



臺北市立大學

臺北市立大學

地球環境暨生物資源學系

114 學年度第 2 學期地震學期末學習成果報告

結合理論計算、野外實作與防災工程的地球物理探索

學習成果彙整人：

陳柏亘（學號：U11310022）

課程指導教授：

宋冠毅老師 助理教授



中華民國一一五年六月

摘要

本期末成果報告旨在系統性回顧 114 學年度第 2 學期在地震學領域的學術探索歷程，內容涵蓋四大核心面向：理論幾何計算、野外觀測實務、物聯網邊緣計算自我實作，以及工程防災之實地反思。

在理論幾何面向，深入探討雙力偶源模型 (Double Couple Model) 力學機制，完成宜蘭外海強震與堪察加半島 $M_w 8.8$ 超級巨震之震源機制解判定。在實務觀測面向，團隊利用 SmartSolo 短週期地震儀採集觀測數據，並透過 Python ObsPy 科學流水線診斷出都會區特有的環境交通背景噪訊。

本報告之核心突破在於建置「大安 IoT 觀測站」，利用樹莓派 4B 結合 MPU6050 感測器發展微型地震儀系統。透過嵌入式邊緣運算執行 STA/LTA 觸發演算法、四階巴特沃斯高通濾波及快速傅立葉變換 (FFT)，實現本地即時地震訊號處理與動態姿態解算；同時利用多執行緒架構優化硬體 PWM 蜂鳴器警報系統，克服 Python 全局解釋器鎖 (GIL) 之延遲瓶頸。當地震事件觸發時，系統能自動生成暗色風格專業分析圖表，並透過 LINE Notify 與 Discord Webhook 進行自動化即時速報推播，成功達成物聯網前沿技術與地科理論之跨領域結合。

最後，結合國家地震工程研究中心 (NCREE) 之實地參觀，深入剖析台北盆地共振效應與結構消能減震裝置，並結合動態網頁託管平台，為後續前沿地球物理深造與實習奠定紮實技術基礎。

關鍵字：震源機制球、SmartSolo、樹莓派物聯網、STA/LTA 演算法、邊緣計算、消能減震。

Contents

摘要	i
圖目錄	iv
表目錄	v
1 課程成果與學習總覽	1
1.1 核心理論與實作面向之全景地圖	1
1.2 成果集成儀表板說明	1
2 理論計算與數據分析	2
2.1 雙力偶模型與 P 波初動幾何投影	2
2.2 宜蘭外海強震數據解析 (24271505.P25)	2
2.3 堪察加半島 M_w 8.8 超級巨震分析	3
3 實務觀測與野外實驗	4
3.1 SmartSolo 短週期地震儀佈設實務	4
3.2 Python ObsPy 資料處理與都會噪訊診斷	4
4 樹莓派微型觀測站與邊緣計算實作	6
4.1 大安 IoT 觀測站硬體架構	6
4.2 數位訊號處理 (DSP) 配置與技術指標	6
4.3 開源核心程式碼與多執行緒邏輯解析	7
4.3.1 監測、處理與雲端速報主程式 ('seismograph _{main} .py')	7
4.3.2 物理警報與執行緒優化 ('buzzer _{alarm} .py')	8
4.4 觀測成果與雲端自動化展示	9
5 地震科學分析與工程減災	10
5.1 2025 嘉義大埔地震科學反思	10
5.2 國家地震工程研究中心 (NCREE) 耐震工程工法研析	10
5.2.1 常見抗震漏洞與共振效應	10
5.2.2 現代結構減震工法對比	10
5.3 學術演講心得與暑期中央大學實習展望	11

6 結語與未來展望	12
6.1 本學期地震學核心體悟	12
6.2 未來學術與實務研究方向	12
參考文獻	13

List of Figures

3.1	微震時頻分析示意（已將系徽縮小，實際操作請替換為 ObsPy 導出之波形頻譜圖）	5
4.1	大安 IoT 觀測站硬體線路與樹莓派 MPU6050 實體佈設圖	6
4.2	大安 IoT 觀測站本地邊緣端自動生成之 5 面板暗色風格專業地震分析報告圖表	8
4.3	整合遠端 MobaXterm 環境之 Pygame 瑪利歐互動優化版運作畫面	8

