

使用 Zigbee 無線網路之應變規信號感測及傳輸之研究

白富升^{*a}、王文金^b、涂哲維^b、張睿文^b、黃世杰^c、黃冠傑^c、蔡謹隆^a、古鎮璋^c、陳映蓉^c
 國立臺南大學電機工程學系^a
 財團法人精密機械研究發展中心^b
 國立成功大學電機工程學系^c

摘要 一本文旨在建立應用於塑膠射出成型機之應變規訊號感測電路，並使用 Zigbee 無線網路融入數據傳輸與遠方監測控制功能。本文所提系統首先藉由應變規、儀表放大器、微控制器取樣及類比數位轉換，接著將轉換之電阻訊號經由 Zigbee 無線網路之端節點模組回傳至協調器模組，再利用電腦程式顯示目前感測資訊，進而將其數據儲存，故其不僅可提供後續分析之需，同時可俾以掌握塑膠射出成型機之動作狀態。本文於文中已完成感測電路設計、監控平台架設、並由實驗驗證其確能整合應變規、Zigbee 無線感測網路訊號傳遞及系統監視之效能。相關研究成果應已具學術探討及實務應用之參考價值。

一、 簡介

近幾十年來基於感測材料、械電、控制技術之高度整合發展，塑膠射出成型機已成為製造工業上一不可或缺之塑膠製品成型加工機。塑膠射出成型機的基本原理是將塑膠材料融化後注入模具中，再令其冷卻成型而得到成品，其中新式射出成型機除需具備省電之優點之外，其射膠切換的準確性與成品安定性均為性能評估之重要指標。然而要達成這些目標，成型機除要有很好的控制線路外，亦尚須配置準確之感測元件，因此工業上應用頗多之應變規已被思考使用在塑膠射出成型機上。應變規以金屬線為計測器，利用金屬線受力產生電阻變化之原理，檢測被試體之受力變量，此時成型機只要再使用電橋電路偵測阻抗變化，則即可得到被試體之運動伸長量，進而掌握機器之運動狀況。

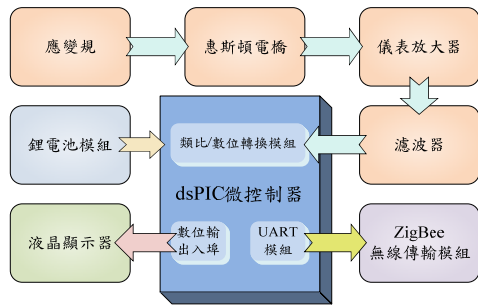
基於上述背景，同時茲由於今日感測及通訊輔助技術之精進，塑膠射出成型機之受控系統已朝自動執行保護、監視、控制及資訊整合之智慧型電控平台開發邁進[1-3]。因此，如將塑膠射出成型機之受控系統進一步與遠端偵測技術整合，同時依據資訊管理邏輯判斷，使其於智慧控制平台內彈性處理，以便能立即執行控制命令輸出回饋給工具機，則應可大幅提昇其運轉效率。換言之，此智慧型控制概念除依不同機構需求，予以自動規劃內部控制迴路，其本身所具備之自我診斷功能，兼以確保應用保護可靠度之達成。

二、 整體電路架構設計

本文在規劃上為有效應用應變規感測元件，取得完整、即時之塑膠射出成型機之運動參數，本文規劃研究¹本研究由財團法人精密機械研究中心贊助，計畫編號 NSC XX-0123-456-789。

感測網路作為應變規之輸出電阻變動監測工具。本文所擬架構包括感測電阻、供電模組、儀表放大器、A/D取樣與轉換電路、數位訊號處理電路、通訊傳輸模組及遠端資訊系統平台等，如圖1所示，其中基於近年無線通訊技術進步神速，傳統之有線通訊正逐漸朝向無線通訊發展，除了全球行動通訊及無線區域網路外，短距離無線通訊已成另一新興研究領域，而在短距離無線通訊的研究範疇中即涵括 ZigBee 與藍芽等不同方法[4-6]。由於 ZigBee 之技術特性其在網路上可支援六萬五千多個 ZigBee 之節點連接，較藍芽網路，更具擴充優勢，同時其工作頻段以較不受限之 2.4GHz 為例，傳輸速度為 250kbps，足以支撐本文規劃應變規電阻變化訊號之即時擷取與傳遞，因此本文之應變規無線監測網路即擬以 ZigBee 為無線感測網路為主體架構，期能同時充分利用 ZigBee 之通訊特點，進而建立完整安全之運轉監控系統，以期對於工作機台運轉之狀態，能予以有效掌握及控制。本文在感測電路設計上，使用 Microchip 公司開發之 dsPIC30F4011 控制晶片作為訊號處理電路核心，dsPIC 它具有硬體數位訊號處理功能與基本即時控制功能，其中微控制器負責擷取感測電路之應變規電阻、供電模組輸出電壓及電流，且在微控制器內部進行雙通道類比訊號之取樣轉換，最後再透過內建之通用非同步收發傳輸器(UART)模組與 ZigBee 無線通訊模組連結，以將相關資料傳送至遠端監控平台顯示。

