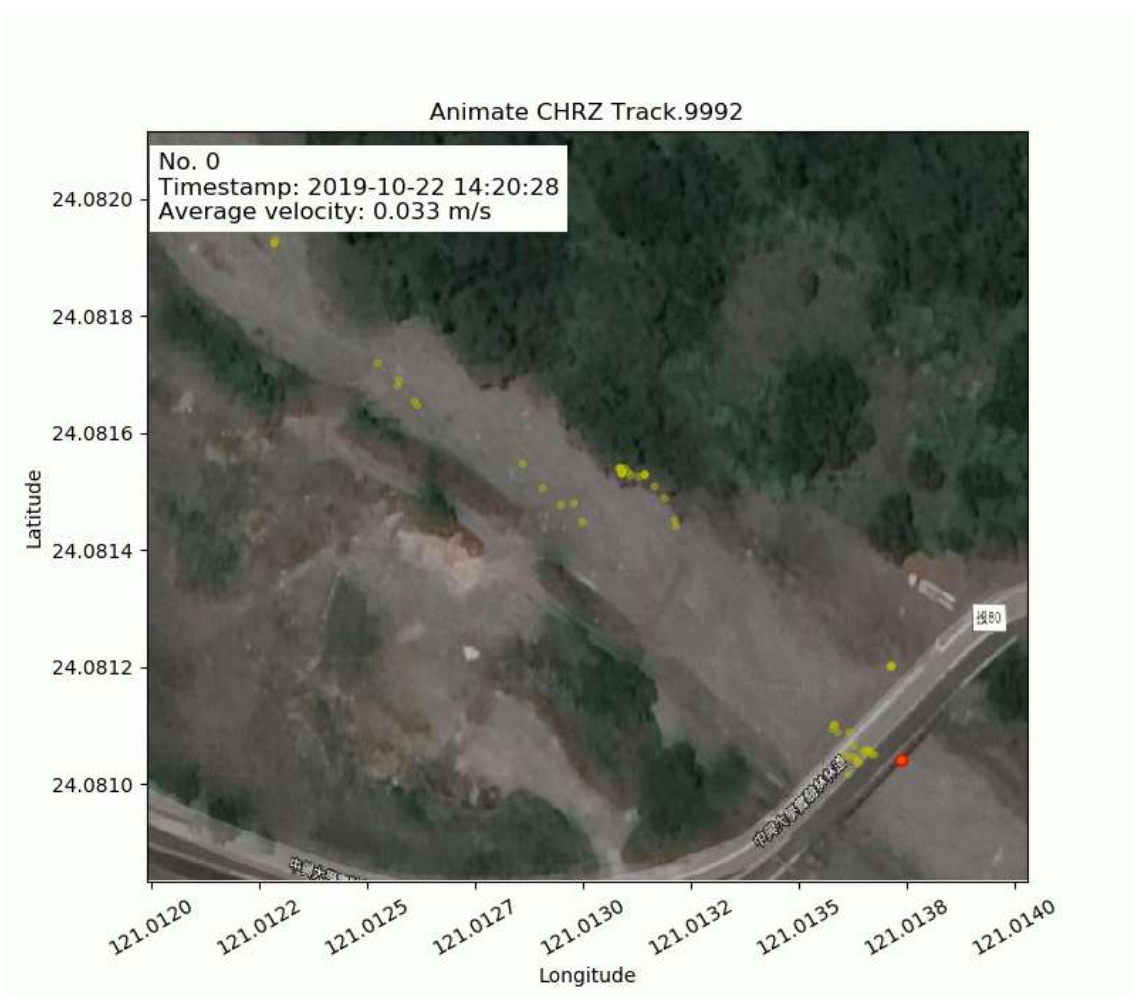


圖-65 智慧粒子獲取位置資訊之點位

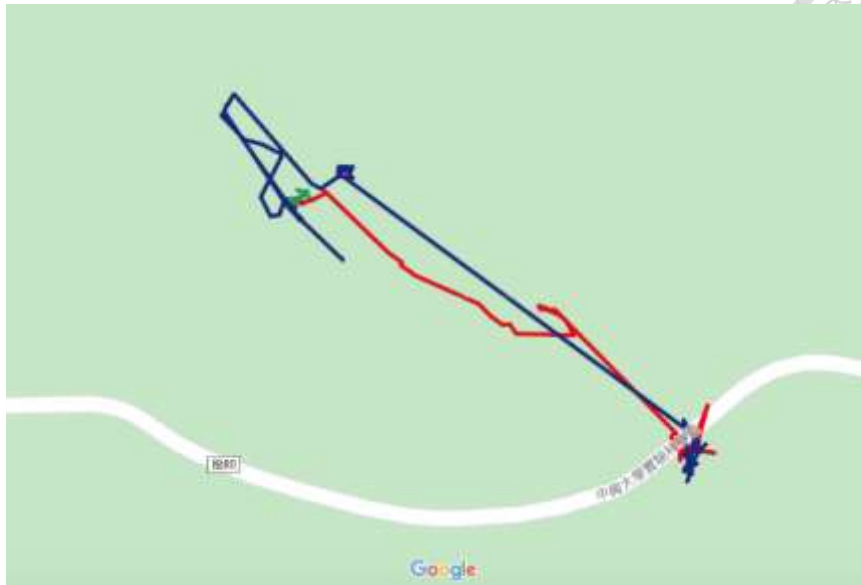


圖-66 智慧粒子運動軌跡，藍色為 9993，紅色為 9992，綠色為 9995

4.3.3 實驗成果與技術驗證

多次實驗證實，水利智慧粒子於實地部署後具高度穩定性與準確度：

- 粒子定位精度穩定於 1 公尺內，即便於多障礙場域仍能取得衛星訊號；
- 根據每十秒就必須傳回經緯度的資料顯示，資料傳輸成功率平均超過 92%，並根據資料發送時間及 GPS 時間的校正比對，實際漂流時間落差小於 5 秒；
- 埋設型粒子觸發準確，成功率達 90% 以上，具潛力用於堤體破壞預警系統；
- 漂流粒子軌跡圖與河道水流模型對應良好，可驗證其水力模擬應用價值。

進一步分析也顯示，粒子可用於辨識流速區段、漩渦區形成位置及水流障礙影響點，若加裝加速度與姿態感測器，將可拓展其於水流三維動態建模之應用。

4.3.4 實驗小結

本模擬實驗驗證了智慧粒子於實地環境下的操作可行性與技術優勢。其即時啟動、精確定位與穩定通訊能力，使其成為橋墩沖刷、堤體崩塌與漂流物行為分析的重要工具。未來可擴充感測模組種類、強化能量管理設計，或結合 AI 模型即時分析漂移模式，以進一步提升預警系統的時效性與精準度。





4.4 環境複合式監測模組場域實驗與成果

本節詳細報告環境複合式監測模組(整合空氣品質、微氣候與加速度感測)於實際場域部署中的實驗過程、觀測成果與性能評估。場域實驗旨在驗證模組在真實戶外環境下同步量測多種環境參數的能力、數據準確性以及與環境事件的關聯性。本節將呈現包括在竹山鹿谷地區進行的空氣污染與微氣候監測結果，以及利用三軸加速度感測器進行振動或地震偵測的實測數據。透過這些實驗，全面評估模組的穩定性、可靠性與實際應用效能。

本研究與國立臺灣大學實驗林管理處以及臺灣防災產業協會合作，進行竹山鹿谷地區空氣污染空間分布之研究。由所架設之 12 測站於 2019 年 6 至 9 月監測結果，利用竹山管理處測站與環保署竹山站並以 PM10 進行比較兩者之數值呈現一致性，顯示能有一定之代表性。由於監測站之整體資料獲取率受限電源與無線傳輸等因素仍有改進之空間，未來仍需透過研究開發並部署新式儀器以獲得更具代表性之結果。本研究發表論文鹿谷北勢溪上游地區懸浮微粒空間分布之研究於臺大實驗林研究報告。

4.4.1 測試場域與部署配置

為全面評估環境複合式監測模組的功能與性能，本研究在多個具代表性的場域進行了部署與測試。

- 空氣品質與微氣候監測場域：

主要部署於南投縣竹山鎮與鹿谷鄉地區。這些區域具有獨特的地形和土地利用類型，適合研究空氣污染物(如 PM 和氣體)的空間分佈特徵及其與微氣候的關係。在這些區域選擇了分散的監測點，涵蓋城鎮、鄉村、山區等不同環境類型，並按照前述安裝指引進行模組固定，確保感測器暴露於代表性的環境空氣中。