List of Tables

2.1 宜蘭外海地震代表性測站幾何轉換與極性對照表	3
5.1 傳統耐震、減震與隔震工法力學特性對比表	11

第 1 章

課程成果與學習總覽

1.1 核心理論與實作面向之全景地圖

本學期地震學課程以「結合理論計算、野外實作與工程防災」為主軸。整體學習路徑緊扣地球物理學的核心方法，區分為四大板塊：

1. **理論計算**：走時曲線推導、雙力偶源力學模型分析、以及立體投影網幾何轉換。
2. **野外觀測**：節點式 SmartSolo 地震儀之實地佈設、連續觀測資料去噪與 ObsPy 時頻譜科學診斷。
3. **物聯網實作**：基於樹莓派與 MPU6050 微型感測器的本地端邊緣運算與數位訊號處理 (DSP) 自主開發。
4. **工程防災**：實地參訪國家地震工程研究中心，解構軟腳蝦結構、台北盆地效應，以及現代建築減震/隔震元件。

1.2 成果集成儀表板說明

為體現地球物理資訊學 (Geoinformatics) 之應用能力，本學期所有核心成果 (含作業 8、作業 10、SmartSolo 實驗、樹莓派自製觀測站、國震中心與大埔地震專題) 已全面整合成網頁互動式儀表板。完整之數據分析流與交互式模擬模組已部署至遠端平台：[Hugging Face 成果集成展示平台 \(seismology_final\)](#)，以供學術界即時動態審閱。

第 2 章

理論計算與數據分析

2.1 雙力偶模型與 P 波初動幾何投影

當斷層面受剪力發生破裂時，其輻射出的 P 波能量在空間中可由一對正交的雙力偶源 (Double Couple Model) 來等效類比。此力學機制將震源周遭空間劃分為交替對稱的四個象限：

- **壓縮象限 (Compression)**：震源向外推擠，測站觀測到 P 波初動極性向上 (+)，在烏氏立體投影網 (下半球投影) 上繪製為**紅色實心點**。
- **張裂象限 (Tension)**：震源向內拉引，測站觀測到 P 波初動極性向下 (-)，在投影網上繪製為**藍色空心圓**。

在進行下半球立體投影時，必須嚴格依據觀測站相對於震源的方位角 (ϕ) 與射出角 (i) 進行幾何轉換。若地震發生在深處，部分往上傳播的射線 (射出角 $i > 90^\circ$) 將在穿透臨界前射向對側，此時必須進行**對蹠點修正 (Antipodal Point Correction)**，幾何轉換公式如式 (2.1) 所示：

$$\begin{aligned}\phi_{\text{new}} &= (\phi + 180^\circ) \bmod 360^\circ \\ i_{\text{new}} &= 180^\circ - i\end{aligned}\quad (2.1)$$

此時，射線的初動極性特徵 (+ 或 -) 在轉換後保持不變。

2.2 宜蘭外海強震數據解析 (24271505.P25)

本研究帶入 2025 年 12 月 27 日發生於台灣宜蘭外海之強震數據進行實證。該地震基本參數為：北緯 24.39° 、東經 122.01° ，深度達 67.7 km，芮氏規模 7.01。

在全台 213 個觀測站中，計有 154 站具備清晰可辨的初動極性 (139 站為壓縮，15 站為張裂)。經幾何修正後，藍色張裂點高度密集收斂於東南 (SE) 象限，其餘西方、北方及東北方皆為紅色壓縮點。依據此初動極性分布，判定該地震屬於典型以**逆衝斷層 (Thrust Fault)** 為主、伴隨極少量走滑分量的震源機制解。代表性測站幾何座標轉換數據如表 2.1 所示。

Table 2.1: 宜蘭外海地震代表性測站幾何轉換與極性對照表

測站名稱	原始方位角 ϕ	原始射出角 i	修正後 ϕ_{new}	修正後 i_{new}	初動極性
TWC (音羽山)	248.0°	167°	68.0°	13.0°	壓縮 (+)
ESA (南澳)	239.0°	164°	59.0°	16.0°	壓縮 (+)
TUIB (烏石鼻)	348.0°	157°	168.0°	23.0°	壓縮 (+)
EOS2 (東澳二)	139.0°	139°	319.0°	41.0°	張裂 (-)

