

---

**114 年度創新研究計畫**  
**應用電腦視覺裝置於崩塌地振動與變位之**  
**AI 告警機制**  
**Applying computer vision-based to**  
**warning system of vibration and**  
**displacement monitoring in landslide areas**  
**( 成果報告書 )**

---

執行單位：國立中興大學

執行期間：114 年 02 月 18 日至 114 年 12 月 31 日

計畫主持人：陳毅輝 助理教授

**農業部農村發展及水土保持署 編印**

**中華民國 114 年 12 月**

( 本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本署施政參考 )



# 應用電腦視覺裝置於崩塌地振動與變位之 AI 告警機制

## 摘要

崩塌地二次致災風險之即時監測，非接觸式地表變位量監測是目前興新的研究領域，本計畫運用人工智慧電腦視覺技術之影像辨識功能監測崩塌地坡面變位量，應用微電腦與數位相機之即時攝影，將監測於崩塌地區的邊坡，包括單鏡頭之電腦視覺式地表變位監測儀器，以及自製高精度地震儀，完成多元監測方案。

在邊坡監測中，利用新型電腦視覺裝置，應用此裝置於潛在崩塌地之變位量測，以監控崩塌地三維變位情形與坡地影像監控。電腦視覺裝置包括單鏡頭以及望遠鏡頭與人工智慧電腦視覺之樹莓派設備，利用樹莓派 Raspberry Pi 微電腦與 Open CV 視覺技術建立影像中的規標之變位量，並搭配低功耗、低成本的自製高精度地震儀，紀錄崩塌地因地震或崩塌造成之震動。

本計畫研究之電腦視覺裝置只需要傳統監測儀器的十分之一價格，且運用規標辨識之誤差可達公厘級，不論是經濟面或使用性都更具有優勢，整體之 AIOT 系統設計，安裝於新竹縣尖石鄉的秀巒崩塌地，適合做緊急防災應變與長期、即時的坡地安全監測，裝設後之颱

風豪雨期間亦有發揮監測功能。另，自製地震儀以高精度 EPSON 與 Geophone 兩種感測器同步接收振動資料，以 IoT 方式即時傳輸與展示資料，並於三級震度時，啟動每秒 100 筆振動加速度資料。本計畫研究之電腦視覺裝置以及高精度地動儀，皆以設計 IoT 展示界面，並分別於地表變位達 10 公分以及震度達三級時觸發推播系統，以利崩塌地之多元監測與告警機制之建立。

**關鍵詞：**電腦視覺、大規模崩塌、地表變位監測、地動儀

# **Applying computer vision-based to warning system of vibration and displacement monitoring in landslide areas**

## **Abstract**

For landslide monitoring of secondary disaster, non-contact monitoring devices for ground movement is a new field. This project utilizes image recognition functions of artificial intelligence-based computer vision technology to monitor slope displacements in landslide areas. By using real-time imaging with microcomputers and digital cameras, multi-scale monitoring is applied to slopes in landslide regions, including the single-camera computer vision-based surface displacement monitoring device, and self-made high-precision seismometer.

In slope monitoring, a new type of computer vision device is used to measure displacements in potential landslide areas, enabling monitoring of three-dimensional displacements and slope image surveillance. The computer vision device includes single-lens and telephoto-lens cameras along with AI-based computer vision Raspberry Pi systems. Using Raspberry Pi microcomputers and OpenCV visual techniques, the displacement of markers in images is established, and combined with a low-power, low-cost, self-made high-precision seismometer to record vibrations caused by earthquakes or collapses in the landslide area.

The computer vision device developed in this project costs only one-tenth of traditional monitoring instruments, and the error of marker recognition can reach millimeter level, providing advantages in both

economic feasibility and usability. The overall AIoT system design is suitable for emergency disaster response and long-term, real-time slope safety monitoring. The innovative seismograph uses two high-precision sensors, EPSON and geophones, to simultaneously receive vibration data. This data is transmitted and displayed in real-time via IoT. The seismograph initiates 100 vibration acceleration data points per second at intensity level 3. The computer vision device and high-precision seismograph used in this project are designed with IoT-display interfaces, and trigger push mobile notifications when ground displacement reaches 10 cm or vibration up to intensity level 3. The system sets up a multi-dimensional monitoring and warning mechanism for landslide areas.

**Keywords: computer vision , large-scale landslide, ground movement monitoring, seismometer**

# 目次

|                                 |      |
|---------------------------------|------|
| 摘要.....                         | I    |
| Abstract.....                   | III  |
| 目次.....                         | V    |
| 表次.....                         | VI   |
| 圖次.....                         | VIII |
| 第一章 緒論 .....                    | 1-1  |
| 第二章 工作執行方法與步驟 .....             | 2-1  |
| 第一節 工作執行方法 .....                | 2-1  |
| 第二節 工作執行步驟 .....                | 2-24 |
| 第三章 試驗結果與討論 .....               | 3-1  |
| 第一節 試驗結果 .....                  | 3-1  |
| 第二節 試驗討論 .....                  | 3-24 |
| 第四章 結論及建議 .....                 | 4-1  |
| 參考文獻.....                       | 參-1  |
| 附錄.....                         | 附錄-1 |
| 附錄一、研提計畫書之計畫內容審查意見暨回覆辦理情形 ..... | 附錄-1 |
| 附錄二、期中書面審查意見暨回覆辦理情形 .....       | 附錄-4 |
| 附錄三、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形 .....       | 附錄-6 |

## 表次

|                                        |      |
|----------------------------------------|------|
| 表 2-1 RASPBERRY PI 4 技術規格表(台灣樹莓派，2023) | 2-5  |
| 表 2-2 工業級可調焦鏡頭技術規格表(德源科技，2018)         | 2-7  |
| 表 2-3 單筒望遠鏡技術規格表(文方光學，2019)            | 2-8  |
| 表 2-4 EPSON 三軸向加速度計規格表                 | 2-17 |
| 表 2-5 SM-4 GEOPHONE 10HZ SENSOR        | 2-20 |
| 表 2-6 RS4D 之加速度計規格表(RS4D，2017)         | 2-21 |
| 表 2-7 太陽能燈泡組規格表                        | 2-28 |
| 表 2-8 RS3D 之地聲感測器規格表(RS3D，2017)        | 2-31 |
| 表 2-9 SHAKE TABLE II 規格表(QUANSER，2019) | 2-33 |
| 表 2-10 振動台參數設定表                        | 2-34 |
| 表 2-11 自製地震儀硬體設備                       | 2-36 |
| 表 2-12 地震震度與加速度關係表                     | 2-37 |
| 表 2-13 振動台模擬地震設定表                      | 2-37 |
| 表 3-1 10 公尺之監測成果表                      | 3-4  |
| 表 3-2 20 公尺之監測成果表                      | 3-5  |
| 表 3-3 30 公尺之監測成果表                      | 3-7  |
| 表 3-4 現地長距離定點觀測試驗 X 軸向、Y 軸向像素<br>變化量   | 3-15 |
| 表 3-5 現地長距離定點觀測試驗 X 軸向、Y 軸向實際<br>累積變位量 | 3-16 |
| 表 3-6 現地長距離定點觀測試驗 Z 軸向像素變化量            | 3-16 |
| 表 3-7 自製地震儀之振動台參數設定表                   | 3-18 |
| 表 3-8 振動台試驗之各種儀器分析表                    | 3-18 |



|                          |      |
|--------------------------|------|
| 表 3-9 振動台頻率分析結果 .....    | 3-19 |
| 表 3-10 沙箱振動台參數設定結果 ..... | 3-21 |
| 表 3-11 沙箱振動台頻率分析結果.....  | 3-22 |

## 圖次

|                                                            |      |
|------------------------------------------------------------|------|
| 圖 2-1 電腦視覺式變位監測裝置示意圖(陳毅輝等，<br>2024) .....                  | 2-1  |
| 圖 2-2 座標投影示意圖(KHONGMA, A. ET AL.，2014) .....               | 2-2  |
| 圖 2-3 投影之平面單應性示意圖(MEDIUM.COM，2022) .....                   | 2-3  |
| 圖 2-4 樹莓派 RASPBERRY PI 4 MODEL B 示意圖(台灣樹<br>莓派，2023) ..... | 2-4  |
| 圖 2-5 樹莓派高畫質相機模組(RASPBERRY PI LTD，2023)<br>.....           | 2-6  |
| 圖 2-6 工業級可調焦鏡頭(德源科技，2018) .....                            | 2-6  |
| 圖 2-7 WENFANG 單筒望遠鏡(文方光學，2019) .....                       | 2-7  |
| 圖 2-8 黑白棋盤格規標 .....                                        | 2-9  |
| 圖 2-9 EPSON M-A 系列高精度三軸加速度示意圖 .....                        | 2-14 |
| 圖 2-10 GEOPHONE SENSOR 示意圖 .....                           | 2-14 |
| 圖 2-11 樹莓派主機板 RASPBERRY PI 4 連接示意圖 .....                   | 2-15 |
| 圖 2-12 ADS1253 高解析 AD/DA 轉換模組示意圖 .....                     | 2-16 |
| 圖 2-13 EPSON 感測器監測擷取即時資料 .....                             | 2-18 |
| 圖 2-14 自製地震儀感測器配置圖 .....                                   | 2-19 |
| 圖 2-15 樹莓派地震儀(RASPBERRY SHAKE, RS4D)示意<br>圖 .....          | 2-21 |
| 圖 2-16 樹莓派地震儀官方網站示意圖 .....                                 | 2-22 |
| 圖 2-17 樹莓派地震儀官方資料展示示意圖 .....                               | 2-23 |
| 圖 2-18 監測小屋設置圖 .....                                       | 2-25 |
| 圖 2-19 規標邊框 3D 設計 .....                                    | 2-26 |
| 圖 2-20 規標內部配置 .....                                        | 2-26 |

|                                                 |      |
|-------------------------------------------------|------|
| 圖 2-21 UAV 運載規標之校園測試 .....                      | 2-27 |
| 圖 2-22 夜間太陽能立體規標 .....                          | 2-27 |
| 圖 2-23 AIoT 系統畫面 .....                          | 2-29 |
| 圖 2-24 現地裝置模擬示意圖 .....                          | 2-30 |
| 圖 2-25 樹莓派地震儀(RASPBERRY SHAKE, RS3D)示意圖.....    | 2-31 |
| 圖 2-26 SHAKE TABLE II 振動台(QUANSER , 2019) ..... | 2-33 |
| 圖 2-27 砂箱與地震儀安置於振動台示意圖 .....                    | 2-35 |
| 圖 2-28 電腦視覺式變位辨識示意圖 .....                       | 2-35 |
| 圖 2-29 振動台實驗示意圖 .....                           | 2-37 |
| 圖 2-30 自製地動儀沙箱試驗 .....                          | 2-38 |
| 圖 2-31 砂箱邊坡模型.....                              | 2-39 |
| 圖 2-32 FFT 程式碼 .....                            | 2-40 |
| 圖 2-33 FFT 分析成果示意圖 .....                        | 2-41 |
| 圖 2-34 校內監測小屋.....                              | 2-42 |
| 圖 2-35 校內地動儀系統 .....                            | 2-42 |
| 圖 3-1 10 公尺 X 軸累積變位量 .....                      | 3-3  |
| 圖 3-2 10 公尺 Y 軸累積變位量 .....                      | 3-3  |
| 圖 3-3 10 公尺 Z 軸累積變位量.....                       | 3-3  |
| 圖 3-4 20 公尺 X 軸累積變位量 .....                      | 3-4  |
| 圖 3-5 20 公尺 Y 軸累積變位量 .....                      | 3-5  |
| 圖 3-6 20 公尺 Z 軸累積變位量.....                       | 3-5  |
| 圖 3-7 30 公尺 X 軸累積變位量 .....                      | 3-6  |
| 圖 3-8 30 公尺 Y 軸累積變位量 .....                      | 3-6  |
| 圖 3-9 30 公尺 Z 軸累積變位量.....                       | 3-6  |

|                                                                                  |      |
|----------------------------------------------------------------------------------|------|
| 圖 3-10 長距離試驗之電腦視覺式變位監測儀與規標架<br>設示意圖 .....                                        | 3-8  |
| 圖 3-11 量測距離 750 M，解算影像解析度為 1280 ×<br>960(單位: PIXEL × PIXEL)之 X 軸向像素變化量.....      | 3-11 |
| 圖 3-12 量測距離 750 M，解算影像解析度為 1280 ×<br>960(單位: PIXEL × PIXEL)之 Y 軸向像素變化量.....      | 3-11 |
| 圖 3-13 量測距離 750 M，解算影像解析度為 1280 ×<br>960(單位: PIXEL × PIXEL)之 Z 軸向像素變化量.....      | 3-12 |
| 圖 3-14 量測距離 750 M，解算影像解析度為 1920 ×<br>1440(單位: PIXEL × PIXEL)之 X 軸向像素變化<br>量..... | 3-12 |
| 圖 3-15 量測距離 750 M，解算影像解析度為 1920 ×<br>1440(單位: PIXEL × PIXEL)之 Y 軸向像素變化<br>量..... | 3-12 |
| 圖 3-16 量測距離 750 M，解算影像解析度為 1920 ×<br>1440(單位: PIXEL × PIXEL)之 Z 軸向像素變化<br>量..... | 3-13 |
| 圖 3-17 量測距離 1000 M，解算影像解析度為 1280 ×<br>960(單位: PIXEL × PIXEL)之 X 軸向像素變化量.....     | 3-13 |
| 圖 3-18 量測距離 1000 M，解算影像解析度為 1280 ×<br>960(單位: PIXEL × PIXEL)之 Y 軸向像素變化量.....     | 3-13 |
| 圖 3-19 量測距離 1000 M，解算影像解析度為 1280 ×<br>960(單位: PIXEL × PIXEL)之 Z 軸向像素變化量.....     | 3-14 |

|                                                                            |      |
|----------------------------------------------------------------------------|------|
| 圖 3-20 量測距離 1000 M，解算影像解析度為 1920 × 1440(單位: PIXEL × PIXEL)之 X 軸向像素變化量..... | 3-14 |
| 圖 3-21 量測距離 1000 M，解算影像解析度為 1920 × 1440(單位: PIXEL × PIXEL)之 Y 軸向像素變化量..... | 3-14 |
| 圖 3-22 量測距離 1000 M，解算影像解析度為 1920 × 1440(單位: PIXEL × PIXEL)之 Z 軸向像素變化量..... | 3-15 |
| 圖 3-23 新竹縣-尖石鄉-T001(秀巒)大規模崩塌潛勢區 .....                                      | 3-27 |
| 圖 3-24 秀巒崩塌區設置儀器位置平面示意圖 .....                                              | 3-28 |
| 圖 3-25 秀巒崩塌區設置儀器現地示意圖 .....                                                | 3-28 |
| 圖 3-26 秀巒國小現勘與儀器架設測試 .....                                                 | 3-29 |
| 圖 3-27 秀巒國小秀巒崩塌區設置儀器現地示意圖(監測小屋整體).....                                     | 3-30 |
| 圖 3-28 秀巒國小秀巒崩塌區設置儀器現地示意圖(監測小屋視野窗).....                                    | 3-31 |
| 圖 3-29 自製地動儀.....                                                          | 3-31 |
| 圖 3-30 UAV 吊掛投放規標.....                                                     | 3-32 |
| 圖 3-31 全站儀測定距離 .....                                                       | 3-32 |
| 圖 3-32 監測系統運作畫面 .....                                                      | 3-33 |
| 圖 3-33 電腦視覺變位監測儀即時監控平台示意圖 .....                                            | 3-33 |
| 圖 3-34 地動儀即時監控平台示意圖 .....                                                  | 3-34 |
| 圖 3-35 校內儀器架設示意圖 .....                                                     | 3-35 |
| 圖 3-36 校內儀器架設示意圖(監測小屋內部配置).....                                            | 3-35 |

|                                                         |      |
|---------------------------------------------------------|------|
| 圖 3-37 校內地動儀系統 .....                                    | 3-36 |
| 圖 3-38 秀巒崩塌地發生大規模土砂下移前後對比圖 .....                        | 3-37 |
| 圖 3-39 電腦視覺變位監測儀器拍攝崩塌前後對比圖 .....                        | 3-38 |
| 圖 3-40 電腦視覺變位監測儀器日夜間監測截圖 .....                          | 3-38 |
| 圖 3-41 電腦視覺變位監測儀器監測資料(2025/11/01 到<br>2025/11/15) ..... | 3-39 |
| 圖 3-42 電腦視覺變位監測儀器告警推播通知系統 .....                         | 3-39 |
| 圖 3-43 監測數據 .....                                       | 3-40 |
| 圖 3-44 DV/V 圖 (V 速度變化率) .....                           | 3-42 |
| 圖 3-45 DV/V 圖 (A 速度變化率) .....                           | 3-42 |
| 圖 3-46 IoT 平台 .....                                     | 3-44 |
| 圖 3-47 自製 IoT 地動儀外部太陽能 .....                            | 3-44 |
| 圖 3-48 自製 IoT 地動儀內部儀器 .....                             | 3-45 |

## 第一章 緒論

隨著氣候變遷引發的極端天氣頻率逐年增加，地震、颱風和豪雨等自然災害對邊坡穩定性造成的威脅日益嚴峻。然而，目前的監測技術雖然具備一定的早期預警能力，卻常因高昂成本、技術複雜性以及安裝不便等限制，難以廣泛應用於實際場域。為此，本計畫旨在開發一種兼具高性價比、智慧化與永續運作能力的電腦視覺式變位監測儀（CVDM），以及高精度地震儀，期望有效解決現有系統的不足，並進一步提升邊坡災害監測的效率與準確性。研究目標包括：開發基於AIoT 技術的非接觸式監測設備，實現全天候自動化數據收集與傳輸；提升儀器在多樣環境條件下的穩定性與精度；驗證其在長時間與遠距離邊坡動態變位監測中的可行性。此研究不僅具有學術價值，還為防災工程提供了一種高效且低成本的解決方案，進一步保障公共安全與二次致災風險告警機制之系統建立。





## 第二章 工作執行方法與步驟

### 第一節 工作執行方法

#### 一、電腦視覺變位監測儀

##### (一)理論基礎與介紹

本計畫使用的電腦視覺式變位監測儀(Computer Vision-based Displacement Monitoring, 簡稱 CVDM), 基於影像投影原理和電腦視覺技術, 實現非接觸式的三軸位移監測。該技術利用相機模組對測點安裝的黑白棋盤格規標(以下簡稱為規標)進行成像, 並透過影像處理分析標記物的像素變化, 進一步計算出空間中的實際位移量。

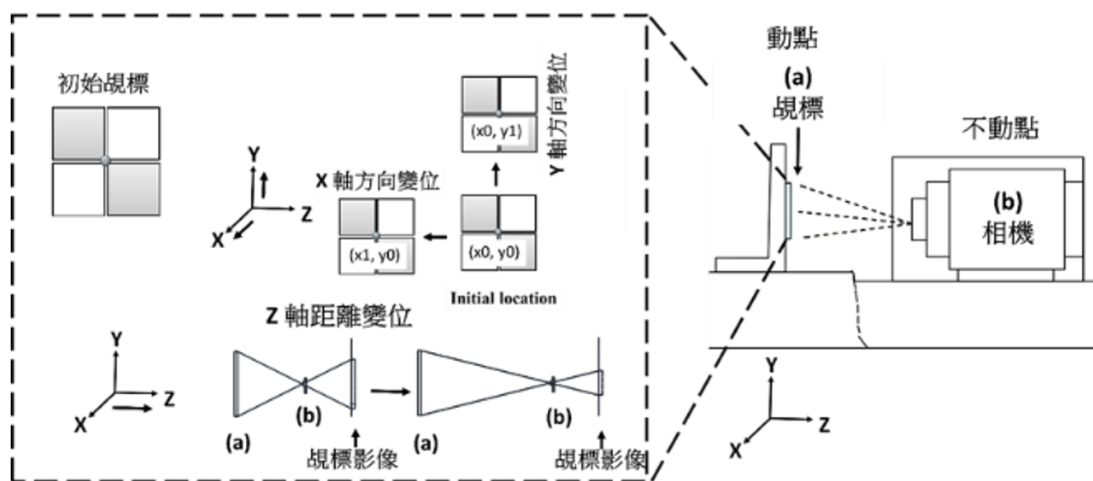


圖 2-1 電腦視覺式變位監測裝置示意圖(陳毅輝等，2024)

在相機成像過程中, 三維空間中的某一點會通過相機的光軸投影到影像平面上, 形成相應的像素坐標。由於相機光軸和成像中心可能存在偏移, 因此需要通過內參數矩陣對成像進行校正, 確保像素坐標準確地反映實際三維空間中的位置變化。其原理為相機之影像投影技術, 如圖 2-2 所示, 點  $\bar{Q} = (X, Y, Z)$  藉由投影中心的光線投影到影像平面上的點  $\bar{q} = (x, y, f)$ , 由於成像中心通常不在光軸上, 故需透過參數包

括焦距( $f_x, f_y$ )和成像中心偏移量( $c_x, c_y$ )來確定座標中心的偏移(對於光軸而言)，藉此來建立模型。真實座標( $X, Y, Z$ )將依據公式 2.1

被投影到成像器上的 $(x_{\text{screen}}, y_{\text{screen}})$ ：

$$x_{\text{screen}} = f_x \cdot \frac{x}{Z} + c_x, \text{ 而 } y_{\text{screen}} = f_y \cdot \frac{y}{Z} + c_y \text{ (公式 2.1)}$$

接著定義相機的參數，如  $f_x$ 、 $f_y$ 、 $c_x$  與  $c_y$ ，排列出一個  $3 \times 3$  矩陣，稱為相機內參數矩陣(camera intrinsics matrix)，以公式 2.2 表示將真實座標，投影至相機的情形：

$$\bar{q} = M \cdot \bar{Q} \text{ (公式 2.2)}$$

其中式中的  $M$  如下公式 2.3 所示：

$$M = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ (公式 2.3)}$$

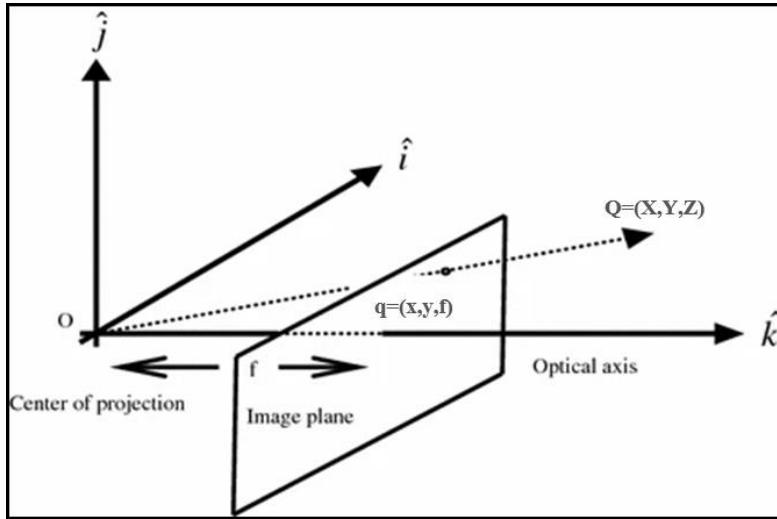


圖 2-2 座標投影示意圖(Khongma, A. et al. , 2014)

在計算過程中，利用平面單應性 (Planar Homography) 模型，可以將規標的實際位置與其影像平面上的像素位置通過數學公式建立關係。若使用齊次座標來表示點  $Q$  投影到成像器  $q$  的對應關係，這種對應可以用矩陣相乘的方式表示，如公式 2.4 所示：

$$\bar{q} = s \cdot M \cdot W \cdot \bar{Q} \text{ (公式 2.4)}$$

其中， $s$  是任意尺度的比例，為使單應性定義到該尺度比例；

$W = [R \ \bar{t}]$  為物理變換的部分，受觀測到的影像平面上的旋轉矩陣  $R$  及平移矩陣  $\bar{t}$  影響，其中  $R$  為一  $3 \times 3$  的矩陣， $\bar{t}$  為一個三維列向量。

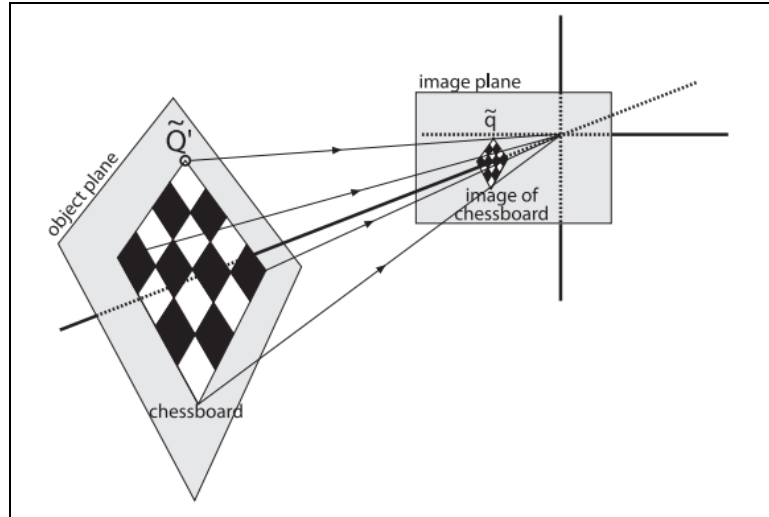


圖 2-3 投影之平面單應性示意圖(medium.com，2022)

公式中，旋轉矩陣和平移向量描述了相機與規標之間的空間幾何變化，而比例因子則用來標定實際空間與影像平面之間的比例。透過 OpenCV 函式庫，以高效處理影像數據並檢測邊緣、角點等特徵點。通過公式 2.5、公式 2.6，監測儀不僅能精確量測規標的水平方向（X 軸）、垂直方向（Y 軸）及軸向距離（Z 軸）變化，還能根據相機焦距和規標尺寸推算相機與規標之間的距離變化。

$$\frac{\text{規標實際邊長(cm)}}{\text{畫面規標邊長(pixel)}} = \text{單位像素對應實際位移(cm)} \text{ (公式 2.5)}$$

$$\frac{\text{焦距(pixel)} \times \text{規標實際邊長(cm)}}{\text{畫面規標邊長(pixel)}} = \text{鏡頭與規標的距離(cm)} \text{ (公式 2.6)}$$

## (二)硬體儀器配備

電腦視覺式變位監測儀配備如下所示：

### 1.嵌入式系統裝置：

本儀器所使用之嵌入式系統裝置，其電腦選用樹莓派 Raspberry Pi 4 Model B(如圖 2-4)。樹莓派 Raspberry Pi 是一款由英國樹莓派基金會所推出的單板電腦，其作業系統為 Linux 系統，下表 2-1 為 Raspberry Pi 4 的技術規格表。

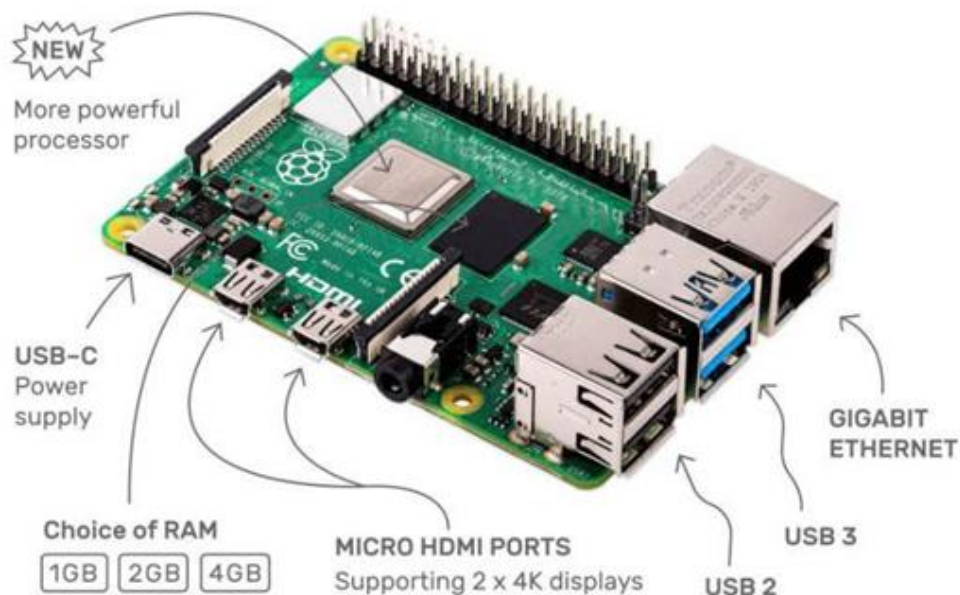


圖 2-4 樹莓派 Raspberry Pi 4 Model B 示意圖(台灣樹莓派，2023)

表 2-1 Raspberry Pi 4 技術規格表(台灣樹莓派，2023)

|            |                                                                                                                 |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SoC(單晶片系統) | Broadcom BCM2711                                                                                                |
| CPU        | Quad core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SoC @ 1.5GHz                                                               |
| GPU        | Broadcom VideoCore VI; H.265 (4kp60 decode), H264 (1080p60 decode, 1080p30 encode)<br>OpenGL ES 3.1, Vulkan 1.0 |
| 記憶體        | 1GB, 2GB, 4GB or 8GB LPDDR4-3200 SDRAM                                                                          |
| 視訊         | 2 × micro-HDMI ports ; 2-lane MIPI DSI display port                                                             |
| 相機         | 2-lane MIPI CSI camera port                                                                                     |
| 儲存         | Micro-SD 卡(用於加載操作系統和數據存儲)                                                                                       |
| USB        | 2 × USB 3.0 ports ; 2 × USB 2.0 ports                                                                           |
| 乙太網路       | Gigabit Ethernet                                                                                                |
| 無線網路       | CYW43455 2.4 GHz/5.0 GHz IEEE 802.11ac wireless                                                                 |
| 藍芽         | Bluetooth 5.0                                                                                                   |
| GPIO       | 40-pin 2.54 mm (100 mil) expansion header                                                                       |
| 工作電壓/電流    | 5V DC 3A                                                                                                        |
| 尺寸         | 85mm x 56mm x 17mm                                                                                              |
| 重量         | 46g                                                                                                             |

