

無線感測器監測技術之開發

林宜清／中興大學土木工程學系教授

童建樺／弘光科技大學資訊工程學系副教授

李宗翰／台中教育大學資訊工程學系副教授

摘要

台灣山坡地災害與公路橋梁損傷事件頻傳，對相關預警監測工作有急迫需求，由於監測所需配置感測器數量多且分布廣，以傳統有線方式布設感測器會產生眾多缺失，無線分散式資料擷取系統將是發展主流，無線感測器（wireless sensor）更是此主流中最重要之成分，其組成可分為感測器、微處理器與無線傳輸器，電源供應必須自給自主，現階段大都採用小型電池加上節能設計，在每分鐘傳送一筆監測資料情況下，可以維持運作 6 個月已算難得。本文介紹自行開發設計之無線感測器，在兼顧節能與獵能情況下，電源模組可以讓所開發之無線感測器得於免換電池終身有效。後續無線感測器要應用在橋梁振動監測上，只需搭配有足夠記憶體之微控制器與誤差在微秒內之同步量測機制即可。

前言

台灣處在歐亞板塊及菲律賓海板塊的交界帶，地震頻繁，又加上河川及地勢陡峭，於夏季時雨量豐沛及颱風侵襲，導致邊坡災害與公路橋梁損傷事件頻傳，因此在土木工程界一直對山坡地與橋梁結構安全監測工作有殷切之需求。

近幾年結構健康監測（Structural Health Monitoring，簡稱 SHM）為相當熱門之議題，SHM 乃在現場結構上配置感測器，監測結構對外在刺激所產生之響應，經由結構系統特性分析，達到檢測結構損傷或劣化的目的。結構健康監測系統一般包括感測

器系統、資料擷取系統、監控中心以及訊號診斷識別技術。

不管是山坡地或是橋梁安全監測，都有一個共通點就是感測器配置數量多，且分布範圍寬廣，以傳統方法採用有線布設感測器將有下列重大缺失^[1]：(1) 訊號線與保護管路布設成本過高，有時候可佔儀器安裝總費用之 50%^[2]；(2) 現場感測器安裝費時費力效率很低；(3) 感測器與 data logger 間之訊號線被干擾與破壞風險增加；(4) 未來擴充與調整缺乏彈性。相較於傳統上採用有線的方式布設感測器，無線感測器因其有安裝方便、維護成本低和部署靈活等特點，非常適合於山坡地與橋梁監測領域，故基於無線感測器網路（Wireless Sensor Network, WSN）的監測系統已經成為近年來國內外學術界和工程界關注的焦點。

現今錢幣大小之微處理器可以具備有運算、儲存與通訊功能，搭配微機電感測器（MEMS sensor）就可以量測加速度、傾斜角度、應變、力量、雨量、溫度…各種物理量，若將此等感測器無線化，則此等無線感測器將有安裝容易且成本低之特點，可增加布設密度與提高資料收集之空間解析度，進而提升坡地災害與橋梁結構損傷之評估品質。但是無線感測器之開發遇到最大的挑戰是電源供應問題，目前以採用小電池供電方式最為普遍，不過大都只能維持幾天至幾個月，取決於感測器與資料無線傳輸之節能設計。

本文將針對無線感測器監測技術之開發進行介紹，開發中需面臨之三大議題為：如何架構資料擷取系統、如何選用感測器類型與如何供電給無線感測器，本文後續就針對此三大議題進行分析探討。

資料擷取系統架構與遠距離無線資料傳輸系統

資料擷取系統架構

原則上感測器之訊號輸出應該都是屬於連續的類比訊號，但是類比訊號不利於後續資料儲存、分析與傳送之用，因此都會進行類比／數位轉換之取樣 (sampling)。市售感測器分二類，第一類為數位輸出之感測器，其內部已配備類比／數位轉換器 (Analog-to-Digital Converter, ADC)，第二類為類比輸出之感測器，其需經由外接資料記錄器 (data logger) 來將類比訊號轉換為數位訊號。

類比訊號在傳送過程將會有明顯訊號衰減與雜訊干擾等問題，然過去受限於市售類比／數位轉換器體積偏大與價格昂貴，常將類比／數位訊號轉換動作整合放在多頻道之資料記錄器來執行，以致於感測器與資料記錄器之間常需要配置甚多獨立之電纜線來作聯結，形成了傳統常見的集中式資料擷取系統架構，此等集中式資料擷取系統有如下之嚴重缺失：(1) 大量佈線導致成本增加與保護困難；(2) 電纜線長度過長引起之訊號衰減與干擾；(3) 不利於未來系統之擴充。

