

# 樹莓派與六軸感測器之低成本即時地震監測系統建置與學期成果簡報

Project SEISMOS v2.0 & 課程學習回顧

報告人：lin diego (地生二)

學號：u11310019

課程：地震學與社會應用

June 2026

# 緒論(Introduction)

## 研究背景與動機

- 地震是台灣最主要的地質災害，建立高密度觀測網極為重要。
- 傳統強震儀成本高昂，難以進行超高密度的社區型布設。
- 微機電感測器(MEMS) 與單板電腦(SBC) 的成熟，為低成本、分布式的邊緣運算地震觀測提供了全新契機。

## 專案目的與核心任務

- 自主研發基於樹莓派與MPU6050的**SEISMOS v2.0** 即時監測站。
- 深入整合全學期十份作業，涵蓋：
  - 地震學基本理論與波相識別
  - SmartSolo 野外實地觀測與ObsPy 數據處理
  - 國震中心參訪與抗震減災實務
  - 地震預報、預測與核子試爆監測

# 專案概述：低成本邊緣地震觀測站

## 開發背景與核心概念

- 傳統強震儀造價昂貴，難以進行極高密度的都市密集布設。
- **邊緣運算(Edge Computing)** 興起：利用樹莓派進行在地即時信號處理，隔絕高頻噪聲，僅上傳震波特徵，降低傳輸頻寬與延遲。
- **本專案成果**：完成硬體接線、感測器校正、互補濾波姿態解算、零相位高通濾波、STA/LTA 觸發、SQLite3 本地儲存與Discord 警報警示鏈。

## 技術堆疊(Tech Stack)

- **硬體**：Raspberry Pi 4B, MPU6050 六軸感測器
- **通訊**：I2C (Python smbus2 驅動)
- **運算**：NumPy, SciPy (零相位巴特沃斯)
- **推播**：Discord Webhook (HTTP POST)

Table: 樹莓派4B 與MPU6050 I2C 接線對照

MPU6050	樹莓派4B	實體Pin	功能
VCC	3.3V	Pin 1	電源(3.3V)
GND	GND	Pin 6	接地
SDA	GPIO 2	Pin 3	數據線
SCL	GPIO 3	Pin 5	時脈線

## I2C 通訊機制與WHO\_AM\_I 驗證

- 樹莓派與MPU6050 間透過時脈線(SCL) 與數據線(SDA) 進行雙向串列傳輸。
- 初始化時強制讀取暫存器WHO\_AM\_I (0x75)，若回傳值不為0x68 則發出RuntimeError，保證硬體電路穩定連接。

# 數位訊號處理與姿態解算

## 1. 靜態零點校正(Static Calibration)

啓動時採樣  $N = 200$  個點計算平均偏差  $a_{\text{offset}}$ 。Z 軸扣除重力分量：

$$a_{\text{offset},z} = \left( \frac{1}{N} \sum a_z \right) - 1.0 \text{ g}$$

## 2. 互補濾波姿態解算(Roll/Pitch)

利用加速度計校正陀螺儀低頻漂移，濾波係數  $\alpha = 0.96$ ：

$$\text{Roll}_k = \alpha(\text{Roll}_{k-1} + g_x \cdot dt) + (1 - \alpha)\text{Roll}_{\text{acc}}$$

避免地震儀在傾斜狀況下發生重力串擾，實測 Roll 為  $-0.1^\circ$ ，Pitch 為  $-2.0^\circ$ 。

## 3. 零相位巴特沃斯高通濾波

採用 4 階巴特沃斯高通濾波器 ( $f_c = 0.1 \text{ Hz}$ )，以 `filtfilt` 雙向濾波消除相位延遲。

## STA/LTA 比值觸發演算法

- **短週期窗口(STA)**：0.5 秒，反映即時地動振幅。
- **長週期窗口(LTA)**：10 秒，反映環境背景雜訊。
- 當比值 $\text{Ratio} = \text{STA}/\text{LTA} > 3.5$  時觸發事件，保存前後15 秒波形。