基於上述規劃，由於應變規產生之應變力感測訊號係以 350 歐姆附近之微電阻變化量輸出，因此本文首先利用惠斯頓電橋，將該感測電阻變化量轉成電訊號。本文續使用儀表放大器偵測電位惠斯登電橋輸出電壓訊號。儀表放大器由於採差動訊號輸入之結構使其具有高共模抑制比、高輸入阻抗之特性，又其經過兩級放大器電路之補償，故又能具低噪聲、低線性誤差等優點，故使其在電壓訊號感測與放大方面倍受青睞。再者本文所提系統係運用在射出機等高雜訊污染環境，同時應變規對於應變力之感測僅產生微幅之電阻信號變化，因此在訊號處理過程，所提電路將無可避免產生雜訊。本文所使用之 Chebyshev 型低通濾波器響應曲線濾除雜訊。Chebyshev 濾波器在允許訊號通過之頻帶內會產生漣波，但其卻有較尖銳之截止頻率特性。最後本文使用微控制器擷取來自儀表放大器之輸出訊號，微處理機電路會將目前的應變規電阻等訊號顯示於液晶顯示器，並通過 UART 模組及 ZigBee 通訊模組將資料傳送至遠端監控電腦。



圖一：本文所規劃之架構圖

三、無線感測網路之訊號傳遞與遠端顯示

本文使用 Zigbee 無線網路傳遞與監視應變規訊號變化。茲為使感測器節點具有功率感知(Power-Aware)的機制首先就是要讓感測器節點清楚瞭解本身構成的各個單元硬體所消耗功率，之後才可進一步調整不同工作模式以減少功率消耗。因此本節將討論構成感測器節點的各種硬體電路與功率消耗情形，並進一步將其功率消耗方式以進階的工作模式管理。

無線感測網路係以眾多感測節點為基本單位所組成之無線傳輸網路系統，其主要目的為偵測並收集一區域之環境資料，並透過簡單運算處理及無線傳輸，將資料回傳至遠端以便進行後續之資料處理。基於此，無線感測網路之節點，不僅常需配備簡單的感測裝置及無線傳輸裝置，同時亦需整合微處理器及小型嵌入式系統至感測器節點內，俾使感測器節點具有資料儲存、運算及路由等功能，進而使整個網路於資料傳輸與監控更具便利性。然而一般感測器節點之功率消耗，主要係來自微處理器、感測裝置及射頻電路三項硬體單元，且於本研究文中外部資料之收集，皆係透過微處理器中之 UART 裝置進行收集電能資料，並無使用 ZigBee 無線晶片模組之感測裝置，因此本文於韌體之設定，亦先將感測裝置部分予以關閉，以節省不必要的電能消耗，故於本文中並不討論感測裝置之能耗情形。換言之，本文將依微處理器與射頻電路等各硬體單元之工作狀態，將感測器節點組成數種工作模式，即如表 1 所示。本文將對各硬體單元之工作模式進行運轉能耗分析，以尋得各硬體單元最妥適之運轉時程

基於上述，由於每次 ZigBee 模組工作狀態轉換均需額外之能耗，且因各工作模式於切換間並非理想狀態，將會造成一段時間延遲，且此延遲時間亦需消耗部分電能，即如圖二所示，而圖二即為 S1→S4→S1 工作狀態切換時之消耗電流變化圖，且當節點狀態由閒置轉為休眠時，將造成 τ_{sleep} 的延遲及 I_d 之電流損耗；而當節點由休眠甦醒成閒置狀態時，因韌體設定會自動 Ping 父節點，故除造成原本之延遲及能耗外，亦會額外增加發送信標訊號所造成之電流損耗，故本文為避免計算之繁雜度，乃將此損耗一同算入節點甦醒所造成之能耗中，亦即圖二所示之電流 I_{idle} ，且透過圖二將可推估休眠狀態所節省之電能，即如式(1)所示。

