

# 高可靠度現場無線感測網路系統技術

## High Reliability Field Wireless Sensor Network System Technology

林旭政 陳昌憲 洪毓蔚 陳銘哲 李曉暉  
Hsu-Cheng Lin, Chang-Hsien Chen, Yu-Wei Hung, Ming-Che Chen, Hsiao-Hui Lee

### 中文摘要

工廠現場即時監控是提升生產管理與產品品質的重要利器，而傳統的有線網路監控系統成本高且佈線不易，不利於中小型或運行中的工廠，因此無線工業感測網路逐漸成為智慧工廠未來主流。然工廠環境中充斥著作業人員與運輸機具移動造成訊號受阻隔而衰減、混雜的無線干擾(例如：無線對講機、馬達運轉所衍生的寬頻雜訊等)、或是機台林立而造成多路徑效應等問題，對於無線傳輸可靠度影響甚鉅。再者無線網路頻寬與時序同步能力遠不如有線網路，面對工廠多元化傳輸需求，將是一大挑戰。總而言之，無線網路在工廠實務應用上仍未能全然滿足設備干擾、資料同步與服務品質等需求。

本計畫設計發展之高可靠度現場無線感測網路系統提供感測資料收集應用，本系統主要包含三個部分：mote感測節點、網路管理器、以及行動監控平台。感測節點mote裝置以IEEE 802.15.4e自動形成感測叢集，並傳送與接收資料至所屬的網路管理器。網路管理器管理其感測叢集內的mote節點，同時與其他網路管理器形成WiFi mesh網路骨幹，將資料收即至後台。行動監控平台Mobile Dashboard則提供Web-based場域編輯工具與感測網路監控工具便於佈建及監控人員掌控狀況。

本系統經工廠實地佈建測試驗證，情境包含(一)跨越實體阻隔收集機台定點多樣態感測資料；(二)跨廠區移動載具之資料收集。測試結果顯示WiFi mesh以hopping可跨越阻隔及連結廠區且傳輸速度亦可滿足資料收集需求，驗證本系統於工廠生產管理資料收集應用的有效性，且於網路佈建具有機動性及擴充性。未來系統將朝向各特定應用之服務品質發展，提供產業升級更好的輔助工具。

### Abstract

Monitoring system is important for production management and quality control. Wired solutions are high cost and the cabling installations are inconvenience. Hence, wireless sensor network solution has become a new trend in intelligent factories. However, due to the combined effects of signal attenuation, noise and multipath induced by machines, personnel or vehicles, the transmission of wireless networks might be not reliable as wired networks. It is also a challenge by using wireless network solutions to satisfy the various transmission requirements in factories, due to the limited bandwidth and poor capability of time-synchronization. As a result, there are several issues such as, interfere, data synchronization, Quality of Service (QoS), have to be overcome in real cases.

In this project we developed a high reliability field wireless sensor network system for data collection. This system includes three parts: mote, network manager and mobile dashboard. Mote is

sensor embedded network device, built with IEEE 802.15.4e communication protocol and in charge of sending sensor data to its belonging network manager. Network Manager is a hardware device built with Wi-Fi and IEEE 802.15.4e communication protocols that are used to corporately collect sensor data from the motes and send to management server. Mobile Dashboard is an application with graphical user interface that user can easily arrange sensor network hardware and monitor them.

The system has been verified in two factories. In case 1, there are obstacle in the environment; in case 2, the mobile carrier with sensor node moved in two zones. The results show WiFi mesh network are constructed through hopping to overcome constrained environments, and the data rates fulfil the requirements. It shows the efficiency of our system in filed network for sensor data collection. In the future, the QoS issues will be improved for specific applications.

## 關鍵詞(Key Words)

感測網路(Sensor Network)

感測節點(Mote)

網路管理器(Network Manager)

行動監控平台(Mobile Dashboard)

## 1 · 前言

在面臨全球化的挑戰下，產業莫不積極提升生產管理與產品品質以提高競爭力。工廠現場的即時監控則是其中關鍵資訊來源。傳統生產線監控系統佈建一般採用成熟而穩定的有線網路[1]，可惜有線網路所建構出的工廠感測網路之成本頗高，往往僅在資本雄厚的大型自動化工廠採用，建構機台預防保養機制，提升產品良率。而中小型工廠基於成本考量，在機台保養多半採用損壞維護 ( Breakdown Maintenance ) 或週期性預防保養 ( Preventive Maintenance - fix it before it breaks )，不足以因應未來「工業4.0」產品自主式 ( Autonomous ) [2]與即時處理的生產樣態。而佈建有線網路對於運作中的工廠極為不便，對於生產的影響更是額外的成本。因此具低成本及高可調整之特性之無線工業感測網路會在近年來廣受矚目，成為智慧工廠未來佈建之主流[1]。