近年來資料擷取系統已逐漸把大型的集中式系

統分解成模組化的分散式系統，建立更小更便宜的子系統，就算其中一個系統故障，也可以輕鬆替換或維護。圖 1 為分散式資料擷取系統之示意圖，各子系統可以由一條通訊線 (例如 RS485) 串接不同數量之感測器連接到主機 (central unit)，主機經通訊線提供電源給各感測器，各感測器藉由同一條通訊線將監測資料傳回主機，再由主機透過資料傳輸單元以無線或有線方式將監測資料傳送至遠端伺服器。

相較於集中式資料擷取系統，分散式架構可提供多種優勢^[3]包括：(1) 提高量測準確度，因為分散式系統之感測器與類比／數位轉換器之接線相當短，能夠避免雜訊、干擾、訊號損耗等情況；(2) 分散式架構可透過單一通訊線連接至分散式子系統，不必配置數百條感測器接線，有助於減少接線成本；(3) 具有靈活的擴充與調整功能；(4) 維修成本低；(5) 分散式資料擷取系統可配備內建運算分析用智慧型功能，使感測器訊號上傳到中央系統之前先縮減資料，只剩下關鍵數值。

雖然有線的分散式資料擷取系統已經遠比集中式更具優點，除了大幅減少佈線數量外，更重要的是各感測器之監測資料皆已經數位化，資料傳送過程都是數位資料，可避免訊號衰減與雜訊干擾之問題。既然分散式資料擷取系統已經屬於數位資料之傳送，再加