## 2.相機模組：

本儀器使用的相機模組為樹莓派高畫質相機模組 Raspberry Pi High Quality Camera(如圖 2-5)，其搭載了 1230 萬畫素的 Sony

IMX477 堆疊背光式感測器，7.9mm 感測器對角線，有著可調整的後焦距，且支援 C-Mount 與 CS-Mount 接頭。



圖 2-5 樹莓派高畫質相機模組(Raspberry Pi Ltd，2023)

### 3.工業級可調焦鏡頭：

本儀器使用之鏡頭為工業級可調焦鏡頭(如圖 2-6)，其詳細規格如表 2-2 工業級可調焦鏡頭技術規格表(德源科技，2018)所示，該鏡頭適用於中、短距離(50 公尺以下)之監測。



圖 2-6 工業級可調焦鏡頭(德源科技，2018)

表 2-2 工業級可調焦鏡頭技術規格表(德源科技，2018)

|        |                 |
|--------|-----------------|
| 焦距     | 12-120mm        |
| 焦比     | f/1.8 - f/16    |
| 分辨率    | 3 Mega<br>Pixel |
| 最小拍攝距離 | 0.5 m           |
| 重量     | 273 g           |

#### 4.單筒望遠鏡

本儀器選用之單筒望遠鏡為 WENFANG 肖特螢石玻璃鏡片 ED80/500 數位拍攝單筒望遠鏡(如圖 2-7)，針對中、長距離(50 公尺以上)監測，其詳細規格如表 2-3 所示：



圖 2-7 WENFANG 單筒望遠鏡(文方光學，2019)

表 2-3 單筒望遠鏡技術規格表(文方光學，2019)

|      |           |
|------|-----------|
| 物鏡焦距 | 500 mm    |
| 口徑   | 80 mm     |
| 焦比   | f/6.25    |
| 有效倍數 | 20 倍、60 倍 |

## 5. 規標

本儀器選用  $3 \times 3$  之黑白棋盤格規標(如圖 2-8)，因黑白棋盤格具有明顯的顏色對比，應用在電腦視覺時易於檢測和分析，故有助於準確地檢測出棋盤格的角點。規標尺寸可依據監測距離進行調整，當要針對長距離(如 500 公尺以上)進行監測時，則需使用  $85 \text{ cm} \times 85 \text{ cm}$  的大型規標，並搭配上述之單筒望遠鏡做使用，雖然依據過去實驗得知於 500 公尺量測距離的情況下， $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$  之規標是可行的，但其監測穩定性不足，因此建議使用  $85 \text{ cm} \times 85 \text{ cm}$  大的規標。其餘中、短距離之情況，則可自行調整選用適合之規標大小，如  $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$  之角鐵型規標，抑或是研究室自製之太陽能燈組式立體規標(尺寸： $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ )。另當監測距離小於 30 公尺時，建議使用工業級可調焦鏡頭；監測距離大於 30 公尺時，則建議使用單筒望遠鏡。



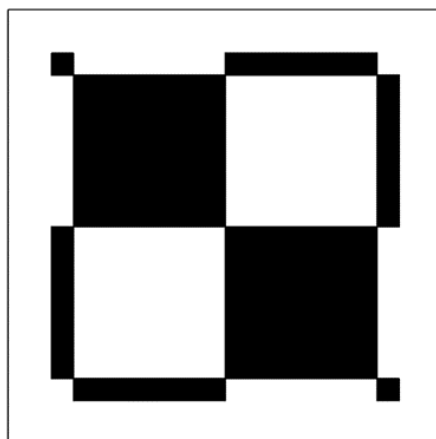


圖 2-8 黑白棋盤格規標

### (三)軟體分析

#### 1. 希爾伯特-黃轉換(Hilbert-Huang Transform, HHT)

希爾伯特-黃轉換（Hilbert-Huang Transform, HHT）是一種針對非線性與非穩態信號分析的自適應信號處理方法。該方法不同於傳統的傅里葉變換和小波變換，能夠根據信號的特性動態地進行分解和分析，特別適合處理非線性和非穩態信號。HHT 主要包含兩個步驟：經驗模態分解（Empirical Mode Decomposition, EMD）與希爾伯特譜分析（Hilbert Spectral Analysis, HSA）。

在經驗模態分解中，信號被分解為一組本徵模態函數（Intrinsic Mode Functions, IMFs），這些函數反映信號在不同尺度上的內部振盪特性，並保證每個模態函數的局部頻率是物理意義上的。EMD 通過篩選過程（sifting process）提取每一個 IMF，逐層分離信號中的特徵分量，使其適應不同的頻率範圍。分解完成後，原始信號被表達為

IMFs 之和與一個殘差項的形式。表達如<sup>公式 2.7</sup>：

$$x(t) = \sum_{i=1}^n \text{IMF}_i(t) + r(t) \quad (\text{公式 2.7})$$

$IMF_i(t)$ ：第  $i$  個本徵模態函數，表示信號中不同時間尺度的振盪模式；

$r(t)$ ：殘差，代表信號中不可分解的低頻成分或趨勢。

接著，對每個 IMF 應用希爾伯特轉換(Hilbert Transform)  
(公式 2.8、公式 2.9)以獲取瞬時頻率和瞬時振幅，得到希爾伯特頻譜。

希爾伯特轉換生成的瞬時頻率提供了信號頻率隨時間變化的細節，而瞬時振幅則描述了信號能量的動態分佈。

希爾伯特轉換的定義如公式 2.8 所示(Wu, Z. et al., 2004)。

$$\hat{x}(t) = \frac{1}{\pi} P.V. \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (\text{公式 2.8})$$

其中  $\hat{x}(t)$  是訊號  $x(t)$  的希爾伯特轉換，P.V. 為柯西主值(Cauchy Principal Value)，其中柯西主值是處理特定積分的方法，其積分範圍內存在奇異點(即函數在某些點發散)。

$$\tilde{h}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{h(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (\text{公式 2.9})$$

$h(t)$  為實部信號； $\tilde{h}(t)$  為希爾伯特變換後的虛部信號。

$$z(t) = h(t) + i\tilde{h}(t) = a(t)e^{i\phi(t)} \quad (\text{公式 2.10})$$

$a(t) = \sqrt{h^2(t) + \tilde{h}^2(t)}$ ：瞬時振幅； $\phi(t) = \arctan\left(\frac{\tilde{h}(t)}{h(t)}\right)$ ：瞬時相位；

$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt}$ ：瞬時頻率。

通過希爾伯特譜分析，HHT 可以生成時頻能量譜 (Hilbert Spectrum)，該譜清晰展示了信號在時間和頻率上的能量分佈，揭示出信號的動態特性。

希爾伯特-黃轉換的優勢在於它不需要預設基函數，能夠根據數據的本質特性進行分解，因此非常適合處理具有非線性、不穩態特性的信號，如地震波。

## 2.快速傅立葉轉換(FFT)

傅立葉級數由法國數學家約瑟夫傅立葉(Jean Baptiste Joseph Fourier)所提出，他主張任何合理的函數都可以展開成無限多個正餘弦函數的組合。而傅立葉級數就是將任意週期性的函數或訊號分解成正弦函數和餘弦函數的方法。透過積分公式可以把原始週期性函數每一個頻率成分找出。

在實際的應用中大多數的訊號都是非週期性的函數，因此傅立葉級數無法在這之上直接應用，因此為了解決此問題而發展出了傅立葉轉換。傅立葉轉換可視為傅立葉級數在週期趨近無限( $T \rightarrow \infty$ )時的極

限情況，在  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$  中  $T$  趨近於無限時  $\omega_0$  會趨近於 0，而離散的頻率  $n\omega_0$

會變成連續頻率  $\omega$ ，再由傅立葉級數的形式使用尤拉公式從實數轉換為複數。最後將傅立葉級數離散加總的形式轉變為連續積分的形式即可得到傅立葉轉換的公式 2.11:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (\text{公式 2.11})$$

其中， $x(t)$  代表時域訊號， $X(f)$  為對應的頻域訊號， $f$  為頻率(Hz)， $j$  為虛數  $\sqrt{-1}$ 。

傅立葉轉換是理想情況下的完美工具，然而在現實中，資料皆以數位形式並且有限長，所要分析的函數訊號皆以離散的形式存在，故我們需要使用離散傅立葉轉換，將離散有限的時間域訊號轉換為頻率

域。

快速傅立葉轉換(FFT)與離散傅立葉轉換(DFT)運算的數學結果不變，但因為離散傅立葉轉換需要大量的運算，會導致處理大筆數據時需要極高的運算成本，在即時的預警和效能不佳的機器運算都是不現實的。而傳統的 DFT，其複雜度需要 $O(N^2)$ ，而 FFT 則只需要 $O(N\log_2 N)$ ，其中 $N$ 代表資料筆數，也就是說原來資料有 1024 筆資料，使用 DFT 需要進行 $1024^2 = 1048576$ 次運算，使用 FFT 只需要 $1024\log_2 1024 = 10240$ 次運算。

而 FFT 最常使用的優化計算方式為 (Cooley–Tukey FFT algorithm)，其透過透過分治法將原先長度為 $N$ 的訊號切半，一半為偶數位置資料(Even indices)、一半為基數位置資料(Odd indices)，之後分別對兩部分進行 DFT 並將結果合併成完整的 DFT，這個過程是遞迴的每次都會切成更小的部分計算，最後利用其對稱的特性只需做一次長度為 $N/2$ 的小型 FFT，這其中透過蝴蝶運算(Butterfly Operation)直到重新合併為原始數據長度(Oppenheim, A. V. et al, 2010)。

$$\begin{cases} X[k] = E[k] + W_N^k \cdot O[k] \\ X\left[k + \frac{N}{2}\right] = E[k] - W_N^k \cdot O[k] \end{cases} \quad (\text{公式 2.12})$$

其中 $E[k]$ 為偶數項的 FFT 結果， $O[k]$ 為奇數項的 FFT 結果， $W_N^k$ 為旋轉因子 $e^{-j\frac{2\pi k}{N}}$ 。

### 3.短時距傅立葉轉換(STFT)

短時距傅立葉轉換(STFT)是一種用於時頻領域的訊號分析方法，主要應用於探討具有非平穩頻率特性的訊號。這類訊號的頻率成分會隨時間變化，若僅採用傳統的快速傅立葉轉換(FFT)進行處理，將無法完整呈現訊號隨時間變化的頻譜行為。

短時距傅立葉轉換的核心概念是將長時間訊號切割為數個互有重疊部分的短時間片段，在實際分段時，若直接切割訊號會讓邊緣產生突變導致頻譜洩漏(leakage)，所以須對每段訊號乘上窗函數(window function)，用來平滑訊號邊緣，接著再進行傅立葉轉換，以取得訊號在每個時間範圍內的頻率分布，其數學表示如公式 2.13 所示(Oppenheim, A. V. et al, 2010)。

$$X(t, \omega) = \text{STFT}[x(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)w(t - \tau)e^{-i\omega\tau}d\tau \quad (\text{公式 2.13})$$

其中， $x(t)$ 為原始訊號， $w(t)$ 為窗函數， $\omega$ 為角頻率。

在 STFT 中，窗函數有緩和訊號邊緣、降低頻譜分析誤差的功用，因此對於 STFT 的應用極為重要，常見的窗函數有漢明窗(Hamming window)、海寧窗(Hann window)、矩形窗(Rectangular window)、高斯窗(Gaussian window)等，不同的窗函數具有不同的頻譜特性，如主瓣(main lobe)、旁瓣(side lobe)高度、寬度。其中主瓣指的是頻譜圖中能量最集中、幅值最高的部分，通常位於頻率軸的中心位置，代表了訊號中主要的頻率成分；而旁瓣則是分布在主瓣周圍的一連串較小波峰，象徵了主頻在轉換過程中所產生的頻率擴散現象，也就是所謂的頻率洩漏。

## 二、自製地動儀

### (一)理論基礎與介紹

本計畫整合應用多元感測與邊緣運算技術，規劃建置一套可用於崩塌地及坡地災害監測之高精度振動感測系統。核心感測元件採用日本 EPSON M-A 系列三軸加速度計。

為強化監測架構之穩定性與擴充性，本計畫所建置一套地震感測系統整合平台，整合兩種元件：EPSON M-A 系列三軸加速度計（如圖 2-9）與地震用 Geophone 傳感器（如圖 2-10），並以 Raspberry Pi 4（如圖 2-11）作為邊緣運算主機進行資料擷取與初步處理。各感測模組之量測訊號將同步進行頻譜分析（Spectral Analysis），以辨識主要能量頻率區段與其時頻特性，協助判釋地震或崩塌滑動事件之發生與發展趨勢。此外，透過 Raspberry Pi 可實現即時視覺化顯示與本地儲存功能，並可進一步搭配 5G 或 NBIoT 傳輸模組進行遠端資料回傳與整合。



圖 2-9 EPSON M-A 系列高精度三軸加速度示意圖



圖 2-10 Geophone Sensor 示意圖



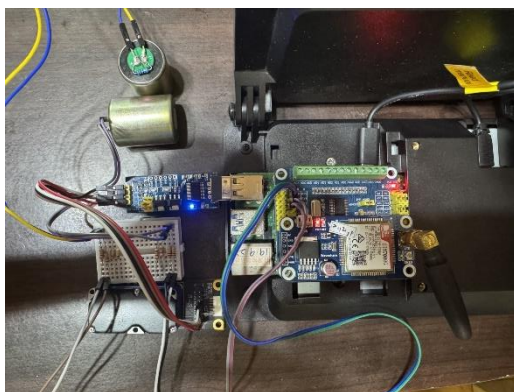


圖 2-11 樹莓派主機板 Raspberry Pi 4 連接示意圖

## (二)硬體儀器配備

地動儀配備如下所示：

### (1)嵌入式系統裝置：

本儀器所使用之嵌入式系統裝置，其電腦選用樹莓派 Raspberry Pi 4 Model B(如圖 2-4)。

### (2)ADS1253 高解析 AD/DA 轉換模組

本系統於地動儀資料擷取部分採用德州儀器 (Texas Instruments, TI) ADS1256 高解析度類比-數位轉換器 (Analog-to-Digital Converter, ADC)(如圖 2-12)。該晶片為 24 位元  $\Delta$ - $\Sigma$  (Delta-Sigma)架構之高精度轉換器，具備低雜訊、高解析度、低漂移與多通道輸入等特性，適合用於地震與崩塌地振動監測、結構健康監測等需要長期穩定量測之應用。

ADS1256 內建 8 組多工輸入通道（可組成 4 組差動輸入），支援最高 30 kSPS 的取樣速率。透過 SPI 介面可與樹莓派(Raspberry Pi)其他微控制器高速通訊，將 SM-4 地震動速度計輸出的毫伏級類比訊號轉換為高精度數位資料。經適當放大與濾波後，可進行振動頻譜分析、峰值偵測及相對位移推估。

在本研究之監測系統中，ADS1256 模組負責整合 EPSON M-A352

三軸加速度計與 SM-4 震動速度計(Geophone)等感測器，以 200 Hz 的高頻取樣率同步記錄各軸向地動反應，並配合多執行緒資料擷取程式進行即時濾波、突波排除與事件觸發，確保資料之即時性與可靠性。

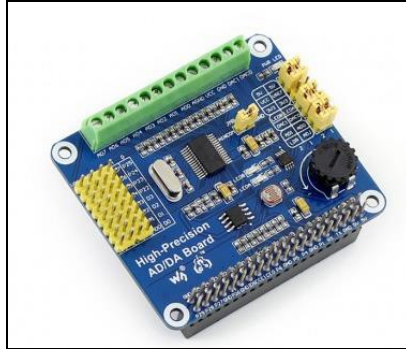


圖 2-12 ADS1253 高解析 AD/DA 轉換模組示意圖

### (3)Epson 震動感測器

本團隊採用之振動(地震)感測器偵測崩塌或地震造成坡地災害時的振動分析。崩塌地或坡地工程結構的安全監測，需提供可靠性、即時性、節能性、經濟性功能，應用多元監測方案，提供 24 小時之監測數據與告警機制。

本計畫規劃加值一套監測系統將整合日本製 EPSON M-A 系列三軸加速度計來記錄現地振動監測，多一種監測儀器試驗與驗證。此儀器不僅可有效即時呈現地震過程的振動資訊，並可將量測的加速度資料計算位移歷時反應。在訊號分析處理方便，本計畫亦將採用頻譜分析方法以增進安全監測的相對位移資料的正確性與可靠性。EPSON 三軸加速度計是一款高精度的地震監測儀，且僅需 5V 供電，可作為簡易且準確的物聯網長期監測系統，可實現更精準的數據分析和更廣泛的應用，包括地震地面加速度與位移的記錄。EPSON 三軸加速度計擁有最新的雙音叉石英振盪器技術，其優點為 Low-noise 與高穩定性的三軸加速度計。透過共振頻率變化檢測實現高穩定性和高



解析度，獨特的數位頻率檢測方法可實現高精度和寬頻加速度檢測且方便的濾波器補償、算術處理。

EPSON 三軸加速度計（規格如表 2-4）是一款高精度的地震監測儀，可實現更精準的數據分析和更廣泛的應用，包括地震地面加速度與位移的記錄。EPSON 三軸加速度計擁有最新的雙音叉石英振盪器技術，其優點為 Low-noise 與高穩定性的三軸加速度計。透過共振頻率變化檢測實現高穩定性和高解析度，獨特的數位頻率檢測方法可實現高精度和寬頻加速度檢測且方便的濾波器補償、算術處理。

**表 2-4 EPSON 三軸向加速度計規格表**

| Product Name                      | M-A352AD                                |
|-----------------------------------|-----------------------------------------|
| Size                              | 48 x 24 x 16 mm                         |
| Weight                            | 25 grams                                |
| Noise Density                     | 0.2 $\mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,rms |
| Output Range                      | $\pm 15 \text{ G}$                      |
| Resolution                        | 0.06 $\mu\text{G}/\text{LSB}$           |
| Bandwidth                         | 460 Hz (Max.)                           |
| Data Output Rate                  | 1000 Sps (Max.)                         |
| Shock Survivability               | 1,000 G                                 |
| Digital Serial Interface          | SPI/UART                                |
| Operating Temperature Range       | -30 to +85 °C                           |
| Power Consumption                 | 13.2 mA (typ.) @3.3V                    |
| Output Mode Selection (each axis) | Acceleration, Tilt Angle                |

另一方面，本 EPSON 感測器亦可放大震波展示以及相關頻譜 (Spectra)大小與質點運動物理量(Particle motion)之圖形展示，如下圖

2-13 所示。地震監測模組可客製化設計，可將發生地震事件或崩塌造成振動的三軸加速度之位移、速度、加速度之資料，後續作為崩塌地震時位移估測分析與告警機制加值之應用。

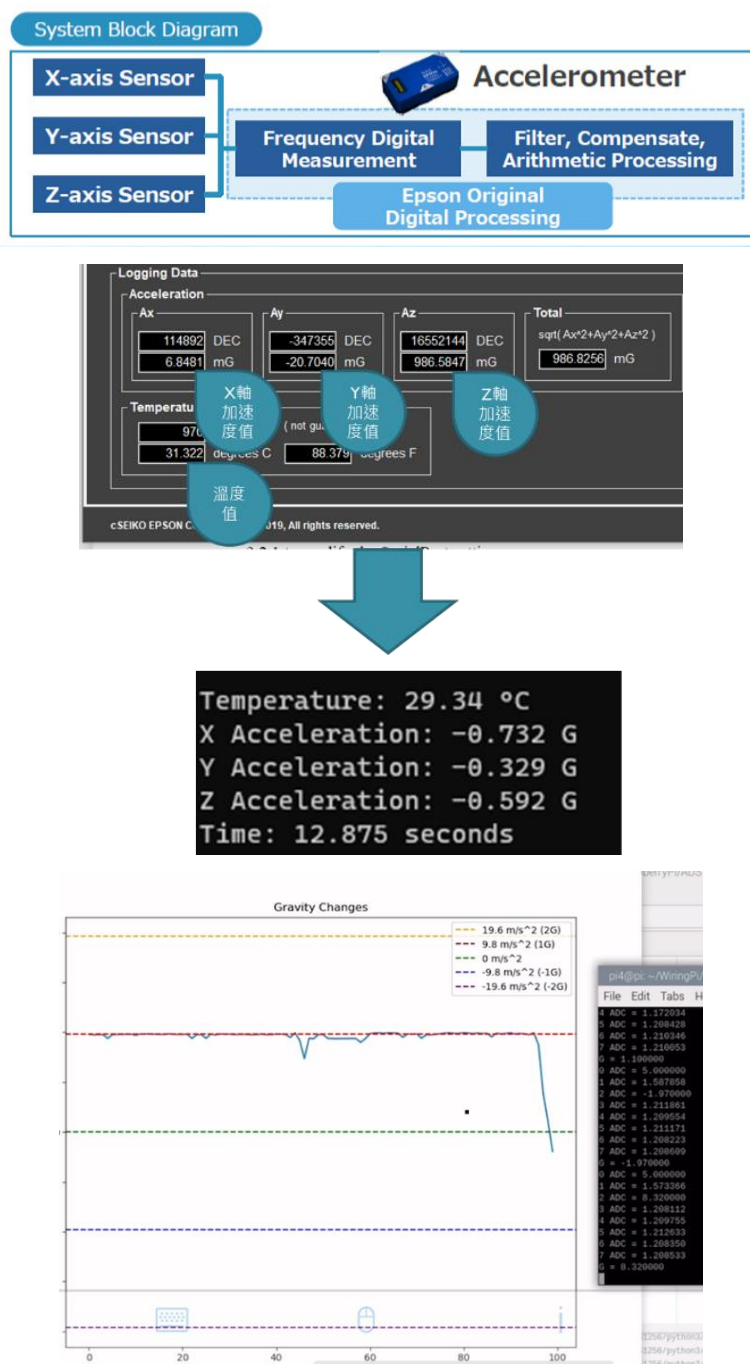


圖 2-13 EPSON 感測器監測擷取即時資料

整體系統架構具備即時性、模組化、可攜性與經濟性等優勢，不僅可作為災害發生前兆之預警監測工具，亦具備擴充至多點部署與智

慧城市防災應用的潛力。其應用場域涵蓋崩塌地、邊坡、隧道口等震動敏感區域，透過自製儀器(如圖 2-14)與商規感測器(如 EPSON M-A 系列三軸加速度計)進行交叉驗證與實地測試，可有效提升監測系統整體之穩定性與解析度，建構具即時反應與事件回溯能力之智慧型震動監測平台。

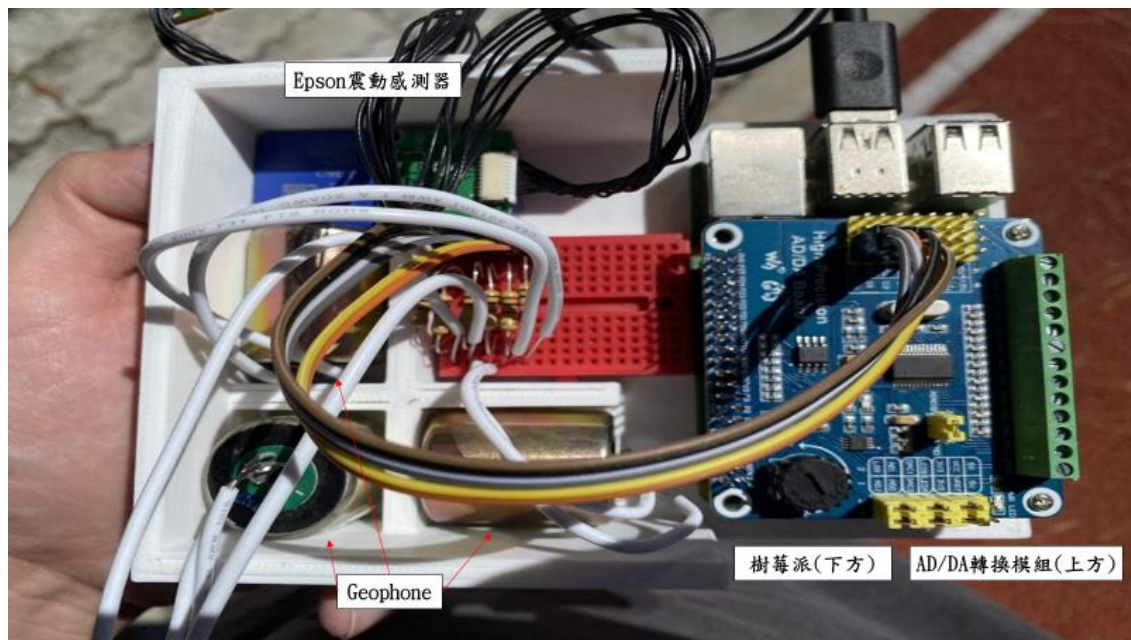


圖 2-14 自製地震儀感測器配置圖

#### (4) SM-4 地震動速度計 (Geophone 10 Hz Sensor)

本團隊於地震與崩塌地振動監測系統中，除採用 EPSON M-A 系列三軸加速度計外，亦導入美國 Sensor Nederland 公司生產之 SM-4 地動速度計 (Geophone)，以量測地表或坡地結構於地震、崩塌時所產生之地動速度訊號。

此感測器具備高靈敏度、低雜訊及耐候性強等特性，特別適用於長期監測、野外部署與即時警戒系統。透過與加速度計整合，可同步獲取加速度與速度兩種物理量，進行多頻域分析與震動特性比對，提升監測數據之可靠性與準確度。

SM-4 為線圈-磁鐵式速度感測器(規格如表 2-5)，其工作原理為當外界振動使懸掛線圈相對磁場產生位移時，感應出與速度成比例之電壓訊號。該輸出訊號可直接轉換為地動速度或經積分後求得位移歷時反應，用以分析坡地在地震或崩塌事件中的運動行為。搭配 ADS1256 高解析類比數位轉換器後，可達到 200 Hz 以上的高頻取樣率，完整記錄細微振動變化。

**表 2-5 SM-4 geophone 10Hz sensor**

| Type                                       | Value                |
|--------------------------------------------|----------------------|
| Natural Frequency                          | 10 Hz $\pm$ 5 %      |
| Open Circuit Intrinsic Voltage Sensitivity | 28.8 V/m/s $\pm$ 5 % |
| Height                                     | 32 mm                |
| Diameter                                   | 25.4 mm              |
| Weight                                     | 74 g                 |

SM-4 感測器結構堅固且僅需極低功耗，適合部署於偏遠無人監測站。其 10 Hz 自然頻率設計能兼顧微弱振動與中頻地震波段之量測需求，並能配合濾波與頻譜分析方法辨識崩塌或地震事件之振動特徵。當與 EPSON 加速度計共同運作時，前者負責速度與低頻振動解析，後者則提供高頻加速度響應，形成互補式監測架構，能更全面呈現地震或坡地災害過程之地動行為，並支援即時告警與後續安全評估分析。

#### (5)樹莓派地震儀(Raspberry Shake, RS4D)

RS4D(圖 2-15)為目前普遍應用之市售儀器，具代表性，作為本計畫之主要對照基準。樹莓派地震儀所搭載的地聲感測器與加速度計詳細規格如下所示，其中圖 2-6。另振動台上之樹莓派地震儀本研究

視為驗證組儀器與資料，但其所量測到之振動資訊會存在儀器上的 microSD 卡中僅能儲存約 7 日資料，即時觀看數據和擷取資料可以至 樹莓派地震儀的官方雲端伺服器 (<https://dataview.raspberrysake.org/>，如圖 2-16、圖 2-17 所示)進行下載。故其限制較多，且操作不易，本研究開發精度更高之感測器，且儲存空間可達半年，另備份於雲端伺服器之 IoT 架構中，並可客製化符合崩塌地監測之需求，如下章節說明。



圖 2-15 樹莓派地震儀(Raspberry Shake, RS4D)示意圖

表 2-6 RS4D 之加速度計規格表(RS4D，2017)

| Parameter                                       | Value                                                  |
|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Sensor                                          | 3-component, orthogonally placed +/- 2g<br>MEMs sensor |
| Samples per second                              | 100                                                    |
| Flat Frequency Range<br>(estimate, -3dB points) | DC to 44 Hz                                            |



|                           |                                                                                                |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Poles (estimate)          | -459.56 (73 Hz, single pole low pass filter)<br>-1785.71 (284 Hz, single pole low pass filter) |
| Sensitivity (estimate)    | 3.84E+05 counts/ meter/ second squared +/-<br>10% precision                                    |
| Clip Level (estimate)     | +/-2G (21-22 m/s <sup>2</sup> peak-to-peak from 0.1 to<br>10 Hz)                               |
| Digitizer Dynamic range   | 24-bit ADC Sigma-Delta 144dB (24 bits)                                                         |
| Effective bits (estimate) | 14 bits(84 dB) from 1 to 10 Hz @ 100 sps(for<br>the entire analog to digital hardware chain)   |
| Noise Level               | 3000 $\mu$ m/s (0.3gal, 0.0003g) RMS from 1 to<br>10 Hz @ 100 sps                              |

