

儀器科技研究中心 103 年期末成果報告

## 崩塌災害評估儀器與預警系統技術發展

計畫主持人：廖泰杉

報告日期：中華民國 103 年 12 月 31 日

# 目錄

一、	計畫目的.....	3
二、	工作項目.....	3
三、	具體成果.....	3
3.1	坡地多點感測器模組與通信架構系統可行性技術發.....	3
3.1.1.	節點系統架構.....	6
3.1.2.	實作與結論.....	10
3.2	坡地崩塌區域之快速取像評估系統開發.....	15
3.3	坡地崩塌近景觀測系統之演算法分析與整合.....	222
3.3.1.	表面模型重建流程與方法.....	244
3.3.2.	地形變遷分析結果.....	30
3.3.3.	近景觀測系統故障後更新維修與整合.....	322
四、	結語.....	355
五、	參考文獻.....	37

## 一、 計畫目的

由於科技日新月異，人類的生活品質逐漸提高，對於天然災害防治的觀念日益加深，雖然部分天然災害的發生及結束時間可以由氣象報告來預估，但其損害程度常常是無法掌握的，如風災、水災，土石流，其影響範圍通常廣泛，災況變動速率大，災害對環境及人民生命財產的影響量很難及時獲得。此計畫目的，儀科中心整合國內相關技術與資源，針對特用型之災害預警儀器監測系統趨勢，研發坡地潛勢崩塌災害評估儀器與坡地崩塌即時監測影像觀測技術，降低坡地防災之成本及提高其時效性。

## 二、 工作項目

災害預警儀器與系統技術發展計畫中儀科中心於103年工作項目主要為3項，其分別如下：

- (1) 坡地多點感測器模組與通信架構系統可行性技術發展
- (2) 坡地崩塌區域之快速取像評估系統開發
- (3) 坡地崩塌近景觀測系統之演算法分析與整合

## 三、 具體成果

將分別針對各項成果簡介如下：

### 3.1 坡地多點感測器模組與通信架構系統可行性技術發

台灣地處歐亞大陸板塊和菲律賓海板塊交界處地震頻繁發生，且夏季有西南季風、冬天有東北季風、春末至秋初更有梅雨颱風肆虐，這一切使得台灣的土質更為的鬆軟不穩定，在與湍急的河流交互作用下土石流、山崩等崩塌災害不斷的發生奪去眾多的生命，無奈災害的發生的源頭往往是地處偏遠且公路、電力、水力、通訊等基礎建設難以到達的地點，造成災難預警系統設置受限無法即時監測

災難源頭，除此之外目前災難預警系統還面臨的幾個重大的問題：維護成本高昂、佈建系統困難、監測設備昂貴無法做大範圍監測，為此我們提出以無線感測網路為核心的災難預警系統來解決傳統災難系統所無法解決的問題。

為了清楚的描述此技術網路節點設計，將節點軟硬體系統架構整理如圖 1 所述。在圖 1 中媒體存取控制層(MAC Layer)至網路層(Network Layer)，主要控制如何將資料發送到無線射頻(RF)以及資料如何從路由到目標節點或基站。現今有提出很多 MAC[1-5]和路由[6]的設計，在文獻中許多方面表現優異，但其設計仍尚缺乏實際和長期的測試，以確保在實際環境中的可靠性。此外媒體存取控制層至網路層的效能容易受到底層硬體特性的影響。因此，此技術發展選擇另行設計一種軟體，直接整合媒體存取控制層至應用層(Application Layer)，此種設計可免除四層中四種設計上下相容上的疑慮並使得設計更為一致，易於找出各種軟體造成的問題。

而在泛用室外環境監測的無線感測網路平台設計中，泛用設計需具有低硬體成本、低耗能與高度目的設計自由，鑑於以上要點採用挪威 Nordic 半導體公司推出的 2.4GHz 無線射頻收發芯片與美國 ATMEL 半導體公司生產搭載 ATMEGA328 微處理器的 Arduino Uno 開發板來做為泛用硬體平台。選用兩者結合而成具有多跳網路的節點成本僅不到 30 美元，相較於主流的無線感測網路裝置 Mote 價格更是擁有 72% 的優勢，泛用平台成功的推動將降低技術與時間成本，並加速領域知識普及與降低跨領域門檻。

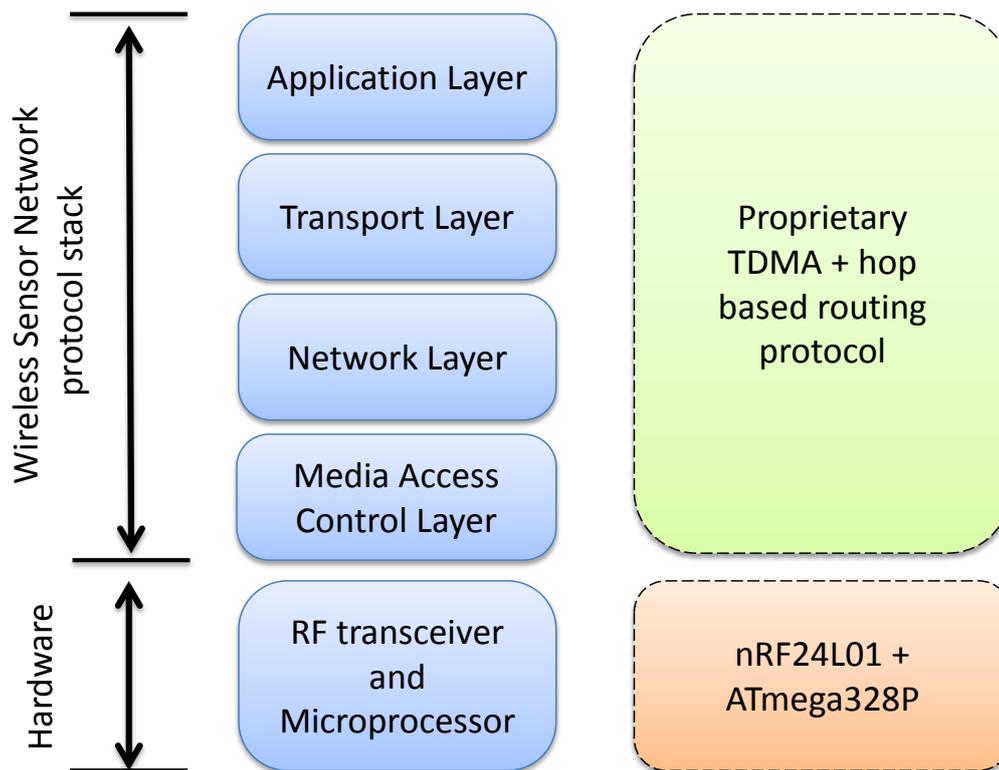


圖 1、節點系統架構圖

戶外無線感測網路環境總是多變且難以預測，感測器網路可能隨著放置地點、間隔距離、時間、溫度、濕度、季節氣候變化，甚至動物與人類的活動皆會對網路拓撲產生不可預期影響，因此網路需具備有能高度適應環境變化的拓撲。再者戶外無線感測網路的建置通常有長時間且不易配線等特性，通訊協定必須是依靠獨立電源能長時間穩定運作。最後作為低成本的嵌入式系統限制，微處理器有限的處理能力無法負荷龐大的網路拓撲，所以應採用輕量級的傳輸協議。

ZigBee[7]作為至今成熟的無線個人區域網路(Low-Rate Wireless Personal Area Network)的代表協定，其具備了低耗電、低成本、支援大量網路節點、支援多種網路拓撲並且可靠。但作為戶外無線感測網路的通訊協定其拓撲與提供的功能存在著一定程度的不足，ZigBee 網路拓撲中節點有三種狀態：Coordinator, Router, End Device，其中除了作為網路核心的 Coordinator 不能執行低功耗操作外，由於 Router 也負責協調網路節點加入、路由更新與轉傳封包等等運作，在 ZigBee 規範[7]中並沒有辦法執行低功耗操作，唯一能執行低功耗操作的只有 End

Device。有鑒於此在 Router 無法執行低功耗操作的 ZigBee 無線感測網路架構下，系統的運作時間將因作為 Router 節點的無線射頻模組無法關閉而大大下跌。這也促使我們必須實現一個能適應戶外無線感測網路環境的通訊協定。

根據 Huang-Chen Lee 教授提出針對通用室外環境監測無線傳感器網路平台 [8] 的概念一文中，從多種感測網路的通訊機制所整理出的結論：在多數節點和基站(Sink)做時間同步的應用中，節點皆需要取得準確的時間戳記(time stamped)，基站才能識別該資料串流。由此同步彼此時間時使用時分多址(TDMA)通信協議會是較好的選擇。

在建立網路中各節點的關係中我們參考了 D.S.J. De Couto [9,10], K.-W. Chin[11] 等人的研究成果，研究成果表明：一個純粹基於跳數來選擇傳輸路徑，常常導致所選的並不是最好的路由路徑。基於此原因我們選擇統計接收到最多 Beacon 封包的節點來做為我們的路徑節點，以確保由一跳到下一跳的通訊品質。

### 3.1.1. 節點系統架構

下圖 2 表示節點系統架構，其中分為五大單元：負責接收發送的無線射頻模組(RF modulator)、緩存資料用的快閃記憶體(RAM)、處理網路封包與偵測資料的中央處理單元(Process Unit)、偵測資料與判斷節點狀態的輸出輸入單元(I/O Unit)、儲存感測資料與系統參數的記憶單元(Memory Unit)。

