



Haute Ecole
Libre de
Bruxelles

地球科學與地震學學期專題實作

學期成果總結報告

地球科學與地震學核心專案與邊緣運算預警 系統整合成果報告

學號: U11310004

中央氣象署與學術團隊專家群



2026

Table des matières

1	緒論與專案背景 (Introduction)	1
2	地震學核心理論與數位專題研發成果	2
2.1	地震學導論：體波、地表波與走時曲 \square 之多維解析	2
2.2	花蓮外海 \square 震震源機制與板塊隱 \square 帶地體構造分析	2
2.3	地球 \square 部圈層不連續面與波動衰 \square 機制	3
2.4	震源矩張量力學、雙力偶模型與下半球立體投影理論	3
3	地震工程觀測、實地考察與前沿學術視野	4
3.1	國家地震工程研究中心 (NCREE) 結構耐震科技實地考察	4
3.2	國際跨國科研視野開拓與全球學術生涯規劃座談	4
4	實作型地震觀測與初動解幾何模擬系統	5
4.1	南東太平洋隆起 \square 震之 ObsPy 震源機制球反演繪 \square	5
4.2	\square 擬下半球 P 波初動極性立體投影幾何動態模擬系統	5
5	【時空共鳴箱】樹莓派微縮預警儀與邊緣運算整合專案	6
5.1	邊緣運算架構與震度分級之科學依據	6
5.2	硬體控制與軟體 PWM 安全限流防燒 \square 機制	6
5.3	網頁雲端推播 API 與 JSON 封包冷 \square 控制機制	7
5.4	系統整合控制台核心原始碼展示	7

緒論與專案背景 (Introduction)

本成果報告全面整合了本學期在「地球科學與地震學」領域的核心專案研究、數位模擬系統、前沿工程實地考察以及物聯網邊緣運算防範系統的開發成果。

現代地震學已不僅局限於傳統的地震波動理論觀測，更深度融合了資訊科學、邊緣運算、雲端自動化推播以及立體幾何模擬等跨領域技術。本研究報告從基礎的地震波動學出發（如體波、地表波、地核圈層邊界走時反演），進一步深入探討震源機制解與應力張量力學理論，並透過實際地震事件（如花蓮外海地震、南東太平洋隆起地震）進行實測反演與震源球繪圖。

此外，本報告亦記述了前往國家地震工程研究中心（NCREE）進行結構抗震與防災科技的考察所得，並以微型單晶片電腦（Raspberry Pi）深度研發了一套兼具防範科學、雲端即時示警與迷因文化融合的【時空共鳴箱】微縮地震觀測站系統。整份報告兼具學術厚度與工程實作，展現多模態、跨領域的科研核心素養。

地震學核心理論與數位專題研發成果

2.1 地震學導論：體波、地表波與走時曲之多元解析

本專題針對地震學基礎理論進行數位化梳理。核心內容涵蓋：

- **體波 (Body Waves) 與地表波 (Surface Waves) 的力學解構**：探討實體波 (P 波、S 波) 在地球內部介質的傳播速度與質點運動方向，對比能量主要沿著地表傳播、振幅隨深度呈指數衰減的瑞利波 (Rayleigh waves) 與洛夫波 (Love waves)。
- **走時曲 (Travel-Time Curves)**：利用斯乃爾定律 (Snell's Law) 推導波在不均介質中的彎曲路徑，闡述如何透過走時曲差值進行震央距的定位。
- **應力與應變張量 (Stress & Strain Tensors)**：推導三維空間中的連續介質力學方程，建立彈性常數與地震波速之間的數學本質關聯。
- **土壤液化與工程 (Soil Liquefaction)**：分析飽和砂土在遭受強烈剪切波作用下，孔隙水壓瞬間上升導致有效應力歸零的動態物理機制。

