

無線感測網路在國土安全領域之 應用研究

作者/中科院電子系統所 孫天文、李明堂

提要

美國自 911 恐怖事件之後，國土安全維護在世界各國政府無不大力提昇其能力，以減少危安事件，保障國家安全。

近年來，資通電產業每 10 年晶片成本減少 10 倍，功耗減少 10 倍，數量與應用模式亦增加 10 倍，10 倍速時代的驅動，使得以環境為平台的普集運算 (Pervasive Computing) 理念，實現智慧空間 (Ambient Intelligence) 之 U 化社會 (Ubiquitous Society) 的可行性變為可能，而無線感測網路技術發展應用與基礎建設是實現 U 化社會的關鍵技術之一，也是繼 2002 年的 e-Taiwan、2005 年的 m-Taiwan 之後，現在政府推動 u-Taiwan 所需發展應用的重要目標之一。

本文探討分析我國國土安全需求，提出無線感測網路階層訊息處理架構與台灣既有之網通基礎建設整合之系統架構，並以中科院實作之「廠房溫溼度監控與自動灑水系統」為例，廣泛探討無線感測網路技術與發展方向，期能以無線感測網路為基礎，達到區域聯防、全面國防之技術與科技整合願景，在國防安全應用上，帶入新創新與高效率的廣大國土安全維護之應用技術與服務產業建議，達到無所不在，危安立即警戒與處置機制的 U 化社會的一環。

關鍵詞：國土安全，無線感測網路 (Wireless Sensor Network)、U 化社會 (Ubiquitous Society)

壹、前言

西元 1997 年，UC Berkeley 電機系一位教授向 DARPA 提出無線感測網路系統概念與架構：運用微機電 (MEMS) 技術，建立體積小、低耗能、多元感測整合技術，量測週遭環境中溫度、溼度、震動、聲音...等參數，利用短距無線傳輸方式，形成網路系統，達到廣域資訊收集與研究之目的。經美軍接受此專案後，由 DARPA 所屬的微型系統技術室 (Micro-System Technology Office, MTO) 主導，以微機電、奈米發展微型感測器、通訊、電源等「真正塵粒大小」的 Smart Dust 之相關技術開發研究並完成雛型與概念展示。爾後，隨著應用類別的不斷創新與新商業模式的產生。民間廠商 (如 Crossbow、Intel 等) 亦製作無線通訊模組，

並以開放性的作業系統(如 TinyOS)發展¹，IEEE 802.15.4、ZigBee 等通訊協定，也創造出非常多的生活應用的展示²。

無線感測網路相關發展應用，成為本世紀初，全世界各個國家或區域積極發展的技術產業，無論其計畫名稱是普集運算、是智慧空間、或是 U 化社會網路，其最終之目標都是以人為中心，探討研發相關技術，解決日常生活中的問題，滿足生活中的需求、創造無所不在的快樂健康、自在安全的生活方式。而資通技術與產業就是實現這一目標的重要手段，無線感測網路技術更是亟待開發與建置的重要核心，網通的整合與創新的服務內容是落實智慧生活重要契機。

目前台灣在國土安全上有諸多的問題亟待解決，城市、鄉村、部落有其不同之需求。台灣是資訊、通訊製造發展的王國，有相當好的資訊通訊網路的基礎建設與服務產業鏈的整合，配合現在政府大力推展的智慧化居住空間計畫與 U-Taiwan 等技術發展與整合應用，我國有機會在既有之網通基礎建設上，建構無線感測網路系統，發展新型應用服務的產業，達到無所不在，危安立即警戒與處置機制，更可以應用國土安全維護之應用上。無線感測網路建置與既有或新發展之網路主幹結合，建構全面環境安全情報監測與偵蒐系統，達成危安立即處理之目標，也能將整個國家社會帶入智慧好生活、便利新科技的嶄新生活方式。

貳、國土安全之需求

依據台灣 2006 國土安全報告書，說明台灣在國土安全、疫災與生物恐怖攻擊、重大基礎建設之威脅具有三個面向，分別是一、脆弱的台灣氣象地理環境；二、疫災與生物恐怖攻擊之威脅；三、重大基礎建設潛在威脅。³另加入目前全世界都重視的環境污染及全球暖化問題，也是普遍國人常詬病的生活環境問題，我們可以歸類台灣國土安全威脅最值得重視的四個面向及其威脅型態與種類綜整詳如表一。

表一 台灣國土安全威脅(作者整理)

項次	環境安全威脅面向	威脅型態與種類
1	脆弱的台灣氣象地理環境	天然災害水(水災)、氣(乾旱、颱風)、土(地震、土石流)等三大類。

¹ TinyOS Community Forum. An open-source OS for the networked sensor regime. Web site: <http://www.tinyos.net/>.