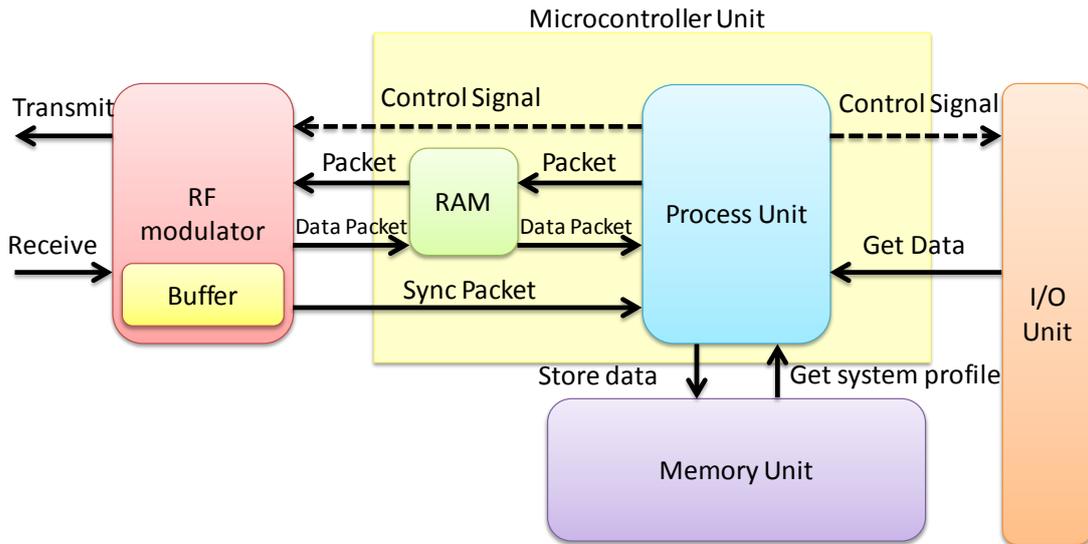


圖 2、節點系統架構圖

(a) 無線射頻模組(RF modulator)

無線射頻模組由中央處理單元輸送控制訊號(Control Signal)來驅動，中央處理單元在正確的時間點喚醒無線射頻模組，無線射頻模組在依據控制訊號決定目前該執行的動作，控制訊號有四：睡眠訊號、喚醒訊號、傳送訊號、接收訊號。

睡眠訊號與喚醒訊號負責控制無線射頻模組電源狀態，從接收睡眠訊號起無線射頻模組將進入省電模式(Power down)，進入省電模式時無線射頻模組將使用最低限度的電流維持運作(近似於 900 nA) [4]，待喚醒訊號到達後進入待機模式(Standby Mode)等待任務。

傳送訊號與接收訊號負責控制無線射頻模組工作狀態，在取得傳送訊號後，無線射頻模組會從快閃記憶體中取出待傳送的資訊，將資訊結合自身節點參數後組合為封包傳送至目標處；在取得接收訊號時，無線射頻模組切換至接收模式接收此時段的所有封包並且判斷封包目標，封包目標非自身時丟棄，為自身時將封包留下做判斷，判斷標準為確認封包類型，當封包類型屬於時間重點型的封包，如同步時間的封包等，將會由中央處理單元直接做處理；而封包類型屬於非時間

重點型封包，如資料封包等，則會先存入快閃記憶體中，待節點切換至處理模式再做資料處理。

無線射頻模組於接收封包時，對封包做迅速分類的原因源自於在嵌入式系統裡中央處理的單元的時脈並非如個人電腦般的高，本文的系統如果採用接收即處理的方式，在中央處理單元處理封包時，將造成新的網路封包持續堆積於無線射頻模組的資料緩衝記憶體，直至無線射頻模組的緩衝記憶體無法容納導致封包丟失，而我們知道重新取得資料是十分高昂的成本，所以為了避免這個問題我們採用封包分類的方式。時間重點型的封包由於喪失時間特性會導致封包失去意義必須第一時間處理；非時間重點型的封包則否，處理時只需把無線射頻模組裡的資料取出放入節點的快閃記憶體，省去的封包處理時間將使中央處理單元能快速的處理更多的封包，避免無線射頻模組的封包丟失問題。

#### (b) 中央處理單元(Process Unit)

中央處理單元為整個節點的核心，負責統合無線射頻模組、快閃記憶體、輸出輸入單元與記憶單元此四大單元，使其在正確的時間點運作即是中央處理單元的工作。

在初始化模式時，中央處理單元從記憶單元中取出系統參數，系統參數包含節點身份編號、最大節點總數、最大子節點數、時隙(Time slot)的長度、工作周期(Duty cycle)、感測器類型、感測頻率與儲存方式，藉由取得以上資料建構基本的節點，並開始監聽信標(Beacon)封包訊息選擇自己的父節點，待選擇後則進入空閒模式。

進入空閒模式時中央處理單元將會依照節點身份編號、時隙長度、工作周期與感測頻率四樣做傳送模式、接收模式、處理模式與感測模式四者間的切換。

#### (c) 記憶單元(Memory Unit)

記憶單元主要工作有兩項：感測資料的保存與節點參數的讀取。感測資料的保存能有效避免節點在長時間無法順利將資料傳送回父節點時，造成的快閃記憶

體容量不夠資訊遺失問題。節點參數由使用者藉由使用者介面寫入 micro SD 卡，節點再從 micro SD 卡讀取近節點中，節點將會獲取本次感測目的中的所有參數後再行運作。

#### (d) 輸入輸出單元(I/O Unit)

輸入輸出單元主要的元件有感測器與按鈕，按鈕的部分我們設有安裝資訊按鈕、記憶體單元開關與初始化模式重啟按鈕，這些按鈕將方便我們在環境現場安裝我們的節點。節點有感測器有三軸加速度計、溫濕度感測器、土壤濕度計與雨量計四種，此四種感測器是我們整理眾多的無線感測網路應用後決定使用(詳情請參閱第三節)，在節點中會包含這些感測元件的各種設定資料，使用者只需在使用者介面輸入相關的偵測頻率與資料傳送條件即可使資料順利傳回。

#### (e) 使用者介面

首先從使用者介面與節點的溝通，我們採用串列埠(Serial port)作為連結方式，使用者僅需開啟執行檔(.exe)後選好串列埠即可開始接收資料如圖 3(a)，以此跳過繁複的程式安裝。而正確連接後接收的資料會顯示於圖 3(b)紅框中，使用者介面會把接收到的資料轉換成有效的資訊顯示在訊息列表中，應用專家能輕易解讀節點傳回來的溫度、濕度、三軸加速度等等感測元件的感測值，且程式將記錄最後一筆訊息接收的時間與至今的傳輸成功率，應用專家亦能迅速且輕易的觀察到部署的節點是否正常運作。此舉將以往只有節點看得懂的封包內容和只有無線感測網路系統專家才看得懂的訊息記錄檔(Log)化為即時的資訊供應用專家使用。

接著在資料儲存的方面如圖 3(c)，我們提供直接在使用者電腦上儲存的功能，應用專家能依據使用習慣儲存在不同的空間並且輕易的做資料搬移與分析，而不用關閉運作中的網路，除此之外儲存的資料會記錄資料收到的時間並且依天數、節點做分類，能使資料做有效率的使用。

節點安裝的地點是否合適，除了可以從圖 3(b)紅框中的傳輸成功率做判斷之外，我們也提供如圖 3(d)紅框中的方式。框中我們採用樹狀列表的方式完整還原

我們的樹狀網路拓撲，應用專家能一目了然的看出系統中的節點目前的父節點與子節點，從而判斷目前各節點負載是否過大，亦或是當一部分節點失去聯繫時，判斷是否為單一節點故障導致沒有任何路徑可以選擇的節點無法傳送資料等等情況。

最後應用專家可以從圖 3(e)設定一個無線感測網路系統的參數，可以設定的參數從節點數、資料回傳周期、SD 卡記錄功能、LCD 顯示器開啟到節點低功耗的設定接可以做更改，這跳過了以往要安裝與學習 IDE 的使用等等漫長的時間，應用專家只要把產生的設定檔放入 SD 卡中就能快速的設定節點，使節點符合自己的應用需求。

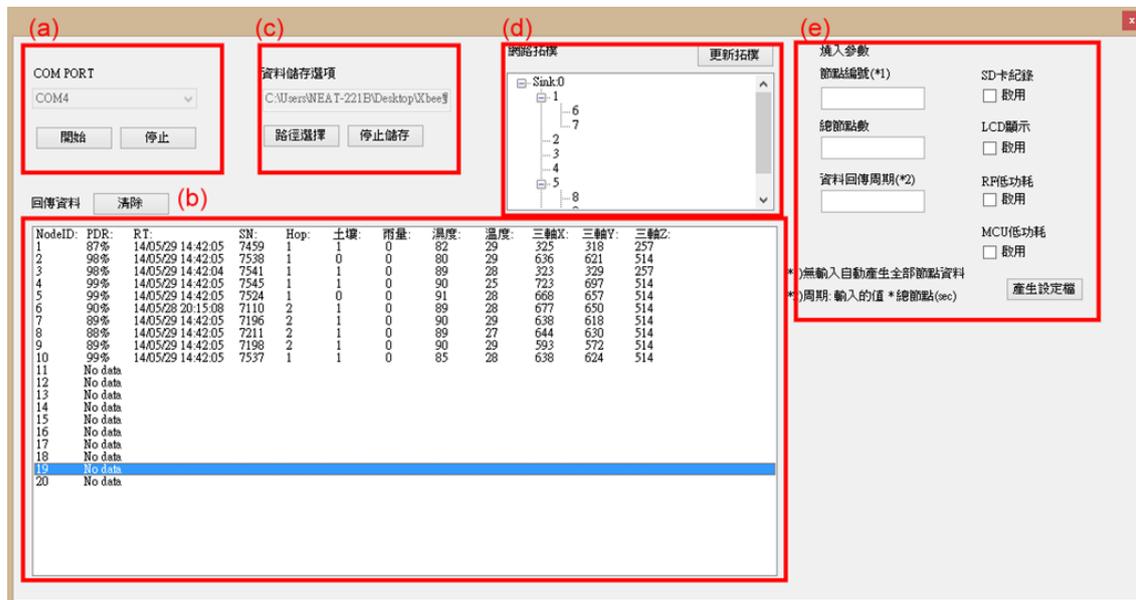


圖 3、使用者介面。

### 3.1.2. 實作與結論

系統評價方式必須公平且有公信力，為此選用 Digi International 所出產的 XBee 做為我們比較的對象。XBee 是一種在 2.4GHz 頻段上工作的 IEEE802.15.4 產品，其作為商業化的無線射頻模組有一定程度上的穩定與使用率。XBee 擁有眾多不同的通訊協定版本，其中包含基礎的 IEEE802.15.4 版本、在其基礎之上的 Zigbee 版本與 DigiMesh 2.4 版本，在做為一個好的對照組的抉擇中我們認為