● 振動與地震監測場域：

三軸加速度感測器的場域實驗可能在如實驗林或其他具有潛在振動源(如交通、工業)或地震活動風險的區域進行。模組被穩固安裝於地面或結構物上，以捕捉環境振動或地震事件引起的加速度信號。

表格-6 環境複合式監測部署一覽

編號	站名	設置牆面材質	電源	WiFi	現場照片
1	台大鳳凰茶園	木質	有	有(App)	
2	武岫農圃	浪板/鋁鐵	有	有	
3	溪頭青年活動中心	木質	有	無(Sim 卡)	
4	溪頭辦公室	RC 牆面	有	無(Sim 卡)	
5	內湖國小	木質	有	有	
6	溪頭氣象站	RC 牆面	有	無	
7	溪頭神木站	木質	有	無	



8	溪頭天文台站	RC 牆或是木質涼亭	有	無	
9	米堤大飯店	RC 牆	有	有	
10	竹山本處	RC 牆	有	有	
11	下坪植物園	RC 牆	有	無	
12	杉林溪大飯店	RC 牆	有	有	



圖- 67 環境複合式監測架設 12 測站位置圖(竹山管理處及下坪植物園不在本圖範圍中)[28]



部署時，所有模組均按照設計要求接通電源(市電或太陽能+電池)並連接至無線網絡。監測週期持續數週至數月不等，以累積足夠的長期數據。數據採集頻率針對不同感測器進行設定，其中加速度感測器通常設定為較高頻率(例如每秒 50 筆以上)以捕捉快速變化的振動信號，而其他感測器則設定較低頻率(例如每 10 分鐘一次)。

4.4.2 監測數據分析與環境關聯

場域實驗採集到包含懸浮微粒、氣體、溫濕度、氣壓、雨量及三軸加速度的綜合數據集。對這些數據進行多維度分析。

- 空氣品質與微氣候關聯分析：

分析竹山鹿谷地區採集的 PM 和氣體濃度數據，研究其時間變化趨勢和空間分佈格局。將這些數據與同步的溫濕度、氣壓、雨量數據進行對比分析。例如，觀察降雨對 PM 濃度的清除效果，分析特定氣體濃度峰值是否與高溫、低風速或特定氣象過程相關。

本研究選取距離環保署竹山測站僅約 353 公尺之竹山管理處設站進行比對分析。以 2019 年 6 至 12 月期間之 PM_{2.5} 與 PM₁₀ 月平均值為樣本，分別與環保署竹山測站資料進行線性迴歸分析，所得 PM_{2.5} 相關係數為 0.9751，PM₁₀ 相關係數為 0.9498，且經顯著性檢定結果均達統計顯著水準($p < 0.05$)，顯示本研究所開發儀器具有良好之觀測穩定性與資料可信度。進一步分析逐月變化趨勢顯示，PM_{2.5} 測值略高於環保署測站，PM₁₀ 則相對略低，可能與儀器等級差異、設站位置距離道路與周邊環境開放程度有所關聯，後續尚需透過更長期監測數據進一步探討其影響因素。

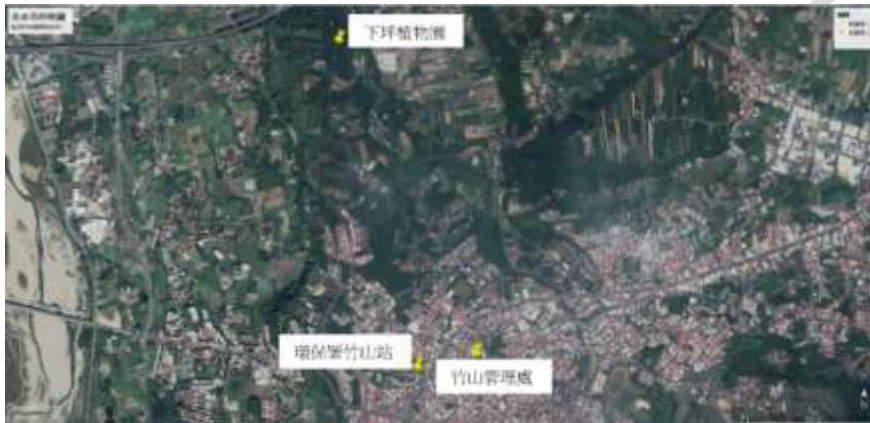


圖-68 下坪植物園、環保署竹山站以及竹山管理處位置圖[28]

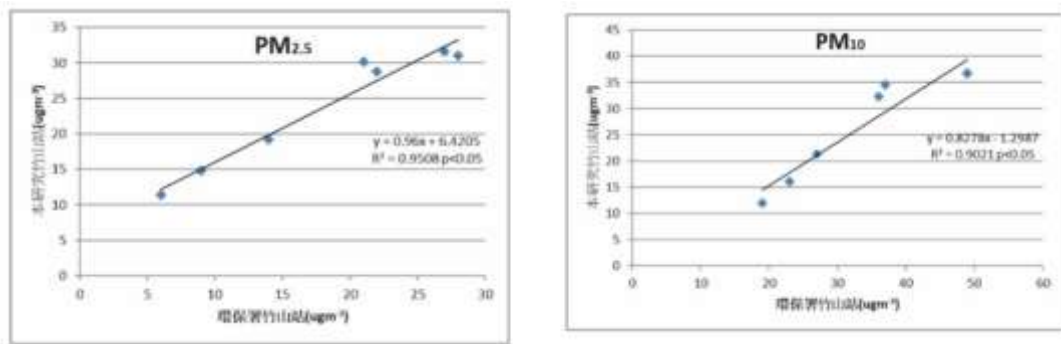


圖-69 本研究與環保署測站 PM_{2.5} 及 PM₁₀ 比對[28]

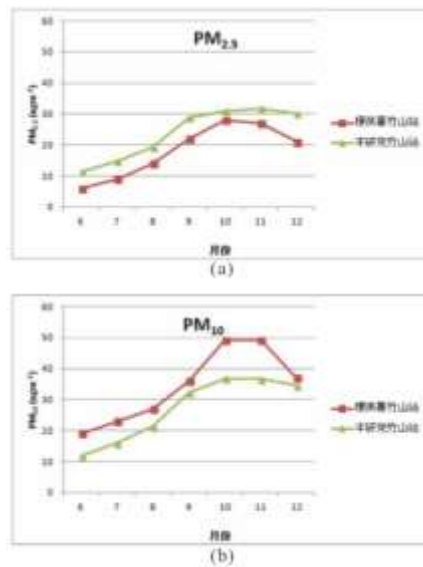


圖-70 本研究(綠線)與環保署測站(紅線)PM_{2.5} 及 PM₁₀ 隨時間軸比對[28]



自訂級距	加速度級距(gal)	自訂級距	加速度級距(gal)
1	0~0.8	16	10~11
2	0.8~2	17	11~12
3	2~2.5	18	12~13
4	2.5~3.5	19	13~15
5	3.5~4	20	15~17
6	4~4.5	21	17~19
7	4.5~5	22	19~21
8	5~5.5	23	21~23
9	5.5~6	24	23~25
10	6~6.5	25	25~80
11	6.5~7	26	80~150
12	7~7.5	27	150~270
13	7.5~8	28	270~480
14	8~9	29	480~850
15	9~10	30	> 850

圖-72 三軸加速度資料壓縮級距

當現地加速度超過設定門檻值時，開始傳輸資料，取樣率為 80Hz，取三軸分別的最大值，以計算 gal 值的 RSS；且依據自訂級距(共計 30 級)作為次數計數之依據。

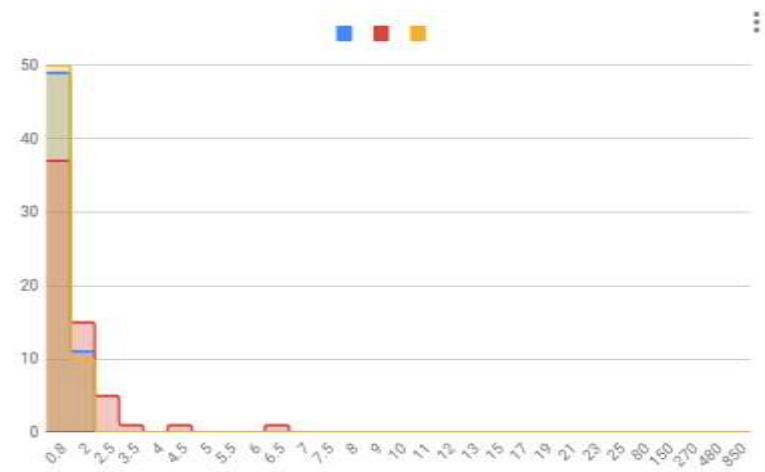


圖-73 藍色為 2019/04/18 地震前之直方圖，紅色為地震中，黃色為地震後



- 數據準確性：

儘管使用了成本較低的感測器(例如用於地震監測的加速度晶片)，但透過優化的數據處理和算法，模組的輸出數據(如地震震度估算)與標準或官方數據具有可比性。空氣品質和微氣候數據與附近標準監測站的比對也顯示其具備一定的準確性，足以支持環境趨勢分析和空間分佈研究。

