

ZigBee 無線感測網路之應用研究

盧坤勇

國立聯合大學電子工程系副教授

e-mail: carlu@nuu.edu.tw

摘要

隨著微機電科技的進步與無線傳輸技術之蓬勃發展,Wireless Sensor Network(WSN) 的應用範圍越來越廣,透過布建大量、便宜而低功耗的感測及通訊裝置,在各種複雜的無線網路互聯互通的環境下,搭配各類數位式資料搜集裝置,在任何時間、任何地點將可輕易的取得各類資訊,諸如老人生理資訊、住家環境狀態監控、入侵安全防護,生產線之產品資訊、物流體系之物品動態資訊等,進而針對個人需求來提供適當的服務,或是針對整體生產系統來提供即時的決策資訊。為了實現無所不在(Ubiquitous Networking)運算環境之理想,本研究提出一個以 ZigBee 無線通訊協定建構而成的無線私用網路(WPAN),搭配各式各樣之數位感應裝置或儀器來搜集各類即時資訊。此研究之主要目的,在於降低一般用戶或是生產機構引用無線私用網路之門檻,希望透過此研究可儘早實現智慧家庭之夢想,對於生產與作業系統也能快速獲得各類有用的決策資訊。

關鍵詞：無線感測網路、ZigBee、監控、系統模擬、即時系統

1. 前言

近年來,隨著微機電科技的進步與無線傳輸技術之蓬勃發展,無線感測網路 (Wireless Sensor Network, WSN) 的應用範圍越來越廣,透過布建大量、便宜而低功耗的感測及通訊裝置,在各種複雜的無線網路互聯互通的環境下,搭配各類固定式或攜帶式的電子資料搜集裝置,在任何時間、任何地點將可輕易的取得各類實體環境資訊,諸如老人生理資訊、住家環境狀態監控、入侵安全防護,生產線之產品資訊、物流體系之物品動態資訊等,進而針對個人需求來提供適當的服務,或是針對整體生產系統來提供即時的決策資訊[2]。

在 ZigBee 無線通訊模組之蓬勃發展下,加上各類數位感測儀器之普及,上述無線居家照護、週遭環境資訊、安全監控、或是應用在生產作業系統之系統資訊搜集,行動運算及無所不在的網路世界將逐漸成為我們生活環境

的一部分,人類將進入所謂智慧型生活環境時代,而資訊科技除了原有應用的領域外,也將在人們居家生活中大放異彩,這是近年來「Ubiquitous Networking」急欲實現的概念。許多學者也陸續提出各種前導型應用案例,常見的案例簡述如下。

在醫療照護方面：透過臨床醫療偵測網路之布建,可以在無線無阻隔之情況下,快速擷取病人心跳、血壓、脈搏等生理資訊,並可依當下之變動資訊來下達適當診療指示[5, 11]。

在農牧業應用方面：透過遠距天候偵測系統,可以立即得知分散在四處之農場、溫室、魚塭等之環境資訊,進而調整適當之供水量、溫濕度控制,或是適當之進排氣量[19]。

在結構安全監控方面：無線偵測網路可快速且廣泛的怖建在橋樑、建築物、大型機構(例如飛機、艦體等)需要持續監控安全需求之目標物體上,運用此感測網路可大幅降低布建成本與施工困難度[17, 20]。

在居家安全與照護方面：運用無線偵測網路亦可在不需布線(更為隱密)的情況下,針對門窗入侵、瓦斯爐與熱水器之漏氣、居家照護之老人生理資訊等蒐集相關資訊與建構自動通報系統[18]。

為了實現前述理想及降低導入此應用系統之門檻,本研究提出一個以ZigBee無線通訊協定建構而成的無線私用網路(WPAN),搭配各式各樣之數位式感應裝置或儀器來搜集各類即時資訊。此外,本研究也提出一套整合式資訊系統,其功能包括網路工作環境參數設定、監控指令集產生器、環境資訊模擬產生器、自動資料搜集與剖析介面。希望透過此研究可降低一般用戶引用無線私用網路之技術障礙,儘早實現智慧家庭之夢想,對於生產與作業系統也能快速獲得各類有用的決策資訊。

2. 關鍵問題描述

依據學者 Baronti 等之調查[14],在布建無線感測網路系統時,應從以下幾個構面來考

慮。

2.1 硬體方面

由於實體環境需求，無線感測網路模組普遍朝向小尺寸及低功耗之特性來設計，同時為了方便與感測元件整合，在選擇硬體模組時，應考慮該模組是否提供 RISC 指令集、泛用型非同步傳送及接收通道 (UART)，以及類比數位轉換器 (ADC) 和計時器。