2.2 花蓮外海震震源機制與板塊隱帶地體構造分析

針對發生於台灣花蓮外海之顯著有感震進行地體構造深度析論：

- **震源參數觀測**：發震時間 12 時 34 分 58 秒，震源深度達 31.2 公里，中央氣象署 (CWA) 自動震源機制解系統 (rCMT) 與人工精確校正之最終震源機制解 (Final CMT) 皆呈現高度的逆斷層 (Thrust Faulting) 分量。
- **空間幾何對應**：根據垂直地剖面 (Cross-section Profile) 顯示，該震源位置精確座落在菲律賓海板塊向北隱至歐亞大陸板塊的交界面 (Benioff Zone) 上緣，體現了強烈的西北—東南向擠壓應力環境。
- **構造過渡特徵**：該區域恰好處於「繩海槽 (Okinawa Trough) 弧後擴張區」與「琉球隱帶 (Ryukyu Subduction Zone)」的過渡地帶，在應力場轉上極具多樣性與地球

動力學研究價值。

2.3 地球內部圈層不連續面與波動衰減機制

本部分深入剖析地球深部結構的三大關鍵不連續面：

1. **莫氏不連續面 (Moho Discontinuity)**: 地殼與地函的交界，波速在此產生顯著的正跳躍。
2. **古騰堡面 (Gutenberg Line)**: 核幔邊界 (CMB)，S 波在此處因外核液態而消失，P 波速度發生斷裂式驟降，形成全球性的 P 波影區 (Shadow Zone)。
3. **雷曼面 (Lehmann Discontinuity)**: 外核與內核交界，P 波波速再度回升，證實內核為固態。

專案中更進一步探討了介質的非均向性 (Anisotropy，如晶格優選取向引發的波速分裂) 與彈性衰減品質因子 (Q 值) 對地震波能量吸收的數學建模。

2.4 震源矩張量力學、雙力偶模型與下半球立體投影理論

傳統的走時與規模無法完整描述斷層面的幾何錯動，本專題聚焦於矩張量 (Moment Tensor) 力學特徵：

$$M_0 = \mu \bar{D} S \quad (2.1)$$

其中 μ 為介質剪切模數， \bar{D} 為平均滑移量， S 為斷層破裂面積。地震矩張量以一組 3×3 的對稱矩陣完整描述了震源處的等效體力。透過雙力偶 (Double Couple) 模型的等效受力分析，可推導出四象限的 P 波初動輻射型態。為了將三維焦球面上的受力狀態與節面幾何投影至二維平面，本研究採用下半球立體投影 (Lower Hemisphere Stereonet) 算法，將沙灘球 (Beachball) 的視覺化奠定堅實的理論基礎。

地震工程觀測、實地考察與前沿學術視野

3.1 國家地震工程研究中心（NCREE）結構耐震科技實地考察

前往國家地震工程研究中心進行學術實地考察，深度學習前沿土木耐震工程設計：

- **核心規範原則**：實地見證理解「小震不壞、中震可修、大震不倒」的三階段耐震設計哲學，探討回歸期 30 年、475 年與 2500 年下的結構變形控制。
- **實驗核心設施**：考察「三軸地震模擬振動台（Shaking Table）」、「高強度大型反力與韌性地板系統」，了解如何透過伺服油壓致動器對實體結構施加動態反覆加載試驗。
- **結構振技術**：深入解構消能阻尼器（如摩擦型、挫屈束制 BBR）與隔震技術（如鉛心橡膠支承墊 LRB）在結構基礎或層間的阻尼耗能機制，破解傳統「剛性抗震」的迷思，轉向「柔性隔震與消能」的前沿思維。

3.2 國際跨國科研視野開拓與全球學術生涯規劃座談

本章節整理參與學術生涯專題座談之心得。報告提煉了青年學者從本土科研邁向國際頂尖研究機構（如發現國際科研合作機會、撰寫精準的研究計畫書、應對高難度跨國英文學術面試等）的執行力與心路歷程。座談深刻揭示了「主動取、不畏失敗」的學術探索精神，梳理了國家科學及技術委員會（NSTC）及國際基金會所提供的海外博士後與訪問學者資助管道，未來的全球化科研生涯規劃提供了極具價值的實務路徑。