- 模組穩定性：

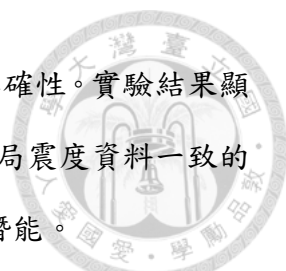
模組在長期的戶外部署期間表現出良好的穩定性，能夠持續採集和傳輸數據，硬體故障率低。

4.4.4 場域實驗總結

本研究所開發之環境複合式監測模組，於多場域實地部署實驗中展現出完整系統整合能力與跨領域技術貢獻。系統創新整合懸浮微粒、多元氣體、溫濕度壓力、風速風向、雨量與三軸加速度感測模組，並以嵌入式微控制系統進行邊緣計算與異常監測，有效克服傳統監測設備系統整合性不足與維運成本高昂之困境。透過高度模組化與耐候水密封裝設計，本系統可於各類戶外環境穩定長期運作，實現高密度佈建與即時資料回傳。

整合開發的智慧防災盒系統能夠同步量測懸浮微粒(PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{1.0}$)、氣體污染物、多元氣象參數及地表三維加速度數據，於溪頭、鳳凰與竹山地區完成長時間穩定運作。模組以雷射光散射原理進行粒徑分析，並搭配消費型氣體感測器及高靈敏度的溫濕度、壓力與雨量計，形成完整環境監測能力。其懸浮微粒監測結果與環保署竹山站進行比對， $PM_{2.5}$ 與 PM_{10} 皆達顯著線性一致性($R^2=0.9751$ 與 0.9498)，證實本系統具備高度代表性與可信度。

技術上，本系統提出之三軸加速度震度判釋演算法，在低成本晶片架構下導



入資料雜訊動態過濾與高頻取樣技術，有效提升地震事件偵測準確性。實驗結果顯示，即使採用低階加速度感測晶片，仍能準確量測出與中央氣象局震度資料一致的震度結果，具體展現出智慧型邊緣計算於物聯網感測端之應用潛能。

在資料處理與空間分析層面，本研究結合地理統計學克利金法進行懸浮微粒之空間變異性建模，於北勢溪谷地成功描繪出隨地形梯度(東南至西北)懸浮微粒濃度遞增趨勢，並揭示粗細粒徑微粒與高程間之相關性偏低(0.067-0.1889)，初步描繪出山區污染物擴散特性。

此外，本研究開發之感測模組亦兼具通訊整合性與擴展彈性，透過自主研發之軟硬體整合架構，串接雲端伺服器平台與即時資料視覺化應用，支援災害告警推播、決策支援分析與模型訓練應用，形成資料完整性高且即時性佳之災防監測資料流。相較於坊間消費型系統僅提供單一感測數據，本系統可同步整合多類型環境資訊，支援跨領域科學研究、精準環境監控與防災預警。

整體而言，本研究透過低成本、高整合、智能化與彈性部署技術，奠定智慧防災物聯網感測模組之技術平台基礎，展現出具規模化應用潛力之新世代災防監測解決方案。



4.5 智慧水井變形實驗與圖像分析

為驗證本研究設計之智慧水井變形模組於實際場域中的穩定性與實用性，並觀察其在自然環境條件下對井體形變與水位變化的反應能力，本章將說明模組於阿里山地區一座大型集水井中的部署情形與初步觀測成果。該集水井位於海拔逾 2000 公尺的幼葉林林區，井體深度約 18 公尺，內徑約 4 公尺，屬於高山大型集水井結構，具備複雜環境條件與高濕、低光的挑戰特性，為本模組之理想實測場域。

4.5.1 實地部署條件與配置說明

部署地點選定於阿里山幼葉林區排水系統核心位置的主井，該處全年高濕、降雨頻繁，並常受颱風豪雨影響。井體為鋼筋混凝土結構，設有井壁梯道與側孔，底部為集水槽構造。

本模組依據井深 18 公尺之結構規模，安裝了 30 組 ARUCO 三維樣態標記以及六支攝影機，均固定於井壁階段性環圈處。每組標記皆配有 2D 校正圖與 Cross-Pad 對準標籤，便於跨日觀測與對應位移。

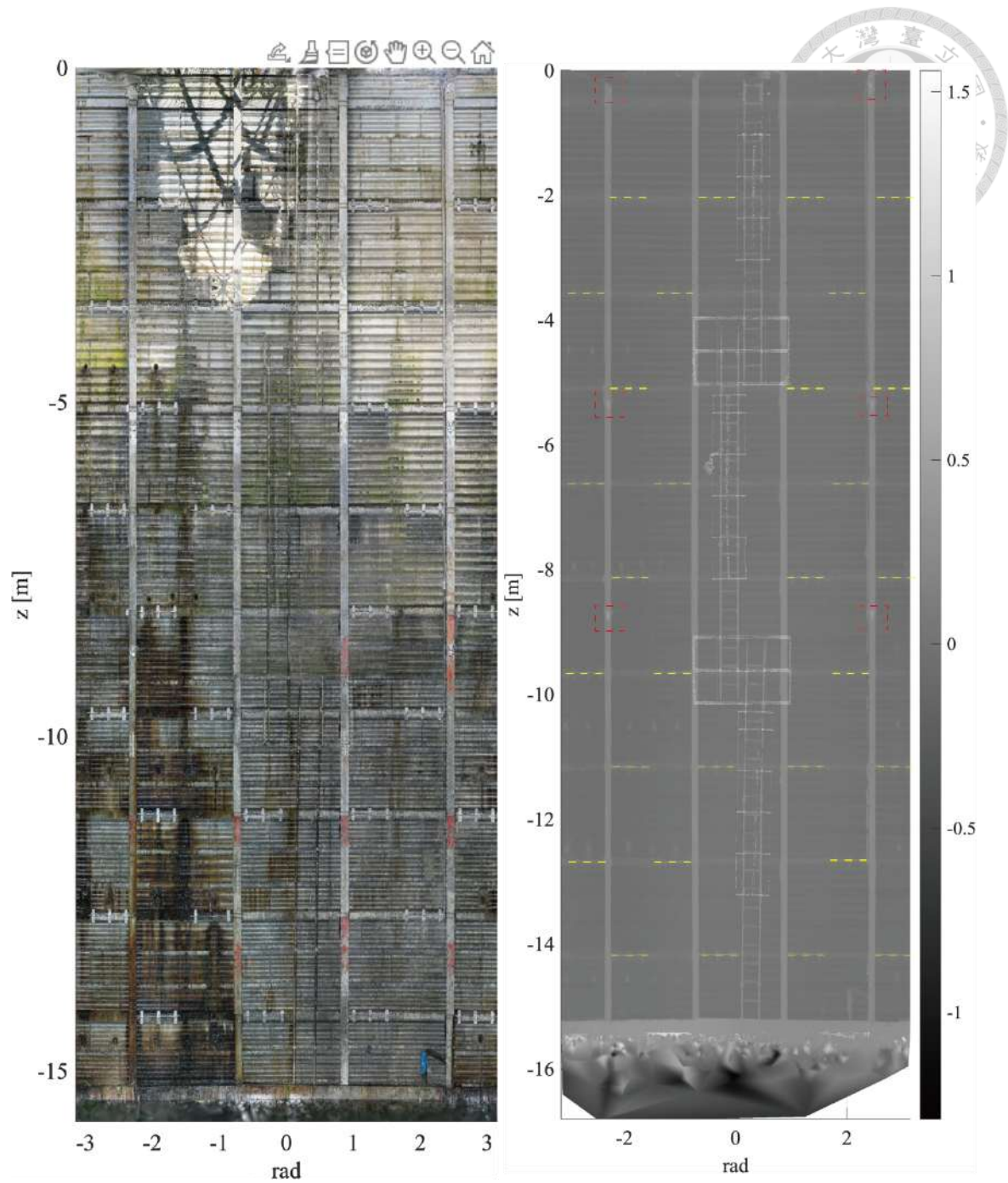


圖-75 幼葉林水井壁面展開圖以及部署位置，右圖黃色虛線為樣態標記，紅色框為攝影機位置



圖-76 集水井俯視



圖-77 智慧水井一號攝影機



圖-78 智慧水井二號攝影機



圖-79 智慧水井三號攝影機



圖-80 智慧水井四號攝影機



圖-81 智慧水井五號攝影機



圖- 82 智慧水井六號攝影機

4.5.2 影像處理流程與資料擷取機制

影像由攝影機自動擷取並上傳至遠端伺服器，經由 OpenCV 演算法進行標記自動辨識與三維姿態推估。系統輸出標記中心點座標(X,Y,Z)與姿態角(Pitch, Roll, Yaw)，並與感測器資料對時整合。