² Uttam Sengupta, John Sherry, 「Future Vision 2015: Building a User-Focused Vision for Future Technology」, www.intel.com/technology/magazine/research/rs09042.pdf.

³ 總統府, 「2006 國土安全報告書」, 民國 96 年 5 月, 頁 68-71。

2	污染的台灣生活環境	水質的污染(工業及民生廢水)、土壤的污染(重金屬、有毒化學物質)、空氣的污染(CO ₂ 、石化)、食物鏈的污染等類。
3	疫災與生物恐怖攻擊之威脅	新興疫情與傳染病、生物恐怖攻擊等類
4	重大基礎建設潛在威脅.	非法入侵、蓄意破壞、公共工程品質與維護、外來攻擊與天然威脅等類。

我們分析台灣環境安全的威脅型態與種類，其範圍擴及全台各個角落，科技領域包羅萬象，有氣象與環境地質變動危害感測、有環保、公共工程品質檢測、有生物與疫病防治、人事物等非法入侵等等。其共同之特性是安全防護是多樣性、安全防護範圍廣大、安全事件發生是稀少、隨機與瞬間發生的、無法完全以人力獲得監控與處置的。而其需求確是要危安事件發生時，需即時警報處置，要處處監測，防微杜漸，要有完善的應變救援機制，使問題的損害降到最小之需求。

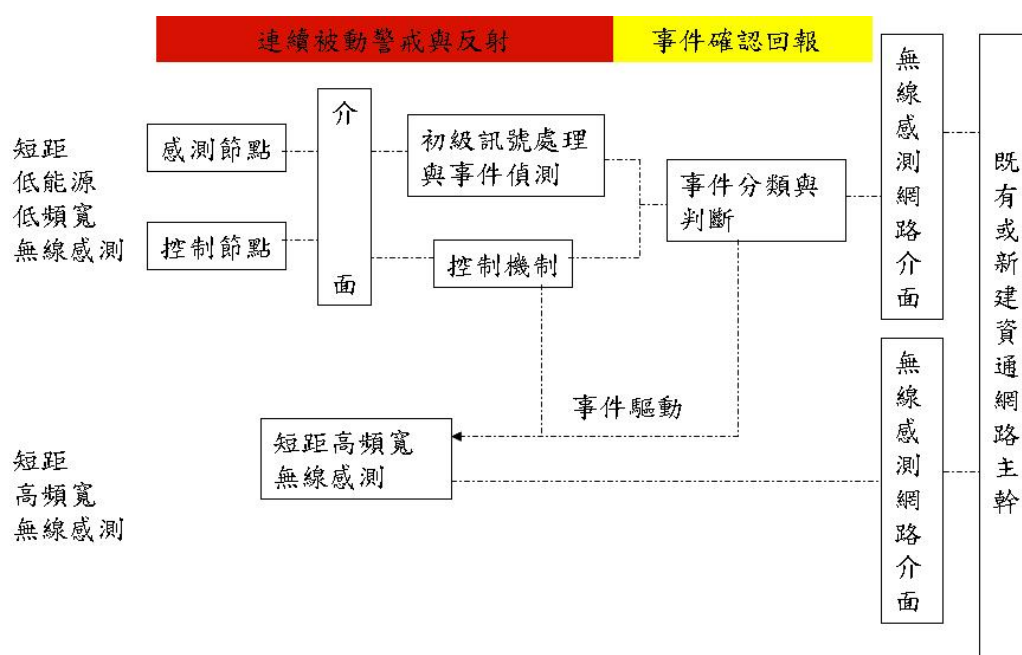
參、國土安全無線感測網路應用架構

如果我們能使環境具有相似於人神經系統的機制之感知與處理能力，能感知氣象與環境變化因子與參數、能感知生物與疫病的訊息、能感知人事物的移動，並能情境認知，事件判斷，做出適宜的處置，就有機會使人避開危險，整個社會與國家的環境安全就有機會獲得更安全的保障。無線感測網路的基礎建設建置是實現這樣一個社會的重要關鍵。