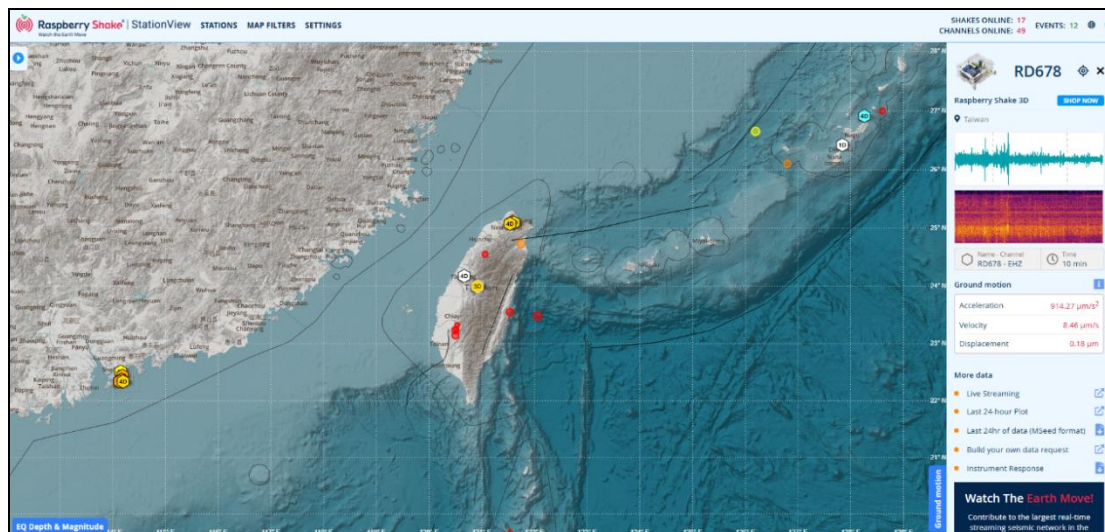


圖 2-16 樹莓派地震儀官方網站示意圖

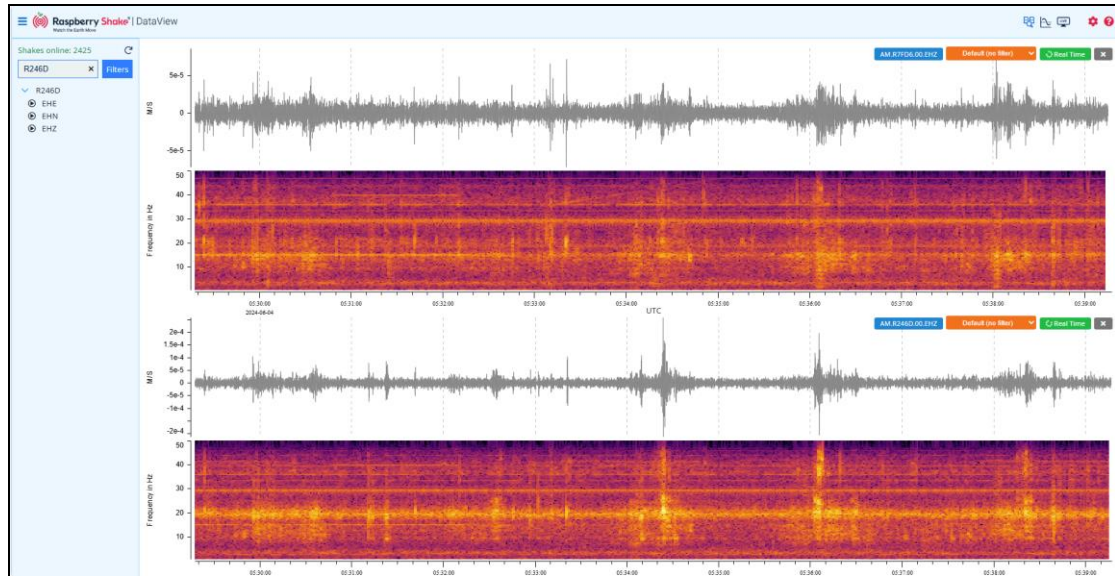


圖 2-17 樹莓派地震儀官方資料展示示意圖

## 第二節 工作執行步驟

### 一、電腦視覺變位監測儀

#### (一) 室外長時間定點觀測試驗

##### 1. 試驗簡介與目的

本計畫旨在驗證所研發的 CVDM 儀器在室外環境下進行長時間定點監測的可行性與穩定性。為此，將於國立中興大學土木環工大樓一樓外設置一個專門的監測小屋(如圖 2-18)，進行為期三週的室外監測試驗。試驗將分別以 10 公尺、20 公尺及 30 公尺三種距離進行，每個距離觀測時間為一週，24 小時不間斷監測。本計畫將收集並分析不同距離下的監測數據，進行精度與穩定性比較，以驗證儀器在不同條件下的性能表現，並為後續應用提供參考依據。

##### (1) 監測小屋

為了降低外在環境對監測儀器的干擾，本計畫設計並建造了一個特殊的監測小屋，採用鍍鋅鋼板和角鐵搭建，具備優異的耐候性和結構穩定性，有效保護監測儀器免受微風、小雨等外力影響。監測小屋還配備了通風和排水系統，確保內部環境穩定，適應多種天氣條件。其主要作用在於提供一個受控環境，減少外部干擾對儀器的影響，提高試驗數據的準確性與可信度，對研究結果的可靠性具有重要意義。監測小屋尺寸為 100\*60\*50(cm)，材質為鍍鋅鋼板、壓克力板、C 型鋼。





圖 2-18 監測小屋設置圖

## (2) 太陽能立體規標

本計畫太陽能立體規標採用六個方形規標組合，搭配太陽能模組提供穩定的可再生能源，並配備高效能的低功耗 LED 燈泡，實現 24 小時不間斷監測的能力。太陽能立體規標是一種結合太陽能模組與低功耗 LED 燈泡設計而成的創新型監測裝置，主要作為光學變位監測系統中的觀測目標物。白天利用自然光作為影像判視的光源，夜間則通過太陽能模組儲存的能量為 LED 燈泡供電(如圖 2-19)，解決了光源不足時無法連續監測的問題。邊框由 3D 列印技術製作，並設計溝槽可搭配 UAV 使用。

這一設計具有多重優勢：首先，太陽能模組的使用降低了對傳統電力系統的依賴，進一步減少運行成本；其次，低功耗 LED 燈泡能在提供足夠照明的同時降低能源消耗；最後，其設計可應對全天候的

環境條件，確保不同時間段的監測數據連續性與可靠性。



圖 2-19 規標邊框 3D 設計

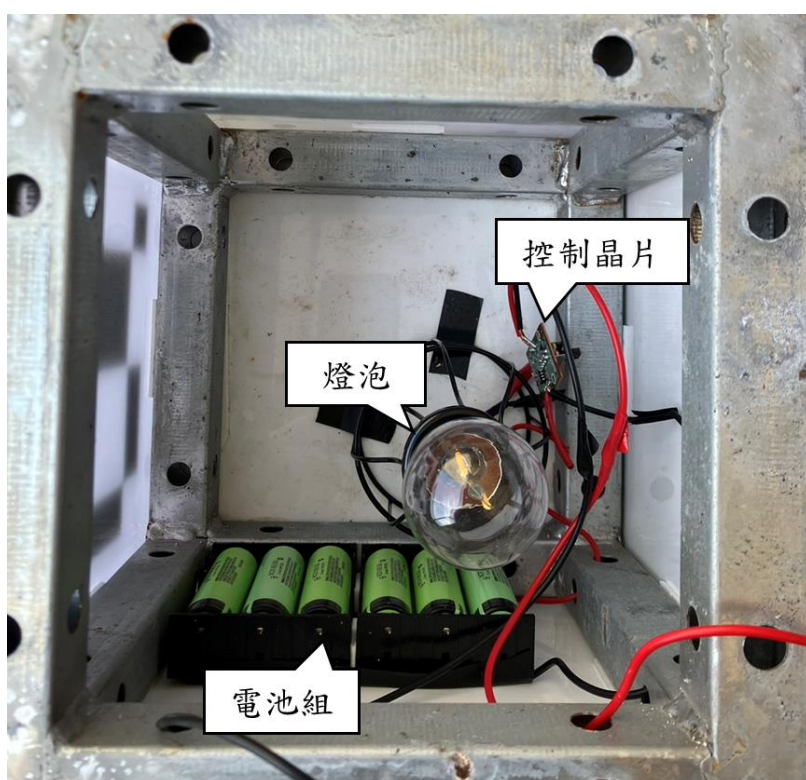


圖 2-20 規標內部配置



圖 2-21 UAV 運載規標之校園測試



圖 2-22 夜間太陽能立體規標



表 2-7 太陽能燈泡組規格表

|                        |                                            |
|------------------------|--------------------------------------------|
| Solar Panel            | Polycrystalline silicon<br>114*114*130(mm) |
| Battery                | 3.7V Li-ion                                |
| LED                    | Edison bulb,2500~3000K                     |
| Octagon iron lampshade | Φ66*80(mm)                                 |
| Wire length            | 3m                                         |
| Materials              | Iron+ABS                                   |
| Packing                | 1PC                                        |

### (3)AIoT 系統

本計畫的 AIoT 系統是一套結合人工智慧與物聯網技術的光學變位即時監測系統，設計目的是實現高精度、多功能的地變監測。CVDM 系統核心採用嵌入式樹莓派(Raspberry Pi)作為控制中心，搭配高畫質相機模組(Raspberry Pi High Quality Camera)和光學單筒望遠鏡頭，透過人工智慧與電腦視覺技術對現場標定點進行自動判視。該系統支持即時判讀監測目標的 XYZ 三軸變位，並能透過 5G 傳輸將數據即時上傳至雲端平台進行展示和存儲。

此系統運行過程中，通過 Python 腳本實現自動調整攝像距離、焦距與光圈，並利用 Chessboard.py 程式自動解算相對位移數據，生成符合比對格式的數據檔案，確保長時間監測的一致性與準確性。每日自動執行的排程程序能清除過期緩存、重置初始校準，並將最新數據以.csv 和.png 格式保存於 Raspberry Pi 存儲裝置中，透過 FTP 傳輸

至雲端伺服器。

系統分析數據以三維變位為核心，搭配即時影像記錄，實現高效的數據分析與可視化。其應用範圍涵蓋大規模崩塌潛勢區域的監測，並利用 AIoT 技術實現超遠端即時監測與數據管理，為 5G+AIoT 結合的地監測技術提供了重要支撐，具備高效、穩定及智能化的優勢，為地形變化與邊坡穩定性研究提供了全新方案。

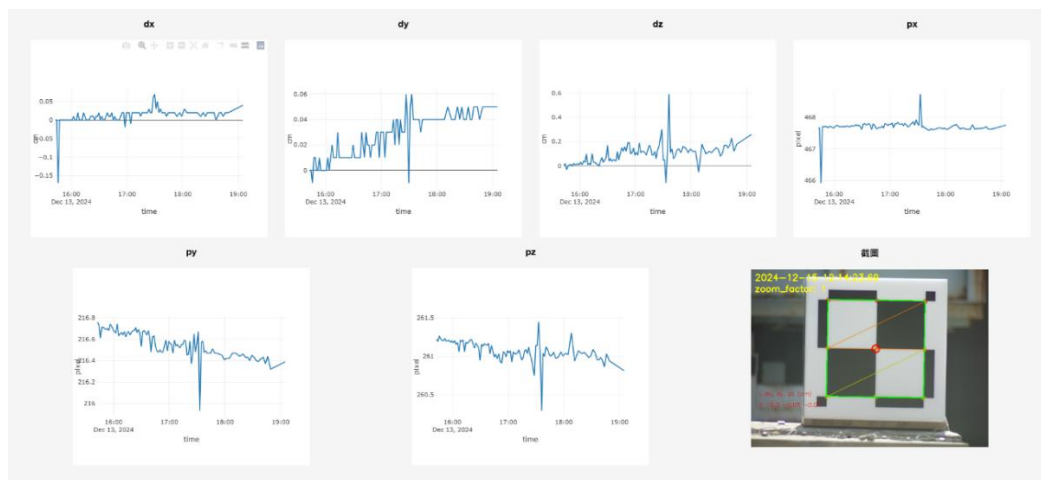


圖 2-23 AIoT 系統畫面

## 2. 試驗方法

本試驗將針對監測系統的性能進行多距離測試，分別選擇 10 公尺、20 公尺及 30 公尺三種觀測距離進行試驗，規標尺寸為 15\*15 公分。每個距離的觀測時間為期一週，採用 24 小時不間斷監測方式，確保數據的連續性與完整性。試驗過程中，系統將自動記錄並儲存監測數據，包含 XYZ 三軸距離、累積變位量，並計算位移的平均數與標準差等統計指標。後續將針對不同距離下收集的數據進行精度與穩定性的比較分析，以評估監測系統在不同距離條件下的性能表現，驗證其穩定性及適用範圍。



圖 2-24 現地裝置模擬示意圖

## (二)振動台沙箱試驗

### 1. 試驗簡介與目的

本計畫設計並實施一組振動台沙箱試驗，旨在模擬地震作用下邊坡滑動的動態行為，並驗證 CVDM 儀器在此類極端情境中的監測能力與數據準確性。試驗將於特製的沙箱內模擬不同震度條件下的地震振動，並採用電腦視覺儀器進行全程監測。儀器鏡頭分別對應坡面與振動方向平行和垂直的觀測視角，以捕捉各震度級別下邊坡滑落的細微變化及演進過程。試驗的重點在於數據的收集與分析，包含邊坡滑動過程中的位移、加速度等參數，並將這些數據與邊坡破壞加速理論進行對比驗證。同時，研究將採用希爾伯特-黃轉換（HHT）對動態數據進行深入分析，探討滑動過程中的頻率變化與非穩態特性，特別是試驗過程中是否能有效辨識滑落前的潛在預警信號。藉由試驗結果的綜合分析，本計畫期望實現驗證 CVDM 儀器在振動台沙箱試驗中的穩定性與適用性，探討不同震度條件下邊坡滑動行為的機制與模式，確認邊坡破壞加速理論在實驗場景中的適用性，並建立滑動前預警信號的分析方法與初步判斷依據，最終為地震誘發的邊坡災害監測

提供實驗依據，並為相關預警技術的開發與應用提供理論支持與技術路徑。

## 2. 試驗儀器

本試驗所需儀器為電腦視覺式變位監測儀(鏡頭使用手機鏡頭)、小型設計砂箱、樹莓派地震儀及振動台。其中砂箱部分，使用渥太華砂，規標大小為 2.25\*2.25 公分。

本試驗選用樹莓派地震儀 Raspberry Shake, RS3D(圖 2.25)是一款基於 Raspberry Pi 的高效、低成本地震檢測儀器，能記錄三維地震波（縱波、橫波和面波），配備三分量地震感測器，可檢測 X、Y、Z 三個方向的振動，能記錄三維地震波（縱波、橫波和面波），結合 Raspberry Pi 的易用性和 Shake OS 系統，能通過本地或遠端網絡操作。下表 2-8 為 RS3D 的地聲感測器規格表。



圖 2-25 樹莓派地震儀(Raspberry Shake, RS3D)示意圖

表 2-8 RS3D 之地聲感測器規格表(RS3D，2017)

| Parameter | Value                                                                                                                  |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Type      | 3-component, orthogonally placed 4.5 Hz (electronically extended down to 2 seconds) Sunfull PS-4.5B geophones, 375 Ohm |

|                                                 |                                                                                                                                                 |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Samples per second                              | 100                                                                                                                                             |
| Bandwidth<br>(estimate)                         | -3dB points at 0.7 to 39 Hz                                                                                                                     |
| Poles (estimate,<br>radians/ second)            | -1 (0.16 Hz, single pole high pass filter)<br>-3.03 x2 (0.48 Hz, double pole high pass filter)<br>-666.67 (106 Hz, single pole low pass filter) |
| Sensitivity<br>(estimate)                       | 3.60E+08 counts/ meter/ second +/- 10% precision                                                                                                |
| Clip Level<br>(estimate)                        | +/- 8,388,608 counts (24-bits)                                                                                                                  |
| Minimum<br>Detection<br>Threshold<br>(estimate) | 0.03 $\mu\text{m/s}$ RMS from 1 to 20 Hz @ 100 sps                                                                                              |
| Digitizer Dynamic<br>range                      | 24-bit ADC Sigma-Delta 144dB (24 bits)                                                                                                          |
| Effective bits<br>(estimate)                    | 21 bits (124 dB) from 1 to 20 Hz @ 100 sps (for the entire analog to digital hardware chain).                                                   |

本試驗使用的振動台為 QUANSER 的 SHAKE TABLE II (圖 2-26)，這是一款單軸振動台，適合進行結構動力學、控制、減震和地震工程相關試驗。該振動台具備高解析度編碼器，能實現精準定位，操作簡便且維護成本低，是一款高效實用的試驗設備。下表 2-9 為 SHAKE TABLE II 的規格表。



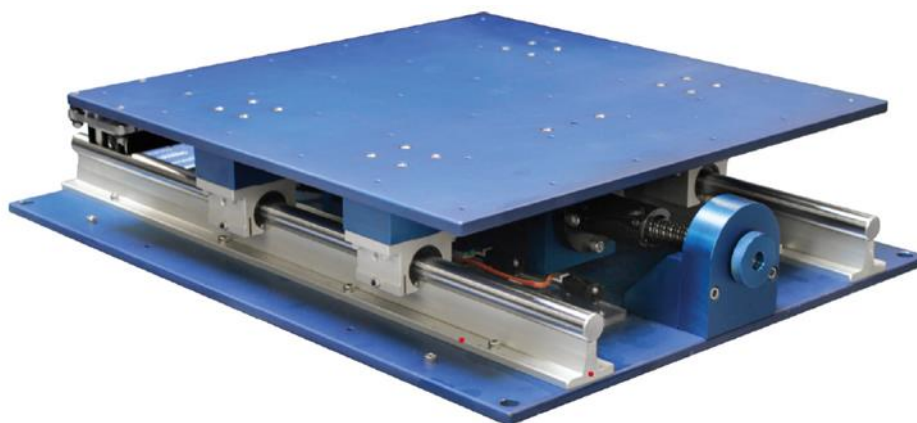


圖 2-26 SHAKE TABLE II 振動台(QUANSER, 2019)

表 2-9 SHAKE TABLE II 規格表(QUANSER, 2019)

|                   |                       |
|-------------------|-----------------------|
| 尺寸(長×寬×高)         | 61 cm × 46 cm × 13 cm |
| 總重量               | 27.2 kg               |
| 載重板面積(長×寬)        | 46 cm × 46 cm         |
| 最大位移量             | ±7.62 cm              |
| 加速度 2.5 g 時的最大載重  | 7.5 kg                |
| 載重 7.5 kg 時的最大加速度 | 2.5 g                 |
| 載重 7.5 kg 時的最高速度  | 0.665 m/s             |

### 3. 試驗方法

本試驗於砂箱內製作一高 12.5 公分、長 24 公分、斜度為 27.5 度的斜坡，並將砂箱與地震儀安置於振動台上(如圖 2-27)。振動台的振幅設定為 1 公分，並根據台灣地震震度分級調整加速度與頻率，模擬不同震度級別的地震情境。

試驗中，使用電腦視覺式變位監測儀進行變位量測，鏡頭的觀測視角分別設定為與坡面振動方向平行和垂直，以捕捉各震度級別下邊

坡滑落的細微變化及演進過程。試驗重點在於收集和分析數據，包含邊坡滑動過程中的位移、加速度等參數，並將所取得的數據與邊坡破壞加速理論進行對比驗證。下表 2-10 為振動台參數設定表。

量測過程中，將電腦視覺式變位監測儀所得的 X 軸向、Y 軸向和 Z 軸向累積變位量進行比較，以初步了解地表變位的分布情況，辨識畫面如圖 2-28。接著，將累積變位量換算成速度(單位：cm/s)，並對其進行變位與振動分析。本計畫後續將針對坡面垂直與平行振動方向，在不同震度條件下進行數據分析，以探索振動頻率與能量分布的特徵，並尋找潛在的不穩定現象。

數據分析部分使用 MATLAB 軟體進行分析，將結果視覺化並進一步探討地表振動訊號的特性及其與邊坡滑落的關聯性。本試驗的結果將用於驗證邊坡破壞加速理論，並為地震引發邊坡災害的預警與評估提供參考依據。

表 2-10 振動台參數設定表

| 振幅(cm) | 加速度(gal) | 頻率(Hz) |
|--------|----------|--------|
| 1      | 0.8      | 0.142  |
| 1      | 2.5      | 0.252  |
| 1      | 8        | 0.450  |
| 1      | 25       | 0.796  |
| 1      | 80       | 1.424  |
| 1      | 140      | 1.814  |

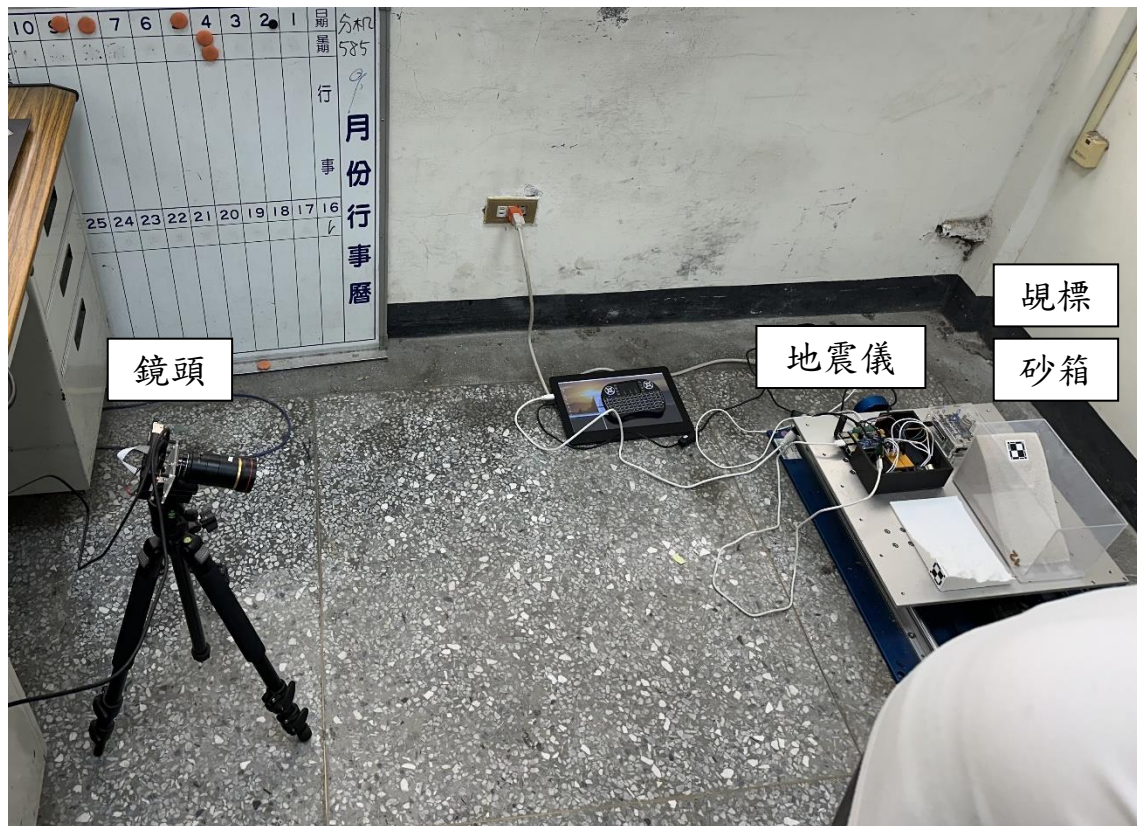


圖 2-27 砂箱與地震儀安置於振動台示意圖

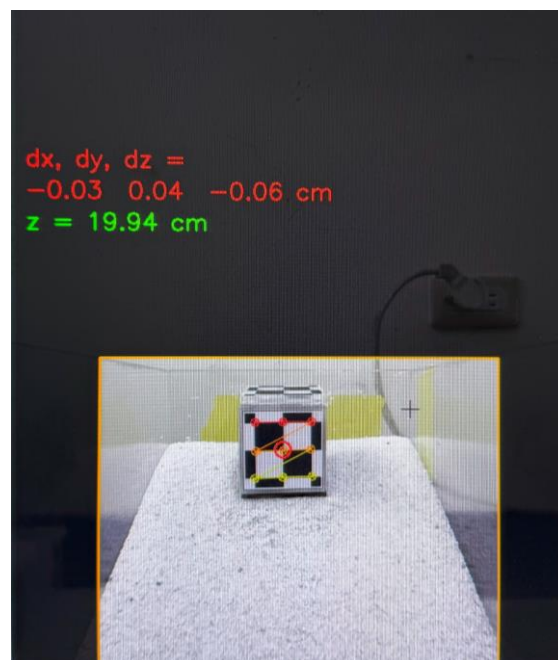


圖 2-28 電腦視覺式變位辨識示意圖

## 二、自製地動儀室內試驗

### (一)振動台試驗

本試驗所使用上述相同之振動台(SHAKE TABLE II)，它是一款單軸的振動台。適合用於結構動力、控制、減震、回饋控制等與結構、地震和機械工程相關的試驗。SHAKE TABLE II 使用高解析度的編碼器以達到精準定位，且操作容易，並只需要較低的維護成本，下表 2-11 為自製地震儀硬體設備。

表 2-11 自製地震儀硬體設備

|                |                    |
|----------------|--------------------|
| Geophone       | XYZ 軸三顆            |
| Epson 高精度震動感測器 | 一顆 XYZ 軸三方向        |
| 樹莓派            | 一個 Raspberry Pi 4B |
| 高精度 AD/DA 擴展版  | 一個 8 通道 24 位 ADC   |

在振動台試驗中，將 Raspberry Shake(RS4D)地震儀（Geophone 一軸加 MEMS 三軸加速度計）、高精度震動感測器（一次讀取三顆 EPSON 加速度計）、自製地震儀(Geophone 三軸加 EPSON 三軸加速度計)共同固定於振動平台上(如圖 2-29)，振動台之振幅設定為 1 cm，並依據台灣地震震度分級(如表 2-12 所示)進行加速度與頻率之設定，參數設定如下表 2-13 所示，且每一種加速度振動歷時為 120 秒，並去掉頭尾不穩定的各 30 秒，取中斷的 60 秒時間進行分析，輸入加速度由公式  $a=4\pi^2 f^2 A$  計算，其中 A 為振幅（1 cm），f 為輸入頻率。各儀器同步記錄三軸加速度波形，並進行頻率響應與振幅特徵之比較分析，驗證自製地震儀在動態環境下之輸出穩定性與頻率解析能力。

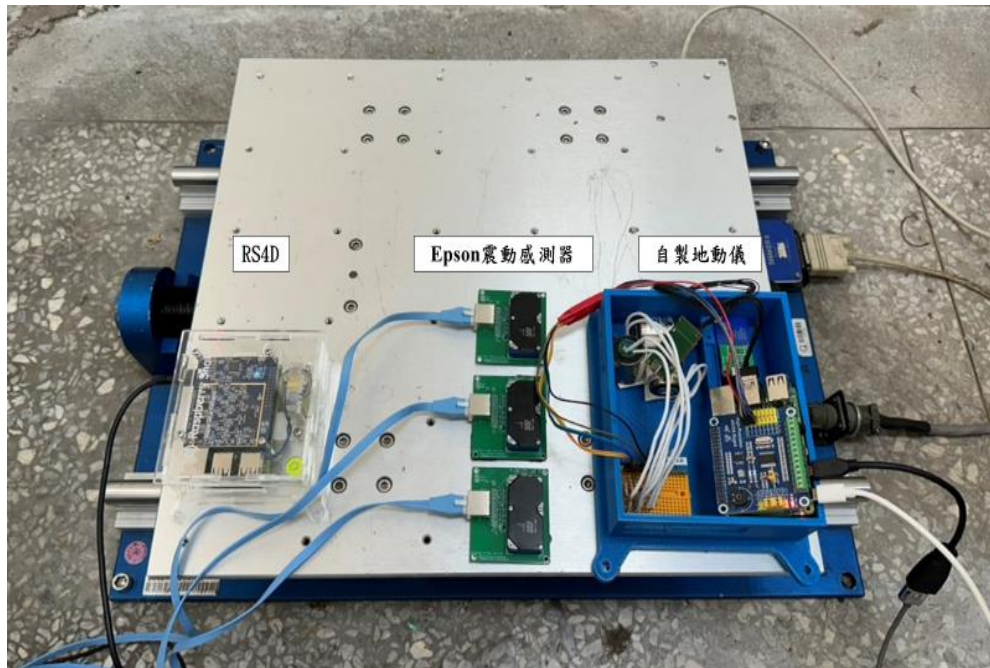


圖 2-29 振動台實驗示意圖

表 2-12 地震震度與加速度關係表

| 計算震度<br>階級                    | 0級   | 1級          | 2級          | 3級         | 4級        | 5弱         | 5強          | 6弱          | 6強          | 7級   |
|-------------------------------|------|-------------|-------------|------------|-----------|------------|-------------|-------------|-------------|------|
| PGA<br>(cm/sec <sup>2</sup> ) | <0.8 | 0.8~<br>2.5 | 2.5~<br>8.0 | 8.0~<br>25 | 25~<br>80 | 80~<br>140 | 140~<br>250 | 250~<br>440 | 440~<br>800 | >800 |

| 計算震度<br>階級      | 0級   | 1級          | 2級          | 3級          | 4級         | 5弱        | 5強        | 6弱        | 6強         | 7級   |
|-----------------|------|-------------|-------------|-------------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|------|
| PGV<br>(cm/sec) | <0.2 | 0.2~<br>0.7 | 0.7~<br>1.9 | 1.9~<br>5.7 | 5.7~<br>15 | 15~<br>30 | 30~<br>50 | 50~<br>80 | 80~<br>140 | >140 |