DigiMesh 2.4 擁有幾個重要的特性是跟我們研究相似的：(1)DigiMesh 只有一種節點狀態，相較於 Zigbee 網絡設置更簡單、(2)DigiMesh 不論任何的節點皆有擴展網路的功能而 Zigbee 中只有 Coordinator 與 Router 擁有擴展網路的能力、(3) DigiMesh 並不依靠單一的 Coordinator 或 Gateway 來同步，透過提名與投票的機制來決定時間由誰同步，進一步使得網路能有較高的抗干擾與損壞能力。(4) DigiMesh 裡允許任何的節點進行睡眠而非像 Zigbee 只能允許 End Device 進行睡眠。而以上提及的特點做為戶外無線感測網路平台的對照組是非常重要的，因此我們採用 XBee DigiMesh 為實驗對照組。

在硬體架構上我們為了追求公平，XBee 所搭配的微處理器與本研究同樣使用 ATmega328P，如此可以免除微處理器的處理效率差異導致的封包遺失的問題，在輸出功率上面 XBee 與 nRF24I01 同樣為 1mW 輸出功率的版本，天線方面採用同強度的天線，以讓整體硬體差異最小化，詳細實驗硬體規格比較如表 1，實驗實體如圖 4。

表 1、實驗平台軟硬體對照表

	本研究	對照組
通訊協定	自行研發之感測網路協定	IEEE802.15.4, DigiMesh
微處理器	ATmega328P	ATmega328P
無線射頻模組	nRF24I01	Xbee DigiMesh 2.4
工作頻段	2.4GHz	2.4GHz
RF功率	1mW	1mW
天線	SMA	RP-SMA
省電模式	全節點皆可	只有End Device可執行



圖 4、實驗實體

實驗將系統與對照組放置於中正大學電通館二樓，並設置十一個節點於二樓走廊。兩邊的實驗系統配置皆為每分鐘傳一筆感測資料；每二十秒發送一次特殊封包，接收到的節點會重置看門狗(Watchdog)；每一百秒沒收到特殊封包看門狗會讓節點重開機。實驗運行共五天，各節點的擺放位置如圖 5 所示。



圖 5、實驗一的實驗環境示意圖

實驗數據的分析上，我們主要分析資料收集站(圖 5 中的綠色節點)所接收的封包訊息並將資訊統整於圖 6。圖 6 中我們將節點的資料順利到達資料收集站做為一次成功的傳輸，反之沒收到資料當作失敗，並在封包中夾帶封包編號以利我們統計節點總共傳輸的封包數。圖 6 中我們也加入各個節點總共傳輸次數的直條圖，以便觀察各節點是否正常運作，從圖 6 中可以看出 XBee 的六號節點並沒有成功的運行至最後一天，其設置的地點電源疑似遭人為撞擊導致無法正常供電，所以在實驗探討的部分六號節點將不做討論。

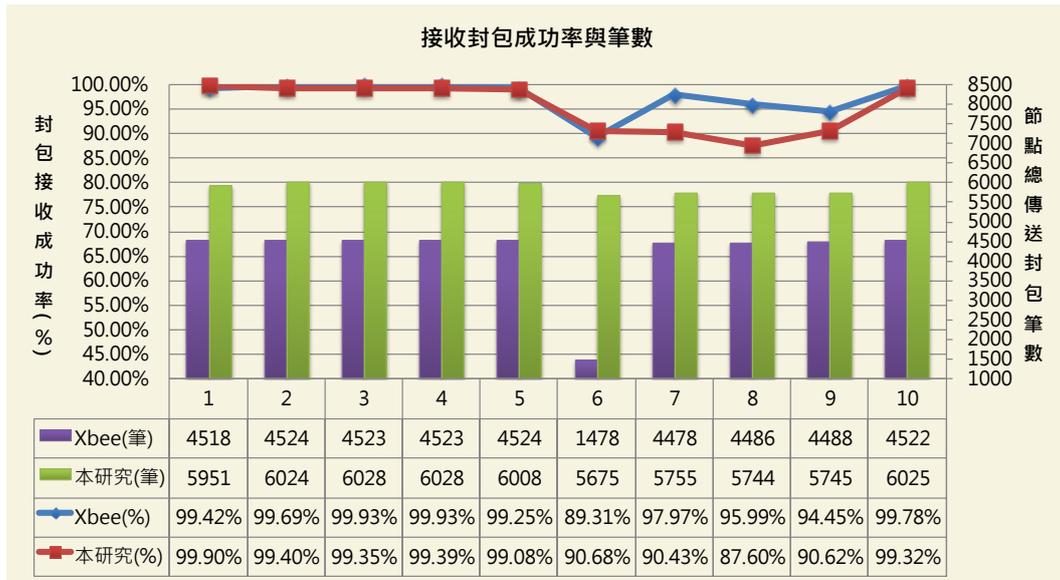


圖 6、資料接收站接收的封包成功率與總接收筆數分析圖

從資料接收站接收到封包的成功率來看，我們可以看出在大部分的節點中，我們節點的傳輸成功率互有高低且差異不到 1%，這顯然是很好的現象，因為 XBee DigiMesh 模組雖然任意節點皆可以進行低功耗操作，但網路中每隔一段距離後，仍然需要一個節點主動持續監聽網路中是否有新節點要加入，否則網路無法進行擴展；而我們的網路採用新節點被動監聽網路封包的方式來加入網路，這也使得我們能全部的節點進行低功耗，而非 XBee DigiMesh 的大部分節點進行低功耗。我們認為兼具全節點低功耗功能的我們佔有優勢。

而在節點資料差異較大的七、八、九號節點我們嘗試分析原因並找出一些特異點，發現位於七號、八號與九號位置的節點連線的環境十分不穩定，我們將不穩定的證據實際資料繪製成圖 7。圖 7 中我們將各節點更換父節點的次數做統計並與傳輸成功率做比較，發覺此三顆節點的更換次數遠高於其他節點。在圖 7 中有趣的一點是一號節點同樣有相似的問題，但其傳輸成功率卻維持著 99.90% 的高水準表現，這讓我們做出以下推測：更換次數過高的七、八、九節點，距離間隔較其他節點長兩至三公呎，這使得通訊距離接近臨界值，導致必須時常更換網路連結，而在此條件下仍維持近 90% 的傳輸水準我們認為是可以接受的。

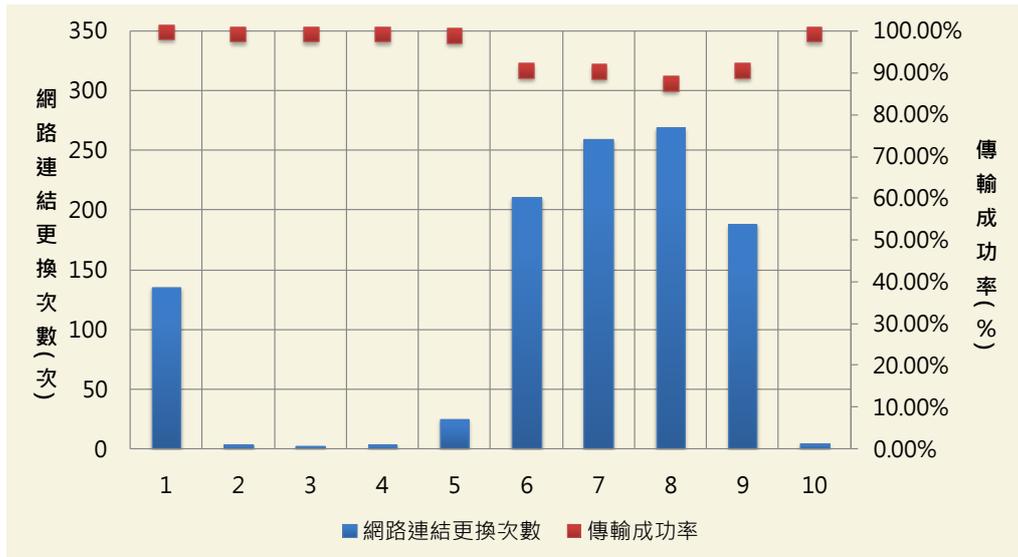


圖 7、各節點網路連結更換次數與傳輸成功率

但對於同樣環境下 XBee DigiMesh 沒有這個問題，我們推測是天線造成的差異，雖然兩者皆採用同樣強度的天線，但由於接頭界面的不同，所以天線無法共用。而不同製程的天線分別有不同的場型與品質，在距離接近臨界值的傳送，天線的品質是會影響傳輸成功率的。

利用此次實驗的結果我們將在未來把網路連結的更換次數放入使用者介面，並且告知可能需要新增節點的地方以利提升傳輸成功率。

103 年 11 月底時將多物理量測型態感測器之置於中正大學之戶外測試，此期間南部天氣晴朗，無下雨，也無地震，因此多物理量測型態感測器只有溫濕度有較明顯之變化，如下圖 8 所示

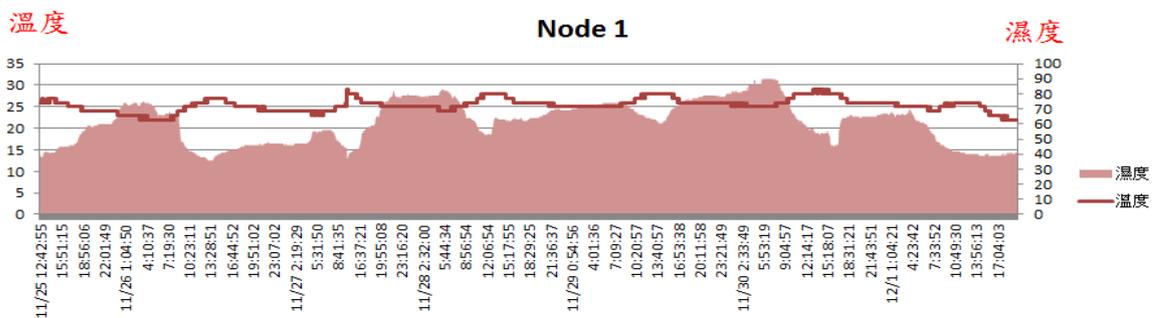


圖 8、溫度與濕度變化資料

溫度於攝氏 20 度到 30 度之間變化, 戶外濕度 40%至 90%之間變化, 此驗證多物理量測型態感測器與硬體網路架構是可行。綜而言之

1. 多物理量測型態感測器與感測器網路實驗室與戶外驗證可行, 但是長期野外測試多物理量測型態感測器與感測器網路還是需要繼續進行, 以累積可靠度與經驗修正。
2. 多物理量測型態感測器與感測器網路整合成功, 實現一套省電型無線多物理量測型態感測器感測網路系統, 其效能與商業化的 IEEE 802.15.4 模組做比較有較高之穩定、便宜、低工耗與容易使用。
3. 希望藉由多物理量測型態感測器與感測器網路整合, 激盪出山裏社區型崩塌災害評估儀器與預警系統技術之防災新策略。