根據NIST指出，各種無線技術包括機器人控制、RFID標籤追蹤，以及無線區域網路通訊等，都有助於工廠與生產計畫[3]。不過很多工廠皆為高反射性環境 (highly reflective environment)，會干擾或是阻擋無線電波，讓像是汽車製造廠這樣的地方難以享受無線網路帶來的優勢。NIST的研究人員從2006年8月開始

在一個汽車組裝廠房測試無線訊號，研究人員每次會連續24小時監控6GHz以下的頻率，以理解廠房週遭的無線電背景環境。根據頻譜調查結果顯示，來自重型設備的干擾——“機器噪音 (machine noise)” 會減弱低頻應用的訊號，例如某些廠房控制器中所使用的。而研究人員在對2.4~2.5GHz頻道上的WLAN頻率進行詳細分析後發現，資料傳輸節點、無線掃描器和工業設備皆可傳輸穩定且密集的资料流量。

目前智慧工廠擬採用之無線感測網路技術因成本考量，多以IEEE 802.15.4實體層 (或與其相似之技術) 為基礎，提供多變化高可調度之網格(mesh)式拓譜網路，此類實體層之技術特點主要在於其實體層之超低耗能，故非常適合以電池趨動，此特點大大提昇了網路佈建的機動性及擴充性。然而，超低耗能特性也同時帶來一些負面的效應，例如：工業無線網路為了達到較高的封包傳輸可靠度，被迫增加點與點間的重傳次數，如此一來整體網路功耗提昇，並同時降低總網路傳輸容量[4]。整體來說，目前的無線感測網路技術無法滿足工廠現場網路所需要的高傳輸可靠度、整體網路功耗管理、服務品質 (QoS, Quality of Service) 保證及資料同步等需求。

基於工廠感測資料收集需求，例如：溫度、流量、壓力等在收集頻率上不同，故製造設備

參數取樣區間可由1筆/Sec到1,000筆/Sec，而其中又分持續性或間歇性資料，工廠現場感測網路勢必需要依資料時效性之不同，提供不同的QoS，並需滿足資料同步等需求。本計畫研發高可靠度無線感測網路架構，以Wi-Fi mesh建立無線資料傳輸骨幹，結合TSCH(Time Slotted Channel Hopping)模式的IEEE 802.15.4e感測節點，克服工廠環境不同應用情境提供無線傳輸的穩定性(Reliability)，提供不同資料傳輸QoS與資料同步需求，並建立行動平台 Mobile Dashboard人機介面，以利工廠人員快速佈建，並易於即時監控。

在以下章節中，將在第二章介紹本計劃提出之高可靠度現場無線感測系統架構及其各單元模組功能，於第三章介紹其無線骨幹設計，第四章說明場域實際建置測試結果，第五章為結論。

## 2. 高可靠度現場無線感測系統

本計畫提出的高可靠度現場無線感測系統架構如圖1所示，包含三個部分：mote感測節點形成感測叢集、網路管理器(network manager)建立802.11n的mesh網路、以及行動監控平台 Mobile Dashboard提供圖形化即時監控資訊。本系統主要目標為即時佈置感測節點及網路管理員後，感測節點自動形成感測叢集，網路管理員自動形成Wi-Fi Mesh 網路，感測節點即時收集到感測資料後，透過Wi-Fi Mesh網路傳送到後台，透過Mobile Dashboard即時管理及監測感測節點及網路管理員的動態資訊。

