

# 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報告

Project SEISMOS v2.0 & 學期回顧

學生姓名：lin diego

學號：u11310019

班級年級：地生二

課程名稱：地震學與社會應用

June 2026

# Contents

<b>1 緒論(Introduction)</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景與動機	1
1.2 專案目的與核心任務	1
1.3 報告章節架構	1
<b>2 SEISMOS 樹莓派即時地震監測系統v2.0</b>	<b>3</b>
2.1 邊緣端硬體架構與I <sup>2</sup> C 接線	3
2.2 感測器校正與數據採樣	3
2.3 姿態解算與互補濾波器	4
2.4 數位濾波與訊號處理	4
2.5 STA/LTA 地震事件觸發演算法	4
2.6 數據持久化與SQLite3 串接	5
2.7 五面板分析圖生成與Discord 即時推播	5
2.8 實測數據分析與環境雜訊探討	6
<b>3 地震學核心理論基礎與公式解析</b>	<b>7</b>
3.1 地震學研究的三大範疇	7
3.2 震波識別與波徑彎曲原理	7
3.3 Seismic Hazard 與Seismic Risk 的科學區別	8
3.4 地震波能量衰減之三大物理機制	8
3.5 地質危害圖與東西部傳遞差異	9
<b>4 野外實地觀測與耐震工程實務</b>	<b>10</b>
4.1 SmartSolo 節點式地震儀野外布建	10
4.2 測站數據ObsPy 時頻特徵分析	10
4.3 國家地震工程研究中心參訪與抗震原理	10
4.4 高風險結構物與耐震NG 事項	11
<b>5 地震預報、預警與安全監測</b>	<b>12</b>
5.1 地震預報與預測的本質差異	12
5.2 Seismic Gap 地震空區假說之檢驗	12
5.3 地震學於地下核子試爆監測之應用	12
5.4 互動式震源機制解與初動投影網開發	13
<b>6 學期總結與未來展望</b>	<b>14</b>
6.1 AI 協作工作流實作路徑	14
6.2 學習成果總結與致謝	14

## Abstract

本報告系統性地整理了2026年春季學期「地震學與社會應用」課程的研究成果與學習歷程。報告核心分為兩大部分：第一部分為自主設計並實作的**SEISMOS v2.0 即時地震監測系統**，其基於樹莓派(Raspberry Pi 4B)平台與六軸慣性加速度計(MPU6050)，利用I2C協定進行資料傳輸。系統內建零點校正、互補濾波姿態解算、零相位巴特沃斯(Butterworth)高通濾波、以及即時STA/LTA觸發演算法，並整合SQLite3本地資料庫與Discord Webhook警報推播機制，實現了邊緣運算地震觀測站之原型開發。第二部分則為全學期十份課程作業的詳細回顧，涵蓋地震學三大範疇（震源、介質、接收器）之物理基礎、SmartSolo野外實地觀測布建、國家地震工程研究中心參訪耐震設計實務、地震預報與預測之區別、核試爆監測原理，以及於Hugging Face平台上部署的兩個互動式教學與繪圖Web系統。本學期的學習不僅深化了地震學的物理本質理解，亦培養了地球科學、嵌入式軟硬體與資料科學跨領域融合的實作能力。

# 第1章 緒論(Introduction)

## 1.1 研究背景與動機

地震是全球及台灣最主要的地質災害之一。為了減少地震造成的風險 (Seismic Risk)，發展高密度的即時地震觀測系統至關重要。然而，傳統觀測站設備成本昂貴、布建繁瑣，難以在都市中進行超高密度的部署。隨著微處理器與微機電系統 (MEMS) 的發展，低成本的物聯網與邊緣運算硬體為新型地震監測提供了全新路徑。本研究嘗試利用消費級晶片與邊緣運算平台，實現具備即時震波處理與自動通報功能之低成本監測站。