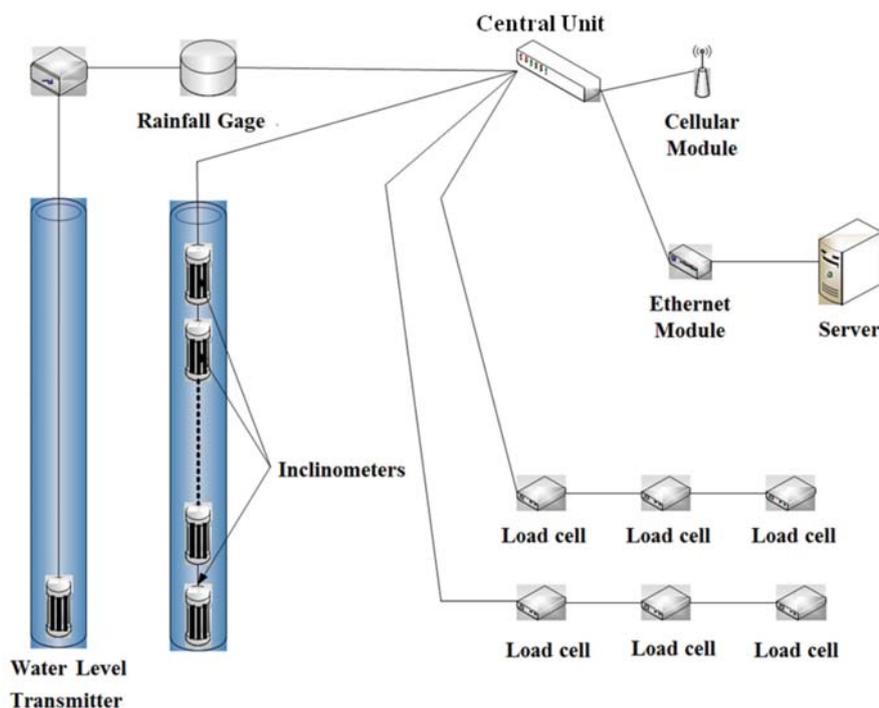


圖 1 分散式資料擷取系統示意圖

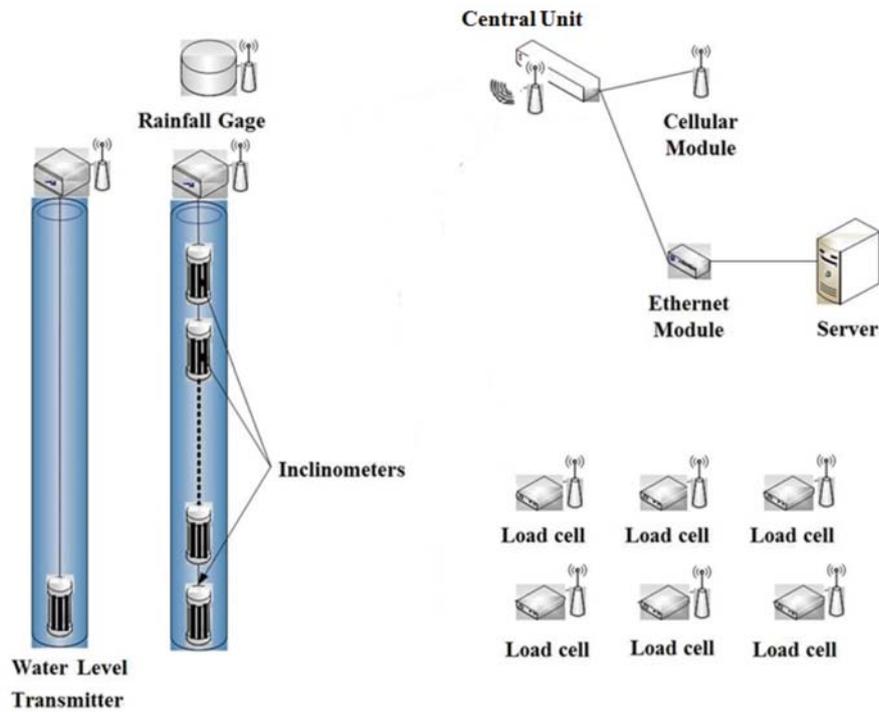


圖 2 無線分散式資料擷取系統示意圖

上無線通訊技術進步相當快，使得山坡地與橋梁監測系統有無線化之趨勢。

圖 2 為無線分散式資料擷取系統之示意圖，各子系統感測器與主機（central unit）之間都採無線通訊技術，不再配置通訊線，使得無線分散式資料擷取系統在感測器布設施工與維修上更具便利性，無線感測器（wireless sensor）是無線分散式資料擷取系統之最重要成分，無線感測器之組成可分為感測器、微處理器與無線傳輸器三個基本單元如圖 3 所示，而這三個基本單元都需要電源供應，由於無線化以後電源就無法由主機端提供，必須自給自主，現階段大都採用小型電池，其可以供電時間長短取決於感測器、微處理器與無線傳輸器之節能設計，目前較佳節能設計在每分鐘傳送一筆監測資料情況下，可以維持運作 6 個月已算不錯了，但是還是要面臨更換電池之不方便性，因此無線感測器之電源供應必須兼顧節能與獵能，才可以達到最佳的免更換境界。

考量現場條件，為能維護無線感測器之資料無線傳輸品質與效率，網絡（network）之配置通常可分為 single-hop 與 multi-hop 二類，若現場監測條件單純且感測器種類與部署數量不多情況下，則可考慮 single-hop 之簡易網絡布設即可，但若遇到感測器部署種類與數量偏多情下，則可考慮採用 multi-hop 之網絡布設。

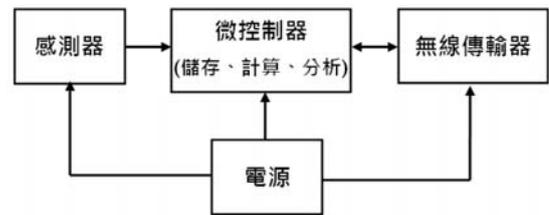


圖 3 無線感測器之組成

遠距離無線資料傳輸系統

感測器與資料擷取系統可以將現場監測到之資料彙整到主機，為了達到自動化與監測預警功能，必須將主機收到之監測資料第一時間利用遠距離無線資料傳輸系統傳送到遠端伺服器進行監控。物聯網（Internet of Things, IoT）與霧端運算（Fog Computing）技術很適合於坡地與橋梁安全監測上作為遠距離無線資料傳輸用。

物聯網在 2005 年由國際電信聯盟所發表的網際網路報告為物聯網作了以下定義：今日網路化的時代將邁入新的階段，以往人們能在任何時間及任何地點透過網路與人互相聯繫，並與物件進行資訊的交換，同樣的任何物件之間可藉由網運算建構出資訊互通平台。

霧端運算與雲端運算採用不同的策略，因雲端運算採用集中式管理，除需配備有運算能力強大之叢集

式主機外，還需要高速的網路頻寬做為資料流的分享與傳遞。然而透過雲端到現地監測設備的資料傳輸過程而言，現在的高速行動網路，如 3G (HSPA) 及 4G (LTE) 的網路頻寬仍有待加強。在現場應用上，霧端運算無須配備強大的運算處理設備，取而代之的是採用具有低耗電特性以及低運算能力的嵌入式系統，作為處理現地的資料收集、分析、儲存與傳輸等工作。

遠距離無線資料傳輸系統可以細分為物聯網霧端運算處理平台、遠距離無線傳輸發送器以及物聯網圖形化監控系統等三項元件，嵌入式物聯網霧端運算處理平台運行嵌入式 Linux 系統，並結合物聯網與霧端運算技術，本元件除本身能提供無線區域網路、高速乙太網路外，可透過遠距離無線傳輸發送器，依照現地無線通訊品質，選擇適合的 3G 或是 4G 網路來提升物聯網連線品質，並將 Live Beacon 行動網路之上下行頻寬監測與轉換傳輸數據量等資訊回報給物聯網圖形化監控系統，以確保資料遠距離無線傳輸系統之正常運行。