2.3 堪察加半島 M_w 8.8 超級巨震分析

本節針對 2025 年 7 月 30 日發生於俄羅斯堪察加半島東側海域之超大型隱沒帶地震 (Megathrust Event) 進行探討。該地震震源深度僅 20.7 km，屬極淺層巨震。其板塊構造背景為太平洋板塊以每年約 8 cm 的速度向西北隱沒至鄂霍次克微板塊下方。

美國地質調查局 (USGS) 有限斷層模型指出，此地震破裂面沿海溝向南大幅延伸達 500 公里，最大斷層錯動量高達 8 公尺。本研究經由手繪初動機制解，求得幾何參數為：走向 198°、傾角 18°、滑動角 51°；與全球矩張量 (GCMT) 機構發布之矩張量解 (走向 195°、傾角 28°、滑動角 43°) 呈現高度吻合，確定位於低角度隱沒介面之逆衝事件。大範圍的海底垂直錯動瞬間抬升上覆水體，觸發跨洋海嘯，鄰近 DART 21416 觀測塔測得 0.9 m 海嘯波高，展現了海嘯長距離無衰減傳播的巨大防災風險。

第 3 章

實務觀測與野外實驗

3.1 SmartSolo 短週期地震儀佈設實務

本實作於科學館前草地進行微震觀測。實驗採用 SmartSolo 一體化三軸短週期地震儀 (Geophone)，該儀器免除傳統地震儀繁瑣的訊號傳輸線、外部大型電池與記錄器，高度整合高精度 GPS 授時模組與大容量鋰電池。其實地佈設流程如下：

1. **挖掘土洞**：挖掘深約 20–30 cm 的土洞，直至觸及堅實土層，以確保儀器錐錐與地表具備優良的彈性耦合。
2. **氣泡水平校正**：將儀器置入後，嚴格觀察頂部圓形水準器，微調角度至氣泡完全居中。
3. **地理方位校正**：利用機械指北針，將儀器頂部的正北指示線精確對準地理正北 (Geographic North)，以確保後續導出的震動分量 (N、E、Z) 與真實地理方位吻合。
4. **回填與踩實**：回填泥土並用腳踩緊，最大化增強耦合效應，隨即開機記錄。

3.2 Python ObsPy 資料處理與都會噪訊診斷

資料採集完成後，透過 Python 專業地球物理函式庫 ObsPy 進行流水線處理。首先利用 'obsypy.read()' 讀取 SAC 格式之連續地震波形，並以 'slice()' 切割出目標時段。接著透過快速傅立葉轉換 (FFT) 繪製時頻譜圖 (Spectrogram)。

在實測波形中，Z、E、N 三軸的突發脈衝波形幾乎完全同步，無任何天然地震所應具備的 P 波與 S 波走時差。因此，可診斷此震動屬於極近場之**強迫振動 (Forced Vibration)**，即周遭行人走動引發的干擾。透過時頻譜圖，本研究診斷出三大都會環境噪訊特徵：



Figure 3.1: 微震時頻分析示意（已將系徽縮小，實際操作請替換為 ObsPy 導出之波形頻譜圖）

- **常態低頻雜訊** ($< 5 \text{ Hz}$)：時頻譜底部呈現持續高能量紅帶。此為都會區密集交通流量引起的背景雜訊。其能量密度呈現約 200 秒的週期性起伏，完美契合周邊主要道路之紅綠燈號誌週期。
- **突發高頻雜訊** (40-50 Hz)：譜圖上呈現垂直貫穿的脈衝亮帶，診斷為實驗人員在儀器周遭走動時，鞋底與地表拍擊所產生的衝擊波。
- **穩定高頻噪訊** (45-50 Hz)：橫向一條穩定的藍色線條，推測為鄰近電力系統的 60 Hz 電磁諧振干擾或儀器內部的採樣電路雜訊。