## 1.2 專案目的與核心任務

本專案主要目的在於利用樹莓派4B 與MPU6050 感測器，自主開發一套低成本的邊緣即時地震監測站原型 (SEISMOS v2.0)。此外，結合本學期十份作業，回顧並探問了地震學核心理論 (如震波相、Snell 折射、衰減機制、Hazard vs Risk)、野外觀測 (SmartSolo)、結構減震 (101 大樓TMD 與反應譜) 及核子試爆監測等主題，最終將其整合為完整的學術成果報告。

## 1.3 報告章節架構

本報告結構如下：

- **第一章：緒論(Introduction)**：介紹研究背景、專案目的與報告架構。
- **第二章：SEISMOS 樹莓派即時地震監測系統v2.0**：說明邊緣監測系統之硬體配置、數位濾波、互補濾波姿態解算與即時STA/LTA 觸發演算法之實現。
- **第三章：地震學核心理論基礎與公式解析**：探討地震學三大研究範疇、波徑彎曲、Seismic Hazard 與Seismic Risk 之科學區別、以及能量衰減之三大物理機制。
- **第四章：野外實地觀測與耐震工程實務**：記錄SmartSolo 節點式地震儀布建、ObsPy 數據時頻圖特徵分析、國震中心參訪、台北101 大樓TMD 原理以及結構耐震NG 事項。
- **第五章：地震預報、預警與安全監測**：區分地震預報與預測、檢驗地震空區 (Seismic Gap) 假說，說明地下核子試爆監測原理以及於Hugging Face 部署的Web 互動系統。

- **第六章：學期總結與未來展望：**總結全學期成果與AI 協作 workflow 實踐心得。

# 第2章 SEISMOS 樹莓派即時地震監測系統v2.0

## 2.1 邊緣端硬體架構與I<sup>2</sup>C 接線

本專題旨在利用低成本的消費級硬體建構具備邊緣運算能力的即時地震監測站。系統主控台採用Raspberry Pi 4B (配置4GB RAM)，透過I<sup>2</sup>C 序列通訊協定 讀取六軸感測器晶片InvenSense MPU6050 的加速度與角速度數據。

硬體初始化時，系統強制讀取MPU6050 的WHO\_AM\_I 暫存器(位址0x75)，驗證其回傳值是否為預期的0x68，以確保實體耦合與通訊鏈路的穩定性。I<sup>2</sup>C 實體接線配置如表 2.1 所示。

Table 2.1: Raspberry Pi 4B 與MPU6050 I<sup>2</sup>C 實體接線對照表

MPU6050 針腳	樹莓派4B 針腳	實體編號(Pin)	功能說明
VCC	3.3V	Pin 1	電源輸入(3.3V)
GND	GND	Pin 6	系統接地
SDA	GPIO 2	Pin 3	I <sup>2</sup> C 數據傳輸線
SCL	GPIO 3	Pin 5	I <sup>2</sup> C 時脈訊號線

## 2.2 感測器校正與數據採樣

系統預設採樣頻率設定為 $f_s = 50$  Hz (時間步長 $dt = 0.02$  秒)。為了消除感測器本身的製造偏差與重力加速度對加速度計的靜態影響，系統在啟動時會進行靜態零點校正(Static Zero Calibration)。

系統會連續讀取 $N = 200$  個靜態採樣點，並計算各軸的平均偏差值 $a_{\text{offset}}$  與 $g_{\text{offset}}$ ：

$$a_{\text{offset},i} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N a_{i,k} \quad (i \in \{x, y\}) \quad (2.1)$$

對於垂直向 (Z 軸)，由於其常態承受地表重力加速度(1.0 g)，故校正公式需扣除重力分量：

$$a_{\text{offset},z} = \left( \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N a_{z,k} \right) - 1.0 \text{ g} \quad (2.2)$$

