

無線感測網路技術進行森林氣溫與 相對濕度觀測之先驅實驗

賴彥任¹ 邱祈榮² 魏聰輝¹ 沈介文¹ 林清儒²

¹ 臺灣大學實驗林管理處

² 臺灣大學森林環境暨資源學系

(中華民國九十五年七月三十日收稿；中華民國九十六年五月七日定稿)

摘 要

綜觀天氣之氣象測站的環境空曠度需求，無法適用於森林之微氣象觀測。本研究嘗試利用 30 個 Tmote Sky 無線感測網路系統，於溪頭森林生態自然教育園區進行林外與林內氣溫與相對濕度之微氣象監測先驅性實驗。實驗結果顯示，無線感測網路系統的概念，能監測不同林分與空曠地之微氣象氣溫與相對濕度時序變化特徵，滿足森林氣象與生態觀測的結合需求。現有 Tmote Sky 系統的缺點仍有 2 項：(1) Tmote Sky 之溫濕度感測計對通風遮罩有敏感性選擇，系統之觀測誤差分別為氣溫 ± 1.11 與相對濕度 $\pm 1.87\%$ ；(2) 資料回傳成功率隨跳接數增加而遞減，耗電量隨之而增加，本系統回傳成功率在 90%~10% 之間。由於無線感測網路技術與硬體快速發展與改進，完全適用於戶外使用之產品應是指日可待。

關鍵字：微氣象、無線感測網路

一、前言

植物的生長、發育及型態改變深受氣象環境因子的調控，比如溫度就是調控物候事件(phenological event) 最重要的環境因子之一(Larcher, 1995; Seeley et al. 1996; Fuchigami and Wisniewski, 1997; Chuine et al., 1999)。因此，植群的分佈受大至數萬公里之行星尺度之季節變化；乃至數千公里的綜觀天氣系統如氣團、颱風、季風等數日變化影響；甚而，數百公里之中尺度如海陸風、山谷風等日週期變化，以及小尺度地形邊界層大氣均有影響。至於林內植群更新演替相關研究，則關注在數百公尺之森林內，數年之森林冠層之下的植物類型演替與生長變動情形，因此，除了上述不同尺度之天氣系統所造成背景氣候影響外，森林周遭微地形與林內冠層孔隙度差異所造成林內氣溫、濕度與光照等微氣候變化，成為相關研究主要之微環境影響因子。然而，一般綜觀天氣的測候站必須選擇環境遮蔽小的空曠地點，雖可提供背景氣候值，但因森林林內微氣象環境可能有顯著落差，仍無法滿足微尺度的生態環境相關研究。

關於森林林內微氣象監測技術之探討，國內曾有不少相關研究，包括梁 (1998)利用自行設計之林內軌道測量系統於福山天然闊葉進行林內太陽輻射量觀測；游 (2000)於太平山進行檜木人工林內之光環境監測；徐(2002)則利用 thermocouple 溫度感測器量測冠層不同位置之逐時溫度變化。這些研究在臺灣生態觀測技術之開發與探索上，實值後輩學習與參考，然而該系統也有架設技術困難、大量線路佈線以及樣區面積不能太大等缺點。

近年來無線傳輸技術精進，基礎氣象感測器

也朝迷你化發展，整合以上兩種電子技術的無線感測網路(Wireless Sensor Networks, 以下簡稱 WSN)技術，提供一種高空間與時間密度的環境監測方法，可讓生態學家更能掌握大氣與森林的交互作用；此外，WSN 再結合網際網路和資料庫，實現全球化和近即時化的監測理念。WSN 緣自於美國加州柏克萊大學「智慧灰塵(Smart Dust)」研究計劃 (Hill et al., 2000)，其基本構想是發展便宜、省電且可自動尋找最佳路徑回傳資料(Multi-hop mesh network)之觀測設備。這項計劃是由美國國防部研究計劃單位(DARPA)所贊助，原先的構想是應用在軍事上，然而近兩年來已逐漸廣泛運用在商業、軍事、醫藥、安全和生態學等領域。Buonadonna (2005)採用 Crossbow 公司所發展的 mica2、mica2dot 以為無線感測網路節點，並以 TinyOS 開發節點觀測韌體與接收資料之媒介，該系統在實驗室內的佈署實驗共採 54 個感測節點，以 13%的運作週期(duty cycle)，即節點每 30 秒甦醒工作 4 秒後即進入休眠狀態進行試驗。試驗結果有 4 個節點發生故障，資料回傳成功率最高有 75%，最低 30%，該試驗驗證系統中的電力管理和看管程式能持續使感測網路正常運作，並提供開發研究者在感測網路應用和演算所需的資訊。此外，Buonadonna (2005)另在戶外的植物園內佈設 23 個感測節點觀測 20 天，以 6.6%的運作週期，即節點每 30 秒甦醒工作 2 秒後即進入休眠狀態進行試驗。試驗結果有 1 個節點發生故障，資料回傳成功率最高有 75%，最低 22%。

在自然與生態領域之運用上，國外已有數個原型 WSN 應用在環境監測。Tolle *et al.*(2005)於紅木 70m 高垂直剖面微氣象觀測研究中，共佈設 33 個節點，每 2m 垂直距離佈設一點。採用感測節點為 Crossbow 公司生產之 Mica2Dot，外接感

測器有氣溫、相對濕度和光照強度等。另由英代爾柏克萊研究中心(Intel Research Berkeley)協助設計接收端，開發 Stargate 系統做為閘道，收集感測網路節點的資料且暫儲於現地微電腦的資料庫，然後利用 GPRS 傳輸資料至實驗室的資料庫中。實驗期間每 5 分鐘觀測並紀錄一筆資料，在 44 天的觀測時期中，共有記錄資料 170 萬筆，經過篩選後有 820,700 筆資料(49%)可供分析。在有效輻射觀測的資料中，看出在天氣晴朗時，個別感測器中的有效輻射數值有相當大變化，原本認為這種現象是風吹動樹葉所造成的遮蔽，但比較兩天的時間序列特徵十分雷同，因此認為其真正原因應該是太陽日間運行軌跡與各觀測節點相對之樹葉遮蔽差異所造成。這些感測資料群突顯出氣象因子在空間和時間梯度的變化，提供了植物體內液流(sap flow)、植物蒸散作用等植物生理研究，森林生態系統在碳水分交換作用等研究議題的背景。