在射頻之選用方面，供一般感測元件搭配之最為簡便模式，乃採用 Carrier Sense Multiple Access (CSMA) Medium Access Control (MAC) 協定，因為此協定可在不需發照（可應用在 315/433/868/916 MHz）即享有 20-50kbps 之頻寬，新一代之模組更可在

2.4GHz 及 250kbps 之頻寬下使用。

此外，在能源提供方面，若需長時間在戶外使用，則需考慮硬體模組是否可與太陽能電池整合。

2.2 ZigBee 與 802.15.4 概述

所謂 ZigBee 乃一商業聯盟組織[24]，其成立宗旨乃為發展一個能可靠、合乎成本效益及低功耗之無線網路標準（含產品），其使用技術乃依據 IEEE 802.15.4 之標準，並特別針對實體層及 MAC 層定義相關網路架構。ZigBee 網路架構如圖 1 所示，其中 PHY 與 MAC 層由 IEEE 制定標準，而 NWK 與 APL(包含、APS、APO、ZDO)由 ZigBee 聯盟制定標準。

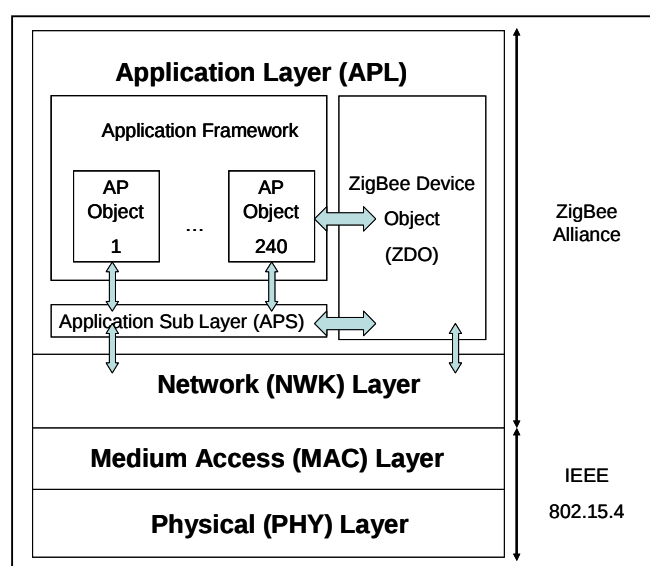


圖 1. ZigBee 網路架構與運作功能示意圖

在實體層方面，此網路支援三種頻帶：2450 MHz(搭配 16 個通道)、915 MHz(搭配 10 個通道)及 868 MHz(搭配 1 個通道)。前述頻帶均使用 DSSS 接取模式，而 2450 MHz 另支援 O-QPSK 接取模式搭配中繼點為 915 及 868 MHz 模式。

有關 MAC 層方面，ZigBee 定義了兩種節點型式：Reduced Function Devices (RFDs) 和 Full Function Devices (FFDs)。在網路拓樸方面，ZigBee 使用三種網路拓樸：Star、Tree 及 Mesh。FFD 通常用於 PAN 網路之協調者及充當 Router，而 RFD 則用於端點之資料接取及一般控制器[12]。

2.3 應用層(Application Layer)

ZigBee 應用層是由一組 APO、ZDO 及 APS 所組成，ZigBee 應用可由分布在網路節

點上之一組 APO(Application Object) 所組成，APO 可由軟體來實現，它用來控制硬體元件，包括變壓器、開關及顯示燈。ZDO 則負責提供對應之服務給 APO 模組，包括網路之搜尋及聯網，同時負責網路通訊及網路安全控管；APS 則負責在 APO 和 ZDO 之間轉送資料。在實作 ZigBee 應用時，所有介面屬性及其訊息格式必須符合 ZigBee 聯盟制定之標準，而 ZigBee 應用組件之提供者，其產品及介面屬性必須能與聯盟成員之產品互相聯通。

2.4 節能方面

以無線感測網路應用而言，能源效率是一項非常重要之考慮因素，尤其是應用在戶外而需長成間工作之模組，許多研究提出相關之節能建議。Chen 從從聯網之路徑著手[4, 21]，Zhao 及 Guibas 從 MAC 應用層著手[22]，

Hohlt 等從資料流之跨層技術著手[8, 23]，而 Santi 則從網路拓樸控制技術著手[15, 16]。

2.5 途程規劃

隨著網路節點的增加，資料傳送途程規劃也成為一項重要課題，常見的途程規劃技術及優缺點摘述如下：

- 途程樹(Routing Trees)：當網路需要傳送資料時，每個節點只需記住其父節點，然後將資料依途程樹之邊(Edge)往回送即可，此法實作簡單且容易維護，但無法用於端點對端點之資料傳送[9]。
- 貪婪法則(Greedy Routing)：以貪婪法則來建立途程路徑，此法實作也是非常簡單，但是一個節點並無法自行得知其合作夥伴，當途程路徑中斷時，系統也無法預知將發生何事[10]。
- 階層法則(Hierarchical Routing)：此法先將 Node 依分布區域來分群，每一群指定一個 Vertex 節點，群內節點需與它群節點通訊時，需經群內之 Vertex 節點繞出，群間之途程則採貪婪法則來建立[1, 6]，此法乃用於改善貪婪法則之缺點。