後續讀取的原始數據皆須扣除此偏差值，以獲取淨地動加速度。

## 2.3 姿態解算與互補濾波器

為了避免地震儀水平傾斜造成各軸加速度分量受到重力串擾（Cross-talk），系統運作中實時進行Roll（翻滾角）與Pitch（俯仰角）的姿態解算。本系統使用**互補濾波器(Complementary Filter)**結合加速度計估算之靜態姿態與陀螺儀積分之動態姿態：

$$\text{Roll}_k = \alpha(\text{Roll}_{k-1} + g_x \cdot dt) + (1 - \alpha)\text{Roll}_{\text{acc}} \quad (2.3)$$

$$\text{Pitch}_k = \alpha(\text{Pitch}_{k-1} + g_y \cdot dt) + (1 - \alpha)\text{Pitch}_{\text{acc}} \quad (2.4)$$

其中，濾波權重權衡係數設定為 $\alpha = 0.96$ ，以隔絕陀螺儀的低頻漂移與加速度計的高頻噪聲。加速度計所計算的即時角度公式為：

$$\text{Roll}_{\text{acc}} = \text{atan2}(a_y, \sqrt{a_x^2 + a_z^2}) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (2.5)$$

$$\text{Pitch}_{\text{acc}} = \text{atan2}(-a_x, \sqrt{a_y^2 + a_z^2}) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (2.6)$$

## 2.4 數位濾波與訊號處理

為了過濾直流漂移與環境低頻干擾，採樣數據會送入**4階零相位巴特沃斯(Butterworth)高通濾波器**，截止頻率設定為 $f_c = 0.1$  Hz。利用雙向濾波（Zero-phase filtering, Python程式碼中之`filtfilt`）消除濾波器所產生的相位延遲，確保發震時間與波形特徵在時間軸上的絕對精準度。

對於地動強度的量化，系統實時計算水平向最大地動加速度( $\text{PGA}_h$ )與垂直向最大地動加速度( $\text{PGA}_v$ )：

$$\text{PGA}_h = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} \times 980.665 \quad (\text{Gal}) \quad (2.7)$$

$$\text{PGA}_v = |a_z| \times 980.665 \quad (\text{Gal}) \quad (2.8)$$

## 2.5 STA/LTA 地震事件觸發演算法

本系統採用經典的**短週期平均/長週期平均比值法(STA/LTA Algorithm)**來進行地震事件的自動偵測。STA反映瞬時震波能量，LTA代表背景雜訊能量：

$$\text{STA}(n) = \frac{1}{N_{\text{sta}}} \sum_{i=n-N_{\text{sta}}+1}^n y^2(i) \quad (2.9)$$

$$\text{LTA}(n) = \frac{1}{N_{\text{lta}}} \sum_{i=n-N_{\text{lta}}+1}^n y^2(i) \quad (2.10)$$

系統設定短週期窗口為0.5秒 ( $N_{\text{sta}} = 25$ )，長週期窗口為10.0秒 ( $N_{\text{lta}} = 500$ )。當即時能量比值滿足下式時觸發記錄：

$$\text{Ratio}(n) = \frac{\text{STA}(n)}{\text{LTA}(n)} > \text{Threshold} \quad (\text{預設值}3.5) \quad (2.11)$$

一旦比值超越3.5，系統即判定為地震事件爆發，會擷取發震前後共15.0秒的波形，並啟動為期20.0秒的cold-down冷卻時間以避免重複觸發。

## 2.6 數據持久化與SQLite3 串接

觸發的地震事件將會自動寫入本地SQLite3 資料庫 (`seismo_events.db`)，儲存欄位包含：發震時間戳記(Timestamp), 最大PGA, 水平與垂直向PGA, 對應的氣象署(CWA) 震度等級, 訊號優勢頻率, STA/LTA 峰值以及發震時的姿態角度 (Roll/Pitch)。這為邊緣端提供了本地數據自我維護能力。

## 2.7 五面板分析圖生成與Discord 即時推播

當監測系統觸發事件後，會自動調用Python 的`matplotlib` 套件，以135 DPI 解析度即時繪製一張黑底風格的專業科學分析圖（稱為五面板分析圖，如圖 2.1 概念所示）。面板包含：