另外，當無線行動網路服務供應商，如中華電信、遠傳電信或台灣大哥大電信，僅提供內部私有網路位置 (Private IP address) 時，嵌入式物聯網霧端運算處理平台將可改以自建的資訊流通道 (Data Flow Tunnel)，作為現地資料無線傳輸單元與外部網際網路雙向傳輸之介面如圖 4 所示，該雙向傳輸功能可以執行遠端重開機以及現場監測儀器之控管。

感測器類型與比較

目前應用最為廣泛的感測器仍屬電子式感測器，電子式感測器之基本偵測方法有：(1) 電容式 (利用電

容量的改變來偵測激源變化)；(2) 電阻式 (利用電阻值之改變)；(3) 電感式 (利用線圈電流改變產生感應電壓)；(4) 磁阻式 (永久磁鐵或電磁線圈之磁通量的改變被磁阻干擾而改變通過之路徑)；(5) 光傳導式 (利用相對運動來感應電壓量測電壓變化)；(6) 磁抗式 (固態材料受光照射其內部電阻值會與照度成正比)；(7) 光伏特式 (兩種不同材料做成接合面受光照產生電壓)；(8) 電位計式 (透過可變電阻分壓值取得激源變化)；(9) 壓電式 (石英晶體被擠壓形狀改變產生電壓)；(10) 應變計式 (導體受力量改變幾何形狀產生電阻值改變)；(11) 熱電式 (利用熱產生電阻值改變)；(12) 磁致伸縮式 (利用磁致伸縮材料之波動效應)；(13) 振弦式 (利用弦線震盪頻率)；… 陸續開發中。

本文以土木結構最常應用之應變量測來說明感測器類型與比較其優缺點。目前應變量測最主要的三種量測方法為電子箔片 (Electrical foil)、電子振弦 (Electrical vibrating wire) 與光纖光柵 (Fiber Bragg Grating, FBG)，其原理簡要說明如下：

金屬箔片電阻式應變計，如圖 5(a) 所示，是經由金屬導體長度變化與電子電阻之間的關係測得應變。要精確量測金屬導體電阻的微小變化，必須透過常用的 Wheatstone 電橋與訊號放大器 (OP) 來完成。金屬箔片應變規感測器的優點是精度高、測量範圍廣、壽命長、結構簡單、頻率響應特性好，能在惡劣條件下工作，易於實現小型化、整體化和品種多樣化。但是此種金屬箔片應變規在早期遷就於 data logger 價格昂貴，皆採用集中式多頻道之資料擷取系統，在現場就要布設很多長短不一的訊號線，也就產生被人詬病的訊號衰減與電磁波干擾問題。但是在近幾年電子產業技術不斷提升，資料擷取架構已經趨向分散式，在感測器端已經進行類比/數位轉換，故已能夠克服訊號衰減與電磁波干擾等問題。

振弦式應變計，如圖 5(b) 所示，乃利用弦線震盪頻率來推求得到弦線之張力與對應之應變，激發弦線之震盪方式為導入驅動電流穿過弦線附近的線圈產生磁場，並因其極性而有排斥或吸引弦線之作用，一旦弦線震盪達穩定狀態，

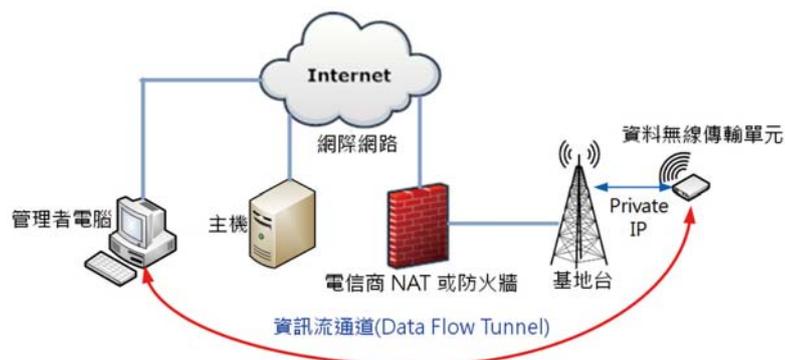


圖 4 透過資訊流通道與資料無線傳輸單元進行雙向傳輸監測系統之架構

再透過同一線圈量測其震盪頻率。振弦式應變計由於是量測弦線之振動頻率，在集中式資料擷取系統中可以比較不受訊號衰減與電磁波之干擾。

光纖光柵應變計，如圖 5(c) 所示，是利用光線進入光纖光柵感測器時，即由光柵屬性而反射特定波長。在光纖光柵伸展的同時，這些光柵之間間隙亦隨著變大，進而改變反射光的波長，由測得反射光之波長漂移轉換為應變值。與前二款電子式應變計比較，光纖光柵屬於光學感測系統並未使用電子導體可以不受電磁波干擾之影響，另外，FBG 光學感測是透過「頻率」而非「振幅」，不需訊號處理亦可達極長的距離，為其二大優點。