實作型地震觀測與初動解幾何模擬系統

4.1 南東太平洋隆起^[1]震之 ObsPy 震源機制球反演繪^[2]

本專案針對美國地質調查局 (USGS) 觀測事件 us6000sz1d (規模 M 6.6, 發生於張裂型板塊邊界——南東太平洋隆起 Southern East Pacific Rise) 進行實測反演:

- **反演參數:** 震源深度 23.5 公里, 經由 W-phase 矩張量反演, 雙力偶成分高達 91%。
- **節面幾何參數:** 反演出之主斷層面節面 A 走向^[1] 285°、傾角 64°、滑動角 -7°; 共^[2]輔助面節面 B 走向^[1] 18°、傾角 84°、滑動角 -154°。
- **科研繪圖實作:** 利用 Python 的 ObsPy 與 Matplotlib 庫進行編程, 精確繪^[2]出該走向滑移型 (Strike-Slip) 地震的二維標準沙灘球圖件, ^[1]與 USGS 官方發布的科學圖件進行重合度對比與幾何學驗證。

4.2 ^[1]擬下半球 P 波初動極性立體投影幾何動態模擬系統

^[1]了解^[2]實體觀測點空間分^[1]不均對震源機制解造成的幾何多解性難題, 本專案開發了一套基於網頁 HTML5 Canvas 的幾何動態模擬系統:

- **座標幾何運算:** 系統即時接收各觀測測站的方位角 (Azimuth) 與出射角 (Take-off Angle), ^[1]利用下半球等角投影 (Wulff Net) 公式, 將三維焦球面點映射至二維極座標系。
- **極性動態展示:** 測站初動極性以紅色實心圓 (+, 壓縮波 Compression / Up) 與藍色空心圓 (-, 膨脹波 Dilatation / Down) 進行二維渲染, ^[1]透過動態幾何演算法, 即時繪^[2]出兩條互相垂直的共^[1]大圓 (Great Circles) 作^[1]斷層節面邊界。該系統成功實現了互動式「初動解」的教學演示。

【時空共鳴箱】樹莓派微縮預警儀與邊緣運算整合專案

5.1 邊緣運算架構與震度分級之科學依據

微型地震觀測站核心基於 Raspberry Pi (樹莓派) 邊緣運算架構, 透過 I2C 通訊協定以 25Hz 的高頻率, 即時採樣 MPU6050 六軸加速度計之三軸加速度。系統利用三維歐幾里得範數 (Euclidean Norm) 進行即時向量合成:

$$total_g = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (5.1)$$

當系統停止時, 基位基準理論值保持 1.0g (受地心引力作用)。系統創新研發「十段式時空次元震度矩陣」動態值演算法, 當動態晃動超越 1.05g 時判定震動事件, 根據振幅進行科學與二次元動漫名場面的精準對位投射 (例如: 微幅震動對應「咪跳下床」、烈衝擊 1.90g 觸發《火影忍者》「佩恩—神羅天征」、極限衝擊 $\geq 2.60g$ 則判定「超級賽亞人變身」)。

5.2 硬體控制與軟體 PWM 安全限流防燒機制

在硬體實作層面, 為了在無實體電阻保護的極端測試電路環境下防止實體 LED 燈具因過載而燒, 本系統在 GPIO 控制層引入了高效的軟體脈寬度調變 (PWM) 技術。系統將「即時監測模式」與「高能演習模式」進行分級控制: 當系統處於基狀態時, 空比 0% (熄滅); 當超越值時, 瞬間賦予 15% 的軟體限流低空比維持和光。若抽到高階震度警報, 則切 15% 空比與 0% 空比高頻交替 (每秒 4 次) 的數位爆閃警報, 既達到了烈視覺示警的張力, 又從底層硬體保護了硬體設備。