1. 三軸加速度隨時間變化之濾波波形；
2. STA/LTA 比值曲線與觸發門檻線；
3. 經由快速傅立葉變換(FFT) 得到的加速度功率頻譜，並標註優勢頻率(Dominant Frequency)；
4. 陀螺儀三軸角速度波形；
5. 關鍵指標規格摘要表。

繪圖完成後，邊緣端腳本會隨即以非同步方式，將警報數據（含最大PGA, 震度級別, 姿態角與主頻）包裝成**Discord Embed** 卡片，並透過`requests` 庫呼叫Discord Webhook，將該五面板分析圖作為附件推播至防災回報頻道（如圖 2.2 概念所示）。

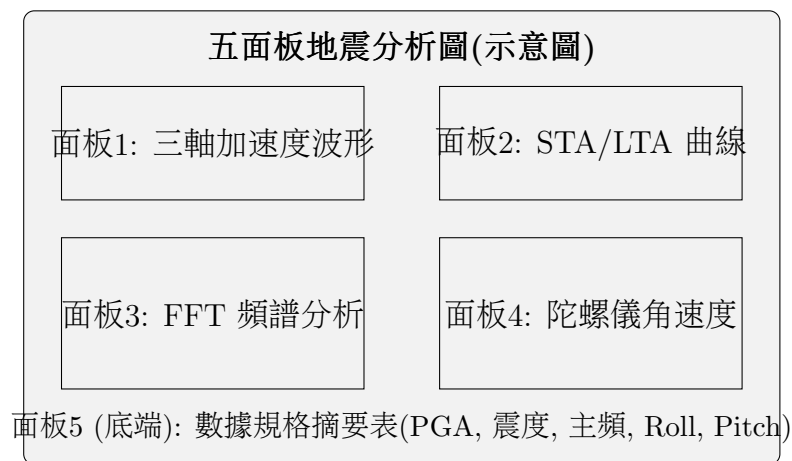


Figure 2.1: 實時生成之五面板地震事件分析圖板塊配置



Figure 2.2: Discord Webhook 即時警報推送卡片結構

## 2.8 實測數據分析與環境雜訊探討

在實驗室桌面進行系統測試時，系統捕捉到了高達746.9 Gal (對應CWA 震度等級6 強)的極大加速度讀值。然而，經過對五面板圖中三軸加速度的波形與時頻分析，發現其呈現出極高的頻率成分。

這主要是因為儀器置於辦公桌面，容易受到周圍人員走動、碰撞等高頻人文噪聲(Human-induced noise) 干擾。由此項實測結果可證實：在實際地震監測網布署中，地震儀必須深入挖掘並穩固固定於地表或基盤岩體上，以阻絕近距離的環境高頻干擾，確保觀測資料的科學價值。

# 第3章 地震學核心理論基礎與公式解析

## 3.1 地震學研究的三大範疇

地震學(Seismology) 是一門研究固體地球內彈性波（聲音波）的科學。其核心研究架構由三大範疇組成一個「三角關係」的物理觀測系統，如圖 3.1 所示：

1. **震源(Source)**：研究地震的成因。包含定位震央與震源深度、破裂之物理機制（斷層錯動幾何），以及釋放的能量等級（地震規模）。
2. **介質(Medium)**：將地震波視為地球內部的「X光」。藉由震波穿過介質時產生的速度變更、偏極化與能量衰減，反演地球內部的密度分層、化學組成成分與相變（例如外地核的液態特徵）。
3. **接收器(Receiver)**：設計與布署高精度的地震儀網絡，三維地記錄地表的運動向量，為震源與介質的研究提供最原始的觀測波形（Seismogram）。