### 3.2 坡地崩塌區域之快速取像評估系統開發

災區大多屬於局部性或區域性之小面積測區, 以專業設備進行災況資訊獲取則成本過高, 並且災況資訊極具時效性, 必須考量設備的即時性及機動性, 傳統設備(衛星影像、航空影像)因受其公轉週期及雲層遮蔽等因素限制, 及時性與機動性不足, 拍照後需做幾何精度修正與正射化等影像處理, 時間費時不利防災救災單位迅速作出正確決策。因此, 如何在最緊急關鍵時刻, 快速蒐集災況的原始面貌, 是我們計畫的目標。

計畫於 102 年開發出第一代的快速取像評估系統, 其系統搭載了 2 台各 1210 萬有效畫素的全片幅 CMOS 感測器, 具有高感光度、高動態範圍、低雜訊等優點, 並包含 R、G、B 和 NIR(Near Infrared)共四種波段, 系統機構以碳纖維及鋁管材設計製作而成, 保有剛性和承載性, 又能大幅減輕重量, 此系統含 4 波段相機模組僅重 4.6KG, 符合旋翼 UAV 載重限制 5KG 以下之規範[12-18], 系統如下圖 9 所示。

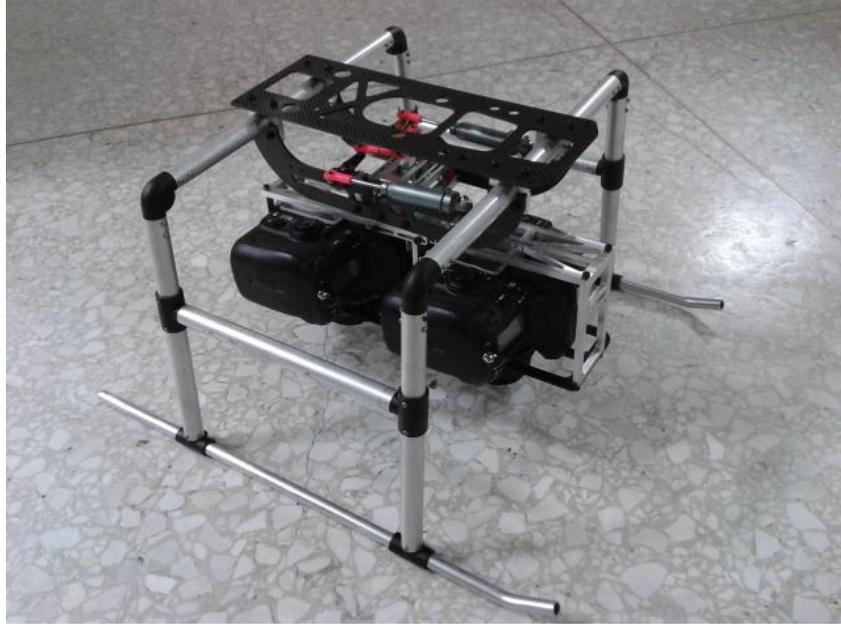


圖 9、第一代快速取像系統

在 102 年 9 月一次雲林坪頂地區航拍任務時，為閃避山區道路上的電線，下降重落地，起落架應聲從中折斷，系統鏡頭直接撞擊地面，造成了鏡頭損毀，如下圖 10 所示：





圖 10、第一代快速取像系統重落地損毀

事後我們檢討，除了操作環境複雜，造成這次的事故，在系統設計上，是否能再強固性一點，尤其是載台的設計部分。故 103 年在第二代系統開發上，進一步針對載台強固性、重量及系統性能上，改進與優化；首先是感測器本體選擇部分，由於科技的進步，新型態的全片幅感測器，已經可以捨棄五稜鏡，讓影像直接投射在 CMOS 上，直接由 LCD 取景，也就是全片幅式的微單眼相機，不僅把體積縮到極為輕巧，更完整保留了全片幅 DSLR 的專業特性及高 ISO 畫質表現，跟第一代系統相比，感測器本體重量一口氣從 995 公克減到 416 公克，變成一半不到的重量，如下圖 11 所示：



圖 11、第一代與第二代取像系統大小比較

在鏡頭選擇上，由於全片幅微單眼相機為新產品，其可搭配的 FE-Mount 鏡頭中，定焦鏡目前只有兩款，分別是 Carl Zeiss Sonnar T\* FE 35mm F2.8 ZA 和 Carl Zeiss Sonnar T\* FE 55mm F1.8 ZA，其規格表如下表 2 所示，以旋翼 UAV 航高約 600 公尺以下，在考量覆蓋率及地面解析度後，我們選定 Carl Zeiss Sonnar T\* FE 35mm F2.8 ZA 為第二代取像系統的鏡頭，如未來採用定翼 UAV，則可選用長焦段定焦鏡，提升地面解析度至公分等級。

表 2、鏡頭規格比較表

		
	Carl Zeiss Sonnar T* FE 35mm F2.8 ZA	Carl Zeiss Sonnar T* FE 55mm F1.8 ZA
濾鏡口徑	49 mm	55mm
光圈	f/2.8	f/1.8
視角	63° (對角)	43° (對角)
光圈葉片數	7	9
直徑 x 鏡長	61.5 x 36.5 mm	64.4 x 70.5 mm
重量	120 g	281g

接著進行近紅線改裝，新的感測器模組像素高達 2400 萬畫素，尺寸為全片幅大小，為能塞進這狹小的機身，電路板層層堆疊，以軟排線互相連結，光是機

構拆解就費了好大一番功夫，一不小心可能就會傷到電路板，拆下後的這片 Exmor CMOS 如下圖 12 所示：

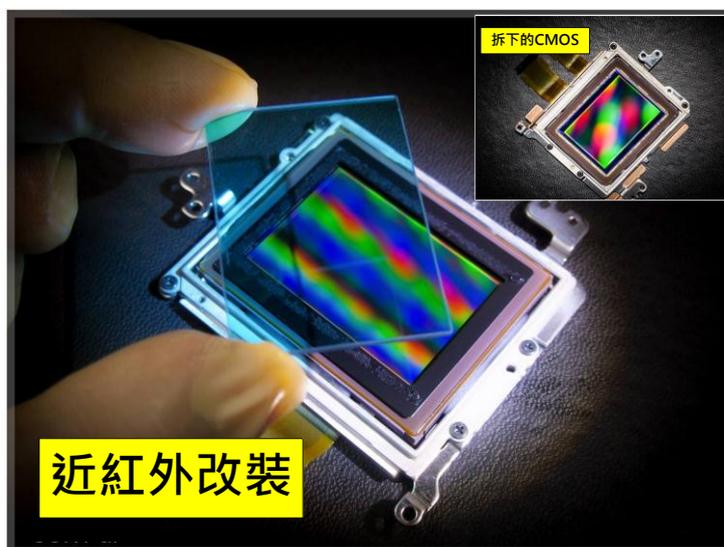


圖 12、近紅外改裝

典型的 CCD 感測器或 CMOS 感測器，光譜響應曲線約 380nm 至 1200nm，可見光波長在 380nm~780nm 之間，光譜響應曲線大於 780nm 低於 1200nm 是 CCD 或 CMOS 感測器可應用的近紅外光範圍，如下圖 13 所示，但是多數的數位相機在出廠時，為了增加色彩的鮮豔度以及降低雜訊，都會在 CCD 感測器或 CMOS 感測器前加裝紅外去除濾波器(IR-Cut Filter)，因此只要透過置換 IR-Cut Filter，加上光路折射率的修正，即可讓數位相機變成近紅外相機，關於選擇何種規格紅外光學濾波器就跟觀測何種物體，水，植物或礦物等特徵波長有關，表 3 為 SCHOTT 紅外光學濾波器光學性質規格，RG 型號表示可使紅外光線透過之紅色和黑色玻璃，RG 後面之數字表示以下範圍之可見光被濾除，如 RG\_800 為 800nm 以下可見光範圍被濾除，只通過 800nm 以上之紅外光。

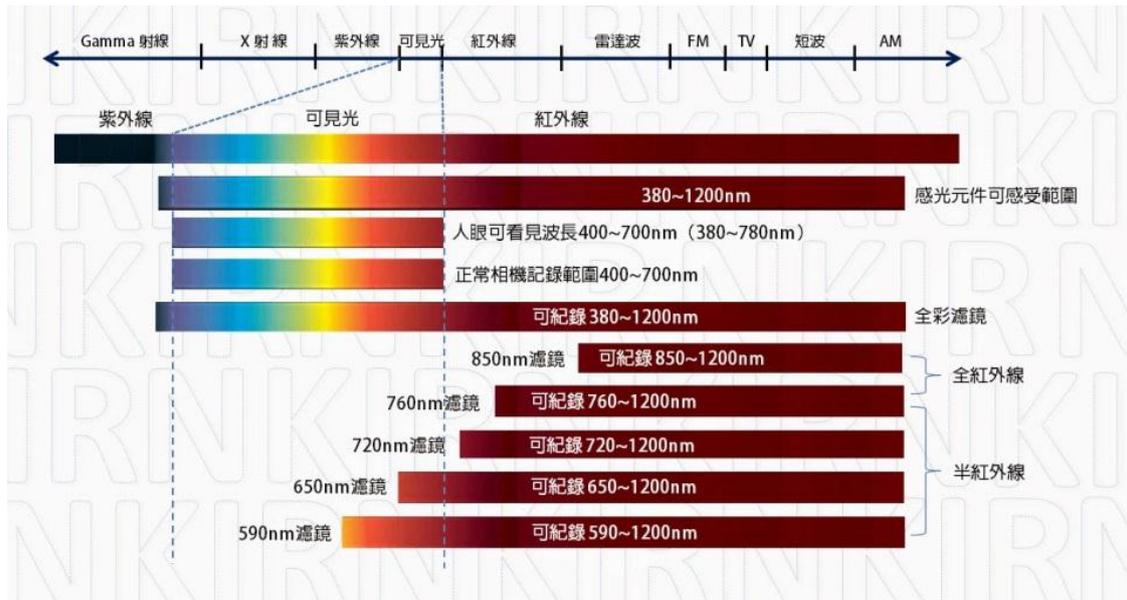


圖 13、光譜圖

表 3、紅外線濾鏡規格表

SCHOTT 型號	以上紅外波長通過
RG_695	695nm
RG_710	710nm
RG_780	780nm
RG_800	800nm
RG_830	830nm
RG_850	850nm
RG_1000	1000nm