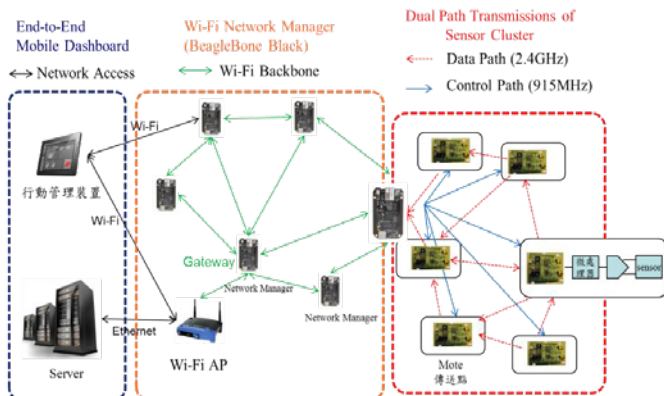


圖 1 高可靠度現場無線感測系統架構圖

### 2.1 Mote感測節點

感測節點mote 裝置將連接感測器，擷取廠區所需的感測資料，mote裝置內的軟硬體模組，透過TSCH協定以及2.4 GHz頻道，將感測資料發送到網路管理器，並接受來自網路管理器所發送的的控制命令。Mote節點需具備TSCH網路中央集權式對時、感測叢集辨別、重傳次數調節、轉傳備用路徑等功能以建立感測叢集。於各節點中，擇一節點設定為根節點，由此根節點與網路管理器連接，則可於建置後自動將該網路管理器下的mote節點自動形成感測叢集，將各節點資訊透過根節點傳送到網路管理器，執行路由規劃與資料收集。其無線傳輸模組之軟體架構如圖2，於本計畫中採用802.15.4e [5]，並在應用層開發電量監測與溫濕度環境監測，以作為應用測試。

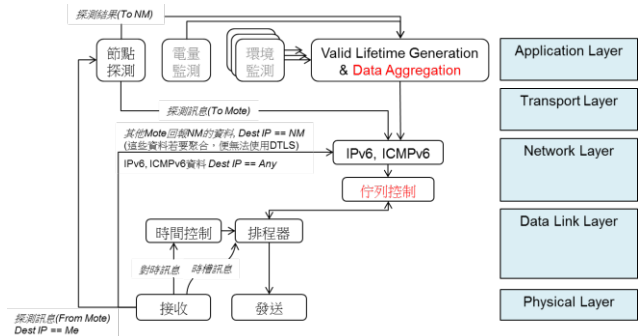


圖 2 mote感測節點軟體架構圖

### 2.2 網路管理器

網路管理器的工作為管理mote，計算mote的路由，並使用Wi-Fi 建立能達到802.11n的mesh網路，透過Wi-Fi mesh 演算法自動形成以IP為基礎的資料傳輸骨幹。網路管理器在建立WiFi mesh 802.11n網路骨幹上透過鄰點探索(Neighbor Discovery)，建立格點網路拓撲，並以鏈路(Link)品質感知功能，因應網路傳輸品質改變時的路由重建。在mote管理則具備mote的資料收集、參數設定、負載感知等功能，建立主傳送路徑規劃與備用傳送路徑規劃。其上運行的軟體主要包括Network Manager Process以及Wi-Fi Mesh·Network Manager Process主要工作有三：(1) 界接802.15.4e Handler；(2) 執行路由演算法，替每個mote計算可靠的主要路由和備用路由；(3) 執行時槽排程演算法，產生一起級訊框(superframe)資料結構，上面標示著每個mote可使用無線媒介進行收/送的時間點。

Wireless mesh network 是用於在無線節點間數據之傳輸技術，通常由2或(多)更多的節點，交換關於彼此的路由，並更新連接狀態信息。802.15.4e Handler的工作是把感測網路的資料接收起來向Network Manager Process送，並把Network Manager Process傳來的訊息往感測網路傳送。

### 2.3 行動監控平台Mobile Dashboard

Mobile dashboard行動裝置為佈建Wi-Fi骨幹及mote的軟體工具應用載具，透過Wi-Fi mesh 網路的存取點上網，就可以連接到後端的伺服器存取資料。提供Web-based 感測網路系統資源監控與管理系統，其軟體架構如圖3所示，共分成client端及server端，在client端提供場域編輯工具以及感測網路監控工具，場域編輯工具主要是提供使用者佈建網路管理器以及Mote時，能有一個快速且立即可以取得裝置回報的佈建方式，避免浪費太多時間在佈建的工作上；感測網路監控工具則是在場域佈建完成之後，監控人員可以隨時取得感測資料，掌控工廠的狀況。在server端則在application server中開發Java 應用程式Field Controller，Java 應用程式Field Controller主要用處是在協助前端工具，建立相關處理的方法，如資料庫的存取，建立系統資源供前端使用者的資訊交換與狀態的管理；Network Manager Agent則為一個Java 的函式庫，做為外部連結到Mobile Dashboard軟體架構的入口。在可視化感測元件圖形顯示設計，是將元件以SVG繪製，單一元件以單一個SVG檔描述，並儲存在server中管理，由前端的應用程式以HTML5為基礎，透過SVG的標籤與Javascript於行動裝置上產生可以直接操作的可視化元件。