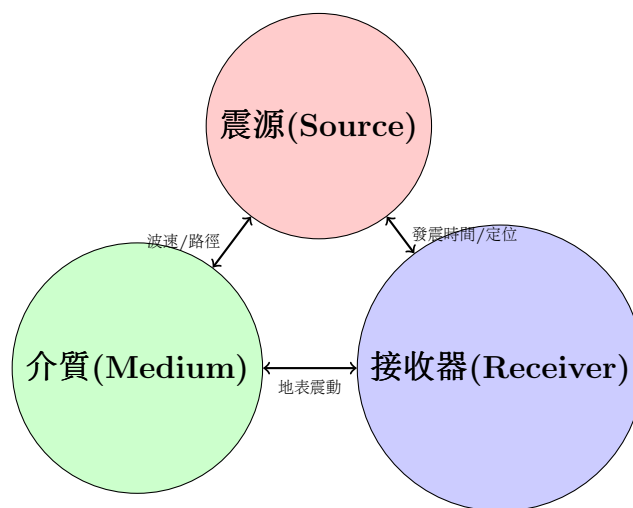


Figure 3.1: 地震學研究範疇之三角物理觀測系統

## 3.2 震波識別與波徑彎曲原理

典型震波圖(Seismogram) 上可識別出三種主要震相：

1. **P波(Primary Wave)**：縱波（壓縮波），波速最快，最先抵達測站。

2. **S波(Secondary Wave)**：橫波（剪力波），波速次之，無法穿過液態介質。
3. **表面波(Surface Wave)**：傳播於地表，波速最慢但振幅最大，是造成地表結構物破壞的主因。

由於地球內部岩石密度與壓力隨深度遞增，導致**震波速度「越深越快」**。依據司乃耳定律(Snell's Law)：

$$p = \frac{\sin i}{v} = \text{constant} \quad (3.1)$$

其中 $p$ 為射線參數， $i$ 為入射角， $v$ 為波速。當 $v$ 隨深度增加時，入射角 $i$ 必須隨之增大以維持 $p$ 值守恆，這使得震波路徑無法呈直線傳播，而是向水平方向彎曲，最終「回彈」折射回地表，被遠距離的測站所接收。

### 3.3 Seismic Hazard 與Seismic Risk 的科學區別

在地震學與防災工程領域中，Hazard (危害) 與Risk (風險) 是兩項本質相異的概念：

- **Seismic Hazard (地震危害)**：屬於自然的地理與地質事實。描述特定地點在給定時間內，發生特定地動強度（如PGA）的機率。其完全受控於板塊運動與斷層幾何，**人類無法改變Hazard**。
- **Seismic Risk (地震風險)**：描述地震對人類社會造成的預期損害程度（如人員傷亡、經濟損失）。其概念公式為：

$$\text{Risk} = \text{Hazard} \times \text{暴露量(Exposure)} \times \text{脆弱性(Vulnerability)} \quad (3.2)$$

其中暴露量代表人口與財產密度，脆弱性代表建築與基礎設施的避震抗震品質。**人類雖無法改變Hazard，但可透過加強耐震設計規範與都市減災措施來降低Risk**。

### 3.4 地震波能量衰減之三大物理機制

為了描述最大地動加速度 $a$ 隨震級與距離的衰減特徵，地震學家使用經驗公式：

$$a(M, r) = b \cdot 10^{cM} \cdot r^{-d} \quad (3.3)$$

這說明加速度隨規模 $M$ 指數上升，但隨距離 $r$ 的增加而衰減。其主要物理機制有三：

1. **幾何擴散(Geometric Spreading)**：波陣面呈球面由源向外擴展，球面面積正比於 $r^2$ 。由於總能量守恆，單位面積分配到的能量密度正比於 $1/r^2$ 。這是地動振幅隨距離增加而降低的主因。
2. **內在衰減(Intrinsic Attenuation / Anelasticity)**：地球岩石並非完美彈性體。震波通過使岩石晶格產生往復形變時，岩石內部分子摩擦會將彈性波動能轉換為微小的熱能，造成能量的物理耗散。
3. **散射(Scattering)**：地殼富含斷層帶，岩脈與裂隙等不均勻介面。震波遇到這些障礙物時會發生複雜的多方向反射與折射，使得原始相干的震波能量在空間中被發散且稀釋。