最後是機構部分，由於第一代系統四波段感測器部分占了快 4 公斤的重量，為了減輕系統重量，載台採用鋁管材設計製作，的確是達到了 5 公斤內的目標，之後經多次的任務執行，在一次重落地後折損，造成系統損毀，於是在 103 年的計畫，我們在載台部分採全碳纖維製作，強化剛性，並加上自穩式兩軸穩定雲台，及抗震阻尼，來增進穩定度，如下圖 14 所示：



圖 14、自穩式兩軸穩定雲台

其系統總重量壓低至 2.2 公斤，與第一代系統相比減輕了 52% 的重量，未來在載具的選擇上可以更多元，例如搭載於多旋翼機上使用；以四旋翼為例，在四旋翼機的外尺寸與傳統直升機主旋翼直徑相等的原則下，四旋翼機之載重能力只有傳統單旋翼直升機的一半，但在操控上以四旋翼機較為簡易，在設計及應用上也較有彈性，也是未來應用的主流。因此，減輕一半重量的第二代系統快速取像評估系統，更適合搭載於多旋翼機上使用，下表 4 為第一代與第二代的系統比較表。



第二代 4 波段快速取像系統\_任務執行與拍攝成果

表 4、4 波段快速取像系統比較表



項目	第一代 4 波段快速取像系統(102 年開發)	第二代 4 波段快速取像系統(103 年開發)
光學波段	R、G、B 及 NIR	R、G、B 及 NIR
感測元件數	1200 萬畫素	2400 萬畫素
重量	4.6 公斤	2.2 公斤
地面解析度(35mm 鏡頭航高 600 公尺)	優於 12 公分	優於 10 公分
穩定裝置	單軸自穩式	雙軸自穩式
記憶裝置	可擴充 64GB	可擴充 256GB
RGB 及 NIR 波段影像拍攝時間同步誤差	< 1/100 sec	< 1/100 sec
單次飛行拍攝張數	900 張/次	340 張/次
性價比	中	高

### 3.3 坡地崩塌近景觀測系統之演算法分析與整合

坡地崩塌區之定點近景即時觀測系統之研發，102 年雖然完成崩塌監測系統之實驗雛型建置[19-22]，包括實驗地點選定、相機率定程序、相機架設安裝與調校、核影像糾正程序、密集匹配方法等工作，已經可以網際網路由遠端即時監控與取像，然後在 PC 上以監測軟體進行坡地崩塌的即時解算與監測，103 年繼續將近景即時監測系統之演算法進行修正與小林國小對岸崩塌地偵測及土方量計算，並與嵌入式系統進行整合，以達到低消耗功率系統功能之特色。

台灣地區常因風災或震災等因素，造成山區土石之鬆動、崩塌或土石流的發生。且受到近幾年極端氣候的影響，強降雨模式將增加崩塌發生的機率，對於山區有人居住的村落將造成強烈威脅。103 年計畫中，則利用兩台能即時回傳影像的 IP Camera 組成立體像對，針對山區部落裸露之崩塌地區進行監測，並透過近

景攝影測量技術，藉由影像拍攝求解影像方位並重建物體的三維表面模型 (Digital Surface Model, DSM)，同時透過多時序表面模型的差異分析，並能評估是否有崩塌現象與土方量的即時計算。考慮供電，交通，幾何等因素，IP Camera 的選址原則與建置有以下幾點考量：

- 目標點與相機之距離在 500 公尺~1000 公尺間；
- 監測地點已有明顯崩塌跡象或在可預期的未來仍有機率發生崩塌；
- 監測點需與村落鄰近，並能提供電力與網路設備以進行即時資料傳輸；
- 兩台相機的架設須有 50~100 公尺長的基線距離。

於是根據上列條件，IP Camera 選擇小林國小對岸的大範圍崩塌作為監測目標，並架設在小林國小頂樓兩側約 50 公尺的基線進行長期監測，其位於新建小林村的對岸，如下圖 15(a)所示即為本研究中監測的大範圍崩塌地。(b)為監測目標與獻度山崩塌之相對位置，其中紅框即為監測目標，綠框為獻度山崩塌。



(a) 小林村對岸大範圍崩塌影像



(b) 小林村對岸大範圍崩塌與獻度山崩塌相對位置

圖 15、小林國小對岸之大範圍崩塌

IP Camera 已於 2013 年底完成架設並正常運作，至 2014 年 12 月間，約有一年的完整時間，其中台灣分別受到麥德姆颱風(7/21-7/23)與鳳凰颱風(9/19 與 9/22)的兩次侵襲，本文即針對麥德姆颱風後的地形變遷進行分析，而鳳凰颱風後本亦進行地形分析，卻發生相機故障問題，因而緊急帶回修理，且亦針對目標物的拍攝角度有所調整。因此本報告則針對兩點進行說明，第一為麥德姆颱風後的地形變遷，第二為目前新調整的變遷與說明。

### 3.3.1. 表面模型重建流程與方法

應用即時立體對影像求解數值表面模型的流程圖如圖 16 所示，其主要包含像機率定、方位解算、影像雲霧去除、核影像糾正、影像密匹配等步驟以產製數值表面模型，各步驟內容則介紹如下。

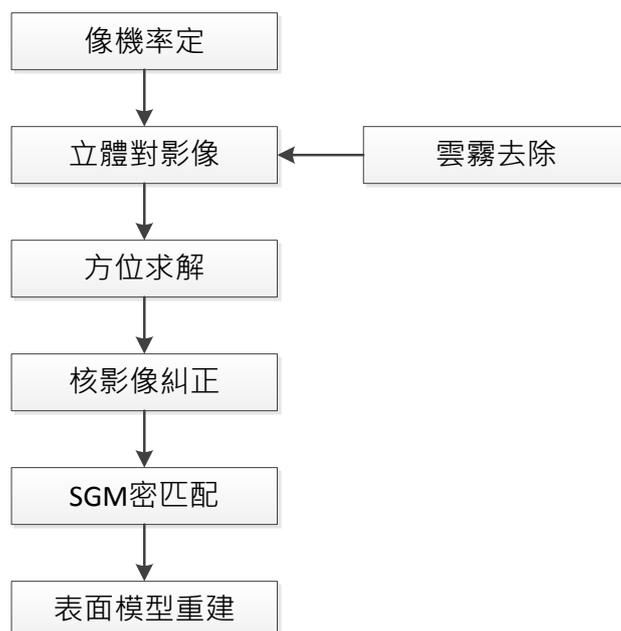


圖 16、表面模型重建流程圖

#### ● 透鏡畸變修正

由於相機無法避免因鏡頭所產生的畸變現象，因而需針對各相機進行像機率定，以求取包含相機焦距( $f$ )，像主點( $x_0, y_0$ )，輻射畸變參數( $K_1, K_2, K_3$ )及偏心輻

射參數( $P_1, P_2$ )之內方位參數。率定時，本研究藉由拍攝一佈滿人造標之旋轉圓盤 (Rau and Yeh, 2012)，以 30-45 度的傾斜角進行拍照，透過旋轉圓盤即可得到 60-90 度的相片交會幾何，經附加參數光束法平差模式以計算相機幾何畸變參數，示意圖如圖 17 所示。在式(1)中，其表示附加參數光束法平差的數學模型，其中  $(x, y)$  為影像之量測座標， $(x_0, y_0)$  為像主點座標， $r_{11} \sim r_{33}$  為相片之旋轉矩陣， $(X, Y, Z)$  為像點的物空間座標， $(X_o, Y_o, Z_o)$  為相片的投影中心，而  $(\Delta x, \Delta y)$  則為附加參數之改正量，其表示如式(2)。

$$x - x_0 + \Delta x = -f \frac{(X - X_o)r_{11} + (Y - Y_o)r_{12} + (Z - Z_o)r_{13}}{(X - X_o)r_{31} + (Y - Y_o)r_{32} + (Z - Z_o)r_{33}} \quad (1)$$

$$y - y_0 + \Delta y = -f \frac{(X - X_o)r_{21} + (Y - Y_o)r_{22} + (Z - Z_o)r_{23}}{(X - X_o)r_{31} + (Y - Y_o)r_{32} + (Z - Z_o)r_{33}}$$

$$\Delta x = (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6)(x - x_0) + P_1(2(x - x_0)^2 + r^2) + 2P_2(x - x_0)(y - y_0) \quad (2)$$

$$\Delta y = (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6)(y - y_0) + P_2(2(y - y_0)^2 + r^2) + 2P_1(x - x_0)(y - y_0)$$

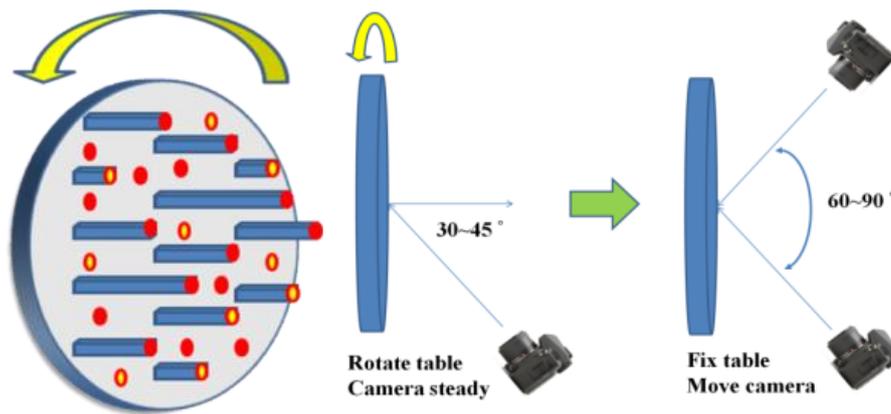


圖 17、 像機率定獲取多交會幾何影像示意圖

## ● 雲霧去除

山區時常有陰影、雲霧、霾氣等因水氣或灰塵而造成影像失真的現象，因此有必要針對原始影像進行雲霧之去除，不僅恢復色彩也增加對比度，進而提升影像匹配之可靠度。在本研究中採用暗通道雲霧去除法，將原始影像上的霾氣現象去除，而一組原始影像與雲霧去除後之影像展示於圖 18，可很明顯發現山區色彩飽和度與對比度皆有所提升。