WSN 應用在生態監測研究的實際範例還有 Cerpa et al. (2001)在 James Reserve Forest 放置 40 個無線網路觀測節點(node)進行環境監測應用，監測項目包括氣溫、相對濕度、土壤溫度及土壤濕度等，更在六個鳥巢內進行溫度與相對濕度監測，藉此瞭解鳥的生活習性。Mainwaring 等人(2002)在 Great Duck Island 佈設了 147 節點，以了解棲地微氣象和鳥巢內鳥的存在與否，在 221m 長與 71m 寬近似橢圓空間範圍進行 16 天觀測，記錄鳥巢內溫度的變化和鳥進出鳥巢的頻率與時間，成功地詮釋鳥巢溫度與鳥的習性。Cardell-Oliver et al.(2004)監測 15 天下雨過程的土壤濕度變化，這項試驗特色是節點能感測到暴雨的來臨時，進行高頻率的觀測，並於暴雨結束後回歸於低頻率觀測。Martinez(2004)佈署 9 個節

點於冰河內，監測壓力、溫度及傾斜，藉以瞭解冰河融化行為。Batalin 等人(2004)在 James Reserve Forest 區域設置索車式的感測器來監測森林中在 70m 寬及 15m 高之垂直剖面的太陽輻射量分佈狀況，並以 2.4GHz 無線傳輸技術將資料傳回。

上述的研究計畫顯示 WSN 和資料庫技術，可將單點氣象觀測擴展為小尺度空間監測網來檢視微氣象資訊。目前 WSN 微氣象觀測網尚未在臺灣氣象或生態研究領域進行實驗，本文將透過臺灣大學實驗林溪頭營林區的 WSN 安裝與實測資料，進行 WSN 的研究應用先驅實驗。第二節具體說明 WSN 硬體特性和森林場地安裝細節，第三節檢討 WSN 觀測過程中的若干評估性實驗和微氣象觀測結果分析，最後是總結與討論。

二、實驗材料與方法

(一) 觀測研究地點

本文的研究目標是擬運用 WSN 來瞭解林內林外的氣溫與相對濕度差異，因此研究區域需有不同的林木類型，並有一處可供 WSN 銜接上國際網路之基地站。臺灣大學實驗林管理處溪頭營林區負責管理維護之苗圃氣象站，為與中央氣象局合作之一級農業氣象站(編號：U2H48)，位於森林所圍繞的林間空地，離林地最近水平距離為 55m，最遠為 140m，可視為林外氣象；苗圃周圍為柳杉(*Cryptomeria japonica*)人工林，為溪頭地區主要之造林樹種；柳杉林南邊緊接台灣杉(*Taiwania cryptomerioides*)人工林，為臺灣特有杉科植物，與美國之紅木皆屬於世界零星殘留之子遺植物。鄰近台灣杉林有一區著名之銀杏林(*Ginkgo biloba*)，亦為子遺植物，屬中型落葉喬

木。同時，銀杏葉四季變化分明，這一林區為溪頭營林區重要的森林遊憩景觀地點。本研究乃以苗圃農業氣象站為實驗基地，接收四周林內 WSN 資料並匯入資料庫，再利用網際網路提供線上即時監控。2005 年 11 月完成 WSN 節點架設和啟動觀測迄今。

考量 WSN 各節點可能受到遊客的人為干擾，置放高度乃稍升到離地 3m 高度的樹幹上；節點佈設空間分布除了顧及科學目標之外，也針對節點無線訊號發射回傳基地站強度，以及縱向延展林內節點等考量。另外，參考美國紅木微氣象研究(Tolle *et al.*,2005)，於柳杉林裝設 1 個 8.45m 高的節點，銀杏林裝設 1 個 9m、1 個 11m 的節點，用以瞭解不同高度量測的差異性。為了避免太陽直射干擾，節點均朝北設置。由於 Tmote Sky 之內建天線具有指向特性而非全向性，WSN 節點繫綁於樹幹上，將有半圓訊號遭受遮蔽而無法進行資料傳輸，因此節點採取“之”字形空間佈設，致使 WSN 觀測網末端訊號必須跳接更多節點才可將資料回傳到站房主機。研究區域 30 個節點佈設分佈由基地站往南穿越苗圃空曠區、柳杉林、台灣杉林到最遠的銀杏林，最遠節點距離基地站直線距離約 420m (圖 1)。

(二) 觀測儀器特性

本研究採用 Moteiv Corp.所生產的 Tmote Sky 無線感測器 (圖 2)，其系統採用免費之 TinyOS 作業平台進行開發；操作電壓範圍介於 2.1V 至 3.6V 之間且可回傳電力狀況；再者資料儲存記憶體 1Mbytes，當主機無法即時將觀測資料回傳時，資料可記錄於感測主機上，並於爾後直接連線進行資料下載。另每一個觀測節點都有內建無線傳輸設備，但受限於臺灣地區無線管制

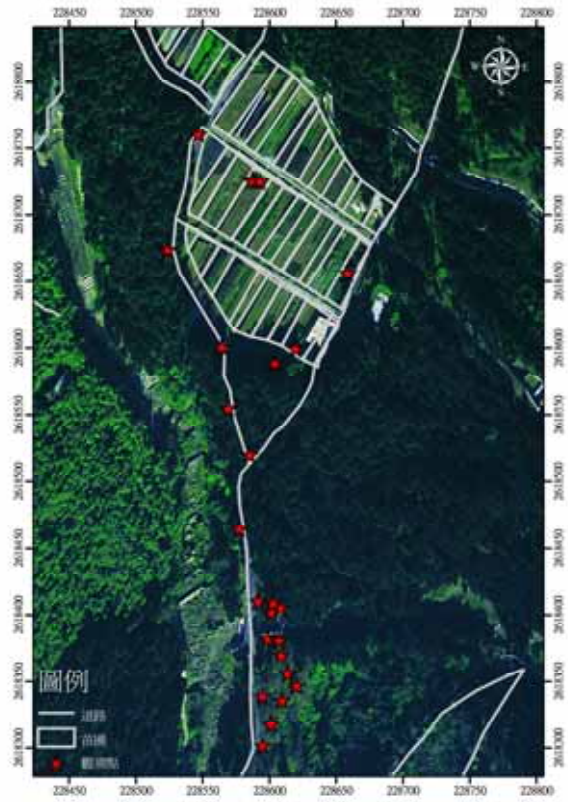


圖 1 Tmote Sky 放置分佈圖。



圖 2 Tmote sky 無線感測網路節點 (擷取自 MOTEIV Inc. website)