2.6 資料管理

建構感測網路之主要目標，在於偵測環境資訊並予以擷取出來。對於網路用戶而言，如何方便的與網路交談、下達指令，從而取得與管理所需資料將是建構感測網路之核心課題。在實作應用介面時，兩種技術常被用來發展此類應用系統。其一為以事件導向為基礎之方法，透過定期感測器事件偵測，比對事前設定之條件或資料樣板，若前述條件穩合則觸發對應事件並取出資料。採用此法時，鄰近之節點必須高度配合來達成較高的信賴度。

另一種常用技術乃透過長時間之觀測並持續擷取樣本資料，從而組成資料流並予以後送，此法很容易造成大的資料流致使資料封包被系統拋棄。此外，使用此法也需考慮節點途程間之負載平衡問題。

2.8 結語

雖然 ZigBee 無線感測網路正蓬勃發展，在布建無線感測網路系統時，如前述關鍵問題得知，所需考慮之因素的確非常多，因此進入門檻也非想像中的低。為了

能降低引用門檻，本研究乃從系統介面設計及資料管理著手，希望提出一個非常友善的人機整合介面，包含網路工作環境參數設定、實體網路布建、感測資料剖析等，使得一般實務界在無專業知識的情況下，也能輕鬆的建構 ZigBee 無線感測網路。此外，透過此系統之規劃與實現，使得一般在學學生也能深入瞭解無線通訊網路之實務應用。

3. 無線網路實作

為了實現前述理想，本研究引用 ZigBee 無線通訊協定及模組來建構無線私用網路(WPAN)，在端點應用方面則搭配各式數位式感應裝置或儀器來搜集各類即時資訊。此外，為了降低一般用戶或是生產機構引用無線感測網路之門檻，本研究開發一套整合式資訊系統，其功能包括網路工作環境參數設定、監控指令集產生器、環境資訊模擬產生器、自動資料搜集與剖析介面。

3.1 網路架構

本研究採用赫立訊科技生產的 IP-Link 2220 無線通訊模組來建構感測網路，IP-Link 2220 非常適用用於短距離無線的機器對機器(Machine-to-Machine)的通訊，在硬體上 IP-Link 2220 提供了工業標準的 RS-232、RS-485 及 DIO 介面，因此可以方便的與各種感測儀器連接，或是操控一般數位控制裝置。通訊部份則使用 802.15.4 通訊標準方式來傳遞資料，網路模式可設定為 Mesh、Star、Cluster-tree 等網路拓樸，更可提昇網路的信賴度，充份滿足各種不同短距離無線應用的需求。IP-Link 2220 除了可利用上述各種拓樸或點對點方式進行短距離網路連結與資料傳輸，IP-Link 2220 的 Master 節點亦可直接與赫立訊科技 MA8 系列 GPRS/CDMA 產品連接，進行與長距離無線資料傳輸搭配整合，形成整體的無線 M2M 架構。

系統架構如圖 2 所示，在構建應用系統時，前端搭配 ZigBee 通訊協定之裝置來連結資料搜集元件或控制元件，中繼部份則以 GPRS 模組透過 GSM 來聯上 Internet 網路(也可直接與 PC 連接)，後端則為控制中心及資料庫伺服器。系統模組及元件功能概述於後。