上述三種常見應變計之發展歷史，以電阻式變計最早被提出已經有超過 60 年之應用，但因早期受限於類比／數位轉換器之體積與價格昂貴，大都採用集中式資料擷取系統，即俗稱之多頻道 data logger，造成大量佈線，並延伸出訊號衰減與電磁波干擾問題；於是約 30 年前有振弦式應變計之提出，其輸出訊號為頻率，抗干擾能力強、對電纜規格要求低，可以進行遠距離之傳輸；接著近 10 年來隨著光纖光柵應變量測技術的精進與製作成本降低，使得光纖光柵技術之應用開始快速成長。雖然振弦式與光纖光柵應變計都有很好的抗電磁波干擾能力，但是他們二者在結構動態量

測上與感測器無線化之發展就比較緩慢，反觀金屬箔片電阻式應變計之動態量測可輕鬆達到 1 kHz 之動態量測範圍，又加上類比／數位轉換器之微小化與低單價，使得電阻式應變計可輕易的以低成本方式完成無線分散式資料擷取系統，也就解決了其在早期集中式資料擷取系統所令人詬病之訊號衰減與電磁波干擾問題，因此在無線感測器之開發上就佔有優勢。表 1 為三種常見應變計之綜合比較，由表中可以看出電阻式應變計搭配無線分散式資料擷取系統有相對較佳之綜合優勢，尤其是在佈線施工性、動態量測與成本上之優勢更加明顯。

無線感測器之開發

從前面之討論，可以確定資料擷取系統已經由集中式往分散式發展，各感測器皆有完成類比訊號轉換成數位訊號，如此後續之數位訊號傳輸可以維持高訊號品質，也很有彈性，可以選擇有線或無線方式來進行數位訊號之傳輸，當然無線傳輸絕對優於有線傳輸，因其有安裝方便、維護成本低和部署靈活等特點，非常適合於山坡地與橋梁監測領域，故基於無線感測器網路 (Wireless Sensor Network, WSN) 的監測系統已經成為主流。但是開發無線感測器所要面臨之

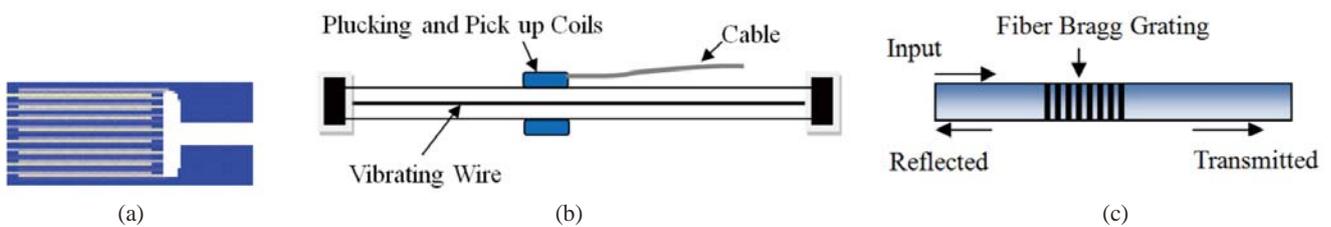


圖 5 常見的三種應變計：(a) 電阻式；(b) 振弦式；(c) 光纖光柵

表 1 三種常見應變計之綜合比較

	電阻式應變計		振弦式應變計	光纖光柵應變計
	集中式資料擷取系統	無線分散式資料擷取系統		
佈線施工性	差	優	差	普通
訊號品質	差	優	佳	優
動態量測	優	優	普通	普通
溫度補償	佳	佳	佳	佳
電磁波干擾影響	大	小	小	無
長距離傳輸	差	佳	尚可	優
成本 (含佈線)	高	低	中	高
維修難易度	難	易	中	高

主要問題有：(1) 電源供應問題；(2) 連續動態資料傳輸中遺失（掉包或碰撞）問題；(3) 各感測器時間同步問題；(4) 高取樣速率 100 Hz 產生大量資料之處理。