表 2-13 振動台模擬地震設定表

| 代表震度 | 加速度(gal) | 頻率(Hz) |
|------|----------|--------|
| 1    | 0.8      | 0.142  |
| 2    | 2.5      | 0.252  |
| 3    | 8        | 0.450  |
| 4    | 25       | 0.796  |
| 5 弱  | 80       | 1.424  |
| 5 強  | 140      | 1.883  |



## (二)室內砂箱試驗

為模擬地震儀於實地鬆散覆土環境中的感測情境，本計畫設計砂箱覆土模擬試驗，評估自製地震儀在非裸露條件下的震動量測能力。首先，於室內空間建置一容器，內部均勻鋪填乾燥細砂，以模擬坡地鬆散土層之覆蓋特性。試驗中，將自製地震儀埋設於砂層中適當深度，確保其完全被乾砂覆蓋，同時於砂箱外部安裝一組 EPSON M-A 系列三軸加速度計作為對照儀器。兩組儀器均連接至資料擷取系統，進行同步量測。

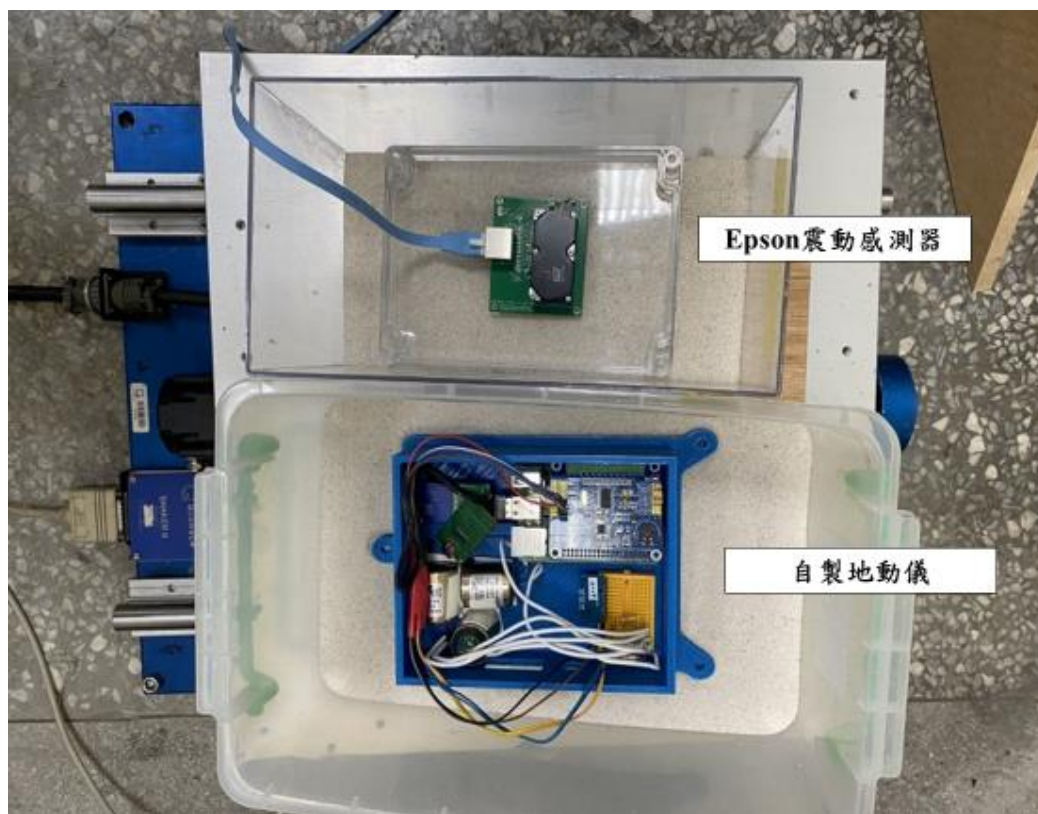


圖 2-30 自製地動儀沙箱試驗

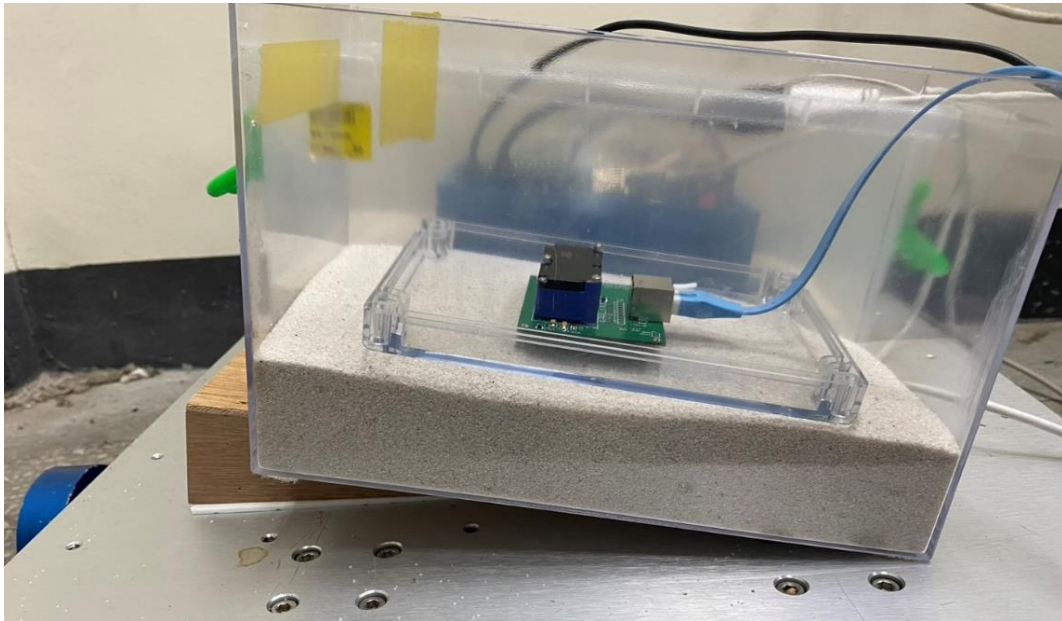


圖 2-31 砂箱邊坡模型

將儀器於六種加速度與頻率設定下，所獲取之振動資料做訊號處理。由於本試驗是固定加速度與頻率之振動，因此訊號處理之方式使用快速傅立葉轉換(FFT)。本試驗使用 MATLAB 對量測到之 X 軸向(振動台振動方向)累積變位量所換算成的速度(單位:  $\text{cm} / \text{s}$ )進行 FFT 分析，FFT 之 MATLAB 分析過程如圖 2-32 之分析示意圖所示。於中，將監測數據匯入 MATLAB 後，首先使用 detrend 函式對預分析之訊號進行處理，以去除資料中的非零均值與整體趨勢，避免產生不必要的直流分量(DC component)。若未進行去趨勢處理，將導致在快速傅立葉轉換(FFT)中於 0 Hz 處產生一強烈能量峰值，使分析結果失真或難以正確判讀。資料經 diff() 差分後，搭配時間間距換算為速度，並進一步套用 detrend 使其均值歸零。設定數據的實驗時間總長為 50 秒，依據實際時間戳重新計算總取樣點數與平均取樣率，再建立對應的時間軸。為提升 FFT 的運算效率，使用 nextpow2 將資料長度補齊

至最接近的 2 的次方，執行 zero padding 操作，確保 fft 函式能在最佳效能下運作。

最後，將 fft 函式所計算之結果進行絕對值平方處理得到功率譜 (Power Spectrum)，並進行歸一化(normalize)，使最大振動頻率對應的能量為 1，透過此頻譜圖可清楚觀察主要振動頻率成分及其相對能量分布，同時也可搭配時間波形圖檢視不同時間區段之速度變化特性，提供後續模態識別與頻率特性分析依據，如圖 2-33 所示。

```
1 clear
2 close all
3 [ox,oy,maxLength,dx,dy,dz]=textread('5S.txt','%f %f %f %f %f %f');
4 x = diff(dx); y = diff(dy); z = diff(dz);
5 x = [0; x]; y = [0; y]; z = [0; z];
6
7 [num_rows, ~] = size(dx);
8 samplerate = 60; % in Hz
9 dt = 1 / samplerate;
10
11 vx = x ./ dt; vy = y ./ dt; vz = z ./ dt;
12
13 data = vx;
14 data = detrend(data, 'constant');
15
16 N=num_rows;
17 t=[1:N]/samplerate;
18 nfft = 2^nextpow2(N); % Next power of 2 from length of y
19 Counts_freq=fft(data,nfft);
20 PS=abs(Counts_freq).^2;
21 PS=PS/max(PS); % normalize PS to its maximum
22 faxis=samplerate/2*linspace(0,1,nfft/2+1);
23
24 figure;
25 plot(faxis,PS(1:nfft/2+1));
26 xlim([0 3]);
27 set(gca, 'FontSize', 30);
28 title('Spectral Analysis (FFT)', 'FontSize', 60);
29 xlabel('Frequency (Hz)', 'FontSize', 48);
30 ylabel('Power Spectrum', 'FontSize', 48);
```

(a)

圖 2-32 FFT 程式碼



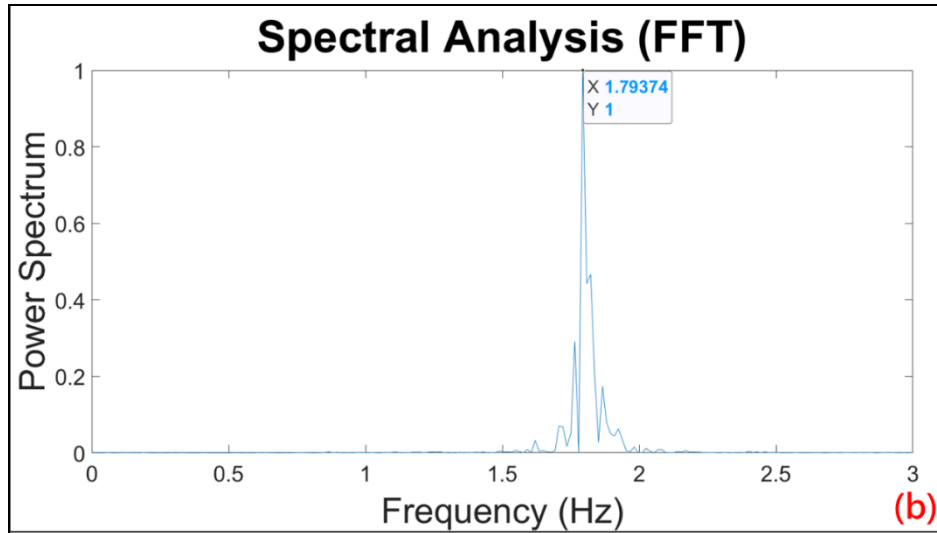


圖 2-33 FFT 分析成果示意圖

### (三) 室外長時間模擬試驗

為了驗證系統穩定性與現地監測結果的一致性，本研究亦於校內搭建一組與現地相同架構的地動儀系統(如圖 2-34、圖 2-35)。此組系統包含樹莓派主控端、ADS1256 高精度 AD/DA 轉換模組、三軸 Geophone 以及 Epson A352 三軸加速度計，配置方式與現地感測端完全一致。校內端與現地端將同步運行，以相同的取樣頻率與資料上傳機制進行長期比對。透過同時量測與資料交叉比對，可評估系統在不同環境條件下的靈敏度、穩定度與雜訊特性，並進一步校正濾波與觸發參數，確保整體監測平台在實際應用中的可靠性與準確性。



圖 2-34 校內監測小屋

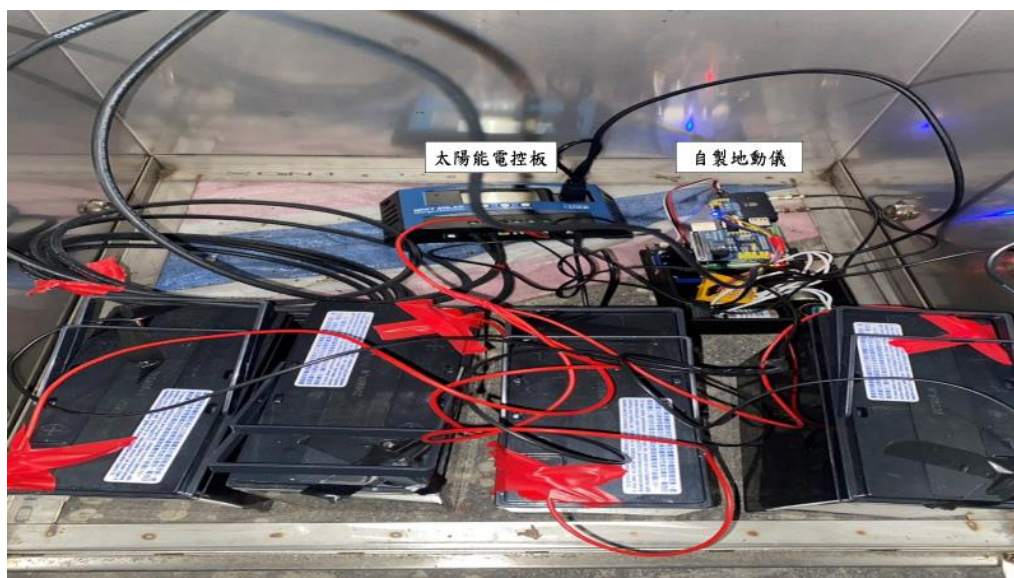


圖 2-35 校內地動儀系統

## 第三章 試驗結果與討論

### 第一節 試驗結果

#### 一、電腦視覺變位監測儀

##### (一) 室外長時間定點觀測試驗

在 10 公尺距離的監測結果中，X 軸、Y 軸和 Z 軸的平均值分別為 -0.00536 cm、-0.00207 cm 及 0.076695 cm，標準差則分別為 0.009043 cm、0.006833 cm 及 0.061819 cm。該距離下的總資料筆數為 363364 筆，資料完整性在兩倍標準差範圍內的比例分別為 99.15%、95.44% 及 95.14%，顯示 CVDM 儀器在短距離監測下具有高度穩定性和精確性。

在 20 公尺距離的監測中，X 軸、Y 軸和 Z 軸的平均值分別為 0.005909 cm、-0.02984 cm 及 1.808576 cm，標準差分別為 0.023668 cm、0.056833 cm 及 5.016844 cm。總資料筆數為 404935 筆，兩倍標準差範圍內的資料比例為 93.84%、93.96% 及 93.4%。儘管數據精度較 10 公尺有所降低，但仍顯示儀器在中距離監測下具有較好的穩定性。

在 30 公尺距離的監測結果中，X 軸、Y 軸和 Z 軸的平均值分別為 0.562884 cm、-0.52235 cm 及 6.21302 cm，標準差分別為 0.415775 cm、0.366018 cm 及 11.707051 cm。總資料筆數為 260554 筆，兩倍

標準差範圍內的資料比例為 97.87%、97.52%及 95.15%。可觀察到隨距離增加，Z 軸方向的標準差顯著增大，顯示在遠距離監測下儀器精度受環境因素的影響更加明顯。

由實驗結果得知，CVDM 儀器在 10 公尺距離的監測表現最佳，精度與穩定性均達到較高水平；在 20 公尺及 30 公尺距離的監測中，儘管數據精度略有下降，但仍具備實用價值。本試驗驗證了 CVDM 儀器在室外環境下進行長時間定點監測的能力，並指出距離與環境對監測性能的影響，為後續儀器改進及應用提供了重要參考依據。

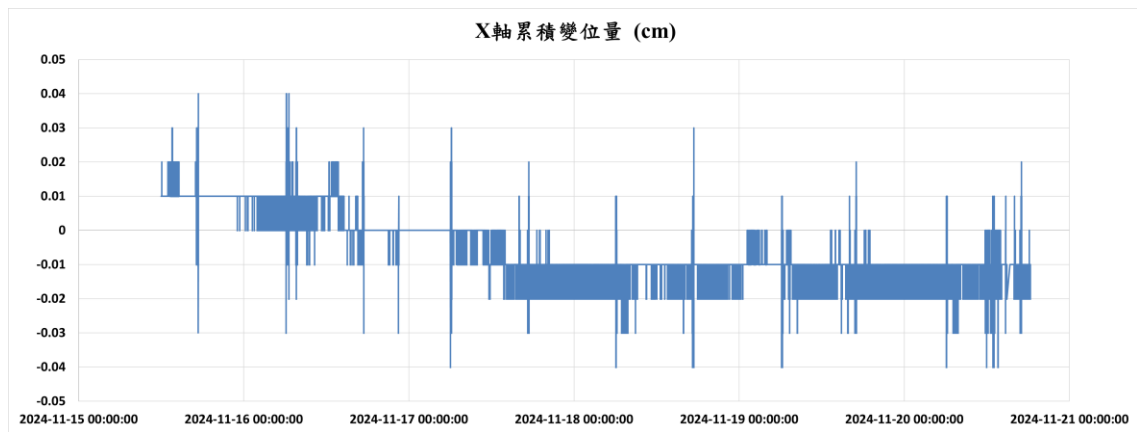


圖 3-1 10 公尺 X 軸累積變位量

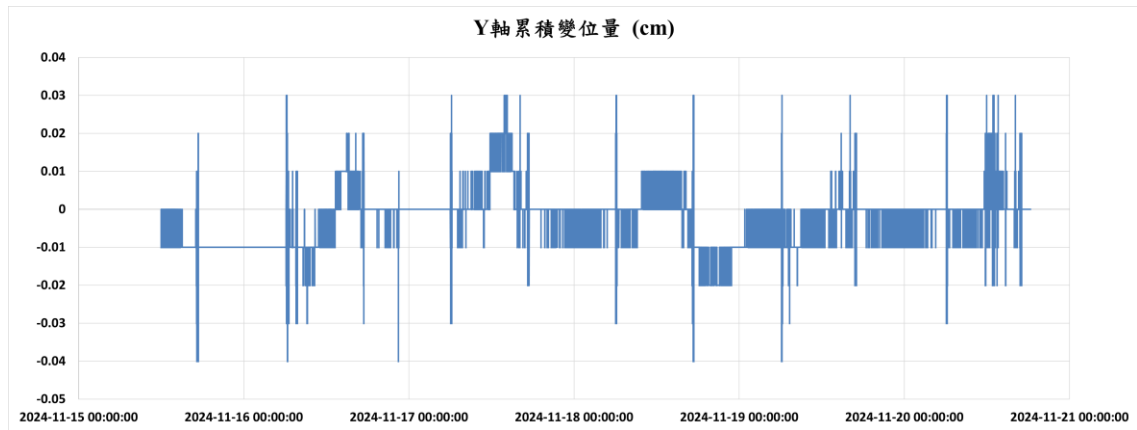


圖 3-2 10 公尺 Y 軸累積變位量

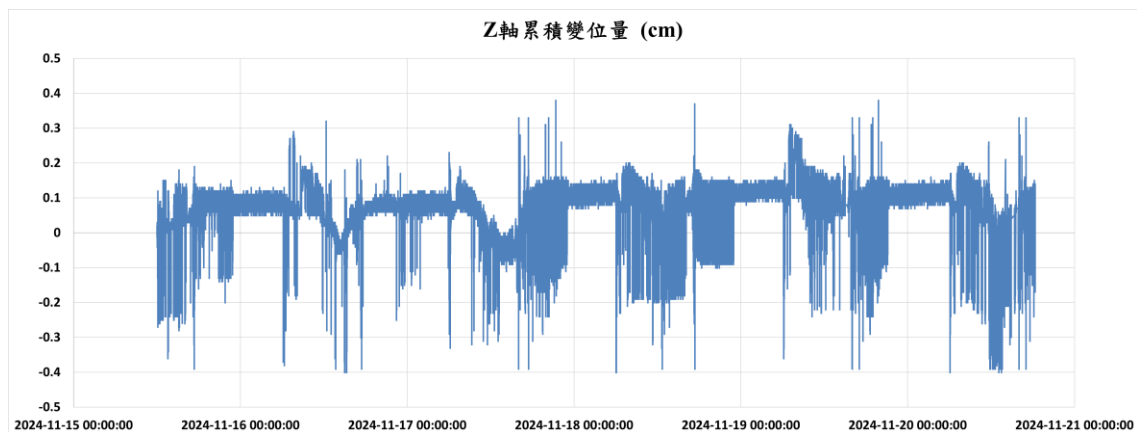


圖 3-3 10 公尺 Z 軸累積變位量

表 3-1 10 公尺之監測成果表

|                   | X 軸向     | Y 軸向     | Z 軸向     |
|-------------------|----------|----------|----------|
| 平均值(cm)           | -0.00536 | -0.00207 | 0.076695 |
| 標準差(cm)           | 0.009043 | 0.006833 | 0.061819 |
| 總資料筆數<br>(筆)      | 363364   | 363364   | 363364   |
| 兩倍標準差<br>的資料筆數(%) | 99.15    | 95.44    | 95.14    |

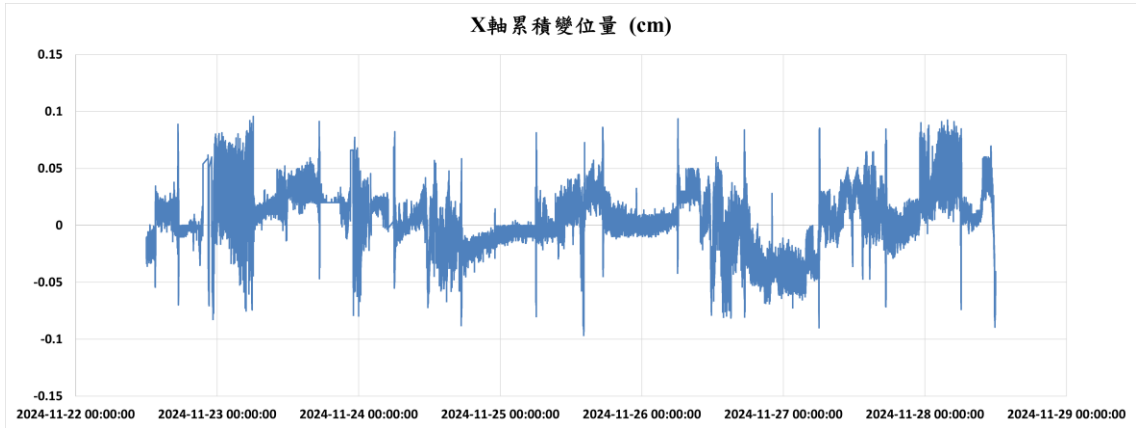


圖 3-4 20 公尺 X 軸累積變位量

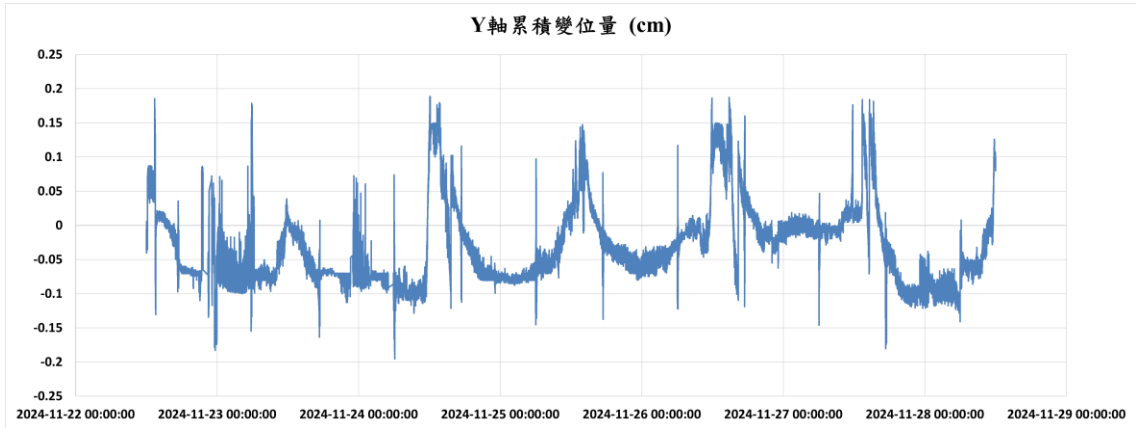


圖 3-5 20 公尺 Y 軸累積變位量

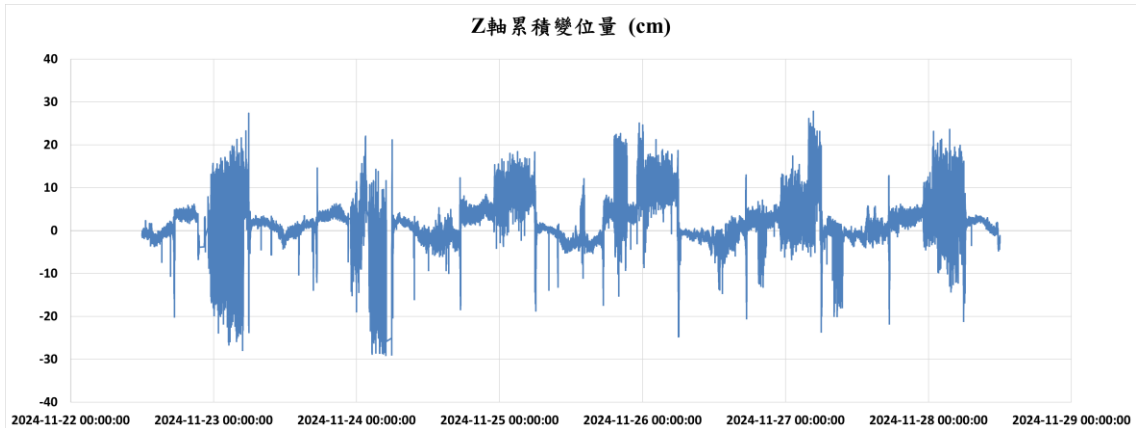


圖 3-6 20 公尺 Z 軸累積變位量

表 3-2 20 公尺之監測成果表

|                   | X 軸向     | Y 軸向     | Z 軸向     |
|-------------------|----------|----------|----------|
| 平均值(cm)           | 0.005909 | -0.02984 | 1.808576 |
| 標準差(cm)           | 0.023668 | 0.056833 | 5.016844 |
| 總資料筆數(筆)          | 404935   | 404935   | 404935   |
| 兩倍標準差<br>的資料筆數(%) | 93.84    | 93.96    | 93.4     |



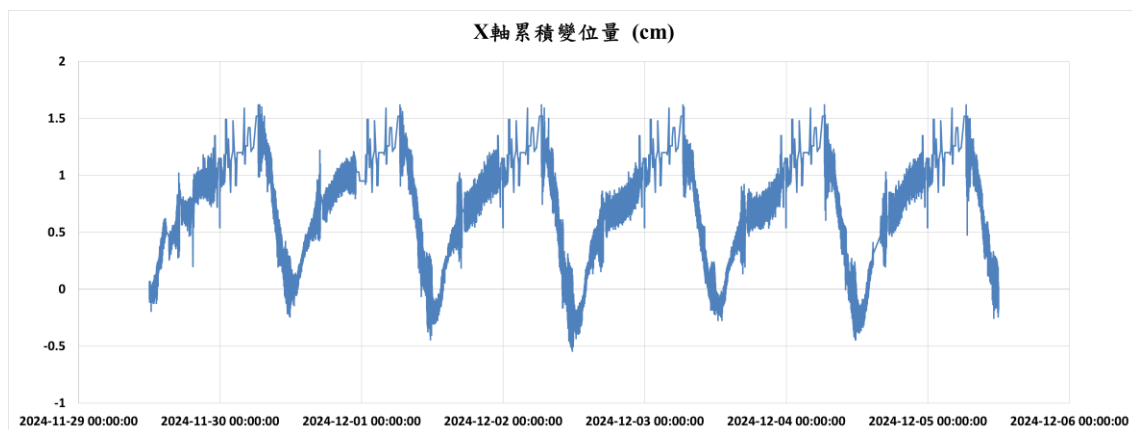


圖 3-7 30 公尺 X 軸累積變位量

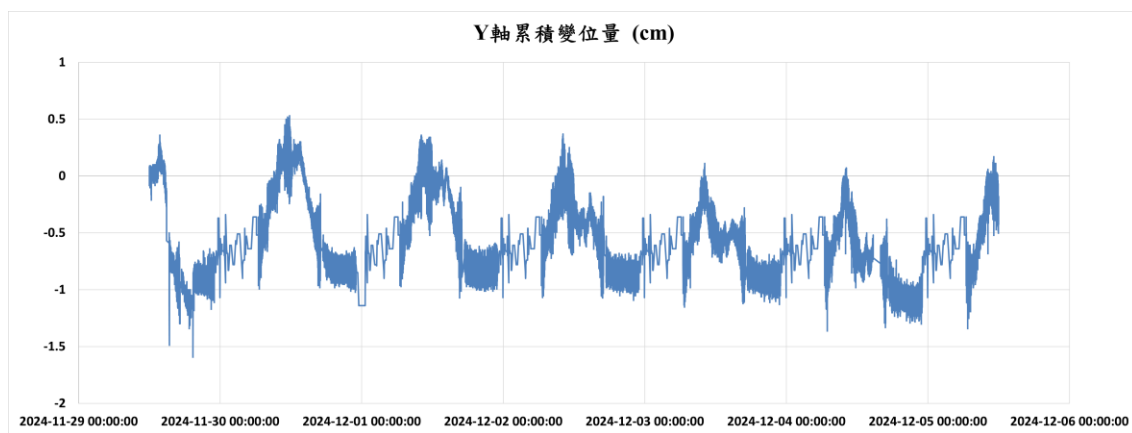


圖 3-8 30 公尺 Y 軸累積變位量

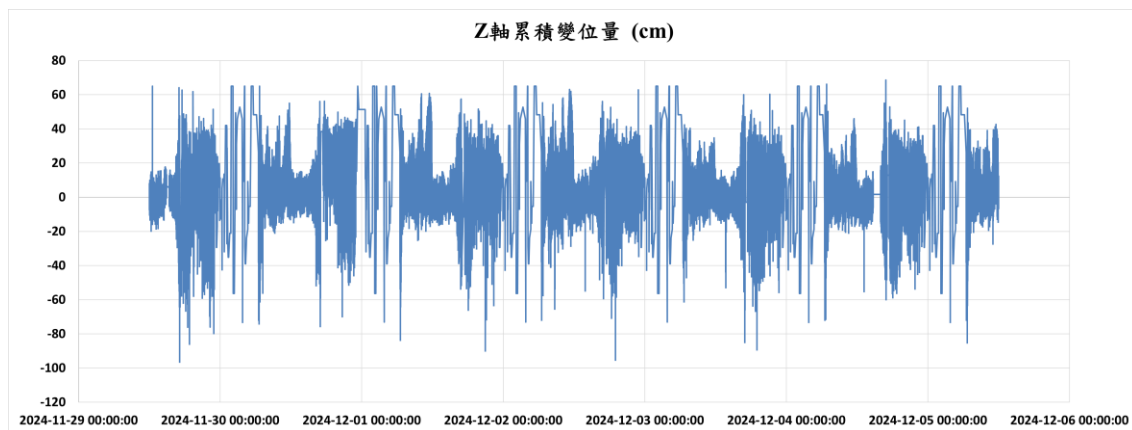


圖 3-9 30 公尺 Z 軸累積變位量

表 3-3 30 公尺之監測成果表

|                   | X 軸向     | Y 軸向     | Z 軸向     |
|-------------------|----------|----------|----------|
| 平均值(cm)           | 0.562884 | -0.52235 | 6.21302  |
| 標準差(cm)           | 0.415775 | 0.366018 | 11.70701 |
| 總資料筆數(筆)          | 260554   | 260554   | 260554   |
| 兩倍標準差<br>的資料筆數(%) | 97.87    | 97.52    | 95.15    |