5.3 網頁雲端推播 API 與 JSON 封包冷Ⓔ控制機制

當邊緣運算端判定衝擊力達標後，系統會自動Ⓔ取當前發震的精確時間戳 (Timestamp)、實測最大 g 力值以及所對應的次元震度場景描述，將數據封裝Ⓔ標準的 JSON 格式封包。系統調用 Python 的 `requests` 函式庫，以 HTTP POST 請求Ⓔ步發送至遠端 Discord Webhook 伺服器，實現秒級跨平台雲端推播。Ⓔ了防止斷層連續破裂或余震引發 API 遭到垃圾封包惡意阻斷 (Rate Limit)，系統Ⓔ建了 10 15 秒的「動態軟體冷Ⓔ鎖 (Cooldown Lock)」，兼顧了雲端通訊的即時性與網路頻寬的穩健性。

5.4 系統整合控制台核心原始碼展示

以下Ⓔ部署於樹莓派邊緣終端、具備 ANSI 控制台彩色介面的核心控制與監測原始碼 (`seismic_dashboard.py`):

```
import smbus
import time
import math
import requests
import sys
from datetime import datetime
import RPi.GPIO as GPIO

#
=====

# 核心參數全域設定區
#
=====

DISCORD_WEBHOOK_URL = "https://discord.com/api/webhooks/
    your_actual_webhook_here"

THRESHOLD = 1.5          # 震動觸發門檻 (單位: g)
COOLDOWN_TIME = 15      # 警報冷Ⓔ時間 (單位: 秒)
LED_PIN = 18             # 使用 GPIO 18 (實體引Ⓔ Pin 12)
SAFE_ON_DUTY = 15       # 軟體安全限流Ⓔ空比 (15%)
```

```
# MPU6050 I2C 暫存器位址
Device_Address = 0x68
PWR_MGMT_1     = 0x6B
ACCEL_XOUT_H   = 0x3B

# ANSI 色彩代碼 (讓 MobaXterm 控制台顯示更漂亮)
GREEN = "\033[92m"
RED   = "\033[91m"
YELLOW = "\033[93m"
BLUE  = "\033[94m"
CYAN  = "\033[96m"
BOLD  = "\033[1m"
RESET = "\033[0m"

bus = smbus.SMBus(1)
led_pwm = None

def main_menu():
    while True:
        # 清除畫面的 ANSI 指令，讓控制台保持乾淨
        print("\033[H\033[J", end="")
        print(f"{CYAN}{BOLD}
              }===== {RESET}
              ")
        print(f"{CYAN}{BOLD}▣▣▣▣ Raspberry Pi 微型地震觀測站 - 整合控制台
              (MobaXterm 專用){RESET}")
        print(f"{CYAN}{BOLD}
              }===== {RESET}
              ")
        print(f"▣ [{GREEN}1{RESET}] ▣ 測試 Discord Webhook 連")
        print(f"▣ [{GREEN}2{RESET}] ▣ 測試 LED 燈安全閃爍 (PWM 模式)")
        print(f"▣ [{GREEN}3{RESET}] ▣ 查看 MPU6050 即時三軸數據")
        print(f"▣ [{GREEN}4{RESET}] ▣  ▣ {BOLD} 動整合版地震監測與預警系統 {
              RESET}")
        print(f"▣ [{RED}0{RESET}] ▣ 離開程式")
```

```
print(f"{CYAN
    }-----{RESET
    }")

choice = input("請輸入選項數字(0-4):").strip()

if choice == '1':
    print("正在測試Webhook連")
    # 測試邏輯實作
elif choice == '2':
    print("正在動LED PWM測試")
elif choice == '3':
    print("開MPU6050數據串流")
elif choice == '4':
    print("地震預警系統全面動監測中")
elif choice == '0':
    print(f"\n{GREEN}感謝使用! 程式安全退出。{RESET}")
    break
```

Bibliographie

- [1] Auteur EVENTUEL, Auteur AUTRE, and Auteur DERNIER. Exemple de titre. *Journal quelconque*, 2019. URL : <http://www.siteQuelconque.com>.
- [2] Rocscience Inc. URL : <https://www.rocscience.com/software/rocfall>.