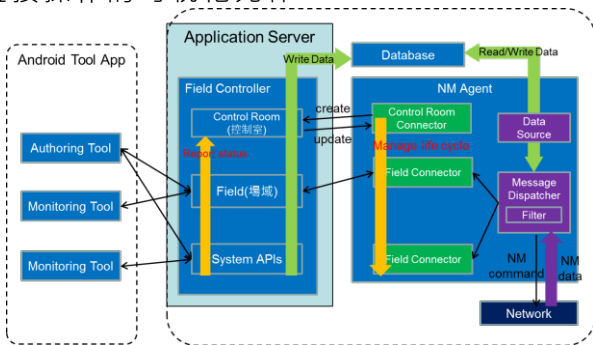


圖 3 Mobile Dashboard軟體架構圖

## 3 · 無線網格網路骨幹

於此高可靠度現場無線感測網路中，無線網格網路骨幹為其佈建範圍與現場監測關鍵。網路管理器之間的資料傳輸架構如圖4所示，為無線網格網路，主要由四個部分所組成，Mesh Point Gateway(MPG)、Mesh Access Point(MAP)、Mesh Point(MP)以及Wireless Station(STA)：

- 1) Mesh Point Gateway(MPG)，或稱Mesh Point Portal(MPP)，為對外之閘道連接埠，可透過乙太網路與企業主機網路相接；
- 2) Mesh Access Point(MAP)，為Mesh Point與Access Point共構之節點，提供STA連線與傳輸資料；
- 3) Mesh Point(MP)，為Mesh Point節點，提供hopping服務並傳輸資料；
- 4) Wireless Station(STA)，為使用者節點，可以與MAP連線傳輸使用者資料。

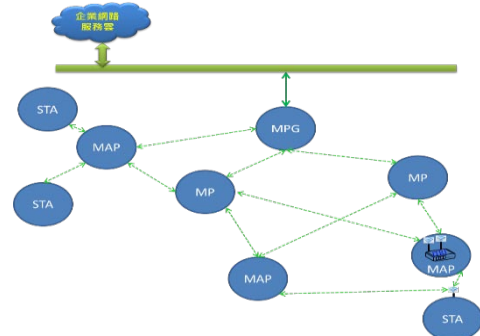


圖 4 網路管理器資料傳輸架構範例

此無線網格網路用於無線節點間數據傳輸之技術，通常由2或多個節點，交換關於彼此的路由，並更新連接狀態信息，其特點為每一個節點都知道有哪些途徑能達到任何其它節點；且當一個節點想要達到無法直接連接的另一個節點時，會傳向其它節點，直到最後的節點(此行為又稱為hopping)；並具自我組成與自愈性，無須額外的maintain，且可靠度高之優勢。

網路初始化時MPG與MAP會自動設定，讓MAP可以透過MPP連至測試PC主機(自我組成性)。以圖5為例，將MAP拉遠至與MPG無法通訊，再加入MPs後，MAP亦可透過MP1或MP2之hopping跳點至MPG最終到達目的地測試PC主機端，其間透過Open Shortest Path First (OSPF)[6]計算出最佳路徑，而自動選擇MP；而

移除一個MP後，MAP可自動透過另一個MP修復網路的斷點(自愈性)。但相對的mesh網路會產生額外的網路流量，路由信息(路由更新)的交換會產生大量的交通流量，同時每一個設備必須有足夠的CPU /內存擁有的所有其它路由器的概述，以及如何到達目標的路由表。在實現無線網格網路採用無線隨意網路(Ad hoc)為基礎傳輸協定，並搭配Optimized Link State Routing Protocol(OLSR)[7]作為上層的路由傳輸協定。