## PGA 計算與中華民國氣象署震度級別

- 計算水平加速度  
度 $\text{PGA}_h = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} \times 980.665 \text{ (Gal)}$ 。
- **氣象署(CWA) 震度對照：**
  - $\text{PGA} < 8.0 \text{ Gal}$ ：1-2 級(微/輕震)
  - $80.0 \sim 140.0 \text{ Gal}$ ：4 級(中震)
  - $250.0 \sim 400.0 \text{ Gal}$ ：5 強震
  - $400.0 \sim 800.0 \text{ Gal}$ ：6 弱/6 強(烈震)

## 五面板地震分析圖(matplotlib)

事件觸發後，系統自動繪製包含以下內容的科學圖：

- 1 三軸加速度高通濾波後波形。
- 2 STA/LTA 能量比值演變曲線。
- 3 FFT 振幅功率頻譜，標註主頻(Dominant Hz)。
- 4 陀螺儀角速度曲線。
- 5 數據規格表(PGA, 震度級別, 姿態角)。

## Discord Webhook 警報推送

- 邊緣端透過requests 將分析圖與地動規格，包裝成Embed 豐富卡片。
- 實時上傳分析圖至Discord 防災頻道，提供秒級的災情回報。

## 實測數據與雜訊探討

- 實測捕捉到746.97 Gal，主頻高，判定為人為走動碰桌的「人文雜訊」。
- 說明地震儀必須防震固定於bedrock 上。

# 地震學研究範疇與能量衰減機制

## 地震學三大核心領域(Seismology Triangle)

- **震源(Source)**：斷層破裂幾何、發震位置、震級與應力釋放。
- **介質(Medium)**：震波路徑與速度反演（越深越快，Snell 折射彎曲，CMB 反射ScS 核心波）。
- **接收器(Receiver)**：精密觀測網布設，記錄Seismogram。

## 地震波能量衰減之三大機制

經驗衰減公式： $a(M, r) = b \cdot 10^{cM} \cdot r^{-d}$ 。衰減成因：

- ① **幾何擴散(Geometric Spreading)**：波陣面球面面積擴大，能量密度正比於 $1/r^2$ 。
- ② **內在衰減(Intrinsic Attenuation)**：岩石非完美彈性體，分子摩擦將波動能轉為熱能耗散。
- ③ **散射(Scattering)**：地殼裂隙與斷層界面造成震波多向混亂反射折射。

# Seismic Hazard 與 Seismic Risk 的嚴格區別

## 觀念對照：危害與風險

### ● Seismic Hazard (地震危害)：

- 大自然的地質事實（如聖安德烈斯斷層、台灣花東縱谷斷層的強震機率）。
- 人類無法改變。地表最大加速度機率分佈(Hazard Map)。

### ● Seismic Risk (地震風險)：

- 地震對人類社會造成的具體損失（傷亡人數、財物損失）。
- 公式： $\text{Risk} = \text{Hazard} \times \text{暴露量(Exposure)} \times \text{脆弱性(Vulnerability)}$ 。
- 人類可以改變：透過提高耐震法規與結構品質，可降低Vulnerability，進而減輕Risk。

## 東西部地殼能量傳遞差異

美國西部板塊活動劇烈，地殼破碎且溫度高，衰減高，餘震震度範圍集中；東部地殼古老低溫堅硬，衰減極低，同等規模下震波傳遞範圍顯著較廣。

## 野外布建實務操作(科學館前草地)

- **整地挖坑**：排除表土雜物，使儀器鋼釘與土壤良好耦合。
- **水平氣泡校正**：消除重力傾斜對觀測分量造成的系統偏差。
- **方位角校正**：利用指北針精確對齊正北(Azimuth)，確保三分量方向性無誤。

## Python ObsPy 數據分析

- 下載4958 測站三分量資料，進行波形與時頻分析。

## 訊號特徵判讀

- **環境背景微震**：振幅維持在 $\pm 2.5$ ，主頻集中在 $0 \sim 10$  Hz，符合城市環境低頻微震。
- **脈衝型人為干擾**：突發的強烈振幅( $\pm 10 \sim \pm 15$ )，在時頻圖上呈現一條貫穿 $0 \sim 50$  Hz 的高能量垂直亮帶，屬於行人踩踏草地的高頻近距離人為雜訊。

