
陣列式光柵光纖感測即時解算系統開發與
廣域無線傳輸地表監測設備整合之評估

**Development of realtime calibration
systemfor FBG sensing array and
evaluation forits integration with long
range wirelesstransmitting surface
monitoring devices**

執 行 單 位：中央研究院

執 行 期 間：106 年 2 月 20 日至 106 年 12 月 31 日

計畫主持人：中央研究院應用科學研究中心郭志禹研究員

共同主持人：國立交通大學土木工程學系黃安斌教授

研究人員：林沐禾、毛雅盈

行政院農業委員會水土保持局委託研究

中華民國 106 年 12 月

（本報告書內容及建議純屬執行單位意見，不代表本局意見）

目次

目次	I
表次	III
圖次	IV
摘要	VII
Abstract	VIII
第一章 前言	1-1
第一節 擬解決問題	1-1
第二節 計畫目標	1-2
第三節 實施方法與步驟	1-2
第四節 預定進度	1-4
第五節 太平山研究區域簡介	1-5
第二章 即時光柵光纖採樣解算系統開發安裝與測試-硬體	2-1
第一節 串列式光纖光柵水壓計	2-1
一、光纖布拉格光柵(FBG)原理	2-1
二、光纖光柵水壓計設計	2-2
三、孔隙水壓計之溫度相依性	2-2
四、光纖光柵水壓計的完整率定	2-3
五、光纖光柵的串接原理	2-3
第二節 紅外光解讀儀	2-6
第三節 低功耗擷取系統硬體架構	2-9
第四節 電源備援系統	2-11
第五節 硬體系統整合	2-12
第三章 即時光柵光纖採樣解算系統開發安裝與測試-軟體	3-1
第一節 光纖光柵即時解算系統	3-1
一、即時解算系統主程式	3-1
二、感測器校正設定輔助程式	3-8
三、系統整合執行腳本	3-10
第二節 時序資料庫與網頁呈現	3-11

一、KairosDB	3-11
二、Grafana	3-12
第三節 太平林道 13km 光纖光柵孔隙水壓監測應用案例	3-13
第四節 彰濱離岸測風塔動態傾斜監測	3-15
第四章 低功耗無線傳輸地表感測模組	4-1
第一節 Wasmote Pro v1.5 簡介	4-1
第二節 Wasmote 優勢	4-3
第三節 LoRa P2P Test	4-6
一、使用設備介紹	4-7
二、Wasmote 室內測試結果	4-18
三、供電系統配置	4-21
第四節 目前研發進度	4-23
第五節 現地測試	4-25
一、含水量計與無線通訊模組位置	4-25
二、截至 2017 年 10 月 27 日之狀況	4-29
第五章 結論	5-1
參考書目	參-1
附錄	附錄-1
附錄一、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形	附錄一-1
附錄二、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形	附錄二-1

表次

表 1-1	工作進度表	1-4
表 4-1	Waspote 相關資料整理	4-2
表 4-2	Waspote 四種不同模式差異之整理	4-5
表 4-3	LoRa module 參數設定之相關 Function	4-8
表 4-4	LoRa 接收器靈敏度(dBm)	4-9
表 4-5	量測點封包掉落情況	4-10
表 4-6	SCA103T-D04 引腳描述	4-13
表 4-7	讀寫寄存器表	4-14
表 4-8-1	Pin 1 至 Pin 12 引腳之描述	4-16
表 4-8-2	Pin 13 至 Pin 33 引腳之描述	4-17
表 4-9	LoRa 重要程式碼編寫	4-19

圖次

圖 1-1 宜蘭太平山蘭台地區之區域地形圖	1-5
圖 1-2 蘭台地區之區域地質圖	1-6
圖 1-3 蘭台區域崩崖地形特徵	1-7
圖 1-4 蘭台地區宜專一線道路裂縫	1-7
圖 1-5 宜蘭縣蘭台崩塌地正射影像	1-7
圖 1-6 蘭台崩塌地推估之地質與地下水位分布剖面，及崩塌地測傾管 IH-13 地中 水平變形紀錄	1-8
圖 1-7 宜蘭太平山蘭台研究區域之 Google 影像圖	1-8
圖 1-8 宜蘭縣太平山林道 10 至 15 km 處蘭台地區潛勢山崩區光達地形圖	1-9
圖 1-9 太平山蘭台地區監測儀器佈設位置	1-10
圖 1-10 水壓井鑽設現地施工圖	1-11
圖 1-11 現地照片(a)單頻 GPS 基線調整(b)水壓計&地電阻裝設.....	1-11
圖 1-12 太平山蘭台-儀器架設位置	1-12
圖 2-1 光纖光柵反射光波長示意圖	2-4
圖 2-2 光纖光柵水壓計設計示意圖	2-4
圖 2-3 孔隙水壓計(ps1)率定曲線圖	2-5
圖 2-4 解算流程圖	2-8
圖 2-5 Moxa 嵌入式電腦.....	2-13
圖 2-6 低壓直流 UPS 系統.....	2-14
圖 2-7 Raspberry Pi 整合週邊	2-15
圖 2-8 電腦週邊設備(a) Raspberry pi 3 單板微電腦	2-16
圖 2-8 電腦週邊設備(b)整合系統之一	2-16
圖 2-8 電腦週邊設備(c)為加入之後級 UPS 之系統	2-16
圖 3-1 解算系統架構	3-2

圖 3-2 感測器原始資料	3-9
圖 3-3 蘭台新井水壓圖	3-17
圖 3-4 蘭台新井溫度圖	3-18
圖 3-5 福海測風塔傾斜角度圖	3-19
圖 3-6 福海測風塔傾斜角度圖	3-20
圖 4-1 Wasmote PRO V1.5 Hardware 圖(正面)	4-1
圖 4-2 Wasmote PRO V1.5 Hardware 圖(反面)	4-2
圖 4-3 Sleep mode 流程圖	4-3
圖 4-4 Watchdog Switch 位置圖(紅框處)	4-4
圖 4-5 DeepSleep mode 流程圖	4-4
圖 4-6 Hibernate mode 流程圖	4-5
圖 4-7 Hibernate Switch 位置圖(藍框處)	4-5
圖 4-8 LoRaWAN US module	4-7
圖 4-9 封包掉落測試—量測點分布與量測距離	4-10
圖 4-10 最遠傳輸距離測試—量測點分布與量測距離	4-11
圖 4-11 傾斜儀 SCA103T-D04 圖	4-11
圖 4-12 SCA103T-D04 引腳示意圖	4-13
圖 4-13 含水量計 Soil moisture sensor v2.7.3 圖	4-14
圖 4-14 擴充版 Wasmote Proto Sensor Board v2.0	4-16
圖 4-15 LoRa 發送端配置圖	4-18
圖 4-16 LoRa 接收端配置圖	4-18
圖 4-17 焊線成果圖	4-19
圖 4-18 LoRa 發送端資料儲存情況	4-20
圖 4-19 LoRa 接收端資料接收情況	4-21
圖 4-20 本次測試所使用之太陽能板規格圖(正面)	4-21
圖 4-21 本次測試所使用之太陽能板規格圖(背面)	4-21

圖 4-22 太陽能板控制器	4-22
圖 4-23 供電系統整體之連接方式示意圖	4-23
圖 4-24 放置含水量計(Soil moisture sensor v2.7.3)之外構.....	4-24
圖 4-25 傾斜儀(SCA103T-D04)安置前	4-24
圖 4-26 傾斜儀(SCA103T-D04)安置後	4-25
圖 4-27 放置太陽能板之座台	4-25
圖 4-28 鑽孔施工現場	4-26
圖 4-29 設置完成的含水量計與無線通訊模組	4-27
圖 4-30 太陽能面板	4-27
圖 4-31 通訊模組於太陽能面板相對位置	4-28
圖 4-32 安裝機房端的天線並進行接收端的設定	4-28

摘要

就光纖光柵感測器設計與現場監測原理而言，此技術具有耐候佳、抗雷及電磁干擾的特點，適宜應用於嚴苛環境之中。基於這項優點，國立交通大學黃安斌教授及其研究團隊設計了量測一系列物理量的感測器，如孔隙水壓計、傾斜儀、應變與溫度計等等，於此感測端發展逐漸完備。

我團隊遂於 2015 年兩次在宜蘭太平山林道 13km 處試行佈建該光纖光柵監測系統，期以即時監測深層山崩潛勢區之深層地下水壓，目標在連繫該水壓與山崩觸發機制。然而在連續高頻率及即時物理量呈現的要求下，發現當時之系統無法達成，需仰賴費時高昂易誤的人工解算程序，且需於設備端安置一耗能之工業電腦以驅動光纖設備，來存放及傳輸監測所得之原始光波數據，這些困難將阻礙本技術之推廣而其關鍵點在於資訊處理端的不定，亦即缺乏整合機制。故提出一整合驅動自動解算與資料回傳功能的系統，為本計劃之緣起。而主體是開發一涵蓋以上主要功能之常駐方程式，而掌握該資訊技術後，即可引入低功耗、小體積之嵌入式系統，以節約現地電力需求，延長監測之時序完整度等等，以克服更廣泛採用時所必需的門檻。同時藉由本系統開發，測試以系統餘裕的計算功能，再整合現今物聯網長距離通訊技術，了解此類新技術於山區的適用性，亦或是需要排除的障礙。在計劃中即時解算軟體與低功耗嵌入設備整合均可穩定運行，且已推廣至外海測風塔傾斜量測之中，而於本計劃中之無線傳輸評估中，則發現在本研究區域傳輸仍受侷限而預期需引入中繼接續功能之節點補強。

關鍵詞：光纖光柵、光纖光柵即時解算系統、分佈式地下孔隙水壓監測、長距離無線廣域通訊

ABSTRACT

According to the design and monitoring principle, the optical fiber bragg grating (FBG) technique is weather endurable, immune to thunder and electro-magnetic interferences, such that it is suitable to be applied to harsh environments. To extend the applicability of the technique, Professor An-Bing Huang, of National Chiao Tung University and his research group developed a series of FBG sensors for sensing various physical quantities, such as underground pore water pressure, inclination angle, strain, temperature, etc.

In 2005, our research group implemented a demonstrative system for monitoring of a potential deep-seated landslide site, on the slope at 13 km of Taipin Forest Trail, Taipin Mountain, Ilan County. The goal was to monitor pore water pressure in a deep borehole, to relate the pressure to the landslide triggering mechanism and to construct towards a warning system. To achieve the purpose, the system had to be able to provide real time, reliable readings for the pressure. However, at the time of adoption of the system, it relied on time-consuming, error-prone and expensive hand-crafted data-processing routine. Besides, a high power industrial computer has to be installed to drive the FBG interrogator, store and upload the wavelength raw data. These requirements hindered the technique to wider applications.

The missing key component is simply an integrated, automatic data-processing information system and to develop such a software system is the origin and primary aim of the project. The result is a background daemon program performing the aforementioned tasks. With the information technology, it becomes possible to integrate the system into a low profile, low power consumption embedded system, such that reliabilities can be increased and better temporal coverage of monitoring can be achieved. In addition, with the abundant computational capability of the modern embedded systems, it can be further integrated with the emerging small foot-print IoT (internet of things) devices to provide wider spatial coverage. In the project, the third task is to assess the applicability of the new long range wireless communication technique in our mountainous area and to foresee the hurdles for wider deployments.

With the help of the present project, we completed the real time resolution system and integration into a low power embedded system. The system has been proved to be able to operate continuously and robustly. An additional FBG inclinometry system was also installed onto an offshore wind mast as a side contribution of the project. As to the long range wireless communication, we found that the point-to-point communication was not reliable and

intermittent nodes to forward data packets have to be properly incorporated in the area.

Keywords : optical fiber Bragg grating (FBG)、real-time FBG data resolution system、distributed underground pore water pressure monitoring、Long range wireless wide area network (LoRaWAN) communication

第一章 前言

第一節 擬解決問題

台灣近年來極端降雨事件頻繁，又地形陡峭導至坡地災害發生機率高。例如 2009 年莫拉克颱風造成高雄市甲仙鄉小林村山崩，即為極端降雨所導致的大規模崩塌災害。自此深層潛勢崩塌的議題則引起國內產官學各界關心。有鑑於此，大規模崩塌發生時序與應變機制為亟需探討之課題。然而大規模崩塌通常與深層滲水及區域局部水循環息息相關，因此土體內之含水量多寡為相當重要之指標(Anderson and Sitar, 1995; Cascini, et al, 2010; Collins and Znidarcic, 2004; Huang, et al., 2012)。大規模災害防治工程為近年來國內坡地防災重點之一，由於大規模崩塌之災害面積大，其影響範圍往往涵蓋保全重點如聚落與財產等。故需要針對其包含保全重點之區域進行連續、即時且穩定的現場監測。其監測的設備包含地表伸張計、傾斜儀、GPS 等等以監測滑移的產生。而深層的井下設施則多反應地下水位、壓力或應力，理論上更能直接反應邊坡穩定的力學性質。

本團隊自 2016 年起執行之行政院防災應用科技計劃：大規模崩塌多元尺度綜合監測、資料綜整分析與滑動機制研究：以太平山蘭台地區為例 I、II、III(106-2119-M-006-009)，於太平山林道 13km 處發現之深層山崩區塊及其周圍所布建的現有監測設備為基礎來進行本研究。在該區塊目前監測(GPS、SAR 與空照)結果顯示，該地區潛勢山崩活動明顯，年位移可達十餘公分，且與降雨關聯度大。由於邊坡內由降雨造成之邊坡入滲水及其引致之地下孔隙水壓之消長，為改變邊坡力學穩定性之主要因子，於是在該地區鋪設了陣列式光纖水壓計及傾斜儀，測量深層孔隙水壓(30~70m)。目前的結果顯示，這些設備得以提供降雨事件中，入滲水波前位置之歷線及潛勢傾角變形。該系統之優點為光纖感測器不畏雷擊、對環境電磁干擾免疫等優點，然而本系統目前呈現兩大缺點，首先是原始資料仍由人工進行週期性的校驗解算，而未能達到即時物理量監測的要求。據以往經驗每次人工解算皆需要一碩士級以上人力，進行約三天至一周的計算，且需人工校驗原始光纖波長資料的完整性，缺漏資料補遺以及最後的物理量解算。在這過程中不乏引入人為錯誤，故排除人工解算的程序是本計畫的第一要務。其次是整個系統運作時所需功耗太大(50-60W)，因而極度仰賴穩定市電及高功耗的不斷電設備的備援。這是因為在原始架構中，需要一組傳統個人(工業)電腦來驅動光纖設備，且以該電腦為資料採樣與數據儲存之用。自 2016 年系統啟用以來，我們發現該作業系統穩定性不佳，光纖驅動程式容錯率低等問題，使得尋求一適當的系統，成為本光纖光柵監測技術的另一重點，也是本計畫的第二要務。

最後，受到台灣特殊之地形、地質、氣候甚至於植被等因素影響，現場監測在極端環境下，其可靠度往往大幅遭受設施穩定度及傳輸方面的挑戰，如坡地電子設施被落雷擊毀或無線傳輸於天候不佳時無法傳送訊息等等。不斷嘗試新的通訊技術，期望克服通訊問題，是研究與開發人員所必須的。故在本計畫前述的兩大重點之外，加入測試新式低功耗長距離通訊設備與感測器開發之第三項目，並以同樣的太平山蘭台地區的實施狀況，來建議未來採用此等技術的採用施行前提條件等等。

以上三項為本計畫之核心，可分為以下三點：

1. 建構一光纖光柵監測之即時解算系統，排除人工解算。
2. 排除高功耗之個人(工業)驅動電腦的需求，朝向低功率、小型化的整合系統。
3. 在蘭台地區測試新式物聯網(IoT)通訊技術，並對未來於類似地區施行時提出施行準則。

第二節 計畫目標

根據前節的綜整，本計畫的目標如下：

1. 建立即時光纖感測器物理量解算系統，該系統包含
 - a. 即時解算之物理量，在本研究中為孔隙水壓與傾斜角
 - b. 自動上傳原始資料及解算結果至中央伺服器，時序資料庫建制及資料呈現界面。
2. 資料擷取系統微型與低功率化。透過重新撰寫即時解算驅動程式系統，完成跨平台移植。
目標平台為 MOXA 嵌入式電腦或樹莓派 Raspberry Pi，兩者均為 Linux 為基底的完整作業系統，最大功耗為 5 W 左右。
3. 完成一以 LoRaWAN 為傳輸技術之低功耗坡面土壤含水感知器與傾斜儀，來測試太平山林道 13 km 處，約 1 km 之高濕度之森林間傳輸運作。

第三節 實施方法與步驟

一、期初

1. 低功耗資料擷取儀硬體開發：主要工作為低壓直流系統構件選擇與整合施作。該系統包含 Moxa 或 Raspberry Pi 主機，當機看門狗，系統運行時之電流電壓感測器及直流高容量不斷電系統等元件等。以及該硬體整合統中之搭配韌體之開發，如系統運行之自我監測，評估及自動通報系統。
2. 即時解算系統撰寫：主要工作為克服串接式光柵光纖感測陣列中，針對單一感測器的特

性波長範圍完成定址，關聯至率定曲線，及利用該率定資料與讀取之光波波長解算為物理量，而後輸出。而該系統並負責初始資料之現地機房端之備份與週期上傳至後端（中研院）資料伺服器。

二、期中

1. 即時解算系統撰寫運行測試：主要工作為前述資料擷取儀硬體安裝至太平山林道 13 km，紀錄該資料擷取儀硬體及即時解算系統之穩定性，評估冗餘備援 (redundant backup) 之必要性。
2. 時序資料庫建制及透過網路之可視化呈現系統整合：主要工作擬將即時光纖解讀儀所紀錄之資料，整合至開放之時序資料庫系統 (e.g. openTSDB, 或 KairosDB)。該類系統是針對大量小數據類型之資訊型態最佳化後之特殊化資料庫類型。該資料庫可支援初步可視化之資料呈現。
3. 低功耗地表無線模組感知器開發：本模組初步僅擬提供地表土壤含水量計與雨量計，重點在於測試點對點 LoRaWAN 之通訊協定。考量未來在極端環境下使用，我們將特別注意選用低功耗模組。且由於感測器種類眾多，未來之各類整合之可能性也列入考量。目前已有一組候選平台(Waspmote) 在測試，在該平台中，單一模組之運行電流可低至微安培級。而軟體撰寫上，也將特別注意撰寫之程式範式(paradigm)，如利用有助於節電的硬體中斷架構，與週期性硬體休眠等範式。

三、期末

1. 持續即時解算系統撰寫運行測試：主要工作為前述資料擷取儀硬體安裝至太平山林道 13 km，紀錄該資料擷取儀硬體及即時解算系統之穩定性，持續評估冗餘備援(redundant backup) 之必要性。
2. 點對點 LoRaWAN 之機房接收端伺服器開發與穩定測試。主要工作在評估約 1 km 之高濕度之森林間傳輸運作。並與交大、成大等類似之利用不同無線傳輸技術之監測計畫，綜合評估傳輸性能，並探尋國內物聯網業者之意向，以為未來坡地，甚或環境監測架構建言。
3. 以太平山林道為縱深，測試 LoRaWAN 通訊瓶頸，規劃未來廣域監測架構。

第四節 預定進度

本計畫預定之工作進度如表 1-1 所示。

表 1-1 工作進度表

重要工作 項目	工作 比重 (%)	預定進度	106 年			
			1-3 月	4-6 月	7-9 月	10-12 月
即時光柵光 纖採樣解算 系統開發安 裝與測試	25	工作量 或內容	解算系統程式 撰寫，擷取系統 開發，後端時序 資料庫架設	光柵光纖 感測校正 率定	安裝系統至太 平山監測基地 及運行	系統穩定性 評估
		累計百 分比	50	70	85	100
低功耗無線 傳輸地表感 測模組	25	工作量 或內容	地表土壤含水 量計與雨量計 開發組裝	無線模組 實驗室測 試	安裝低功耗無 線傳輸地表感 測模組至太平 山監測基地及 運行	安裝系統至 太平山監測 基地及運行
		累計百 分比	25	50	75	100
無線通訊品 質驗證	25	工作量 或內容			通訊品質監測	通訊品質監 測
		累計百 分比	0	0	50	100
報告撰寫	25	工作量 或內容		期中報告	期末報告	成果報告
		累計百 分比	0	35	70	100
累計總進度	百分比		19	39	70	100

第五節 太平山研究區域簡介

本計畫以太平山蘭台為研究區域，並延續我團隊於行政院防災應用科技計畫(林慶偉，2015;林慶偉，2016)，於太平山林道 13km 處所發現之深層山崩區塊及其周圍所布建的已有監測設備為基礎，來進行本研究。此研究區域位於宜蘭縣大同鄉太平村，蘭台苗圃位於羅東林區管理處太平山事業區 98 林班內，此處由行政院農業委員會林務局所管轄，土壤屬於砂質壤土，以培育中高海拔造林樹種為主。蘭台屬太平山白嶺區域、天狗溪流域邊坡(圖 1-1)，邊坡坡趾處受到天狗溪(田古爾溪)支流侵蝕，崩塌區塊位於白嶺巨木景點東方，如圖中紅色虛線所圈繪的區塊，由崩塌處之等高線可看出地形由東向西漸漸增高，坡面約以 15 度傾向東南，海拔高度約介於 1000 至 1200 公尺之間。本區因雨量豐沛，加上地層屬較軟弱之硬頁岩/板岩帶，因此，附近流域之溪谷皆發育出強力之向源侵蝕，進而造成許多崩塌發育。(林慶偉，2015)

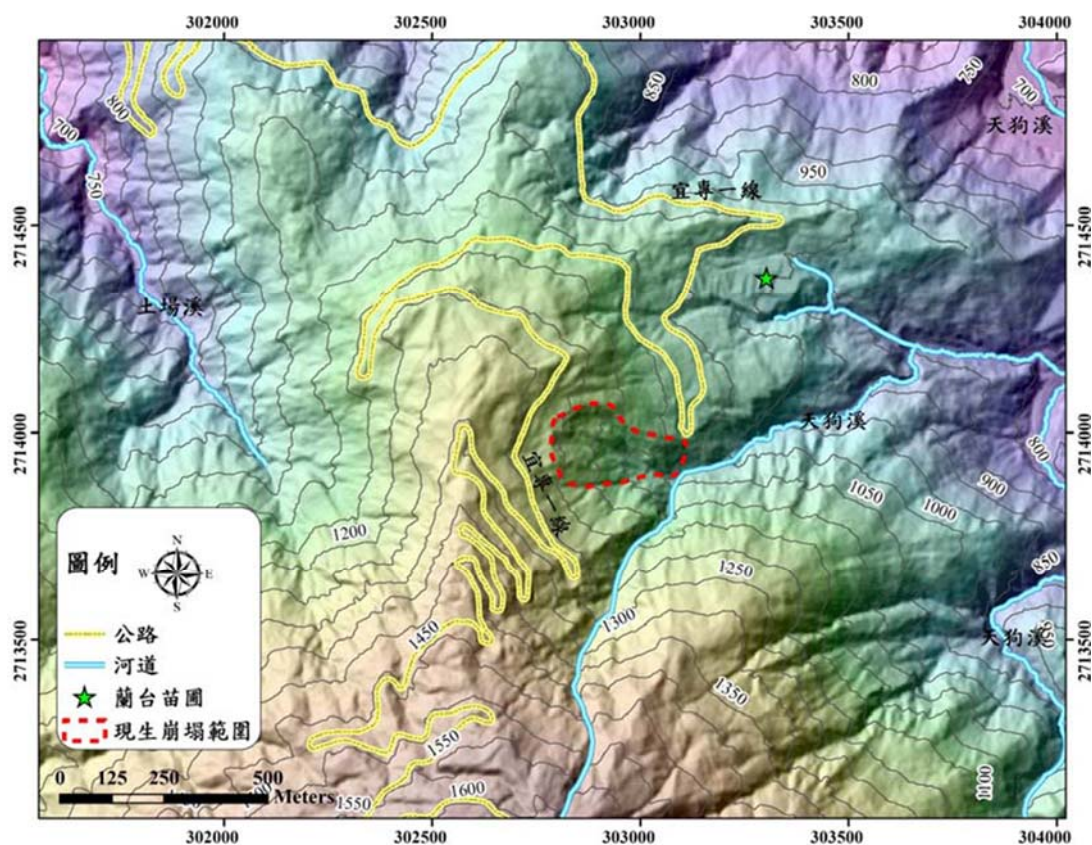


圖 1-1、宜蘭太平山蘭台地區之區域地形圖(底圖為五米之數值地形模型)

以下內容引用至 105 年行政院科技部防災應用科技計畫(林慶偉，2016)。根據中央地質調查所 1/50,000 三星圖幅，本研究區域位於廬山層清水湖段及仁澤段之間(圖 1-2)，其岩性組成為厚層至塊狀板岩偶夾薄層變質砂岩或是透鏡狀變質砂岩，且普遍發育位態呈東北-西南

走向之次生劈理面(地調所, 2010)。廬山層根據岩性與構造特徵, 由下到上可分成古魯段、清水湖段, 以及仁澤段三段(曾長生, 1978), 由黑色到深灰色的硬頁岩、板岩、千枚岩, 以及深灰色變質砂岩互層組成, 並含有少量零星散布之泥灰岩團塊。