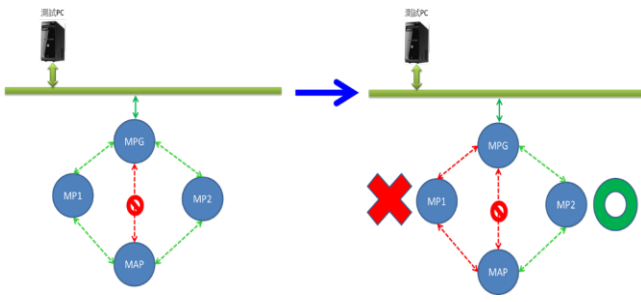


圖 5 網格網路組建與重組案例

#### 4. 場域實驗測試結果

為驗證本計畫開發之高可靠度現場無線感測網路系統技術於工廠實際場域建置與資料收集的有效性，選擇兩個實際工廠場域建置與測試，驗證系統於場域可正常運作並達成預期的工作，並評估系統功能設計是否能滿足工廠管理應用需求。測試使用的網路管理器硬體採用 AM335x 1GHz ARM® Cortex-A8、512MB DDR3 RAM、4GB 8-bit eMMC on-board flash storage，作業系統為Ubuntu，具Ethernet、WiFi。場域中包含各類網路管理器，其中MPP為一閘道器，可透過乙太網路與企業主機網路相接；MAP具無線基地台功能，為網格節點與無線基地台，共構之節點，提供其他節點連線與傳輸資料；MP則為單純的網格節點，提供hopping服務並傳輸資料，另有使用者節點STA，可以與MAP連線傳輸使用者資料。兩個測試場域特色與測試結果如表1所示。

表1 場域測試條件與結果

場域	感測點	感測頻率	實測傳輸速率
場域一	固定位置	頻率不一	20Mbps~50Mbps
場域二	移動	事件驅動	15Mbps~35Mbps

場域一有三個獨立空間，每個空間約30至60公尺，有30公分的水泥牆隔開，各感測節點為固定位置，資料收集頻率不一，節點佈建如圖6所示，左右兩區隔著水泥牆，各區機台擺放緊密。實測結果第一區之MPP無法直接與第二區進行資料的傳輸，WiFi Mesh會啟動hopping，自行建立多跳之WiFi Mesh網路拓樸，於此測試中最遠的節點經由4 hopping傳送，跳點較多，傳輸速度相對較慢。經過多跳的測試結果，第一區測試的傳輸速度為50Mbps至20Mbps，而第二區最末端節點速度尚有4Mbps，可符合該場域之感測資料傳輸所需。

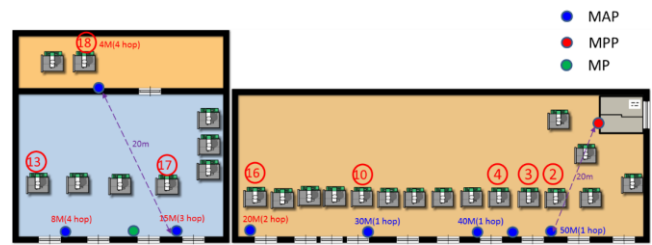


圖 6 測試場域一之節點佈建圖

在場域二有兩個約130 x 83公尺之空間，中間有兩個通道，使用情境則為感測節點位在一移動載具上，節點佈建如圖7所示，需確保移動的感測節點(STA)在廠區移動時，保持有效的資料傳送。由場域較為高挑且空曠，可傳輸的距離較廣，因此將MPP佈建在高點，以達到最少的hopping點，以滿足在移動時之連線恢復速度；載具於不同區域的移動需要自動恢復跨點的網路連線，故於銜接廊道佈設中繼節點(MP)，以滿足在移動時之連線。測試中首先關閉中繼節點，當測試節點STA由區域1移動至區域2時，開啟中繼節點後，透過hopping將WiFi Mesh傳輸距離延伸至第一區與第二區全場域，STA移動其間都可以接收到WiFi Mesh訊號，並進行資料傳輸。使用iperf量測802.11n WiFi Mesh傳輸速度，在主控室MPP至兩通道的MP，速度約35Mbps，而經過2 hopping到第二區中間的MAP節點，速度約有15Mbps。