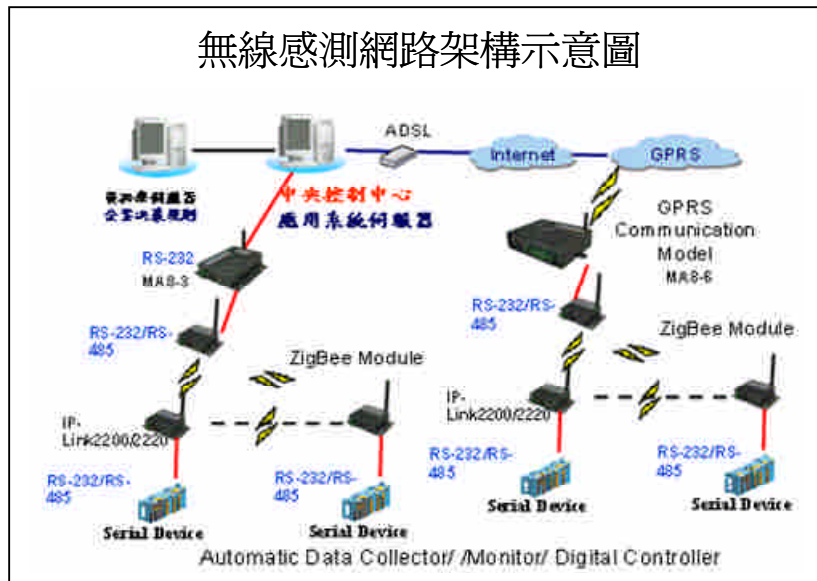


圖 2. 系統架構示意圖

3.1.1 Serial Device

串接使用 RS232 或 RS485 通訊協定之裝置，諸如 RFID 讀取裝置，條碼讀取裝置，數位檢測/感測裝置，或是數位控制裝置。此部份之用途主要是搜集前端資料，或是回授決策資訊之控制信號。

3.1.2 ZigBee Module

此模組乃使用 IEEE 802.15.4 與 ZigBee Alliance 兩個組織所制定標準之無線個人區域網路(WPANS)，此協定介於 IEEE 802.11 與 WiFi 之間，使用 2.4GHz 的 ISM、915MHz 及 868MHz 之傳輸頻率，傳輸距離介於 10~75 米之間，傳輸速率介於 20kbps~250kbps 之間。每個網路可搭配 65,535 個節點，因此可以方便的構建區域形資料搜集與控制系統。

雖然 ZigBe 傳輸短距離不長，但由於其網路架構可為 Star, Tree, Mesh，透過節點間之接力傳送，使得傳輸距離可依需要延伸。實作系統時，可指定一個節點擔負 Master 之責任，其功能在於轉傳各節點與中繼模組(GPRS Module)之資料。其餘節點則負責傳送資料，或是將命令送給控制系統。

3.1.3 GPRS Communication Module

GPRS 是一種移動式資料傳輸服務協定，乃透過 GSM 系統來提供用戶之數據傳輸服務，常用於 WAP Access, SMS, MMS, 以及 Internet 之服務。由於其計費方式是依據傳送內容之多寡，有別於傳統以時間計費的方式，

因此非常適合企業間的資料傳輸服務。此模組之功能乃負責將前端送來的資料，透過 Internet 轉送至後端的伺服器，或是將伺服器送來之命令轉傳至前端的控制器。

3.1.4 Control Server

此模組用來管理系統之各節點之工作參數設定與維護。啟用系統前，可用來設定各傳輸節點之屬性。啟用系統後，則可用來監控節點之運作狀態，將相關資料轉存至後端的資料庫，或是向前端傳送相關指令。當後端資料庫收到新的紀錄時，將觸發對應之 Trigger 事件觸發器，此時 Control Server 將啟動對應之指令集，進而執行自動通報系統或操控各類控制裝置（此部份將作為進階研究）。

3.1.5 Database Server

此模組用來儲存下列資訊：

- 各類系統參數
- 系統指令集
- 事件觸發指令
- 企業決策規則

3.2 系統運作原理

IP-Link 2220 有三種網路模式，分別是 Binary Protocol、Transparent-Broadcast 及 Transparent-P2P 模式。IP-Link 2220 採用 Full Mesh 架構，整個網路設計上採取一個 Master 節點，其他的 Client 均是使用 RN+ 的網路節點，Mesh 網路提供多條備份的通信路徑，如

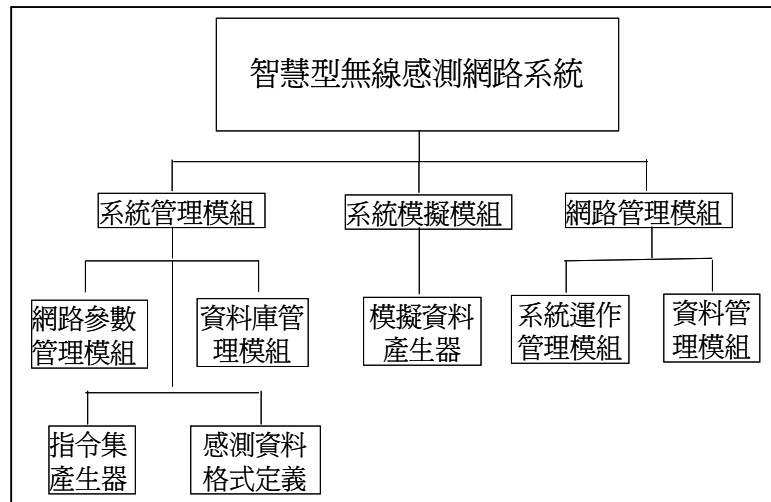


圖 3. 智慧型無線感測網路系統架構圖

果一條路徑因某種原因產生故障(包括干擾)，網路自動通過備用路徑傳送訊息。這種 Mesh 拓撲增加了整個網路的可靠度，同時由於 Mesh 配置相當容易，因為要增加新的裝置或重新配置現有的設備是非常簡單的。