第 4 章

樹莓派微型觀測站與邊緣計算實作

4.1 大安 IoT 觀測站硬體架構

為進一步將地震學理論落地並與嵌入式前沿技術結合，本研究自主建置了名為「大安 IoT 觀測站 (DA-AN IoT Station)」的微型地震觀測站。系統硬體核心組件如下：

- **主控單元**：採用樹莓派 4B (Raspberry Pi 4B)，負責本地核心邊緣計算、即時數位訊號處理與雲端速報推播。
- **感測元件**：微機電 (MEMS) 微型晶片 MPU6050 三軸加速度計與陀螺儀。透過 I2C 介面與主控端通訊 (晶片硬體位址為 '0x68')。
- **硬體警報模組**：無源蜂鳴器 (Buzzer，接入 GPIO 12 腳位，由硬體 PWM0 直接驅動) 與 LED 高頻閃爍警示燈。

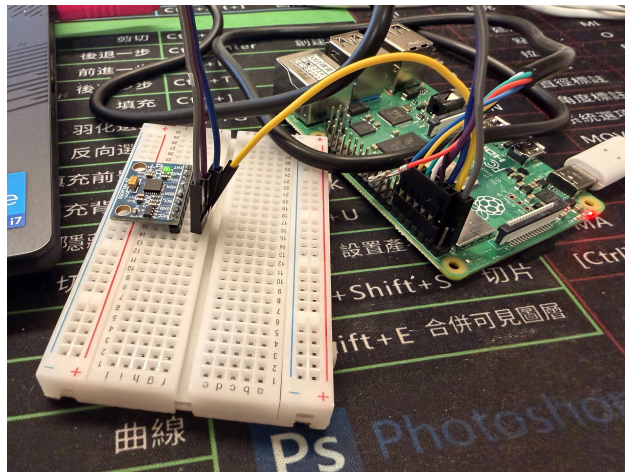


Figure 4.1: 大安 IoT 觀測站硬體線路與樹莓派 MPU6050 實體佈設圖

4.2 數位訊號處理 (DSP) 配置與技術指標

為了在平時喧囂的都會區環境噪訊中精確濾波、辨識並速報真實地震，系統在邊緣端配置了高標準的數位訊號處理 (DSP) 演算法：

1. **高頻取樣率**：系統主循環採樣頻率設定為 50 Hz (取樣時間間隔恆定為 0.02 秒)。

2. **四階巴特沃斯 (Butterworth) 高通濾波器**：為徹底根除感測器因溫度或時間產生的直流零點漂移，配置截止頻率為 0.1 Hz 的四階高通濾波。
3. **FFT 功率頻譜分析**：系統觸發時，自動截取時域訊號並加入**漢明窗 (Hamming Window)** 進行快速傅立葉轉換，解算出地動震動之優勢頻率 (大安站實測雜訊優勢頻率為 0.10 Hz)。
4. **互補濾波器 (Complementary Filter) 姿態解算**：動態追蹤觀測站即時的 Roll (翻滾角) 與 Pitch (俯仰角)，設定濾波因子 $\alpha = 0.96$ ，嚴密監測觸發時感測器是否發生物理傾斜 (實測觸發震動時姿態為 Roll: -0.1° , Pitch: -2.0°)。
5. **地震觸發演算法 (STA/LTA)**：採用專業之長短時平均窗比值法。設定短時間平均窗 (STA) 為 0.5 秒，長時間平均窗 (LTA) 為 10.0 秒。當 STA/LTA 比值門檻值超過 3.5 或本地峰值地動加速度 (PGA) 直接突破 2.5 Gal 時，即判定為地震事件觸發。
6. **CWA 2020 震度分級自動解算**：軟體智慧演算完全符合中華民國交通部中央氣象署 (CWA) 最新修訂之震度分級，由 PGA 自動導出震度級數 (實驗中最大峰值加速度曾模擬達 746.979 Gal，系統精確解算並速報為 ****6 強烈震****)。