初步測試期間(約三週)所擷取影像皆成功辨識出各深度標記，且影像品質穩定，無紅外線反光干擾問題。部分深井處因霧氣濃度較高，導致偶爾影像模糊，但系統設有資料有效性評估程序，會自動剔除信賴度過低之紀錄。

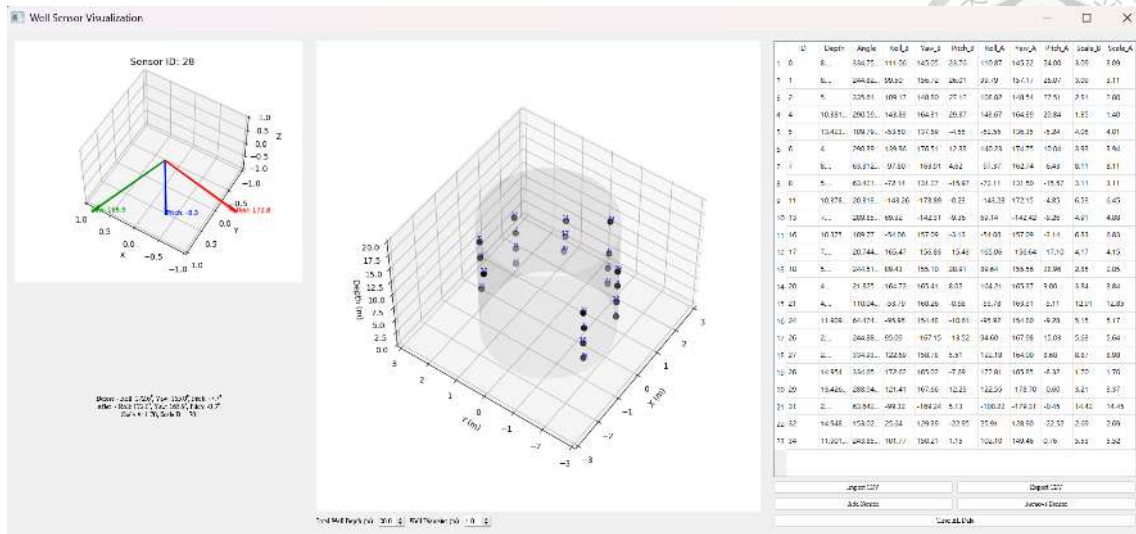


圖- 83 智慧水井資訊視覺化展示平台

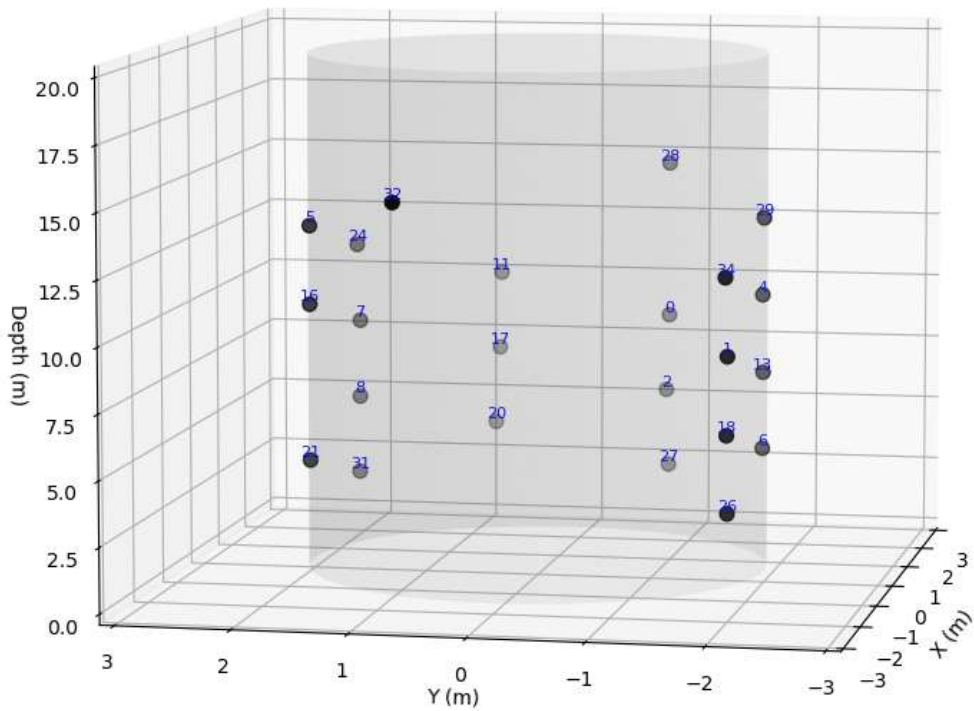


圖- 84 智慧水井樣態標記位置 3D 圖



4.5.3 初步觀測成果與模組運作情形

本研究於井體構造內部進行智慧型視覺辨識模組部署，並完成初步觀測與系統運作測試。透過多視角相機架設與標定版佈置，整體系統可穩定辨識多組標定板 (ID0~ID34)，並即時輸出其三維空間位移與姿態資訊。實驗設置共涵蓋六組攝影機陣列，配置於井體不同高程位置，以利涵蓋完整內壁環境。每組標定板整合多重影像特徵設計，包含棋盤格校正紋、線條與編碼式二維識別碼，可在高仰角、大曲率圓柱體內有效抑制影像畸變干擾，提升辨識準確度。

系統初步運作結果顯示，標定板於不同鏡頭下皆可被穩定辨識與編號，並成功計算其三維姿態向量。以 W01C01 至 W01C06 六組拍攝結果為例，系統能正確區分並標示各標定板之 ID 編碼，並繪製其三軸空間座標系統，整體影像辨識運作穩定，無明顯辨識錯誤或誤標情形。系統自動化運作流程亦可即時輸出姿態資料供後端監控系統進行即時視覺化呈現與後續變形分析運算。

整體而言，初步觀測結果證實本智慧水井變形監測模組能有效應用於井體內部三維空間結構變形量測，透過影像辨識與即時姿態推算技術，可長期穩定蒐集結構內部之相對位移資訊。後續將進一步結合時間序列監測資料進行變形模式辨識與長期穩定性評估，以驗證本模組於井體內部結構安全監測應用之實用性與可靠度。

4.5.4 分析結論與後續應用潛力

本研究於高山大型集水井內部署之智慧水井變形監測模組，成功展現出穩定可靠之三維結構辨識與姿態量測能力。透過六組多視角攝影機環繞佈設，系統可在高仰角與曲面環境中穩定辨識超過 30 組標定板，並即時取得其空間座標與姿態向量。圖像辨識結果呈現完整的井體內部三維分佈圖，並結合姿態資訊視覺化呈現各標定板的微小位移與旋轉變化，充分驗證模組於封閉井體空間中的影像穩定性與



定位精度。

本模組之最大技術亮點在於採用影像辨識搭配空間姿態解算方式，突破以往井體內部結構變形量測需依賴大量感測器或昂貴光學雷達的限制；搭配多重特徵標定設計，有效提升在高濕、光線不足與圓柱體內反射環境下的穩定辨識效能；系統內建資料可信度篩選與異常濾除演算法，可自動排除影像模糊或遮蔽造成之失真資訊，確保長期監測穩定性。

初步分析結果顯示，井體內部各標定板目前呈現穩定空間分布，尚未觀測到明顯結構位移趨勢。結合水位變化資料後，可進一步分析水位漲退對井壁穩定性的長期影響。此外，本系統亦展現與浮球模組、磁簧水位感測器等異質感測資料的整合潛力，可同步獲取水文動態與結構變形雙重資訊，提供完整井體安全監測數據流。