相關法規繁複，因此採用最無疑慮的 2.4GHz 射頻產品，其具有自動搜尋最佳路線傳輸功能，可自動尋找最佳路徑回傳資料則是無線感測網路最大優點。產品內建感測器包含 1 個數位溫濕度整合感測器，1 個全天光輻射感測器及 1 個光和作

表一 Tmote Sky 內建感測計規格表。

Sensor Type	Company	Model	Measurement range	Resolution	Accuracy
Temperature	Sensirion	SHT15	-40 ~ 123.8 °C	0.01 °C	±0.3°C(25°C)
Relative Humidity	Sensirion	SHT15	0 ~ 100% R.H.	0.03% R.H.	±2.0%(10 ~ 90% R.H.)
Global radiation	Hamamatsu	S1087-01	320 ~ 110 nm		
Photosynthetically active radiation	Hamamatsu	S1087	320 ~ 730 nm		

用輻射感測器(表一)其中溫濕度感測器原廠設計乃是採用瑞士 Sensirion 公司之 SHT11 型,為了提高觀測精度,本研究特別要求代理商將感測器改為 SHT15 型,其精度隨觀測範圍而異,於 25°C 有最準確量測精度 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 。2 個輻射感測器因與 SHT15 感測計並列,但兩者觀測條件互斥,因此本研究暫時不進行太陽輻射觀測。由於溫濕度感測器須位於不受太陽直射和通風等條件,才能量測到代表周遭環境的氣溫及相對濕度,然因 Tmote Sky 僅為一個 IC 板之半成品,背板則是可裝 2 顆 3 號電池之電池盒,實無任何防潮耐候之處理,因此本研究首先在 IC 電路板塗上一層防濕絕緣保護劑(感測器除外)此外,因應實驗安裝需求,以壓克力材質設計一套通風遮罩(圖 3)



圖 3 自製通風遮罩,內置 Tmote sky 無線感測網路節點。

將 Tmote Sky 無線感測器置放其內進行戶外觀測。通風遮罩遮片共有 3 層,最上層為不透明遮片,可遮蔽低太陽天頂角時的太陽直射,其下兩層採用透明遮片,用以監控節點運作情形之燈號閃爍(正式觀測期間,燈號全時關閉)。

三、結果與討論

由於本實驗是國內首次運用 WSN 於微氣象觀測網概念,因此在微氣象觀測科學目標之外,也探討 WSN 系統在台灣副熱帶較高溫與高濕度的森林環境下的運作穩定度、資料回傳成功率、溫濕度感測器觀測可信度和電力耗掉程度。

(一) 溫濕度感測器檢定

由於在具有溫濕梯度環境下之戶外進行量測檢定時,環境的不確定性也是檢定誤差之一,因此本研究首先以環境密閉的防潮箱進行初步室內檢定試驗,以確定感測器本身之精確度,本試驗以瑞士 Rotronic 公司之 MP101A 型溫濕度計為參考標準置於防潮箱內進行同步量測,SHT15 感測器檢定之誤差分析如表 2 所示。隨著室溫變化,防潮箱內溫度線性檢定迴歸之 R-square 高達 0.999,最大誤差量為 0.29 ;相對濕度線性檢定迴歸之 R-square 高達 0.969,最大誤差量為 1.1%。綜合言之,SHT15 溫濕度感測器精確度符合出廠

表二 Tmote Sky 置於自製通風遮罩於室內防潮箱內溫度與相對濕度、室外東南向及室外北向放置之氣溫與相對濕度誤差分析。

		Average	St.dev.(σ)	Min.	Max.	Number
Indoor	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	0.12	0.05	-0.25	0.29	1983
	R.H.(%)	0.47	0.42	-0.68	1.10	1956
Outdoor Southeast	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	0.60	2.74	-2.99	9.02	3182
	R.H.(%)	-3.07	6.13	-26.50	14.94	3182
Outdoor North	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	-0.01	1.11	-2.39	3.60	2012
	R.H.(%)	-0.79	1.87	-9.75	4.65	2012

標準與一般森林氣象試驗氣溫 ± 0.5 及相對濕度 $\pm 5\%$ 以內的需求。

完成上述室內初步檢定程序後，我們將 30 個 Tmote Sky 各置放於自製通風遮罩中，並列於苗圃農業氣象站觀測坪進行戶外檢定，參考標準是苗圃農業氣象站採用的 Vaisala HMP45D 溫濕計；該溫度計為白金 100 型元件，在 20 時，有 ± 0.2 的精度，相對濕度有 $\pm 1\%$ 的精度。由於氣象站資料輸出最短的頻率僅有 10 分鐘平均值，另考量此站為重要農業氣象站，不宜任意更動程式，因此採用此值與各節點每 10 分鐘瞬時觀測值之間進行比對可能有較大誤差。圖 4a 顯示戶外檢定之氣溫 R-square 雖高達 0.937，然而可看出氣溫超過 18 時，Tmote Sky 量測值偏大且偏差值隨溫度增高而增大，最大誤差高達 9.02，兩者似有非線性曲線關係；相對濕度比對結果 R-square 高達 0.969，然而相對濕度愈低，Tmote Sky 量測值偏有偏低趨勢，最大誤差高達 -26.5%。若將 20 以上之相對濕度先以 Tmote Sky 量測溫度換算回空氣之水氣壓力，再以苗圃農業氣象量測溫度所演算之飽和水氣壓力計算相對濕度，則因 Tmote Sky 量測溫度過高導致相對濕度低估情形可被修正（圖 4b 相較於圖 4a 之相