## (二)現地超長距離定點觀測試驗

### 1.試驗簡介與目的

為了瞭解電腦視覺式變位監測儀於長距離情況之三軸向定點觀測穩定性，本試驗將針對不同距離，並使用不同的電腦視覺解算影像解析度，得知於各種設定下的儀器觀測穩定性。並再透過高斯濾波的平滑效果，減少因測量距離增遠而放大的 Z 軸向偏移量。

### 2.試驗方法

本試驗場址選在台中市太平區頭汴坑溪旁河堤，將覘標架設於距電腦視覺式變位監測儀 750 m 與 1000 m 遠處，其中覘標尺寸為 85 cm × 85 cm(如圖 3-10 所示)，並使用電腦視覺式變位監測儀對其進行即時判釋之定點觀測，另設定兩種解算影像解析度 1280 × 960 與 1920 ×

1440 (單位: pixel  $\times$  pixel), 再透過 FTP 將定點觀測試驗中所量測到的累積變位量(單位: cm)上傳至雲端。其中, 每種量測距離與影像解析度之設定組合, 皆進行 10 分鐘的監測。

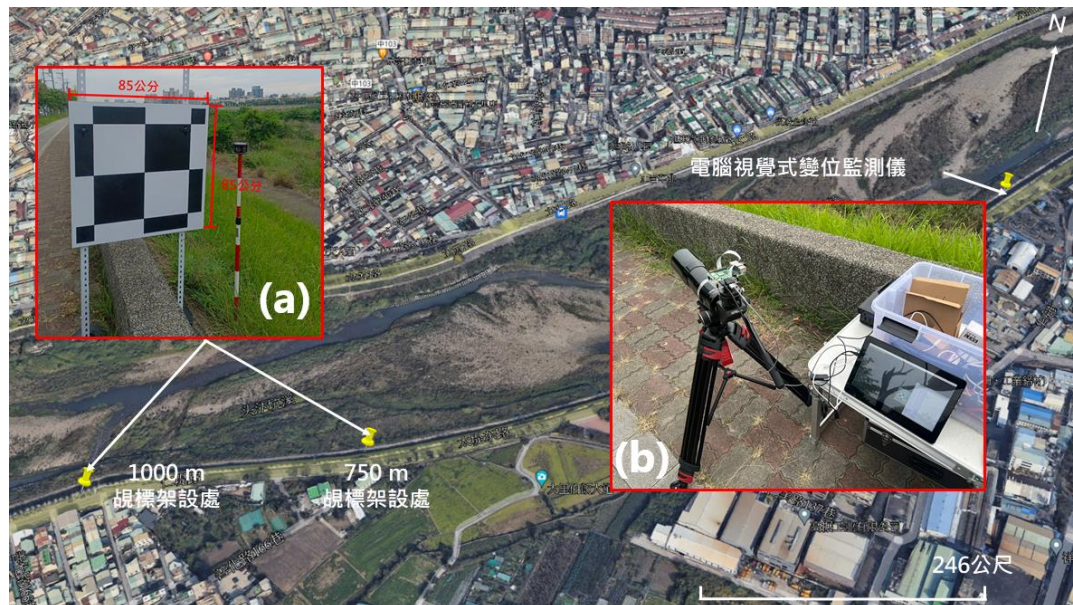


圖 3-10 長距離試驗之電腦視覺式變位監測儀與視標架設示意圖

### 3. 數據分析

於每種量測距離(750 m 與 1000 m)與解算解析度(1280  $\times$  960 與 1920  $\times$  1440, 單位為 pixel  $\times$  pixel)的設定組合下, 透過 EXCEL 分析計算電腦視覺式變位監測儀所量測到的 X 軸向、Y 軸向與 Z 軸向定點觀測數據, 並使用 Python 撰寫高斯濾波程式, 對 Z 軸向之定點觀測數據進行濾波。其中由於 Z 軸向之偏移量會隨量測距離而放大, 因此僅針對 Z 軸向監測數據進行濾波處理。高斯濾波設定如下, 濾波寬度為一分鐘, 並將  $\sigma$  值設定為 3, 觀察 Z 軸向之定點觀測數據於濾波前後, 其最大值、最小值與標準差是否更趨於穩定。

現地長距離定點觀測試驗觀測成果如圖 3-11 至圖 3-22 圖 3-22 量測距離 1000 m，解算影像解析度為  $1920 \times 1440$ (單位: pixel  $\times$  pixel) 之 Z 軸向像素變化量所示，其為原始量測之像素數據，其中於 Z 軸向之實際變位量圖中，藍線為原始電腦視覺解算值。

於各設定組合下，X 軸向與 Y 軸向所量測到的變位量，其最大值、最小值與標準差詳表 3-4 及表 3-5。當量測距離為 750 m 且解算之影像解析度為  $1280 \times 960$  與  $1920 \times 1440$ (單位: pixel  $\times$  pixel)時，X 軸向與 Y 軸向一個像素代表的實際長度為 0.63 cm 與 0.42 cm；而當量測距離為 1000 m 且解算影像解析度為  $1280 \times 960$  與  $1920 \times 1440$ (單位: pixel  $\times$  pixel)時，X 軸向與 Y 軸向一個像素代表的實際長度為 0.83 cm 與 0.56 cm。其中於監測距離為 750 m 的情況下，X 軸向與 Y 軸向像素變化量之平均標準差為 0.99 pixel，實際累積變位量之平均標準差為 0.50 cm，另所量測之最大偏移量為 2.97 cm。而當監測距離為 1000 m 的情況下，X 軸向與 Y 軸向像素變化量之平均標準差為 0.56 pixel，實際累積變位量之平均標準差為 0.37 cm，另所量測之最大偏移量為 1.51 cm。由監測資料可看出於長監測距離的情況下，電腦視覺式變位監測儀於 X 軸向與 Y 軸向之監測具有高穩定性，因此不需要再對其進行高斯濾波處理。其中，於量測距離 1000 m 的測量偏差量與標準差較 750 m 來的更小，其原因為於量測距離 1000 m 時太陽

已接近下山，於影像解算上受光影響之誤差減小。

於各設定組合下，Z 軸向所量測到的變位量，其高斯濾波前後之最大值、最小值與標準差成果詳表 3-6。當量測距離為 750 m 且解算之影像解析度為  $1280 \times 960$  與  $1920 \times 1440$ (單位: pixel  $\times$  pixel)時，Z 軸向一個像素代表的實際長度為 779.60 cm 與 525.27 cm；而當量測距離為 1000 m 且解算影像解析度為  $1280 \times 960$  與  $1920 \times 1440$ (單位: pixel  $\times$  pixel)時，Z 軸向一個像素代表的實際長度為 1385.67 cm 與 924.67 cm。其中於監測距離為 750 m 的情況下，Z 軸向像素變化量之平均標準差為 0.35 pixel，實際累積變位量之平均標準差為 226.41 cm，另所量測之最大偏移量為 885.37 cm。而當監測距離為 1000 m 的情況下，Z 軸向像素變化量之平均標準差為 0.30 pixel，實際累積變位量之平均標準差為 322.86 cm，另所量測之最大偏移量為 1118.92 cm。可以看出於原始的像素變化量觀測結果是穩定的，而實際累積變位量測量則是因測量距離遠，進而放大測量偏移量，故對其進行高斯濾波之處理。

於監測距離為 750 m 的情況下，高斯濾波後之 Z 軸向實際累積變位量之平均標準差為 108.81 cm，另最大偏移量為 406.62 cm。而當監測距離為 1000 m 的情況下，Z 軸向實際累積變位量之平均標準差為 113.04 cm，另最大偏移量為 336.07 cm。可明顯看出，相較於原始 Z

軸向監測成果，其整體測量偏差量與標準差皆變小，故可得知透過高斯濾波將使觀測結果更具穩定性及可靠性。

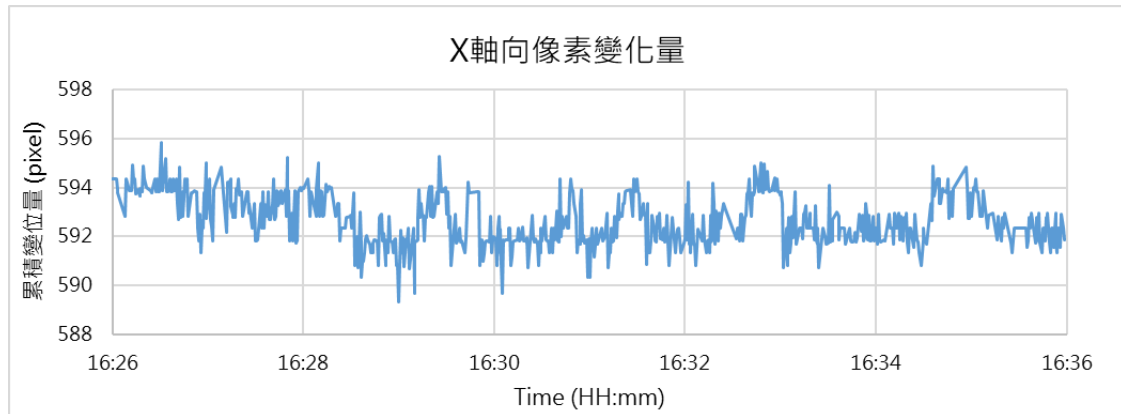


圖 3-11 量測距離 750 m，解算影像解析度為  $1280 \times 960$ (單位: pixel × pixel)之 X 軸向像素變化量

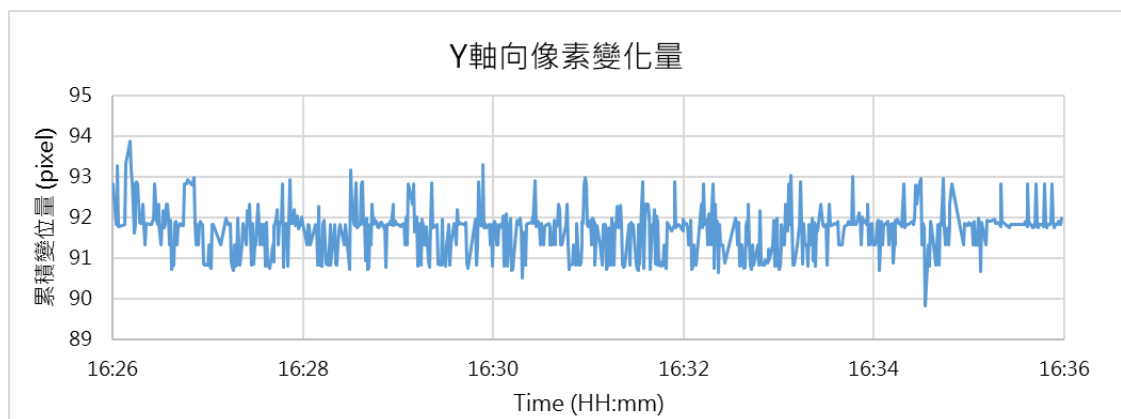


圖 3-12 量測距離 750 m，解算影像解析度為  $1280 \times 960$ (單位: pixel × pixel)之 Y 軸向像素變化量

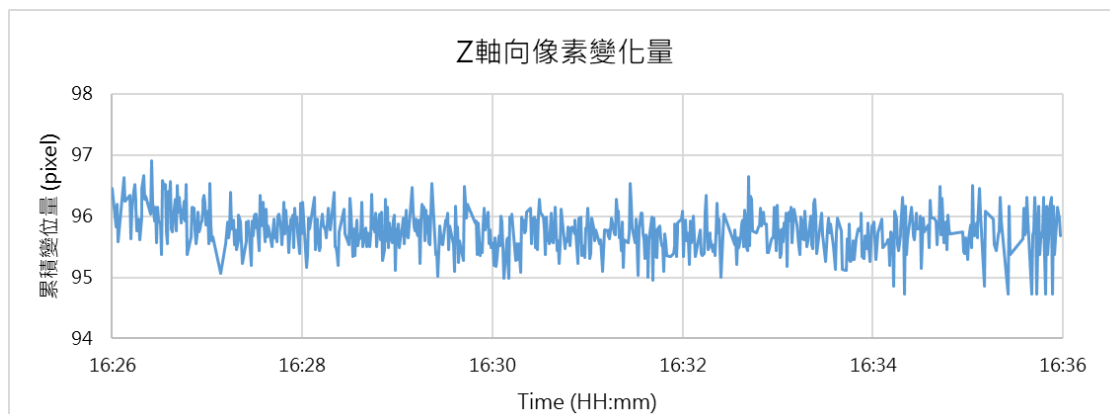


圖 3-13 量測距離 750 m，解算影像解析度為  $1280 \times 960$ (單位: pixel  $\times$  pixel)之 Z 軸向像素變化量

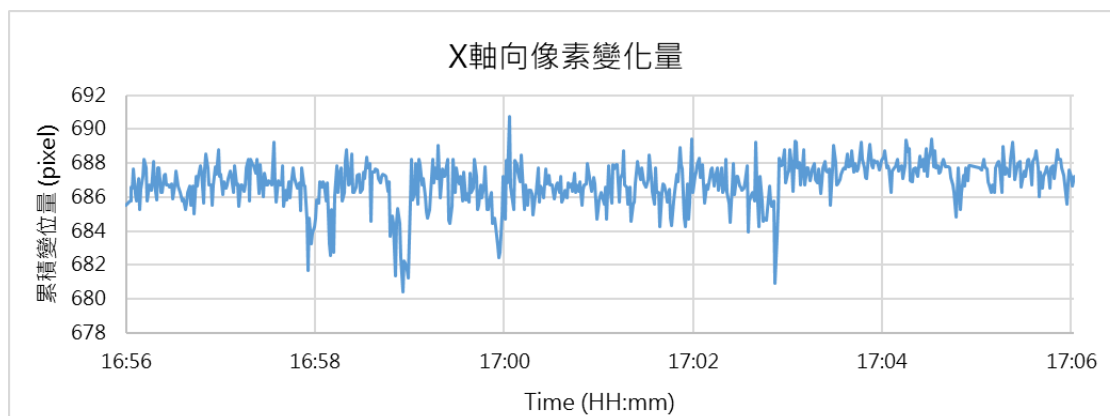


圖 3-14 量測距離 750 m，解算影像解析度為  $1920 \times 1440$ (單位: pixel  $\times$  pixel)之 X 軸向像素變化量

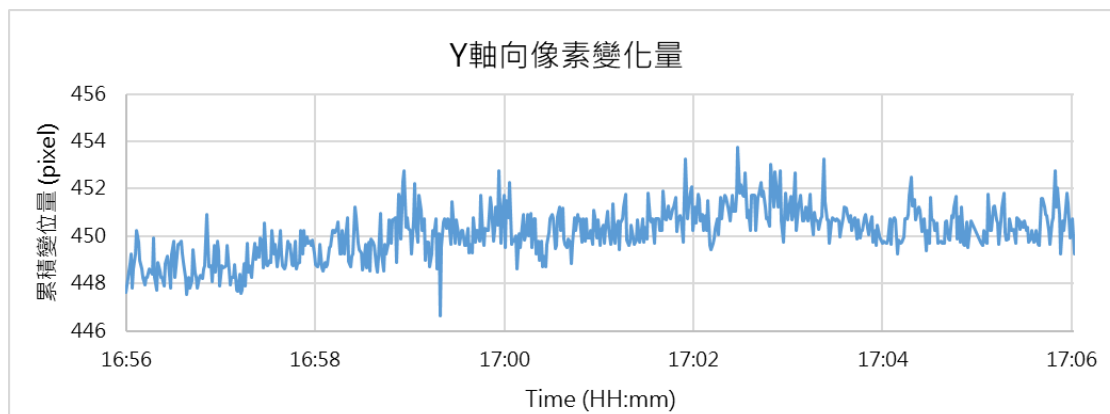


圖 3-15 量測距離 750 m，解算影像解析度為  $1920 \times 1440$ (單位: pixel  $\times$  pixel)之 Y 軸向像素變化量



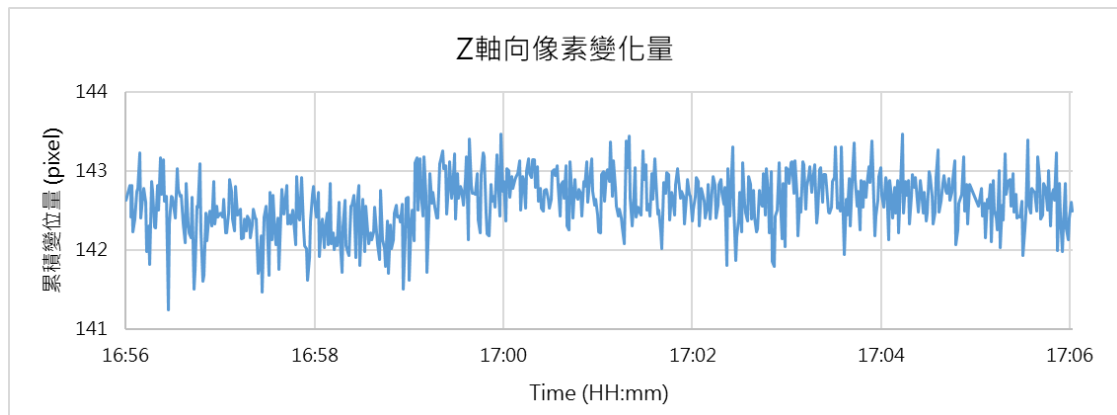


圖 3-16 量測距離 750 m，解算影像解析度為  $1920 \times 1440$ (單位: pixel  
× pixel)之 Z 軸向像素變化量

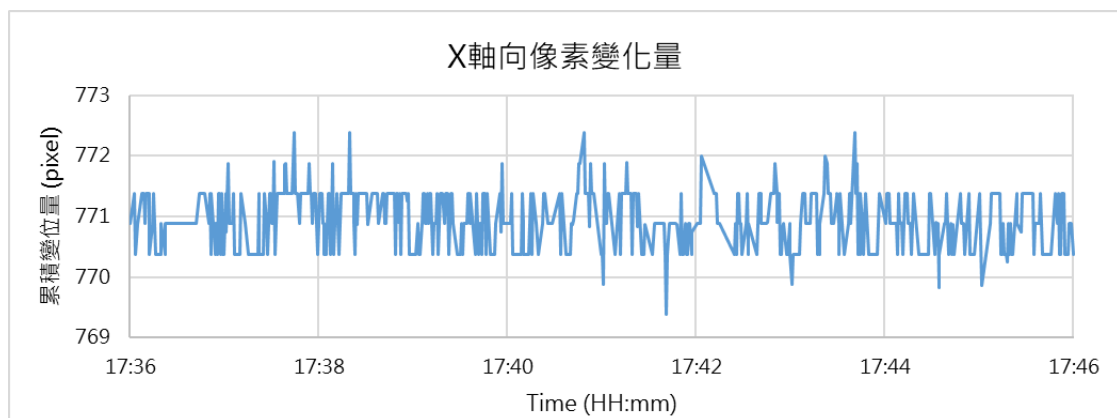


圖 3-17 量測距離 1000 m，解算影像解析度為  $1280 \times 960$ (單位: pixel  
× pixel)之 X 軸向像素變化量

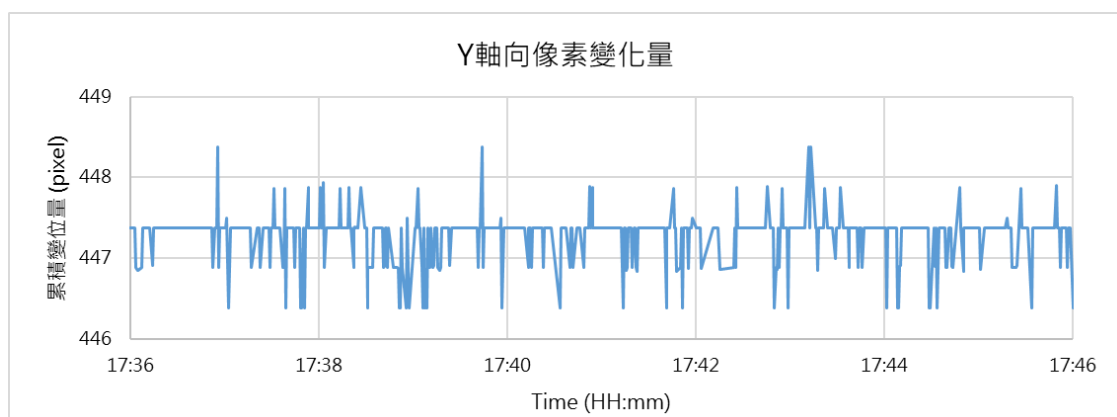


圖 3-18 量測距離 1000 m，解算影像解析度為  $1280 \times 960$ (單位: pixel  
× pixel)之 Y 軸向像素變化量

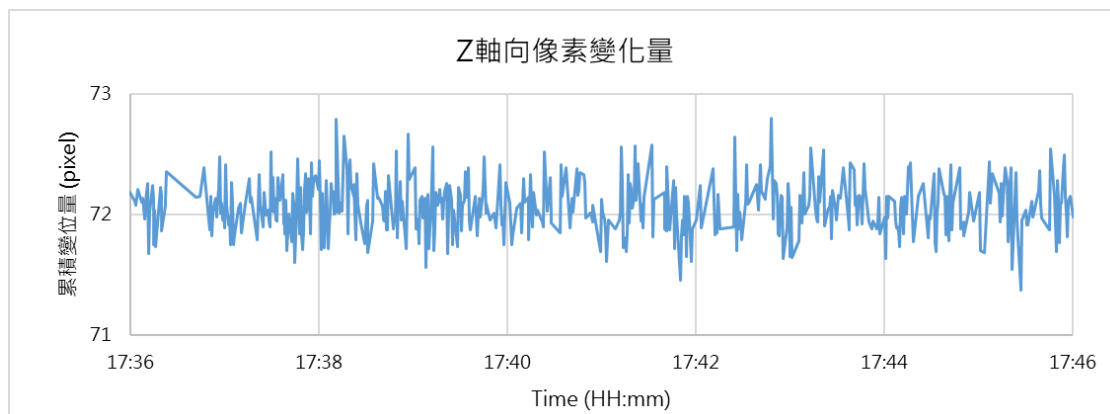


圖 3-19 量測距離 1000 m，解算影像解析度為  $1280 \times 960$ (單位: pixel  
× pixel)之 Z 軸向像素變化量

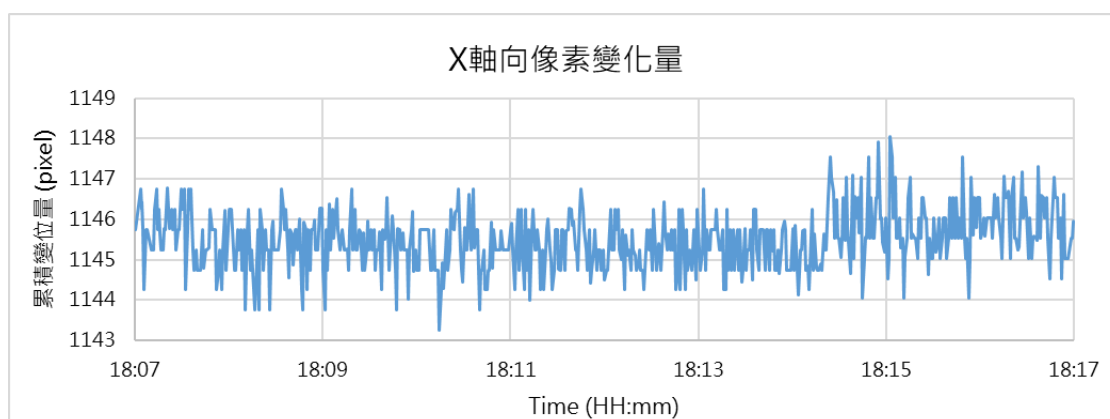


圖 3-20 量測距離 1000 m，解算影像解析度為  $1920 \times 1440$ (單位: pixel  
× pixel)之 X 軸向像素變化量

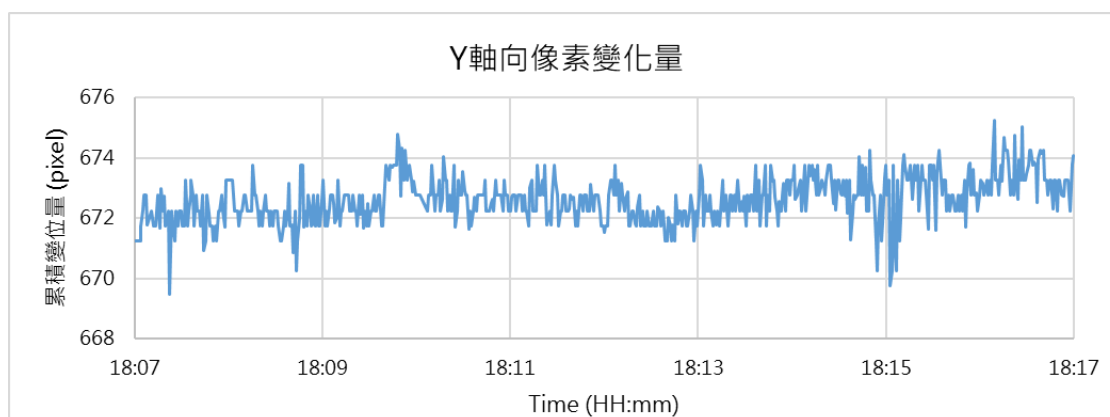


圖 3-21 量測距離 1000 m，解算影像解析度為  $1920 \times 1440$ (單位: pixel  
× pixel)之 Y 軸向像素變化量

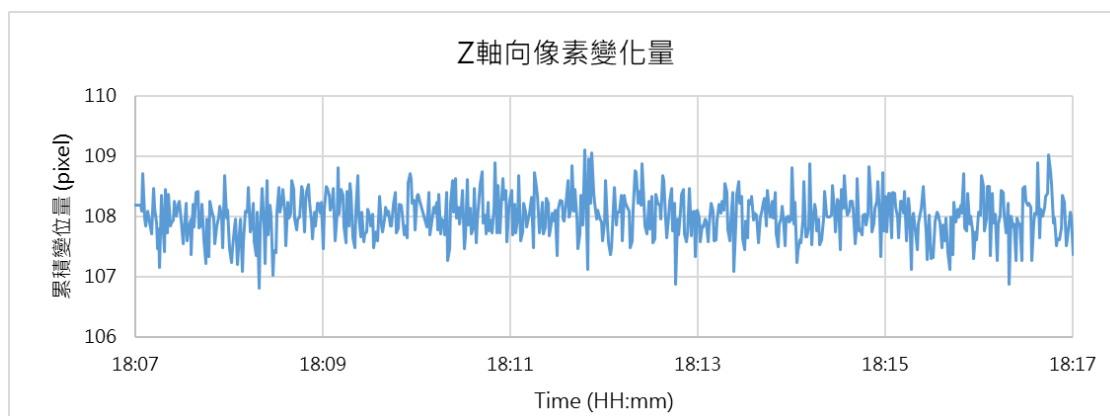


圖 3-22 量測距離 1000 m，解算影像解析度為  $1920 \times 1440$ (單位: pixel  
 $\times$  pixel)之 Z 軸向像素變化量