(a)原始影像

(b)雲霧去除後之影像

圖 18、原始影像與雲霧去除影像之對照

## ● 方位解算

由於相機架設地點位於山區，且因岩層裸露，植被覆蓋等問題，難以利用人工方式進行共軛點的量測以解算相機方位。同時考慮匹配方法應具備高效率，抗雜訊等條件，本研究選用 Speed-Up Robust Feature (SURF) (Bay et al., 2008)法進行立體對影像之特徵匹配，透過光束法平差計算兩相機之相對方位。圖 19 即為應用 SURF 匹配法所萃取的影像特徵。

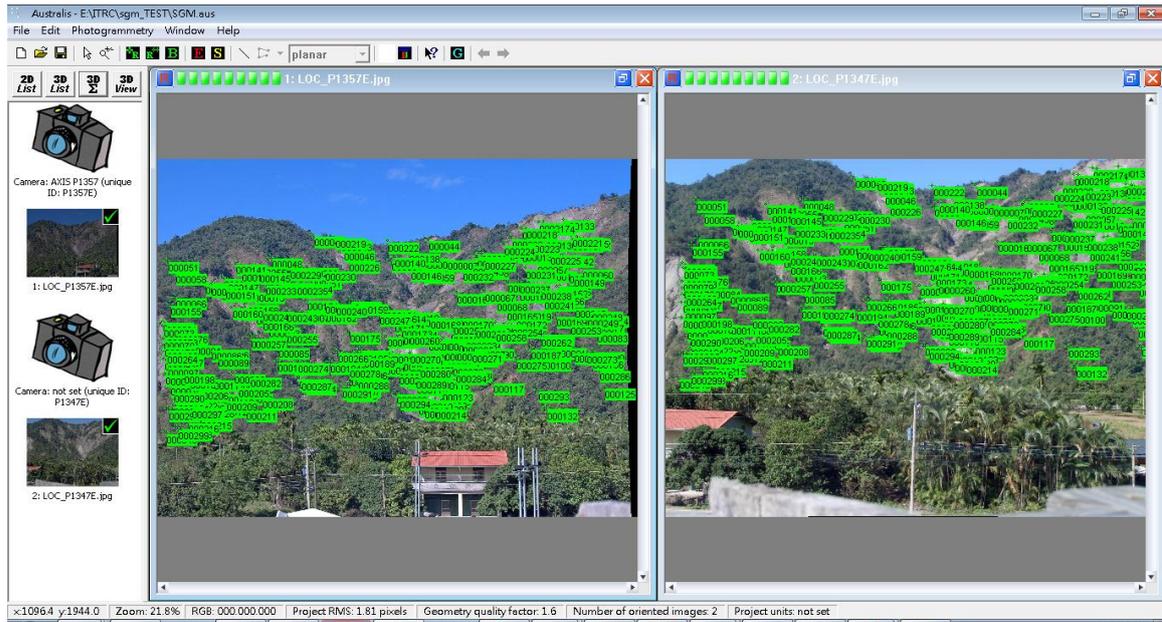


圖 19、以 SURF 法進行立體對影像特徵匹配之成果

### ● 核影像糾正

在影像內外方位皆已求解之後，便能將原始影像轉換至核影像空間，以減少匹配的搜尋空間並增加後續影像密匹配的效率。核影像具備以下的幾點特性：

- 像平面與相機基線平行；
- 核線彼此平行，且影像每一列即為一條核線；
- 影像不具  $y$  視差，僅保有  $x$  視差，故能重建立體視覺；
- 能協助影像匹配及搜尋，由二維空間降至一維。

圖 20 為核影像轉換之示意圖(Cho and Schenk, 1992)。首先由原始影像的旋轉角 $R(\omega, \phi, \kappa)$ 轉換為垂直影像，再透過基線之偏移量( $BX, BY, BZ$ )計算核影像旋轉矩陣 $R_N(\omega_N, \phi_N, \kappa_N)$ 。最後透過透視投影轉換，便能將原始影像轉換至核影像空間，式(4)即為轉換公式其中 $(x_n, y_n)$ 為核影像座標， $(x, y)$ 為原始影像座標。在圖 21 中則呈現一組原始影像與核影像之示意圖，可明顯發現原本具有  $y$  視差的共軛點，在經轉換後已不具  $y$  視差，如此進行密匹配時能增加執行效率與可靠性。

$$\kappa_N = \tan^{-1} \frac{BY}{BX} \quad \phi_N = \tan^{-1} \frac{BZ}{\sqrt{BX^2 + BY^2}} \quad \omega_N = (\omega' + \omega'')/2 \quad (3)$$

$$m_{3 \times 3} = R_N R^T$$

$$x_n = -f \frac{m_{11}x + m_{12}y - m_{13}f}{m_{31}x + m_{32}y - m_{33}f} \quad (4)$$

$$y_n = -f \frac{m_{21}x + m_{22}y - m_{23}f}{m_{31}x + m_{32}y - m_{33}f}$$

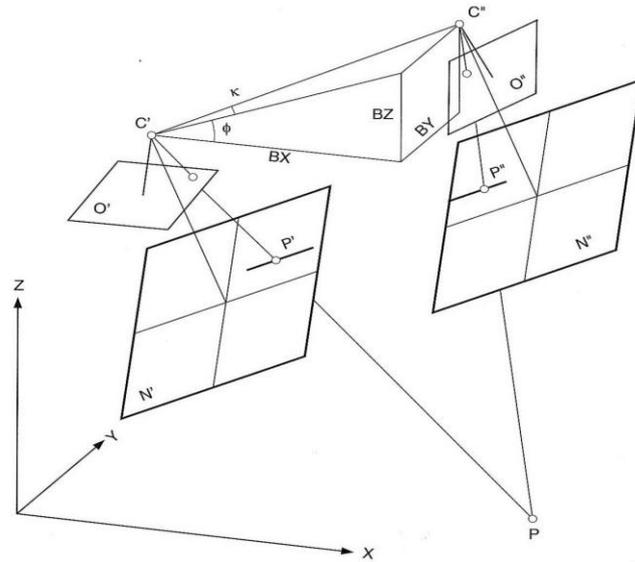
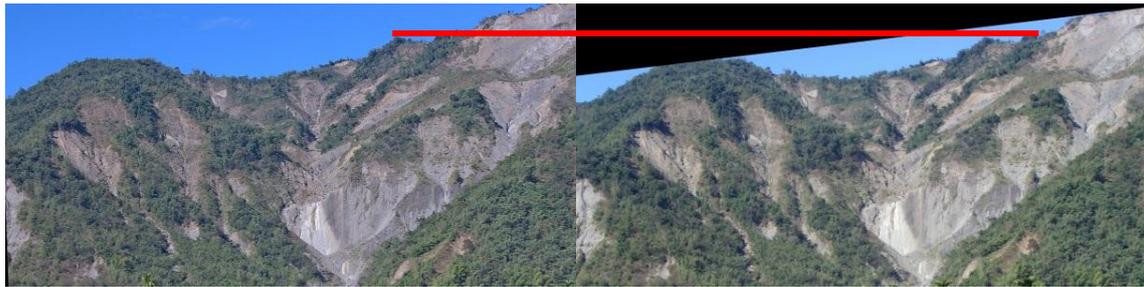


圖 20、核影像轉換示意圖



(a) 左像原始影像

(b) 右像原始影像



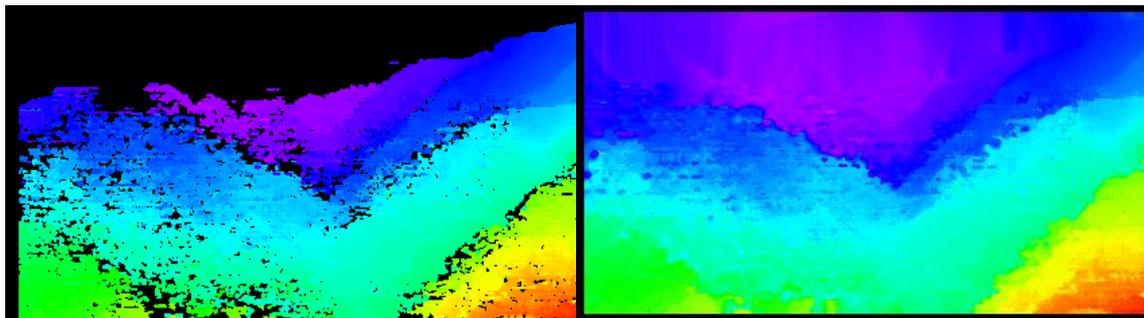
(c)左像之核影像

(d)右像之核影像

圖 21、 原始與核影像立體對

### ● 影像密匹配與數值表面模型重建

影像密匹配於核影像空間進行，因核影像有助於二維搜尋降低至一維搜尋以提升效率。在所選用的密匹配法，本研究採用 Semi-Global Matching (SGM)(Hirschmuller, 2008)法，其能快速可靠的獲得核影像的視差值。然而匹配得到的視差值仍然具有漏洞，如圖 22 (a)，因此則另外使用克利金內插法以獲得整幅的視差影像如圖 22 (b)。



(a)原始視差影像

(b)空間內差後之視差影像

圖 22、 原始視差與空間內差後之視差影像

由密匹配求得的視差圖，便能依式(5)在核影像空間重建三維視圖的深度影像(如圖 23)及上視圖(24)，其中  $B$  為兩台相機之基線長， $f$  為核影像之焦距，Disparity 則為匹配求得的視差。而不同時期的深度影像透過差異分析，便能了解是否有地形上的變化。

$$Z = \frac{B \times f}{Disparity}, \quad X = Z \times \frac{x_R}{f}, \quad Y = Z \times \frac{y_R}{f} \quad (5)$$