對濕度檢定）若將 Tmote Sky 由原本東南向放置改為北向放置，以儘量避免太陽直射，圖 4c 顯示氣溫檢定之 R-square 提高為 0.968，相對濕度檢定之 R-square 提高為 0.984。最大誤差由 9.02 降為 3.6；相對濕度最大誤差降為 -9.75%。因此，我們推測這一結果乃因本研究自行設計的通風遮罩無法有效遮蔽太陽直射，導致 SHT15 感測計因而升溫所致。由於 3m 高度各節點均採北向放置，且林內樹冠可遮蔽大部分太陽直接輻射，上述升溫效應應可較觀測坪碧空檢定環境更為減緩。由於北向放置檢定分析其誤差分佈為高斯分佈 (Gaussian distribution) 之隨機誤差，表二北向放置誤差分析之標準差將做為 Tmote sky 系統之觀測誤差，分別為氣溫 ± 1.11 與相對濕度 $\pm 1.87\%$ ；雖氣溫之觀測誤差大於一般森林氣象試驗之 ± 0.5 ，但 Tmote Sky 觀測系統仍可初步勾勒出林內外氣溫差異，於第 4 小節進行探討。

(二) 無線傳輸分析

由於 WSN 基地站主控電腦的軟體調整與修正，觀測期間有不定時停止觀測的間斷性，因此以抵達基地站資料之最大量之節點為基準，來討論每一節點的相對回傳率。以 2006 年 1 月 18 日

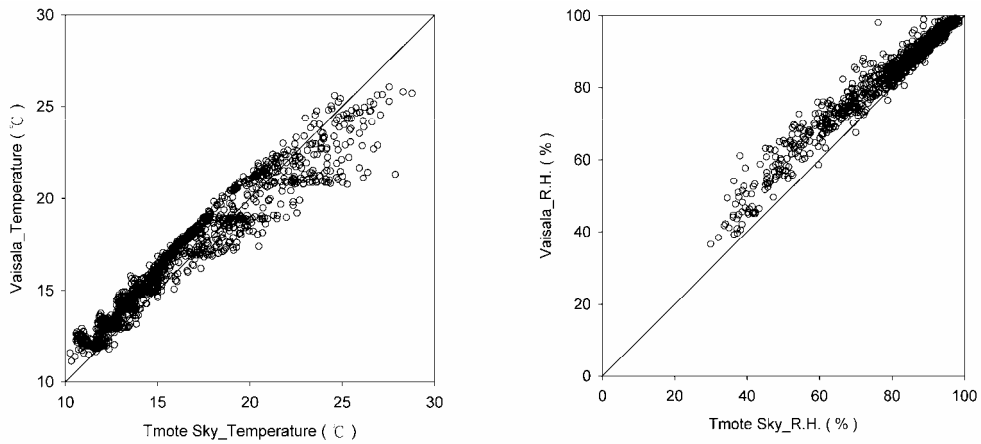


圖 4a Tmote Sky 置於自製通風遮罩於戶外東南向放置條件下，以 Vaisala HMP45D 為標準之氣溫與相對濕度檢定結果。

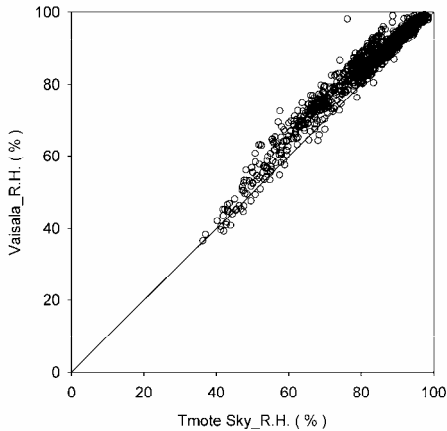


圖 4b Tmote Sky 置於自製通風遮罩於戶外東南向放置條件下，以 Vaisala HMP45D 氣溫修正 Tmote Sky 相對濕度後，與 Vaisala HMP45D 觀測之相對濕度檢定結果。

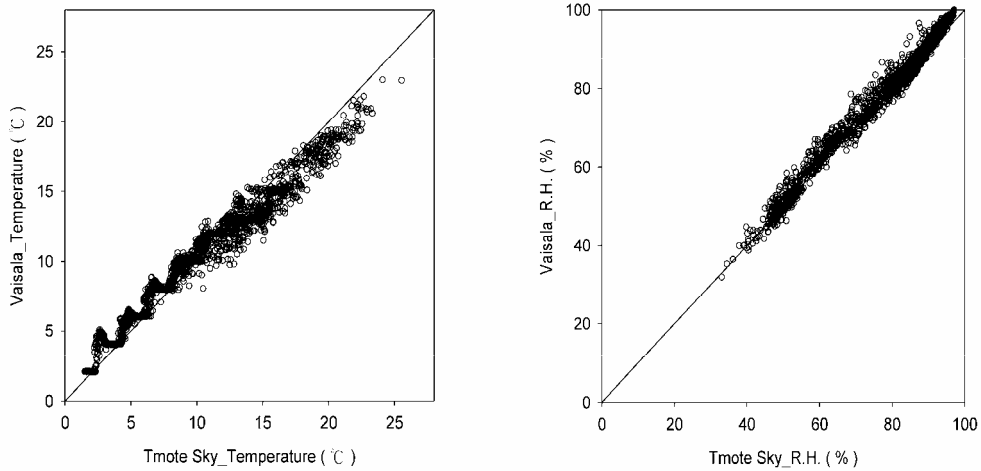


圖 4c Tmote Sky 置於自製通風遮罩於戶外北向放置條件下，以 Vaisala HMP45D 為標準之氣溫與相對濕度檢定結果。

每 5 分鐘觀測並回傳資料 1 次(duty cycle=1%)為例，當日共記錄 13,353 筆資料，平均回傳率為 35.6%。回傳成功比例與跳接數有明顯呈反比的趨勢(圖 5)，跳接數愈多回傳資料成功率愈低，研究樣區最末點回傳需經 9 個跳接點，則回傳率低於 10%。相反地，在基地站周遭之苗圃與柳杉林回傳率則可在 60%以上。傳輸失敗乃因 TinyOS 傳輸採用定時同步開啟主動傳輸，並無法確認資料是否已被接收之程序，因此資料跳接過程中可能因為同步時間錯亂或因傳輸環境變差，而導致資料傳輸不完全。可行的解決方法乃採用外接天線加強訊號來增加傳輸距離，或以遠距無線傳輸