4. 資訊系統架構

本研究建議的資訊系統如圖 3 所示，由系統管理模組、系統模擬模組及網路管理模組所組成，下分七個子模組，各模組之功能簡述如下。

4.1 系統管理模組

此模組用於產生及管理各類系統指令、工作參數及端點感測裝置之資料格式，設定資料則儲存在資料庫內，預設資料庫為 Access，也可改用 MySQL。

4.1.1 網路參數管理模組

此模組用於管理下列資料：

- 通訊埠之通訊格式
- ZigBee 模組之工作參數。
- 連結感測器資料格式及資料接收方式
- 制動器之處理方式。

4.1.2 資料庫管理模組

此模組用於管理各類屬性資料表及感測網路傳入的資料，也可處理進階資料，諸如圖示、群組、匯出及刪除。感測資料將以 ZigBee 模組為單位，分別儲存在各自的資料表內，以方便其它應用系統之取用，例如檢驗紀錄表之製作。

4.1.3 指令集產生器

用於產生各類 ZigBee 模組之控制指令，IP-Link 2220 之控制指令分成下列五種類型：

- AT Command Mode
- Command Request：要求執行指令
- Command Response：執行結果回覆
- Data Request：要求傳送資料
- Acknowledgment：回覆資料

事前可由使用者依預設介面來產生指令，完成之指令將儲存在指令集資料表內，當啟動感測網路時，可由用戶選用預設之指令集來設定網路環境及啟動系統。

4.1.4 感測資料格式定義

用於設定各類感測元件之資料格式，感測網路傳回之 Payload 將依此格式來剖析資料。若無實際之感測元件可用時(一般學校多半如此)，可用 PC 串接 ZigBee 來模擬資料。

4.2 系統模擬模組

系統模擬模組是由模擬資料產生器及模擬事件觸發器所組成。當無實際感測元件可用時，本系統允許以 PC 充當感測元件，以 Com Port 與 ZigBee 連結，然後依預設之資料格式自動產生模擬資料。此時系統將被設定為 Client，模擬資料將透過感測網路送至 Server，而 Server 之對應指令也可經感測網路送至 Client。

4.3 網路管理模組

此部份為本研究之核心模組，用來啟動、監控與管理整個感測網路之運作。網路管理模

組由下列四個子模組所組成，對應功能摘述如後。

4.3.1 系統運作管理模組

系統啟動方式，可由用戶選用預設之指令集來啟動系統，而指令集將依不同格式而有不同之運作方式，運作方式說明如下：

- Initiate：只在啟動系統時執行一次。
- Continue：在系統運作期間持續被執行。
- Interval：依間隔時間來執行。
- Trigger：當預設事件被觸發時才執行。

4.3.2 資料管理模組

此模組負責剖析感測網路轉送來的 Payload，可依各 Node 事前設定之資料格式予以剖析為可供系統存取之資料格式，符合預設格式的資料將被儲存在對應的資料表內。

5. 系統模擬

本研究完成之雛形系統及運行方式，分別以 Server 端、Client 端，及指令和系統參數管理介面說明如下。

5.1 Server 運行

圖 4 為模擬 Server 之應用介面。首先由用戶選定 PC 與 Master 接口之通訊埠代號，然後

指定此台 PC 扮演之角色為 Server，被開啟的 PC 即被模擬成 Server。接著用戶可選擇運行模式為手動或自動，選擇手動方式時，用戶可自行下個別指令給感測網路；選擇自動模式時，用戶需選定指令集，再以批次方式將指令集下給感測網路。

圖 4 之介面分成四個部份：Control Panel、AT Mode、Binary Mode 及 Transparent Mode。Control Panel 為系統管理面板，AT Mode 用於設定各類 AT 指令，Binary Mode 用於設定各類二進制指令，或是提示感測網路接收的資料及回覆信息，而 Transparent Mode 則用於提示以 ASCII 編碼的接收資料。

Server 接收到的各類資料或回覆信息，將提示在面板上的對應方塊，也可選擇儲存在後端資料庫。系統運作流程如圖 5 所示。

5.2 Client 運行

圖 6 為模擬 Client 之應用介面。首先由用戶選定 PC 與 Client Node 接口之通訊埠代號，然後指定此台 PC 扮演之角色為 Client 及選擇運行模式為手動，被開啟的 PC 即被模擬成 Client。設成 Client 模式之 PC，只能傳送資料給 Server，若 Server 有傳送指令或資料給 Client Node 時，對應信息將提示在對應方塊上。