### 3.5 地質危害圖與東西部傳遞差異

地質危害圖(Hazard Map) 常以「未來50 年內有2% 機率會被超越的最大地表加速度」作為著色基礎，為抗震設計力提供計算基準。

在美國本土，相同震級的地震在西部與東部產生的影響範圍有極大差異。美國西部（如加州）由於地體活動劇烈、斷層破碎且地溫較高，介質的內在衰減係數高，震波能量消散極快；反之，美國東部地殼古老、低溫且完整性高，衰減極低，使得震波能傳遞至極遠的距離，影響範圍遠較西部廣泛。

# 第4章 野外實地觀測與耐震工程實務

## 4.1 SmartSolo 節點式地震儀野外布建

野外地震學觀測的首要挑戰在於確保感測器與地表有良好的物理接觸。本學期在科學館前草地進行了SmartSolo 節點式地震儀的實地部署試驗。實務操作步驟如下：

1. **整地挖坑**：挖除表土草根，露出較為緊實的土層，使儀器鋼釘能與土壤達成良好耦合。
2. **水平校正**：觀察儀器頂部的圓形氣泡水準儀，細心調整儀器姿態呈垂直狀態，避免重力分量對加速度水平分量造成系統性偏差。
3. **方位對齊(Azimuth)**：由於地震波具有三維方向性，必須使用指北針將地震儀的特定刻度對準正北方向（方位角 $0^\circ$ ），以獲得精準的南北向與東西向地動分量。
4. **開機與記錄參數設定**：設定採樣率為50 Hz，確認燈號閃爍正常以啟動寫入。

## 4.2 測站數據ObsPy 時頻特徵分析

將4958 測站下載的SAC 格式原始觀測數據，利用Python 的ObsPy 套件進行30 分鐘（02:50 至03:20）的波形與時頻譜分析，觀察到兩類顯著訊號特徵：

- **環境背景微震(Ambient Noise)**：在安靜無干擾的時段，地表微小振幅平穩維持於 $\pm 2.5$  左右，主要能量集中於低頻段(0 ~ 10 Hz)，此為典型都市或校園環境中，來自遠方車流或大氣活動所致。
- **寬頻高能量垂直帶(Broadband Transient Spikes)**：波形圖中數次出現突發、短促的強烈震動，最大振幅達到 $\pm 10 \sim \pm 15$ 。時頻圖上在相同時間點呈現出一條貫穿0 ~ 50 Hz 的高能量垂直亮帶。

由於實驗地點鄰近科學館走道與草皮，此類高頻、突發且為寬頻特徵的訊號，判定為典型的人文干擾雜訊(Human-induced noise)（如行人的跑跳腳步聲或周圍車輛的定時行經），進一步印證了觀測選址對自然地震觀測的關鍵性。

## 4.3 國家地震工程研究中心參訪與抗震原理

在國家地震工程研究中心（NCREE）參訪中，實地接觸到了現代耐震工程的核心技術。

台北101 大樓內部懸掛的調諧質量阻尼器(Tuned Mass Damper, TMD)，其主要設計目的在於「減緩超高層大樓受強烈風力吹拂時產生的低頻搖晃」。101 大樓整體剛性極強，且基樁深入地底80 公尺 固定於基盤岩石上。當遠方地震波傳至台北盆地時，高頻成分多已被地層衰減，剩下長週期的地動。101 大樓的固有振動週期（超長週期）與遠震波之主頻不一致，不易引發共振；同時深層基樁與TMD 的動態消能機制能有效吸收震波能量，因而內部人員多對遠震無感。