一般而言，要開發無線感測器有二種方式，第一種為直接購買已架構好的商用開發平台（mote），例如 UC Berkeley 開發已商品化之 Tmote Sky 或 U of Michigan Lynch 教授實驗室之 wireless sensor nodes 或可以由網路搜尋到甚多 wireless sensor nodes，當然選購商用無線感測器可以縮短開發時間，但是缺乏彈性與擴充性，也很難解決既存電源供應問題。第二種則為自行開發，雖然所需開發時間較長，不過可以滿足客製化之各種功能需求，下面即介紹自行開發無線感測器進行介紹，最大訴求即要解決上述無線感測器開發所要面臨之主要問題。

為了讓感測器之資料擷取更具相容性與擴充性，自行開發多功能微型智慧節點（smart node）如圖 6 所示，smart node 為混合訊號微控制器與訊號擷取及數位串列通訊電路模組所組成的智慧型工業感測器訊號擷取節點，其可接受工業標準感測器常用的類比或數位訊號，例如電壓輸出、4-20 mA 電流輸出、橋式電路輸出、RS485、RS422 等，並將上述訊號轉換為數位通訊封包格式，傳給協調器（coordinator）彙整後輸出至網路、PC 或 data logger。由於封包內含節點 ID、感測器型別及對應物理量等資訊，所以在同一通訊匯流排上，可串接大量不同類型與不同廠牌的感測器，其數位化的資訊可經由 coordinator 匯整後紀錄或傳出。監測系統基於本架構，可大幅降低跨廠牌及多類別的感測器整合複雜度，並具備高彈性的感測節點擴充功能。



圖 6 智慧節點（smart node）其尺寸為 74 × 19 mm



圖 7 訊號放大與類比數位轉換器（OP+AD）

利用圖 6 之智慧節點（smart node）即可對數位感測器直接進行資料擷取，若搭配訊號放大器（OP）與類比數位轉換器（AD）如圖 7 所示，即可對微小訊號輸出之感測器例如電阻式荷重計進行資料擷取，採用之類比數位轉換器（AD）具有 100 kHz 取樣速率及 16 bit 解析度，訊號放大器之輸出電壓為 0-5 V。

無線傾斜計之開發

將 smart node 與傾斜感應晶片結合（如圖 8(a) 所示）可構成結構物傾斜量測之基本單元，再加上圖 8(b) 所示 smart node 之電源供應與資料輸出電路板與圖 8(c) 所示之無線傳輸發送器，即完成結構物傾斜量測用之無