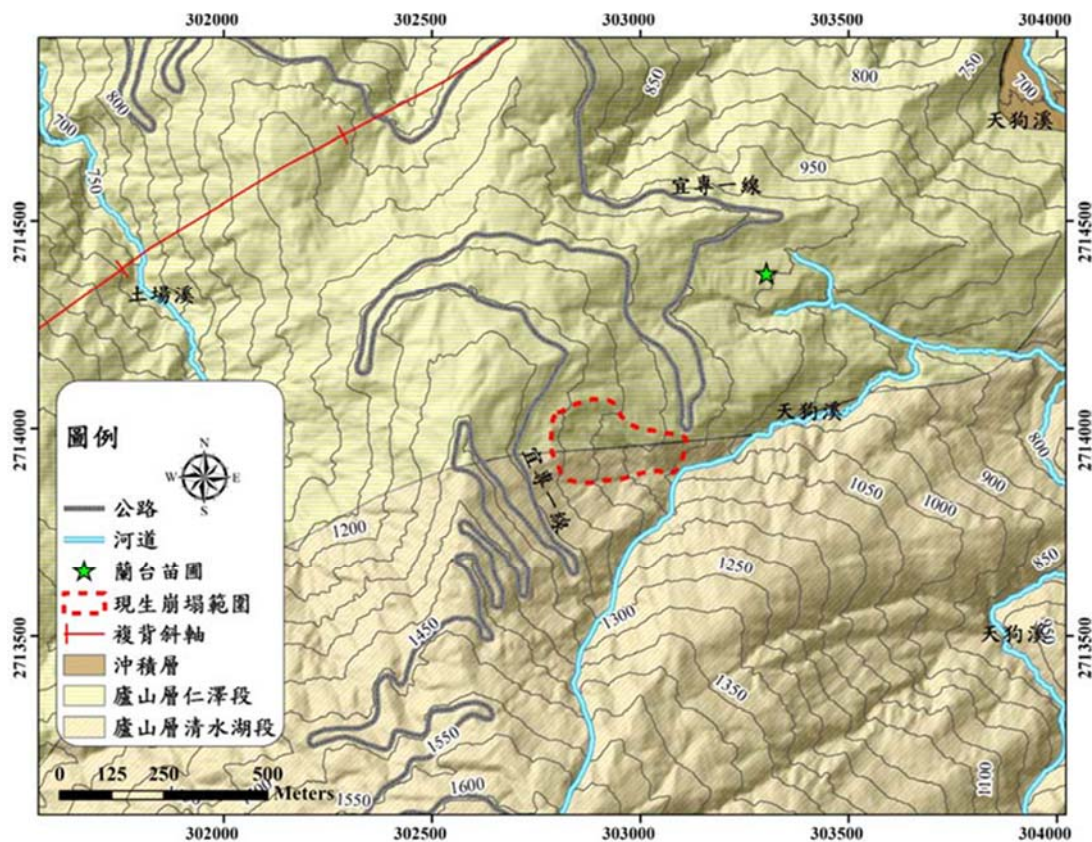


圖 1-2、蘭台地區之區域地質圖 (修改自 2010 年, 地調所三星圖幅)

蘭台地區相關資料顯示自 2005 年開始, 周圍道路陸續產生張力裂隙與沉陷之現象(圖 1-3 與圖 1-4), 其明顯受到大規模崩塌之地表潛移作用影響(地調所, 2011)。蘭台苗圃崩塌地調所自 2010 年起開始進行觀測(圖 1-5)。蘇拉颱風襲臺期間(101 年 7 月 30 日至 8 月 3 日), 蘭台累積雨量達 1,499 毫米, 而 72 小時最大累積雨量達 1,473 毫米, 接近 100 年重現期 72 小時延時雨量(1,503 毫米)。水位觀測顯示驚人的雨量導致地下水位有明顯的抬升, 其中又以 IH-19 水位觀測井水位上升 16.9 米最為顯著, 整體而言, 地下水位抬升量介於 3.1 至 16.9 米之間。地中變形觀測顯示 IH-13 及 IH-15 分別於地表下 16.5 米及 47.5 米有明確的位移(圖 1-6)。本研究團隊初步進行現地勘查後, 發現沿著蘭台地區南側邊坡明顯變形、部分樹林傾倒且路面毀壞嚴重, 下邊坡有一處現生崩塌, 相較於蘭台苗圃更具崩塌潛勢活動的跡象(圖 1-7)。



圖 1-3、蘭台區域崩崖地形特徵



圖 1-4、蘭台地區宜專一線道路裂縫(寬約 3~5 公分、落差約 3 公分高)

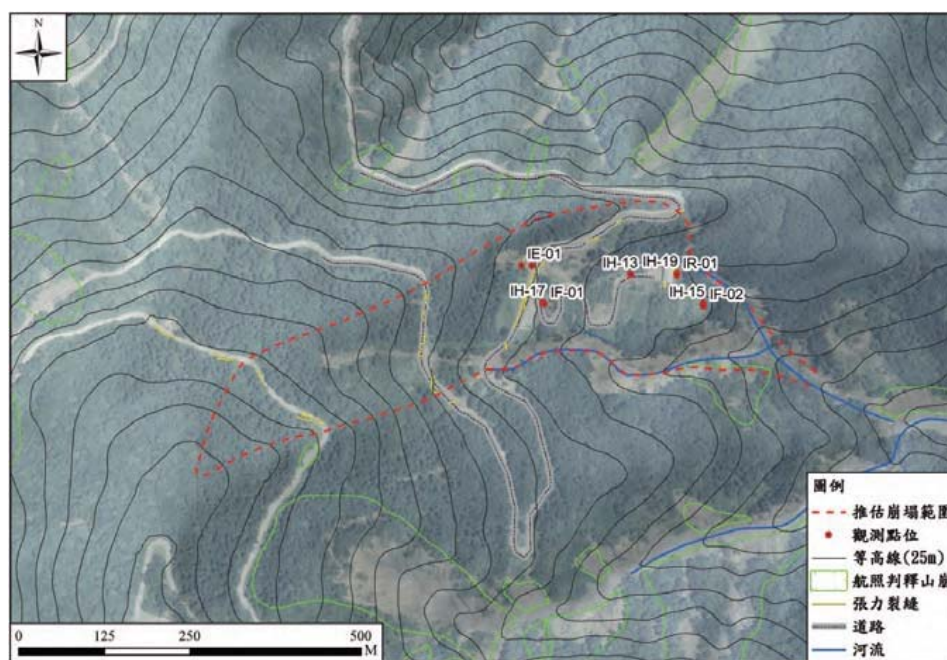


圖 1-5、宜蘭縣蘭台崩塌地正射影像 (2002 年 3 月拍攝)。

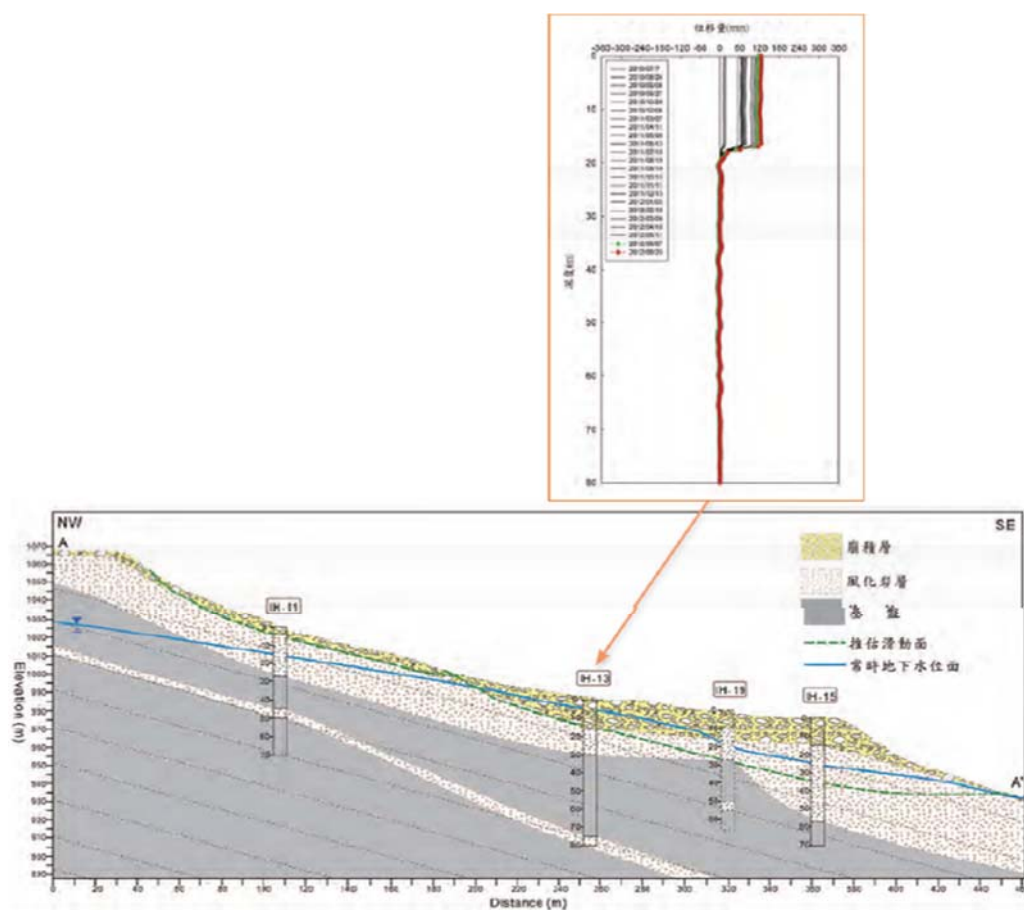


圖 1-6、蘭台崩塌地推估之地質與地下水位分布剖面，及崩塌地測傾管 IH-13 地中水平變形紀錄

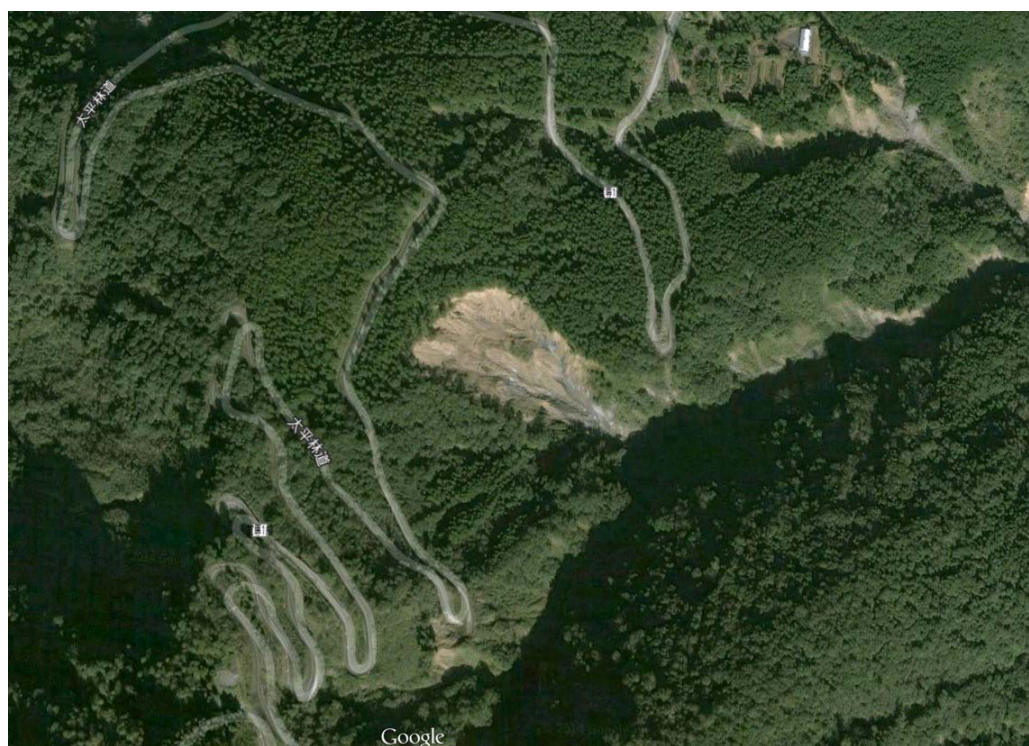


圖 1-7、宜蘭太平山蘭台研究區域之 Google 影像圖

太平山蘭台地區之潛移崩塌是在 2012 年由光達判讀所發現，而後續由 2014 年及 2015 年防災應用科技研究計劃所裝設周密的監測設備，如地表 GPS、井下地電及孔隙水壓計等(圖 1-8)。由於宜專一線為太平山森林遊樂區唯一聯外通路，但蘭台地區並無具體保全對象，地調所計劃中部分井下監測儀器受損無法修護，以致於蘭台觀測計畫已於 101 年年底終止。目前則預計將該大規模崩塌區域整合為水保局計畫中。

在太平山林道 13km 處目前監測 (GPS、空照與 SAR) 結果所示，該地區潛勢山崩活動明顯 (年位移甚可達十餘公分)，且與降雨關聯度大。由於邊坡內由降雨造成之邊坡入滲水及其引致之地下孔隙水壓之消長，為改變邊坡力學穩定性的主要因子，於是在我團隊所共同主持之子計畫中(林慶偉，2016)，於該地區鋪設了陣列式光纖水壓計及傾斜儀，測量深層孔隙水壓 (30~50 m)。

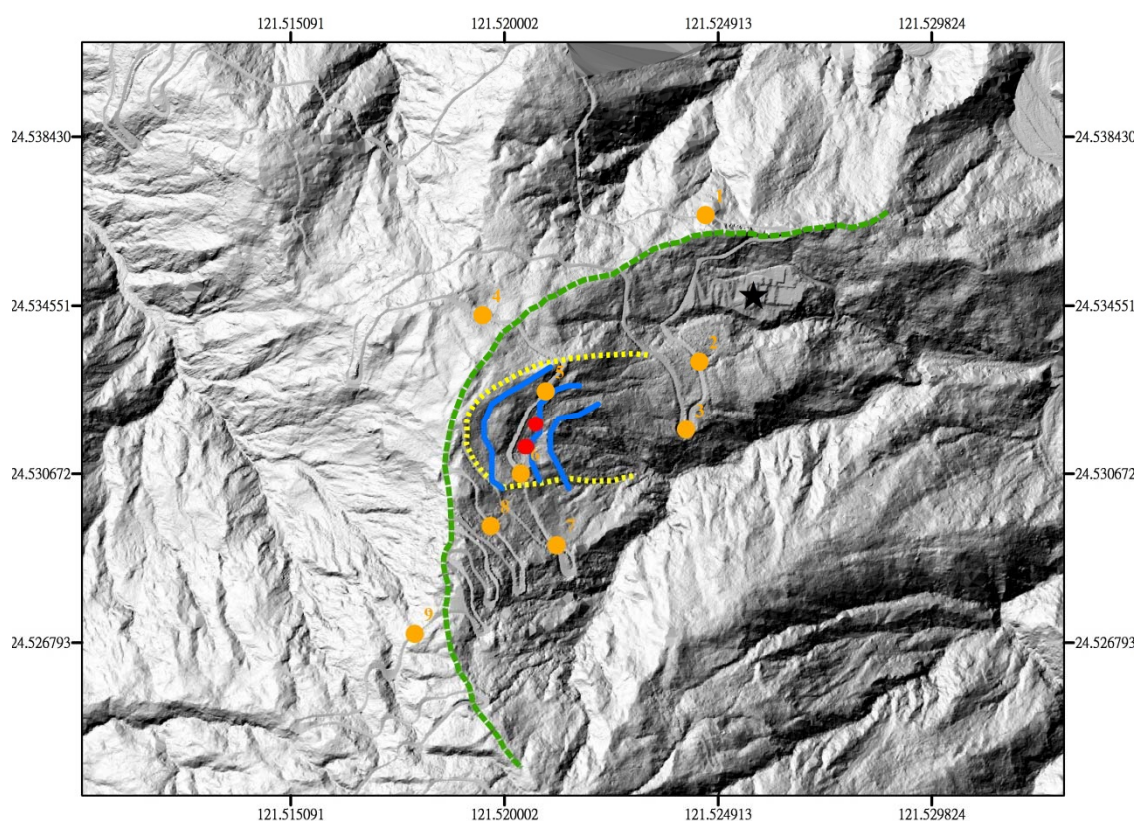


圖 1-8、宜蘭縣太平山林道 10 至 15 km 處蘭台地區潛勢山崩區光達地形圖。橙色點為代表地表單頻 GPS 監測站位，紅色點位為兩口 70 公尺監測井，安裝設備包含地電量測電極、光柵光纖孔隙水壓計及傾斜儀。藍色實線為現生崩塌，黃色虛線為監測中之潛勢崩塌。(林慶偉，2015)

圖 1-9 為太平山蘭台地區監測儀器佈設位置，其中黑點為 GPS 佈設點位，目前共有 12 個測站；紫色為地震儀佈設點位，目前有 10 個測站；而 A&B 兩點為鑽井位置，點 A 為光纖孔隙水壓監測井位置，點 B 為光纖傾斜儀位置，但目前光纖傾斜儀讀數飽和，已無繼續使用。關於傾斜井鑽孔的垂直度是傾斜監測重要設施，我們在本地區的施工經驗如下：傾斜監測井的垂直度有賴於現場施工團隊與工班的專業經驗，我等研究團隊無法左右，特別是在山區坡面上，故工班的經驗建議須加以綜合考量。而傾斜儀的一般量測範圍落在 $\pm 10^\circ \sim \pm 12^\circ$ 間，若垂直度落於該區間，傾斜角度即以感測器之率定曲線反推。在本區域，我們由安裝的光纖光柵傾斜儀中發現該地區有快速的潛移。自鑽井完工至感測器安裝間約兩個月時間，井下位移已使得安裝深度僅達 9 米。而再經過僅約一季傾斜儀讀數已包含 $(\pm 15^\circ)$ ，故已停止採樣。

而在點位 A 與 B 之間，我們利用今年度(2017)年防災應用科技計畫，重新裝置一口光纖光柵水壓計的孔隙水壓監測井，在該新井中水壓計安裝於深度自 30 至 70 米，以每十米為間隔佈放，以下將該新井命名為 LTW03。圖 1-10 和圖 1-11 為水壓井鑽設現地施工圖，圖 1-11 (a) 正在進行單頻 GPS 基線調整，圖 1-11 (b)為水壓計及地電阻裝設，圖 1-12 為光纖水壓計及傾斜儀監測器資料擷取機房位置。井位與資料擷取機房相隔約 500 米。

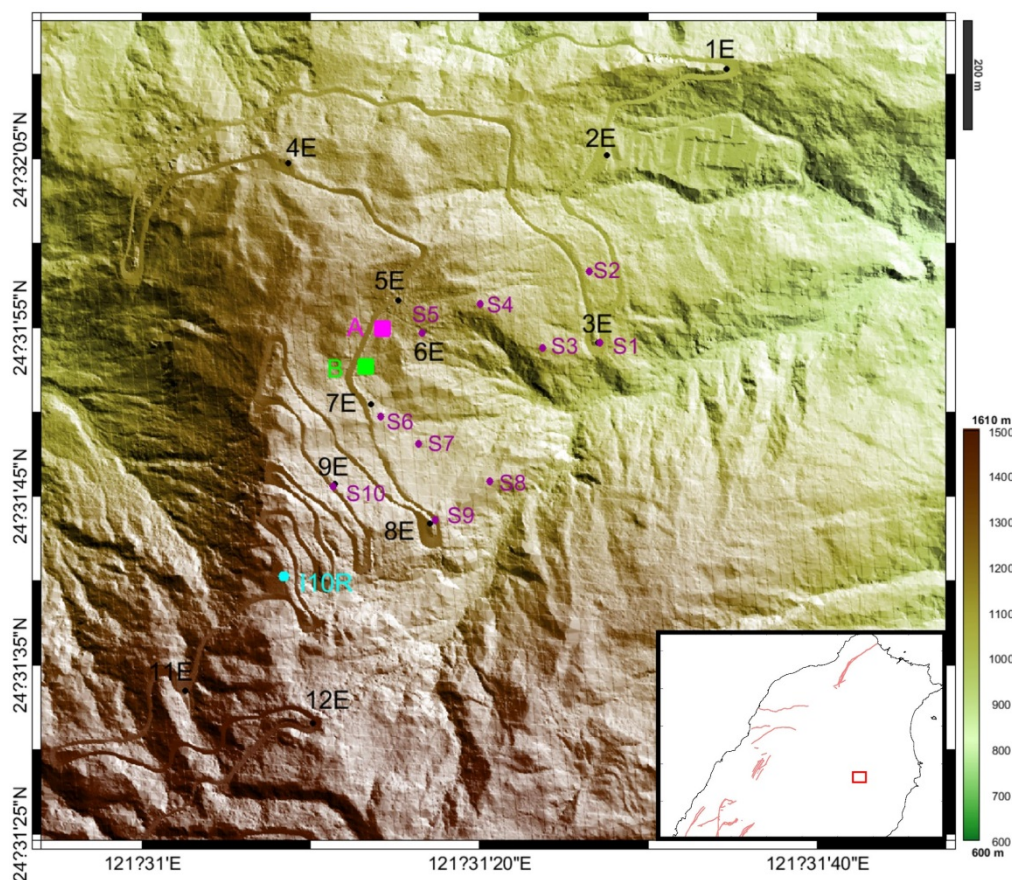


圖 1-9、太平山蘭台地區監測儀器佈設位置



圖 1-10、水壓井鑽設現地施工圖

(a)



(b)



圖 1-11、現地照片(a)單頻 GPS 基線調整(b)水壓計&地電阻裝設

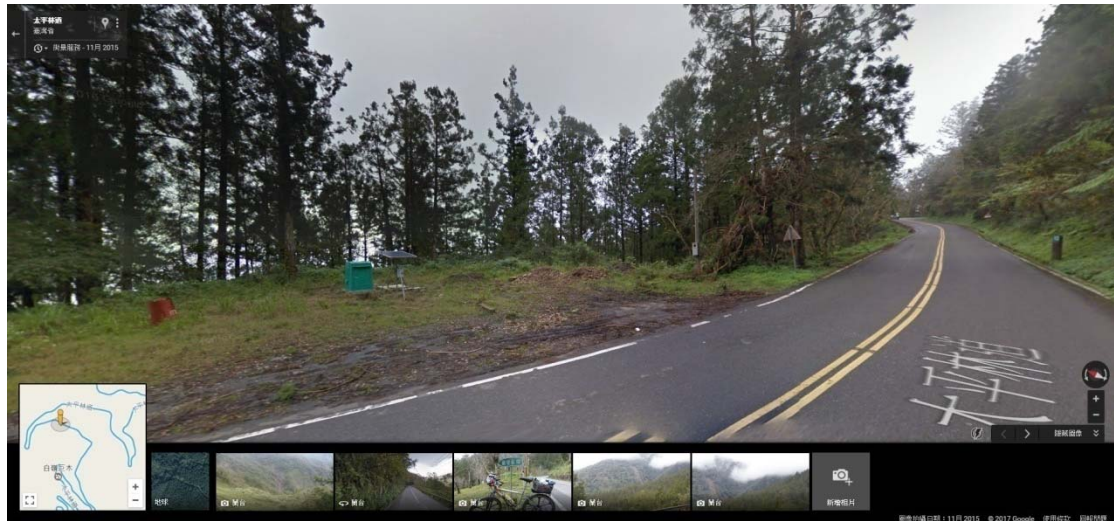


圖 1-12、太平山蘭台-儀器架設位置(圖片來源：Google 地圖)

第二章 即時光柵光纖採樣解算系統開發安裝與測試- 硬體

光柵光纖感測原理以及其多功架構已在回顧文獻中詳述(Doherty, et al., 2015; Hill and Meltz, 1997; Kersey, 1996)。然於本計劃前，環顧市面所見之光纖解讀儀器及驅動程式之架構以及成本，在實用化推廣，有其困難，而本計劃是為移除這些侷限所提出。本計劃是基於廣泛已知的光纖感測器架構，旨在進一步擴充由國立交通大學土木系光纖感測器開發製作團隊所設計之各式光纖光柵感知器(Ho, et al, 2005; Ho, et al, 2006, Ho, et al, 2008; Huang, et al, 2012)及監測架構至高穩定性非交互式(適用於無人操作)的系統。且由於本系統在運行中無與任何特殊軟體(Labview、Matlab)有依存關係，得以廣泛使用於各類系統，且隨應用環境調整。如本計劃所衍生的應用：永傳能源離岸風塔動態光纖傾斜儀系統。在離岸測風塔由於僅有獨立小型供電系統，對每一監測技術只能供電 10W 的額度。吾等以本創新系統進行監測，已自 2017 年七月起連續以 3Hz 採樣至今。

第一節 串列式光纖光柵水壓計

在本節中我們以蘭台大規模深層山崩區所設的光纖光柵孔隙水壓計為例，簡要說明本光纖光柵孔隙水壓計之感測原理。光纖光柵技術是採用 Fiber Brag Grating (FBG)原理(Hill and Meltz, 1997)所發展而來的串列式光纖光柵水壓計做為量測地層水壓的感測器。

一、光纖布拉格光柵(FBG)原理

光柵是利用擴散植入(doping)的微機電製程技術，在光纖中的特定區段製造出沿光纖方向折射率(refraction index)具規則週期式反覆交錯的段落。由於這個週期性的折射率，造成光波穿越這個區段時，特定的波長會被反射(穿透吸收，以下皆以反射波敘述)，而其他的波長則繼續穿透此一區段的光學行為。這是由於

光波的建設性(破壞性)干涉的結果，如圖 2-1 右上角之內嵌圖所示。這種光學行為稱之為布拉格干涉，而光柵為布拉格光柵。而我們稱在入射端所接收到的反射波長為布拉格波長(Bragg wavelength) λ_b 。布拉格波長與光柵的間隔(即光柵週期, Λ)呈現線性關係即 $\lambda_b = 2n\Lambda$ ，其中 n 為光纖的有效折射率。因此當光柵週期改變時，反射的光波長也會產生相對應的變化。在現今的光學電子技術進展下，我們已經可以可靠地偵測數十皮米至數奈米光波波長的改變。故可以以此來換算光纖光柵所受到的變形量，從而反推光纖應變。這即是此項技術的基本原理(Kersey, 1996)。

二、光纖光柵水壓計設計

光纖光柵水壓計的設計則應用反射光波長隨光柵週期改變此一特性。在孔隙水壓計中，我們設計一剛性外殼，該外殼是一圓柱狀中空鋼材並開有孔洞使水流入以便感測水壓，而內部則有一光纖光柵，且該光纖穿過一做為感測元件的金屬膜，將包含光纖光柵的光纖的一端固定於外殼，一端接上金屬薄膜如，圖 2-2 所示(簡旭君，2002; 許智超，2005; 高勝傑，2006)。當水壓改變時，金屬膜受到兩側壓差驅動而產生應變並輕微地拉扯光纖，進而使光柵間隔產生變化。因為光柵間隔的改變，反射的布拉格波長也不同，因此可藉由讀取到的布拉格波長回推感測器量測到的水壓。水壓與反射的光波長的率定曲線如圖 2-3，在我們所設計的壓力計，感測壓力的範圍從 0 kPa 到 500 kPa，對應的光波長變化為 ± 3 nm。將許多個光纖光柵感測器的光柵反射波波長間隔稍作區隔，我們即可將多個感測器串連起來，如圖 2-1 中。藉由通過一連串間隔不同的光柵，便可以反射出五段不同波長的光。如在太平山蘭台坡面上，這些串連的壓力計可對應於深度為 30 m、35 m、40m、45 m、50 m。