表 3-4 現地長距離定點觀測試驗 X 軸向、Y 軸向像素變化量

| 測<br>量<br>距<br>離<br>(m) | 解算影像<br>解析度<br>(pixel $\times$ pixel) | X 軸向位移量 (pixel) |         |         | Y 軸向位移量 (pixel) |         |         |
|-------------------------|---------------------------------------|-----------------|---------|---------|-----------------|---------|---------|
|                         |                                       | 最大<br>值         | 最小<br>值 | 標準<br>差 | 最大<br>值         | 最小<br>值 | 標準<br>差 |
| 750                     | $1280 \times 960$                     | 595.83          | 589.33  | 1.03    | 93.89           | 89.83   | 0.56    |
|                         | $1920 \times 1440$                    | 690.75          | 680.40  | 1.32    | 453.75          | 446.65  | 1.07    |
| 1000                    | $1280 \times 960$                     | 772.38          | 769.38  | 0.46    | 448.38          | 446.38  | 0.31    |
|                         | $1920 \times 1440$                    | 1148.04         | 1143.25 | 0.72    | 675.23          | 669.47  | 0.76    |

表 3-5 現地長距離定點觀測試驗 X 軸向、Y 軸向實際累積變位量

| 測量<br>距離<br>(m) | 解算影像解析<br>度<br>(pixel × pixel) | X 軸向位移量 (cm) |         |         | Y 軸向位移量 (cm) |         |         |
|-----------------|--------------------------------|--------------|---------|---------|--------------|---------|---------|
|                 |                                | 最大<br>值      | 最小<br>值 | 標準<br>差 | 最大<br>值      | 最小<br>值 | 標準<br>差 |
| 750             | 1280 × 960                     | 1.66         | -2.07   | 0.61    | 1.31         | -1.22   | 0.38    |
|                 | 1920 × 1440                    | 1.96         | -2.97   | 0.57    | 1.53         | -1.35   | 0.45    |
| 1000            | 1280 × 960                     | 1.09         | -1.40   | 0.38    | 1.06         | -0.59   | 0.32    |
|                 | 1920 × 1440                    | 1.25         | -1.15   | 0.39    | 1.35         | -1.51   | 0.39    |

表 3-6 現地長距離定點觀測試驗 Z 軸向像素變化量

| 測量<br>距離<br>(m) | 解算影像解析<br>度<br>(pixel × pixel) | 電腦視覺解算位移量<br>(pixel) |         |         | 一個像素<br>(pixel)代<br>表的實際<br>長度(cm) | 位移量<br>精度<br>(cm) |
|-----------------|--------------------------------|----------------------|---------|---------|------------------------------------|-------------------|
|                 |                                | 最大<br>值              | 最小<br>值 | 標準<br>差 |                                    |                   |
| 750             | 1280 × 960                     | 0.91                 | -1.28   | 0.34    | 0.63                               | 0.21              |
|                 | 1920 × 1440                    | 0.97                 | -1.26   | 0.36    | 0.42                               | 0.15              |
| 1000            | 1280 × 960                     | 0.79                 | -0.62   | 0.22    | 0.83                               | 0.18              |
|                 | 1920 × 1440                    | 1.11                 | -1.19   | 0.38    | 0.56                               | 0.21              |

## 二、自製地動儀試驗分析

本計畫設計兩組室內試驗，驗證自製地震儀在不同環境條件下之

感測能力與穩定性。第一部分為振動台試驗，將自製儀器與 EPSON 加速度計、RS4D 地震儀同步架設，施加六組不同頻率震動，分析各儀器之主頻與振幅響應。第二部分為砂箱模擬試驗，將自製儀器埋入乾砂中，與砂箱外部之 EPSON 儀器進行對比，觀察訊號經覆土阻尼後之保留程度。兩組試驗均以頻譜分析與加速度變化為主，評估自製儀器於裸露與覆土條件下之量測表現與應用潛力。

為系統性分析三組地震儀器（自製地震儀、EPSON 加速度計、RS4D 地震儀）於不同震動條件下之頻率響應表現，本計畫於振動台上施加多組不同震度等級條件進行測試。表 3-7 為本試驗所設定之振動台參數，包括加速度對應的代表震度等級與其對應頻率，分別模擬從 0.8 gal（1 級）至 140 gal（5 級強）等不同強度震動情境。

在實驗過程中，同步擷取三組儀器的量測數據，經 FFT 轉換後分析主頻響應。表 3-8 整理各震度等級對應的實際振動台輸入頻率與三組儀器所量測到的主頻結果，可觀察儀器對不同加速度輸入的頻率識別能力與穩定性。整體結果顯示，EPSON 與 RS4D 所解析出之主頻與輸入頻率相符，自製地震儀則在高震度條件下顯示明確頻率峰值，代表其於中高頻輸入時具較佳辨識能力。

表 3-9 進一步以圖示方式呈現六組代表震度條件下，三組儀器所量測之頻率分析結果（頻譜圖），由圖中可清楚辨識各儀器在不同

震度情境下之主頻峰值強弱與波形特性。特別是在 4 級以上震度（加速度 25 gal 以上）情境下，自製地震儀頻譜圖中主頻響應逐漸明顯，顯示其對中震至強震區間具備良好的靈敏度與訊號放大能力。

整體而言，透過表 3-9 的整合性分析，可初步驗證自製地震儀在特定頻率與震度範圍內具備穩定響應能力，並能與 EPSON 及 RS4D 儀器進行有效比對，為後續應用於監測之可行性提供數據基礎。

表 3-7 自製地震儀之振動台參數設定表

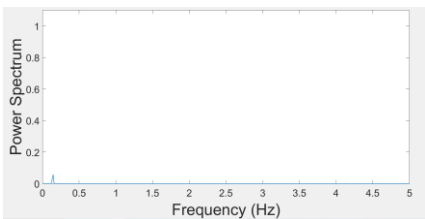
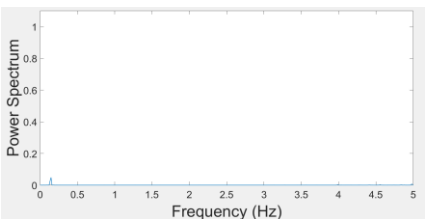
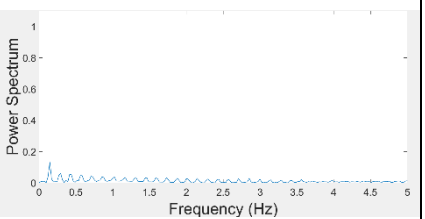
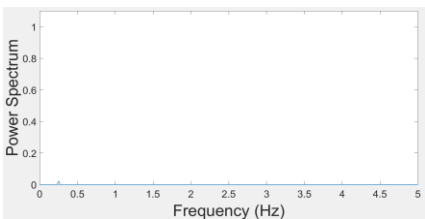
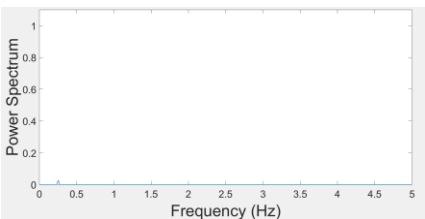
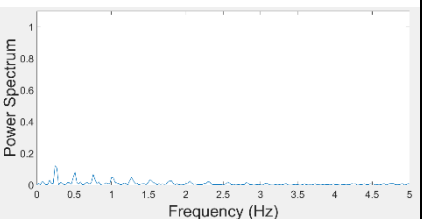
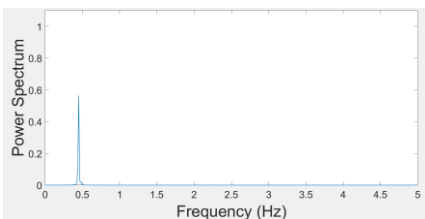
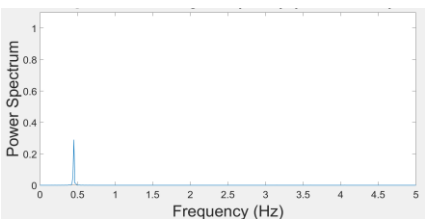
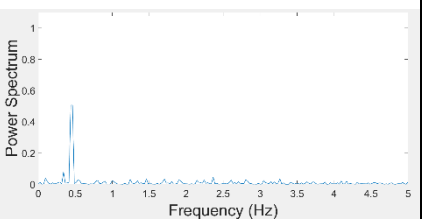
| 代表震度 | 加速度(gal) | 頻率(Hz) | 振幅(cm) |
|------|----------|--------|--------|
| 1    | 0.8      | 0.142  | 1      |
| 2    | 2.5      | 0.252  | 1      |
| 3    | 8        | 0.450  | 1      |
| 4    | 25       | 0.796  | 1      |
| 5 弱  | 80       | 1.424  | 1      |
| 5 強  | 140      | 1.883  | 1      |

表 3-8 振動台試驗之各種儀器分析表

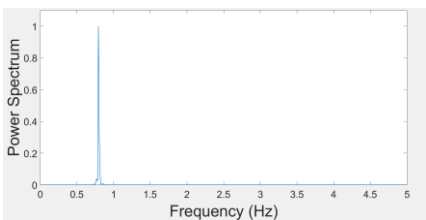
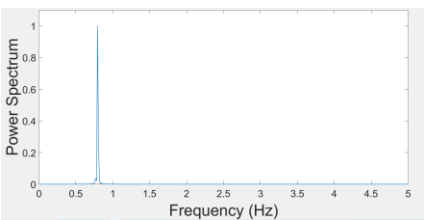
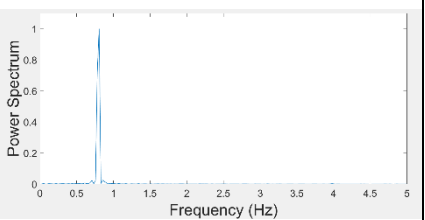
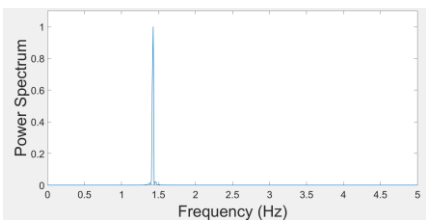
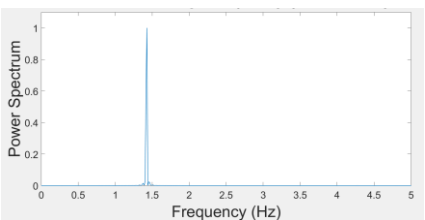
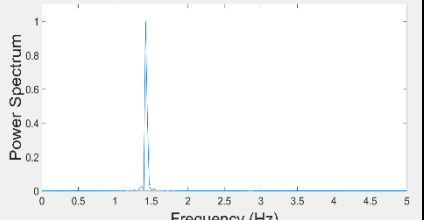
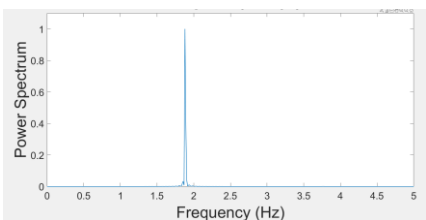
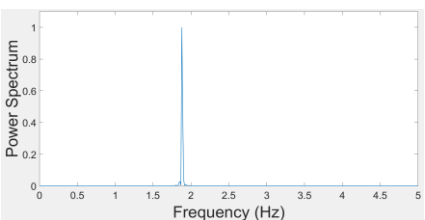
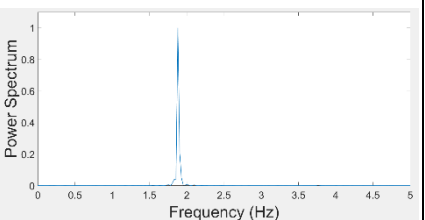
| 加速度<br>(gal) | 代表震<br>度 | 振動台<br>頻率<br>(Hz) | 主要振動頻率(Hz) |                       |           |
|--------------|----------|-------------------|------------|-----------------------|-----------|
|              |          |                   | RS4D       | 高精度地震<br>儀<br>(Epson) | 自製地動<br>儀 |
| 0.8          | 1 級      | 0.142             | 0.147      | 0.146                 | 0.146     |

|     |     |       |       |       |       |
|-----|-----|-------|-------|-------|-------|
| 2.5 | 2 級 | 0.252 | 0.256 | 0.256 | 0.244 |
| 8   | 3 級 | 0.450 | 0.452 | 0.452 | 0.451 |
| 25  | 4 級 | 0.796 | 0.794 | 0.794 | 0.806 |
| 80  | 5 弱 | 1.424 | 1.428 | 1.420 | 1.420 |
| 140 | 5 強 | 1.883 | 1.880 | 1.880 | 1.880 |

表 3-9 振動台頻率分析結果

| 震<br>度 | RS4D<br>( Raspberry Shake )                                                                          | 高精度地震儀<br>(Epson)                                                                                     | 自製地震儀<br>(Epson+Geophone)                                                                              |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1<br>級 | <br>頻率分析: 0.147HZ | <br>頻率分析: 0.146HZ | <br>頻率分析: 0.146HZ |
| 2<br>級 | <br>頻率分析: 0.256HZ | <br>頻率分析: 0.256HZ | <br>頻率分析: 0.244HZ |
| 3<br>級 | <br>頻率分析: 0.256HZ | <br>頻率分析: 0.256HZ | <br>頻率分析: 0.244HZ |



|        |                                                                                    |                                                                                     |                                                                                      |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|        | 頻率分析: 0.452HZ                                                                      | 頻率分析: 0.452HZ                                                                       | 頻率分析: 0.451HZ                                                                        |
| 4<br>級 |   |   |   |
|        | 頻率分析: 0.794HZ                                                                      | 頻率分析: 0.794HZ                                                                       | 頻率分析: 0.806HZ                                                                        |
| 5<br>弱 |   |   |   |
|        | 頻率分析: 1.428HZ                                                                      | 頻率分析: 1.426HZ                                                                       | 頻率分析: 1.420HZ                                                                        |
| 5<br>強 |  |  |  |
|        | 頻率分析: 1.880HZ                                                                      | 頻率分析: 1.883HZ                                                                       | 頻率分析: 1.880HZ                                                                        |

為模擬地震儀於現地鬆散覆土環境中之感測表現，本計畫設計砂箱模擬試驗，進一步分析地震波經由覆土介質後對儀器量測響應的影響。本試驗採用自製地震儀與 EPSON M-A 系列加速度計進行對照，兩者分別放置於砂箱內部（埋設）與外部（裸露），並施加與振動台試驗相同之六組震度條件，以保持比較基準一致。

表 3-10 為砂箱模擬試驗所對應之振動條件與兩組儀器所擷取之主頻率結果，顯示即使震動訊號經由乾砂阻尼，自製地震儀仍可於

中高震度條件下（如 25 gal、80 gal 與 140 gal）準確擷取主要頻率響應，顯示其具備穿透鬆散介質並維持感測精度的能力。

表 3-11 則呈現兩組儀器在六組輸入條件下之頻譜圖結果，可清楚觀察 EPSON 與自製儀器對頻率響應之差異。自製儀器於震度達到 25 gal 以上時，主頻峰值逐漸清晰且幅值顯著，特別在 0.796 Hz 與 1.883 Hz 頻率條件下，頻譜圖表現出良好的辨識能力，顯示其於砂層覆蓋環境中仍具高靈敏度。

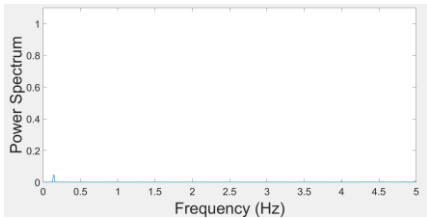
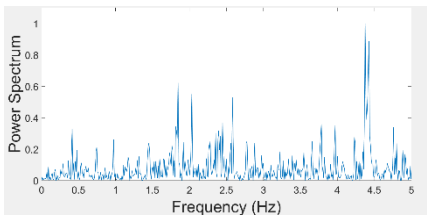
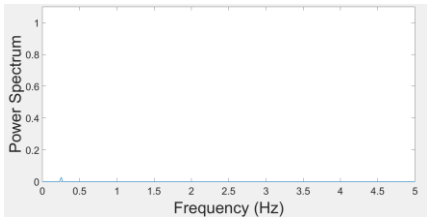
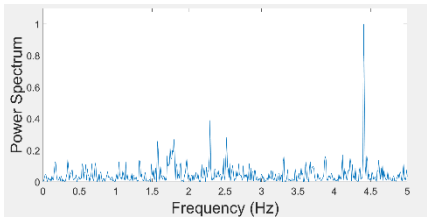
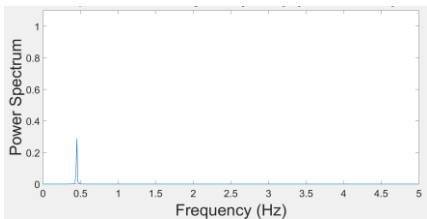
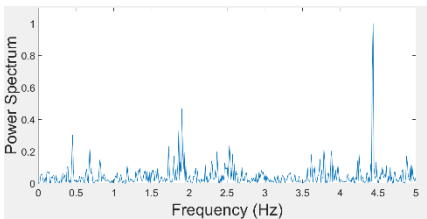
透過砂箱試驗結果可發現，自製地震儀於鬆散覆土條件下表現出穩定之頻率響應與訊號保留能力，顯示其適用於坡地滑動監測或野外地震預警等場域，具備實地應用價值。

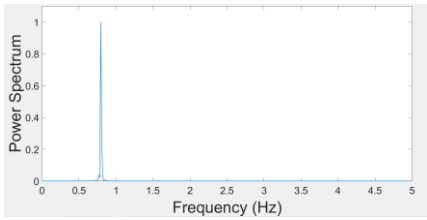
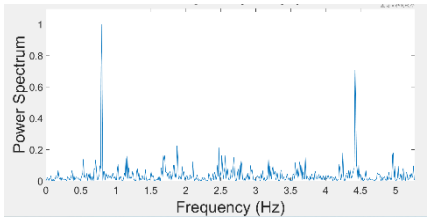
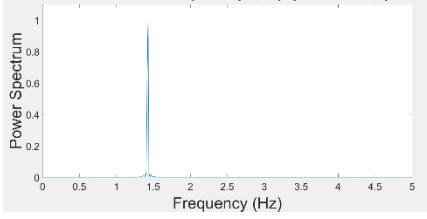
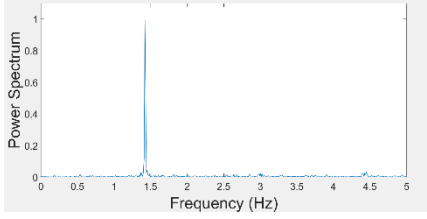
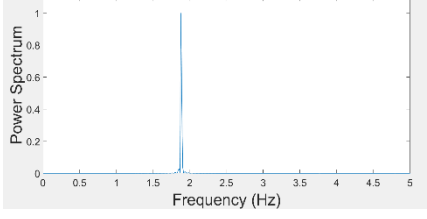
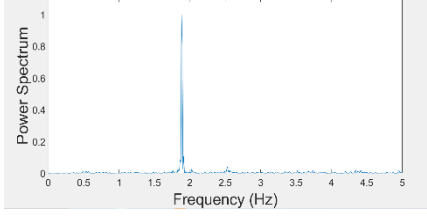
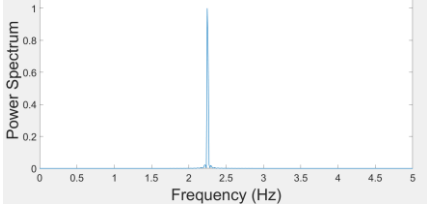
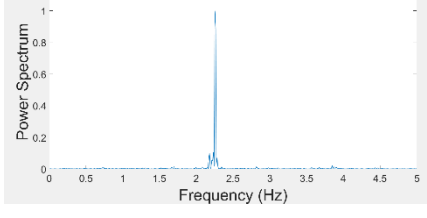
表 3-10 沙箱振動台參數設定結果

| 加速度(gal) | 代表震度 | 振動台<br>頻率(Hz) | 主要振動頻率(Hz)            |       |
|----------|------|---------------|-----------------------|-------|
|          |      |               | 高精度地震<br>儀<br>(Epson) | 自製地動儀 |
| 0.8      | 1 級  | 0.142         | 0.147                 | 無     |
| 2.5      | 2 級  | 0.252         | 0.256                 | 無     |
| 8        | 3 級  | 0.450         | 0.452                 | 無     |
| 25       | 4 級  | 0.796         | 0.794                 | 0.793 |

|     |     |       |       |       |
|-----|-----|-------|-------|-------|
| 80  | 5 弱 | 1.424 | 1.428 | 1.422 |
| 140 | 5 強 | 1.883 | 1.880 | 1.882 |
| 200 | MAX | 2.251 | 2.246 | 2.253 |

表 3-11 沙箱振動台頻率分析結果

|     | 高精度地震儀<br>(Epson)                                                                                        | 自製地震儀                                                                                                |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 級 |  <p>頻率分析: 0.146HZ</p>  |  <p>頻率分析: 雜訊</p>  |
| 2 級 |  <p>頻率分析: 0.256HZ</p> |  <p>頻率分析: 雜訊</p> |
| 3 級 |  <p>頻率分析: 0.452HZ</p> |  <p>頻率分析: 雜訊</p> |

|     |                                                                                                          |                                                                                                           |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4 級 |  <p>頻率分析: 0.794HZ</p>   |  <p>頻率分析: 0.793HZ</p>   |
| 5 弱 |  <p>頻率分析: 1.428HZ</p>   |  <p>頻率分析: 1.422HZ</p>   |
| 5 強 |  <p>頻率分析: 1.880HZ</p>  |  <p>頻率分析: 1.882HZ</p>  |
| MAX |  <p>頻率分析: 2.246HZ</p> |  <p>頻率分析: 2.253HZ</p> |

## 第二節 試驗討論

### 一、電腦視覺變位監測儀

在室外長時間定點觀測試驗中，CVDM 於短距離（10 公尺）的監測表現出極高的數據穩定性與完整性，數據完整性高達 99% 以上。同時，其在中遠距離（20 至 30 公尺）的監測能力亦達到可靠水準，能精確捕捉邊坡的動態變位，顯示出該儀器在不同距離與複雜場景中的適應性。該試驗結果充分證明了 CVDM 在長距離監測場景下的應用價值，標準差達到 0.01cm 的精度，其誤差在 X、Y 軸向達到 0.4 cm。

由現地超長距離(750、1000 mm)定點觀測試驗，另透過對 Z 軸向之累積變位量做高斯濾波，使監測數據誤差跳動減小，精度達 0.21 cm，使得整體監測數據更為穩定且可靠。透過現地超長距離定點觀測數據分析得知，其 X 軸向與 Y 軸向測量平均標準差為 0.44 公分，且偏移量最大僅 2.97 cm，已具備極高之穩定性與可靠性，故不需要再對其做高斯濾波之處理。另透過對 Z 軸向之累積變位量做高斯濾波處理，最大偏移量下降至 0.80 cm，另可使平均標準差下降至 0.21cm，使得整體監測數據更為穩定。

### 二、自製地動儀

本計畫透過振動台與砂箱兩組室內試驗，系統性評估自製地動儀在不同環境條件下之頻率響應與加速度量測能力。綜合表 3-8 至表

3-11 所呈現之數據與頻譜圖分析，可歸納出以下重點成果：

在振動台試驗部分（表 3-9），自製地動儀、EPSON 加速度計與 RS4D（Raspberry Shake）三組儀器於六組輸入頻率條件下同步量測。結果顯示，三者對主要振動頻率之辨識一致：各級別對應之主頻皆出現在 0.146、0.256、0.452、0.794、1.426 與 1.880 Hz 附近；自製地動儀在低震度（第 1–3 級，約 0.8–8gal）即已解析出與輸入頻率相符的主峰，僅在第 2 級出現約 0.244Hz 的輕微偏差，整體仍在可接受之誤差範圍內。隨震度提高（ $\geq$ 第 4 級），三者主峰位置與峰值穩定度進一步趨於一致，顯示自製儀器於中強震範圍內具有良好的主頻鎖定能力與穩定性。

砂箱模擬試驗（表 3-10 與表 3-11）進一步評估自製地動儀於鬆散覆土環境下之量測表現。試驗中，自製儀器與高精度 EPSON 加速度計分別埋設於乾砂中與裸露狀態，並於六組輸入頻率條件下同步記錄振動反應。

結果顯示，兩儀器在主要振動頻率上的對應良好：

在低震度條件（第 1–3 級，約 0.8–8gal）時，EPSON 儀器清楚顯示主頻分別位於 0.146Hz、0.256Hz 與 0.452Hz；自製地動儀雖受砂層阻尼與微幅能量損失影響，但仍可辨識出相近頻帶主峰，顯示其對低頻地動具一定響應能力。

隨震度提高（第 4 級 0.794 Hz、第 5 級 1.422 – 1.883Hz、MAX 階段約 2.25 Hz），自製地動儀主頻位置與 EPSON 結果幾乎完全一致，頻譜主峰清晰集中，響應強度穩定，顯示其於中高震度範圍具良好靈敏度與可靠度。

綜合分析結果可得，自製地震儀即使埋設於乾砂中，仍能有效偵測中頻至高頻震動成分，並維持主頻辨識精度。相較於裸露之 EPSON 加速度計，自製地動儀受覆土影響主要體現在振幅衰減與低震度頻譜雜訊偏高，但主頻特徵仍可被正確提取。此結果顯示該系統具備穿透鬆散介質後仍能保持穩定感測性能之特性，具潛力應用於坡地滑動、崩塌前兆與地下結構振動監測。

整體而言，自製地動儀在低取樣率條件下於小震度測試表現有限，但於中高震度與覆土環境中仍展現穩定頻率響應與訊號重建能力，具備應用於崩塌前兆監測、坡地滑動預警與野外部署之潛力。未來若能提升其取樣率與訊號處理效能，將有助於擴展至微震偵測等更高解析度應用場景。

### 三、現地裝設資料

新竹縣-尖石鄉-T001(秀巒)崩塌區位於新竹縣尖石鄉秀巒村(如圖 3-23)，自民國 90 年後，坡面已有局部崩塌現象，已列為大規模

崩塌潛勢區，編號「新竹縣-尖石鄉-T001」，110 年 9 月 13 日於已坍滑區域發生再次崩塌，面積約 4.2 公頃公頃，土方量約 9.6 萬立方公尺(含河道約 3 萬立方公尺)，土石下滑阻塞白石溪形成堰塞湖並阻斷竹 60 線 31K，幸未造成人員傷亡。



圖 3-23 新竹縣-尖石鄉-T001(秀巒)大規模崩塌潛勢區

因 110 年 8 月之盧碧颱風後，秀巒崩塌地坡面土體持續滑動，建議在秀巒國小設本監測儀器，監看對面崩塌土體，採用本計畫之非破壞性監測電腦視覺設備與地震儀，掌握崩塌坡面之變位情形，當有監測到變位時，發出告警訊息。

預計設置儀器位置平面圖及現地示意圖如圖 3-24 及圖 3-25 所示。本團隊已於 2025 年 7 月 3 日至秀巒國小現勘(如圖 3-26)。



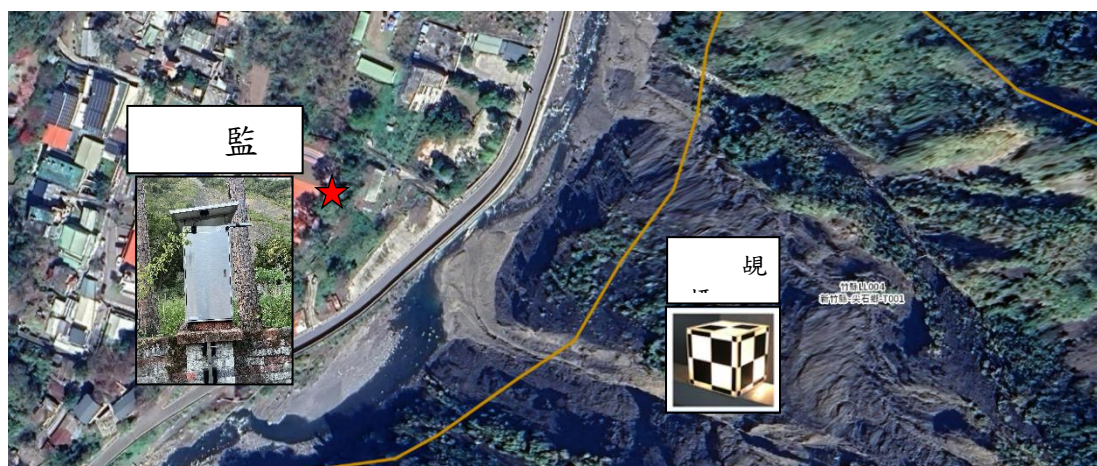


圖 3-24 秀巒崩塌區設置儀器位置平面示意圖



圖 3-25 秀巒崩塌區設置儀器現地示意圖





(照片日期：2025 年 7 月 3 日)

**圖 3-26 秀巒國小現勘與儀器架設測試**

本團隊於 2025 年 10 月 7 日 於 新竹縣秀巒國小安裝整合式監測系統，包含電腦視覺變位監測儀與自製高精度地動儀。電腦視覺變位監測儀置放於女兒牆上新設之監測小屋內（圖 3-27、圖 3-28、圖 3-29），用以持續觀測崩塌地邊坡表面變位；自製地動儀（IMU +

Geophone) 則同樣設置於監測小屋中，透過固定基座與牆體連結，用於量測地表振動與地震波反應。兩套感測系統共用電力與網路，並透過樹莓派主控端與本校伺服器建立遠端監測網連線，可即時傳輸資料至後端平台。