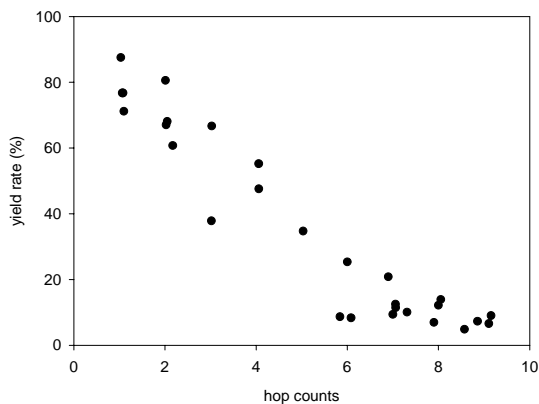


圖 5 資料回傳跳接數與回傳資料成功率之關係。

設備介接來減少資料回傳的跳接數。

(三) 耗電量分析

本研究採用過 3 號鹼性電池(AA Alkaline)、1 號鹼性電池(D Alkaline)、Panasonic 氫氧電池(OXYRIDE)、Sanyo2500mA 鎳氫充電電池(2500mA Ni-MH)為電力來源進行測試，表三顯示 10 分鐘偵測 1 次並回傳資料時每日平均耗電情形，當資料回傳跳接數增加時，除了導致傳輸成功率降低，電力消耗亦隨之增加；最貴之氫氧電池效益最差，鎳氫充電電池則須整合太陽能充電設備方可顯現充電電池之特性，1 號鹼性電池則因有較高之電容量可延長觀測時間。此外，實驗中亦發現 Tmote Sky 最低操作電壓關鍵在於 SHT15 感測器，經測試最低操作電壓應可低至 2.1 伏特，因此兩顆串聯之 3 號電池操作電壓差為 0.9 伏特。

綜合無線傳輸回傳率及耗電量分析，若以 10 分鐘偵測 1 次並回傳資料進行觀測且讓跳接數不大於 3 時的觀測時間可達 1.5 個月，則可符合目前野外試驗每個月前往儀器維護之調查模式。2006 年採用遠距無線傳輸設備介接持續觀測銀杏林微氣象，已可將跳接數降低至 3 個以下，資

表三 電力消耗測試分析表。

Hop count	Power consumption (Unit: Volt/day)			
	Battery Type			
	AA Alkaline	OXYRIDE	2500mA Ni-MH	D Alkaline
1-2	0.011	0.023	-	-
2-3	0.022	-	0.034	-
3-4	0.020	-	-	-
5-7	0.042	0.038	-	-
7-9	0.049	-	-	-
10-11	0.086	-	-	0.009

料回傳率因而提升至 90% 以上，節點可觀測 1 個月以上。此外，感測節點皆有 1Mb 記憶體用以儲存觀測資料，可另利用直接連線下載再匯入資料庫中。但只要每日有一定的資料以無線方式回傳，則可利用這些資料的監控確保節點運作情形，因此無線傳輸與節點儲存資料兩者兼用可提升觀測資料品質。

(四) 微氣象觀測資料分析

由於溪頭地區經常於下午起霧，因此 2005 年 12 月之全日日射量平均值為 7.47MJ/m^2 ，僅為試驗地碧空狀態理論值 15.29MJ/m^2 之 48.9%。為探討瞭解林內林外的氣溫與相對濕度差異，因此於試驗期間選出 2005 年 12 月 2 日苗圃農業氣象站之全天空太陽輻射量及散射輻射量時序變化（圖 6），顯示出當日無劇烈的太陽輻射跳動，全日日射量為 14.18MJ/m^2 為試驗地碧空狀態理論值之 92.7%，達代表當日天空是接近碧空狀態，全天的氣溫與相對濕度應有較顯著的日夜變化幅度，本研究採用這一單日個案來探討不同林相、不同觀測高度的微氣象特徵。

首先我們討論太陽輻射與風速風向變化情形，圖 6 以直接輻射量 150W/m^2 做為日出日落標準，當日苗圃於 07~08 時開始日出，約 08 時 05 分完全日出，隨後太陽輻射量持續增加至 11 時達最高，爾後持續減少，並於 15 時開始日落，於 16 時前完全日落。此區域有明顯山谷風變化趨勢，08 時之前為山風，風向為東南風，由於風向轉變，風速由 08 時的 2.5m/sec 驟降至 09~10 時約 1.0m/sec ，風向轉為北風之谷風，風速亦逐漸上升，直至 15 時再度面臨由谷風轉為山風之臨界點，風速降為 0.7m/sec 。由於太陽輻射造成氣溫與地面溫度升溫，再因周遭地形起伏與下墊面植被之反射率、高度、冠層遮蔽差異等因子綜合所造成溫差梯度，進而帶動氣流水平與垂直擾動，為山區微環境造成小區域氣溫變動之主因，圖 7 為 2005 年 12 月 2 日 08~15 時逐時各觀測點 3m 高平均氣溫所繪研究區域等溫線圖，結果顯示苗圃空曠區因太陽直射時造成氣溫升溫，柳杉林內因林木冠層遮蔽升溫較緩，尤以 09~10 時因高太陽輻射量之升溫效應，外加山谷風風向轉換所造成之低風速雙重影響，致使林內外溫度梯度較大