三、孔隙水壓計之溫度相依性

由於該孔隙水壓計的設計包含一剛性的軀殼，該軀殼是由不鏽鋼製成的厚

重結構，在這設計中，感測器本體可能隨所處環境溫度改變而產生拉扯光纖的應變(高勝傑，2006)。此為我們所指的孔隙水壓計之溫度相依性。為校正此一溫度效應所產生的應變，我們在壓力感測器外附加一組光纖光柵之簡易型應變計，作為溫度計使用。而率定曲線則是將整體孔隙水壓計置於溫控箱中，藉由改變溫度，同時紀錄壓力計光柵與溫度計光柵之波長，來迴歸壓力計之溫度相依性，如圖 2-3(b)中之壓力計與溫度計之率定曲線。

四、光纖光柵水壓計的完整率定

由前兩小節的描述可知，完整的光纖光柵水壓計是由溫度與壓力同時決定的。由於光纖光柵壓力計與溫度壓力呈現良好的線性度，故率定曲線皆以線性函數表示之。其率定包含以下兩部份：

溫度率定

$$T = a_T w_T + b_T$$

其中 a_T 與 b_T 為率定參數， w_T 為溫度計光柵所得之波長。而壓力則為

$$P = a_p w_p + \bar{a}_T T + b_p$$

其中 a_p 、 $\bar{a}_T$ 分別為壓力與溫度率定係數，而 b_p 為壓力率定常數。

而率定程序中，則以壓力計在溫控箱及壓力箱中與光柵解讀儀所記錄之資料，以線性迴歸方法來求得前兩式中之各項係數。 a_T 、 b_T 、 a_p 、 $\bar{a}_T$ 、 b_p 。

五、光纖光柵的串接原理

由於每一布拉格光柵接反射一特定波長(記為 W_0)，而為反應光纖變形，我們適當設計每一光柵以其基礎反射波長之 $\pm 3\text{nm}$ 波長範圍為一感測器之工作波長範圍，即 $W_0 \pm 3\text{nm}$ 。而光纖入射端的波長，通常為紅外光，具有一定波長範圍的寬頻光源，如我們所使用的 1528nm 至 1568nm 光源，故在此波長範圍內，約可容納至多 8 枚光柵 $((1568-1528)\text{nm}/6\text{nm} \doteq 8)$ 。而下節所述紅外光解讀儀，即是一特

殊用途的光學電子設備用以分析反射回來的波長訊號，而向驅動及採樣電腦，回報所接收到的由短而長排序的光波波長(Kersey, 1996)。

而採樣電腦接收到這些波長後，首先要針對各光柵感測器的設計資料，考量因現地因氣候或人為因素等環境變異，資料偶有漏失，故需核借助現場感測器串聯的拓撲結構，來對各波長所對應的感測器，來提取率定曲線(稱之為定址)，再進行物理量解算，這項工作為本即時解算系統的內容，將在第三章中詳述。

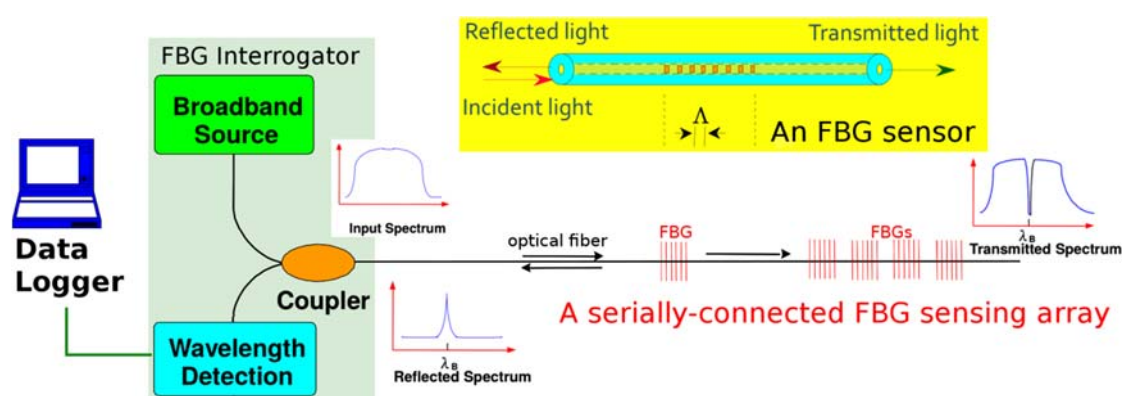
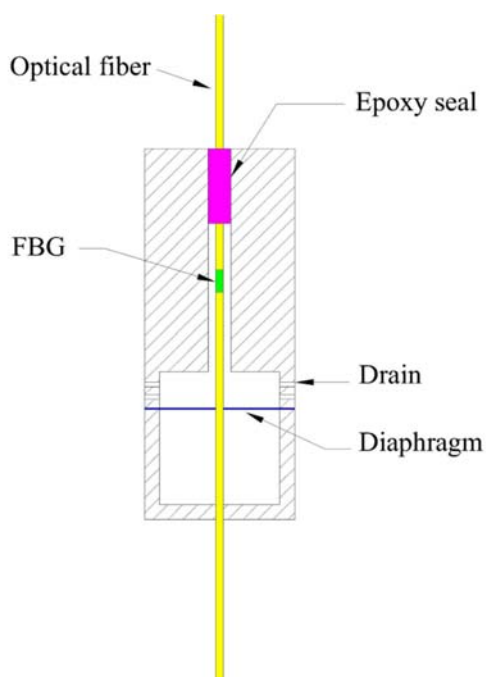


圖 2-1、光纖光柵反射光波長示意圖



(Schematic view)



(Photograph)

圖 2-2、光纖光柵水壓計設計示意圖

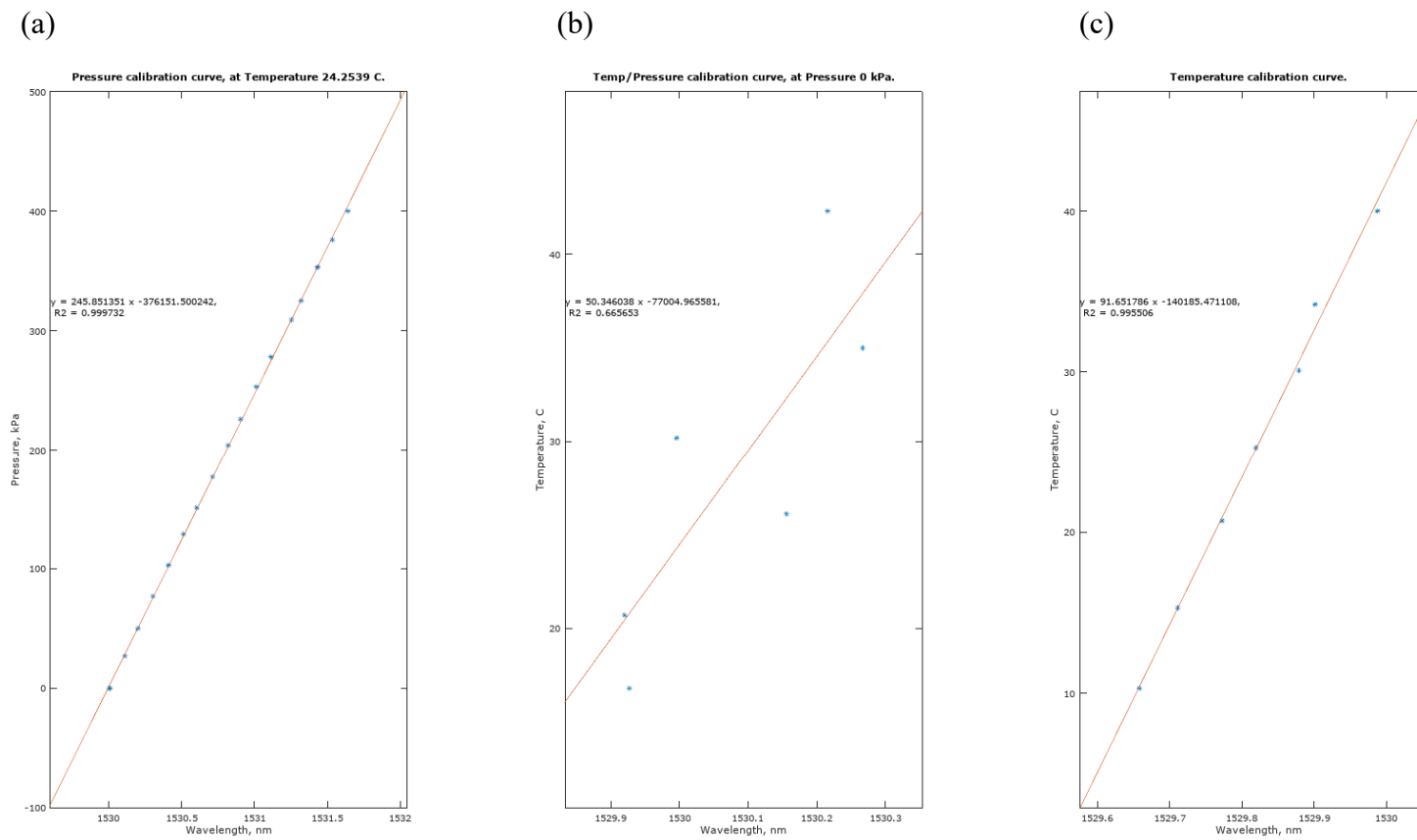


圖 2-3、孔隙水壓計(ps1)率定曲線圖

左圖為壓力與壓力計波長，中圖為壓力計波長與溫度，右圖為溫度與溫度計波長之關係圖

第二節 紅外光解讀儀

經 FBG 反射後透過光纖傳遞回來的光將由專用的解讀儀進行分析，解讀儀整合了紅外光光源、光譜分析儀與光纖光耦合器。由光纖光耦合器將射入與反射回來的光分流，光譜分析儀則由稜鏡與光柵等元件構成，能夠分析反射回來的光波長。本計畫使用 Arcadia Optronix 的 FBG 解讀儀，其擁有 16 個通道，每個通道可以接收 30 個波長，分析的光波長範圍為 1528~1568 nm。該解讀儀之最高採樣頻率為 3 Hz。亦即在目前解讀儀的通道數與每通道之光柵數之規格下，每秒至多可讀取 16 x 30 x 3 組光柵波長樣本。該整合型解讀儀提供乙太網路 RJ45 之硬體通訊介面。在解讀儀與驅動主電腦設定為由廠商 Arcadia Optronix 設定的固定 IP。在通訊層面上，採用標準的 UDP 通訊。通訊協定由 Arcadia Optronix 提供。唯目前有公開閱覽的限制，在本報告書中不便揭露，然其通訊原則十分簡單：命令與回應。常用命令包含版本、韌體查詢、光譜儀峰值閾值設定、光譜讀取以及連續光譜峰值掃描等。

一旦對解讀儀下達連續掃描讀取波長命令之後，解讀儀會在乙太通訊界面埠，持續以每秒三組 UDP 資料封包的頻率回傳波長資料給驅動主電腦。而此時驅動主電腦之工作即是接收資料與將峰值波長解算為物理量。由前一節對孔隙水壓計的描述可知，每一組光柵有其基礎設計波長，透過感知器的機械結構與光纖預拉設計，可感知 ± 3 奈米之光纖拉伸量。

每組 UDP 資料封包，包含解讀儀所有的 16 組通道，每通道 30 組波長由小而大排序之結構，接到回傳之資料封包後，驅動電腦首先必須檢視資料的完整性。這是由於容錯的考量，解讀儀在預定光柵波段若沒有讀取到相對的波長，會以下一組波長來填補，直至沒有新的波長峰值為止，若每頻段波長不足 30 組(同光柵數)，則以 0 值遞補。此外，在實際運作中，我們亦發現因光譜偶有較大頻寬的現象發生，而在相近的波長段紀錄多組數據。濾除這些錯誤必須輔以光柵之設計資料，特別是光柵之基礎波長，以及波長區間來校正，這項操作稱為資料完整性

檢核與感測器定址。

檢核過後，我們可根據陣列式光柵光纖感測網路的設定，將所讀取的波長定為歸納至各單一感測器。另一項關於定位操作的必要性是由於我們所使用的感測器，為精確度的考量，通常具備兩組光柵。如孔隙水壓計，除了壓力感測光柵之外，另外具備一組溫度光柵用來作為溫度補償校正之用。透過本段所述的定位操作，我們將對應到各單一感測器的兩組讀數，關聯至該感知器的解算系統內部資料庫中。

第三步為資料率定轉換，將定位至每一感測器的波長透過感測器的率定曲線，反算出物理量，並暫存在解算系統之內部資料結構中。最後，透過輸出設定，將原始波長與解算之物理量，輸出到指定的檔案中。以上這些流程在循環採樣的操作中，進行無限制的循環，而解算的流程如圖 2-4 所示

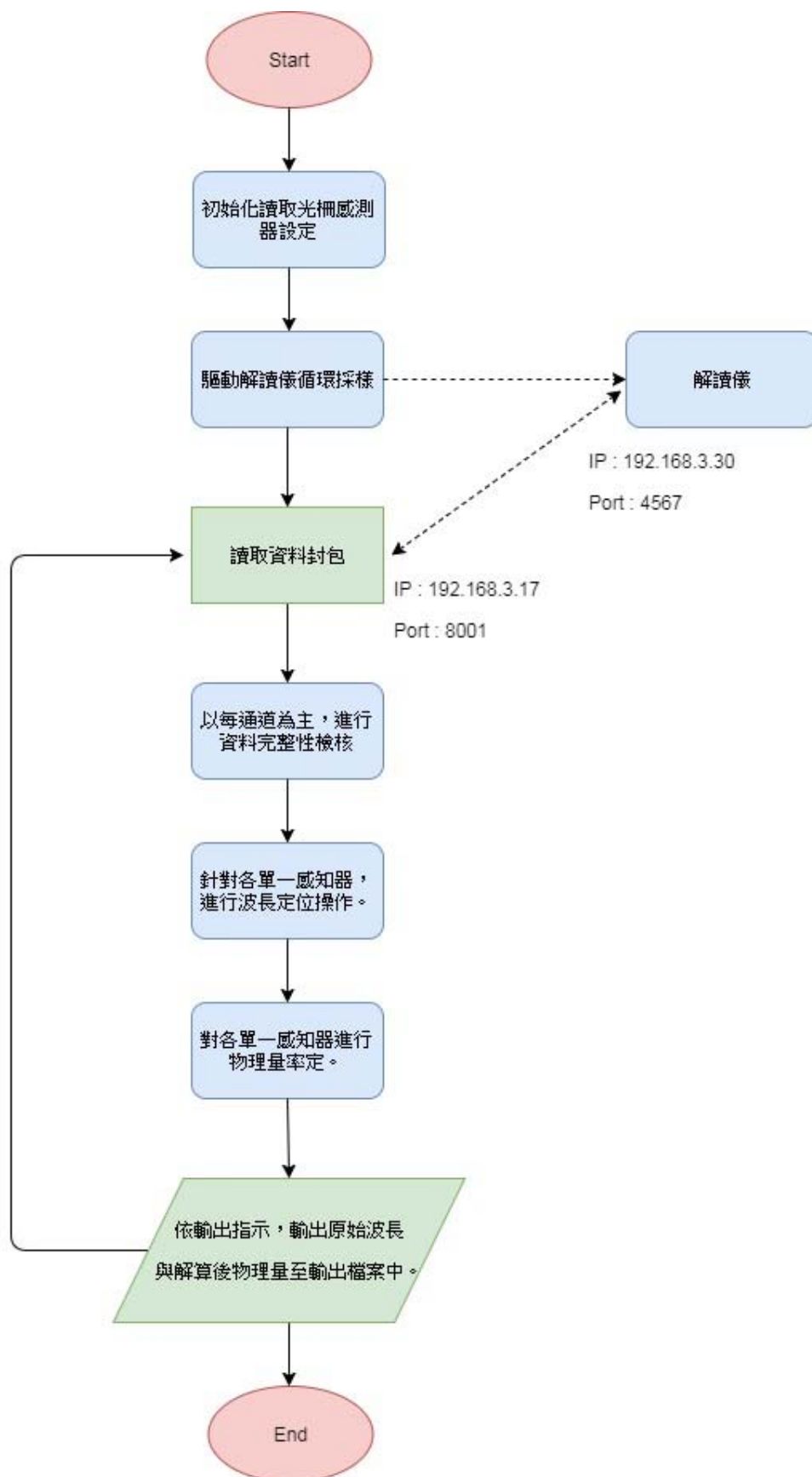


圖 2-4、解算流程圖

第三節 低功耗擷取系統硬體架構

本研究中光柵光纖感測系統之物理量是透過前節中光柵解讀儀所負責。該解讀儀是一光學與電子數位之整合設備，將所有光纖通道中所有的光柵波長訊號批次解讀後，以循序的方式不斷地藉由乙太網路 UDP 之通訊方式，回傳至驅動電腦。驅動電腦在此所扮演的角色主要有兩個；其一是提供人機操作的界面，控制解讀儀的運作，其次負責資料擷取、儲存，以及上傳至中央資料庫。

在 2014-2015 年應用科學計畫執行中，我們在太平山蘭台地區現場布置了一以微軟 Windows 為基礎的工業電腦負責此項任務。然而於 2015 年 1 月至 6 月的運作中發現以下缺失：

1. 原始波長數據紀錄，仍須透過人工解算至物理量，這是一次繁重且易出錯的工作，而為求避免單次解算的成本，往往會累積一段時日才進行解算，造成緩不濟急的情況。
2. 工業電腦功耗大，所採用的系統額定功率以 30W，考量前述該硬體所負擔的角色，是能源使用上的浪費。
3. 作業系統不穩定，Windows 作業系統主要是因應人機即時互動所設計的，其運作原理主要是透過即時的圖像界面，與操作人員互動的模式來進行。今將該系統至於無人看管的環境，是需要精細的調整，而這些調整乃是涉及相當程度的專業，而非該系統所未經調校即可勝任的。

我們所遭遇的問題包含：解讀儀驅動程式瑕疵。該驅動程式存有記憶體漏失(memory leak)問題，每數日需人工重啟，而失去穩定工作的要件。其次，作業系統不預期的更新中斷等，皆造成遠端無人操作的困擾。

以上種種缺失在學術上以事件為目標的研究方式尚且可行，但若是在於即時監測與預警系統的建置則須力求改進。這項硬體擷取系統的改進，也是本計劃工作項目之一。由於光學解讀儀部分已是專用設備，無更動的空間外，最重要的就是替換驅動電腦的架構，以及電力備援設備的改進。適合長時間無人照應且低

計算資源的電腦，是以安謀 ARM 為中央處理器為基底的硬體架構較為合適，在此架構下，最成熟的作業系統莫過於是 Linux 系統。且 Linux 系統高度的自由、多功，工具完備等特性，打造精簡完備的系統。在本計劃中，我們提出兩種嵌入式系統：1. MOXA UC8112 嵌入式系統與 2. 自行打造整合的樹梅派(Raspberry Pi)系統

1. Moxa 8112 嵌入式電腦為以 Cortex-A8 為處理器的 ARMv7 架構：該主機如圖 2-5 所示，其具有兩組 10/100 Mbps 乙太網路埠，SD 卡插槽，與一組 MiniPCIe 擴充插槽，在本計劃中該擴充插槽加裝 3G 行動通訊模組，同時負責資料上傳之通訊。該主機尺寸僅有 101×29×128 mm，重 224g 無外加 USB 及通訊模組狀況下，額定功率僅 5.4W，僅約一般傳統 INTEL Window 架構之工業電腦耗電量之 1/6，售價的 1/4。在軟體系統方面，該主機採用 Debian ARM7 Linux 系統，在該作業系統中，許多成熟軟體，如軟體開發工具 GCC、GDB，以及程式庫等，均與 PC 或工作站殊無二致，有助於在系統使用經驗的轉移。
2. 樹莓派 Raspberry Pi 系統，樹莓派是一英國公司 Raspberry 所發布的公開硬體系統，如圖 2-8 所示，他是 ARMv8，64 位元四核心中央處理器的架構。該系統主要訴求是多樣性與教育性。然其優越的硬體性能與低廉的售價 (\$35 美元)使許多客製化的平台皆得以實現。以下為我們所使用該系統的簡介：我們使用的是 Raspberry Pi 3 mode B 主機，該系統包含 1.2GHz 四核心之 ARMv8 處理器，1GB 動態記憶體、藍芽、無線 wifi 以及 10/100MB 乙太網路通訊模組，4 組 USB 擴充槽，HDMI 影像輸出以及一些其他本計劃中無需使用的硬體界面。這些系統最具規劃彈性的是它具有一組 40 接腳的泛用輸出埠 (General-purpose I/O, GPIO)。在這組輸出埠中，我們可以串接數位類比輸入訊號，而感測器也可進行數位類比、脈衝輸出，模擬傳統序列埠通訊、SPI、I2C 等通訊協定等等。這項設備使得市面上廣泛出現低廉且實用的擴充模組，使物聯網(IoT, Internet of things)的概念得以實行。有鑑

於此，實作一組高度整合的光柵光纖採樣及驅動系統。該系統預設的作業系統同樣是根源於 Debian ARM 的 Linux 作業系統。該系統經由 Raspberry 公司修正調整成為一類似 Windows 之作業系統。然而由於 Linux 的共同操作標準，系統間的核心操作與前述 MOXA 系統也有近乎 100% 的相容性。在電力消耗方面該系統使用 5V 輸入，最高額定電流 2.4A，12W。而本團隊之經驗，常規使用下約為 5W，系統遠較 PC 系統為基礎架構低。

第四節 電源備援系統

郊外山區常因天候事件、颱風、強降雨等事件造成電力中斷，而電力中斷之時正應是所有監測系統需要全力運轉的狀態。故電源備援殊為重要。我們所選取的兩種驅動電腦主機 (MOXA)、(Raspberry) 均是低電壓(5-24V)，低功耗 (<5W) 的系統，加上光纖解讀儀本身功耗 7W，總共約 12W。有目前的電力需求下，傳統市電級 UPS 則顯較不適用。其原因為 1. 一般 UPS 設計主要為高功率快速放電所用，其次，2. 應用市電 UPS 透過兩次電壓轉換過程 (UPS : 12/24V- > 110V 及光纖系統 110V- > 12/24V 在轉換過程中，即使採用高效率之電源轉換器，仍將損失約一之二成之功率)。故在本計劃中，我們採用低壓直流 UPS 系統模組。經廣泛評估，我們發現主要應用汽車用電子市場的低壓直流 UPS 模組 PicoUPS、OpenUPS 及 OpenUPS2，在供電功率上，符合目前的要求。這些直流 UPS 的電源端通常為 12-24V 直流，得以自動管理對鉛酸或是鋰電池充電過程，有些模組更具備輸出端電壓調控的機制。利用這些模組，我們設計一二級 UPS 系統，系統架構如圖 2-6 所示。其中 PSU USP64 為主電源供應器，用以轉換市電至 15V；額定工作功率 60W(無通風)，至 80W(強制通風)。而該值流供應至兩組 PicoUPS 120 不斷電系統。PicoUPS-120 個連接一組密封鉛酸電池 12V，45Ah 以及電池保護模組 SLA-LVP。該模組充電最高電流為 1A，為慢速型態，故完整充電歷程最長估計為 45 小時。兩組 PicoUPS 為前級不斷電系統，其輸出為 12V，經負載平

衡器(PWR-Y)後，輸入至二級 OpenUPS2。兩組鉛酸 45Ah 電池，預計可提供該監測系統約 90 小時之滿載運轉。OpenUPS2 之備援電池為 3400 mAh 18650 鋰電池。該系統提供 USB 通訊控制介面至主電腦。可透過主電腦調控以及探詢 UPS 狀態。該 UPS 輸出電壓為可調式。針對目前應用，設定為 16V。此系統為二級 UPS，在斷電及一級 UPS 匱乏的情況下該 UPS 提供最後約一小時之供電，進行系統關機、警示、通訊等。以上兩級低電壓直流不斷電系統預期可提供連續四日運轉。以此計算配置，若需達兩周時間，則須外加約 12V、200Ah 之容量，擬以外掛傳統 UPS 的方式解決。

第五節 硬體系統整合

因 MOXA 開放出來的低階硬體界面較少，在本計劃中，不擬採用該系統來示範深度整合。取而代之，在本節中我們描述利用 Raspberry Pi 的整合系統。我們的整合目標，是提供兩組乙太網路介面，外接 wifi 及 3/4G 通訊模組，以及新式低功耗長距離無線通訊 LoRaWAN 模組，以及監控與操作驅動電腦的週邊設備，如電源、風扇散熱等。為達此一目的，我們選配 TX300 與 Raspberry Pi 散熱模組。前者增加三組 USB，即時時鐘 (Realtime clock)，外接 wifi 模組以及較佳的供電能力 (5-20V)。後者則提供模組化的 GPIO 介面端子，以及連接外部感測與操控設備。外部設備包含：

1. 4G 傳輸數據機。此數據機透過 USB 連接至 Raspberry Pi。
2. LoRaWAN 傳輸數據機。此數據機透過 USB 連接至 Raspberry Pi。
3. 乙太擴充模組
4. SwitchDoc 看門狗(watchdog)，設定為每 2 分鐘檢視主機，若主機無反應，則強制主機重新啟動。
5. SwithDoc 電源監控模組。此模組透過 I2C 介面與 Raspberry Pi 通訊。用以監控一級不斷電系統供電狀態。

6. 風扇脈衝控制開關。在電池充電中，主電源有較高的輸出，用該設備控制散熱通風。
7. 5V 供電開關。5V 為光纖解讀儀供電，該開關用來遠端控制解讀儀之冷重置（斷電-重啟）循環。
8. 類比電流、溫度感測器，用以監測主電源狀態。
9. OpenUPS2 二級直流不斷電系統。此模組透過 USB 介面與 Raspberry Pi 通訊。