未來，本模組可延伸應用於地下水井、滯洪池、隧道襯砌等封閉結構體之長期變形監測。結合時間序列資料建模與異常變位趨勢分析，將有助於提前辨識結構潛在破壞機制，提升井體工程安全管理之科學決策依據。同時，透過物聯網架構整合，可實現大規模分散部署，成為山區水文工程設施維運與防災管理的重要技術支撐平台。



4.6 災防通訊平台實測

本節詳細闡述本研究開發之災防通訊平台於實際情境下的功能測試與性能評估結果。透過在真實災害事件或模擬情境中進行實測，旨在驗證系統將物聯網感測數據、模型分析結果與 LLM 能力有效整合，並透過社群通訊平台即時、準確且個人化地傳遞災情警示訊息的能力。實驗設計著重於評估系統端到端的響應時間、訊息傳遞的穩定性、LLM 生成訊息的準確性以及使用者互動回饋的有效性。這種實地測試是驗證智慧災防系統在複雜實際環境中可行性的重要環節，也是發現潛在問題、指導系統優化改進的關鍵。

本研究與交大土木系合作，開發 LLM API 與通訊軟體串接部分，並發表文章 *Combination of Large Language Models and Portable Flood Sensors for Community Flood Response: A Preliminary Study*[29]於 MDPI Water 期刊。

4.6.1 測試情境與資料來源

為驗證本研究所開發之智慧災防通訊平台於都市洪水預警應用之可行性與實務效能，本研究選定臺北市松山區中華里作為實驗測試場域。該區域屬高密度都市住宅區，近年屢次發生短時強降雨引發之淹水事件，具備代表性都市型內水災害風險特性。測試系統整合多源資料來源，包含現地部署之便攜型超音波洪水感測器、中央氣象局即時降雨觀測資料、開放式氣象預報平台、以及以高解析度數值高程模型(DEM)為基礎所建構之快速洪水擴散模擬模型。感測器於重要排水節點配置，可即時擷取道路積水深度變化，透過通訊協定回傳至後端資料平台。

系統模擬模組結合 DEM 地形模型與降雨資料，運用簡化集流演算法快速模擬不同降雨強度下可能形成之積淹水分布範圍與深度變化。模擬結果與感測資料同步整合進入後端運算架構，形成結構化情境資料流，作為大型語言模型(LLMs)提示詞生成之依據。為涵蓋不同災害發展情境，本研究設計九組典型測試案例，模

擬從無淹水、輕度積水、嚴重淹水至預測可能惡化或緩解等多元動態情境，藉以全面驗證系統於即時性、適應性與應變建議生成之效能。整體測試流程皆採自動化資料擷取與轉換串流模式，模擬災害動態變化下系統連續穩定運作之能力。



4.6.2 模型生成災情狀態及提示工程

本研究所設計之智慧型災防通訊平台核心在於結合物聯網感測資料、自主模擬分析與大型語言模型(Large Language Model, LLM)之語意生成能力，建立一套具情境適應性之動態災情訊息生成架構。透過資料整合與提示工程(Prompt Engineering)設計，使系統能在複雜災害情境下即時生成具行動性的應變建議，提升災情資訊的即時性、準確性與使用者可理解性。

系統首先整合前端感測器所擷取之即時洪水深度數據，以及高解析度 DEM 模型結合降雨資料所模擬之積淹水範圍，形成結構化資料流。資料經標準化處理後，轉換為可供 LLM 理解之語意描述內容。資料結構包含三個主要時間序列狀態：「過去狀態」描述近期趨勢變化、「目前狀態」呈現即時監測與模擬結果、「預測狀態」則反映未來數小時內的潛在變化趨勢。透過此三層次描述，提供 LLM 充分情境背景以進行語意生成。

為確保生成訊息具備一致性與操作性，本研究設計固定格式之提示詞模版(Prompt Template)，核心格式如下：

「請依據以下資訊，生成 150 字以內之防災警示訊息：

觀測時間：{當前時間}；

過去六小時狀態：{過去狀態描述}；

目前狀態：{目前狀態描述}；

預測六小時內變化：{未來狀態預測}；



請針對目前與預測狀況，提供明確、具體的行動建議。」

在每次生成任務中，系統會依據即時感測與模擬資料，自動填入對應欄位的語意描述。例如，若感測器偵測目前積水深度已超過 30 公分，系統將自動於「目前狀態」欄填入：「目前道路積水深度 30 公分，可能影響車輛通行與行人安全」。若 DEM 模型預測後續降雨將持續累積，則於「未來預測」欄補充「未來六小時內積水深度可能進一步上升 15~20 公分，部分道路恐淹沒」。整體提示詞內容以自然語言描述方式組合後送入 LLM 模型。

LLM 接收到提示詞後，依據內建之語言理解與生成模型，自主撰寫具備情境對應性與行動導向的防災訊息。透過此提示工程設計，可引導 LLM 生成內容符合災防需求，避免出現模糊敘述或過度誇張之表述，並確保訊息內包含具體應變建議，例如「請盡速撤離低窪地區」、「避免駕車涉水」、「注意電力設備安全」等具體指令內容。

此外，本系統於 LLM 生成後端亦設計訊息驗證與過濾程序，包含關鍵字檢查、格式規範比對與內容敏感性過濾，確保最終推播至用戶端之訊息符合官方建議與公眾安全需求。經此設計，系統即使在多變災害動態情境下，仍可穩定生成具語意脈絡、行動建議明確且訊息安全可控之防災推播內容。

本提示工程設計不僅成功整合結構化感測資料與自然語言生成技術，更建立出一套具擴充性之智慧防災語意轉換框架，可隨未來加入之多元災害模組進行彈性擴展，進一步提升整體災防決策支援系統之智慧化程度與應用範圍。

表格- 7 水情災害劇本[29]

Scenario	Past observation ($t-\Delta t$)	Present observation (t)	Future forecasts ($t+\Delta t$)
A	No flooding (flood depth = 0 cm)	No flooding (flood depth = 0 cm)	No flooding (flood depth = 0 cm)
B	No flooding (flood depth = 0 cm)	Slight flooding (flood depth = 19 cm)	Severe flooding (flood depth = 39 cm)

C	No flooding (flood depth = 0 cm)	Severe flooding (flood depth = 38 cm)	Slight flooding (flood depth = 9 cm)
D	Slight flooding (flood depth = 7 cm)	Severe flooding (flood depth = 35 cm)	Slight flooding (flood depth = 28 cm)
E	Slight flooding (flood depth = 29 cm)	No flooding (flood depth = 0 cm)	Severe flooding (flood depth = 49 cm)
F	Slight flooding (flood depth = 26 cm)	Severe flooding (flood depth = 45 cm)	No flooding (flood depth = 0 cm)
G	Severe flooding (flood depth = 55 cm)	Slight flooding (flood depth = 21 cm)	No flooding (flood depth = 0 cm)
H	Severe flooding (flood depth = 45 cm)	Slight flooding (flood depth = 10 cm)	Severe flooding (flood depth = 36 cm)
I	Severe flooding (flood depth = 55 cm)	No flooding (flood depth = 0 cm)	No flooding (flood depth = 0 cm)

4.6.3 LLM 產生應變訊息準確性及可靠度

大型語言模型(Large Language Model, LLM)為本研究災防通訊平台核心智慧引擎，其主要任務在於針對即時災害情境資料，生成具備情境脈絡性、行動性與可讀性的災防訊息。為評估其在實際應變訊息生成中的準確性與可靠度，本研究針對九組不同情境設計進行系統性測試，涵蓋無淹水、輕度積水、嚴重淹水、趨勢惡化及趨勢改善等多元組合。

實驗結果顯示，LLM 在大部分測試情境中均能成功辨識災情程度與風險趨勢，並生成符合邏輯且具行動指引的應變建議。例如在「輕微積水但預測惡化」情境下，生成訊息通常包含監控提醒與防範性備災建議，如「目前積水尚屬可控，但預測降雨將持續，請社區居民提前移動車輛至高處並備妥應急物資」。在「嚴重積水且預測持續惡化」情境中，則直接生成強烈應變指令，如「道路積水已超過安全標準，請民眾立即撤離低窪區域，避免涉水行動」。系統可隨情境變化自動調整語氣強度、建議層級與行動內容，展現良好語意適應能力與危險感知邏輯。