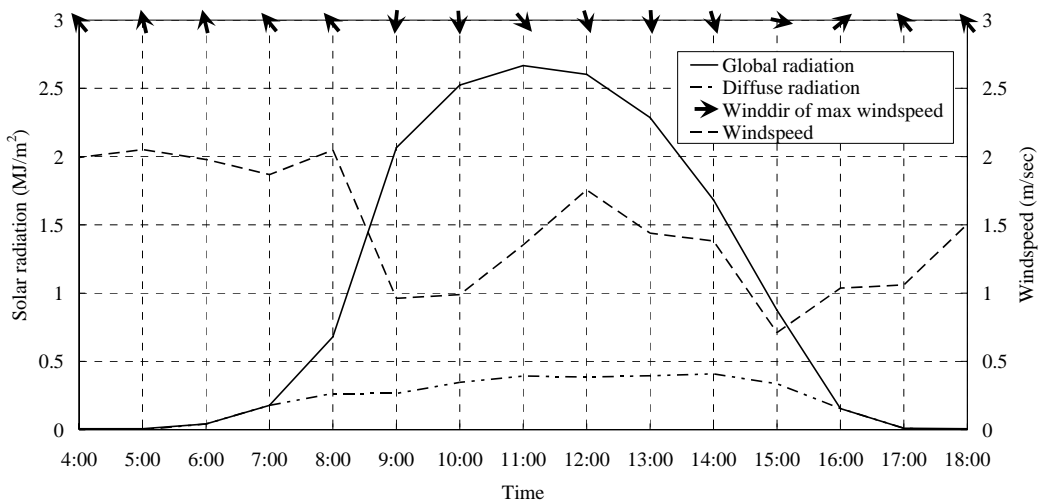


圖 6 2007/12/02 分析個案當日全天光輻射量、漫射光輻射量、風速與風向時序變化。

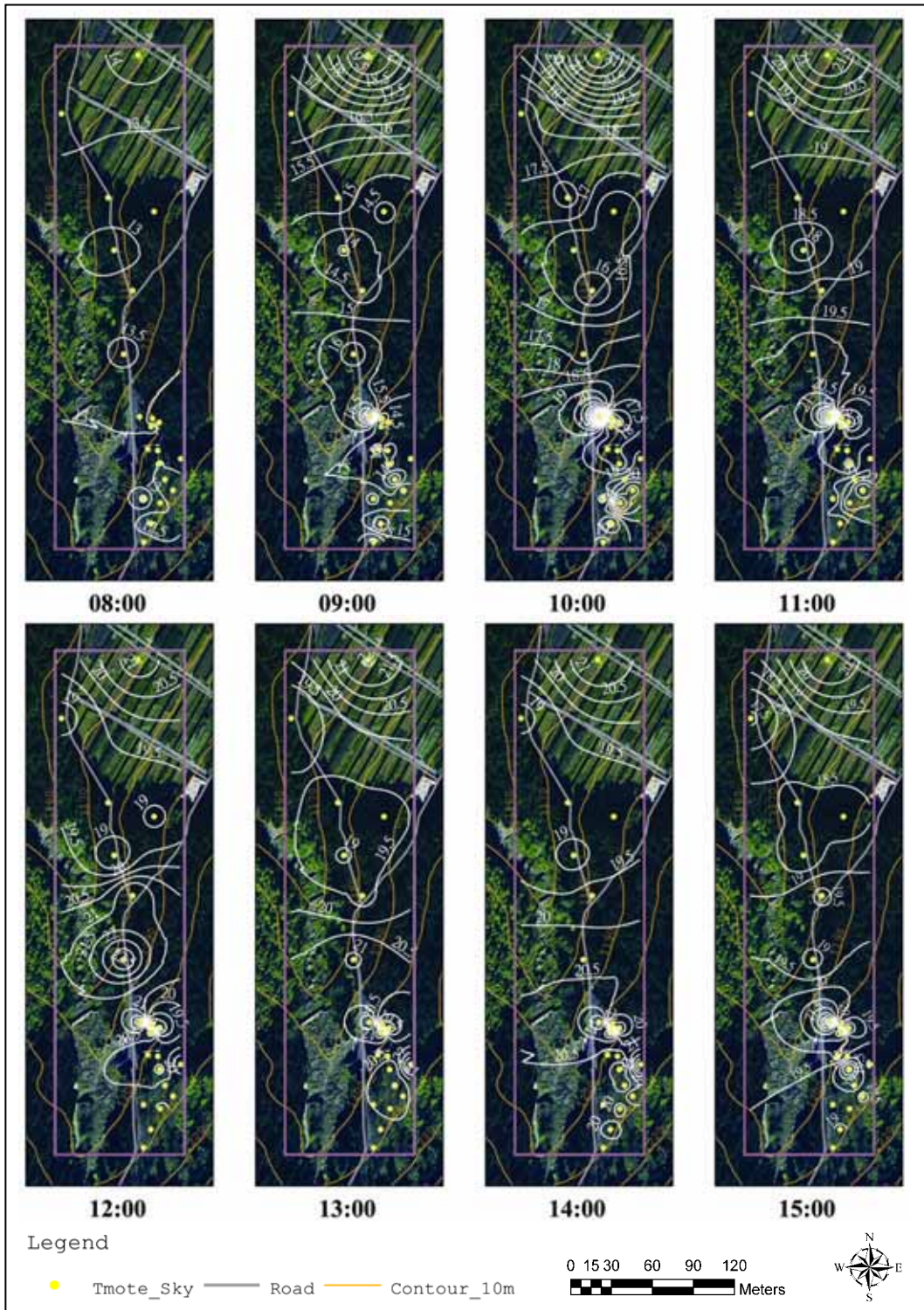
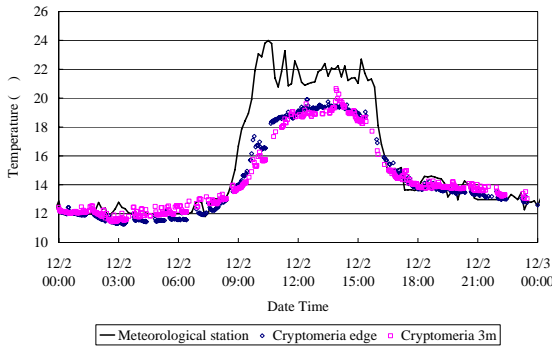


圖 7 2007/12/02 08~15 時之等溫線分佈圖。

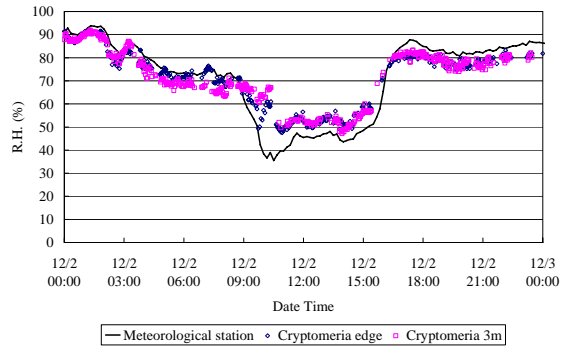
(林內溫度較林外低 6) ;11 時因風速升高且為北風，加速苗圃熱空氣進入柳杉林內，減緩了林內外溫度梯度(林內溫度較林外低 3.5)。台灣杉林及銀杏林也有類似變化趨勢，然發生時間似有延後現象，可能與不同地形遮蔽效應導致太陽直