該整合系統方塊圖如圖 2-7 所示，而系統完成如圖 2-8 所示。圖 2-8(a) 為 Raspberry Pi 3；(b)為整合系統之一，其左側為 15V 主電源，中為前級 UPS，右為 Raspberry 主電腦，TX300 擴充模組與看門狗；(c)為加入之後級 UPS 之系統。



圖 2-5、Moxa 嵌入式電腦

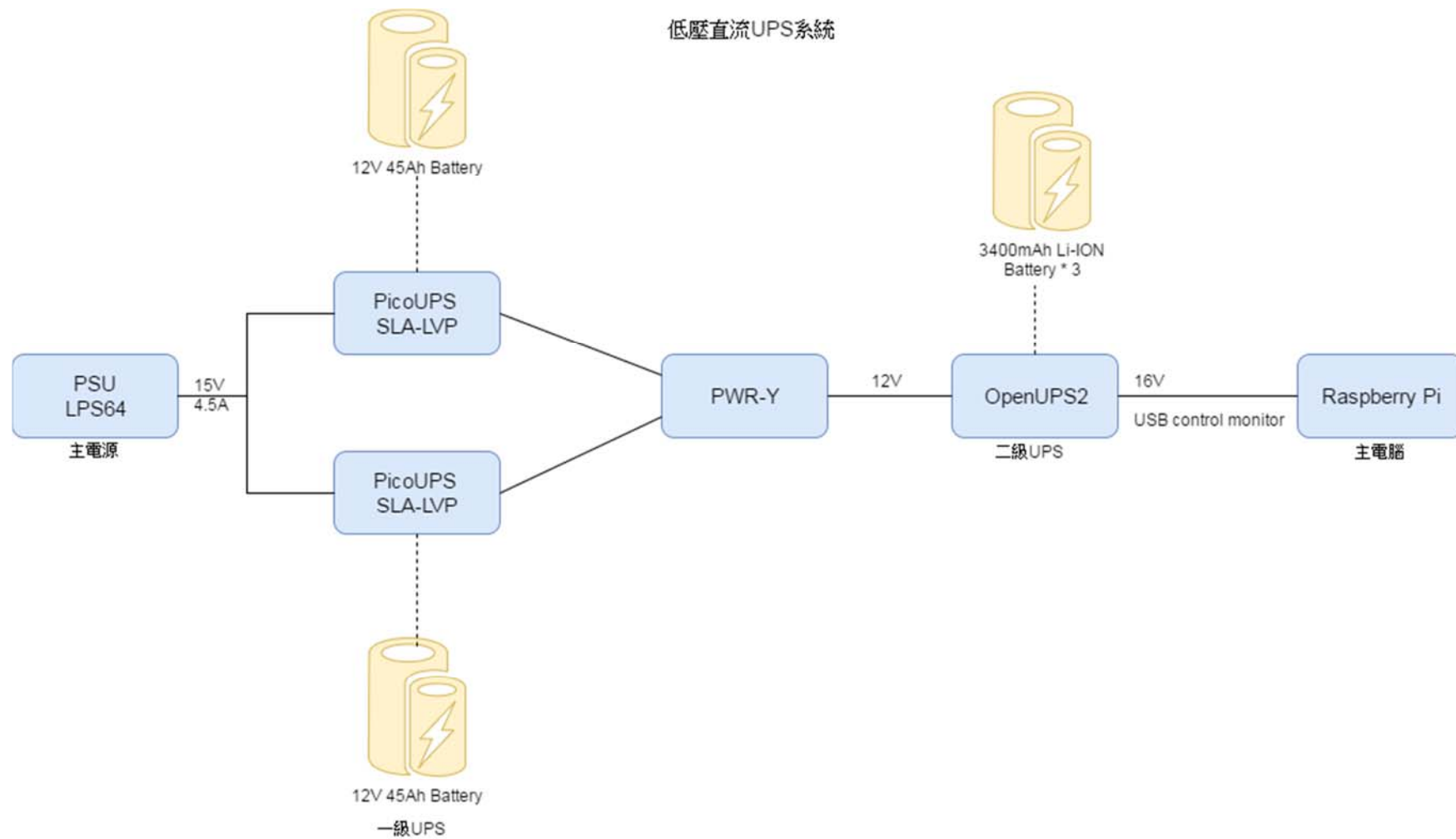


圖 2-6、低壓直流 UPS 系統

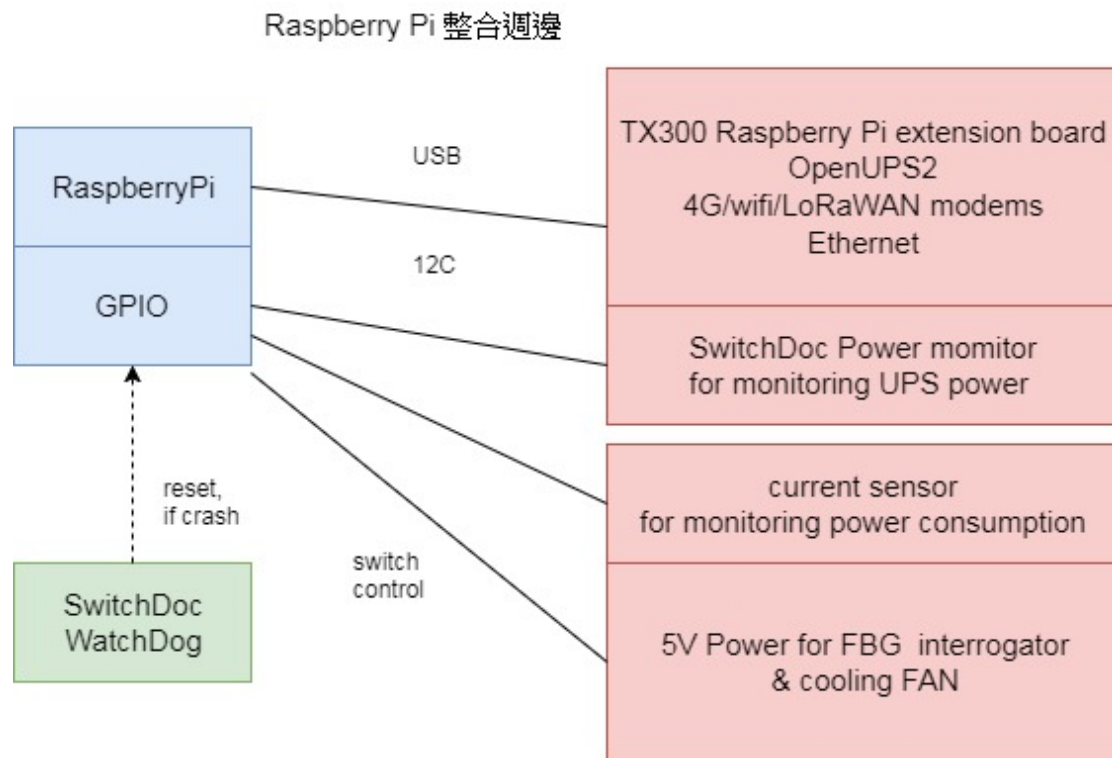
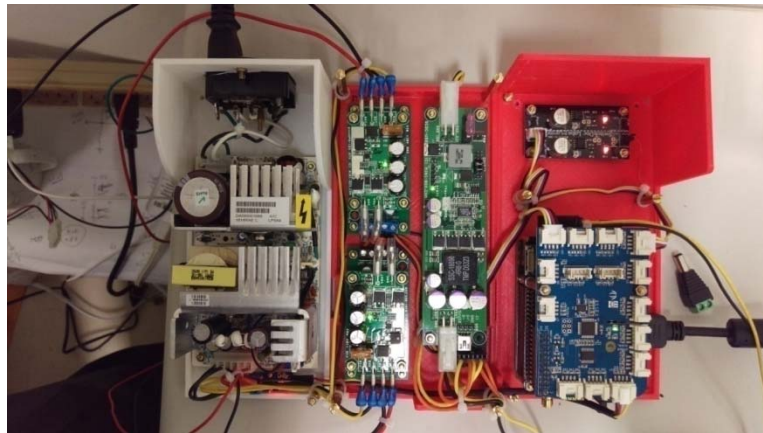


圖 2-7、Raspberry Pi 整合週邊

(a)



(b)



(c)

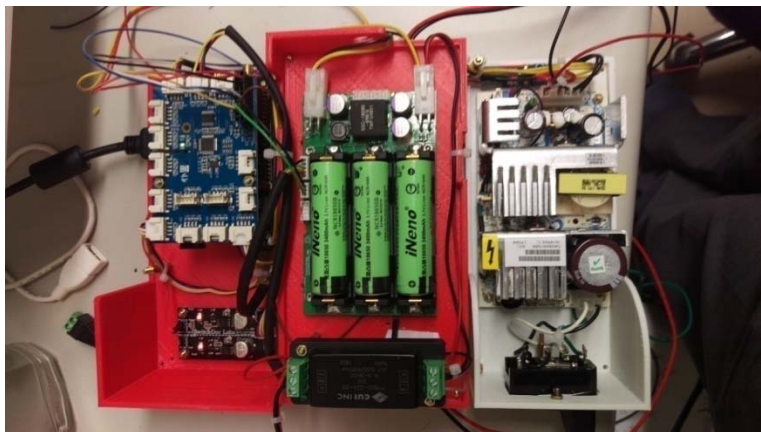


圖 2-8、(a) Raspberry pi 3 單板微電腦，為 Raspberry Pi 3，(b) 為整合系統之一，其左側為 15V 主電源，中為前級 UPS，右為 Raspberry 主電腦，TX300 擴充模組與看門狗 (c) 為加入之後級 UPS 之系統。

第三章 即時光柵光纖採樣解算系統開發安裝與測試-軟體

第一節 光纖光柵即時解算系統

在本節中，我們敘述光纖光柵即時解算系統的軟體架構，該即時解算為本計劃的核心項目。本系統架構包含三個主要部分：

1. 即時解算主程式
2. 感測器校正設定輔助程式
3. 系統整合執行腳本

以下依序在各子節中敘述這些系統組件。

一、即時解算系統主程式

系統主程式是由約 5600 行 C++ 程式所組成。在執行中是以背景常駐程式的型態(daemon program)運行。該程式需要一具有特定格式的輸入設定敘述檔，以告知該程式感測器特性，感測器串接組態與光纖解讀儀設定等等。主程式一旦載入新設定檔後，即依循其中所設定的光纖解讀儀的設定，透過解讀儀專屬的乙太通訊協定，依序詢問解讀儀之版本、序號、通道與通道所支援之最大光柵波長等等。這些訊息將與設定檔作比對，以確立軟硬體之內容。若有誤則程式顯示錯誤並停止運作。設定檢查成功後程式自動背景化 (daemonize) 並挑起第二執行緒，即解算執行緒。亦即在背景執行中，有主副兩執行緒負責解算程序。

這兩個執行緒之分工如下：主執行緒負責與解讀儀通訊與收集自解讀儀回傳之數據封包，而將封包推送至一先進先出(FIFO, first-in-first-out)之資料暫存結構中。而副執行緒則不斷檢查該 FIFO 資料暫存結構，一旦有新資料匯入，則將之取出進行解算程序。利用獨立的雙執行緒的架構之主要優點在於解讀儀的硬體取樣與解算軟體運行系統獨立，提高軟硬體時序衝突的容錯能力並可放寬採樣電

腦對執行速度的要求，且硬體取樣需要快速反應，否則易造成資料缺損，而解算則需要詳細檢查資料完整性，兩者運算重點不同，也是雙執行緒設計之優點。而經過解算的物理數據則依據設定檔所指定的格式，輸出至採樣電腦的檔案之中。由於本解算採樣系統採取背景常駐程式執行，為操作其解算及採樣行為，在程式中也依循作業系統準則設計有程序間的通訊信號(IPC：inter-process communication)機制。這機制最常見的應用在於輸出資料檔案在採樣中的釋放與更新，即用於輪替資料檔，以避免產生無限擴增之資料記錄。其次用於操控光纖解讀儀的行為，如開始或停止解算工作等在線控制之用。以上所述之解算系統架構如圖 3-1 所示。

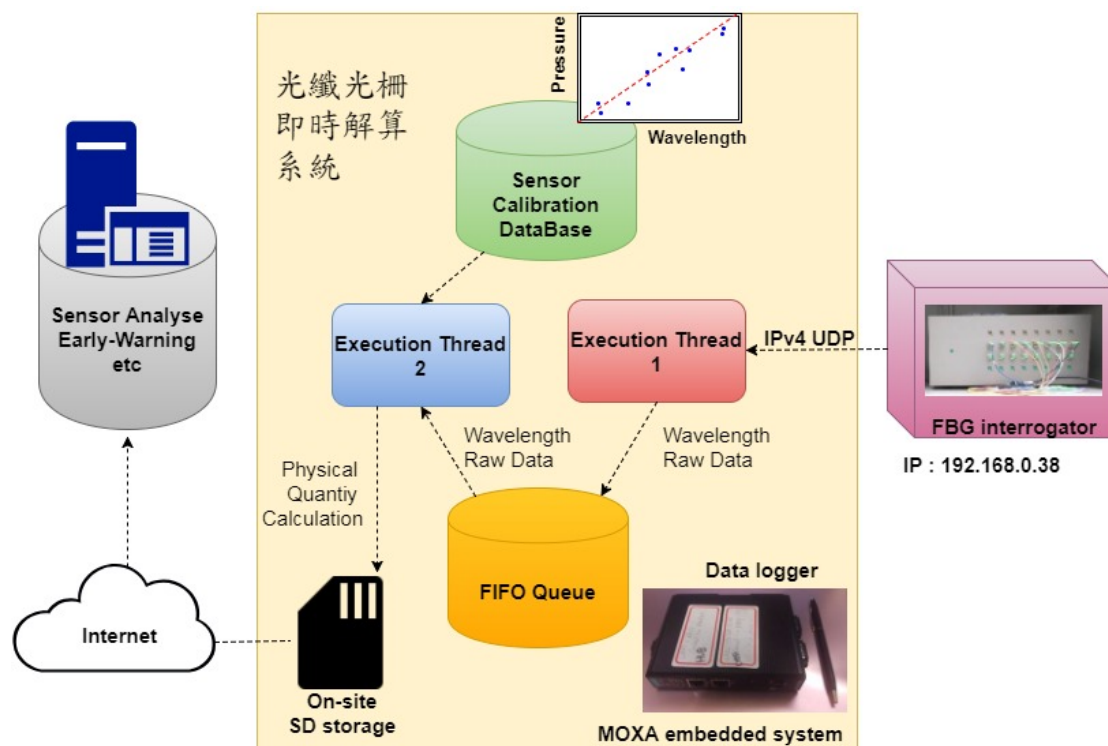


圖 3-1、解算系統架構

以上為即時解算主程序之概述，以下將介紹該系統與使用者主要的介面：系統設定檔。本系統設定檔是一簡單的文字檔案，描述四大部分的設定，為求簡潔明瞭，以下我們用太平山蘭台地區現有第一口地下孔隙水壓監測井之設定檔為例來解釋。本設定檔檔名為 FBGlogger.conf

```

GC97001C {
    channel_number = 16;
    wavelength_number = 30;
    duplicate_time_threshold = 2; // milisec
    // 1, one sample; 2, Average over sampling window
    // For 2, frequency (wv length range of each sensors are needed for statistics
    conditioning_scheme = 2;
    sampling_period = 5000;
    frequency_resolution = 300; // GHz.
    //output_interval = 30; // integer multiply of sampling period, no use for now
    shadow_logging = 1;
    FBG_IP = "127.0.0.1";
    FBG_port = 4567;
    // Seconds, timeout threshold considered FBG disconnected
    FBG_disconnect_timeout = 1800; // In seconds.
    // When FBG disconnected, action to take
    FBG_disconnect_action = "";
    // The logger_IP cannot be set. Probably the udp packets sent from FBG box is not
    // udp-spec conformed.
    logger_IP = "127.0.0.1"; // "192.168.0.14";
    logger_port = 8002;
    logger_timeout = 3000; // milisec, at least 1000 for now.
debug = 1;
    output_dir = ".";
    output_file_prefix = "CH";
    output_file_rotate_action = "";
    // For debugging. Forward what received at the logger
    // to the specified location below.
    //forward_ip = "10.8.0.1";
    //forward_port = 8002;
}

pressureSensor {
id = ps1;
description = "Pressure sensor 1, 30m";
    //tempBaseWavelength = 1529.8;
tempBaseWavelength = 1529.39966953096;
tempWavelengthBounds = [1528, 1534];
    //tempWavelengthBounds = [1350];
pressureBaseWavelength = 1530.447435;
pressureWavelengthBounds = [1528, 1534];
tempCalibration = [38.614207, 0.];
tempPressureCalibration = [75.13906509, 7.8291681665];
pressureCalibration = [192.2808489, 0.];
    //Kpt=0.0751, Kpp=0.1923, Ktt= 0.0386 (kPa/pm), 1000pm=1nm
    // Tref = 14.6972
pressureBounds = [-500, 2000 ]; //kPa
tempBounds = [ -10, 50 ]; //Celsius
}

pressureSensor {
id = ps2;
description = "Pressure sensor 2, 35m";
tempBaseWavelength = 1535.70255478167;
tempWavelengthBounds = [1534, 1540];
    //tempWavelengthBounds = [1350];
pressureBaseWavelength = 1537.53531567124;
pressureWavelengthBounds = [1534, 1540];
tempCalibration = [39.100484, 0.];
tempPressureCalibration = [70.066119, 17.5851713553207];
pressureCalibration = [196.396607108092581, 0.];
    //Kpt=0.0701, Kpp=0.1964, Ktt= 0.0391 (kPa/pm), 1000pm=1nm
    // Tref=14.3536

```

```

pressureBounds = [-500., 2000. ];    //kPa
tempBounds = [ -10.,  50. ];        //Celsius
}
pressureSensor {
id = ps3;
description = "Pressure sensor 3, 40m";
tempBaseWavelength = 1541.81396937432;
tempWavelengthBounds = [1540, 1546];
    //tempWavelengthBounds = [1350];
pressureBaseWavelength = 1543.284548;
pressureWavelengthBounds = [1540, 1546];
    //tempCalibration = [40.708, 12.];
tempCalibration = [35.07122, 0.];
tempPressureCalibration = [40.707965, 29.6501962];
pressureCalibration = [213.9198608, 0];
    //Kpt=0.0407, Kpp=0.2139, Ktt= 0.0351 (kPa/pm), 1000pm=1nm
    // Tref=15.63553
pressureBounds = [-500, 2000 ];    //kPa
tempBounds = [ -10.,  50 ];        //Celsius
}
pressureSensor {
id = ps4;
description = "Pressure sensor 4, 45m";
tempBaseWavelength = 1547.33181316834;
tempWavelengthBounds = [1546, 1552];
    //tempWavelengthBounds = [1350];
pressureBaseWavelength = 1548.608299;
pressureWavelengthBounds = [1546, 1552];
tempCalibration = [37.555134, 0.];
tempPressureCalibration = [55.45671998, 15.6049412];
pressureCalibration = [173.51253287, 0.];
    //Kpt=0.0555, Kpp=0.1735, Ktt= 0.0376 (kPa/pm), 1000pm=1nm
    // Tref=15.26304
pressureBounds = [-500, 2000 ];    //kPa
tempBounds = [ -10,  50 ];        //Celsius}
pressureSensor {
id = ps5;
description = "Pressure sensor 5, 50m";
tempBaseWavelength = 1553.57531453627;
tempWavelengthBounds = [1552, 1558];
    //tempWavelengthBounds = [1350];
pressureBaseWavelength = 1555.1500858;
pressureWavelengthBounds = [1552, 1558];
tempCalibration = [35.519989, 0.];
tempPressureCalibration = [53.25823094, 10.81899262];
pressureCalibration = [185.8419014, 0.];
    //Kpt=0.0533, Kpp=0.1858, Ktt= 0.0355 (kPa/pm), 1000pm=1nm
    // Tref=15.29312
pressureBounds = [-500, 2000 ];    //kPa
tempBounds = [ -10,  50 ];        //Celsius
}
FBGinput {
channel = 1;
threshold = 4000;
    //file = "Data/19121015_Wavelength_CH0_20160705113545_Raw.csv";
format = [ ps1.pressureWavelength, ps2.pressureWavelength,
           ps3.pressureWavelength, ps4.pressureWavelength,
           ps5.pressureWavelength];
}
FBGinput {
channel = 2;

```

```

threshold = 4000;
//file = "Data/19121015 Wavelength CH1 20160705113545_Raw.csv";
format = [ ps1.tempWavelength, ps2.tempWavelength,
           ps3.tempWavelength, ps4.tempWavelength,
           ps5.tempWavelength];
}
FBGoutput {
prefix = "PT";
format=[ps1.pressure, ps2.pressure, ps3.pressure, ps4.pressure, ps5.pressure,
        ps1.temp, ps2.temp, ps3.temp, ps4.temp, ps5.temp ];
}

```

如上所示。圖中分有四種不同底色的區塊，分別代表四大部分的設定：

1. 水藍色為光柵解讀儀設定
2. 但黃色為五支地下孔隙水壓感測器的校正設定
3. 但綠色為感測器與光纖解讀儀的光纜連接拓撲
4. 但紅色為輸出指述，敘述輸出檔案的結構。我們以 Backus-Naur Form (BNF)

語法格式來說明各設定檔的文法結構，該語法結構設計如下。

```

spec_blocks
:
| spec_blocks_list
;
spec_blocks_list
: spec_blocks_list spec_block
| spec_block
;
spec_block
: IDENTIFIER
'{' spec_stats '}'
;
spec_stats
:
| spec_stats_list
;
spec_stats_list
: spec_stats_list spec_stat
| spec_stat
;
spec_stat
: IDENTIFIER '=' primary ';'
;
primary
: REAL
| INTEGER
| STRING
| IDENTIFIER
| IDPAIR
| '[' elements ']'
;
elements
: elements ';' primary

```

```
| elements primary
| primary
;
```

接下來分別描述各項設定區塊的意義。首先是光柵解讀儀設定。目前我們使用的解讀儀為國內奇博 (citpo) 委託 Arcadia optronix 所生產的解讀儀。其通訊協定同 GC7100 系列產品，故以 "GC7100" 命名解讀儀設定區塊 (水藍色)。在本區塊中則包含通道數(channel_number)、每通道最大波長數(wavelength_number)、採樣頻率(sampling_period, in micro-second)、光柵解讀儀之通訊地址(FBG_IP)、通訊埠(FBG_port)、採樣電腦地址(logger_IP)與通訊埠(logger_port)及輸出檔所在目錄位置(output_dir)。在未來，將可在此區塊中加入初級資料處理之敘述(conditioning_scheme)。

次為感測器的描述區塊。我們以孔隙水壓計為例，水壓計以 "pressureSensor" 為區塊命名，而在本範例該區塊中，記載太平林道 13.5 km 處 A 井位孔隙水壓井中自 30 至 50 米處之所有孔隙水壓計的個別感測器之率定資料。這些描述具有溫度補償功能之水壓計所必需的所有參數依序如下：

id：感測器名字，以英文字母為首的名稱用於感測器連接拓撲與輸出指定之中。

description：自由字串，註解用。

tempBaseWavelength：該感測器的溫度計參考波長。

tempWavelengthBounds：該感測器的溫度計波長範圍，其範圍為 6 奈米。

pressureBaseWavelength：該感測器的水壓計參考波長。

pressureWavelengthBounds：該感測器的水壓計波長範圍，其範圍為 6 奈米。

tempCalibration：溫度計率定曲線參數。

tempPressureCalibration：水壓計溫度相依率定曲線參數。

pressureCalibration：水壓計率定曲線參數。

pressureBounds：水壓量測範圍。

tempBounds：溫度量測範圍。

第三區塊為感測器連接拓撲描述，亦即輸入區塊，以"FBGinput"為區塊之辨識字。在區塊中之參數如下：

channel：指該輸入區塊所對應的光纖解讀儀的通道。

threshold：指該通道波峰辨識的閾值，介於 0 至 1024 之間。

format：為一類似 Matlab 矩陣的描述，代表掛接在此一通道之上的感測器。由於光纖光柵的物理限制，感測器波長是由短到長而架設，在本例中，channel 1 的感測器總共有五支，分別為 ps1 至 ps5，其中的壓力光柵以下標 .pressWavelength 為描述。相似地在 channel 2 地感測器，則對應到 ps1 至 ps5 中的溫度光柵，以下標 .tempWavelength 為描述。一但即時解讀系統讀入這段描述，程式將檢核各感測器波長範圍有無重合，以及排序是否正確。若排序錯誤與感測波長範圍有所重和。代表解算過程恐有錯誤，於是會印出錯誤訊息，並停止執行。

最末區塊，則是輸出，以"FBGoutput"為辨識字。

其設定參數包含：

prefix：為一簡單字串，冠於輸出檔時間命名段之前以方便辨認。

format：則為一類似 Matlab 向量之形式，依序為各感測器之輸出資料。在本例中，輸出檔的行序分別為時間（預設），ps1 至 ps5 之解算後之壓力值，繼以 ps1 至 ps5 解算後之溫度值。壓力值與溫度值分別以下標 .pressure 與 .temp 表示之。

應用於實務中的系統，必須針對錯誤發生提供容錯修正的能力，以盡量保持系統的運作。在光纖光柵系統中最常遭遇的問題是光柵訊號遺漏。在解算系統中，我們會針對解讀儀的每次採樣波長封包，依據 FBGinput 所描述的感測器連接拓撲，檢核各感測器之波長，若有缺漏則在缺漏發生之感測器補以 Nan (Not a number) 以茲識別，進而調整波長至適當感測器的位置，而繼續解算的程序。其次容錯的設計是，我們的感測器是具有溫度補償的，但若補償訊號消失，則自動切換為單物理量解算，而繼續解算的程序。