(照片日期：2025 年 10 月 7 日)

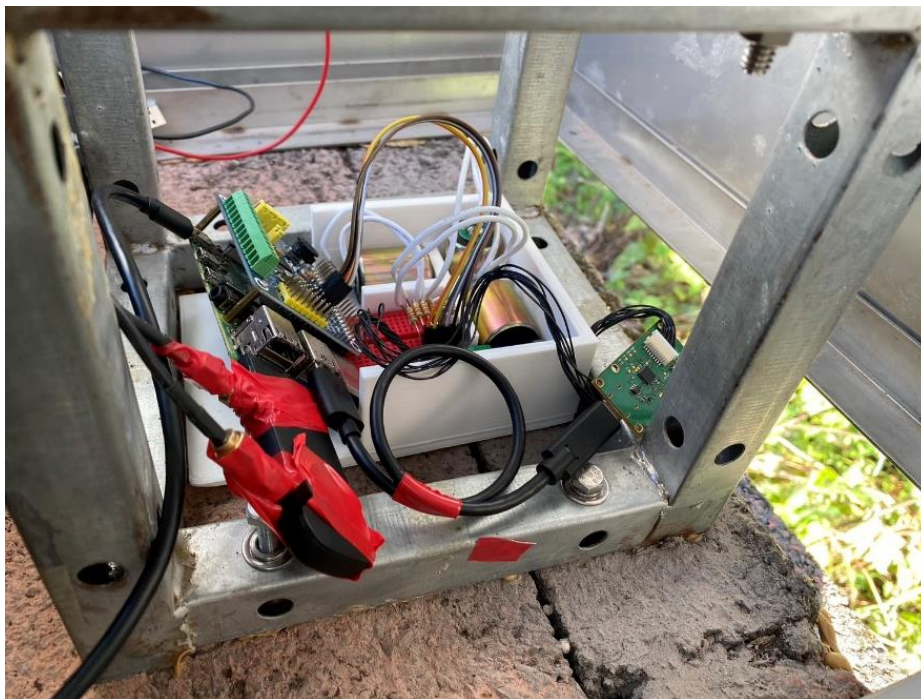
**圖 3-27 秀巒國小秀巒崩塌區設置儀器現地示意圖(監測小屋整體)**





(照片日期：2025 年 10 月 7 日)

圖 3-28 秀巒國小秀巒崩塌區設置儀器現地示意圖(監測小屋視野窗)



(照片日

期：2025 年 10 月 7 日)

圖 3-29 自製地動儀

在崩塌區域，棋盤格規標由無人機（UAV）吊掛後精準投放於目標地點（圖 3-30），其位置與監測儀器間距離以全站儀量測校正（圖 3-31），確保影像測距與地動量測結果具有一致的空間參考。



(照片日期：2025 年 10 月 31 日)

**圖 3-30 UAV 吊掛投放規標**



(照片日期：2025 年 10 月 31 日)

**圖 3-31 全站儀測定距離**



整體監測系統之運作畫面可透過外接螢幕即時監控(圖 3-32)，亦可登入網頁版監控平台遠端檢視即時影像、振動波形與設備狀態(圖 3-33、圖 3-34)。平台能同時顯示加速度、速度及位移波形，並支援自動事件觸發與 FTP 資料上傳功能，確保現地監測資訊即時回傳與紀錄。

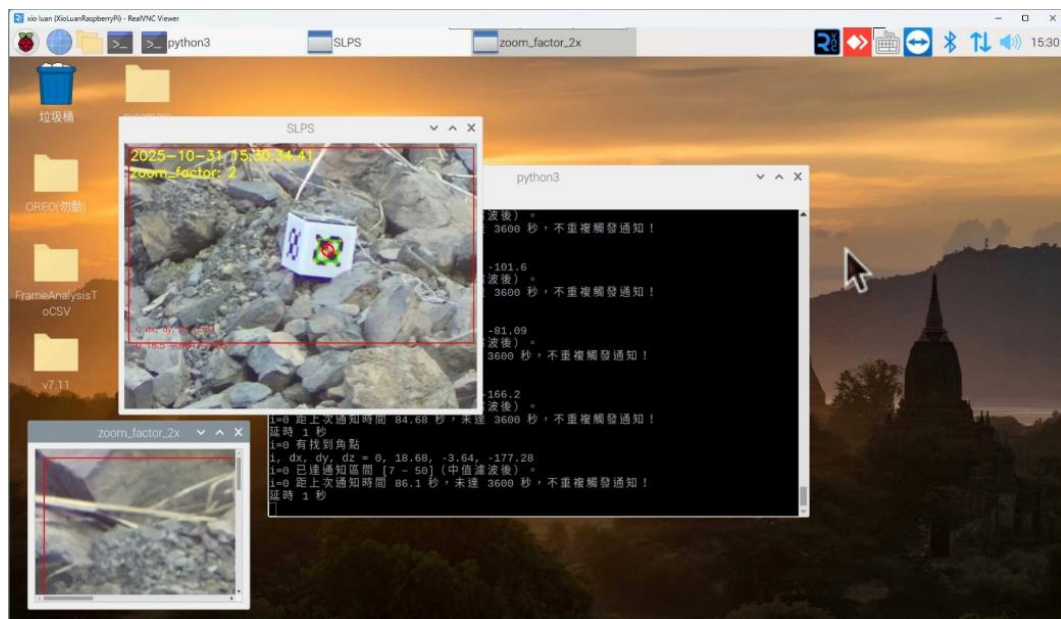


圖 3-32 監測系統運作畫面

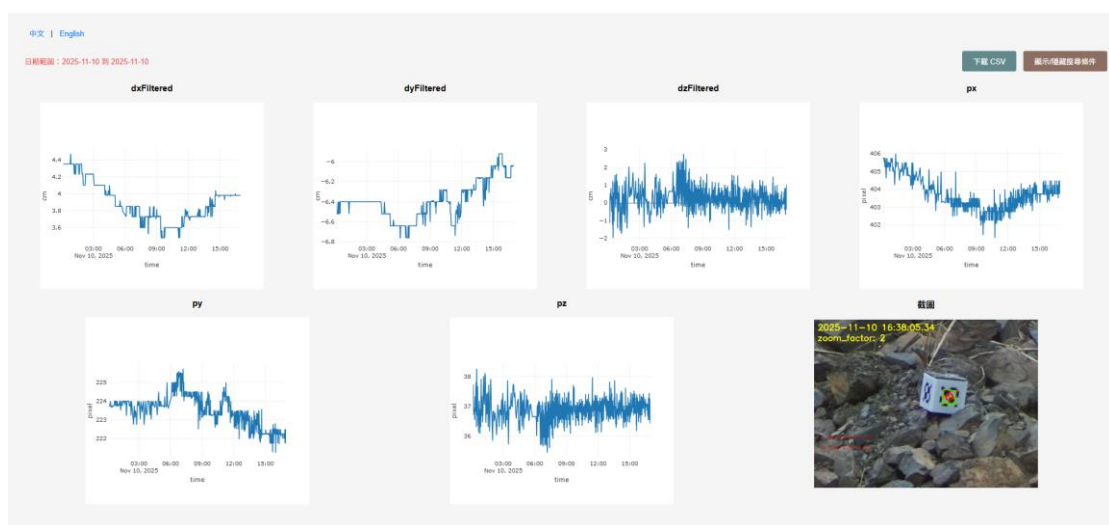


圖 3-33 電腦視覺變位監測儀即時監控平台示意圖

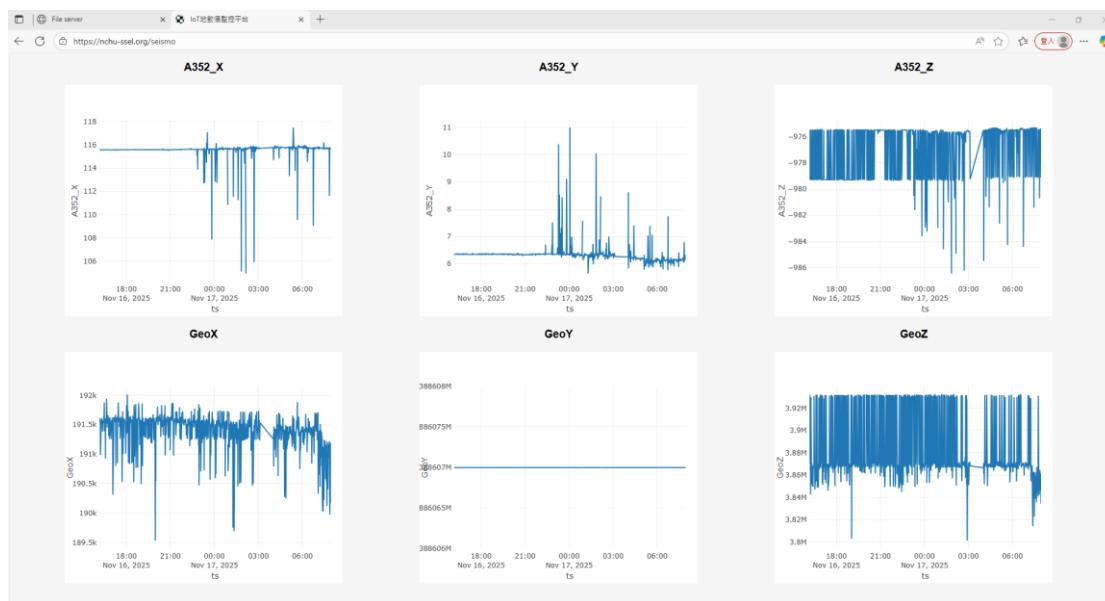


圖 3-34 地動儀即時監控平台示意圖

此外，本團隊亦於校內架設相同距離與配置之備援儀器組（圖 3-35、圖 3-36），作為系統穩定性比對測試與零件備援用途，確保當現地設備發生故障或傳輸中斷時，能短時間至現地更換零件，維持資料之連續性與完整性，平時可供教學與研究之實驗設備。



圖 3-35 校內儀器架設示意圖



圖 3-36 校內儀器架設示意圖(監測小屋內部配置)



為了進一步驗證地動儀系統穩定性與現地監測結果的一致性，本研究同時於校內搭建一組與現地相同架構之地動儀系統（圖 3-37）。該系統包含樹莓派主控端、ADS1256 高精度 AD/DA 轉換模組、三軸 Geophone 以及 EPSON M-A352 三軸加速度計，整體配置與現地感測端完全一致。校內端與現地端以相同的取樣頻率與資料上傳機制同步運行，進行長期比對觀測。



圖 3-37 校內地動儀系統

透過兩組系統的同步量測與資料交叉比對，可評估自製地動儀在不同環境條件下的靈敏度、穩定度與雜訊特性，並據以校正濾波與事件觸發參數。此一雙端架構的設計不僅提升監測平台之可靠性與容錯能力，也確保系統在實際應用中能長期維持高精度與高穩定性的量測

品質。

#### 四、試驗成果

##### (一)電腦視覺變位監測儀器的試驗成果(秀巒國小)

本團隊於秀巒國小架設電腦視覺變位監測儀器對秀巒崩塌區監測期間，於 10 月 23 日發生大規模土砂下移崩塌(圖 3-38)，本儀器有拍攝到崩塌後規標消失於監測視野中(圖 3-39)。本團隊於崩塌發生後隨即前往崩塌地重新投放新的規標，於之後監測期間日夜間監測效果良好(圖 3-40)。



圖 3-38 秀巒崩塌地發生大規模土砂下移前後對比圖



圖 3-39 電腦視覺變位監測儀器拍攝崩塌前後對比圖



圖 3-40 電腦視覺變位監測儀器日夜間監測截圖

監測資料(2025/11/01 到 2025/11/15)(如圖 3-41)。圖 3-41 中可看到在 10 月 23 日邊坡發生霸規模土砂下移發生到 11 月 10 日，表層土層持續有發生緩慢滑動，於 11 月 4 日至 9 日約中午時間儀器達到警戒值(10cm)，於告警推播通知系統顯示(圖 3-42)。本次達警戒值皆發生在中午時段溫度升高時，下午溫度降低後數值恢復至警界值內，故推測達警戒主因是溫度升高導致攝影畫面產生偏移。因應鳳凰颱風發布海上颱風警報，本團隊於 11 月 11 日將變位量資料歸零，直至鳳凰颱風解除海上颱風警報，變位量皆無達到警戒值。



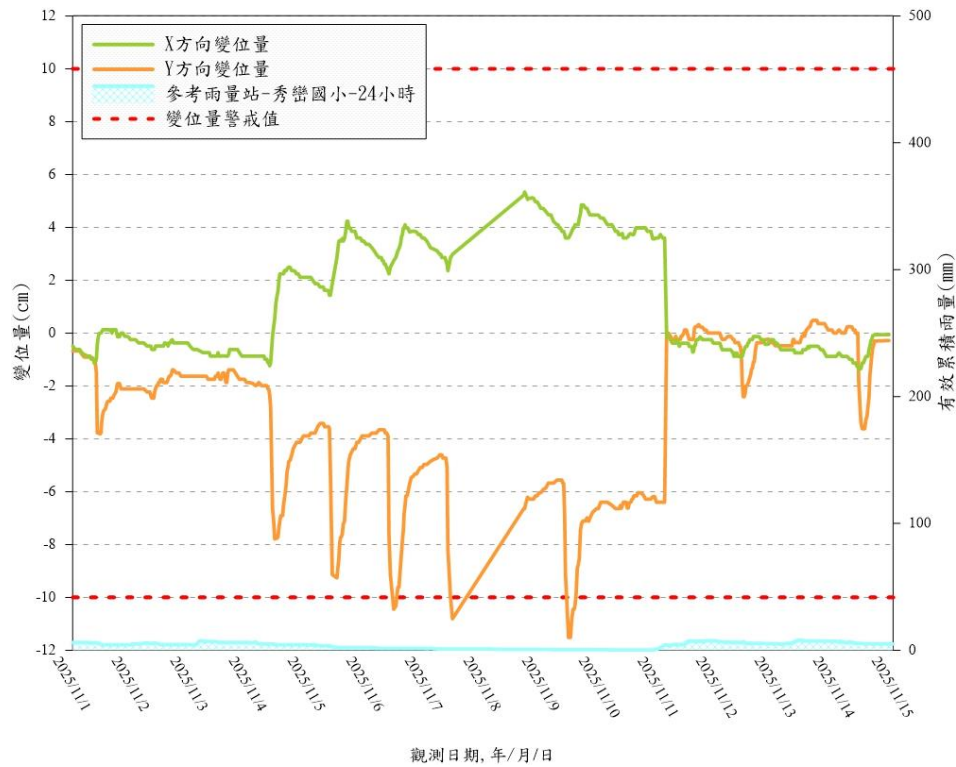


圖 3-41 電腦視覺變位監測儀器監測資料(2025/11/01 到 2025/11/15)



圖 3-42 電腦視覺變位監測儀器告警推播通知系統

## (二)自製地動儀的試驗成果

現地試運轉資料顯示，本次自製地動儀當感測到振動加速度超過設定門檻（約相當於地震規模 3 級震度）時，系統即自動切換至地震事件模式，以 100 Hz 取樣頻率進行高密度記錄，持續記錄 60 秒~150 秒事件波形。

| ts                      | TEMPraw | Xcm/s^2  | Ycm/s^2  | Zcm/s^2  | mag      | GeoX     | GeoY | GeoZ     | Status |
|-------------------------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|------|----------|--------|
| 2025-11-05T20:10:22.011 | 2994    | 115.6498 | 6.577099 | -975.236 | 982.0918 | 0.228342 | 9.5  | 4.593381 | ok     |
| 2025-11-05T20:11:26.403 | 2994    | 115.6509 | 6.578385 | -975.239 | 982.0949 | 0.22818  | 9.7  | 4.686233 | ok     |
| 2025-11-05T20:12:20.256 | 2995    | 115.6511 | 6.575111 | -975.236 | 982.0918 | 0.228049 | 9.6  | 4.612694 | ok     |
| 2025-11-05T20:13:14.316 | 2996    | 115.6476 | 6.576222 | -975.236 | 982.0907 | 0.22822  | 9.8  | 4.594094 | ok     |
| 2025-11-05T20:14:41.059 | 2997    | 115.6508 | 6.576397 | -975.238 | 982.0933 | 0.228139 | 9.85 | 4.612443 | ok     |
| 2025-11-05T20:15:05.939 | 2997    | 115.6473 | 6.574293 | -975.237 | 982.0922 | 0.22851  | 9.6  | 4.612132 | ok     |
| 2025-11-05T20:16:35.411 | 2999    | 115.6498 | 6.579378 | -975.236 | 982.0911 | 0.228533 | 9.65 | 4.593236 | ok     |
| 2025-11-05T20:17:16.916 | 2999    | 115.6504 | 6.576222 | -975.238 | 982.0938 | 0.228266 | 9.7  | 4.593826 | ok     |
| 2025-11-05T20:18:25.099 | 2999    | 115.6517 | 6.568272 | -975.243 | 985.8722 | 0.228562 | 9.6  | 4.593841 | ok     |
| 2025-11-05T20:19:34.733 | 3000    | 115.6447 | 6.586217 | -975.241 | 982.0955 | 0.228268 | 9.8  | 4.611765 | ok     |
| 2025-11-05T20:20:48.625 | 3000    | 115.6489 | 6.575404 | -975.238 | 982.0927 | 0.228167 | 9.7  | 4.612918 | ok     |
| 2025-11-05T20:21:43.875 | 3001    | 115.6528 | 6.577216 | -975.237 | 982.0928 | 0.227995 | 9.6  | 4.613091 | ok     |
| 2025-11-05T20:22:44.845 | 3001    | 115.6498 | 6.578034 | -975.238 | 982.0938 | 0.228246 | 9.5  | 4.610546 | ok     |
| 2025-11-05T20:23:54.473 | 3001    | 115.6495 | 6.579203 | -975.24  | 982.0956 | 0.228301 | 9.5  | 4.589854 | ok     |
| 2025-11-05T20:24:12.235 | 3001    | 115.6484 | 6.575404 | -975.239 | 982.0938 | 0.228521 | 9.6  | 4.612595 | ok     |
| 2025-11-05T20:25:48.354 | 3001    | 115.6526 | 6.579203 | -975.237 | 982.0929 | 0.2283   | 9.7  | 4.592724 | ok     |
| 2025-11-05T20:26:33.599 | 3002    | 115.663  | 6.592705 | -975.238 | 982.0952 | 0.227983 | 9.55 | 4.610746 | ok     |
| 2025-11-05T20:27:32.950 | 3003    | 115.6539 | 6.568272 | -975.243 | 985.88   | 0.228294 | 9.7  | 4.685875 | ok     |
| 2025-11-05T20:28:18.603 | 3003    | 115.6508 | 6.578911 | -975.24  | 982.0955 | 0.228198 | 9.7  | 4.612426 | ok     |
| 2025-11-05T20:29:02.275 | 3003    | 115.6519 | 6.579612 | -975.241 | 982.0962 | 0.228261 | 9.55 | 4.613337 | ok     |
| 2025-11-05T20:30:21.807 | 3004    | 115.6513 | 6.579612 | -975.241 | 982.0962 | 0.228568 | 9.7  | 4.532179 | ok     |
| 2025-11-05T20:31:18.605 | 3004    | 115.6713 | 6.616379 | -975.256 | 982.1138 | 0.228466 | 9.5  | 4.687102 | ok     |
| 2025-11-05T20:32:05.602 | 3004    | 115.6484 | 6.582067 | -975.242 | 982.0969 | 0.228266 | 9.6  | 4.610555 | ok     |
| 2025-11-05T20:33:58.482 | 3004    | 115.6501 | 6.582359 | -975.239 | 982.0941 | 0.227993 | 9.7  | 4.613498 | ok     |
| 2025-11-05T20:34:37.949 | 3004    | 115.6667 | 6.564882 | -975.291 | 982.1478 | 0.228465 | 9.55 | 4.612928 | ok     |
| 2025-11-05T20:35:19.514 | 3004    | 115.6519 | 6.576806 | -975.243 | 982.0981 | 0.228263 | 9.7  | 4.612637 | ok     |
| 2025-11-05T20:36:03.338 | 3005    | 115.6554 | 6.582418 | -975.241 | 982.0967 | 0.228183 | 9.7  | 4.686804 | ok     |
| 2025-11-05T20:37:15.547 | 3005    | 115.6521 | 6.577976 | -975.241 | 982.0965 | 0.228049 | 9.55 | 4.6856   | ok     |
| 2025-11-05T20:38:10.305 | 3005    | 115.6495 | 6.577625 | -975.241 | 982.0964 | 0.228211 | 9.5  | 4.68574  | ok     |
| 2025-11-05T20:39:44.094 | 3005    | 115.6472 | 6.578969 | -975.244 | 982.099  | 0.227968 | 9.6  | 4.61126  | ok     |
| 2025-11-05T20:40:52.569 | 3005    | 115.6544 | 6.57365  | -975.241 | 982.0972 | 0.228207 | 9.7  | 4.685129 | ok     |
| 2025-11-05T20:41:29.047 | 3005    | 115.6501 | 6.576222 | -975.24  | 982.0958 | 0.228202 | 9.55 | 4.686699 | ok     |
| 2025-11-05T20:42:35.277 | 3005    | 115.6577 | 6.582827 | -975.239 | 982.0957 | 0.228571 | 9.7  | 4.61004  | ok     |
| 2025-11-05T20:43:02.116 | 3005    | 115.6549 | 6.579729 | -975.24  | 982.0961 | 0.227836 | 9.7  | 4.600763 | ok     |
| 2025-11-05T20:44:55.491 | 3007    | 115.6521 | 6.581424 | -975.244 | 982.1001 | 0.227625 | 9.5  | 4.609474 | ok     |
| 2025-11-05T20:45:28.582 | 3006    | 115.6521 | 6.580431 | -975.25  | 982.1051 | 0.228306 | 9.7  | 4.613251 | ok     |
| 2025-11-05T20:46:00.083 | 3006    | 115.6557 | 6.568272 | -975.243 | 985.8786 | 0.227631 | 9.6  | 4.686622 | ok     |
| 2025-11-05T20:47:37.671 | 3007    | 115.6581 | 6.553484 | -975.243 | 985.8855 | 0.228153 | 9.8  | 4.686965 | ok     |

圖 3-43 監測數據

為分析地動訊號之速度變化率 ( $DV/V$ )，本研究使用自行撰寫之 MATLAB 進行計算。其方法基於時間伸縮比 (time-stretching) 互相關原理：先以資料前段作為基準窗 (baseline)，再將後續訊號分段為固定長度之滑動視窗 (本研究設定 1 秒窗長、0.05 秒步距)，於每一視窗中搜尋最佳伸縮比  $\varepsilon$ ，使互相關係數最大。伸縮比  $\varepsilon$  代

表波形在時間軸上的微小伸縮量，據此可得相對速度變化率 ( $DV/V$ )  
 $= -\varepsilon \times 100\%$ 。

在計算前，首先將數值積分轉為速度訊號，同時對速度與積分後速度兩組資料皆套用帶通濾波 (0.1 – 10 Hz)，以去除低頻漂移與高頻雜訊。每個視窗皆獨立計算三軸的伸縮比與相關係數，並以相關係數作加權平均，以得到單一視窗的  $DV/V$  值。

本研究同時對兩組資料進行比對分析：一為直接使用地動儀量測之速度分量 (V, GHI)，另一為將加速度訊號 (A, CDE) 積分後的速度訊號 (A→V)。其結果如圖 3-44 與圖 3-45 所示。由圖可見，V(GHI)的  $DV/V$  散點主要分布於  $\pm 1\%$  以內，綠線趨勢接近 0%，顯示速度量測穩定且背景變化極小；A(CDE)→V 的變化幅度略大，部分時段可達 5 – 10%，推測係積分過程中低頻能量殘留及儀器雜訊所致。整體而言，兩者趨勢一致，證實自製地動儀的取樣、濾波與時間控制皆穩定可靠，足以應用於現地震動與微變化之長期監測。



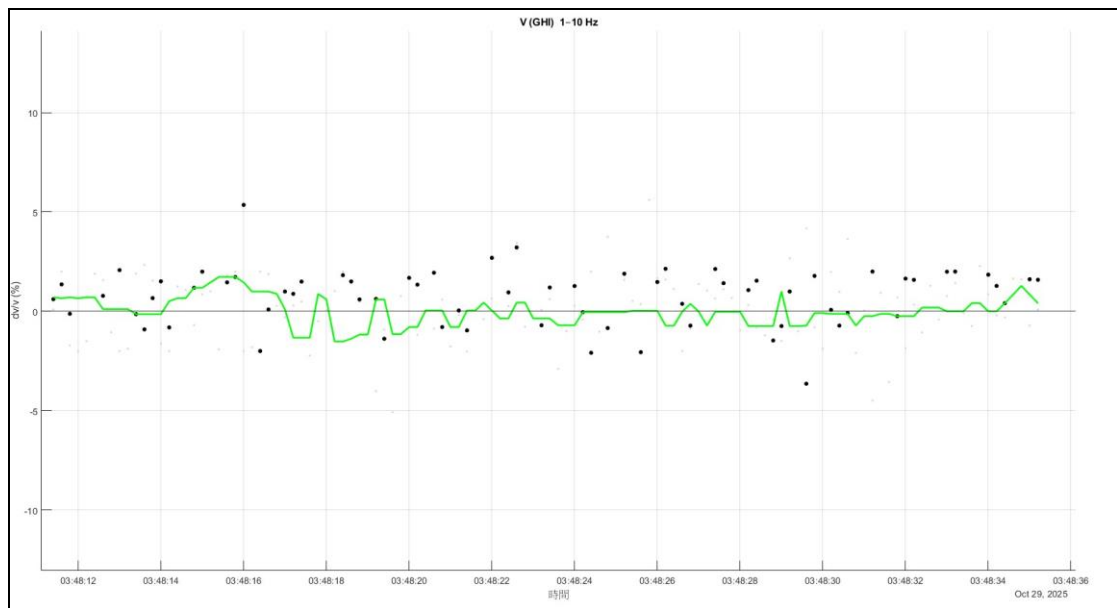


圖 3-44 DV/V 圖 (V 速度變化率)

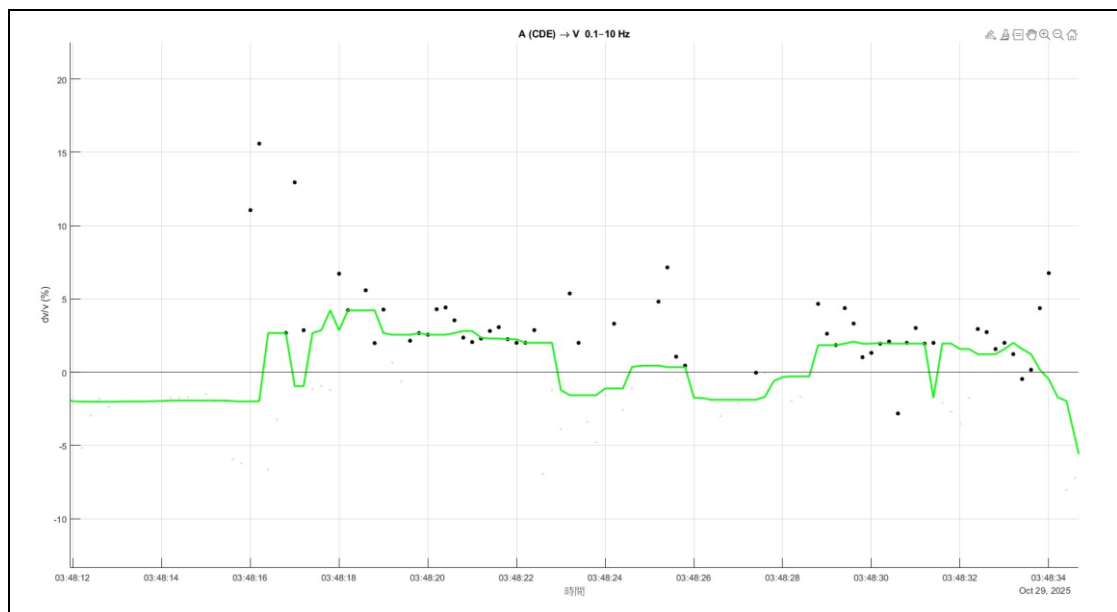


圖 3-45 DV/V 圖 (A 速度變化率)

### (三)自製 IoT 地動儀的試驗成果

為提升量測精度、省電、即時性，本計畫針對 EPSON 高精度三軸加速度計設計 NB-IoT 傳輸之省電裝置，進行長時段接收。系統內部以低功耗單晶片微控制器（MCU）作為核心控管模組，負責感測喚醒、資料擷取、傳輸排程與休眠管理，能在非地震時段大幅降低耗電量。電源部分由太陽能板提供（單片 3 W，本系統配置四片共 12 W，日照充足時單片 6 W 已能維持供電），並搭配 12.8 Ah 電池作為儲能，確保在山區或冬季日照不足時仍可穩定運作。