## 101 大樓阻尼球(TMD) 與遠震無感之謎

TMD 主要任務為「減緩強風吹拂產生的低頻搖晃」。101 大樓基樁深入地底80 m 岩盤，整體剛性極強。遠方地震傳至台北盆地時高頻多已衰減，且101 大樓固有振動週期長，不易與遠震共振，配合TMD 的消能吸震，使大樓內人員對遠震大都無感。

## 反應譜與耐震設計準則

- **建築物反應譜**：不同固有週期的結構受特定地震波輸入產生的最大動態加速度/位移圖表，是計算設計地震力的核心工具。
- **減災準則**：「小震不壞、中震可修、大震不倒」，利用結構韌性保障大眾安全。

## 高風險結構特徵

- ❶ **底層軟弱層**：一樓因商業挑高或拆除隔間牆，導致勁度與剪力強度不足，地震時易在此層崩塌（俗稱軟腳蝦）。
- ❷ **結構幾何不對稱**：L 型或U 型立面/平面，質心與剛心嚴重不重合，地震時產生強烈扭轉效應。
- ❸ **老舊結構**：建於921 地震抗震規範修訂前的房屋。

## 抗震NG 行為

- 任意敲毀大樓底層之承重牆、剪力牆或柱子。
- 頂樓違章加蓋：增加建物上部重量，拉高重心，大幅加重底層柱子的側向與垂直彎矩負擔。
- 施工品質不良：箍筋未落實 $135^\circ$  彎鉤，或間距過大，導致梁柱頭缺乏剪力韌性。

# 預警、預報與預測之區別

## 地震預報(Forecasting)

- 長期統計機率（如30 年內發震機率）。
- 用於耐震法規制定。

## 地震預測(Prediction)

- 精確時間、地點、規模。
- 目前地學界公認「短期預測是不可能的」，破裂具強隨機性與非線性。

## 地震空區假說(Seismic Gap)

- 認為長期未發生地震的活動斷層區段是未來發震高危區。
- **挑戰(Palsett Creek 沉積層定年)**：古地震具有「叢集性(Clustering)」，並非完美的週期性規律。
- **支持案例**：1989 年Loma Prieta 地震填補了聖安德烈斯斷層的空區。

# 地震學監測地下核子試爆

## 1. 波形特徵差異

- **地下核爆**：集中球狀膨脹點源。向外推擠產生極大、尖銳的P波，幾乎沒有剪力成分，故S波與表面波微弱。
- **天然地震**：斷層剪切錯動。P波振幅相對小，但會產生巨大的S波與能量充沛的長週期表面波。

## 2. 當量估算

- 地震學家能依據觀測震級與振幅，精確反推核爆產生的當量能量（以KT噸TNT為單位）。

## 3. $m_b - M_s$ 鑑別散佈圖

- 計算事件之體波震級( $m_b$ )與表面波震級( $M_s$ )。
- 核爆落在 $m_b$ 偏高區，天然地震落在 $M_s$ 偏高區，兩者界線分明，是禁核試條約監測的核心依據。

## Hugging Face 互動式Web 開發

- 1 地震學第3章解說網頁：利用ECharts 動態演示PREM 模型、折/反射震測波形與陰影區。
- 2 初動與震源機制繪圖系統：Schmidt Net 投影，支持P-file 極性解析，滑桿控制與手繪沙灘球大圓弧，自動辨別斷層類型。

## AI 協作 workflow 實作路徑

- **Antigravity**：預處理並分割長PDF 教科書，防資訊遺漏。
- **Python Notebook**：高速提取數據特徵與公式。
- **Gemini**：優秀邏輯分析，學術語優化與大綱整理。
- **Genspark**：快速視覺化簡報架構。

## 學期總結

- 從課本上抽象的公式（Snell's Law、反應譜、震相），到野外親手在草皮布建SmartSolo 地震儀。
- 從實驗室數據處理，到自主動手實作樹莓派+ MPU6050 地震監測站與Discord 即時推播。
- 這堂課不僅深化了我們對地震物理的理解，更實踐了將地科與嵌入式軟硬體、資料科學、Web 開發跨領域融合的强大能力。

**感謝聆聽，請指導！**