二、感測器校正設定輔助程式

如圖淡黃色所示的壓力感測器區塊所示，針對每一感測器所需有與物理量的校正率定曲線。為降低校正程序的人為錯誤，本系統提供了 Octave 程序腳本 (pressureCalibr.m) 來自動由校正原始資料來完成。Octave 是公開原始碼系列的成熟公用軟體，為 matlab 的替代品。在 Octave 命令中鍵入 .pressureCalibr 之後，該程式會要求一孔隙水壓計的原始檔案。在本文件中，以 "ps1_calibr_data" 為例。輸入後 pressureCalibr 自動展示校正曲線，顯示相關係數為 (R^2)，以及最後整理一 FBGlogger 可以直接讀取的感測器設定區塊，使用者得以使用文字編修器拷貝至設定檔之中。

由於感測器原始資料至為關鍵，在此以 ps1_calibr_data.m 為例，如圖 3-2。在圖 3-2 中，我們可見關於 ps1 感測器的原始資料區塊。首先是感測器之識別名稱：id="ps1"；緊接其後為補充文字描述註解。接下來為溫度計之原始資料，左側欄位為攝氏度數，右側欄位為解讀儀波長。而對應溫度計之波長範圍則為 tempWavelengthbounds 以及溫度量測範圍 tempbounds。接著則是關於壓力計之波長資料。由於壓力計波長是壓力與溫度的函數，故分為兩個區塊：首先是在校正時背景壓力下 (Pcalibr, 0 為 1 大氣壓) 的溫度響應波長 T_DATA。而第二區塊為校正溫度下之壓力響應區塊 P_DATA。在以上兩區塊的資料中，左側欄位為物理量 (溫度、壓力)，而右側欄位為波長讀數。最末，針對壓力計光柵波長範圍與解算壓力之範圍，分別記錄於 pressureWavelengthBounds 與 pressureBounds 之中。以此一壓力感測器所計算而得的率定曲線如圖 3-3 所示。分別為壓力曲線，壓力計之溫度曲線及右側之溫度計曲線。而溫度計相對單純。其校正僅是將製作好的感測器整體置於溫控箱內，在校正壓力的同時，直接讀取溫度計波長，即得到校正所需之資料。

```
% Calibration Data for pressure sensor
% Sensor id
id="ps1";
% Verbal description of the sensor
```

```

%description="Pressure sensor 1, 30m";
%=====
% Temperature FBG Data
%=====
TEMP_DATA=[
20.7  1529.7727
30.1  1529.879
40.0  1529.988
34.2  1529.9015
25.3  1529.8195
15.3  1529.711
10.3  1529.6579
];
tempWavelengthBounds=[1528, 1534];
tempBounds=[-10, 50];
%=====
% Pressure FBG Data
%=====
Pcalibr = 0.;    % Ambient pressure when temperature calibration was
                 % performed.
% T (C)    Wpp (nm)
T_DATA=[
20.7  1529.92
30.2  1529.996
42.3  1530.216
35.0  1530.267
26.1  1530.156
16.8  1529.927
];
% Data for pressure dependence of the pressure gauge
Tcalibr = 7.825; % Ambient temperature when pressure calibration was
                 % performed.
% p (kPa)  Wpp (nm)
P_DATA=[
0      1530.007
50     1530.201
103    1530.411
151    1530.604
204    1530.820
253    1531.013
309    1531.254
353    1531.433
400    1531.640
376    1531.535
325    1531.320
278    1531.114
226    1530.904
177    1530.713
129    1530.513
77     1530.304
27     1530.112
0      1530.008
];
% Wave length bounds for the pressure gauge
pressureWavelengthBounds=[1528, 1537];
pressureBounds=[-500, 2000];

```

圖 3-2、感測器原始資料

三、系統整合執行腳本

為簡化操作，一旦感測器設定檔準備妥當後，在本系統中，則透過與系統整合的執行腳本 (script)，使採樣電腦開機時，自動執行採樣，以及資料上傳等工作。這些輔助腳本包含: FBGlogger.sh、rotateDataFiles.sh 與 removeExtraOldData.sh 其中 FBGlogger.sh 是依照標準 systemV 的起始化程序所撰寫，當採樣電腦開始作業系統加載程序後，自動由起始程序 "init" 所帶起。為達到此功能，我們在 /etc/init.d 目錄中建構一符號連結 (symbolic link) 至腳本，而在系統執行層次 (run level) 2 至 6 中設定起始連結。(利用 update-rc.d FBGlogger default)。

而 rotateDataFiles.sh 則負責發送訊息至 FBGlogger，告知該程序解放目前正在寫入的資料檔，而被釋放出來的資料檔即可透過系統既有的傳輸工具，如 ftp、rsync 等，上傳至中央伺服器，而同時在採樣電腦上留存備份。最後 removeExtraOldData.sh 是為因應不斷膨脹地暫存資料，自動將最後的檔案移除。而後兩者的執行，則是透過系統中定時執行之功能 (crontab) 來完成。目前設定中，我們每天執行四次 rotateDataFiles.sh 以及每周執行一次 removeExtraOldData.sh 而上傳資料則不需特殊腳本，只需以系統本身具備的 rsync 命令，同步至中央伺服器即可。目前設定每天執行四次。

以上這些執行頻率，皆屬作業系統層面的操作，非常容易完成更新調整。且為偶爾需要直接登入採樣電腦，進行遠端操控，在採樣電腦上，我們亦裝設虛擬私人網路 (OpenVPN)，使在需要時，得以最小通訊資源需求下，進行遠端操控。

總括以上各項子系統，我們對即時解算的系統可總括以下特色：

1. 各構件的獨立性，使容錯能力提升
2. 系統整合性，利用 Moxa 或 Raspberry Pi 等嵌入式電腦即可輕易完成，而不需如常見的 Windows 基礎的系統，許多操作皆須仰賴重量級的應用程式。在這些基礎上，微型化與輕量化得以實現。

第二節 時序資料庫與網頁呈現

計畫中太平山所使用的感測器每 5 秒會記錄一筆公約三十餘組數據，隨著採樣時間增加，資料會將有大量的累積。又因在許多監測應用中皆面臨類似的狀況，故尋求一個通用的資料處理平台，可將許多針對這些監測資料的重複性操作單純化，達到有效管理的目標。以專有名詞而言，這些監測資料是伴隨取樣時間點而出現的，此類型的資料通稱為時序資料(Goldschmidt, et al., 2014)。在實務上，時序資料有下列特色：

1. 資料隨時間呈線性累積
2. 資料本體是小量的
3. 資料處理通常是循序的

許多近年出現的”物聯網”(IoT)感測器之資料，同樣屬於時序資料的範疇。故在本計畫中，規劃一中央伺服器，統整現場回報之資料。

由於時序資料是一種在監測領域中普遍遇到的資料型態，在資訊產業中，有數十種以上的成熟方案得以採行。在本計畫中同樣秉持使用公司授權軟體的原則，採用廣泛使用的 KairosDB 及 Grafana 的架構。以下將分別簡介這兩項的軟體。

一、KairosDB

KarisoDB 在時序資料庫中是負責核心的資料庫管理，時序資料匯入匯出等功能。他是架構在兩大底層支援系統上：網站伺服器與資料庫伺服器之上。在公開授權的系統中，前者通常是採用 Apache 伺服器。該伺服器具有執行使用者程序的功能，故得以執行 KairosDB 之執行腳本(script)；而後者常見者如 MySQL、postgreSQL 等資料庫。而時序資料庫有與前述一般資料庫相異的特性，在資料庫結構(schema)須採用特殊的設計，故 KairosDB 採用 Cassandra 作為其底層資料庫系統。Cassandra 為支援分散式與異地備援的資料庫，目前也同時是 Facebook 所採用的資料庫系統，足見 KairosDB 的設計已將規模化(Scaliding)當成重要的設計

因子。

KairosDB 是以原始 python 程式碼發布，安裝在網路 Apache 與 Cassandra 伺服器可及(accessible)的系統中(或目錄下)。安裝完成後即可透過如 Firefox、IE 等網路瀏覽器與使用者(管理者)通訊。例如在本計畫中，該時序資料庫安裝於中央研究院應用科學中心內部公用伺服器上，該伺服器內部網路地址為 192.168.45.3。故使用者在本中心內部網路中，可以網址 <http://192.168.45.3:8080/> 來操作資料庫。

而每一筆資料在該資料庫中有三項相關的資料屬性：時間、資料本體與資料標籤。前兩者易於理解在此不再贅述，而後者則可用來分辨資料來源。如在太平山地下水井之光纖光柵孔隙水壓計系統中，每一感測器均有一唯一的標籤，在所有的資料提存、運算等操作，均可透過這些標籤來描述。與本感測器為例，我們命名 ps1.pressure、ps2.pressure、...、ps3.pressure 分別對應到太平山林道 13km A 井下 30、35...至 50 米處之孔隙水壓感測器。而於本年度(106)年行政院防災應用科技計劃支持下，所安裝的新地下孔隙水井中(LTW03)，共五組水壓計，分別命名為 Pressure_30m、Pressure_40m...對應 30、40、...70 米深。在下節中，我們將概略呈現該新井自安裝完成至八月九日之資料。

二、Grafana

Grafana 則為 kairosDB 上層，專責於資料處理，網頁繪圖輸出與呈現的系統。舉凡資料平均、濾波、計數等等功能。這套分析軟體同樣具有規模化設計的考量，故可搭配許多底層各式資料庫系統，如 influxDB、Prometheus.....等，在此我們搭配以 KairosDB。Grafana 的主要強項在於可透過網路使用者與伺服器端的互動操作，可系統化地呈現多張圖表。並允許使用者隨時檢視，改變資料呈現的樣貌。在下節的應用範例中所有的時序資料圖皆直接取自 Grafana 之輸出。

第三節 太平林道 13km 光纖光柵孔隙水壓監測應用案例

在前文中以指出應用本計畫所開發的即時解算系統與整合至低功耗的採樣電腦，是本計畫的主要工作，而應用範例為太平林道 13km 處之邊坡。在此再重述於該邊坡上所安裝的光纖光柵感知系統。

在該坡面上至今總共有三套光纖光柵感測系統。參考圖 1-9，在圖中 B 點點位為傾斜儀系統，為雙軸光纖光柵傾斜儀，安裝於 5、6、7 米深。在圖中 A 點點位為孔隙水壓井，感測器以五米為間距。安裝於 30 至 80 米處，共 11 支。由於屬學術研究性質，這兩井的工程是在極為有限的資源下，以中央研究院應用科學研究中心之研究經費與部分行政院科技部防災計畫(2016)共同分擔下安裝。這兩口前期試驗井自 2016 年春季開始採樣，然我們發現三大重要問題。

1. 該監測坡面運動快速，僅約三個月時間，B 井位傾斜儀讀數大部分皆呈現飽和。故不再具備參考價值，故在本報告中，不再引用傾斜儀的結果。

2. 由於這項光纖感測器的製作，仍為半研究屬性，是由實驗室人力手工完成。而在製作過程中，不察光纖沾黏用膠已劣化。固於 2016 年啟用後，隨即發現孔隙水壓計的定常水壓讀數已偏移，這是由於膠的劣化導致光纖與感測器裏握力不足，而釋放了預設的光纖預應變。這預應變是用感測正常水壓的重要設計(許智超，2005)，故該井無法正確反應靜水壓之讀數。

就以上兩點檢討我們所取得的數據，我們發現地下溫度的變化不大，幅度僅約 0.1~0.2 度。然地下水根據相關計劃的研究，此坡面在地下約 40 米處有不透水層，地下水體可能不為連續水體，而不同水層有不同的來源補助。故溫度的歧異是有可能的。我們需要更長時間的尺度的量測資料來確認此一推論而需對此坡面持續監測。水壓部分讀數不隨深度變大則不合理，這是由於前述第二點，首批感測器於施工後，因現地因素造成光纖與感測器機構之長期裏握力鬆弛所造成的靜水壓度數偏移。故此批感測器之讀數，目前僅能使用於雨量氣候相關的定性描述。而今年度(2017)七月，在科技部防災應用計畫支持下，復行安裝第二口孔隙水壓

井(LTW03)以為校驗，以新井之記錄顯示，孔隙水壓確實隨深度的增加而增加，以下將再說明之。

3. 光纖接續通訊品質，由於感測器為獨立的設備，在應用於感測網路中，需在串接處使用連接器連接，而每一連接器的施工良窳，對光纖光譜的品質有決定性的影響。而 B 井位之孔隙水壓感測器自 55 至 80 米處，即處於通訊品質較差的連接段上，光譜訊號處於較不穩定的狀態，故本計畫中尚未將本即時解算系統施用於這些感測器。雖然 B 井孔隙水壓讀數在靜水壓方面無法求得正確的壓力，然而所記錄到的歷線，仍然與降雨有好的連動，且在防災應用科技計畫其他如地表 GPS 監測、地電阻/電位量測技術等提供了珍貴的力學觸發因子的紀錄。且由這些紀錄中，推測到該坡面具有多重地下水層的結構。認知到地下孔隙水壓的分布仍是邊坡穩定重要的訊息來源，我團隊在今年(2017)年的防災應用科學計畫的支持下，於 A、B 兩井之連線中點，布設 LTW03 地下孔隙水壓新井，以相同的光纖光柵水壓計以每十米一枚的密度布放至 30 至 70 米的深度，期以校正靜水壓分布，並交互驗證 B 井之觀測。

本新井 LTW03 的鑽孔施工在 2017 年七月初完成，水壓計的布放施工於 7 月 8 日完成。經過調校，新井水壓計自 7 月 8 日開始由本計畫所開發之即時解算系統採集資料。圖 3-3 中描繪自起始至八月九日斷訊為止之水壓資料。在圖 3-3 中之水壓，已自動由即時解算程序解算而轉為物理量，有助於直覺了解地下水位分體狀態。然在完工初期，我們仍遭遇了一些光譜品質問題，故目前缺乏 70 米之資料。而溫度僅有 30 米處之資料，如圖 3-4。

但就目前水壓讀數而言，我們得到了合理的地下水壓分布。如圖 3-3 所示，我們定義壓力計之標籤 Pressure_30m、Pressure_40m、Pressure_50m、Pressure_60m 分別代表位於 30、40、50 及 60 米處之水壓計。觀察水壓分布可發現水壓漲落與日降雨有所關聯。而在 30 米處呈現負壓，雖就感測器之設計原理而言，這並不代表正確的吸引水頭(suction head)，但可認定 30 米是處於未飽和狀態的岩層。而於 40 米處，平均水壓約在 60kPa，是處於地下水位面下約六米處，而 50 米水

壓平均值約 160kPa，反映正確的靜水壓增加的趨勢。但自 50 米至 60 米處，平均靜水壓增加 160kPa，相較於連通水層有更高五米水頭的增幅，推測是由於在 50 至 60 米間有隔水層存在而造成的不同水層的效應。

這呼應了防災計畫的岩心判讀成果。以目前這些結果而言，本計畫的核心目標已大部分完成。而該系統在圖 3-3 所示之採樣期間，完全處於無人看管的狀態，程式的穩定已獲得驗證。本即時採樣解算系統的穩定性以及後端主伺服器上之時序資料庫的承载力也獲得測試。

在這太平林道水壓井監測設備美中不足的地方是於今年(2017)8 月 9 日起，我們發現感測器均呈現失聯狀態。待匯集相關資源與專業人力支援，我們終得以於 10 月 27 日將全系統進行一次徹底的診斷。我們發現傳訊光纜於地面的走纜被鋼片型的除草機絞斷。除了重新佈纜之外無合適之替代方案，故本案於此之連續採樣被迫中斷。鑒於地下水文資料仍是重要力學資料，我們團隊擬以中央研究院之資源，逐步修復並完善光纜的保護措施，以防止事件再次發生。預計本修復工程將於年汛期完成。

為更彰顯本計畫執行之成果，在下節中，我們將簡述本系統應用於永傳能源公司於彰化王功外海之離岸測風塔的應用狀況，這是在本計畫的支持下貢獻至其他光線光柵感測的具體貢獻之一。

第四節 彰濱離岸測風塔動態傾斜監測

由於本即時解算系統的撰寫是採取泛用的角度來開發的，故可適用目前所有的光纖光柵感測器。故本團隊與交通大學黃安斌教授合作共同將本系統安裝於離岸測風塔上，來監測測風塔的結構動態行為。本項研究是由科技部所支持的建教合作研究案，永傳能源公司為參與公司。主旨有二：

1. 測試光纖光柵感測技術應用於外海嚴苛環境的可行性。
2. 探索彰濱外海脆弱海床的基礎在極端風波流事件中的反應。

這兩項要務，均需在有一穩定的即時採樣系統下方能進行。而外海測風塔上是一

獨立結構，僅能配置微弱的 10W 供電，故本系統可完全適用於這項應用場合。

於是本團隊將本系統安裝至該測風塔上，自 7 月 8 日起運行至今。

本系統包含兩種光纖光柵傾斜儀的設計，總共八支，這些傾斜儀的共振頻率約 3Hz。為監視動態，我們設定以 3Hz 的採樣頻率進行。光纖解讀儀與 Moxa 低功耗系統組成主要的感測核心，而資料則透過專屬點對點微波網路，以每日四次傳回位於中研院應科中心之時序資料庫(同前節太平林道之資料庫)中。如圖 3-5、3-6 所示，為本系統中自 7 月 8 日起至 10 月 23 日之紀錄，以每兩小時平均呈現。其中資料的斷點是由於測風塔整體 12V 電源跳脫所致。在監測中發現，該測風塔約呈現日均一度左右的擺盪，而長時間下，則有氣候事件的影響。我們將於未來相關的延伸計畫進行細節評估。我們以這項應用來再次說明本系統的應用價值，以及本計劃的核心研究成果。



圖 3-3、蘭台新井水壓圖

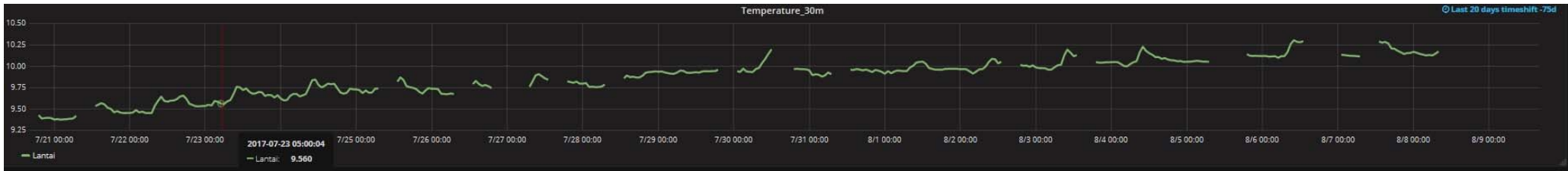


圖 3-4、蘭台新井溫度圖

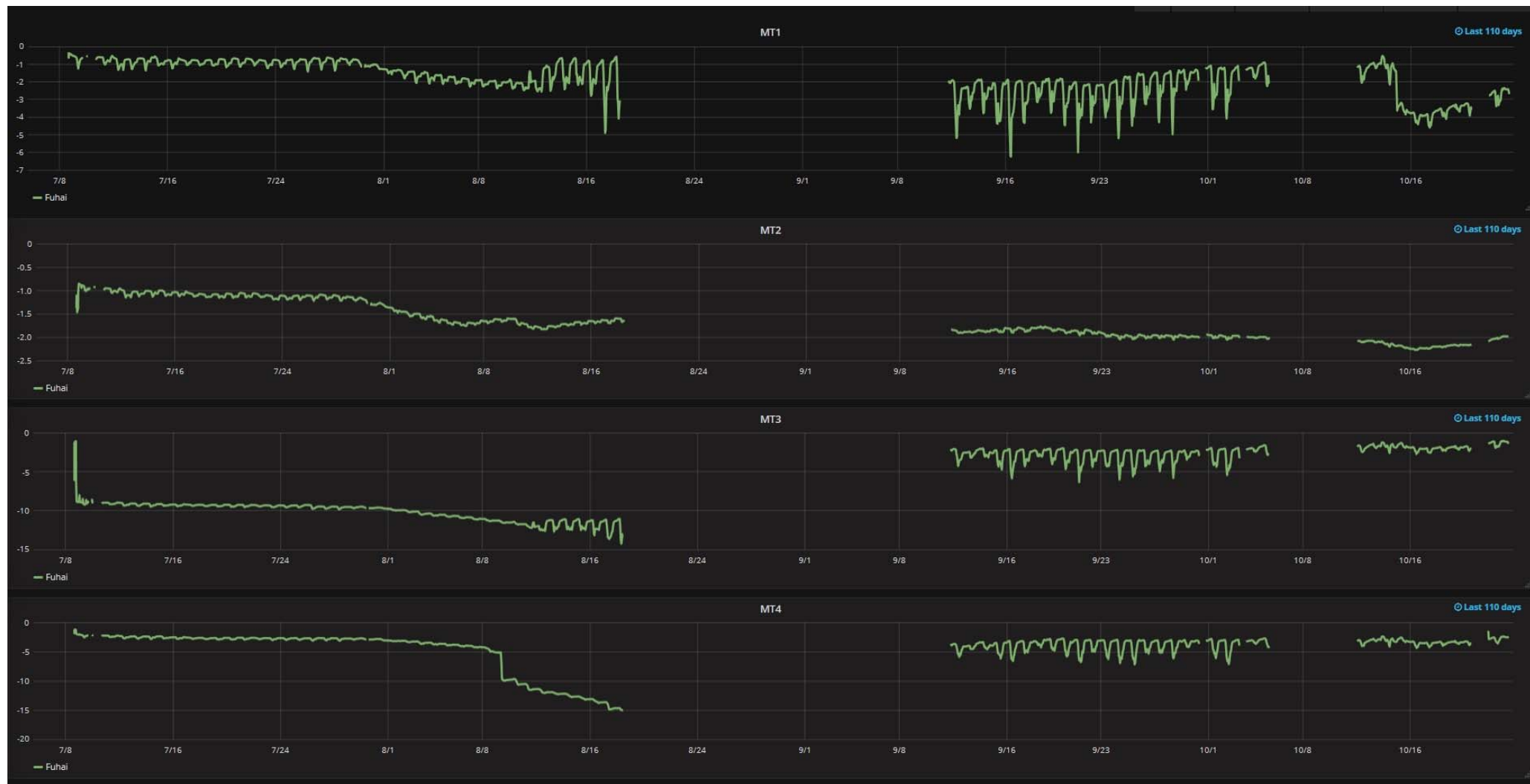


圖 3-5、福海測風塔傾斜角度圖

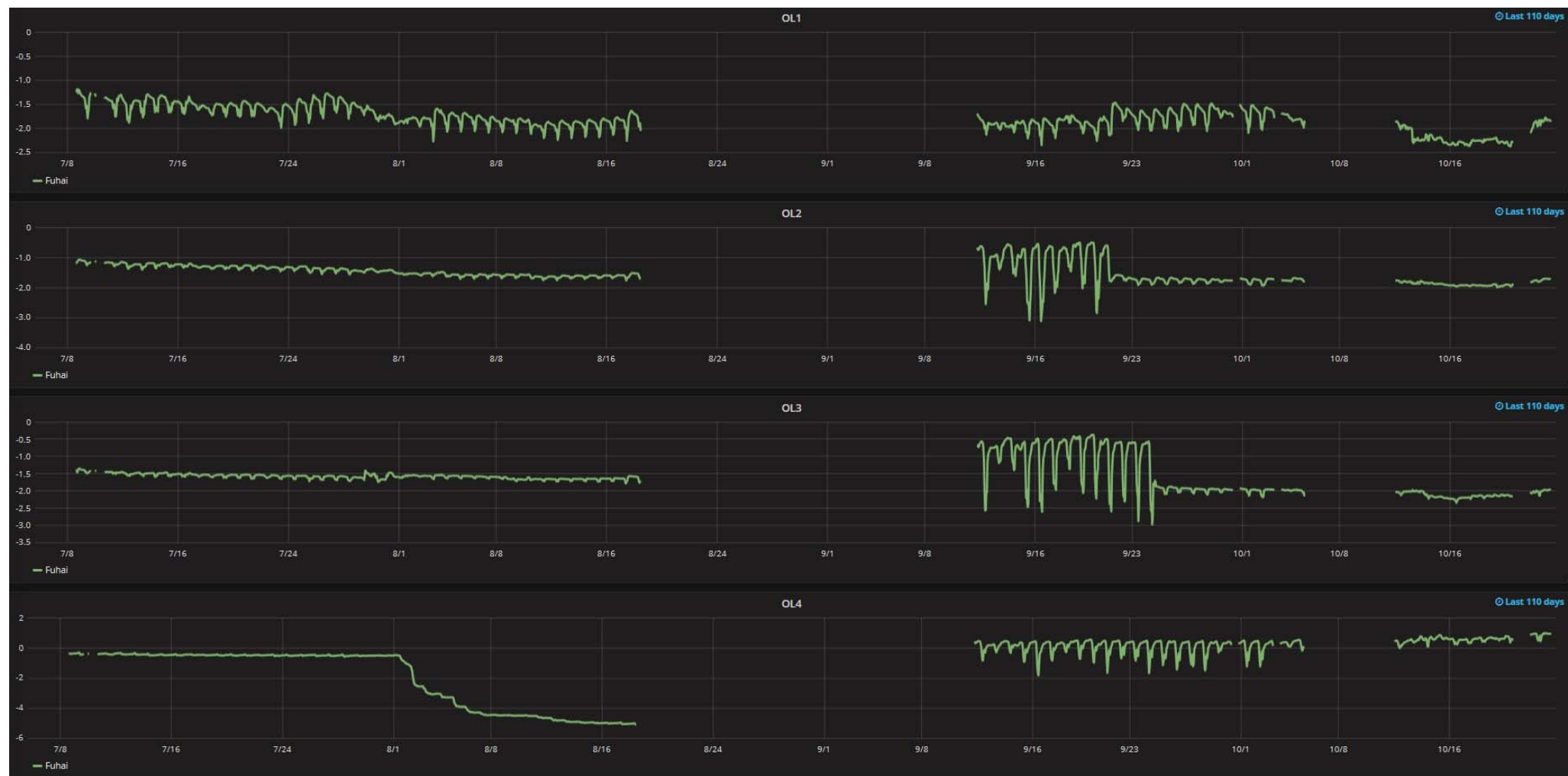


圖 3-6、福海測風塔傾斜角度圖

第四章 低功耗無線傳輸地表感測模組

第一節 Waspote Pro v1.5 簡介

Waspote 由 Libelium 公司所研發(Waspote technical guide, 2016)，在 Hardware 方面，具有較高之整合度。相較於市面上常見之 Arduino，Waspote 本身即內建有 RTC、SD 卡插槽與加速度感測器，且在電源節電功能方面，有最佳化的設計，而這些項目上，無需像 Arduino 再進行額外配置，由此便可顯現出 Waspote 在整合度上的優勢。而在 I/O 引腳配置方面，Waspote 提供 7 analog (I)、8 digital (I/O)、1 PWM、2 UART、1 I2C、1 USB、1 SPI，對使用者而言，已是相當齊全。圖 4-1 與圖 4-2 為 Waspote PRO V1.5 Hardware 圖，分別為正面及背面。表 4-1 為 Waspote 相關資料整理。