表格-8 基於各類劇本，LLM 產生之回應[29]

Scenario	Immediate Actions (Now)	Future Actions (from now to the next time interval, e. g., 6 hours or 10 minutes later)
----------	-------------------------	---

A	<i>“While there is currently no flooding, remain cautious and stay informed about weather updates. Keep an emergency kit accessible, including essential supplies such as food, water, medications, and a flashlight.”</i>	<i>“Continue to monitor local weather forecasts and be prepared to evacuate if conditions change. Establish a communication plan with family and friends. Reinforce the importance of safeguarding property as a precaution against unexpected flooding.”</i>
B	<i>“Avoid low-lying areas and do not attempt to cross flooded roads. Move to higher ground if you are in a flood-prone area. Ensure your emergency kit is ready, including food, water, medications, and flashlight.”</i>	<i>“Stay updated through local news or weather reports for further flooding updates. Prepare to evacuate if the water level rises significantly; follow evacuation orders from authorities. Document any damage for insurance purposes once it is safe to do so.”</i>
C	<i>“**Evacuate:** If you are in a low-lying area or near the affected flood zone, seek higher ground immediately. **Stay informed:** Monitor local news and weather reports for updates on the flooding situation. **Avoid contact:** Do not walk or drive through flooded areas. Floodwaters may contain hazardous materials. **Prepare:** Gather essential items (medications, important documents, food, water) in case of evacuation. “</i>	<i>“**Assess safety:** Once water levels decrease, check your property for damage before re-entering. **Stay cautious:** Remain vigilant, as conditions may change unexpectedly. **Report damage:** Contact local authorities for assistance and to report any hazards. Stay safe and prioritize your well-being.”</i>
D	<i>“Evacuate to higher ground if you are in a flooded area. Avoid driving or walking through flooded streets. Stay updated via local news and weather reports.”</i>	<i>“Monitor water levels; although flooding is expected to decrease, conditions may still be hazardous. Only return home when local authorities have declared it safe. Inspect your property for damage once it is safe, and report any hazards to local services.”</i>
E	<i>“Stay alert, and monitor local weather updates. Ensure all drainage systems are clear and functioning properly. Avoid low-lying areas prone to flooding.”</i>	<i>“Prepare an emergency kit with necessary supplies, including food, water, medications, and flashlights. Identify and plan evacuation routes in case of serious flooding. Keep important documents in a waterproof container or digital form. Follow local authorities' instructions, and evacuate if instructed.”</i>
F	<i>“Stay indoors, and avoid flooded areas. Move to higher ground if your location is prone to flooding. Secure important documents and belongings in waterproof containers.”</i>	<i>“Monitor local weather updates and flood advisories. Once conditions stabilize, avoid traveling through floodwaters. Check your property for any damages, and report issues to local authorities. Stay safe and prepared. Follow these instructions carefully to protect yourself and your property.”</i>
G	<i>“Stay indoors, and avoid unnecessary travel. Keep emergency supplies ready, including food, water, and a flashlight. Monitor local weather reports and advisories for updates.”</i>	<i>“Once flooding subsides, remain alert for any sudden changes in water levels. If you must go outside, be cautious of slippery surfaces. Report any visible hazards to local authorities, and check on neighbors, especially the elderly and those with disabilities. Stay safe and prepared!”</i>
H	<i>“Remain indoors and avoid all travel unless absolutely necessary. Monitor local news and weather reports for updates on flood conditions. Move valuable possessions and important documents to higher ground. If you are in a flood-prone area, prepare an emergency kit with essentials such as food, water, and medications.”</i>	<i>“Be prepared to evacuate if conditions worsen. Stay tuned for alerts from local authorities regarding safety and evacuation routes. Check on neighbors, especially the elderly or those with mobility issues, to ensure their safety.”</i>
I	<i>“Monitor local weather reports and flood alerts continuously. Ensure your emergency kit is prepared with essentials such as water, food, and medications.”</i>	<i>“Continue to stay vigilant for changes in weather conditions. Avoid low-lying areas, and stay informed about flood-prone zones in your environment.”</i>

然而，在部分極端或資料邊界模糊之情境下，LLM 仍存在潛在錯誤生成風險，主要表現在以下幾個面向：(1) 過度推測性敘述：在無充分資料支持下偶爾出現過度推論可能災情發展，例如「可能引發廣泛停電」等較誇張描述；(2) 用詞過度寬泛：部分訊息生成中使用「請小心應對」、「注意安全」等泛化語句，缺乏具體行動建議指引；(3) 偶發性語法錯誤或用詞重複：少數輸出出現語句冗長或重複表述問題。這些現象顯示 LLM 雖具高度語言流暢度，但其對專業災防語境中的指令性要求仍須加強控制與調校。

為提升生成訊息的準確性與實用性，本研究除採用標準化提示工程設計外，亦在 LLM 生成後端設置多層次驗證與過濾機制，包括：

- 關鍵詞確認：

檢查是否涵蓋必要核心警戒詞彙，如「積水深度」、「撤離」、「避難」等具體行動詞。

- 模式比對：


比對輸出格式是否符合預先定義之標準回應結構。

- 內容安全性過濾：

移除可能引發恐慌、誤導或超出權責範圍之過度推測性描述。

- 用語簡化優化：

針對重複性與模糊表述進行自動優化，確保語句簡明扼要。



整體評估結果顯示，透過結構化資料轉換、標準化提示工程與多層次後端驗證流程設計，可有效提升 LLM 在防災應變訊息生成任務中的穩定性與可控性。尤其在高頻率推播與即時互動場景下，系統能持續產生具一致性且具行動性的訊息內容，對於提升災害期間民眾風險認知、行動決策與社區防災效能具有正面助益。

4.6.4 實驗小結

本次災防通訊平台實測針對模擬都市型淹水情境，整合即時感測、快速模擬、大型語言模型與 LINE 通訊平台，完成完整資料流程與訊息生成測試。實驗結果顯示，整體系統在多組災害情境模擬下皆展現穩定運作效能，資料串流順暢、模型計算準確、提示詞生成流程順利，成功驗證整合架構之技術可行性。

在感測與模擬資料整合部分，系統能即時擷取並更新現地超音波感測器回傳之積水深度，並同步整合高解析 DEM 模擬預測結果，形成多時序完整情境描述資料。提示工程設計則有效將複雜結構化資料轉換為 LLM 可讀取之自然語言提示詞，支撐 LLM 後端生成具邏輯性、完整性的災情描述與行動建議。

LLM 生成之應變訊息在情境動態變化中具備良好適應能力，能隨不同警戒等級自動調整語氣強度與行動建議內容，特別在短時強降雨發展過程中，展現出連續穩定生成與即時應變指引能力。透過 LINE BOT 平台推播，實驗中能快速將生成結果傳遞至模擬用戶端，展現高互動性與即時性應用潛力。

整體而言，本次通訊平台系統測試已驗證本研究架構於技術整合、資料流設計與語意生成邏輯上之穩定性，顯示本平台具備實務部署與擴展應用潛力。未來可透過長期現場測試，進一步優化提示工程參數與強化 LLM 模型對地區性防災語彙的掌握，持續提升系統於真實災害情境下之應變支援效能。

表格-9 災防通訊優劣比較[29]

系統架構	優點	缺點
本研究：LLM+API+即時通訊整合 (Messenger、LINE)+可攜式感測器	高準確度、個人化警示、即時資料整合、具擴展性、易於更新	依賴穩定網路、API可能中斷、存在延遲風險
自動化預警系統	穩定可靠、明確定義之標準作業程序	靈活度有限、警示內容較制式化、可能存在延遲、缺乏情境脈絡
感測器為核心之警報系統	精準即時資料、可產生具行動指引之資訊、可立即反應	部署成本高、涵蓋範圍有限、資料易產生模糊判斷、缺乏集中化通訊
傳統通訊系統(如 SMS 簡訊)	簡單、涵蓋面廣、具信任度、無需依賴網路	延遲高、資訊內容低解析度及缺乏個人化、容易出現人為錯誤與效率低落



4.7 小結

本研究整合物聯網感測技術、邊緣運算平台與大型語言模型(Large Language Model, LLM)生成架構，完成一套跨域整合型智慧型環境災防系統，並於多場域進行實地部署與實驗驗證。整體系統涵蓋人工坡地監測、水利智慧粒子追蹤、環境複合式感測、井體結構變形監測與智慧通訊平台等五大核心模組，各模組間相輔相成，構築出完整的災害預警資訊鏈。經由系列實地部署與觀測，系統之整合性能、感測準確性、資料穩定性及應用潛力均獲得實證支持。