4.3 開源核心程式碼與多執行緒邏輯解析

大安觀測站的軟體架構由兩個底層 Python 核心腳本協同驅動，解決了嵌入式邊緣端常見的效能瓶頸：

4.3.1 監測、處理與雲端速報主程式 (*'seismograph_main.py'*)

該腳本在啟動時會先對 MPU6050 進行暫存器初始化，隨即執行 ****200** 次高速取樣的靜態零點自我校準 ******。主循環以 50 Hz 控制時間步長，即時讀取加速規數據。一旦觸發演算法成立，系統將自動執行：

- 鎖定並持續記錄隨後 15 秒的完整震動事件時域數據。
- 呼叫 Linux 本地中文字型，利用 Matplotlib 在背景自動繪製出包含三軸加速度波形、STA/LTA 即時比值曲線、FFT 功率頻譜、陀螺儀角速度與動態幾何參數表在內的 ****5** 面板 (5-panel) 暗色風格 (Dark Theme) 專業地震科學分析圖表 ******。
- 寫入本地 SQLite 資料庫 (*'seismo_events.db'* ****LINENotify** ***
DiscordWebhook ******)

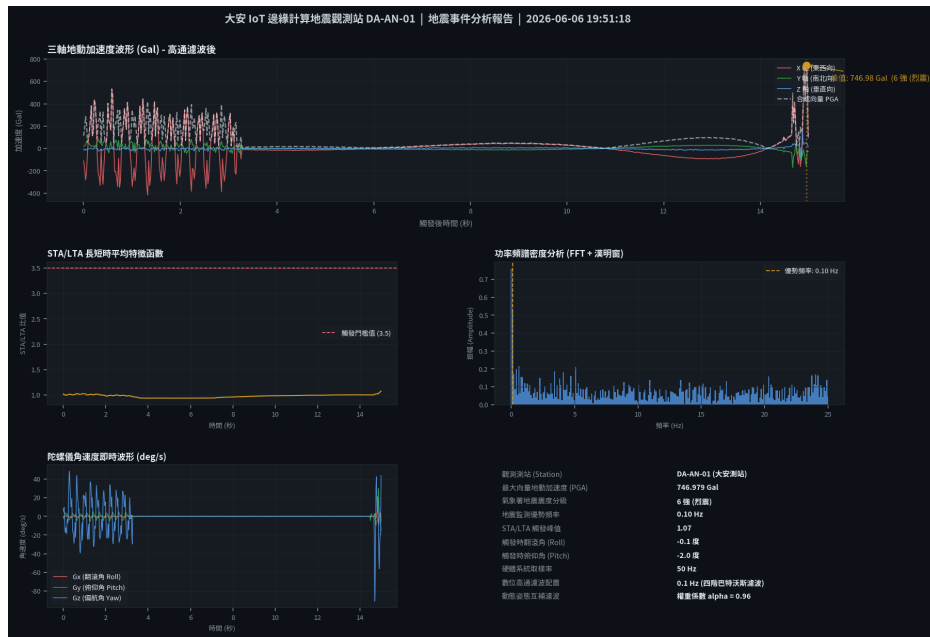


Figure 4.2: 大安 IoT 觀測站本地邊緣端自動生成之 5 面板暗色風格專業地震分析報告圖表

4.3.2 物理警報與執行緒優化 ('buzzer_alarm.py')

為實現一邊即時分析、一邊播放物理警報與互動遊戲之需求，腳本導入了多執行緒 (Multi-threading) 引擎。將背景音樂播放 (如瑪利歐主題曲) 放置於獨立的背景執行緒 ('bgm_worker')

針對樹莓派在執行 Pygame 與硬體通訊時常因 Python 全局解釋器鎖 (GIL) 導致的系統卡頓與閃退死鎖問題，本程式進行了核心優化：將執行緒切換延遲壓低至 '0.015 秒' 的黃金臨界點，並在退出時嚴格執行「先關閉 Pygame 視窗圖形介面，再中斷 'pigpio' 硬體守護進程」的資源釋放順序，確保系統在極端環境下秒退不卡死。

