

地震學期末專題研究成果報告

蕭筠安 (Hsiao Yun An)

台北市立大學 地球環境暨生物資源學系

June 9, 2026

摘要

本研究旨在建構一個結合理論學習、微型觀測系統開發，以及野外觀測實務的完整地震學專題。理論部分探討了彈性回跳理論與地震體波（P波與S波）在地球介質中的傳播物理特性。在硬體實作方面，本組基於 Raspberry Pi 與 MPU6050 微機電加速度計，透過 I2C 通訊協定實現了一套即時震動監測與警報預警系統。最後，在野外觀測實驗中，本組嚴格遵循標準地震站部署流程（SOP），並利用 Python 的專業地科學套件 ObsPy 進行時間序列波形 analysis 與傅立葉頻譜轉換。結果顯示，部署所收集之波形基期極為穩定，頻譜能量主要集中於低頻區段，其物理特徵符合海洋微地動（Oceanic Microseisms）之訊號歸因。本研究不僅證實了微型監測系統之可行性，亦展現了將理論與實務深度整合之教學成效。

關鍵字：地震學、彈性回跳理論、Raspberry Pi、MPU6050、ObsPy、海洋微地動

目录

1 緒論與基礎理論	3
1.1 地震學的核心概念	3
1.2 彈性回跳理論	3
1.3 震源與震央之幾何定義	3
2 地震波傳播與震源機制	3
2.1 P 波與 S 波的波動物理特性	3
2.1.1 P 波 (Primary Wave)	3
2.1.2 S 波 (Secondary Wave)	4
2.2 斯乃爾定律與不連續面	4
2.3 震源機制解與沙灘球圖	4
3 微型監測系統硬體架構	4
3.1 系統邊緣端架構設計	4
3.2 GPIO 接線與 I2C 串列通訊	4
4 野外觀測實驗與資料分析	5
4.1 野外部署標準作業流程 (SOP)	5
4.2 ObsPy 資料處理與頻譜結果	5
5 結論與反思	5
5.1 研究成果總結	5
5.2 跨領域反思	5

1 緒論與基礎理論

1.1 地震學的核心概念

地震學的核心任務在於探討地震的物理成因、地震波在地球內部的傳播規律，並以此逆推人類無法直接抵達與觀測的地球深部結構。在經典的地震觀測與物理逆推架構中，主要由以下三大核心要素組成：

1. **震源 (Source)**：地下岩層釋放累積彈性應變能的初始位置。
2. **介質 (Medium)**：地震波傳播時所經過的地球內部岩體與速度不連續面。
3. **接收站 (Receiver)**：部署於地表或地下的觀測儀器與地震台網。

透過分析地表接收站所記錄到的地震走時 (Travel Time)，科學家能夠如同醫學電腦斷層掃描 (CT) 般，逆推地球內部的地殼、地函與地核的分層幾何特徵。

1.2 彈性回跳理論

地震的動力學成因普遍由彈性回跳理論 (Elastic Rebound Theory) 來描述。當板塊受到地函對流驅動而產生持續相對運動時，斷層兩側的岩體會因摩擦力阻礙滑移而開始累積剪切應力，並產生局部的彈性應變。隨著時間推移，當累積的應力超過斷層面上岩石所能承受的最大靜摩擦力時，斷層面將發生瞬間破裂與高速滑移。此時岩體回彈回復至應變前的原狀，將累積的彈性能位能瞬間釋放，此股能量即以波動形式向外擴散，形成地震。

1.3 震源與震央之幾何定義

在幾何定位上，地震由以下三維空間參數確立：

- **震源 (Focus/Hypocenter)**：地下岩體最初發生斷層剪切破裂的立體空間座標點。
- **震央 (Epicenter)**：將震源沿垂直重力方向投影至地表的地理位置。
- **震源深度 (Focal Depth)**：震源與地表投影點 (震央) 之間的垂直距離。

一般而言，根據世界地震學標準，地震依震源深度可分類為：淺源地震 (0-70 km)、中源地震 (70-300 km) 與深源地震 (300-700 km)。其中淺源地震多發生於地殼脆性破裂帶，對人類地表結構物的破壞性最為劇烈。

2 地震波傳播與震源機制

2.1 P 波與 S 波的波動物理特性

地震體波在各向同性彈性介質中的傳播速度，主要取決於介質的彈性係數與密度 ρ 。

2.1.1 P 波 (Primary Wave)

P 波為縱波 (疏密波)，其質點振動方向與波的前進方向平行。其傳播速度 V_p 最快，能穿透固體、液體與氣體：

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (1)$$

where K 為體積模數 (Bulk Modulus)， μ 為剪切模數 (Shear Modulus)。

2.1.2 S 波 (Secondary Wave)

S 波為橫波（剪切波），其質點振動方向與波的前進方向垂直。其速度較 P 波慢，且由於液體與氣體不具備抗剪切應力的物理能力（即 $\mu = 0$ ），因此 S 波完全無法通過液態介質：