在人工坡地監測系統模組中，透過部署超音波式裂縫儀與坡面運動監測儀，成功於多處人工邊坡及擋土牆構造物上進行連續監測。超音波裂縫儀以毫米級解析度量測裂縫張裂行為，坡面運動監測儀則以三軸加速度與傾斜資料即時掌握坡面微形變趨勢。實驗期間觀察顯示，兩類感測模組在長期運作下具備良好穩定性與耐候性，透過溫度補償及濾波演算法，有效抑制環境擾動對量測之影響。由多時序資料串接分析顯示，人工坡地監測模組能即時反映降雨誘發之短期變位行為，並提供長期穩定監測依據，對於早期坡體不穩定行為之辨識具高度應用價值。

水利智慧粒子模組則針對河川橋梁下游沖刷監測需求進行實驗部署，藉由漂浮式感測粒子具備磁簧開關驅動機制與 GNSS 位置回傳能力，當粒子於高流速沖刷事件中被移動，能即時傳回位移觸發時序與空間座標，提供沖刷臨界點之辨識依據。實驗顯示，多顆粒子在模擬高水位衝擊下能正確回傳首次移動時刻，結合流量模擬數據，可有效推估沖刷臨界水位範圍，提升水工設施運維安全管理之科學依據。

環境複合式監測模組整合空氣品質、多氣體、溫濕度壓力、風速風向、雨量與三軸加速度等多元感測元件，於山區林地與溪谷實地部署中完成長期穩定觀測。特別在鹿谷北勢溪上游地區，經與環保署竹山測站數據比對，PM_{2.5} 與 PM₁₀ 之月均值迴歸分析結果分別達到 $R^2=0.9751$ 及 0.9498 ，驗證所開發模組之監測準確性與資料一致性。加速度模組則搭配低階震度判釋演算法，成功於實驗林地震事件中，判讀出與中央氣象局公布震度結果相符的二至三級震度，證明其邊緣智能運算之應

用可行性。整體模組具備低成本高整合特性，適用於農林區域、山區觀光與偏遠環境下高密度部署之應用需求。

智慧水井模組則針對深井構造內部變形監測需求，開發出三維標定板影像辨識技術。於阿里山高山集水井部署中，系統整合多視角攝影機與 ARUCO 標定板設計，即使於高濕、低光、高曲面曲率之挑戰性條件下，仍能穩定辨識超過 30 組標定板編碼，並即時輸出其三維姿態與位移資料。初步觀測期內各標定板維持穩定空間分布，並隨水位變動形成可持續追蹤之結構變形序列資料。此模組展現於井體內部封閉空間之非接觸式持續變形監測能力，具備長期結構安全監控之技術潛力，並可進一步延伸應用於滯洪池、隧道與地下水工設施等封閉構造物之長期穩定監測。

在整體系統整合層面，本研究提出災防通訊平台，導入大型語言模型(LLMs) 結合 LINE 即時通訊平台，實現具互動性、個人化且語意適應性的災情資訊生成與推播機制。系統透過 Webhook 無伺服器架構整合感測資料流，經由提示工程(Prompt Engineering)設計標準化提示模板，將即時感測與模擬數據轉換為語意可辨識輸入，供 LLM 模型進行自然語言生成。實驗針對多種模擬情境進行系統測試，LLM 生成訊息能隨著不同積水深度、警戒變化與預測趨勢，自動調整語氣強度與行動建議層級，具備良好情境適應能力與動態應變邏輯。針對可能出現的幻覺生成與過度推論風險，本系統設計後端驗證與過濾機制，有效提升語意輸出之穩定性與資訊安全性。

整體而言，本研究所發展之智慧型災防系統已於多模組、多場域實地驗證中展現其整合穩定性、量測準確性與實務應用價值。各感測模組在耐候性、低功耗、高頻監測與邊緣智能運算方面均具備實用優勢，結合 LLM 驅動之智慧通訊平台，更進一步強化系統於民眾互動、防災參與與社區應變支持之應用廣度。未來可依據不同區域特性，彈性擴充更多災害因子模組(如人工坡地位移、強震監測、空品預警等)，整合大數據長期資料庫，發展多層級防災決策支援系統，成為具備科技驅動、自主運作與社區參與特性的次世代智慧型防減災平台。

第五章 結論與未來展望



5.1 研究成果回顧

本研究成功建構一套整合多模組智慧型環境災防系統，融合物聯網感測技術、邊緣運算、電腦視覺辨識與大型語言模型(LLMs)生成技術，實現跨域整合之即時災害監測與應變支援平台。系統涵蓋人工坡地監測模組、水利智慧粒子模組、環境複合式監測模組、智慧水井變形監測模組與防災通訊平台五大核心子系統，經多場域實地部署驗證，整體系統穩定性與應用潛力獲得實證支持。

在感測層面，透過高解析超音波裂縫儀、三軸加速度器與自製智慧粒子，實現人工坡地穩定性、橋梁沖刷與水文流場變化即時監測；結合環境複合式模組，亦同步掌握微氣候、空氣品質與振動資訊，成功於實驗林與溪谷場域建立多元感知網絡。於智慧水井模組中，結合 ARUCO 標記與多視角影像辨識技術，實現深井結構變形之三維姿態監測，克服傳統井體內部封閉空間監測之技術瓶頸。

在通訊與應變決策層面，本研究創新導入 LLM 結合 LINE 即時通訊平台，建構智慧型防災警示互動架構。透過標準化提示工程，將感測資料轉換為語意化輸入，成功驅動 LLM 生成具情境脈絡與行動指引的防災應變訊息。系統經多情境模擬測試驗證，在語意理解、情境適應與行動建議層級控制上表現良好，顯示 LLM 在防災應變通訊上具高度應用潛力。

展望未來，本系統具備良好的模組化與擴展性，未來可整合更多災害類型(如人工坡地滑動、強震、水庫溢洪預警等)、納入長期監測大數據分析、深度學習模型強化災情預測能力，並結合多層級政府與社區防災治理架構，發展具區域特性之智慧型防減災決策支援平台，提升整體社會防災韌性與應變效率。



5.2 實務應用貢獻

本研究所建構之整合型智慧環境災防系統，具備高度模組化、低成本、高穩定性與即時性，對實務災害監測與應變管理具多項應用價值。首先，透過超音波裂縫儀、坡面運動感測器與水利智慧粒子，可應用於都市邊坡、橋梁下游、集水構造物等高風險區域之異常行為早期偵測，提供災害預防性監測依據。其次，環境複合式監測模組整合空氣品質、氣象、振動等參數，適用於山區林業、觀光景點與農業場域之長期環境監控，有助於資源管理與產業安全發展。智慧水井模組則突破井體內部形變監測困境，對滯洪設施、地下水文構造等封閉空間之安全管理具直接貢獻。

此外，結合 LLM 與 LINE 即時通訊平台之智慧防災通訊架構，提供可擴展至社區層級的即時互動式警示系統，提升災防資訊可及性與民眾行動參與度。整體系統架構可彈性部署於政府防災體系、民間企業場域與偏遠社區自主監測場景，展現出實務應用與推廣之高度潛力。

5.3 研究限制

雖然本研究整合多模組智慧災防監測系統於實地部署中展現穩定效能與應用潛力，惟在研究過程中仍存在若干限制，需於後續發展中持續改善。首先，感測模組部分仍受限於感測元件等級與環境干擾條件。以超音波裂縫儀為例，雖具備毫米級解析度，然當裂縫深度劇烈變動或環境溫溼度急遽變化時，仍可能造成量測誤差需加強補償機制；坡面運動模組所使用之低功耗加速度感測晶片，在震度量測上易受雜訊影響，雖經由演算法優化已具可用性，但與高階專業震度儀相比仍存在精度落差。

其次，影像辨識型的智慧水井模組受限於現場光源穩定性與霧氣濕度條件，

長期運作下需定期維護鏡頭與光學系統，否則可能影響標定辨識品質。系統於深井內部高濕封閉環境下，對防水防霧技術與耐久性材料仍有進一步提升空間。

此外，導入 LLM 作為智慧防災通訊核心雖展現語意生成優勢，但在部分邊界情境、極端事件或不完整資料條件下，仍可能產生幻覺式推論或語意漂移現象。因此本系統目前仍需仰賴後端多層次驗證與人工抽檢程序以強化資訊穩定性。隨著未來 LLM 模型技術持續演進與專業語料庫擴充，語意生成準確度預期可進一步優化。