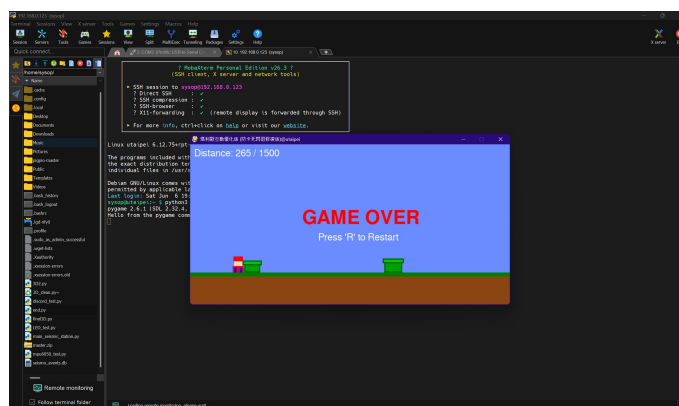


Figure 4.3: 整合遠端 MobaXterm 環境之 Pygame 瑪利歐互動優化版運作畫面

4.4 觀測成果與雲端自動化展示

大安 IoT 觀測站已成功導出多項具體成果。在系統實測中，硬體端 (Pi 4B 與感測器) 牢固黏貼於大安觀測基座上；當震動觸發時，終端機能秒級刷新數據串流。同時，雲端速報完全自動化，手機端能即時接獲 LINE Notify 推播通知，訊息內含精確的 PGA 加速度、震度級數、優勢頻率以及觸發瞬間的姿態翻轉角，成功展示了全自動化孤島監測之可行性。

第 5 章

地震科學分析與工程減災

5.1 2025 嘉義大埔地震科學反思

2025 年 1 月 21 日凌晨 00:17:27，嘉義大埔發生芮氏規模 6.4 的強烈地震，震源深度僅 9.7 km，造成震央附近產生高達 6 弱的局部震度。發震動力來源為菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊的強烈碰撞，最大主應力軸呈西北-東南向。

經濟部地質調查及工程學校資料顯示，該破裂面並未衝出地表。本研究綜合曾文水庫連續觀測站 (JWEN) 的 GNSS 數據 (觀測到地表水平位移 2.2 cm，垂直高程顯著抬升 6.8 cm) 與哨兵一號 (Sentinel-1) 衛星的 InSAR 雷達干涉變形圖，確認該地震是由一條地殼深處的**逆衝盲斷層 (Blind Thrust Fault)** 錯動所致。

大埔地震再次揭露了強震預警的系統極限。由於現行震災災防告警系統 (PWS) 從測站觀測、運算到發布需要約 4-5 秒的盲區時間，以地震波速計算，震央半徑 22.4 km 內的區域屬於「**預警盲區**」——即地表破壞性剪力波 (S 波) 抵達時，民眾手機尚未收到警報。因此，盲區內的減災無法依賴電子即時預警，必須完全仰賴結構本體的高標準耐震設計。

5.2 國家地震工程研究中心 (NCREE) 耐震工程工法研析

透過實地參訪國家地震工程研究中心，本研究解構了常見的結構漏洞與抗震更新工法。

5.2.1 常見抗震漏洞與共振效應

都會區最常見的抗震死角為「**軟腳蝦建築 (Soft Story)**」，此類建築通常在一樓挑高作商鋪並拆除承重牆，導致底層水平剪力剛度崩跌，強震時極易自一樓發生剪力崩塌。此外，台北盆地因鬆軟的厚積土層具備放大長週期地震波的「**盆地效應**」，使得 15 層樓左右的超高層建築易與土壤產生共振，其擺動震幅往往較中低階建築更為猛烈。

5.2.2 現代結構減震工法對比

現代地震工程主要採用消能與隔離手段，其核心機制如表 5.1 所示。

Table 5.1: 傳統耐震、減震與隔震工法力學特性對比表

工法分類	核心消能元件	力學運作機制與防災定位
傳統耐震	增設剪力牆、加粗柱體	「硬碰硬」結構。純粹依靠建材本身的韌性與鋼筋剛度死撐，易累積永久結構內傷。
減震抗震	挫屈束制支撐 (BRB)	內部鋼心板外包混凝土及鋼管，受強烈拉壓時鋼心屈服消能而不發生挫屈，穩定吸收地震動能。
調諧質量減振	調諧質量阻尼器 (TMD)	如台北 101 大樓的 660 噸阻尼球。其重量約佔大樓千分之一，主要用於平衡長週期強風引起的結構擺動，屬於舒適度提升裝置，非主防震結構。
主動隔震	橡膠隔震墊、鉛心隔震支承	於建築物底層基礎裝設隔震層，將整棟房屋與劇烈運動的地表完全「隔離」，減震效果最優。