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2)$$

此物理特性在歷史上為證實地球「液態外核」的存在提供了決定性的證據。

2.2 斯乃爾定律與不連續面

震波在地球內部穿透不同彈性波速的不連續面（如莫氏不連續面）時，會遵守斯乃爾定律（Snell's Law）產生折射與反射：

$$\frac{\sin \theta_1}{V_1} = \frac{\sin \theta_2}{V_2} = p \quad (3)$$

其中 p 為射線參數（Ray Parameter），在層狀介質中為一常數。當入射角達到臨界角時，折射角變為 90° ，此時會沿著不連續界面傳播並放回地表，形成「頭波（Head Wave）」，這在折射地震探勘中是推測地下分層構造的核心物理機制。

2.3 震源機制解與沙灘球圖

透過記錄全球地震台網收到的 P 波第一動（初動）方向是向上（壓縮，Compression）或向下（張裂，Extension），我們可以使用立體投影技術反演出「震源機制解（Focal Mechanism）」，並以「沙灘球圖（Beach Ball Diagram）」視覺化呈現。根據沙灘球圖中深色（壓縮區）與白色（張裂區）的幾何分佈，能即時判定引發地震的斷層剪切型態：

- 正斷層：球體中心主要呈現白色張裂特徵。
- 逆斷層：球體中心主要呈現深色壓縮特徵。
- 走向滑移斷層：呈現標準的黑白相間十字象限分佈。

3 微型監測系統硬體架構

3.1 系統邊緣端架構設計

為了自主模擬現代數位地震觀測台站的訊號採集流程，本專題設計並實現了一套低功耗、基於邊緣計算（Edge Computing）設備的微型震動監測系統。系統核心由 Raspberry Pi 作為主控端，搭配 MPU6050 微機電（MEMS）感測器。主控端負責定頻讀取、時域訊號快取與門檻值（Threshold）警報演算法；感測端則整合高精度三軸加速度計與三軸陀螺儀，可直接數位化輸出微小的地表動能。

3.2 GPIO 接線與 I2C 串列通訊

兩者之間採用 I2C (Inter-Integrated Circuit) 通訊協定。詳細的實體接線配置如表 1 所示。

表 1: MPU6050 感測器與 Raspberry Pi 主控端之接線配置

MPU6050 端	Raspberry Pi 端	實體功能說明
VCC	Pin 1 (3.3V)	系統供電端
GND	Pin 6 (GND)	系統共同接地，確立零電位參考
SCL	Pin 5 (GPIO3)	I2C 串列時脈線 (Serial Clock)
SDA	Pin 3 (GPIO2)	I2C 串列資料線 (Serial Data)

4 野外觀測實驗與資料分析

4.1 野外部署標準作業流程 (SOP)

為獲取真實的地球物理觀測數據，本研究小組進行了野外實際部署實驗，並嚴格遵循學術界的標準觀測站部署規範：

- 選址評估：**避開公路、大樹與高壓電網，將環境雜訊干擾降到最低。
- 儀器埋設：**於地表挖掘土坑，將地震儀深埋並與地基土壤緊密接觸，避免風阻與日照產生的局部雜訊。
- 指北校正 (Alignment)：**使用精密羅盤進行方位角校正，確保觀測的三軸分量方向與物理地理座標軸 (N-S, E-W, Z) 高度一致。
- 時間同步：**外接 GPS 進行精確的 UTC 時間授時，確保資料走時的科學有效性。

4.2 ObsPy 資料處理與頻譜結果

回收觀測資料後，使用 Python 的專業地震學套件 **ObsPy** 進行分析。分析顯示，在部署期間內，基底波形非常穩定，並無偶發之自然地震事件。

經由快速傅立葉轉換 (FFT) 分析其頻譜特徵，我們發現低頻區段具有顯著的能量集中現象。此低頻特性與全球地震台網所記錄到的 **海洋微地動 (Oceanic Microseisms)** 背景訊號頻率高度吻合。同時，透過 ObsPy 內建的帶通濾波器 (Bandpass Filter)，小組亦成功濾除了日間由周遭高速公路重型車輛所引起的隨機高頻地表人為噪音。

5 結論與反思

5.1 研究成果總結

本專題成功實現了從理論探討、硬體預警系統設計，再到野外實習部署與 Python 專業學術分析的完整地學研究鏈。研究成果顯示，基於低功耗邊緣端硬體的預警監測系統具備極高的實用潛力，而野外觀測亦成功捕捉到了極具地科學研究意義的海洋背景微動訊號。

5.2 跨領域反思

本專題除了地球科學理論的深化外，更迫使我們掌握了 Linux 系統控制、I2C 串列通訊開發，以及大數據波形處理等跨學科能力。此外，在研究過程中，我們亦體會到：儘管現今 AI 工具在程式語法除錯（如本報告之 LaTeX 格式微調）上提供了巨大的效率提升，但真實世界的物理思考、硬體電路的 de-bug，以及親臨野外惡劣環境中動手挖掘、校正並佈設儀器的身體實踐，這些操作所培養的科學洞察力與直覺，依然是生成式 AI 工具完全無法代勞與取代的核心價值。