無線感測網路系統有別於現存之無線區域網路。無線區域網路單純考量以語音、數據以及影像，在人與人、人與機器或機器與機器之間不同組合應用下傳輸之標準。而無線感測網路系統，是希望在既有網路主幹之下，能延伸生活空間應用，感測週遭環境或人的行為模式，或即時控制處理某些狀況。將感測資料透過自有我形成之網路連結在現存之有線/無線網路上，達到資料分享與遠距安全維護或研究應用等領域。也就是建構眾多的無線感測節點在生活空間之中，能自我組織，互相連結，成為一個網路系統。無線感測節點就如同人類的神經細胞外觸一樣，具有感知訊息、傳遞訊息、與控制活動等能力。無線感測網路系統，能與現有網路或通訊系統整合應用，既有網路或通訊系統就如同人類主要神經束一般，將眾多分散各地的無線感測節點來的訊息，傳輸到中控中心，中控中心如同人類大腦能做分類判斷，採取適當的處置與行動。而這些處置與行動就是網路增值服務與防災救災等機制或新興產業。

基於整個無線感測網路實際運作及成本考量，有必要將感知訊息傳遞分階

層處理、將感知訊息分頻寬需求選擇適當通路及時機傳遞來考量。訊息傳遞分階層處理之最主要目的是感知訊息初級處理，一旦判定有危害因子時，能即刻就近控制，使危害能即時控制，避免問題擴大，其機制如同人類神經系統的反射動作相仿。其附帶好處是，有需要更精緻或細部處置的有效初級處理的訊息才往中控中心送，可減少頻寬需求及中控中心處理的負荷。分頻寬需求選擇適當通路及時機傳遞的機制設計之最主要目的是一般感知訊息為低速率(低頻寬)、低功率傳輸，一旦判定有危害因子時，有必要將寬頻資料(例如影像)做傳輸需求時，才以事件驅動方式(Event-driven)，驅動寬頻傳輸，給終端使用者，就事件判定與確認之用。其附帶好處是，可大量減少頻寬成本及中控中心處理的負荷，更減少人力的負荷，使人力只花在有用得訊息上，效率可大幅提升、人力可大幅下降。無線感測網路階層訊息處理架構與台灣既有之網通基礎建設整合之系統方塊圖，如圖一。



圖一 無線感測網路階層訊息處理架構與台灣既有之網通基礎建設整合之系統方塊圖(作者繪製)

無線感測網路應用到廣大區域，就得考量成本、技術與實用性。重要的考量因子需要低成本、低能源、低誤偵率、易佈建、低維修度、可擴充性、微型化、高可靠度、高安全性、高效能、高偵測率、抗干擾，滿足這些需求需考量之技術與衡量準則，如表二。

表二 環境安全無線感測網路技術與衡量準則(作者整理)

項次	需求	衡量準則
1	低成本	通用標準、可大量生產
2	低能源	一般水銀電池、AA 電池，使用 1~2 年、階層訊息處理架構、減低通訊量、Soc
3	高偵測率(低誤偵率)	感測元件、信號處理、信號偵測、多重信號融用與事件判別
4	微型化	微電子機械系統技術
5	易佈建、低維修度	佈建分析與 site survey 工具、節點健康狀態回報、軟體自動更新
6	可擴展性	基礎網路新增節點、基礎網路分享應用、應用類別認知自我組織
7	高安全性、抗干擾	調變技術、跳頻、Diversity

肆、環境安全感測節點與網路設計考量

IEEE 協會推出的一個支援短距離、低速率(低頻寬)、低功率傳輸的一套協定 IEEE 802.15.4(low-rate wireless personal and network, LR-WPAN)，IEEE 802.15.4 所定義之無線傳輸方式，被認為可以作為支援無線感測節點間通訊的一套規範，並有如 Chipcon、Freescale 等大廠，發展出滿足此規範之傳輸單元與微波晶片，以利感測節點開發與設計。除傳輸單元納入標準之外，感測節點的硬體設計會因應不同需求與模組化分析的結果，選擇適當的感測單元、處理單位與電力供應單元來組成，經本院對環境安全無線感測節點，執行模組化設計分析後，採用之元件名稱與功能敘述需求，整理如表三所述。