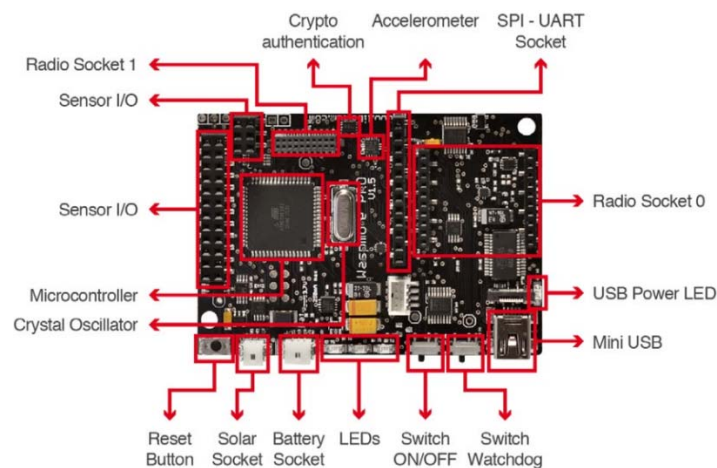


Figure: I/O connectors in Waspote

Sensor connector:

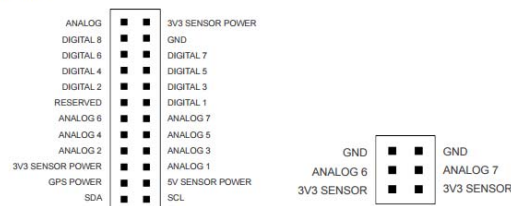


Figure: Description of sensor connector pins

Auxiliary SPI-UART connector:

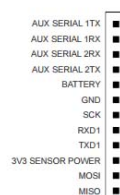


Figure: Description of auxiliary SPI-UART connector pins

圖 4-1、Waspote PRO V1.5 Hardware 圖(正面)(摘自 Libelium 公司)

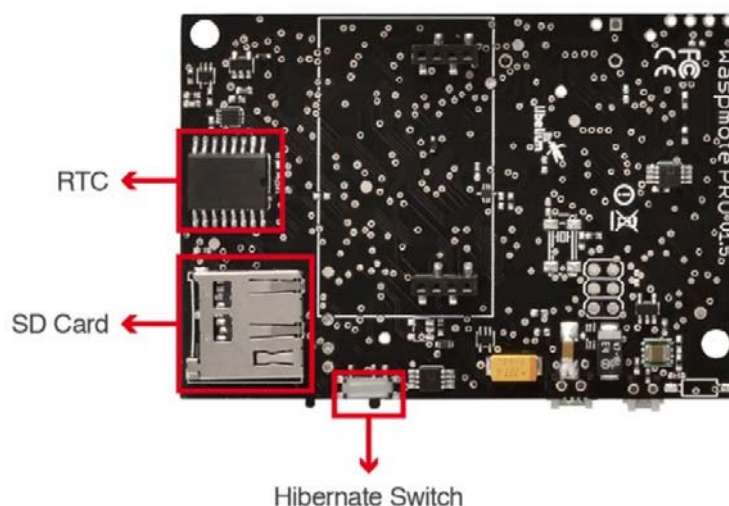


圖 4-2、Waspote PRO V1.5 Hardware 圖(反面)(摘自 Libelium 公司)

表 4-1、Waspote 相關資料整理(整理自 Libelium 公司)

General data	
Microcontroller	ATmega1281
Frequency	14.7456 MHz
SRAM	8 kB
EEPROM	4 kB
FLASH	128 kB
SD card	2 GB
Weight	20 g
Dimensions	73.5 x 51 x 13 mm
Temperature range	[-10 °C, +65 °C]
Clock	RTC (32 kHz)
On	17 mA
Sleep	30 μ A
Deep Sleep	33 μ A
Hibernate	7 μ A
Operation without recharging	1 year*
*使用休眠模式作為節能模式獲得的時間。	
7 analog (I), 8 digital (I/O), 1 PWM, 2 UART, 1 I2C, 1 USB, 1 SPI	
Battery voltage	3.3 – 4.2 V
USB charging	5 V – 480 mA
Solar panel charging	6 - 12 V – 330 mA
Accelerometer	$\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g$
Low power	0.5/1/2/5/10 Hz
Normal mode	50/100/400/1000 Hz

第二節 Wasmote 優勢

本計劃與"坡地淺層水力力學反應無線感測模組研發"計劃有所關連，在感測模組開發，借重了該計劃之成大執行團隊之感測器相關的研發能量。然感測器的驅動模組則捨棄一般團隊所使用的以 Arduino 為基底的方案，而採用 Wasmote。Wasmote 的優勢在該模組提供之硬體介面與開發工具，較之於 Arduino 更為完備。且其為遙感量測之特殊環境(無穩定電力供應)所最佳化之硬體基本模組，在節電控制方面，較一般 Arduino 甚多，即是可利用 Energy System 來控制功率之損耗。而 Energy System 又可分為 ON、Sleep、Deepsleep 以及 Hibernate 四種不同模式，後三者可透過 Synchronous Interruption 或 Asynchronous interruption 喚醒睡眠中的 Wasmote。以下為四種不同模式的概略介紹，而表 4-2 為 Wasmote 四種不同模式差異之整理。

- ON：正常運行模式。在這種狀態下的消耗為 17mA。
- Sleep：主程序暫停，微控制器進入待機狀態，可由 Asynchronous interruption 或 Watchdog 產生的 Synchronous Interruption 喚醒。持續時間間隔可以是從 32ms 到 8s。在此種狀態下的功耗為 30 μ A。圖 4-3 為 Wasmote 進入 Sleep mode 流程圖。

其中，若使用者想要使用 Watchdog，除了將 Watchdog 相關之程式碼寫入 Wasmote 之外，另需於程式碼寫入完成後，將圖 4-4 紅框處之 Watchdog Switch 打開。

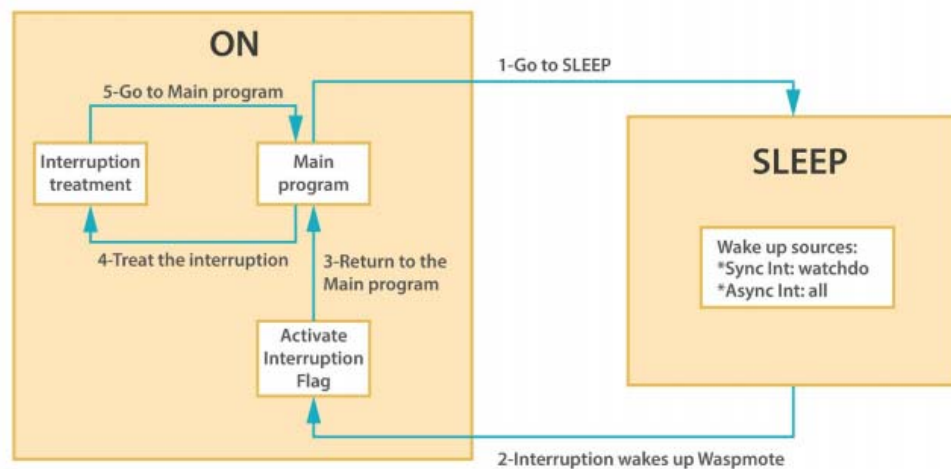


圖 4-3、Sleep mode 流程圖(摘自 Libelium 公司)

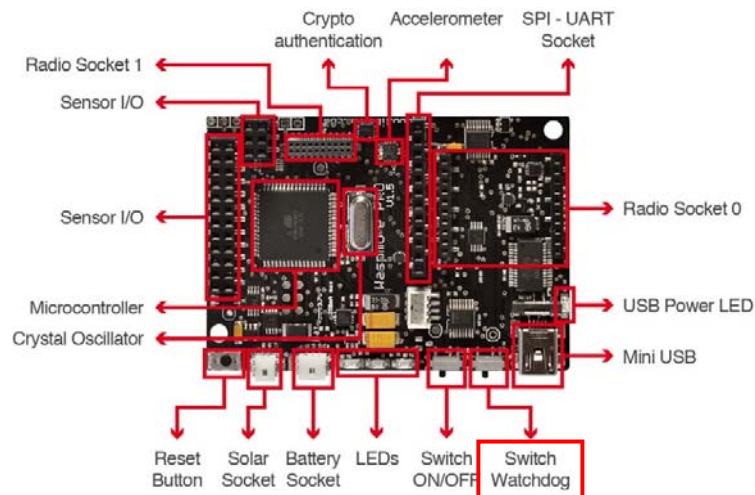


圖 4-4、Watchdog Switch 位置圖(紅框處)(摘自 Libelium 公司)

- DeepSleep：主程序暫停，微控制器進入待機狀態，可由 Asynchronous interruption 或 RTC 所觸發的 Synchronous Interruption 喚醒。這個循環的間隔可以是從秒到分、小時、天。在此種狀態下的功耗為 $33\mu\text{A}$ 。圖 4-5 為 Waspote 進入 DeepSleep mode 流程圖。

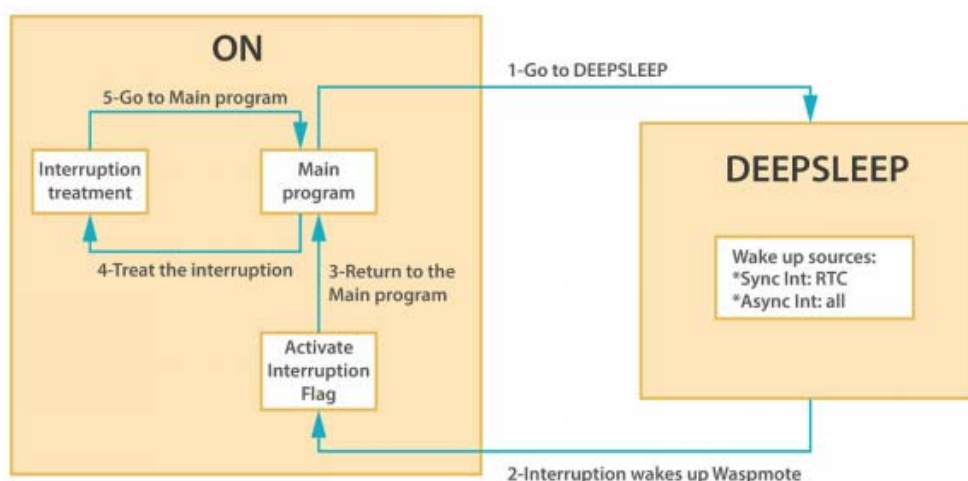


圖 4-5、DeepSleep mode 流程圖(摘自 Libelium 公司)

- Hibernate：主程序停止，微控制器和所有 Waspote 模塊完全斷開連接。重新激活設備的唯一方法是通過 RTC 中的先前編程的報警（同步中斷）。此週期的間隔可以是從秒到分鐘、小時、天，幾乎所有設備完全斷開連接，此時電池只對 RTC 供電，在此種狀態下的功耗為 $7\mu\text{A}$ 。圖 4-6 為 Waspote 進入 Hibernate mode 流程圖。

其中，若使用者想要使用 Hibernate mode，除了將 Hibernate 相關之程式碼寫入

Waspote，另需於程式碼寫入完成後，將圖 4-7 藍框處之 Hibernate Switch 打開。

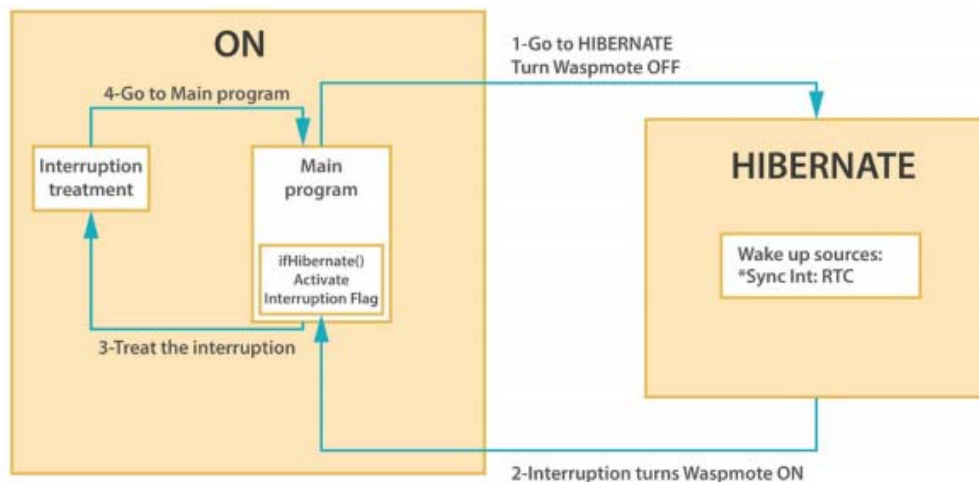


圖 4-6、Hibernate mode 流程圖(摘自 Libelium 公司)

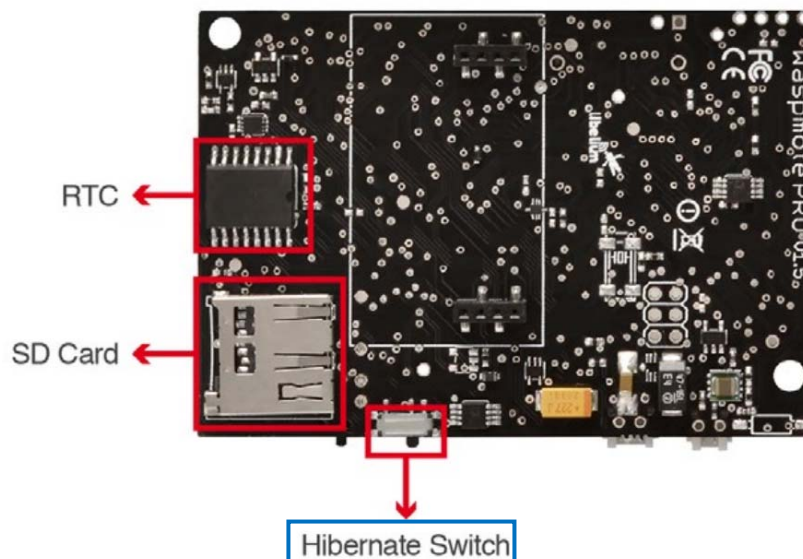


圖 4-7、Hibernate Switch 位置圖(藍框處)(摘自 Libelium 公司)

表 4-2、Waspote 四種不同模式差異之整理

	Consumption	Micro	Cycle	Accepted Interruptions
ON	17mA	ON	-	Synchronous Asynchronous
Sleep	30μA	ON	32ms - 8s	Synchronous (Watchdog) Asynchronous
Deep sleep	33μA	ON	1s - min/hours/days	Synchronous(RTC) Asynchronous
Hibernate	7μA	OFF	1s - min/hours/days	Synchronous (RTC)

Synchronous Interruption 可分為定期和相對兩種類型。

1. 定期為指定在未來之特定時刻將 Wasmote 喚醒，此由 RTC 控制。

例如：不考慮當前時刻，設定 Wasmote 需於每天 AM 10：00 醒來，則 Wasmote 將會固定於未來的每天 AM 10：00 醒來。

2. 相對為考慮到當前時刻，每間隔固定時間將 Wasmote 喚醒，此由 RTC 和微控制器的內部 Watchdog 進行控制。

例如：若當前時刻為 AM 10：00，設定其每 10 分鐘將 Wasmote 喚醒，則 Wasmote 將於 AM 10：10、AM 10：20、AM 10：30...醒來。

Asynchronous interruption 則是利用達到條件或觸發事件來喚醒 Wasmote，因此無法明確得之 Wasmote 何時會被喚醒。以加速度感測器為例，當 Wasmote 中的加速度感測器發生某些事件(如跌落或方向改變等)，將促成 Asynchronous interruption 產生，使其被喚醒。唯一需要注意的地方是一所有的 Synchronous Interruption 和 Asynchronous interruption 都可以將 Wasmote 從 Sleep mode 和 DeepSleep mode 中喚醒。但是，只有 RTC 的 Synchronous Interruption 才能將其從 Hibernaten mode 中喚醒。此外，由於 Hibernaten mode 完全斷開了 Wasmote 的電源，此時電池只對 RTC 供電，當其達到特定時間而醒來時，電源被重新連接，將會使得程式碼再次從 setup 開始。因此使用者在選用 Hibernaten mode 需額外考慮程式碼的編程。

第三節 LoRa P2P Test

本次 LoRa P2P Test 結合了 LoRaWAN US module、傾斜儀(SCA103T-D04)以及含水量計(Soil moisture sensor v2.7.3)進行測試，配合太陽能板做為 Wasmote 外接電池之充電來源，並由外接電池做為 Wasmote 主要供電來源。此外，為降低 Wasmote 之耗電量，本次試驗採用 Energy System 之 DeepSleep mode，設定 Wasmote 於每小時間隔被喚醒，並進行現地含水量與傾斜角度之量測，接著再度進入 DeepSleep mode。而針對 LoRamodule 之遠距離無線傳輸測試方面，另進行了封包掉落及最遠傳輸距離測試。同時，為使 LoRamodule 能夠在市區順利地傳輸傳感器所量測到的資料，尚參考了 Augustin, Yi, Townsley (2016)，針對 LoRa module

之比特率及抗干擾性進行細部調整(LoRaWAN R1.0 open standard, 2015)。

一、使用設備介紹

LoRaWAN US module(如圖 4-8)



圖 4-8、LoRaWAN US module(摘自 Libelium 公司)

LoRaWAN 模塊通過 UART 進行管理，可以連接到 SOCKET0 或 SOCKET1。

主要特色如下：

- 工作電壓為 3.3 V。
- 協議：LoRaWAN 1.0，A 類。
- US 902-928 MHz ISM band。
- TX 功率：高達+18.5 dBm。
- 靈敏度：低至-136 dBm。
- 範圍：郊區> 15 公里，市區 5 公里。
- 功耗：

On：2.7 mA / 傳輸資料：124.4 mA / 接收資料：13.5 mA。

- 無線電比特率：250 至 12500 bps。

而在使用 LoRa module 時，需透過寫入程式碼的方式對其進行相關參數之設定，整理如表 4-3。(紅色粗體字為本次試驗所設定之參數)

表 4-3、LoRa module 參數設定之相關 Function(整理自 Libelium 公司)

	Waspote Pro v1.5
uint8_t radioModuleSetup()	radioModuleSetup();
uint8_t socket	SOCKET0 or SOCKET1 LoRaWAN.ON(SOCKET0);
Enable P2P mode	LoRaWAN.macPause();
uint8_t power	2 ~ 20 (15) LoRaWAN.setRadioPower(power); LoRaWAN.getRadioPower();
uint32_t frequency	902300000 ~ 928000000 LoRaWAN.setRadioFreq(frequency); LoRaWAN.getRadioFreq();
char spreading_factor[]	sf7 ~ sf12 LoRaWAN.setRadioSF(spreading_factor); LoRaWAN.getRadioSF();
char coding_rate[]	4/5 , 4/6, 4/7, 4/8 LoRaWAN.setRadioCR(coding_rate); LoRaWAN.getRadioCR();
uint16_t bandwidth	500, 250, 125 kHz LoRaWAN.setRadioBW(bandwidth); LoRaWAN.getRadioBW();
char crc_mode[]	On LoRaWAN.setRadioCRC(crc_mode); LoRaWAN.getRadioCRC();

其中，較為重要的參數為 Spreading Factor、Code Rate 以及 Bandwidth，此三者之設定將會對 LoRa module 之比特率及抗干擾性有所影響。

Spreading Factor(SF)為擴頻因子，當擴頻因子為 1 時，數據 1 就用「1」來表示。當擴頻因子為 4 時，可能用「1011」來表示 1，這樣傳輸的時候可以降低誤碼率也就是信噪比，但是卻減少了可以傳輸的實際數據，所以，擴頻因子越大，傳輸的數據數率就越小。編碼率(Code rate)為在電信和資訊理論資料流中有效部分(非冗餘)的比例。也就是說，如果編碼率是 k/n，則對每 k 位有用資訊，編碼器總共產生 n 位的資料，其中 n-k 是多餘的。頻寬(Bandwidth)則是指傳輸媒介的最大吞吐量。

✓ LoRa module 比特率與抗干擾性調整

參考自 Aloÿs Augustin 等人發表於 PMC 期刊之文章“A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things”，得知若要對 LoRa module 進行調製，則需對其物理層參數進行調整。LoRa 之物理層參數包含 Bandwidth (BW)、Spreading Factor (SF) 以及 Code Rate (CR)，這些參數將影響 LoRa 調製之有效比特率，抗干擾噪聲和解碼的容易性。下式為比特率之計算公式，

$$R_b = SF \times \frac{BW}{2^{SF}} \times CR \text{ 式中，CR 等於 } 4/(4+n), n \in \{1,2,3,4\}。$$

舉例說明，若將 LoRa module 設定為 BW = 125 kHz，SF = 7，CR = 4/5，則可經由上式

計算出該 LoRa module 之 $R_b = 5.5 \text{ kbps}$ 。

同樣地，這些參數也會影響解碼器的靈敏度。一般來說，增加 Bandwidth (BW)，將會降低 LoRa 接收器靈敏度；增加 Spreading Factor (SF)，則會增加 LoRa 接收器靈敏度；降低 Code Rate (CR)則有助於在存在短脈衝串干擾的情況下，降低分組錯誤率(PER)，即以 4/8 之編碼率傳輸的分組將比以 4/5 之編碼率為單位傳輸的信號更容忍干擾。表 4-4 為 LoRa 在不同的帶寬和擴頻因子之接收機靈敏度(dBm)。

表 4-4、LoRa 接收器靈敏度(dBm)(由 Aloÿs Augustin 等人所整理)

SF BW	7	8	9	10	11	12
125 kHz	-123	-126	-129	-132	-133	-136
250 kHz	-120	-123	-125	-128	-130	-133
500 kHz	-116	-119	-122	-125	-128	-130

本次試驗為使 LoRa module 具有高靈敏度及一定之抗干擾性，因此將 SF 設定為 12，BW 設定為 125 kHz，則可得 LoRa 接收器靈敏度約為-136 dBm。而在比特率設定方面則考量到資料傳輸均以數字為主，若為了增加抗干擾性而提高 CR 值，將會使比特率降至更低，故決定採用原 LoRa module 最初始的設定(即 $CR=4/5$)，可得比特率約為 0.293kbps。

✓ LoRa module 封包掉落測試

測試方法說明：

於測試前利用 Google Earth 選定 LoRa receiver(資料接收端)放置點與數個 LoRa sender(資料發送端)之量測點。每當 LoRa receiver(資料接收端)接收到 50 個封包後，LoRa sender(資料發送端)便往下一個量測點移動。

而本次測試將 LoRa receiver(資料接收端)放置於成功大學土木工程學系館附近某個定點，沿預定路線將 LoRa sender(資料發送端)移動至各個量測點，而量測點分布與量測距離如圖 4-9 所示。表 4-5 為封包掉落情況。

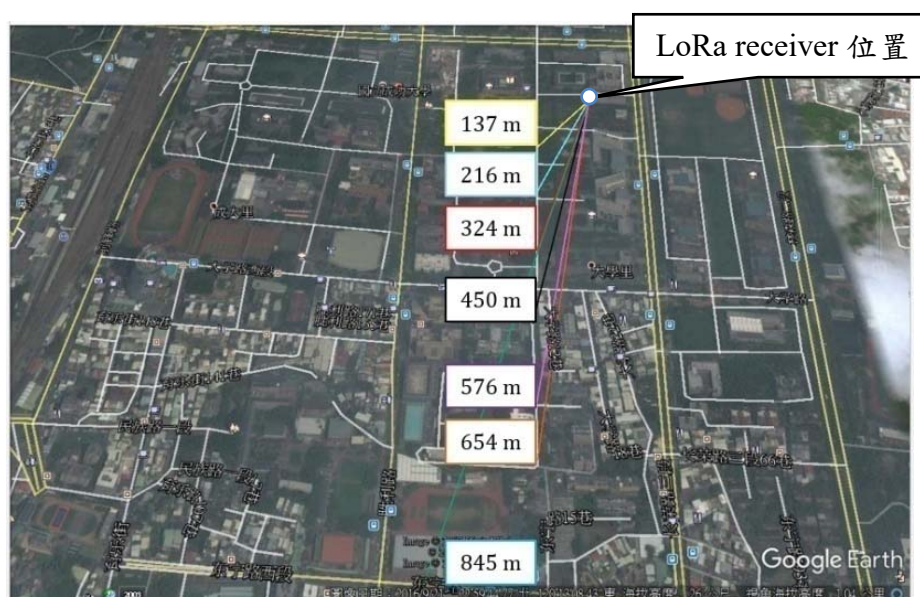


圖 4-9、封包掉落測試—量測點分布與量測距離

表 4-5、量測點封包掉落情況

量測點	封包掉落數量
137 m	0
216 m	0
324 m	0
450 m	0
576 m	1
654 m	除封包掉落外，尚有亂碼出現
845 m	0

由表 4-4 可知，於 654 m 處資料傳遞所受干擾最為嚴重，除了發生封包掉落之外，尚有亂碼出現，初步推估導致原因為該區為學校男女宿舍所在地，使得資料在傳遞的過程中，受到較嚴重之干擾所致。一旦遠離宿舍地段後，封包傳遞又恢復正常了。