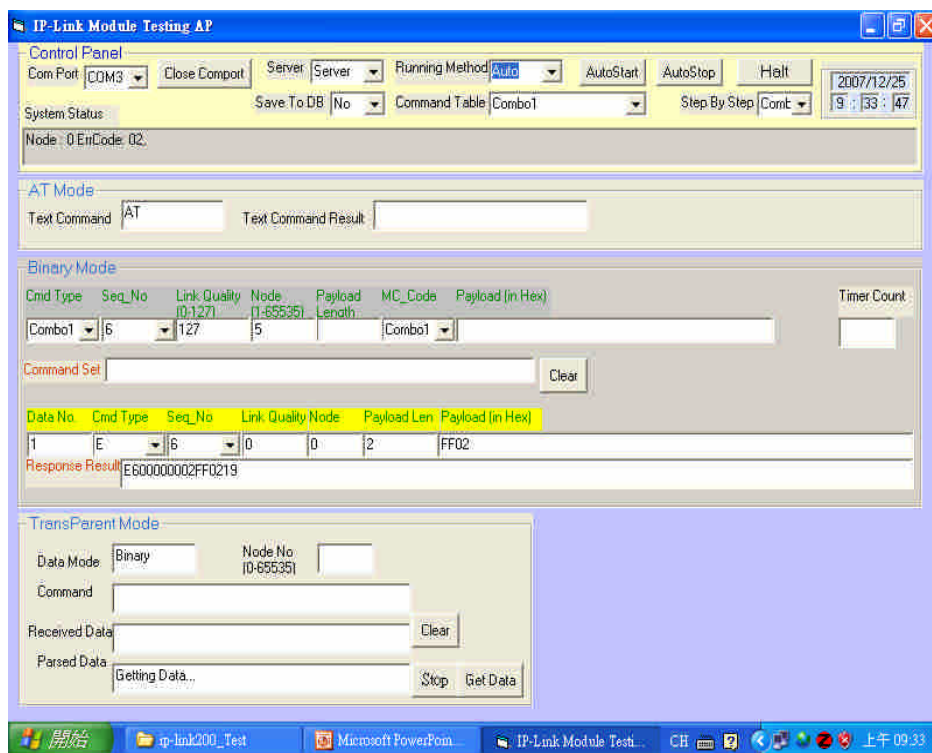


圖 4. Server 端運行工作畫面

模擬 Client 之介面與 Server 介面類似，但多了一個 Data Generator，此模組可依預設之感測器資料格式自動產生資料。在無感測器可用時，資料產生器將是無線感測網路之得力助手。

5.3 指令和系統參數管理

由於篇幅限制，本文僅就指令集產生器及設定結果加以說明，指令集產生器應用介面如

圖 7 所示，用戶可自行選用各式指令或輸入相關指令參數，完成的指令集將儲存在資料表內備用，當啟動 Sever 時，用戶可選取備用指令集來管理感測網路，圖 8 為指令集範例。用戶若需設定感測資料格式，可選用圖 9 所示之工作介面設定各類感測資料格式。在系統運作期間，感測網路轉來之 Payload 將依此格式來剖析資料。