表三 無線感測節點硬體元件(作者整理)

項次	元件名稱	功能敘述
1	感測單元 (Sensing Unit)	感測元件(Sensor)，負責偵測環境的資料，無論是類比訊號或數位訊號皆轉換成數位訊號，並將資料送到處理單位計算處理。
2	處理單元 (Processing Unit)	處理單位主要概分為兩個部分：儲存元件(Storage)，儲存感測的環境資訊；處理元件(Processor)，協調並控制感測節點之間不同的單位元件、感測的環境資訊計算與分析。感測節點間接收與傳送命令訊息。

3	傳輸單元 (Transceiver Unit)	傳輸單位負責連接感測節點與其他感測節點之間的溝通，或是將感測節點的資料傳送給無線資料蒐集器。傳輸單位可使用的傳輸介質有紅外線(Infrared)、無線電波(Radio)、以及光纖介質(Optical Media)等，配合環境及應用的不同，可以使用不同的選擇。
4	電力供應單元 (Power Unit)	電力供應單位必須負責感測節點中所有單位的電力能量，無論是任何一種功能運作都必須使用電量，是感測節點中十分重要的單位。通常感測節點的電力是由電池所支援，因此在軟硬體的設計上，省電可以說是主要考量的因素之一。

感測節點的硬體設計會因應不同需求與模組化分析的結果，有非常大的差異性。在本院對無線感測網路的在環境安全需求架構之研究下，感測節點的設計以省電、價格低廉、體積小、且具有感應環境裝置為目標，感測節點本身配備了簡單的感測、運算、無線傳輸，其可以針對環境中我們所感興趣的事物、與危害因子做偵測行為，並將所收集的資料先做簡單運算處理後，再透過無線傳輸單元將資料回傳給資料收集器，最後，我們就可以根據資料收集器所收集的資料，了解環境的狀態，並開發新穎有趣的應用。本院對環境安全無線感測網路佈建之設計考量因子與說明，如表四。

表四 環境安全無線感測網路佈建之設計考量因子與說明(作者整理)

項次	考量因子	理由與說明
1	感測應用環境	環境安全應用上所處之環境，大多為戶外環境或是各式酸性與鹼性的嚴峻的化學環境等。在機構與硬體設計上就必須能夠根據不同的感測環境而有著不同設計，以便能夠因應環境，還能夠正常蒐集環境中之資料。同時應用環境中有遮蔽、有信號雜訊、有電波干擾，因此，信號偵測的準則、信號雜訊比的提升、誤偵率的控制；電波干擾抑制、頻道管理與使用、調變解調技術、捷變技術、加解密技術皆需考量。
2	感測元件的選定	依據不同種類環境安全應用需求選定適當感測元件，考量多種感測元件，具資料融合(Data fusing)與事件判斷之可行性、資料感測資料靈敏度、精度、可靠度、量測距離與範圍須滿足應用需求、能在應用環境(可能是惡劣環境)中能正常工作、微型化且節能考量。
3	感測節點的價格	環境安全應用無線感測網路的形成需要感測節點大量的使用，因此為了考量整體的成本，如何降低感測節點本身硬體及設計，與網路建置部署上的價格，是十分重要的議題。