射起始時間延遲有關。

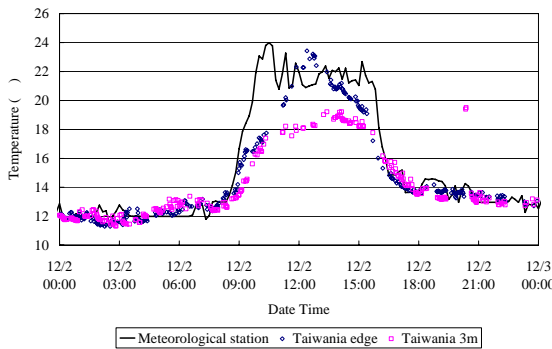
圖 8 展現不同林相與觀測坪空曠地之氣溫與相對濕度時序變化，其中氣溫變化均無太陽直射所造成突然升溫現象，代表節點北向放置與設置



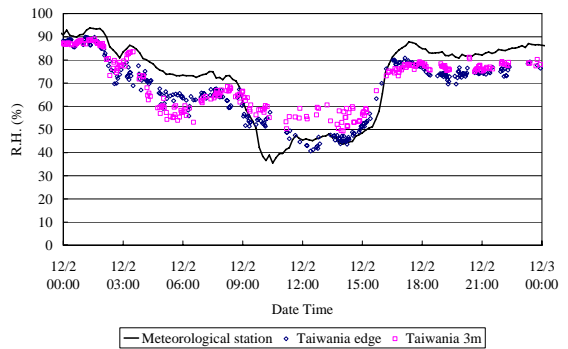
(a) 柳杉林氣溫變化



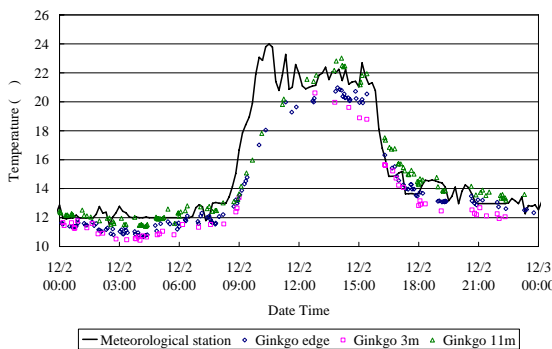
(b) 柳杉林相對濕度變化



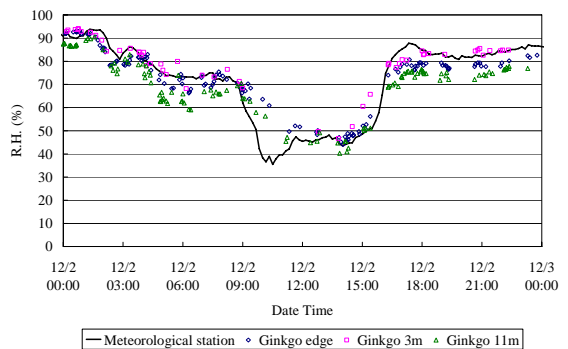
(c) 臺灣杉氣溫變化



(d) 臺灣杉相對濕度變化



(e) 銀杏林氣溫變化



(f) 銀杏林相對濕度變化

圖 8 2005/12/02 三種不同林分內氣溫與相對濕度時序變化。

於林內已可避免太陽直射升溫效應。結果顯示，所有觀測點之氣溫變化情形於夜間均與苗圃觀測結果無太大差異，白天相對有較大的變動。當日約 08 時苗圃空曠區太陽高過山頭而受直接日照後，溫度急速上升，然而柳杉林與苗圃交界處及柳杉林內因周遭林木冠層遮蔽並無長時間明顯直接輻射照射，氣溫逐漸因大氣對流作用將空曠區熱空氣帶入柳杉林內，使得林內氣溫緩慢上升，中午約低 2~3℃，然全日白天均較苗圃氣象站低 (圖 8a)。台灣杉林內氣溫變化情形亦因林木冠層遮蔽而與柳杉林內類似，然而台灣杉林南邊界緊鄰一條野溪之空曠區域再緊接銀杏林，其氣溫變動則較戲劇性，日出時升溫與苗圃相仿，然而中午卻高於苗圃約 2℃，可能與鄰近乾枯野溪多為大礫石與混凝土之工程構造物有較高吸放熱比有關 (圖 8c)。銀杏林氣溫於白天開始上升時刻較苗圃約晚 15 分鐘，此應是所處位置地形遮蔽效應不同，銀杏林東南方之地形遮蔽高度角較苗圃來得大，因此日出時間延後所致，隨後因 12 月季節銀杏已經落葉使整個林分近似空曠地，導致銀杏林之平面氣溫分佈差異不明顯，然放置於 11m 高度處的氣溫較 3m 高度處中午左右仍有高約 1℃ 之垂直梯度差異 (圖 8d)。銀杏林 9m 高之觀測資料因當日回傳率過低而無法分析；放置於柳杉林 8.45m 高之觀測節點則可能因繩索拉動時，造成擺設方位非朝向北方，造成太陽直射升溫效應，因此觀測氣溫於中午前後均高於苗圃約 2℃，於林內環境此結果並不甚合理。由於相對濕度變動與氣溫呈反比相依，因此柳杉林內白天較苗圃高 5~7% (圖 8b)；台灣杉林內白天較苗圃高 5~15% (圖 8d)；銀杏林於 09~10 時較苗圃高約 20% (圖 8c) 應都可歸因於氣溫差異所致。然而夜間柳杉林、台灣杉林及銀杏林相對濕度均有較苗圃低

情形，部分觀測點差異不大，是否為儀器誤差仍須未來進一步檢討。至於台灣杉林於早上 3~8 時甚有較苗圃低 20% 情形發生，與原本植物夜晚呼吸作用相對旺盛下，蒸散水汽至大氣提高空氣含水量之認知相反，為未來有趣的探討課題。

整體而言，本研究探討的森林微氣象區域內地形由苗圃 1160m 至銀杏林 1215m 高度落差 55m，與溫度梯度間並無太大相關；相對而言，林內微環境之冠層遮蔽導致受太陽輻射量多寡和地形效應所導致的直接日射發生時間、山谷風之變化似乎對於溫度梯度有較大影響，然因無直接證據，上述探討仍有待進一步觀測驗證。