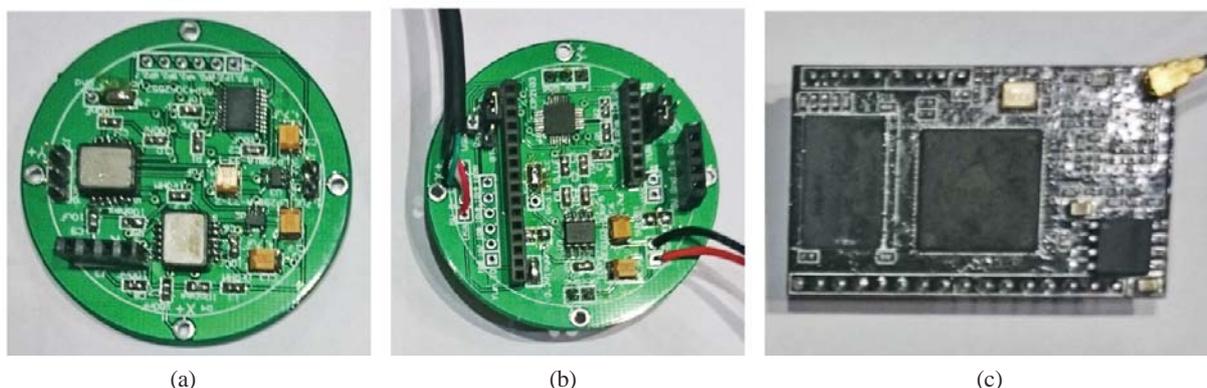


圖 8 無線傾斜計之組成單元：(a) smart node + 傾斜感應晶片；(b) 電源供應與資料輸出電路板；(c) 無線傳輸發送器

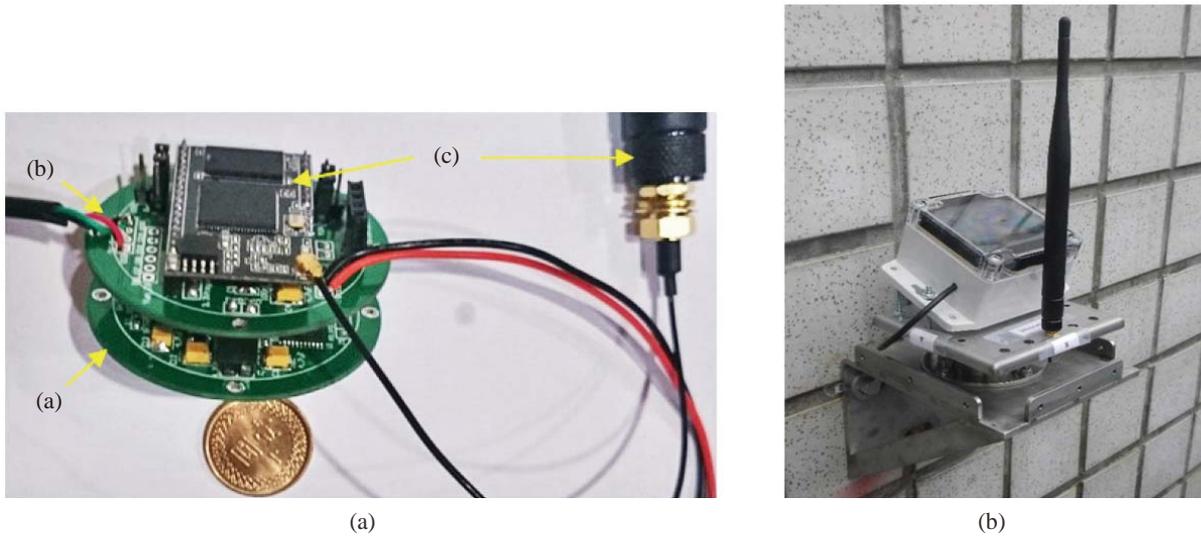


圖 9 無線傾斜計：(a) 電路組裝圖：(b) 現場安裝圖

線傾斜計原型電路板組合如圖 9(a) 所示，圖 9(b) 則為封裝完成後現場安裝圖，現場已將電源模組安裝在傾斜計上方，該電源模組採用 0.5W 之太陽能充電板（尺寸 55 × 70 mm），電源模組在太陽光照射下只要充電 5 分鐘即可充飽，既使在陰天也只要幾個小時就可充飽，在充飽情況下，該電源模組可以提供無線感測器每一分鐘丟一筆資料連續運作 5 天，換句話說，電源模組不管是晴天陰天，都可讓無線感測器持續運作，故所開發之無線感測器得於免換電池終身有效，當然此免換電池技術乃在各單元電路設計時已考量調整到最佳之省電模式才能達到。圖 10 為無線傾斜計之現場監測資料，由監測資料可以清楚看到 MEMS 傾斜計之輸出值會受溫度變化所影響，可以利用傾斜計溫度補償功能進行修正，而得到消除溫度影響之監測結果。

無線荷重計之開發

地錨常為邊坡防護工程或開挖支撐工程使用的工法之一，但因其結構體埋置於地層中，無法進行維護保養，又因地下水及地質環境之多重因素影響下，可能發生錨頭銹蝕／脫、錨碇水漿開、鋼絞線銹蝕／斷等破壞，在國道三號七堵段發生大規模崩塌事故後，引起國內工程界對地錨預力監測之重視。

安裝荷重計做為地錨預力監測可以說是最直接的監測方法，無線荷重計之開發只要利用圖 6 之 smart node、圖 7 之訊號放大與類比數位轉換器與圖 8(c) 無

線傳輸發送器，再搭配市售電阻式荷重計即可完成如圖 11 所示之無線荷重計，圖 12 為無線荷重計之現場監測資料，荷重計內部配置虛（Dummy）應變計來提供溫度補償，因此監測結果不會受日夜溫差所影響。