4	感測節點微型化	感測節點需微型化並與週遭環境與日常生活物件融合一體，符合人性與文化自然美學的需求，力求簡約(Simplicity)而高度科技整合的目標，讓社會人們的生活習慣改變最小、人機介面最少、享受而非接收的日常生活隨心所慾、無所不在的新生活型態與體驗。
5	感測網路的傳輸介質 (Transmission Media)	無線感測網路的傳輸介質通常包括利用紅外線、無線電波、以及光纖介質等作為傳輸媒介，而最常使用的傳輸介質是無線電波。因應不同環境選取適當的傳輸介質是非常重要的。
6	省電機制 (Power Consumption)	環境安全應用的範圍相當廣大而複雜，且感測節點本身能夠攜帶的電源十分有限，然而，感測節點在偵測環境、資料運算、以及將資料傳輸給後端的無線資料感應器時，往往都會耗費為數可觀的電力，倘若沒有特別的省電機制，感測節點本身的使用壽命勢必會大幅縮短，造成更換感測節點時耗費更多的成本，在廣大的戶外環境下，感測節點的更換並不容易。因此，如何提供一個良好的省電機制，可以說是無線感測網路所需要考量的重要課題。
7	無線感測網路的網路拓樸 (Sensor Network Topology)	環境安全需求下，感測節點的佈建往往是以非常大量的方式，透過船隻、飛機或是其他機械等，隨意散佈在感測環境中。因此在部署後，節點需自我組織，形成一個完整的無線網路之機制，盡量減少人為涉入，同時需考量後續維修與網路成長之可行性，當感測節點的位置受到環境因素，例如水力、風力或是人為移動等因素而改變，或是當感測節點電力耗弱或故障損壞時，造成網路拓樸的改變；這時候，系統就必須對拓樸的改變做出即時反應，並迅速對殘缺的網路拓樸做出修正。所以網路新增感測節點、網路基礎架構共享、網路應用認知自我組織、網路軟體更新等議題都有待突破。
8	整合分散的網路 (Integrated Distributed Network)	無線感測網路的優勢就是無線、低耗能、低成本、微型化、可廣為佈建，這些優勢的副作用就是短距、低速率資料傳輸。低速率資料並不能滿足所有環境安全需求，如影像傳輸、就需要高速率資料且大量資料的傳輸。在台灣無線感測網路就必須考量與超寬頻(UWB)、無線區域網路(WLAN)、網際網路、無線通訊 3G、或 WIMAX 等網通基礎通訊主幹整合，形成無線整合型網路(Wireless Integrated network system)。整合分散的網路系統考量感知訊息傳遞分階層處理、感知訊息分頻寬需求選擇適當通路及時機傳遞，除可節省頻寬成本、更減少人力投入需求，改變處處監視變為危安事件主動通知之理念。

伍、安全監控無線感測網路設計與應用實例

近年幾起彈藥庫、工廠爆炸事件，除造成社會不安，亦造成部分傷亡。這些亟需解決之社會關心問題，是科技開發之責任。經過安全需求分析與環境安全感測節點與網路設計考量之結果，中科院電子所同仁藉由無線感測網路技術，完成「廠房溫溼度監控與自動灑水系統」，期能對任何廠房安全需求監控與防災先期處置能有所貢獻，並以無線感測網路應用先國土安全防護之雛形製作進行評估作業。

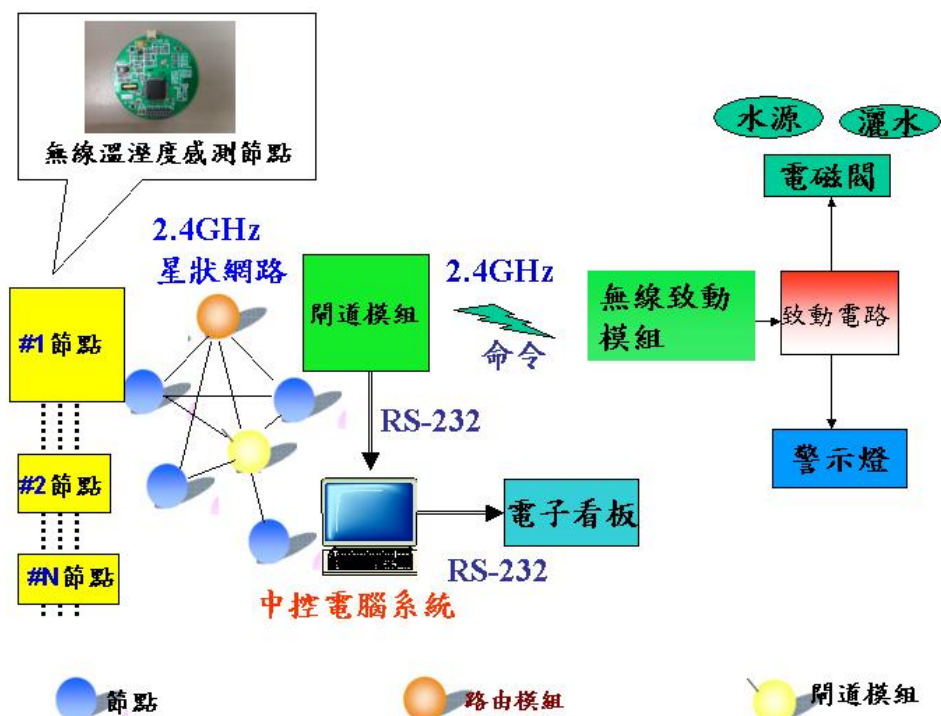
「廠房溫溼度監控與自動灑水系統」已完成初步測試驗證，證明功能、性能皆能達到防災預警與即時先期處置之目標。未來網路系統可擴充發展，依據不同安全領域需求，整合諸如生物性、物理性、化學性等不同種類感測元件，利用符合 IEEE 802.15.4、ZigBee 或主動式射頻辨識(Active RFID)等通訊協定之短距傳輸晶片，配合電源與介面電路設計，將可發展客製化、室內外、特定區域、或廣域空間之不同種類無線感測節點，完成水質、空氣、工廠環境等環境感測網路(Environment Sensor Network)，以維護國土安全需求。這些即時量測訊息，將連網至現有網通主幹，提供遠端監控、資訊服務與防災應變等效率作為，如圖二。