在耐震設計中，**建築物反應譜(Building Response Spectrum)** 扮演了關鍵角色。它量化了不同固有週期的結構物在受到特定地震波作用下產生的最大加速度或位移反應。工程師藉此反應譜來計算結構的「設計地震力」，以符合現行規範「小震不壞、中震可修、大震不倒」之減災準則。

#### 4.4 高風險結構物與耐震NG 事項

根據結構力學，以下建築特徵具有極高的Seismic Risk，為耐震設計的NG 事項：

1. **底層軟弱層（軟腳蝦建築）**：一樓挑高作為挑空大廳或商業廣場，並任意敲除隔間牆，導致一樓的水平剪力抗性（勁度與強度）遠低於上部樓層，在強烈水平震波下極易發生底層剪切垮塌。
2. **幾何形狀不規則與扭轉效應**：建築平面呈L 型、U 型或結構質量分布嚴重不對稱。地震時，建築物質心與剛心不重合，會產生強烈的扭轉力矩（Torsional Effect），使角落柱面產生應力集中而剪斷。
3. **施工品質缺陷**：包含箍筋間距過大，末端未依規定彎折135° 錨定入主筋、或混凝土配比強度不足，皆會導致梁柱接頭缺乏韌性，引發脆性破壞。

# 第5章 地震預報、預警與安全監測

## 5.1 地震預報與預測的本質差異

科學界對此兩者有著嚴格的定義區別，這界定了科學預警的極限：

- **地震預報(Forecasting)**：屬於長期統計與機率估算。基於歷史地震目錄與活斷層滑動速率，評估未來數十年（如30年內）在特定區域發生特定規模地震的機率（例如60%）。此方法科學基礎穩固，能作為政府修訂耐震設計規範與都市防災策略的依據。
- **地震預測(Prediction)**：要求在短時間前（數天或數周前），具體指出地震發生的精確時間、空間地點與震級規模。

截至目前，全球科學界公認「精確的短期地震預測是不可能的」。因為地殼深部的破裂啟動機制，具備高度的隨機性、複雜的非線性與混沌動力學特徵，無法以單一物理模型做重現性預測。

過去曾被廣泛研究的預測前兆包括：前震活動、地殼隆起、井水氬氣排放、波速比值異常( $v_p/v_s$ )、電磁異常與動物異常行為等。經過長期的科學統計檢驗，這些前兆皆不具備「普遍的重現性」與「可靠的預警價值」。因此，地科學界的共識是發展「地震預警系統(EEW)」及工程被動耐震，而非追求無法落地的預測。

## 5.2 Seismic Gap 地震空區假說之檢驗

地震空區(Seismic Gap)假說認為：在活躍的板塊交界處，若某一特定段落長期未發生大地震（相對於其歷史回歸週期），則該段落處於應力高度累積狀態，未來發生大震的機率最高。

然而，古地震學研究對此假說提出了挑戰。例如加州Pallett Creek的沉積層放射性碳定年資料表明，地震並不具有完美的週期性，而是呈現「叢集性(Clustering)」，即在短時間內連續發生數次大震，隨後進入漫長的平靜期。儘管1989年Loma Prieta地震成功填補了聖安德烈斯斷層上的局部地震空區，但空區假說仍須謹慎引用。

## 5.3 地震學於地下核子試爆監測之應用

地震監測是《全面禁止核試驗條約》中最具強制力的技術手段。區分地下核子試爆與天然地震的核心原理有二：

1. **波形特徵差異**：核子試爆為地下集中球對稱點源（純膨脹源），向外發射強烈且陡峭的P波，幾乎不產生剪力分量，故其S波與表面波極度微弱。天然地震則為斷層剪切錯動，會產生巨大的S波與能量充沛的長週期表面波。
2.  $m_b - M_s$  **鑑別法**：地震學家計算事件的體波震級( $m_b$ ) 與表面波震級( $M_s$ )。若將兩者作散佈圖，如圖 5.1 所示，地下核爆會因P波特強而落在 $m_b$  偏高區，天然地震則落在 $M_s$  偏高區，兩者在統計分佈上涇渭分明。