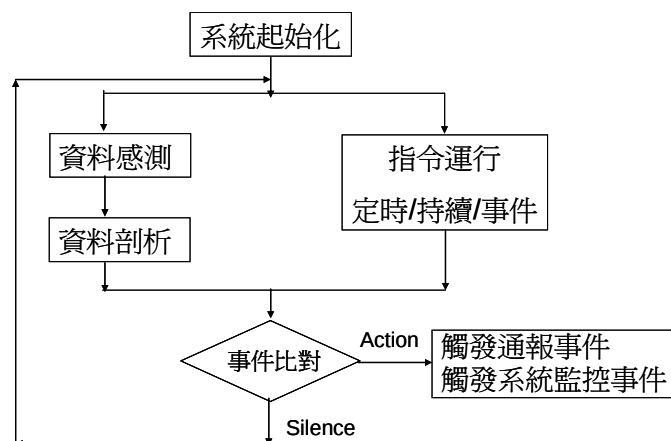


圖 5 系統運作流程示意圖

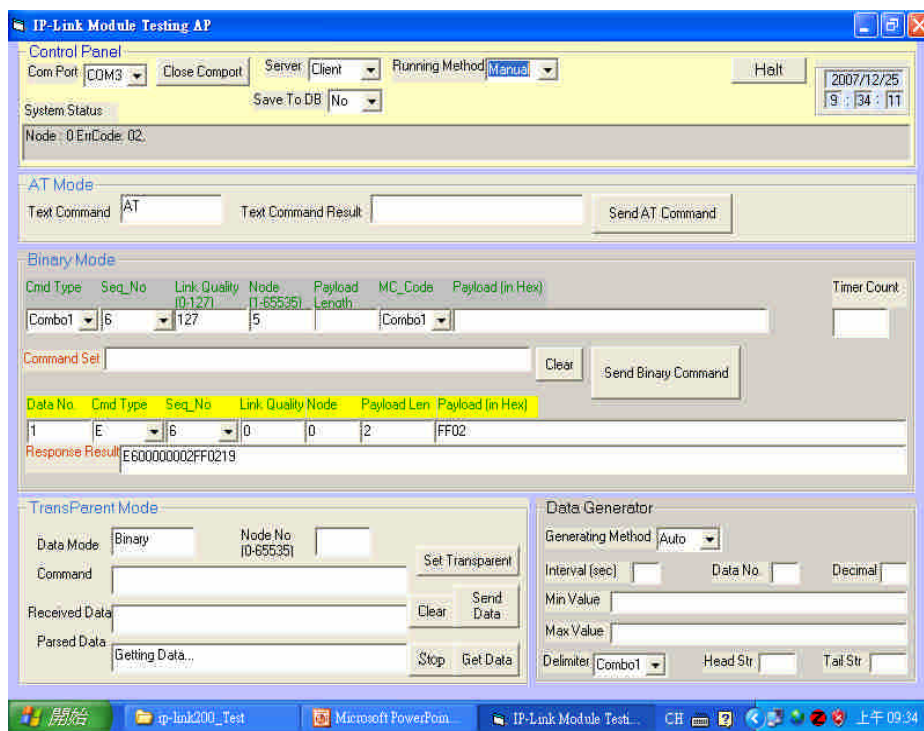


圖 6. Client 端運行工作畫面

圖 7 設定指令集工作畫面

SeqNo	Send	Receiv	CmdType	CommandSet	Send Time	Interv	Event	Enable	Descr
0	0	1	AT	=	Initiate	0	-1	☒	System Initiating
1	0	5	Binary	867F000503AD0400	Initiate	0	-1	☒	System Initiating
2	0	5	Binary	A57F00050165	Interval	2	-1	☐	Get Test Data
3	0	5	Binary	867F000503AD0401	Trigger	0	0	☒	SetIO, Data
4	0	5	Binary	867F000503AD0400	Trigger	0	1	☒	SetIO, Data
5	0	1	Binary	A67F0001031B5205	Continue	0	-1	☒	Read RFID Card
6	0	5	Binary	867F000503AD0401	Trigger	0	2	☐	SetIO, SQL
7	0	5	Binary	867F000502AC04	Interval	100	-1	☐	GetIO
8	0	5	Binary	867F000503AD0400	Trigger	0	3	☐	SetIO, IO
9	0	5	Binary	867F00050DAED50000020300000006320000	Initiate	0	-1	☐	EX: Set Sleep Mode
10	0	0	Binary	867F000504E0020332	Initiate	0	-1	☐	EX: Wake the Slave

圖 8 存檔指令集範例

圖 9 感測資料格式設定畫面

5.4 實務應用

由於本系統所有指令及工作參數都可由用戶自行設定，而設定結果則儲存資料庫內，用戶也可自行維護，因此本模擬系統可輕易的轉至其他領域，諸如下列應用系統。

- 農場溫室之環境監控
- 環境污染監控與預警之應用
- 病房/病人病理資訊之監控與預警
- 老人居家照護資訊搜集與預警

6. 結語

由於企業所處之環境瞬息萬變，在此情境下，誰能快速掌握系統資訊，從而研擬出適切的決策並立即回應，誰就能掌握機先，因而獲得更多的生存利基。雖然即時資料搜集系統能有效掌握現狀資訊，然而傳統的企業資訊系統多半是以人工處理方式來彙整決策資訊，此種決策模式與現時需求仍有時間上的落差，因而經常喪失了寶貴的先機，因此好的即時化資訊

系統應該延伸至即時化的決策應用[3, 5, 13]。

本研究提出的應用系統可協助企業快速達成下列營運目標，以及建構一個具備快速回應之管理機制。

- 透過無限網路之應用，使得各類監控與感測環境邁向無線化。
- 可快速模擬各類監控環境，諸如老人看護、智慧家庭、工廠自動化等。
- 協助企業建立更為全面的 e 化企業管理機制。
- 協助企業建立快速回應(QR)機制，有效提升企業決策效率。
- 使得企業管理系統能邁入自動化與智慧化。