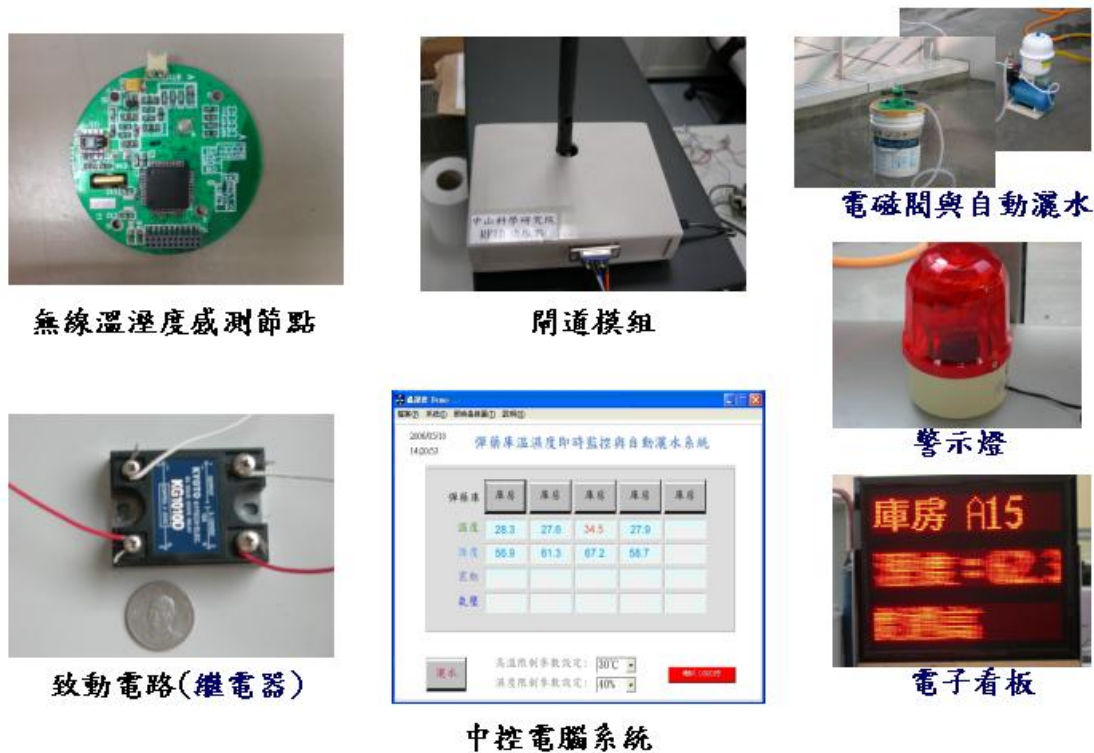
圖二 無線感測網路系統應用示意圖(作者繪製)

一、無線感測網路系統研製

「廠房溫溼度監控與自動灑水」系統在單一廠房系統運作架構圖(如圖三)，研製實體成果(如圖四)。主要包含之模組與功能分析如后：



圖三 「廠房溫溼度監控與自動灑水系統」系統運作架構圖(作者繪製)