四、結論與展望

WSN 技術於 2006 年被國科會工程處列為重點開發專案，顯見此項創新的概念產品極具發展潛力，然也代表這項技術未成熟且有極大改進空間。依據本研究之先驅實驗經驗，WSN 技術可用以瞭解不同林相與林木高度等多維度之微氣象狀態，應用於森林微氣象、林火氣象觀測、物候及植物生理生態等相關研究上。由於國內運用 WSN 技術於生態觀測仍屬起步階段，因此本文也針對 Tmote Sky 進行系統穩定度、資料回傳成功率、溫濕度感測器觀測可信度、電力耗損程度等進行評估。結果顯示 Tmote Sky 系統資料回傳成功率偏低，但因節點設備各自擁有 1Mb 的記憶體，若資料無法成功回傳，仍可暫存於記憶體中，僅需定期前往連線下載即可，對於資料的保存應無太大問題。因此無線網路回傳與各節點自行儲存觀測資料兩種方式並用，將有利於維持觀測網之資料完整性和儀器維護即時反應。

Tmote Sky 系統溫濕度感測器本身可信度應

無太大問題，但因通風遮罩設計仍有瑕疵，太陽直射時將造成氣溫高估，雖北向放置可消除此問題，未來重新檢討設計通風遮罩仍有必要。電力耗掉程度若以目前 10 分鐘觀測 1 次的頻率計算，應可維持 1 個月以上，未來可整合充電電池與太陽能板，以延長儀器可觀測時間。

藉由本次先驅實驗，已可將研究林內外溫差與區域內溫度梯度時序變化狀況初步勾勒出來，再配合一級農業氣象站（溪頭營林區）額外觀測之氣象要素進行比對分析，可概括瞭解造成溫度梯度變化之主要可能因素為林內微環境冠層遮蔽導致受太陽輻射量多寡、地形效應導致直接日射發生時間、山谷風變化等，將可提供未來森林微氣候研究進一步探討參考。

誌 謝

本研究承行政院農業委員會林務局補助經費（計畫編號：94 農科-11.1.2-務-e1；95 農科-12.3.1-務-e3）；兩位審查委員細心的斧正，使本文更具充實，特此一併致謝。

參考文獻

徐新武，郭幸榮，鍾年鈞，梁亞忠 2002：台灣杉花芽生長及發育之物後學 台灣林業科學 17,241-255.

梁亞忠，1998：福山天然闊葉林內太陽輻射量之研究 博士論文 國立臺灣大學森林學研究所 pp.123.

游啟皓，2000：紅檜人工林內之光環境 碩士論文 國立臺灣大學森林學研究所 pp.59.

Batalin, M. A., M. Rahimi, Y. Yu, D. Liu, A. Kansal,

G.S. Sukhatme, W. J. Kaiser, M. Hansen, G. J. Pottie, M. Srivastava, and D. Estrin, 2004: Call and Response: Experiments in Sampling the Environment. *In Proceedings of the Second ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*.

Buonadonna, P., D. Gay, J. M. Hellerstein, W. Hong, and Madden S., 2005: TASK: Sensor Network in a Box. *In Proceedings of the Second IEEE European Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*.

Cardell-Oliver, R., K. Smettem, M. Kranz, and Mayer K., 2004: Field Testing a Wireless Sensor Network for Reactive Environmental Monitoring. *In Proceedings of the International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing*.

Cerpa, A., J. Elson, D. Estrin, L. Girod, M. Hamilton, and J. Zhao, 2001: Habitat Monitoring: Application Driver for Wireless Communications Technology. *In Proceedings of the First ACM SIGCOMM Workshop on Data Communications in Latin America and the Caribbean*.

Chuine I., P. Cour, D. D Rousseau., 1998: Fitting models predicting dates of flowering of temperate-zone trees using simulated annealing. *Plant Cell Environ* 21,455-66.

Fuchigami, L. H and M. Wisniewski, 1997: Quantifying bud dormancy: physiological approaches. *Hortscience*, 32,618-29.

- Hill, J., R. Szewczyk, A. Woo, S. Hollar, D. Culler, K. Pister, 2000: System Architecture Directions for Networked Sensors. *ACM SIGPLAN Notices*, 35,93-104.
- Larcher, W., 1995: Environmental influences on growth and development. *Physiological plant ecology*. 3rd ed. Berlin: Springer Verlag pp.309.
- Mainwaring, A., J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler and J. Anderson, 2002: Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring. *In Proceedings of the First ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*.
- Martinez, K., J. K. Hart and R. Ong, 2004: Environmental Sensor Networks. *IEEE Computer*, 38,50-56.
- Seeley, S. D., J. L. Anderson, J.W. Frisby and M. G. Weeks, 1996: Temperature characteristic of anthesis phenology of deciduous fruit trees. *Acta Hort* ,416,53-63.
- Tolle, G., J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, N. Tumer, K. Tu, S. Burgess, T. Dawson and P. Buonadonna, 2005: A Macroscopic in the Redwoods. *In Proceedings of ACM Sensys, San Diego, USA*.

Preliminary Study of Air Temperature and Relative Humidity Observation around Forest with Wireless Sensor Network Technology

**Yen-Jen Lai¹ Chyi-Rong Chiou² Tsong-Huei Wey¹
Chien-Wen Shen¹ Ching-Ru Lin²**

Research & Development Center, Central Weather Bureau, Taiwan

(Manuscript received 30 July 2006; in final form 07 May 2007)

ABSTRACT

The standard open-area meteorological station setup requirements for synoptic weather observation could not be applied to the micro-meteorological observation inside the forest. To solve the above-mentioned problem, the purpose of this earlier-stage experiment was trying to create a new system based on a wireless sensor network (WSN) which included 30 Tmote Sky nodes to monitor temperature-R.H. variances on different landscape patches at Sitou Ecosystem Education Area of National Taiwan University Experimental Forest. The results indicated the concept of WSN could be used for forestry and ecological temperature-R.H. observation both inside and outside forest. However, the results also showed the WSN hardware, Tmote Sky, could be overestimated if the sensor was not located inside a well-designed radiation shield to avoid direct solar radiation effect. The observed errors of air temperature and R.H. of this system were ± 1.11 and $\pm 1.87\%$ respectively. Another disadvantage of this network was the more the data transfer hop counts, the more the power consumption and the less the data yield rate. The transfer yield rate of this system ranged from 90% to 10%. Due to both WSN technology and hardware are developing and improving speedily, the new designed product for field use could be expected soon in the future.

Key words: Micrometeorology, Wireless sensor network