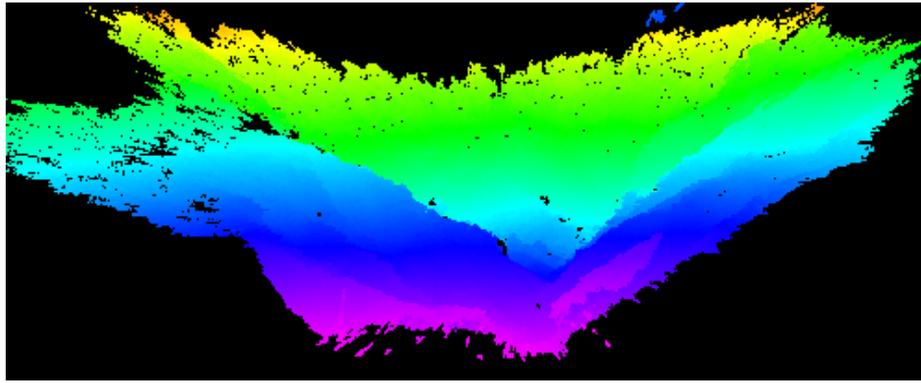


圖 23、三維視圖之深度影像

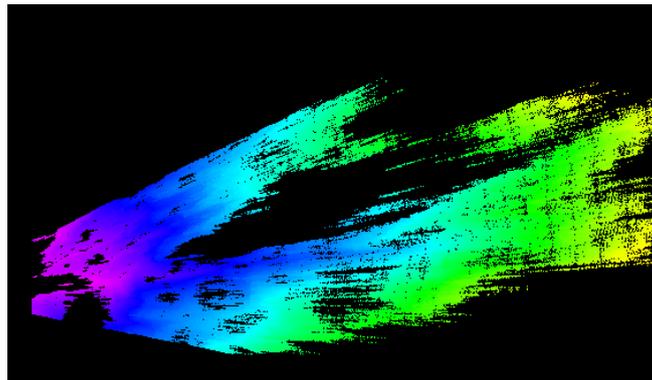


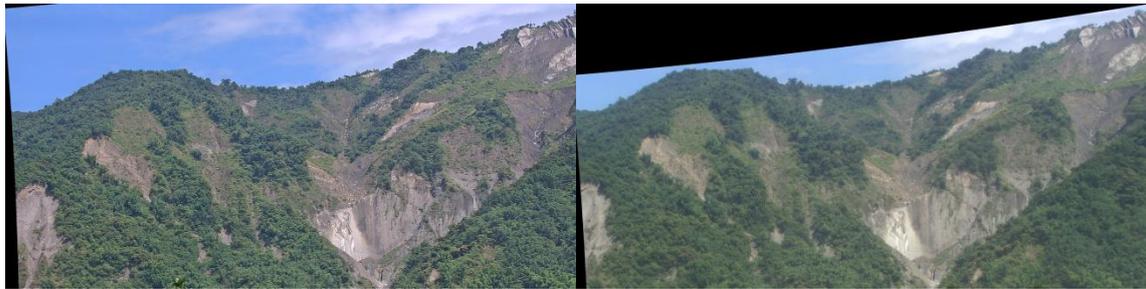
圖 24、上視圖

### 3.3.2. 地形變遷分析結果

在監測小林國小對岸崩塌地之地形變化及有無崩塌現象中，本研究以 20131220(冬)與 20140625 (夏)時隔半年的立體像對，利用本研究提及的方法重建兩時期的數值表面模型，並以差異分析比較是否有崩塌現象發生。圖 25 中展示兩時期的影像立體對，由影像的變化來看，可發現隔了半年植被生長更為茂密，而這也反映了台灣植物在季節上的變化。另一方面，單純就影像上來看該區域似乎無明顯崩塌現象，因而需透過重建數值表面模型進行差異分析。



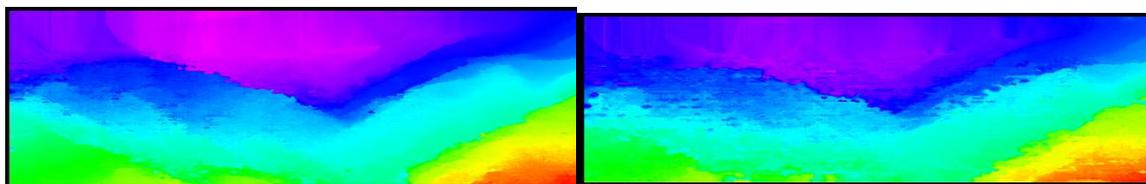
(a)20131220 核影像立體對



(b)20140625 核影像立體對

圖 25、 前後兩期之核影像立體對

透過密匹配得到兩期的視差圖如圖 26，兩者可說是無明顯變化，但在 20140625 的視差圖相對粗糙，由其差異亦反應出植被的生長變化。而由表面模型重建及進行差異分析後呈現於圖 27，在黑色邊界線之上部呈現許多雜亂現象，這主要是因該地區為天空，其視差值是透過內差得到，因此相當不可靠。而下半部則為主要目標物，可以看到地形上的變化主要是呈現正值，主要也是植被生長造成(紅色區塊)，而在幾個舊有崩塌區(紅圈內，與 25 (a)紅圈對應)，其地形變化約為零，可說是無崩塌現象之發生。



20131220 視差圖

20140625 視差圖

圖 26、 前後兩期之視差圖

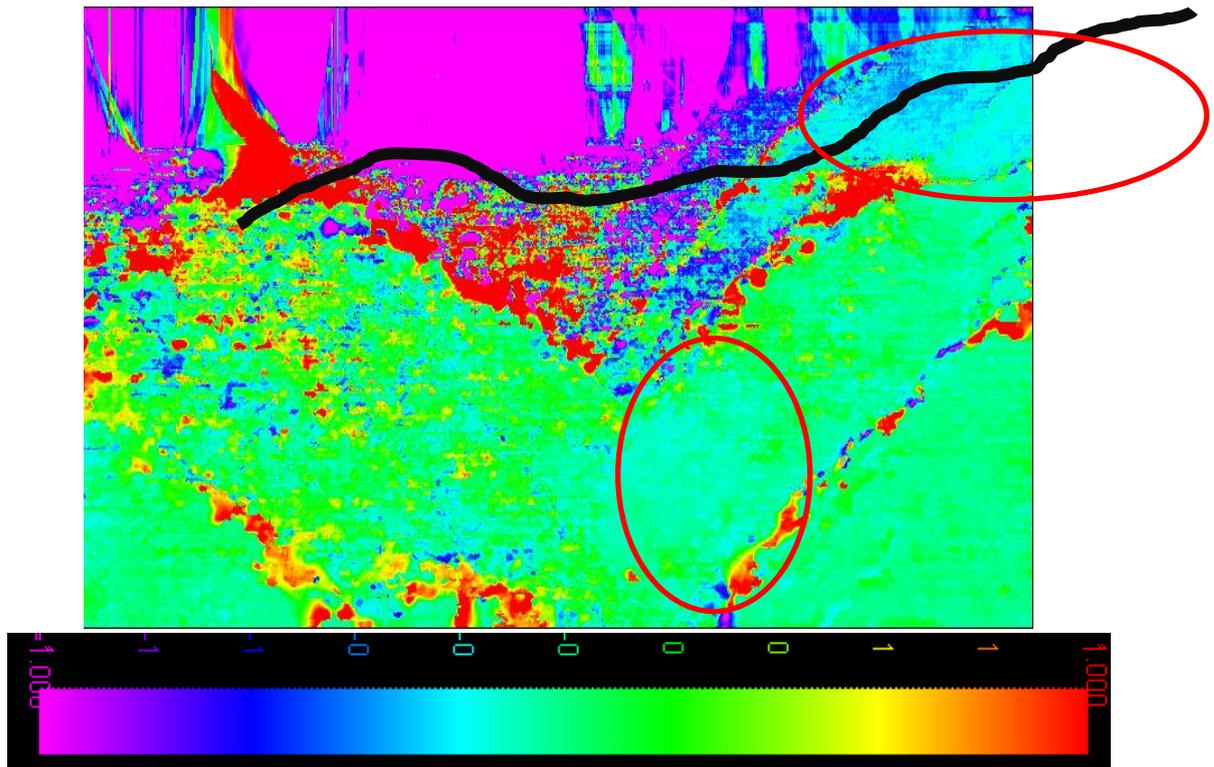


圖 27、崩塌地區地形變化

### 3.3.3. 近景觀測系統故障後更新維修與整合

#### A: 相機保養與維護

由於鳳凰颱風後 IP Camera 發生無法連線之情況，現場查看後推測是當機問題，又因為久未維護，則帶回來重新進行相機率定與簡易清潔。在本次的清潔中發現外置保護鏡頭之壓克力片有磨損，同時內部的鏡頭對焦環亦有鬆動現象，上述現象都將造成影像模糊，且對焦失真，將無法應用率定之內方位參數進行求解。因此在處理上，則將前置的壓克力板更換成玻璃片，鏡頭部分則重新對焦並以防水膠固定，並更新其內方位參數。如 5 所示即為更新後的相機內方位參數，由 Sigma0 來看，其精確度亦能在 0.25 像元以內，說明像機率定成果相當可靠。

表 5、更新後之相機內方位參數

	P1357E	P1347E
f (mm)	9.2561	9.7546
x <sub>p</sub> (mm)	0.1861	-0.1727
y <sub>p</sub> (mm)	-0.0486	0.0072
K1	4.2770e-003	3.7426e-003
K2	3.5299e-005	8.0765e-006
K3	-6.6288e-007	6.0788e-007
P1	9.2678e-005	1.8882e-004
P2	2.0905e-006	1.7112e-006
Sigma0 (Pixels)	0.19	0.24

### B: 相機安裝與視角變更

透過本次維修，亦與現場小林國小老師做簡單訪談，其生活經驗告知這兩次颱風侵襲不像往年有造成重大災害且地形上無明顯變化。因此本次重新安裝時，更改相機視角將本來監測的大規模崩塌向右移動，以監測如 28 新立體像對中紅框處的裸露區，且亦能涵蓋就有大範圍崩塌之範圍。



(a)左像(P1357E)

(b)右像(P1347E)