由於在本計劃中，僅止於簡單模組開發(含水量計+傾斜儀)，而重點在於測試市面上新式低功耗遠距離傳輸模組，特別是針對本計劃著重的太平山林道 13km 處與本機房端以此長距離無線通訊的品質。唯通訊品質仍受地形距離之影響，資料封包缺損率過高，意味於發/受訊兩端之安置仍須考量地形上之通視狀況，或於傳輸途徑中設置中繼站台。

✓ LoRa module 最遠傳輸距離測試

測試方法說明：

於測試前利用 Google Earth 選定 LoRa receiver(資料接收端)放置點與數個 LoRa

sender(資料發送端)之量測點。只要 LoRa receiver(資料接收端)接收到數個封包後，LoRa sender(資料發送端)便往下一個量測點移動。

而本次測試將 LoRa receiver(資料接收端)放置於成功大學卓群大樓七樓 47752 研究室對外窗口處，沿預定路線(即台南市東區之小東路)將 LoRa sender(資料發送端)移動至各個量測點，而量測點分布與量測距離如圖 4-10 所示。經由本次試驗可知，最遠所能量測到之距離為 1876 m。



圖 4-10、最遠傳輸距離測試—量測點分布與量測距離

傾斜儀(SCA103T-D04)(如圖 4-11)



圖 4-11、傾斜儀 SCA103T-D04 圖(摘自 Murata 公司)

SCA103T 系列是採用差分測量原理的基於 3D-MEMS 的單軸傾斜儀系列。高校準精度結合了極低的溫度依賴性，高分辨率和低噪聲以及健全的感應元件設計，使 SCA103T 成為高精度校平儀器的理想選擇。由於具有超阻尼的感應元件，所以村田傾斜儀對振動並不敏感，它們可以承受 20000 g 的機械衝擊。圖 4-12 為 SCA103T-D04 引腳示意圖，表 4-6 為 SCA103T-D04 引腳描述。

主要特色如下：

- SPI 介面

主要引腳分別為

1. VDD：用於連接電壓。
 2. GND：用於接地。
 3. MISO：做為 master 時資料輸出；做為 slave 時資料輸入。
 4. MOSI：做為 master 時資料輸入；做為 slave 時資料輸出。
 5. SCK：SPI 的時脈信號由 master 主控產生；資料（輸出及輸入）和時脈同步。
 6. CSB：晶片致能，slave 選擇信號，由 master 控制。slave 只有在 CSB 信號為低電位時，才會對 master 的操作指令有反應。
- 工作電壓為+5V。
 - 測量範圍： $\pm 30^\circ$ SCA103T-D05。
 - 精確度： 0.01° (Digital output) / 0.001° (Analog output)。
 - 傳感元件控制超阻尼頻率響應(-3dB 18Hz)。
 - 堅固的設計，高耐衝擊性(20000g)。
 - 在溫度和時間上具有出色的穩定性。
 - 使用差分測量原理的共模誤差和降噪。

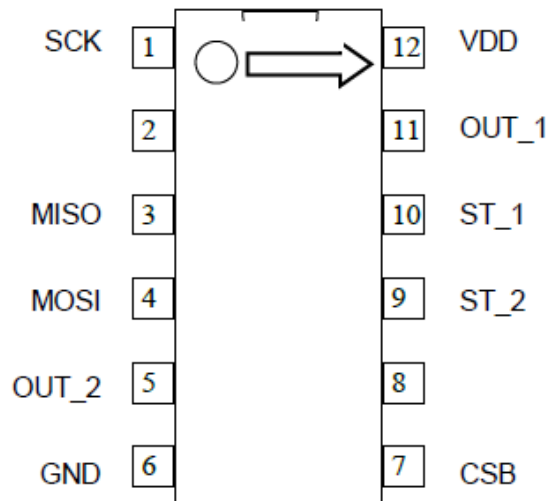


圖 4-12 、SCA103T-D04 引腳示意圖(摘自 Murata 公司)

表 4-6 、SCA103T-D04 引腳描述(摘自 Murata 公司)

No.	Node	I/O	Description
1	SCK	Input	Serial clock
2	NC	Input	No connect, left floating
3	MISO	Output	Master in slave out; data output
4	MOSI	Input	Master out slave in; data input
5	Out_2	Output	Output 2 (Ch 2)
6	GND	Supply	Ground
7	CSB	Input	Chip select (active low)
8	NC	Input	No connect, left floating
9	ST_2	Input	Self test input for Ch 2
10	ST_1	Input	Self test input for Ch 1
11	Out_1	Output	Output 1(Ch 1)
12	VDD	Supply	Positive supply voltage (+5V DC)

含水量計(Soil moisture sensor v2.7.3)(如圖 4-13)



圖 4-13、含水量計 Soil moisture sensor v2.7.3 圖(摘自網路)

- I2C 協議：可用的讀寫寄存器如表 4-7 所示。

表 4-7、讀寫寄存器表(整理自網路)

Name	Register	R/W	Data length
GET_CAPACITANCE	0x00	(r)	2
SET_ADDRESS	0x01	(w)	1
GET_ADDRESS	0x02	(r)	1
MEASURE_LIGHT	0x03	(w)	0
GET_LIGHT	0x04	(r)	2
GET_TEMPERATURE	0x05	(r)	2
RESET	0x06	(w)	0
GET_VERSION	0x07	(r)	1
SLEEP	0x08	(w)	0
GET_BUSY	0x09	(r)	1

主要特色與使用上的相關說明如下：

- I2C 介面

主要引腳分別為

VDD：用於連接電壓。

GND：用於接地。

SDA：資料線 (Serial Data Line)。

SCL：時脈線(Serial Clock Line)。

- 工作電壓為+3.3V 至+5V 之間。

- 電流消耗：

空閒時，1.1mA @ 5V，0.7mA @ 3.3V。

進行測量時，14mA @ 5V，7.8mA @ 3.3V。

當全速輪詢傳感器時，電流消耗平均為 4.5mA @ 5V，2.8mA @ 3.3V。

- 工作溫度 0°C - 85°C。

- 濕度讀數隨溫度變化(在全溫度範圍內<10%)。

- 需為 SCL 和 SDA 線提供上拉電阻。

- 默認 I2C 地址為 0x20 (十六進制)。

- 若要讀取土壤濕度，請從寄存器 0 讀取 2 個字節。

- 若要進行光線感測，透過將寄存器 3 寫入設備 I2C 地址並開始測量，等待 3 秒鐘後，從寄存器 4 讀取 2 個字節。

- 若要讀取溫度，請從寄存器 5 讀取 2 個字節。

- 若要更改傳感器的 I2C 地址，請將新地址寫入寄存器 1，而新地址將在復位後生效。

- 若要復位傳感器，請將 6 寫入設備 I2C 地址。

擴充版(Waspnote Proto Sensor Board v2.0)(如圖 4-14)

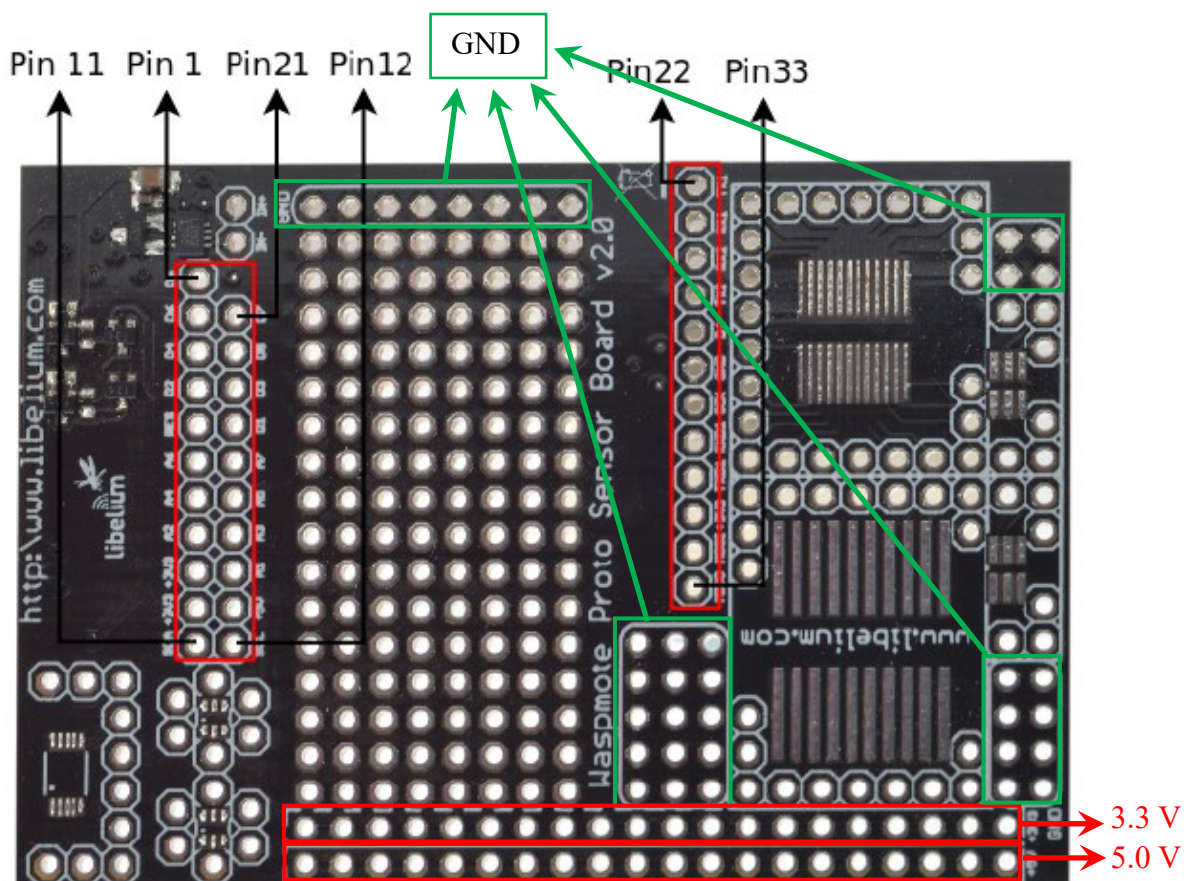


圖 4-14、擴充版 Waspnote Proto Sensor Board v2.0(改自 Libelium 公司)

表 4-8-1、Pin 1 至 Pin 12 引腳之描述(摘自 Libelium 公司)

Pin	Description
1	Digital input/output signal DIGITAL8
2	Digital input/output signal DIGITAL6
3	Digital input/output signal DIGITAL4
4	Digital input/output signal DIGITAL2
5	Reserved
6	Digital input/output signal and analog input ANALOG6
7	Digital input/output signal and analog input ANALOG4
8	Digital input/output and analog input signal ANALOG2
9	3.3V Power supply (SENS_PW_3V3)
10	3.3V Power supply (GPS_PW)
11	SDA (I2C bus signal)
12	SCL (I2C bus signal)

表 4-8-2、Pin 13 至 Pin 33 引腳之描述(摘自 Libelium 公司)

Pin	Description
13	5V Power supply (SENS_PW_5V)
14	Digital input/output signal and analog input ANALOG1
15	Digital input/output signal and analog input ANALOG3
16	Digital input/output signal and analog input ANALOG5
17	Digital input/output signal and analog input ANALOG7
18	Digital input/output signal DIGITAL1
19	Digital input/output signal DIGITAL3
20	Digital input/output signal DIGITAL5
21	Digital input/output signal DIGITAL7
22	Transmission Output UART 1 SERIAL_1_TX
23	Reception Input UART 1 SERIAL_1_RX
24	Reception Input UART 2 SERIAL_2_RX
25	Transmission Output UART 2 SERIAL_2_TX
26	Battery Supply Voltage
27	Ground GND
28	SCK (SPI bus signal)
29	High interrupt input signal RXD1
30	Low interrupt input signal TXD1
31	3.3V Supply Voltage (SENS_PW_3V3)
32	MOSI (SPI bus signal)
33	MISO (SPI bus signal)

操作：

- 板電源電壓：3.3V 和 5V
- 類比數位轉換器電源電壓：5V
- 最大允許電流（連續）：200mA
- 最大允許電流（峰值）：400mA

絕對最大額定值：

- 微處理器引腳電壓：-0.5V 至 3.8V
- 類比數位轉換器輸入電壓：-0.3V 至 5.3V
- 微處理器引腳電流：40mA

二、Wasmote 室內測試結果

試驗日期：2017/06/19

採用 DeepSleepmode，睡眠時間設定為 30 秒。

(一) 整體配置：如圖 4-15、圖 4-16

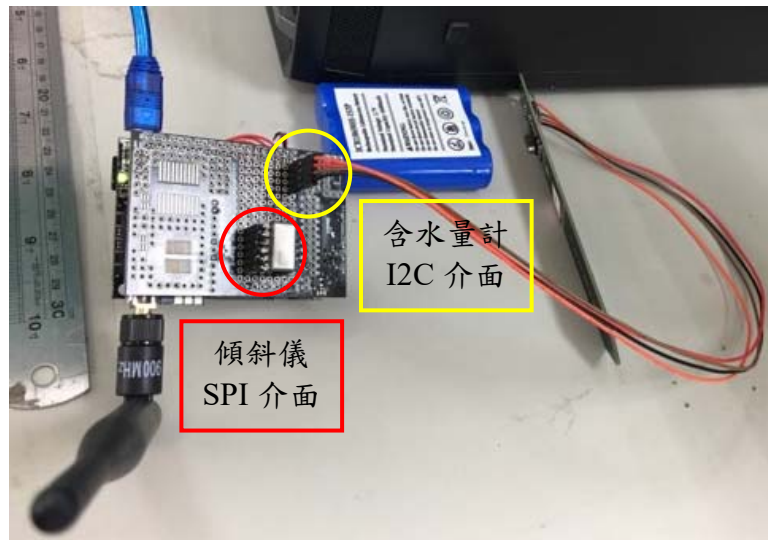


圖 4-15、LoRa 發送端配置圖



圖 4-16、LoRa 接收端配置圖

LoRa 發送端：首先將 LoRaWAN US module 安置於 SOCKET0，而傾斜儀(紅框處)與含水量計(黃框處)之引腳則安置於 Wasmote Proto Sensor Board v2.0 上，並利用杜邦插座作感測器與擴充版之間的連接橋梁(擴充版背後需進行焊線處理，焊線成果如圖 4-17 所示)，接著直接疊加於 Wasmote 上，即配置完成。

LoRa 接收端：直接將 LoRaWAN US module 安置於 SOCKET0 即可。

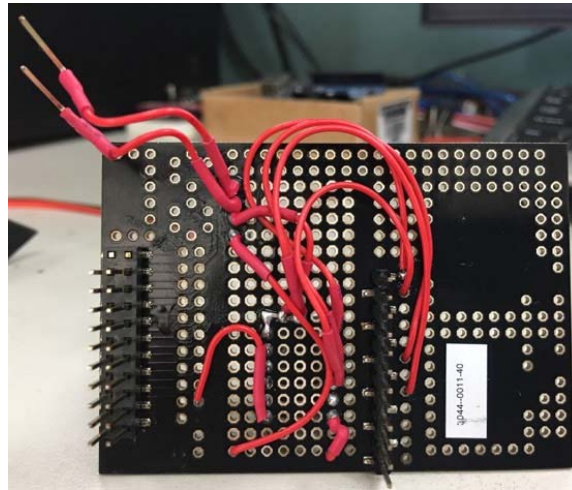


圖 4-17、焊線成果圖

(二) LoRa 重要程式碼編寫(整理於表 4-9)

表 4-9 LoRa 重要程式碼編寫

	Wasmote Pro v1.5
char data[]	0102030405060708090A0B0C0D0E0F (HEX type)
Sensor data send	<pre>char data[] = "0102030405060708090A0B0C0D0E0F"; uint8_t error; char aux1[30] = ""; dtostrf(Sensor data, width, precision, aux1); //將 Sensor data 轉為 Stringtype 並儲存於變數 aux1 之中 // width：資料寬度設定；precision：小數點位數設定 Utils.hex2str((uint8_t*)aux1, data, 5); //資料形態轉換(HEX→String) error = LoRaWAN.sendRadio(data); //資料傳送</pre>
Sensor data receive	<pre>error = LoRaWAN.receiveRadio(Timeout); //資料接收 // Timeout：0 ~ 4294967295ms</pre>

Sensor data store in SD card	<pre>uint8_t buffer1[30]; uint16_t size; uint8_t sd_answer; char filename[] = "FILE1.txt"; //設定檔案名稱與格式 sd_answer = SD.create(filename); //建立檔案於 SD 卡 size = Utils.str2hex((char*)LoRaWAN._buffer, buffer1, sizeof(buffer1)); sd_answer = SD.appendln(filename, buffer1, size); //將資料寫入 SD 卡 SD.showFile(filename); //顯示儲存於 SD 上之資料</pre>
---	---

(三)檔案輸出結果：如圖 4-18、圖 4-19，分別為 LoRa 發送端與接收端

此次試驗日期為 2017/06/19，採用 DeepSleep mode，睡眠時間為 30 秒，而全部資料傳遞總計 30 秒，故間隔時間為 1 分鐘。

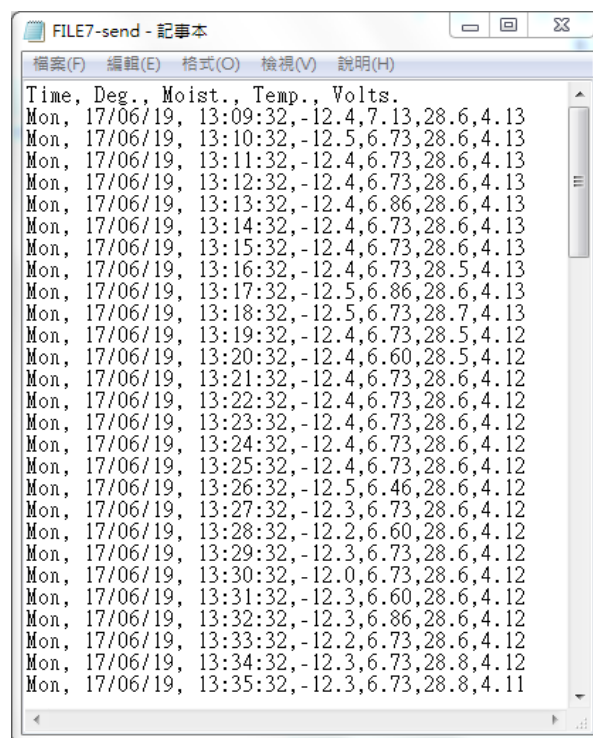
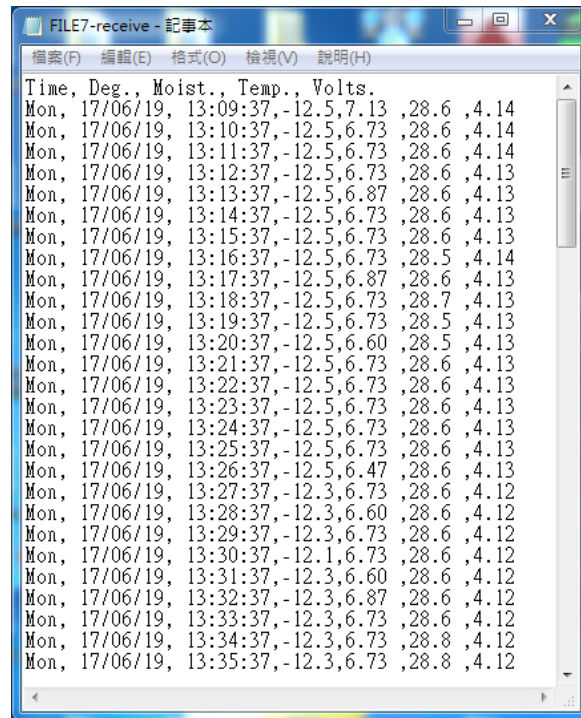


圖 4-18、LoRa 發送端資料儲存情況



Time	Deg.	Moist.	Temp.	Volts.
Mon, 17/06/19, 13:09:37,	-12.5	7.13	28.6	4.14
Mon, 17/06/19, 13:10:37,	-12.5	6.73	28.6	4.14
Mon, 17/06/19, 13:11:37,	-12.5	6.73	28.6	4.14
Mon, 17/06/19, 13:12:37,	-12.5	6.73	28.6	4.13
Mon, 17/06/19, 13:13:37,	-12.5	6.87	28.6	4.13
Mon, 17/06/19, 13:14:37,	-12.5	6.73	28.6	4.13
Mon, 17/06/19, 13:15:37,	-12.5	6.73	28.6	4.13
Mon, 17/06/19, 13:16:37,	-12.5	6.73	28.5	4.14
Mon, 17/06/19, 13:17:37,	-12.5	6.87	28.6	4.13
Mon, 17/06/19, 13:18:37,	-12.5	6.73	28.7	4.13
Mon, 17/06/19, 13:19:37,	-12.5	6.73	28.5	4.13
Mon, 17/06/19, 13:20:37,	-12.5	6.60	28.5	4.13
Mon, 17/06/19, 13:21:37,	-12.5	6.73	28.6	4.13
Mon, 17/06/19, 13:22:37,	-12.5	6.73	28.6	4.13
Mon, 17/06/19, 13:23:37,	-12.5	6.73	28.6	4.13
Mon, 17/06/19, 13:24:37,	-12.5	6.73	28.6	4.13
Mon, 17/06/19, 13:25:37,	-12.5	6.73	28.6	4.13
Mon, 17/06/19, 13:26:37,	-12.5	6.47	28.6	4.13
Mon, 17/06/19, 13:27:37,	-12.3	6.73	28.6	4.12
Mon, 17/06/19, 13:28:37,	-12.3	6.60	28.6	4.12
Mon, 17/06/19, 13:29:37,	-12.3	6.73	28.6	4.12
Mon, 17/06/19, 13:30:37,	-12.1	6.73	28.6	4.12
Mon, 17/06/19, 13:31:37,	-12.3	6.60	28.6	4.12
Mon, 17/06/19, 13:32:37,	-12.3	6.87	28.6	4.12
Mon, 17/06/19, 13:33:37,	-12.3	6.73	28.6	4.12
Mon, 17/06/19, 13:34:37,	-12.3	6.73	28.8	4.12
Mon, 17/06/19, 13:35:37,	-12.3	6.73	28.8	4.12

圖 4-19、LoRa 接收端資料接收情況

三、供電系統配置

- ✓ 太陽能板(如圖 4-20、圖 4-21 所示，分別為正面及背面)



圖 4-20、本次測試所使用之太陽能板



圖 4-21、本次測試所使用之太陽能板

規格圖(正面)

規格圖(背面)

主要規格如下：

- Model：SSB5W-12
 - Standard Test Condition：1000W/m², AM15, 25 +/−2°C
 - Max Power：5W
 - Max Power Voltage：18.25V
 - Max Power Current：0.28A
 - Open Circle Voltage：21.96V
 - Short Circuit Current：0.31A
 - Net Weight：0.55 KG
 - Size (L/B/T)：185x240x17 mm
 - Temperature Range：−45°C to + 85°C
 - Frame Materials：Aluminum
 - Output Tolerance：±5%
- ✓ 太陽能板控制器(如圖 4-22 所示)



圖 4-22、太陽能板控制器

左邊的兩個插槽連接太陽能板，中間兩個插槽連接鋰電池，右邊兩個插槽需經過降壓晶片後才可與 Waspnote 之電池插孔連結，整體之連接方式示意圖(如圖 4-23 所示)。

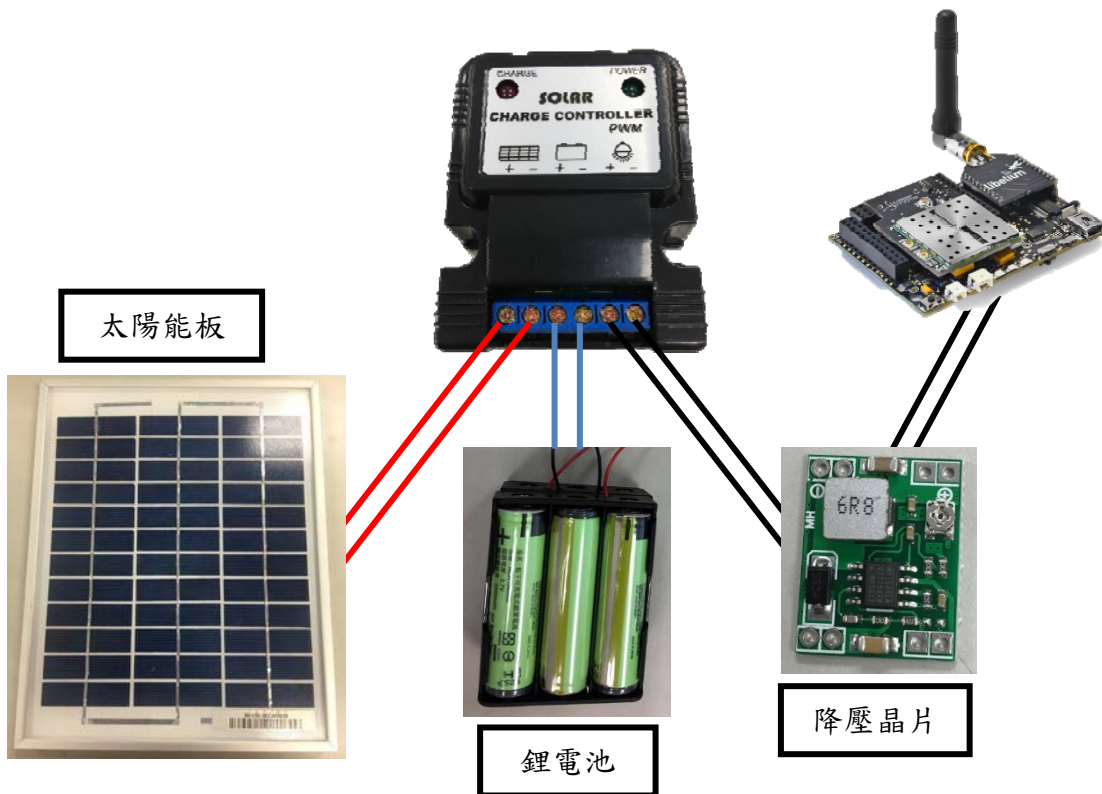


圖 4-23、供電系統整體之連接方式示意圖

第四節 目前研發進度

目前已將程式碼編寫完成，並針對 LoRa module 做了一些相關測試，如封包掉落測試、最遠傳輸距離測試以及室內試驗等，僅剩外構設計部分需多加思考。

關於此部分，目前已將放置含水量計之外構設計完成，如圖 4-24 所示。而傾斜儀則是先在 Wasmote Proto Sensor Board 上焊接杜邦插座，再將其安置於杜邦插座上，如圖 4-25 與圖 4-26 所示，分別為傾斜儀(SCA103T-D04)安置前後。