最後，系統目前以小區域實驗場域驗證為主，對於大尺度、跨行政區域、跨部門整合之全面性災防應變架構，仍需進一步評估大規模部署下的通訊穩定性、資料管理架構與多單位協作機制之可行性與擴展性。

5.4 後續擴充與未來研究建議

本研究所開發之整合型智慧災防監測系統已初步驗證其技術可行性與應用潛力，未來仍有多項擴充與深化發展空間。首先，在感測技術面，可考量導入更高精度、多物理量整合之感測模組，如整合 GNSS 微位移監測、地表雷達干涉 (InSAR)、光纖應變監測等，提升對複雜災害致災機制之精緻掌握能力，特別適用於高位移人工坡地、大型水工結構或深層變形行為之早期偵測。

其次，在資料分析與預測能力方面，建議結合長期累積之感測大數據，導入深度學習、機器學習等資料驅動模型，發展異常行為自動辨識、預測性維護及風險評估模型。藉由長期時序資料訓練，可進一步強化災害預測精準度，提前介入可能演變之災害潛勢。

於智慧防災通訊平台層面，未來可延伸整合多平台(如 Messenger、Telegram、地方防災系統)、多語言支援與多用戶權限設計，提升社區防災互動性

與系統普及性。可利用使用者的回饋，即時重新調整模型。同時，建議與地方政府防災體系進行跨單位協作試驗，建構跨層級、跨部門共享之決策支援架構，驗證系統於真實防救災流程中之協作效能。



整體而言，隨著感測技術、人工智慧模型與雲端通訊平台之持續進化，未來本系統有潛力發展成為具備自適應學習能力、全區域即時監控與主動式預警回應之次世代智慧型防減災決策支援平台，進一步提升社會整體防災韌性。

參考文獻



- [1] 臺南市政府水利局. (2020). 智慧防汛網推廣建置計畫. 取自 https://web.tainan.gov.tw/publicdisaster/News_Content.aspx
- [2] 經濟部水利署. (2024). 水災智慧防災計畫數位轉型說明. 取自 <https://www.moea.gov.tw/MNS/populace/news/EpaperDetail.aspx>
- [3] 國家科學及技術委員會. (2023). 民生公共物聯網計畫現況. 取自 <https://www.nstc.gov.tw>
- [4] Algarni, A., & Abugabah, A. (2024). Internet of things for enhancing public safety, disaster response, and emergency management. *Information*, 13(1), 4. <https://doi.org/10.3390/info13010004>
- [5] Muñoz, D., Ramírez, F., & Villegas, D. (2023). Sensors on the Internet of Things systems for urban disaster management: A systematic literature review. *Sensors*, 23(14), 6259. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10340859/>
- [6] 中央災害防救辦公室. (2024). 災防告警細胞廣播訊息(PWS)與 EEW 系統介紹. 取自 <https://cbs.tw>
- [7] 國立臺灣大學地質科學系. (2022). P-Alert 觀測網建置與成效報告. 取自 <https://zh.wikipedia.org/wiki/P-Alert>
- [8] Zárata, S., & Becerra, A. (2017). New sensing technologies or/and devices for emergency response and disaster management. ResearchGate.



<https://www.researchgate.net/publication/318388964>

- [9] Alhasan, K., Mahmud, M. A. P., Al-Bahadili, H., & Al-Bastaki, Y. (2025). Smart disaster management: The role of AI in preventing, managing, and recovering from catastrophes. ResearchGate.

<https://www.researchgate.net/publication/378562174>

- [10] Parajuli, B. P., Pokhrel, G., & Gautam, D. (2024). Application of smart systems and emerging technologies for disaster risk reduction and management in Nepal. Disaster Prevention and Management: An International Journal, 33(1), 67–84.

<https://doi.org/10.1108/DPM-01-2023-0013>

- [11] 國家災害防救科技中心 · (2024)。《生成式人工智慧於災害防救應用初探》。
取自

<https://www.ncdr.nat.gov.tw/UploadFile/Newsletter/fa4e209ce5fe4c5e8f7bcbeb3b9bfbf6.pdf>

- [12] 行政院國家科學及技術委員會 · (2023)。《TAIDE(Trustworthy AI Dialogue Engine)計畫介紹》。取自 <https://www.nstc.gov.tw/folksonomy/detail/fe2bc2b3-76dc-48bc-933f-73983dca9dca?l=ch>

- [13] 極端降雨來了，AI 如何預測並預防邊坡崩塌？國立臺灣海洋大學 GscLab · (2025 年 3 月 30 日)。取自 <https://gsclab.ntou.edu.tw/wordpress/?p=1961>

- [14] Sheikh, S. A., Raj, M. T., Gupta, H., & Prakash, S. (2024). Harnessing large language models for disaster management: A survey. arXiv preprint.

<https://arxiv.org/abs/2402.09368>



- [15] Alshareef, N., & Almuhaideb, A. (2023). Utilizing LLMs and ML algorithms in disaster-related social media content. *Electronics*, 12(6), 1380.
<https://doi.org/10.3390/electronics12061380>
- [16] Verma, M. K., & Rani, M. (2025). AI in social good: LLM powered interventions in crisis management and disaster response. ResearchGate.
<https://www.researchgate.net/publication/378668358>
- [17] Sethi, T., Behl, A., Pereira, V., & del Giudice, M. (2025). Large language model applications in disaster management: An interdisciplinary review. *Journal of Disaster Research and Management*, 1(1), 1–20.
<https://doi.org/10.1016/j.jdrm.2024.100004>
- [18] 內政部消防署／建築研究所．(2022)．智慧防火防災科技關鍵技術及應用規劃之研究 [PDF]．取自
<https://ws.moi.gov.tw/001/Upload/404/refile/9489/279273/229b6537-ed2a-40e8-9af8-6512df716db7.pdf>
- [19] 內政部建築研究所．(2023)．因應地震災害之都市智慧防災策略藍圖初探．[PDF]．取自
https://www.abri.gov.tw/News_Content_Table.aspx?n=807&s=140239
- [20] 內政部建築研究所．(2022)．坡地社區智慧防災系統研發及實證研究 [PDF]．取自
<https://ws.moi.gov.tw/001/Upload/404/refile/9489/279270/a3a1ba2c-8649-4780-b40d-496703399eb3.pdf>



- [21] Huang, J., & Liu, J. (2019). The integrated disaster reduction intelligent service system and its application. In Proceedings of the 29th International Cartographic Conference (ICC 2019).
- https://icaci.org/files/documents/ICC_proceedings/ICC2019/html/3a-presentation2.html
- [22] Yang, J., & Wang, L. (2023). Technological innovations for enhancing disaster resilience in smart cities: A comprehensive urban scholar's analysis. *Urban Science*, 6(1), 6.
- <https://doi.org/10.3390/urbansci6010006>
- [23] Li, J., & Xu, L. (2023). Comparative study on international research hotspots and national-level policy keywords of dynamic disaster monitoring and early warning in China (2000–2021). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(6), 4888.
- <https://doi.org/10.3390/ijerph20064888>
- [24] Zhang, T., & Müller, F. (2023). Comparative analysis of disaster risk management systems in Germany, USA, Russia and China. ResearchGate.
- <https://www.researchgate.net/publication/371374878>
- [25] Herter, M., Schedel, R., & Bauernhansl, T. (2024). Digital transformation in disaster management. Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation IPA.
- <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/df8ae0cb-b11c-4c4e-8a99-26c1224197f7>

[26] 鄭錦桐、紀柏全、歐宗樺、沈哲緯(2018)。物聯網解決方案：以坡地監測為例。《大地技師期刊(Journal of Professional Geotechnical Engineers)》，**17**, 30 - 35。



[27] 臺北市政府工務局大地工程處(2018)。107 年度臺北市山坡地人工邊坡巡勘檢查及資料維護與檢核期末報告書簡報。臺北市：臺北市政府工務局大地工程處。

[28] 衛強、曹崇銘、鄭景鵬、鄭錦桐、紀柏全、沈哲緯、歐宗樺(2020)。鹿谷北勢溪上游地區懸浮微粒空間分布之研究。《臺大實驗林研究報告》，**34**(4), 299 - 320。

[29] Ou, T.-H., Yang, T.-H., & Chang, P.-Z. (2025). Combination of large language models and portable flood sensors for community flood response: A preliminary study. *Water*, **17**(7), 1055.