圖四 「廠房溫溼度監控與自動灑水系統」實體成果圖(作者繪製)

(一)無線溫溼度感測節點

微型溫、溼度感測元件，整合符合 ZigBee 或主動式射頻辨識之通訊協定之短距傳輸晶片，配合電源與介面電路設計，加入防爆、抗干擾機構設計而成，應用於特殊安全性需求高之特定區域與環境之中。眾多無線溫溼度感測節點佈建成為星狀網路，未來亦可發展為網狀(Mesh Network)型態，無線感測溫溼度即時資料與所屬 ID 傳送到閘道模組。

(二)閘道模組

接收無線感測溫溼度網路即時資料與節點所屬 ID，以通用介面(例 RS232)傳至中控電腦，做進一步處理。

(三)中控電腦系統

處理閘道模組傳來區域中無線溫溼度感測節點的資訊之位置，具以判斷是否溫度過高有火災之虞，並以電子看板顯示，以為決策中心。

(四)無線致動模組

當中控電腦系統判斷溫度過高時，會無線下命令給無線致動模組。此模組利用 ZigBee 或主動式射頻辨識之通訊協定之短距傳輸晶片，配合電源與致動電路設計而成，可開關直流馬達執行灑水作用，並配合警示燈號顯示，達到即時防災之目的。

二、 國土安全無線感測網路

無線感測網路非常適合國軍在國土安全之應用。以「廠房溫溼度監控與自動灑水系統」實現為例，與現有監控系統之比較，其優點具有：

(一)有線改無線，佈建安裝的成本與時間都大幅降低。

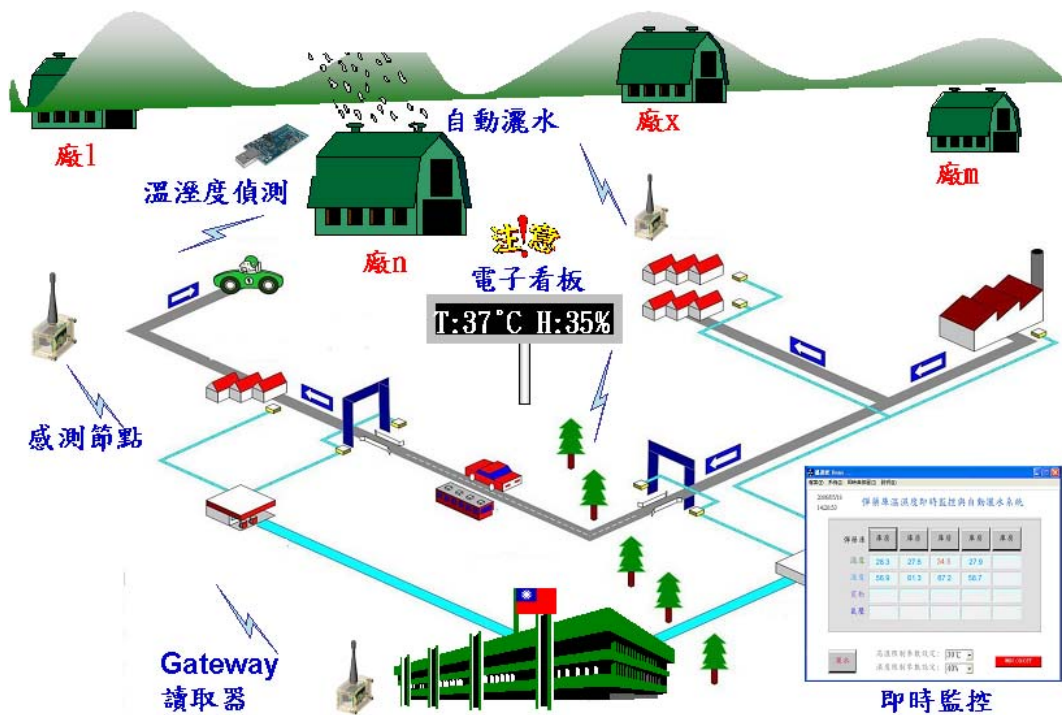
(二)無線感測網路，低成本、低資料量傳輸、低電源需求、高可靠度之特性，適合國軍生產與庫存廠房佈建與應用。