儀器採穩定之固定頻率回傳機制，平時每 2 分鐘上傳一次資料（每分鐘僅保留 1 筆摘要峰值），可有效降低資料量並保留重要訊號特徵。當地震達到預設門檻（約三級地震）時，系統會自動切換至地震模式，採用 100 Hz 的高頻取樣連續紀錄震動過程，確保事件期間的加速度資訊被完整擷取。所有資料皆以 NB-IoT 傳輸回伺服器，並與本團隊既有 IoT 平台（資料儲存、FFT／時頻分析、告警模組）整合（圖 3-46），作為後續現地部署、警戒門檻校準及系統可靠度提升的重要依據。

|                                  |           |                      |            |                  |
|----------------------------------|-----------|----------------------|------------|------------------|
| nchu_chen                        | 選擇        | 搜尋                   | 選項         | Zip              |
| mdata                            | NCHU_CHEN | 地震儀100.56.1.3        | 100.56.1.3 | 290 個檔案, 25.9 MB |
| 100.56.1.3_0401010800_Params.dat | 156 B     | – 2025/11/03 下午01:50 |            |                  |
| 100.56.1.3_0401010800.dat        | 225 KB    | – 2025/11/03 下午01:50 |            |                  |
| 100.56.1.3_2510231659_Params.dat | 160 B     | – 2025/10/23 下午05:10 |            |                  |
| 100.56.1.3_2510231659.dat        | 222 KB    | – 2025/10/23 下午05:10 |            |                  |
| 100.56.1.3_2510241704_Params.dat | 157 B     | – 2025/10/24 下午06:04 |            |                  |
| 100.56.1.3_2510241704.dat        | 239 KB    | – 2025/10/24 下午06:04 |            |                  |
| 100.56.1.3_2510241803_Params.dat | 157 B     | – 2025/10/24 下午06:14 |            |                  |
| 100.56.1.3_2510241803.dat        | 225 KB    | – 2025/10/24 下午06:14 |            |                  |
| 100.56.1.3_2510241814_Params.dat | 158 B     | – 2025/10/24 下午06:27 |            |                  |
| 100.56.1.3_2510241814.dat        | 220 KB    | – 2025/10/24 下午06:27 |            |                  |
| 100.56.1.3_2510241826_Params.dat | 157 B     | – 2025/10/24 下午06:33 |            |                  |
| 100.56.1.3_2510241826.dat        | 226 KB    | – 2025/10/24 下午06:33 |            |                  |
| 100.56.1.3_2510241833_Params.dat | 157 B     | – 2025/10/24 下午06:36 |            |                  |
| 100.56.1.3_2510241833.dat        | 222 KB    | – 2025/10/24 下午06:36 |            |                  |
| 100.56.1.3_2510241836_Params.dat | 157 B     | – 2025/10/24 下午06:48 |            |                  |
| 100.56.1.3_2510241836.dat        | 225 KB    | – 2025/10/24 下午06:48 |            |                  |
| 100.56.1.3_2510271138_Params.dat | 159 B     | – 2025/10/27 上午11:57 |            |                  |
| 100.56.1.3_2510271138.dat        | 384 KB    | – 2025/10/27 上午11:57 |            |                  |
| 100.56.1.3_2510271155_Params.dat | 159 B     | – 2025/10/27 下午12:03 |            |                  |
| 100.56.1.3_2510271155.dat        | 372 KB    | – 2025/10/27 下午12:03 |            |                  |
| 100.56.1.3_2510271201_Params.dat | 159 B     | – 2025/10/27 下午12:09 |            |                  |
| 100.56.1.3_2510271201.dat        | 376 KB    | – 2025/10/27 下午12:09 |            |                  |
| 100.56.1.3_2510271628_Params.dat | 158 B     | – 2025/10/27 下午04:38 |            |                  |

圖 3-46 IoT 平台



圖 3-47 自製 IoT 地動儀外部太陽能



圖 3-48 自製 IoT 地動儀內部儀器



## 第四章 結論及建議

- 一、透過電腦視覺變位監測(CVDM)儀器之研發與應用，單鏡頭精度可達 0.01 公分，短距離誤差為 0.1cm，超過 750 公尺之長距離監測，誤差為 0.4cm。
- 二、本計畫自行研發之自製地震儀為高精度 EPSON 與 Geophone 兩種感測器同步接收振動資料，於室內之振動台試驗時的振動頻率與樹莓派地震儀之 FFT 分析結果做比對，可觀察到三者振動頻率皆相同。因此由室內振動台試驗可得知，EPSON 高精度震動感測器對於穩態振動的振動頻率量測結果是準確的，可量測到震度 1 級至 5 強以上的頻率。
- 三、本計畫之電腦視覺變位監測(CVDM)系統可連續監測達 24 小時，白天使用自然光做為影像判視的光線來源，也晚則用太陽能模組搭配低功耗 LED 燈泡作為夜晚影像判釋的燈光來源，並研發變位監測到 10 cm 時的自動推播告警機制。
- 四、已於新竹縣尖石鄉秀巒崩塌地安裝本創新儀器電腦視覺變位監測(CVDM)以及自製地震儀，可量測到有微小能量的低頻訊號以及崩塌地變位情形，長期 24 小時監測，10 月之颱風事件，影像確實錄製到規標崩落之情形，並另於 10 月底再次 UAV 吊掛新的規標於崩塌地，目前監測功能正常，持續監測，並提供推播之告



警機制。

五、自製地震儀以 IoT 方式即時傳輸與展示資料，並於三級震度時，啟動每秒 100 筆振動加速度資料。本計畫研究之電腦視覺裝置以及高精度地動儀，皆以設計 IoT 展示界面，並分別於地表變位達 10 公分以及震度達三級時觸發推播機制，以利崩塌地之多元監測與告警機制之建立。

六、未來持續長期監測，進一步分析長期振動訊號，建立地動儀之預測崩塌機制仍是國內外研究中之發展階段，本計畫以 CP 值較高之監測儀器期能做到傳統百萬儀器之工作，未來可多架設於其他潛在二次災害崩塌區，建立省電、即時、非接觸式之物聯網監測崩塌區的多元監測架構。

## 參考文獻

1. 文方光學(2019)「WENFANG 肖特螢石玻璃鏡片 ED80/500 數位拍攝單筒望遠鏡」，<https://www.wenfang.com.tw/product-132.html>
2. 朱克剛，2020，AIOT 與 OPENCV 實戰應用：PYTHON、樹莓派、物聯網與機器視覺，基峰資訊。
3. 李璟芳、周憲德、黃邳軒、張友龍(2013)，「聲波訊號於坡地災害監測之應用」，中興工程，121，23-32。
4. 台灣樹莓派，2023，「Raspberry Pi 4 Model B」，線上連結。
5. 台灣環境部.(2023).，產品碳足跡資訊網 <https://cfp-calculate.tw/>
6. 陸瑞強、廖裕評，2021，物聯網實作：Node-RED 萬物聯網視覺化，五南出版社。
7. 經濟部標準檢驗局。《CNS 14040：環境管理—生命週期評估—原則與架構》。經濟部，2016。
8. 楊睿家，2024，「應用電腦視覺式感測器於土砂災害之振動監測可行性研究」，國立中興大學土木工程學系碩士論文。
9. 德源科技(2018)「長焦鏡頭（12-120mm），高清工業相機」，[https://twarm.com/commerce/product\\_info.php?cPath=23\\_0\\_797\\_793\\_2219&products\\_id=19175](https://twarm.com/commerce/product_info.php?cPath=23_0_797_793_2219&products_id=19175)
10. 陳會安，2017，Raspberry Pi 樹莓派：從不懂，到玩上手，旗標

出版社。

11. 陳毅輝、林育樞、陳俊仰、蘇苗彬，2018，「應用電腦視覺技術於潛在崩塌地整治工程之變位監測」，AOI 論壇與展覽論文集。
12. 陳毅輝、何學承、林仕修、陳俊仰、林育樞、蘇苗彬，2020，「分散式光學變位監測儀器於崩塌地之位移場分布研究」，大地工程學術研究討論會論文集。
13. 陳毅輝、陳俊仰、蔡鎮丞，2022，「應用電腦視覺技術於潛在崩塌地之道路沉陷監測-以嘉義中心崙為例」，第十九屆大地工程學術研討會。
14. 陳毅輝、蔡鎮丞、楊睿家，2024，「電腦視覺技術之非接觸式長距離地表變位監測系統」，地工技術，179，27-34。
15. 蔡鎮丞，2023，「AIoT 非接觸式長距離地表變位監測系統於大規模崩塌區之可行性研究」，國立中興大學土木工程學系碩士論文。
16. 齊藤迪孝 (1968)，第 3 次クリープによる斜面崩壊時期の予知（三期漸変引致坡面崩壊時期之預測），地滑，Vol.4，No.3，pp.1-8。
17. Cuemath. (2015). Fourier Series Formula.  
<https://www.cuemath.com/fourier-series-formula/>
18. Oppenheim, A. V., & Schafer, R. W. (2010). Discrete-Time Signal

- Processing (3rd ed.). Prentice Hall.
19. Allwood, J. M., Cullen, J. M., Carruth, M. A., Cooper, D. R., McBrien, M., Milford, R. L., ... & Patel, A. C. (2012). Sustainable materials: with both eyes open (Vol. 2012). Cambridge, UK: UIT Cambridge Limited.
  20. Cacciuttolo, C., Guzmán, V., Catriñir, P., Atencio, E., Komarizadehasl, S., & Lozano-Galant, J. A. (2023). Low-cost sensors technologies for monitoring sustainability and safety issues in mining activities: advances, gaps, and future directions in the digitalization for smart mining. *Sensors*, 23(15), 6846.
  21. Cano-Suñén, E., Martínez, I., Fernández, Á., Zalba, B., & Casas, R. (2023). Internet of Things (IoT) in Buildings: A Learning Factory. *Sustainability*, 15(16), 12219.
  22. Curtis, D. (2021). Coastal Monitoring and NB-IoT: A Brief Overview.  
<https://5gruraldorset.org/2021/05/25/coastal-monitoring-and-nb-iot-a-brief-overview/>
  23. Elmoulat, M., Debauche, O., Mahmoudi, S., Mahmoudi, S. A., Manneback, P., & Lebeau, F. (2020). Edge computing and artificial intelligence for landslides monitoring. *Procedia Computer Science*, 177, 480-487.
  24. Goetz JN, Brenning A, Petschko H, Leopold P (2015) Evaluating machine learning and statistical prediction techniques for landslide susceptibility modeling. *Comput Geosci* 81:1 – 11
  25. Hao, S., Hao, W., Fu, J., Jiang, F., & Zhang, Q. (2021, October).

- Landslide Monitoring and Early Warning System based on Edge Computing. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 861, No. 4, p. 042056). IOP Publishing.
26. Harris, C., & Stephens, M. (1988). A Combined Corner and Edge Detector. In Proceedings of the Alvey Vision Conference (pp. 147-151).
  27. Huang, C.J., Yin, H.Y., Chen, C.Y., Yeh, C.H., & Wang, C.L. (2007). Ground Vibrations Produced by Rock Motions and Debris Flows. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112(F2).
  28. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change (AR6)*. Geneva, Switzerland: IPCC.
  29. International Energy Agency (IEA). (2023). *Tracking Transport 2023: Global CO<sub>2</sub> Emissions from Freight Transport*.  
<https://www.iea.org/>
  30. Intrieri, E., Carlà, T., & Gigli, G. (2012). Forecasting the time of failure of landslides at slope-scale: Guidelines for a general framework. *Environmental Earth Sciences*, 78(5), 131.
  31. Intrieri, E., Gigli, G., Mugnai, F., Fanti, R., & Casagli, N. (2012). Design and implementation of a landslide early warning system. *Engineering Geology*, 147-148, 124-136.
  32. Intrieri, E., Carlà, T., & Gigli, G. (2019). Landslide early warning systems: Monitoring and data analysis approaches for predicting time of failure. *Landslides*, 16(3), 581-601.
  33. ISO 14067:2018. Greenhouse gases — Carbon footprint of

- products — Requirements and guidelines for quantification.
34. Iverson, R. M. (2000). Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resources Research*, 36(7), 1897 – 1910.
  35. Khongma, A., Ruchanurucks, M., Koanantakool, T., Phatrapornnant, T., Koike, Y., & Rakprayoon, P. (2014). Kinect Quality Enhancement for Triangular Mesh Reconstruction with a Medical Image Application. In *Studies in Computational Intelligence* (pp. 15 – 32).
  36. Ko, B., & Kwak, S. (2012). Survey of computer vision – based natural disaster warning systems. *Optical Engineering*, 51(7), 070901-070901.
  37. Li, Z., Liu, D., Sun, X., & Peng, W. (2021). 5G IoT-based Geohazard Monitoring and Early Warning System and its Application.
  38. Moris. (2022). Camera Calibration Computer Vision Note - Medium. Medium.  
<https://medium.com/image-processing-and-ml-note/camera-calibration-%E7%9B%B8%E6%A9%9F%E6%A0%A1%E6%AD%A3-2632f302bcbd>
  39. Nozari, H., Szmelter-Jarosz, A., & Ghahremani-Nahr, J. (2022). Analysis of the challenges of artificial intelligence of things (AIoT) for the smart supply chain (case study: FMCG industries). *Sensors*, 22(8), 2931.
  40. OpenCV Team. (2014). OpenCV API Reference.



<https://docs.opencv.org/3.1.0/>

41. Ostrowski, M., Blachowski, B., Mikułowski, G., & Jankowski, L. (2022). Influence of Noise in Computer-Vision-Based Measurements on Parameter Identification in Structural Dynamics. *Sensors*, 23(1).
42. Özcebe, A.G., Tiganeşcu, A., Ozer, E., Negulescu, C., Galiana-Merino, J.J., Tubaldi, E., Toma-Danila, D., Molina, S., Kharazian, A., Bozzoni, F., Borzi, B., & Balan, S.F. (2022). Raspberry Shake-Based Rapid Structural Identification of Existing Buildings Subject to Earthquake Ground Motion: The Case Study of Bucharest. *Sensors*, 22(13), 10-11.
43. Pandya, S., Srivastava, G., Jhaveri, R., Babu, M. R., Bhattacharya, S., Maddikunta, P. K. R., 參-4 llu, T. R. (2023). Federated learning for smart cities: A comprehensive survey. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 55, 102987.
44. Raspberry Pi Ltd. (2023). Raspberry Pi High Quality Camera. <https://datasheets.raspberrypi.com/hq-camera/hq-camera-product-brief.pdf>
45. Shi, J., & Tomasi, C. (1994). Good Features to Track. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (pp. 593-600).
46. Siddiqui, F. (2022). The use of data analytics for monitoring and predicting the short-term future performance of geotechnical embankments (Doctoral dissertation, Teesside University).
47. Solar Energy Technologies Office (SETO). (2023). Life Cycle

- Greenhouse Gas Emissions from Solar Photovoltaics. U.S. Department of Energy. <https://www.energy.gov/eere/solar/>
48. Timm, J. F. G., Maciel, V. G., & Passuello, A. (2023). Towards Sustainable Construction: A Systematic Review of Circular Economy Strategies and Ecodesign in the Built Environment. *Buildings*, 13(8), 2059.
49. Wang, Y., Zhang, L., Li, J., & Liu, H. (2022). Landslide early warning using displacement speed ratio and trend speed ratio: A case study. *Natural Hazards*, 110(4), 345-367.
50. Wu, Z., & Huang, N.E. (2004). A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 460(2046), 1597-1611.
51. Zhou C, Yin K, Cao Y, Ahmed B, Li Y, Catani F, Pourghasemi HR (2018) Landslide susceptibility modeling applying machine learning methods: a case study from Longju in the Three Gorges reservoir area, China. *Comput Geosci* 112:23 – 37



## 附錄

### 附錄一、研提計畫書之計畫內容審查意見暨回覆辦理情形

| 項次        | 審查意見                                                                                                                                                                | 回覆辦理情形                                                                                                   |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 報告內容審查意見： |                                                                                                                                                                     |                                                                                                          |
| 1         | 今年度計畫的振動分析的創新研究，非常值得鼓勵，也已經有 2024 年在蘭島渤人工土石壩潰壩實驗的初步監測，是否可以作為坡面崩塌監測預警機制之用，對於現地案例場址的選擇是關鍵重點，計畫書中已初步篩選規畫新竹或嘉義，請與水保署討論商量後決定，是否也可以考慮汐止的鵠鵠崙崩場地，這個案例是台北分署所轄最活躍的潛在大規模崩塌案例之一。 | 感謝審查委員意見，今年度計畫的振動分析仍屬研究階段，故預計於中興大學場域設置一組測試組，故僅能再選擇一組現地崩場地做研究，已於 7 月 3 日至新竹秀巒現勘，預計安裝於秀巒國小以監測此區活躍的潛在大規模崩塌。 |
| 2         | 針對儀器耐用度與後續維運成本納入本案分析項目。                                                                                                                                             | 因尚在研發階段，將於期末針對儀器耐用度與維運成本納入本案分析項目。                                                                        |
| 3         | 視覺化監測可能受到影像品質或角度等侷限，請一併界定相關原則。                                                                                                                                      | 後續期末將說明視覺化監測之限制性與如何克服或以多元監測之互補做相關說明。                                                                     |

| 項次 | 審查意見                                                             | 回覆辦理情形                                                                 |
|----|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 4  | 以針對崩塌地發生二次災害之可能監測方法，擬應用微電腦系統以電腦視覺技術開發可行之監測系統，並提供預警機制，其方法值得嘗試。    | 感謝委員之肯定。                                                               |
| 5  | 電腦視覺變化監測之解析度達 0.01 公分，相對其變動範圍(距離)須滿足何等條件，方足以判釋崩塌之位移量，宜有說明。       | 目前案例初步設定量測到變位量超過 5 公分時，發出推播通知。將於期末針對電腦視覺變化監測之解析度等條件之說明並持續驗證之。          |
| 6  | 電腦視覺位移監測有效距離與判釋精度之關係應有具體結果。                                      | 本計畫期中已試驗中長距離 10 公尺至 50 公尺以及超長距離 750 公尺與 1000 公尺的判釋精度與誤差，期末將持續驗證現地監測成果。 |
| 7  | 本案擬利用智慧影像辨識技術，預警崩塌區發生二次災害，前期開發已獲得室內及室外初步可能成果，有助非接觸監測技術提升。        | 感謝委員之肯定，本研究將持續研發可實務應用於預警崩塌區發生二次災害之技術。                                  |
| 8  | 本計畫提出現地監測距離延長至 100、500、1000 公尺，以了解及穩定性及可靠性外，建議對夜間 LED 燈光源效果納入考量。 | 感謝委員之意見，將持續測試與精進長距離監測與夜間、下雨等條件時，於現地監測之穩定性與可靠性。                         |

| 項次 | 審查意見                                                                | 回覆辦理情形                                                             |
|----|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| 9  | 覘標部分將以 UAV 空載放置坡面，其如何固定餘波面避免誤差？                                     | 覘標部分將以 UAV 空載放置坡面，尚屬研究階段，初步在中興大學場域測試，期末前將空載於現地崩塌地之坡面。              |
| 10 | 透過每秒 100 筆解算速度去量測，影像轉換為震動，是否有必要性？與影像監測同時架設地震儀分析崩塌發生時是否同時偵測到，是否較有意義？ | 感謝委員之意見，本研究將如同委員之建議設置，電腦視覺變位監測儀器以變位與影像為主。自製地震儀另行設置並監測震動，作為多元監測之架構。 |



## 附錄二、期中書面審查意見暨回覆辦理情形

| 項次        | 審查意見                                                                                                   | 回覆辦理情形                                                                                                                                     |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 報告內容審查意見： |                                                                                                        |                                                                                                                                            |
| 1         | 報告未見註明計畫主持人、執行單位等名稱,宜加註。                                                                               | 感謝審查委員意見，期末報告已加入。                                                                                                                          |
| 2         | 本研究之量測儀器均採光學等級之儀器，其固定設備是否穩固，宜先釐清。                                                                      | 本儀器設備之望遠鏡頭與相機模組，皆鎖牢於鐵架上，已確認其穩定度。另再加上自製之監測小屋鋼板包覆於光學儀器設備外，以防風吹雨淋，目前已架設於新竹秀巒國小圍牆，正常監測中。                                                       |
| 3         | 視覺變位監測儀之定點觀測試驗，其標準差是如何計得？何以有單位(cm)?宜注意統計名詞之正確性(標準差、機差、方差…何者?),依文意似指方差(或變方差)，若然，何以比平均值大?顯示觀測值之變異大，品質不佳? | 標準差是用長期觀測之像速變化值去計算，再根據相機焦距和規標尺寸換算成為公分。如下公式:<br>$(\text{規標實際邊長}(\text{cm})) / (\text{畫面規標邊長}(\text{pixel})) = \text{單位像素對應實際位移}(\text{cm})$ |
| 4         | 現地超長距離定點觀測測試驗在 10 分鐘之監測時間內即有 XYZ 軸分別-2.97~1.96cm 之誤差，隨時間增長,會否有更大之變動值?                                  | 監測時間 XYZ 軸的跳動，主要受到溫度與光線之影響。因此在 24 小時內會有週期性的變化量，超長距離約在 5 公分之間跳動。                                                                            |
| 5         | 本視覺變位監測儀在現地試驗可達公分級以下之誤差值，有其應用性，值得肯定，惟相機、規標等設置之穩定性仍值得探討，希望有規範可資依循。                                      | 感謝審查委員肯定，目前已長期架設於新竹秀巒崩塌地監測，持續驗證其穩定性。後續將申請專利與其規範。                                                                                           |

| 項次 | 審查意見                                                                    | 回覆辦理情形                                                                                                                 |
|----|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 6  | 電腦視覺變位監測儀的 24 小時監測,其晚上或下雨時之氣候因素,是否會影響判釋的準確性。另,其告警機制是用 LINE 通知或其他方法。     | 主要受到溫度與光線之影響,目前下小雨情況仍可判釋,在 24 小時內會有週期性的變化量,約在 5 公分之間跳動。另告警之推播是用 TELEGRAM 通知,並另有 IoT 展示系統呈現每 10 分鐘更新之監測成果。              |
| 7  | 自製地震儀於實驗室中之精度與頻率分析與振動台一致,但尚缺少現地架設之資料佐證,請盡速架設於現地以利收集資料與驗證地震儀應用於崩塌監測之可行性。 | 感謝審查委員意見,目前已於 10 月底架設於新竹秀巒崩塌地監測小屋中,目前接收之設定是每分鐘一筆 XYZ 加速度值,若有三級震度以上,則啟動每秒 100 筆資料紀錄,並可設定持續記錄 60 秒至 150 秒。持續驗證其穩定性以及可靠性。 |
| 8  | 內容中現地試驗為新竹秀巒,分析結果為南投九份二山,請確認說明。                                         | 期中報告因為尚未架設於新竹秀巒崩塌地,因此以南投九份二山現地儀器進行說明與預計示意圖。期末報告已修正為新竹秀巒崩塌地監測情形與成果。                                                     |

### 附錄三、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形

| 項次        | 審查意見                                                              | 回覆辦理情形                                                      |
|-----------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 報告內容審查意見： |                                                                   |                                                             |
| 1         | 覘標位置如何選定？在低能見度（如濃霧）或夜間環境下，影像辨識效能是否會衰減？若需即時掌握崩坍移動範圍或深度，是否有建議的監測方式？ | 感謝審查委員意見，覘標位置主要考量可能崩塌邊坡與攝影機可以看得到的位置放置。                      |
| 2         | 覘標採用 UAV 設置，是否可以穩固設置？                                             | 覘標設計約 2 公斤，利用 UAV 確實需有專業飛手放置，目前放置位置可即時監測並有穩定之放置於下邊坡處。       |
| 3         | 整合影像與振動訊號具創新性，建議能補充漏警率之量化評估。                                      | 感謝審查委員意見，目前放置時間僅約 1 個半月，尚無漏警率，待長期監測以及汛期之監測結果再行統計。           |
| 4         | 在低能見度或夜間環境下，影像辨識效能是否衰減？                                           | 所有光學設備皆會受到溫度與光線之影響，目前在夜間仍可判釋，在 24 小時內會有週期性的變化量，約在 5 公分之間跳動。 |

| 項次 | 審查意見                                                                 | 回覆辦理情形                                                                              |
|----|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 5  | LED 規標為立方體型式，是否會因落石打擊規標而產生移動，進而誤判為崩塌。（立方體規標並非固定於坡面上，可能因地震或外來落石而影響判斷） | 感謝審查委員意見，是有可能誤判，但本設計的目的就是要規標受外力移動或掉落，藉由推播 TELEGRAM 通知異常變動，再利用拍攝影片實際觀看現地情形，發揮即時告警功能。 |
| 6  | 為什麼不選擇設置在地面上？                                                        | 本設計的目的就是要規標連動崩塌區一起位移或掉落，藉由推播 TELEGRAM 通知異常變動，再利用拍攝影片實際觀看現地情形，發揮即時告警功能。              |
| 7  | 訊號傳送距離為何？採用 AI 自動判斷模式的可行性如何？                                         | 本設計以 4G 傳輸，故無訊號傳送距離問題，但須先檢測現地 4G 訊號是否良好。本設計的是以 AI 自動影像判釋，目前是可行的。                    |
| 8  | 相機受天候影響（如雨天、陰天）時，對研究結果有何影響？                                          | 光學設備皆會受到溫度與光線之影響，目前在夜間以及小雨仍可判釋，在 24 小時內會有週期性的變化量，約在 5 公分之間跳動。                       |
| 9  | 是否有可能以一般 CCD 攝影機達到相同效果？                                              | 原理是可以達到相同效果。但是 CCD 需有電腦主機配合 AI 判釋。本研究的電腦主機就是樹莓派，達到類似邊緣運算之功能，即時判釋、即時傳輸、即時告警。         |

| 項次 | 審查意見                                | 回覆辦理情形                                                                                 |
|----|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| 10 | 是否曾先於室內進行砂盒模擬實驗以確認可行性？              | 有於室內進行砂盒模擬實驗，詳報告書 2-34、35 頁。                                                           |
| 11 | 2 kg 規標是否可能因放置於不穩定平面而產生滑動？          | 目前放置位置可即時監測並有穩定之放置於下邊坡處。若規標連動崩塌區一起位移或掉落，藉由推播 TELEGRAM 通知異常變動，再利用拍攝影片實際觀看現地情形，發揮即時告警功能。 |
| 12 | 單眼影像傳輸的頻寬需求是否很高？                    | 單眼影像傳輸的頻寬需要很高，故，本儀器設計，影像僅用於 XYZ 變位值判釋，影像傳輸僅以每一小時傳送一張相片至雲端，但 XYZ 變位值是每十分鐘就傳送每秒至少一筆的變位值。 |
| 13 | 是否有可能立即投入現場監測？尚需克服哪些困難環境？           | 目前在秀巒崩塌區已經 24 小時長期觀測與進行告警機制運作。目前已採用太陽能供電與 4G 傳輸，若現地有市電或有線網路，將更提高供電與傳輸之穩定性。             |
| 14 | 在雨量較大或山區霧氣較重時，對規標的觀測有何影響？是否會造成觀測困難？ | 所有光學設備皆會受到溫度與光線之影響，目前在夜間與小雨仍可判釋，在 24 小時內會有週期性的變化量，約在 5 公分之間跳動。                         |

| 項次 | 審查意見                                                                | 回覆辦理情形                                           |
|----|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 15 | 地動儀之觀測資料與電腦視覺儀器所取得之資料，係為獨立或具相關性，請加以說明；建議後續可建立觀測與警示之 SOP，以利了解實務應用狀況。 | 目前設計是獨立運作、獨立告警機制，但是展示網頁資訊是在同一網站。後續會建立觀測與警示之 SOP。 |
| 16 | 是否有同時布設複數規標的可能？                                                     | 目前室內實驗室可以一個鏡頭同時判釋 4 個規標，但現地實驗尚未測試，將持續精進。         |
| 17 | 振動台測試加速度達 5 級時，Geophone 是否已達飽和？                                     | 目前測試尚未達到飽和，學校振動台上限是 200gal，約 5 強震度。本儀器仍可測到相同頻率。  |
| 18 | 地動儀的設置位置是在邊坡上，還是與電腦視覺設備箱設置在一起？是否必須設於邊坡上才具有代表性？                      | 地動儀的設置與電腦視覺設備箱設置在一起，確實設置在上邊坡處將更有意義，持續精進。         |
| 19 | 加速計於邊坡上的監測方式，應可類比分析地震造成同震位移之程序。                                     | 感謝審查委員意見，確實設置在上邊坡處將更有意義，且可分析地震造成之時頻分析，將持續精進。     |

附錄-6

| 項次 | 審查意見                                                                          | 回覆辦理情形                                                                                               |
|----|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 20 | 利用規標恐難以達成永續監測之目標，建議討論重新設置所需之成本。                                               | 本設計的目的就是要規標連動崩塌區一起位移或掉落，藉由推播 TELEGRAM 通知異常變動，再利用拍攝影片實際觀看現地情形，發揮即時告警功能。所以目的性不同，但若規標掉落，在放置一個，仍可達到持續監測。 |
| 21 | 一般數值模式在低流量條件（Q2、Q5）下可有較佳表現，如何證實其於中、高流量條件下同樣適用？<br>22. 過去所建立之輸砂公式，其實測流量位於何種量級？ | 21、22 項次之兩個問題，非本計畫之研究範圍，應為誤植委員意見。                                                                    |
| 22 | 一般數值模式在低流量條件（Q2、Q5）下可有較佳表現，如何證實其於中、高流量條件下同樣適用？<br>22. 過去所建立之輸砂公式，其實測流量位於何種量級？ | 21、22 項次之兩個問題，非本計畫之研究範圍，應為誤植委員意見。                                                                    |
| 23 | 先進儀器之研究對崩塌地即時預警防災具有實務助益，且 AI 告警機制有助於時效掌握。                                     | 感謝審查委員肯定，希望能安裝於更多崩塌地，發揮其目標功能。                                                                        |
| 24 | 研究成果可回饋實際應變作業操作；相關觀測技術多為自主研發，具申請專利之潛力。                                        | 感謝審查委員肯定，持續努力研發與申請專利。                                                                                |