此外，利用經驗震級公式，地震學家能透過觀測站記錄到的震波振幅，精確反推核試爆釋放的當量威力（以千噸TNT 為單位），實現遠程軍事安全監控。

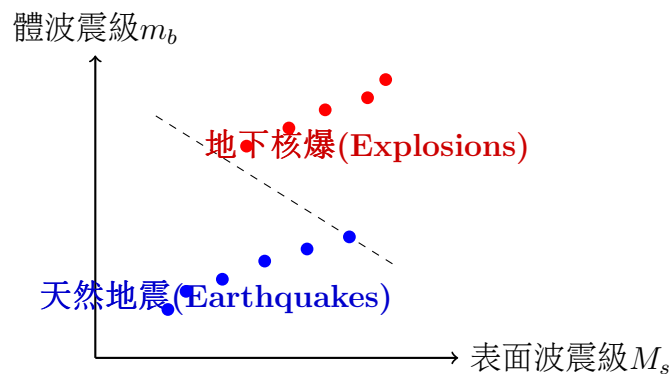


Figure 5.1: 地下核子試爆與天然地震之 $m_b - M_s$  鑑別分佈圖

## 5.4 互動式震源機制解與初動投影網開發

為提供直觀的教學工具，本學期開發了兩套互動式Web 系統並部署於Hugging Face 平台：

- **互動式地震學解說網頁**：利用Apache ECharts 圖表庫展示PREM 一維地球模型中速度與壓力隨深度的動態變化，並動態模擬折射震測首波與反射震測雙曲線動態修正(NMO) 原理。
- **初動解與震源機制繪圖系統**：實作施密特等面積網(Schmidt Net) 投影演算法。系統支持上傳測站初動觀測檔(P-file)，自動解析極性後投影於畫布上。同時支援雙向滑桿調節（走向、傾角、滑移角）或直接手繪大圓弧（Nodal planes），即時渲染沙灘球(Beachball) 並自動辨識斷層型態（逆斷層、正斷層、平移斷層）。

# 第6章 學期總結與未來展望

## 6.1 AI 協作工作流實作路徑

本學期的報告撰寫與專案開發，深度實踐了「各司其職的AI 協作工作流」，依據任務性質選擇最合適在大語言模型協作工具：

1. **資料分割與預處理(Antigravity)**：針對大部頭的英文教科書PDF 進行語義切分，避免大語言模型受限於脈絡長度 (Context Window) 而產生資訊遺漏，確保知識提取的高度完整性。
2. **程式化數據提取(Notebook)**：在Python 互動式筆記本中執行代碼提取並驗證核心公式與數據特徵，避免人工摘錄產生的數值錯誤。
3. **文本邏輯重組與翻譯(Gemini)**：使用邏輯推導能力領先的Gemini 進行核心學術大綱的整理、專有名詞對齊與精細學術語氣修飾。
4. **簡報視覺化大綱生成(Genspark)**：利用Genspark 快速建構視覺化骨架與大綱，精簡繁瑣排版工時。

## 6.2 學習成果總結與致謝

回顧整學期的學習歷程，這是一次地球科學、嵌入式軟硬體與資料科學跨領域融合的精彩實踐。我們從探討教科書上的基礎波動方程式、司乃耳定律與震波相，走到草地上實地操作節點式地震儀的布設與ObsPy 資料庫波形分析；再到親自動手以樹莓派與MPU6050 感測器程式化實作了一套具備零點校正、濾波、STA/LTA 觸發和即時通知的邊緣運算地震監測儀。

這種結合「理論」與「動手實作」的學習模式，讓我切實體驗到了科研人員與防災工程師的日常挑戰。感謝授課老師與助教一整學期的悉心指導與引領，激發了我們對地科應用科技的熱情，這將成為我們未來學術研究與職涯道路上無比珍貴的養分。