透過實測驗證，本系統適用於一般工廠機台監測感測資料收集或是現場物料追蹤感測。

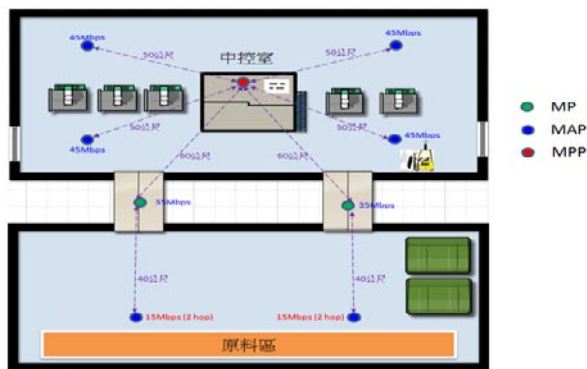


圖 7 測試場域二之節點佈建圖

## 5 · 結論

本計畫設計發展之高可靠度現場感測網路系統技術結合低耗能 IEEE 802.15.4e 與 WiFi mesh 提供一低成本及高可調適性之無線工業感測網路方案，提供工廠現場網路對現場機台進行「全時與即時之監控」。本系統之資料傳輸骨幹採用 WiFi Mesh 傳輸的效益在於 mesh 網路具有自我組成與自我修復的特性，低成本的建置，維護與擴充也相當容易，並具強健性 (robust)，只需在場域中提供多個網格節點，若有一個節點發生故障，WiFi Mesh 會自動找尋另一個最佳路徑來進行資料的傳輸；此外多加一個 Mesh Point 亦可以延伸無線傳輸的範圍，可以大量節省佈線的成本。在實測試場域一的空間無法使用單一無線基地台 (AP) 將資料傳輸到遠端，需多 2 至 3 個橋接器 (Bridge) 做中繼 (relay)，且可容許其中一個故障仍能完成傳輸。本系統在 4 hopping 的節點尚有 4Mbps 傳輸速度，強健且可以滿足資料傳輸之需求。場域二有移動式的裝置，當裝置移動到較遠的角落時，其資料無法有效地傳達至遠端，採用 mesh 傳輸，可以即時的算出最佳的路徑，以滿足移動式節點的需求。以上兩個場域若採用有線佈線方式不僅施工困難且成本太高，本系統建置 WiFi Mesh 為網路傳輸骨幹後，實際測試驗證可以持續且有效地將資料傳輸到遠端資料庫。

本系統所提供場域編輯工具以及感測網路監控工具更大幅提升建置的便利性與日常監測的實用性。經由實際場域之佈建與測試結果顯示具有網路佈建的機動性及擴充性，經由備用路由機制提高傳輸可靠度。未來系統將朝向

各特定應用之服務品質 QoS 發展，提供產業升級更好的輔助工具。

## 參考文獻

- [1] V. C. Gungor and G. P. Hancke, "Industrial Wireless Sensor Networks: Challenges, Design Principles, and Technical Approaches," *IEEE Trans. Ind. Electron*, Vol 56 (10), pp. 4258 – 4265, 2009.
- [2] M. Brettel, N. Friederichsen, M. Keller, and M. Rosenberg, "How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An industry 4.0 perspective," *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, Vol 8 (1), pp. 37 – 44, 2014.
- [3] X. Xu, "From cloud computing to cloud manufacturing," *Robot Comput Integr Manuf*, Vol 28 (1), pp. 75 – 86, 2012.
- [4] W. Jiang, Y. Zhu, and Z. Zhang, "Routing Overhead Minimization in Large Scale Wireless Mesh Networks," in *Proc. Vehicular Technology Conf. (VTC)*, 2007, pp. 1270–1274.
- [5] IEEE std. 802.15.4e, Part. 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 1: MAC sublayer, IEEE standard for Information Technology, April 2012.
- [6] OSPF Version 2, RFC2328 (<http://www.ietf.org/rfc/rfc2328.txt>), 1998.
- [7] T. Clausen, and P. Jacquet, "Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)," IETF RFC 3626, October, 2003.

## 作者簡介

林旭政



工研院資通所智能製造服務  
系統組工程師，專長於軟體工  
程

陳昌憲



工研院資通所智能製造服務  
系統組工程師，專長於嵌入式  
系統

洪毓蔚



工研院資通所智能製造服務  
系統組工程師，專長於軟體工  
程

陳銘哲



工研院資通所智能製造服務  
系統組工程師，專長於無線網  
路

李曉暉



工研院資通所智能製造服務  
系統組資深工程師，聯網終端  
部經理，專長於嵌入式系統與  
無線網路