而不將傾斜儀直接焊接於 Wasmote Proto Sensor Board v2.0 之主要原因為一方便日後若傾斜儀損壞，可直接進行替換，而非將整個 Wasmote Proto Sensor Board v2.0 捨棄。至於放置太陽能板之座台也已設計完成，如圖 4-27 所示。大致上僅剩盒子內的配置需做最後調整。



圖 4-24、放置含水量計(Soil moisture sensor v2.7.3)之外構

(由成功大學土木所研究生蕭涵設計)



圖 4-25、傾斜儀(SCA103T-D04)安置前

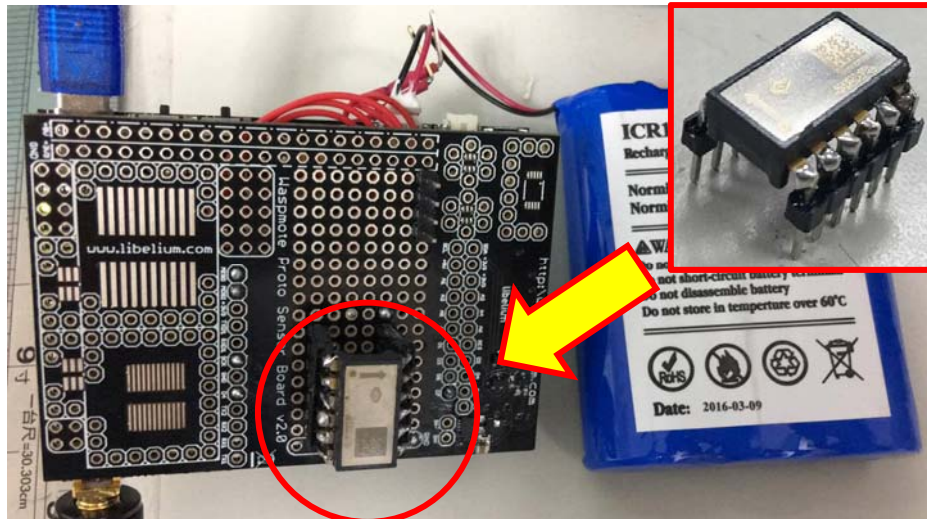


圖 4-26、傾斜儀(SCA103T-D04)安置後



圖 4-27、放置太陽能板之座台

第五節 現地測試

一、含水量計與無線通訊模組設置

為了實測無線通訊模組的運作情況，於是將含水量計與無線通訊模組(如圖 4-24)安裝到太平山 13.5km 處的坡地上。由於九月山區降雨氣候多變，安裝工程於 10 月完成。我們選定的井位是位在 LTW03 光纖光柵孔細水壓監測井旁約一米處。該區域表層仍為碎石崩積物，屬較大顆粒之鬆散材質。為了將含水量計安裝置地下，需要鑽出一個約一米深的孔洞，圖 4-28 為施工狀況一景，圖 4-29 為設置完成的含水量計與通訊模組。為了使無線通訊模組的電池能

夠充電，在感測器旁一米處安置太陽能板。選擇分開安裝是由於我們發現現場由於樹蔭緣故缺乏日照，而在太陽能板選定地則每日正午左右約有三至四小時的日照。安置後之太陽能板如圖 4-30 所示。本感測器設定自啟動後每小時發送一筆資料。資料共有四個欄位：溫度、傾角、土壤濕度與電池電壓。另一方面，在機房側(13km)，安裝通訊的接收端。兩者間距 500 米，但經一約 30°的道路轉折與森林的隔絕。

本現地測試主旨在於測試此低功耗設計與 LoRaWAN 通訊能力，來評估未來廣泛應用的條件，故本階段的檢視目標在資料傳輸的完整性而非正確性，這項前提必須先加以指明。



圖 4-28、鑽孔施工現場



圖 4-29、設置完成的含水量計與無線通訊模組



圖 4-30、太陽能面板



圖 4-31、通訊模組於太陽能面板相對位置



圖 4-32、安裝機房端的天線並進行接收端的設定

二、截至 2017 年 10 月 27 日之狀況

在總共約三週的試驗間，我們發現許多問題。在本小節中我們將逐一描述並提出改善或替代方法。

一、模組節電設計仍有不足，與本計畫雷同的設計，在本年度水保局創新計劃中"坡地淺層水力力學反應無線感測模組研發"應用於南部日照佳的牡丹水庫試驗區中得以長時間運作，然而於大林林道本試驗區，由於日照量過低，仍不足以維持長時間運作。在這客觀條件限制下，我們檢視目前模組中各項元件的耗能狀況以及整合驅動程式發現仍有以下改進的方案。

1. 太陽能充電器模組自身的漏電流過高。以飽和的三枚 18650, 2100mAh，鋰電池作為供電的元件，在沒有負載的狀態下約四天會放電至截止保護電壓，這意味需更換電力控制模組。

2. 深度睡眠(deep sleep)模式中，在目前的驅動程式中並未將感測器模組斷電，造成持續約有 8mA 的漏電流需截止。由於這項改變需要涉及原始程式碼修改、整合與測試，約需數週完成。

二、土壤含水量輸出不具物理意義，這是由於該邊坡的表層材質屬破碎顆粒，孔隙率高，不似一般土壤得以將含水計電極妥適包覆之故。故在本地表層含水量的測試需以它法量測，然這非本計畫重點故不再加以探討。

三、通訊仍是一大障礙，在設計本模組中，我們在成功大學所在之都會區中，在非通視狀況下測試成功約 2km 低損耗之通訊成果，但在太平林道的使用經驗發現，接收端可接收到部分通訊，但封包完整性差而導致通訊內容遺失。目前該缺損率甚高而失去無法以多重傳輸的方式解決，而必須改變網路的拓樸結構接收(topology)，加入中介通訊，將於明年以個人計畫的執行完成。此外從應用該通訊模組的經驗中，我們發現在通訊時有非常高的功率要求，瞬間可達 200mA，約 1W。這對電源的管理也是一挑戰，解決方法是設計更經濟的資料封包，避免重複的通訊握手週期(hand-shaking)的損耗。

四、由於通訊的阻礙，在施行區域中我們必須回退至探索通訊可達的範圍，本項工作擬於十一月中下旬進行。

第五章 結論

本計畫的目標在於嘗試將目前新興的監測技術加以實用化，並提供至大規模深層山崩的即時與長時間監測。我們期許這些新技術能夠提供新的監測觀點，又或了解新技術現有的盲點，指出未來改進的方向。本節結論將就計畫執行至今(2017 年 11 月初)的狀況作一總結。

一、光纖光柵即時解算系統開發：這項目是本計畫最核心的部分。我們基於光纖光柵感測原理設計撰寫了一套泛用的解算系統，該系統是一雙執行緒架構，得以自由文字的型態描述感測器的率定曲線，串接的拓樸結構，解讀儀設定等等。

以此系統應用於首要的太平林道 13km 深層邊坡兩口地下水孔隙水壓監測井，我們已取得水壓歷線。特別是於今年度行政院防災應用科技計畫中所安裝的新 LTW03 井位，四枚水壓計的紀錄，反映了地下水文的狀況，這對將來在學理上了解深層山崩機制是非常重要的。而即時水壓計的讀數也是邊坡深層山崩預警最直接的力學指標，故本技術是未來值得繼續嘗試的。於今年度美中不足之處為於八月初，位於地表道路護欄連接光纖監測井位與採樣機房的鎧甲光纜，為鋼片型割草機絞斷以致於目前處於斷線狀態。礙於維修經費調動，僅能預計明年中完成。

二、低功耗採樣電腦系統之整合：由於前述系統是以標準資訊工具撰寫，有極佳的移植性，可移植整合至各式嵌入式系統。由於嵌入式低功耗的系統使得在太平林道與離岸測風塔的監測得以長期運行。

以前兩點之成果應用於彰濱外海之離岸測風塔，則大幅提升了該測風塔之光纖動態傾斜儀的監測能力。目前該系統運作良好，處於隨時以 3Hz 的頻率，監視該風塔與風波流的互制作用，為本計畫重要的延伸貢獻。

三、遠距離低頻寬的通訊技術是順應 ”物聯網(IoT)” 的趨勢所發展而成的特殊通訊方式，主要適應於低通訊量，但需長時間運作的模式。在本計畫中以市場所出現最高整合度的 Waspnote 為基底，初步開發了邊坡表面監測的模組，並以該模組為感測單元，測試在太平

林道潮濕之森林環境的效能。目前狀況是雖然在都市中，該模組可達成設計目標，但於現場實測時仍受環境的影響，而仍須改進。這些改進項目已在第四章第五節提出，在此不再贅述。

參考書目

壹、研究報告：

林慶偉，2015，*大規模崩塌多元尺度綜合監測，資料綜整分析與滑動機制研究：以太平山蘭台地區為例(I)*，行政院科技部防災應用科學計畫。

林慶偉，2016，*大規模崩塌多元多尺度綜合監測，資料綜整分析與滑動機制研究：以太平山蘭台地區為例(II)*，行政院科技部防災應用科學計畫。

經濟部中央地質調查所，2010，*易淹水地區上游集水區地質調查與資料庫建置-第二期 99 年度集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估(3/3)報告*，經濟部中央地質調查所，台北。

經濟部中央地質調查所，2011，*易淹水地區上游集水區地質調查與資料庫建置-第三期 100 年度集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估(1/3)報告*，經濟部中央地質調查所，台北。

貳、期刊：

曾長生，(1978)，*宜蘭縣清水及土場區地質及地熱產狀*，臺灣石油地質，第 15 號，第 11-23 頁，台北。

Augustin, A., Yi, J., Townsley, W. M., (2016), *A study of LoRa:longrange &low power networks for the internet of things*, Sensors, E1466.

Anderson, S.A., and Sitar, N. (1995). *Analysis of rainfall-induced debris flow*, J Geotech.Eng., ASCE, 121, No. 7, 544-552.

Cascini, L., Cuomo, S., Pastor, M., and Sorbino, G. (2010), *Modeling of Rainfall-Induced Shallow Landslides of the Flow-Type*, J Geotech.Geoenviron. Eng., 136, No. 1, 85-98.

Collins, B.D., and Znidarcic, D. (2004), *Stability analyses of rainfall induced landslides*, JGeotech.Geoenviron. Eng., 130, 362-372.

Doherty, P., Igoe, D., Murphy, G., Gavin, K., Preston, J., McAvoy, C., Byrne, B. W., McAdam, R., Burd, H. J., Houlsby, G. T., Martin, C. M., Zdravkovic, L. T., Taborda, D. M. G., Potts, D. M., Jardine, R. J., Sideri, M., Schroeder, F. C., Muir Wood, A., Kallehave, D. & Skov Gretlund, J. (2015), *Field validation of fibre Bragg grating sensors for measuring strain on driven steel piles*, Géotech. Lett. 5, No. 2, 74-79.

Hill, K. O. and Meltz, G. (1997), *Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview*. J. Lightw. Technol., 15, 1263-1276.

Ho, Y.T., Huang, A.B., Ma, J., Zhang, B., and Cao, J, (2005), *Ground movement monitoring using an optic Fiber Bragg Grating sensed system*, Proceedings, 17th International Conference on Optical Fiber Sensors, Bruges, Belgian, SPIE Vol.5855, pp.1020-1023.

Ho, Y.T., Huang, A.B., and Lee, J.T. (2006), *Development of a fiber Bragg grating sensed ground movement monitoring system*, Journal of Measurement Science and Technology, Institute of Physics Publishing, Vol.16, pp.1733-1740.

Ho, Y.T., Huang, A.B., and Lee, J.T. (2008). “*Development of a chirped/differential optical Fiber Bragg Grating pressure sensor*,” Journal of Measurement Science and Technology, Institute of Physics Publishing, No.19, 6pp.

Huang, A.B., Lee, J.T., Ho, Y.T., Chiu, Y.F. and Cheng, S.Y. (2012), *Stability monitoring of rainfall-induced deep landslides through pore pressure profile measurements*, Soils Found, 52, 737-747.

Kersey, A. D., 1996. *A review of recent developments in fiber optic sensor technology*. Opt. Fiber Technol., 2, 291-317.

參、研討會論文：

T. Goldschmidt, A. Jansen, H. Koziolk, J. Doppelhamer, H.P. Breivold (2014), *Scalability and robustness of time-series databases for cloud-native monitoring of industrial processes*, Cloud Computing (CLOUD) IEEE 7th International Conference on

肆、論文集：

高聖傑(2006)，*光纖光柵水壓計之研發*，交通大學土木工程系碩士論文。

許智超(2005)，*光纖黏貼技術之研發*，交通大學土木工程系碩士論文

簡旭君(2002)，*光纖光柵應變管之研發*，交通大學土木工程系碩士論文。

伍、其他：

LoRaWAN R1.0 Open Standard, 2015.

Waspote technical guide, 2016, Libelium.

附錄

附錄一、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形

開會時間：106 年 8 月 2 日上午 9 時

開會地點：水土保持局第一會議室

主持人：柯總工程司燦堂

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	P.58 表 4 之編碼應與其他表格一致，又文中之表號亦有與表編碼不一。(P.59 表、表 4-5?)	已更正
二	資料傳遞會受周遭環境影響，而產生干擾，是否可能導致本開發模組之功能受限？	在本計劃中，僅止於簡單模組開發(含水量計+傾斜儀)，而重點在於測試市面上新式低功耗遠距離傳輸模組，特別是針對本計劃著重的太平山林道 13km 處與本機房端以此長距離無線通訊的品質。唯通訊品質仍受地形距離之影響，資料封包缺損率過高，意味於發/受訊兩端之安置仍須考量地形上之通視狀況，或於傳輸途徑中設置中繼站台。
三	本計劃與另一"坡地淺層水力力學反應無線感測模組研發"計劃，有無關連性？	本計劃與委員所提之計劃確實有關連，在感測模組開發，借重了該計劃之成大執行團隊之感測器相關的研發能量。然感測器的驅動模組則

項次	審查意見	回覆辦理情形
		捨棄一般團隊所使用的以Arduino為基底的方案，而採用Wasp mote。原因為後者是為遙感量測之特殊環境(無穩定電力供應)所最佳化之硬體基本模組，在節電控制方面，較一般Arduino甚多，待機狀態由50mA降至數十μA。且該模組提供之硬體介面與開發工具，較之於Arduino更為完備，故以此為開發之基礎。然本計劃之重點仍在於測試該遠距離通訊模組而非在感測器模組之最佳化。以此兩點觀之，本計劃與委員所提之計劃在角色上屬互補。
四	本計劃有無與其它單位委辦計劃有重疊之部分?	太平山林道13km處為重要深層山崩的實驗監測場域，自2014年起，確實已經歷科技部與中研院的研究案委辦。這些過往計劃，本人所執行的項目在於安裝光纖監測系統。然而這套系統未臻成熟，如本計劃書所提及，原系統僅能提供光波長讀數，未能即時解算所監測的物理量，使得應用層面大幅受限。而每當有解算需要時，人工的操作成本

項次	審查意見	回覆辦理情形
		為本技術實用化之瓶頸。於是本人提出本計劃，為開發一即時解算系統軟體，以及評估其運行狀況，為本計劃之最核心項目，故與其他計劃的成果歸屬也可清楚分別。但以整體研究領域而言，本計劃所擷取之資料，當然得與科技部及中研院委辦計劃分享。
五	光纖光柵之解算系統開發是否屬創新研究，與以往之系統有何創新之處？	光柵光纖感測原理以及其多功架構已在回顧文獻中詳述。然於本計劃前，環顧市面所見之光纖解讀儀器及驅動程式之架構以及成本，在實用化推廣，有其困難，而本計劃是為移除這些侷限所提出，一言以蔽之，本計劃是基於廣泛已知的光纖感測器架構，所提出的創新的高穩定性非交換式(適用於無人操作)的系統。且由於本系統在運行中無與任何特殊軟體(Labview、Matlab)有依存關係，得以廣泛使用於各類系統，且隨應用環境調整。如本計劃所衍生的應用:永傳能源離岸風塔動態光纖傾斜儀系統。在離岸測風塔上，由於僅有獨立小型供電系

項次	審查意見	回覆辦理情形
		統，對每一監測技術只能供電 10W 的額度。吾等以本創新系統進行監測，已自七月起連續 3Hz 採樣至今。這在本系統開發之前是無法達成的，以此觀之，本解算系統開發是屬於創新及擴展應用。
六	本案研發光纖光柵感測器即時解算系統，極有意義，系統若為本案開發、或者是已有成果。目前看來觀測系統已運作多時，引其他計劃成果應註明。	本光纖光柵即時解算系統是於本計劃的支持下，得已開發完成。首先應用於今年(2017)三月二十二日，正式取代太平山蘭台地區原有的高功耗工業級 PC 電腦採樣系統(且無即時解算功能)。因本系統是基於串接式光纖光柵量測原理所開發，在設定方面採用靈活泛用的描述式的文本，使得該系統非常容易擴展至其他應用，於是在本計劃執行中的第二產品是貢獻於離岸測風塔的動態結構傾斜監測。本系統於今年(2017)七月八日完成安裝而運行至今。固本意見命題應改為"本計劃成果貢獻於其他計劃"。

項次	審查意見	回覆辦理情形
七	由P.47看來地下溫度隨水深會有所變化，不太符合地下水溫分部特性，水壓力分部亦不合理應隨水深變大。	以目前我們所取得的數據而言，地下溫度的變化不算巨大，幅度僅約0.1~0.2度。然地下水根據相關計劃的研究，此坡面在地下約40米處有不透水層，地下水體可能不為連續水體，而不同水層有不同的來源補助。故過度的歧異是有可能的。我們需要更長時間的尺度的量測資料來確認此一推論。故仍需對此坡面不斷監測。水壓部分讀數確實不合理，這是由於首批感測器於施工後，因現地因素造成光纖與感測器機構之長期裏握力鬆弛所造成的靜水壓度數偏移。故此批感測器之讀數，目前僅能使用於雨量氣候相關的定性描述。而今年度(2017)七月，在科技部支持下，復行安裝第二口孔隙水壓井以為校驗，以新井之記錄顯示，孔隙水壓確實隨深度的增加而增加，並於50至60米間，發現異常的水壓增加。推測也是由於約52米處之不透水層造成的不同水層的效應。

項次	審查意見	回覆辦理情形
八	宜蘭專一道路相關，屬國內重要個案，建議水保局可納入大規模崩塌，一併處理。	確實該區域是一研究深層山崩垂重要場域，整合成為水保局的計劃已進入實質規畫階段。
九	設備效能提升多少？演算效能提升多少？以上兩點在本研究案的成效？	本設備重點並不在於演算速度的快慢，原因是在此類環境監控應用中，採樣頻率最高僅約數赫茲(Hz)，市面上任何廉價單板電腦(single board computer)皆有足夠的計算資源(如樹梅派 Raspberry Pi, 1GHz, Moxa 嵌入式電腦 1.2GHz 等)。而重點在於縮小採樣儀器的功耗，移除人工解算所獲益的效益，以本研究案目前之成果而言，該光纖光柵解算系統完全達到該子項目之目標。
十	設備在鑽孔中需要保持垂直？如果沒有垂直？在傾斜儀如何校驗？	以過往鑽孔施工之經驗，垂直度有賴於現場施工團隊與工班的專業經驗，我等研究團隊無法左右。而傾斜儀的一般量測範圍落在 $\pm 10^{\circ} \sim \pm 12^{\circ}$ 間，若垂直度落於該區間，傾斜角度即以感測器之率定曲線反推。在本區域，我們曾試圖安裝光纖光柵傾斜儀，然發現該地區有快速的潛移。自鑽井完工至感測

項次	審查意見	回覆辦理情形
		器安裝間約兩個月時間，井下位移已使得安裝深度僅達 9 米。而再經過僅約一季，傾斜儀讀數已包含 ($\pm 15^\circ$)，故已停止採樣。
十一	光纖光柵系統中重要的模組當屬感測器校正輔助程式；其中包含對於孔內壓力與溫度的校正，但似乎對於孔內溫度如何校正卻較少說明，宜補充之。	溫度計相對單純。其校正僅是將製作好的感測器整體置於溫控箱內，在校正壓力的同時，直接讀取溫度計波長，即得到校正所需之資料。以上答覆也已加入至報告本文中。
十二	本研究案涉及兩套不同目的之系統，但對於含水量計以及 I2C 介面可接收多少支含水量計卻未加說明，建議補充之。	I ² C 為早期 Philips 因應集成電子設備內各原件溝通所設計的標準，適用於低速，採用同步式串列通訊，實體上則藉由兩條信號線完成。由於強調的是集成設備間的通訊，故應用於感測器設計時，感測器與驅動端不可能隔太遠。在應用於本例中，土壤含水計，僅能設計於主機間最長約 1~2 米的範圍。於 I ² C 標準中，理論上可達 112 種設備。雖然近年來該標準又有擴展，但在 IoT 應用中在無修改主機電路之電氣特性的情形下，多數以四項以下設備為多。否則同步時鐘訊號無法有效驅動所串接的通訊設備。在本案

項次	審查意見	回覆辦理情形
		中，僅加入數位傾斜儀與阻抗式土壤含水計等兩項裝備。另一項限制是 I²C 標準中，同樣目的的設備，是共用同一位址的，而原理上需由製造商向標準協會申請使用。故委員所問能串接多少水壓計，則牽涉到自行修改感測器定址的能力，雖然有些感測器確實可以修改 I²C 位址，但這將會是與感測器製造商有關的。我們所使用的含水量計可以自由修改 I²C 位址，故可串皆約四組，而傾斜儀無法修改，故在單一 I²C 匯流排中僅能有一組傾斜儀。整體而言，若需使用者自行修改感測器位址，將增加製造作業的成本，大規模採用將產生阻礙。
十三	目前使用之光纖光柵設備為現成之商品，本計劃之貢獻應以演算法之改進及系統之整合為主，後續建議加強相關說明。	謝謝委員指教，已在前述四、五、六項中答覆。且於報告中本文中修正

附錄二、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形

開會時間：106 年 11 月 29 日上午 9 時

開會地點：水土保持局第一會議室

主持人：柯總工程司燦堂

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	屬新技術之開發，惟電力系統之考量，可再進化。	電力為山區監測重要資源，本團隊將隨時注意降低功耗設備的開發與應用。
二	具有學術應用之價值，可產出一篇學位論文，應可肯定。	謝謝委員的肯定。
三	本案採用很高端的技術做防災監測，值得發展，惟應注意適用範圍及可信賴程度。	由於感測器布放至水壓井後，會施作封層而無法取出，本技術的信賴度主要是建立在感測器率定曲線的恆常性上，亦即感測器安裝至現場後的耐久性。耐久性則需持續監控的資料來輔佐判斷，本團隊將藉由判定時序資料所呈現的特性，來評估本技術的未來信賴度。
四	相關論文很多，很多碩博士參與，也相當有助於基礎科學發展。	謝謝委員的肯定。

項次	審查意見	回覆辦理情形
五	採技術發展，長久對防災策略有益。	謝謝委員的肯定。
六	從目前的報告仍看不到目前系統開發的結果，請補充。 a. 設備效能能提升多少？或成效如何？ b. 室內檢定結果。 c. 解算系統的開發、成果及成效如何？	確實如同評審委員的意見，軟體系統開發與整合較不易於書面文字中呈現，但就 a、b、c 三點意見，可再總結如下 a. 本系統已可取代過往人工解算與高耗能的採樣平台，故以人工而言，可取代一名碩士級的人工解算能力，而低功耗平台可使系統耐受因天災斷電時間至數週持續運作，而非一兩日(由 60W 降至目前約 7W)。 b. 室內檢定係於感測器製作完成時施行，是求取率定曲線的必要過程，在本報告中，請參閱第二章第一節之範例率定曲線。每一感測器均有專屬的率定曲線，限於篇幅，在此僅以一級水壓計為例。 c. 請見 a.之答辯。

項次	審查意見	回覆辦理情形
七	本案結合既有產業商品進行系統整合，並克服系統省電之需求，以因應野外應用，值得鼓勵，建議對於感測端的休眠與喚醒時機的界定，可參考物理現象的變化機率，訂定資料擷取頻率需求。	謝謝評審建議，週期性休眠可為未來方向，且可行。
八	本案屬應用型研究，其中以通訊障礙最為困難，未來無論是否可改善困境，仍具實務教學的價值。	本計劃應用區域確實展現了現場無線通訊的困難處，經由本計劃的評估，已確定改善方案，即加入資料轉發節點與完整的 LoRaWAN 通訊架構，預計於 2018 年中完成通訊示範布建。
九	光纖光柵為可能發展的方向，是否能說明其與其他亞洲方式之成本、精度及效能率之比較。	本系統的建置歷經數項研究計劃所支持，且由於其學術性質，目前在成本上的精確估算確實較為缺乏，然綜合經驗，以目前市場價值約可估算 50kNTD/sensor，8kNTD/m 深井布放，1kNTD/m 地表光纜走線以及機房設備建置成本。若以此結構值算，已與傳統 SAA(該技術採用類似的布放技術)近似，唯光纖解讀儀之成本仍高(約 500kNTD)。 本研究計劃水壓計設計感測區間為 0~400kPa，換算水頭約為 40 米深，

項次	審查意見	回覆辦理情形
		以太平山本研究區域地下水位面約位於 35~40 米間，最深感測器裝置於 70 米處，本設計是足夠的。400kPa 約當 2nm 之波長讀數改變，以目前解讀儀解析度 1pm 而言，折合水壓約 0.2kPa，約 2cm 之水頭差，略低於市面電子式水壓計之精度，但可分布式量測為其特點。
十	有發展性，但尚待驗證。	謝謝評審意見，我團隊將持續發展與驗證該技術。
十一	光纖式感測器，具有多項優點，可作未來監測之參考。	謝謝評審意見。