(三)無線感測網路具有擴充性能力，可依據廠房之變動做適切增減節點，亦可輕易與室外無線感測網路系統連結，或與網路主幹整合，擴大網路系統與應用。非常適合國軍安全防護範圍廣大、安全事件發生隨機與瞬間發生的、無法完全以人力獲得監控與處置之特性。

(四)無線感測網路具有自我組織能力，當某個節點故障時，其所相互影響之節點，能自我再找出鄰近的節點執行傳收任務，形成強健網路系統。

(五)無線感測網路具有節點與閘道模組間之雙向溝通能力，中控電腦能即時了解所有網路節點之健康狀態，對維修相當方便。

各單一運作之「廠房溫溼度監控與自動灑水系統」可藉由網路主幹傳遞資料。到遠端中控中心作終端集中決策作為，亦可利用路由模組再與室外無線感測網路系統連結，傳至鄰近廠房，做區域聯防之用，詳如圖五。



圖五 無線感測區域聯防與集中處理示意圖(作者繪製)

基本上無線感測網路所實現的想法，是要以環境本身為資訊收集、處理、計算、分類與派送之平台，其整合了環境辨識技術、無線感測技術、無線通訊技術與資訊應用整合技術等。而效益提昇與問題改善目標是要達到危安即時偵測、監控、警示、應變與紀錄之效率作為，成為普及運算，無所不在之U化社會，如圖六。

環境辨識技術 + 無線感測技術 + 無線通訊技術 + 資訊應用整合技術

偵測 → 監控 → 警示 → 應變 → 紀錄



圖六 U化社會技術與效益(作者繪製)

結論

無線感測網路系統發展，在台灣仍屬萌芽階段，新系統納入社會體系運作

中，需要系統整合業者積極投入，研發技術標準，發展通用界面，高度整合現有資源。政府則需制定 U 化社會產業相關法規或制度，鼓勵技術與整合產業發展標準與規範，擴大創新異業結合應用示範推廣，才有機會形成 U 化社會產業聚落，並逐漸醞釀普及運算，無所不在之新的生活型態與方式。

無線感測網路系統發展在國土安全發展願景，需配合全面國防政策，以達到營區自動化安全警監視、戰場信息監視、國土保安監控、火炸藥儲存與使用環境監控、敵軍人員與車輛較大規模移動監視、與化學武器與空氣、水質監測等目的，能與台灣整體 U 化社會資訊流相輔相成，達到全民國防的終極目標。

無線感測網路是實現隨心所慾、無所不在的台灣環境安全不可或缺的關鍵技術之一，但並非全部，唯有充分與高度整合台灣既有的資通技術、基礎建設與服務模式，給使用者簡單通用、喜悅新奇的使用模式，才有機會達成智慧化空間整合之社會遠景。無線感測網路基礎建置時，需善用台灣既有之任何已存在之基礎設施再融入無線感測的新功能與新應用，才有可能降低成本、開創新局。雖然科技日新月異，進步一日千里，但人類的生活習慣與生活方式改變卻是一種如釀酒般的文化醞釀，一點都急不得，科技的進步，並不是要提供複雜的工程模式而是提供簡約的生活型態，這代表更多科技整合的努力與巧思需要去努力與實現。

參考資料

1. www.worldscibooks.com/compsci/etextbook/6288/6288_chap1.pdf .
2. Uttam Sengupta , John Sherry , 「Future Vision 2015: Building a User-Focused Vision for Future Technology 」, www.intel.com/technology/magazine/research/rs09042.pdf .
3. Prabal Dutta, Mike Grimmer, Anish Arora, Steven Bibyk, and David Culler, ” DESIGN OF A WIRELESS SENSOR NETWORK PLATFORM FOR DETECTING RARE, RANDOM, AND EPHEMERAL EVENTS ”, <http://www.eecs.berkeley.edu/~prabal/pubs/papers/dutta04xsm.pdf> .
4. Slobodanka Tomic, ”Network-Growing Scenarios in IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks”, http://www.ieee-infocom.org/Posters/1568980086_Network-Growing%20Scenarios%20in%20IEEE%20802.15.4/1568980086.pdf .
5. Phil Buonadonna, David Gay, Joseph M. Hellerstein., Wei Hong and Samuel Madden, ” TASK: Sensor Network in a Box ” , <http://db.cs.berkeley.edu/papers/ewsn05-task.pdf> .