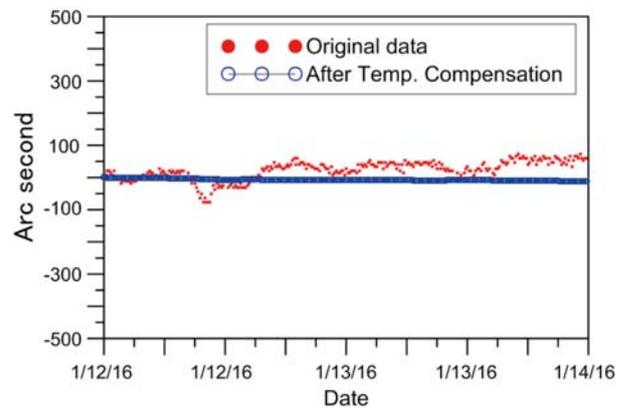


圖 10 無線傾斜計監測資料歷時圖



圖 11 無線荷重計現場安裝圖

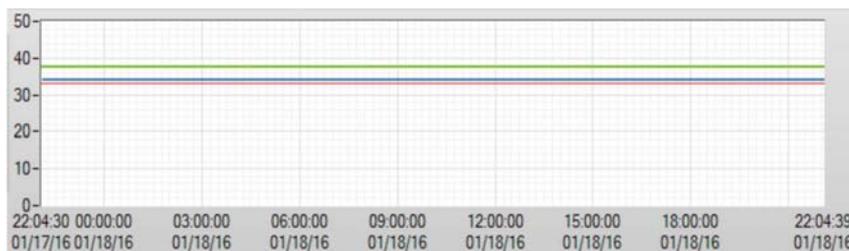


圖 12 荷重計監測資料歷時圖

無線感測器開發之關鍵議題

前二節展示的無線傾斜計與無線荷重計只是無線感測器開發之範例，其節點間之無線傳輸距離可達 500 公尺，同樣的開發架構後續可以擴充至無線加速度計、無線位移計、無線沈陷計、無線索力計、無線水壓計…等。其中無線加速度計在結構健康監測上之應用扮演非常重要角色，大都應用於振動監測，其必須能連續記錄與傳輸振動資料，故要藉助高速網路傳輸能力或搭配有足夠記憶體之微控制器，現場量測之取樣頻率假如為 100 Hz，單筆資料以 2 bytes 擷取，對三軸加速度計而言，一秒將產生 600 Bytes 資料量，一分鐘所需記憶體為 36 kB，此連續記錄長度，可得頻率解析度為 0.0167 Hz。目前開發之無線感測器設定之資料擷取頻率為平時每 10 分鐘監測一次，但在地震與颱風作用下，當無線加速度計振動幅度超過某一門檻值時，系統將自行啟動監測功能，以取得第一時間的現場資料，可作為安全預警機制之用。

雖然已開發免換電池終身有效之無線感測器電源模組，但是從結構振動監測角度來看，無線感測器所要面臨問題還有：(1) 連續動態資料傳輸中遺失（掉包或碰撞）問題；(2) 各感測器時間同步問題；(3) 高取樣速率 100 Hz 產生大量資料之處理。在無線訊號傳輸資料封包漏失避免機制部分，由於各感測節點內建充足的記憶緩衝空間，類比一數位轉換後的資料可佔存於該記憶體中，交由無線傳輸模組分批傳送，可避免因緩衝不足造成的資料漏失。另外，在無線傳輸協定部分，可藉由收發兩端的交握（hand shaking）機制，確保資料完整送達。至於無線感測節點間的時間同步，可藉由節點內建精準 RTC（Real Time Clock）與時間同步訊號廣播之搭配，實現微秒等級的時間同步機制。無線訊號接收節點定時向各節點廣播時間同步封包，各感測節點在收到該封包後，據此作為內建 RTC 時間

基準之校正。因此，後端訊號處理系統將可藉由各感測節點傳回之訊號與校正參數，精準還原所有訊號的時間相對原點。最後有關高取樣速率 100 Hz 產生大量資料之處理，最有效的方法應該是在無線感測器內部建置邏輯運算處理器而成智慧無線感測器，例如可將振動量測資料進行快速富利葉轉換（FFT）與尖峰頻率判讀，最後僅傳送運算處理後之特徵數值，即可大量降低資料量之傳輸與儲存。

結語

本文介紹自行開發之無線感測器，為未來山坡地或土木大型結構相關安全監測提供容易安裝、增加布設密度與提高資料收集空間解析度之良好解決方案，進而可提升坡地災害與橋梁結構損傷之評估品質。所開發之無線感測器已完全解決電源供應問題，可以應用在每隔 10 分鐘傳送一次資料的山坡地滑動或結構健康監測上。無線感測器若要運用到布設密集的橋梁振動監測上，則需搭配有足夠記憶體之微控制器與誤差在微秒內之同步量測機制，最後可以朝無線感測器內建邏輯運算處理器而成智慧無線感測器方向發展，以解決布設大量感測器所產生之振動量測巨大數據量的問題。

參考文獻

1. G.D. Zhou¹ and T.H. Yi, "Recent Developments on Wireless Sensor Networks Technology for Bridge Health Monitoring," *Mathematical Problems in Engineering*, Volume 2013, Article ID 947867, 33 pages, <http://www.hindawi.com/journals/mpe/2013/947867/>
2. M. J. Chae, H. S. Yoo, J.Y. Kim, and M. Y. Cho, "Development of a wireless sensor network system for suspension bridge health monitoring," *Automation in Construction*, vol. 21, no. 1, pp. 237–252, 2012.
3. 小樵, 「資料擷取系統架構的變化」, 電子工程專輯網站 (www.eettaiwan.com), 2015 年。