參考文獻

- [1]Brack , J., J. Gao, A. (Andrew) Jiang, MAP: medial axis based geometric routing in sensor networks, in: Proceedings of the 11th International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2005), Cologne, Germany, August – September 2005, pp. 88 – 102.
- [2]Bulusu, N. J. Heidemann, D. Estrin, GPS-less low cost outdoor localization for very small devices, IEEE Personal Communications Magazine 7 (5) (2000) 28–34.
- [3]Centioli, C., Iannone, F., Ledauphin, M., Panella, M. , Pangione , L., Podda, S., Vitale, V. , Zaccarian , L., 2005. Using Real Time Workshop for rapid and reliable control implementation in the Frascati Tokamak Upgrade Feedback Control System running under RTAI-GNU/Linux. Fusion Engineering and Design 74, pp.593-597.
- [4]Chen , B., K. Jamieson, H. Balakrishnan, R. Morris, Span: an energy efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks, ACM Wireless Networks Journal 8 (5) (2002) 481 – 494.
- [5]Cowling, P. and Johansson, M., 2002. Using real time information for effective dynamic scheduling. European Journal of Operational Research 139, pp.230-244.
- [6]Fang , Q., J. Gao, L.J. Guibas, V. de Silva, L. Zhang, GLIDER: gradient landmark-based distributed routing for sensor networks, in Proceedings of the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Infocom 2005), Miami, FL, USA, March 2005, pp. 339 – 350.
- [7]Gao, T., D. Greenspan, M. Welsh, Improving patient monitoring and tracking in emergency response, in: Proceedings of the International Conference on Information Communication Technologies in Health, July 2005.
- [8]Hohlt, B. t, L. Doherty, E. Brewer, Flexible power scheduling for sensor networks, in: Proceedings of the 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN 2004), Berkeley, CA, USA, April 2004, pp. 205 – 214.
- [9]Intanagonwiwat, C., R. Govindan, D. Estrin, Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks, in: Proceedings of the 6th International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2000), Boston, MA, USA, August 2000, pp. 56 – 67.
- [10]Kranakis , E., H. Singh, J. Urrutia, Compass routing on geometric networks, in: Proceedings of the 11th Canadian Conference on Computational Geometry (CCCG’ 99), Vancouver, BC, Canada, August 1999, pp. 51 – 54.
- [11]Malan , D., T. Fulford-Jones, M. Welsh, S. Moulton, CodeBlue: an ad hoc sensor network infrastructure for emergency medical care, in Proceedings of the International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks, April 2004.
- [12]Miši, J. c, S. Shafi, and V. B. Mišić, Performance limitations of the MAC layer in 802.15.4 low rate WPAN, *Computer Communications* Volume: 29, Issue: 13-14, August 21, 2006, pp. 2534-2541
- [13]Panella, M.,*et al.*, “A commercial real-time manufacturing integration platform for the new control system on FTU,” *Fusion Engineering and Design*, 43, pp.377-382, 1999.
- [14]Paolo Baronti, Prashant Pillai , Vince W.C. Chook, Stefano Chessa, Alberto Gotta, Y. Fun Hu, Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards, *Computer Communications* 30 (2007) 1655 – 1695.
- [15]Santi , P., Topology control in wireless ad hoc and sensor networks, *ACM Computing Surveys* 37 (2) (2005) 164 – 194.
- [16]Santi , P., Topology control in wireless ad hoc and sensor networks, Wiley, London, New York, 2005.
- [17]Szewczyk, R., A. Mainwaring, J. Polastre, J. Anderson, D. Culler, An analysis of a large

- scale habitat monitoring application, in: Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2004), Baltimore, MD, USA, November 2004, pp. 214–226.
- [18]Valente , A., R. Morais, A. Tuli, J.W. Hopmans, and G.J. Kluitenberg, Multi-functional probe for small-scale simultaneous measurements of soil thermal properties, water content, and electrical conductivity, *Sensors & Actuators: A. Physical*, Volume: 132, Issue: 1, November 8, 2006, pp. 70-77
- [19]Wan, N. g, N. Zhang, and M. Wang, Wireless sensors in agriculture and food industry - Recent development and future perspective, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume: 50, Issue: 1, January, 2006, pp. 1-14.
- [20]Wang, H. J. Elson, L. Girod, D. Estrin, K. Yao, Target classification and localization in habitat monitoring, in: Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP 2003), Hong Kong, April 2003, pp. 844–847.
- [21]Xu , Y., J. Heidemann, D. Estrin, Geography informed energy conservation for ad hoc routing, in: Proceedings of the 7th International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2001), Rome, Italy, July 2001, pp. 70 – 84.
- [22]Zhao , F., L. Guibas, *Wireless Sensor Networks - An Information Processing Approach*, Morgan Kaufman Publisher, S. Francisco, 2004.
- [23]Zheng , R., R. Kravets, On-demand power management for ad hoc networks, in Proceedings of the 22nd Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Infocom 2003), San Francisco, CA, USA, March – April 2003, pp. 481 – 491.
- [24]ZigBee Alliance, ZigBee Specifications, version 1.0, April 2005.
- [25]<http://en.wikipedia.org/wiki/GPRS>
- [26]<http://en.wikipedia.org/wiki/ZigBee>
- [27][http:// www.helicom.com](http://www.helicom.com)
- [28]<http://www.mysql.com>