圖 28、新視角立體像對

### C: 建置高解析之地形地真資料

為了提供完善地形資料以建置地形地真，可以考量利用地面光達掃描、航空照片建置，或地面高解析度影像的拍攝來建置地形真值以進行成果精確度的分析。然而地面光達不僅設備昂貴，且距離、點雲密度無法符合該區域的大範圍掃描故不考慮，航空照片則因視角差異將使成果有不一致之問題。因此本研究則以手持式高解析度之單眼相機，透過多視角與多基線的拍攝，利用 Agisoft 軟體重建該地區的三維模型。如圖 29 為利用高解析度單眼相機重建之三維模型。圖 30 為三維模型之上視圖，因遮蔽關係造成之破洞亦與 24 相仿。

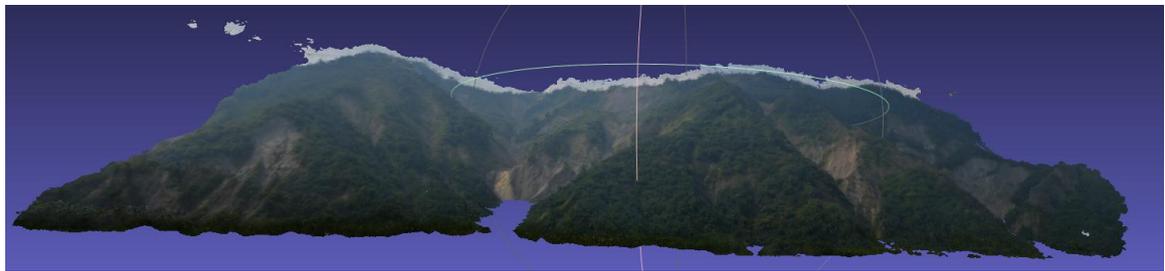


圖 29 大範圍崩塌之三維模型

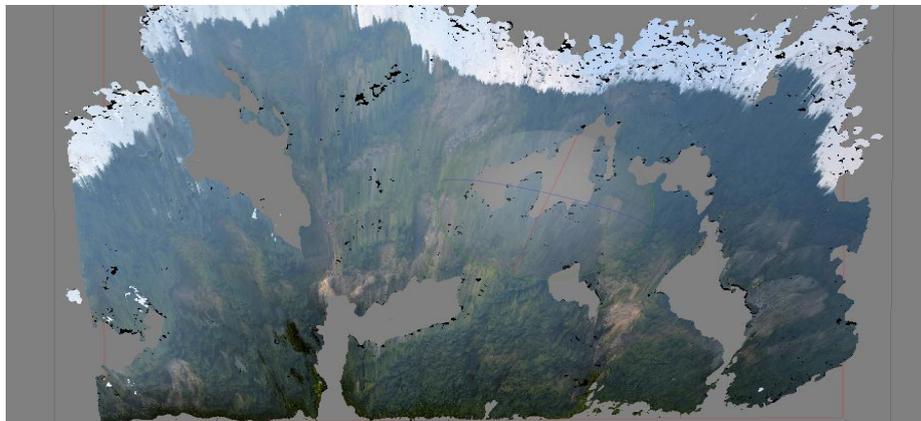


圖 30 三維模型上視圖

### D: 嵌入式系統整合

近景觀測系統觀測演算分析與嵌入式系統整合中，嵌入式系統採用 ARK-1120L 工業電腦模組，本工業電腦模組為國內研華電腦公司所開發，嵌入式系統採用 ARK-1120L 工業電腦模組為消耗功率低於 15 瓦，內建英特爾(N455\_1.666GHz)中央處理器，具有 2 組 RS232 與 4 組 USB 端口，DDR3 記憶體 2GB，並有

2.5 英吋之 STAA 硬碟，或固態硬碟皆可，採用 Linux 系統軟體，穩定性高，重量低於 1 公斤，用於戶外須加裝防熱裝置，以免造成記憶體失效；嵌入式系統採整組系統與兩部攝影機可以連結，完成耗電量低於 50 瓦之演算分析與嵌入式系統整合，近景觀測系統觀測演算分析與嵌入式系統整合如下圖 31 所示

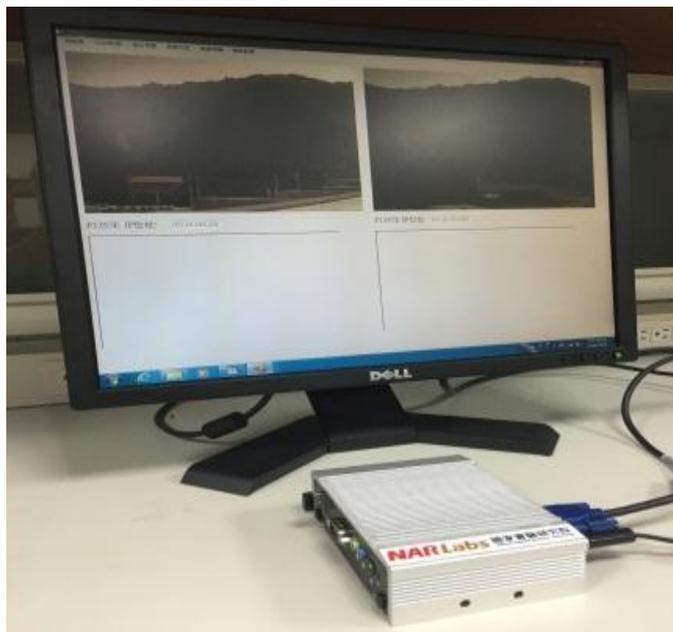


圖 31、近景觀測系統與嵌入式系統整合

#### 四、 結語

崩塌災害評估儀器與預警系統技術發展計畫中，財團法人國家實驗研究院儀器科技研究中心應災防中心緊急任務需求觀點，合作開發適用於多軸旋翼機之快速取像評估系統具有技術推廣價值，103 年計畫開發之系統於對地高度 600 公尺，解析度可優於 10 公分等級，在直徑 10 公里區域之災區觀測具有很大彈性、經濟性與機動性。此系統為台灣第一套自主研發系統，其衍生相關檢測專利技術，已技術推廣應用於日成航太公司之委製案，其公司正在發展類似 Google 街景背包概念的傾斜航拍系統，以用在仿真數碼城市之建置，其中多相機系統部分委託中心來設計與製作，我們採用 6 台 3600 萬畫數相機以多傾角類球體的方式設計，用來構成環景攝影，其中多相機同步性可達千分之一秒，並經由實驗室律定場律

定後，其鏡頭邊緣偏移量僅有 0.22pixel，符合廠商要求 0.25pixel 以下，其地面解析度亦可達 10 公分等級。此外，因近紅外部分可穿透薄雲霧，更適合用於災後第一時間天候不佳的狀態下進行勘災取像，目前技術已實際應用於濁水溪河道變遷觀測，嘉義竹崎山區地層滑動觀測等。藉由 103 年儀科中心於崩塌災害評估儀器與預警系統技術發展計畫成果，希望未來能夠再透過相關計畫持續成果精進與改良，發展更完善之本土化防災儀器與相關實際應用產品，以提昇台灣在防災與儀器產業之優勢。

## 五、 参考文献

- [1] Wei Ye; Heidemann, J.; Estrin, D., An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks, INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE , vol.3, no., pp. 1567- 1576 vol.3, 2002.
- [2] Tijs van Dam and Koen Langendoen. 2003. An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. In Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems (SenSys '03). ACM, New York, NY, USA, 171-180, 2003.
- [3] Michael Buettner, Gary V. Yee, Eric Anderson, and Richard Han. 2006. X-MAC: A Short Preamble MAC Protocol for Duty-Cycled Wireless Sensor Networks. In Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems (SenSys '06). ACM, New York, NY, USA, 307-320, 2006.
- [4] Sha Liu; Kai-Wei Fan; Sinha, P.; , CMAC: An Energy Efficient MAC Layer Protocol Using Convergent Packet Forwarding for Wireless Sensor Networks, Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, 2007. SECON '07. 4th Annual IEEE Communications Society Conference on , vol., no., pp.11-20, 18-21 June 2007.
- [5] Injong Rhee; Warrior, A.; Aia, M.; Jeongki Min; Sichitiu, M.L.; , Z-MAC: A Hybrid MAC for Wireless Sensor Networks, Networking, IEEE/ACM Transactions on , vol.16, no.3, pp.511-524, June 2008

- [6] Al-Karaki, J.N.; Kamal, A.E.; , Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey, *Wireless Communications, IEEE* , vol.11, no.6, pp. 6- 28, Dec. 2004
- [7] ZigBee Document 053474r17, ZigBee Pro, ZigBee Specification. ZigBee Alliance. 2008.
- [8] Huang-Chen Lee, "Towards a general wireless sensor network platform for outdoor environment monitoring," *Sensors*, 2012 IEEE , vol., no., pp.1,5, 28-31 Oct. 2012
- [9] D.S.J. De Couto, D. Aguayo, B.A. Chambers, R. Morris, Performance of multihop wireless networks: Shortest path is not enough, in: *Proc. of the First Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets-I)*, October 2002.
- [10] D.S.J. DeCouto, D. Aguayo, J. Bicket, R. Morris, A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing, in: *Proc. of the Ninth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, September 2003, pp. 134–146.
- [11] K.-W. Chin, J. Judge, A. Williams, R. Kermode, Implementation experience with MANET routing protocols, *SIG-COMM Comput. Commun. Rev. (CCR)* 32 (5) (2002) 49–59.
- [12] 「IMU 感測器整合於四波段同步雙相機取像系統設計」儀器科技研究中心技術報告，2013
- [13] 「四波段同步雙相機取像系統」第六屆 電子工程技術研討會，2013
- [15] 「具有 4 波段取像模組之旋翼無人飛行載台」民生電子科技研討會，2013
- [16] 「高解析度四波段同步雙相機取像系統」儀器科技研究中心技術報告，2013
- [17] 「空拍正射影像數值地形模型製作與 google earth 整合」儀器科技研究中心技術報告，2013
- [18] 「具有四波段取像模組之旋翼無人飛行載台」儀器科技研究中心研究報

告，2013

- [19] 「坡地崩塌偵測系統技術開發及研究」儀器科技研究中心技術報告，2013
- [20] 「坡地崩塌即時監測系統及其方法」民生電子科技研討會，2013
- [21] 「坡地崩塌即時監測系統及其方法」中華民國發明專利申請 102122191 號
- [22] 「坡地崩塌區之定點即時監測之技術與實驗系統雛型研究報告」儀器科技研究中心研究報告，2013