5.3 學術演講心得與暑期中央大學實習展望

本學期特別聆聽了宋冠毅老師關於國外學術交流 101 天的精彩演講。宋老師分享了跨國學術合作的前沿動態與實地考察見聞，深刻顛覆了原本出國深造遙不可及的刻板印象。

面對即將於今年暑期前往國立中央大學地球科學系進行的地球物理研究實習，本課程與自主開發的樹莓派 IoT 觀測站系統已提供了完整的工具鏈準備。在實習中，本人預計將本學期熟練的「下半球立體投影理論計算」、「SmartSolo 節點佈設嚴謹流程」與「樹莓派端 Python 邊緣計算訊號處理技術」直接轉化為研究工具，投入大地工程與深部結構探勘專題，主動突破可能遭遇的巨量數據去噪瓶頸，並積極向學長姐與教授請益跨國地球物理職涯規劃。

第 6 章

結語與未來展望

6.1 本學期地震學核心體悟

縱觀本學期的學習，地震學絕非純粹的象牙塔理論，而是「理論數學、嵌入式物聯網資訊學與土木防災工程」的跨學科交織。透過手寫 Python 程式碼並成功部署 3D 初動解機制球與大安微型觀測站，將複雜的應力張量幾何轉換與邊緣端去噪演算法徹底實踐，深化了對地動訊號與斷層力學的理解；而野外及邊緣端的實作實驗則讓團隊深刻體會到，任何高質量的地球物理觀測數據，都建基於對訊號處理每一步驟細緻到毫秒級的調優與校正。

6.2 未來學術與實務研究方向

針對本課程與自研微型觀測站的延伸，未來規劃將朝兩個前沿方向深入拓展：

1. **邊緣端輕量化深度學習震相識別**：規劃在樹莓派端導入微縮後的輕量化神經網路模型（如微型 PhaseNet），於邊緣端實現 P 波與 S 波震相的零延遲高精度自動識別，進一步提升盲區速報能力。
2. **物聯網群體地震觀測陣列與連鎖反演**：期望在暑期中央大學實習中，學習將多個自研微型 IoT 觀測站組網，結合 GNSS/InSAR 數據進行多測站群體「聯合反演（Joint Inversion）」，以建立更具物理約束力且精準的盲斷層面破裂幾何力學模型。

本學期全模組之動態程式碼、時頻分析譜與立體投影模擬數據，已完整託管於雲端科研集成平台，供審閱組線上參照：

https://huggingface.co/spaces/Sapphirejimmy/seismology_final

BIBLIOGRAPHY

- [1] 中央氣象署，〈2025 年 12 月 27 日宜蘭外海芮氏規模 7.01 地震報告〉，《中央氣象署地震測報中心全球資訊網》，2025。
- [2] 陳柏亘、宋冠毅，〈2025 嘉義大埔地震盲斷層錯動之衛星同震變形與預警盲区反思〉，《臺北市立大學地球環境暨生物資源學系期末專題報告》，2026。
- [3] Beyreuther, M., Barsch, R., Krischer, L., Megies, T., Behr, Y., and Wassermann, J., “ObsPy: A Python Toolbox for Seismology,” *Seismological Research Letters*, vol. 81, no. 3, pp. 530–533, 2010.
- [4] Dynamic Technologies (DT-CC), “SmartSolo Scientific: World’s First Smart Seismic Sensor User Manual v4.2,” *DT-CC Geophysics*, 2024.
- [5] 國家地震工程研究中心，〈台灣結構耐震工法與挫屈束制支撐 (BRB) 技術推廣手冊〉，《財團法人國家實驗研究院國家地震工程研究中心》，2023。