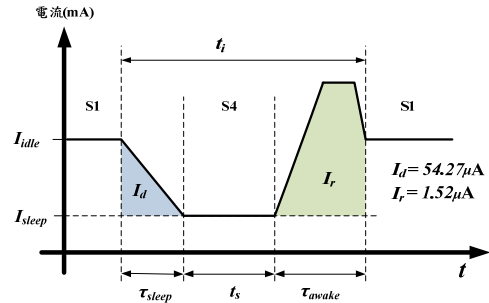
$$E_{save} = I_{idle}t_i - (I_d + I_r) \tag{1}$$

$$= 10100t_i - 46.47$$

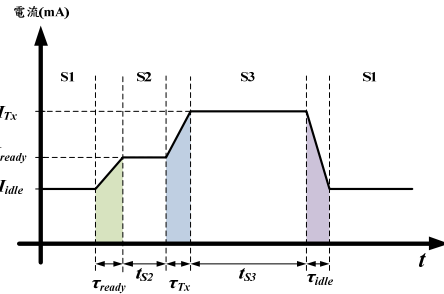
其中 E_{save} 為休眠狀態所節省之電能，且 I_{idle} 即為 S1 狀

表 1 感測器節點工作模式

狀態	微處理器	射頻電路
S1 閒置	閒置	閒置
S2 等待	活動	閒置
S3 傳送	閒置	傳送
S4 待機	休眠	休眠



圖二：ZigBee 模組於休眠狀態之能耗示意圖



圖三：封包傳輸之能耗示意圖

態平均消耗之電流大小，亦即約為 $10100\mu A$ ，故若欲減少休眠狀態之損耗，亦即 $E_{save} > 0$ ，則可求得 t_i 及 t_s 之臨界值，即 t_i 之臨界值需大於 $4.601ms$ ，且 t_s 臨界值之推導，如式(2)與式(3)所示。

$$t_i = t_s + \tau_{sleep} + \tau_{awake} \tag{2}$$

$$t_s > 4.601 - \tau_{sleep} - \tau_{awake} \tag{3}$$

$$\Rightarrow t_s > 0.873ms$$

綜上所述可知，閒置時間 t_i 需大於 $4.601ms$ ，亦即休眠時間需大於 $0.873ms$ 時，則於休眠狀態所節省之電能，方能勝過因延遲狀態而增加之能耗。另圖三即為封包傳輸之電流波形示意圖，其中由上一節敘述可知，影響封包整體傳輸時間之因素在於等待時間 t_{s2} 及傳輸時間 t_{s3} ，且根據 IEEE802.15.4 規範，等待時間是一個介於 $0 \sim (2^{BE}-1)$ 之隨機數值乘上一單位規避時間(a Unit Back off Period)，再加上空頻道檢測時間(Clear Channel Assessment, CCA)，故整個等待時間將可寫成式(4)：

$$t_{s2} = random\{0, 2^{BE} - 1\} \times aUnitBackoffPeriod + CCA \tag{4}$$

其中 BE 代表規避指數，且預設值通常設為 3，而單位規避時間及空頻道檢測時間則分別被定義為 $320\mu s$ 及 $128\mu s$ ，因此最長等待時間約為 $2.368ms$ ，故於本測試中將最長等待時間設定為 t_{s2} 。此外，IEEE802.15.4 協定中規範基礎傳輸率為 $250kbps$ ，故可進一步推估傳送時間，即如式(5)所示。

$$t_{S3} = \frac{(PSDU + SHR + PHR) \times 8}{250 \times 10^3} \quad PSDU \leq 127 \quad (5)$$

其中 IEEE802.15.4 協定中規範限制 PSDU 大小需在 127bytes 內，且 JenNet 堆疊限制最大資料載荷量為 82bytes，故可將式(5)改寫成式(6)：

$$t_{S3} = \frac{(45 + n + SHR + PHR) \times 8}{250 \times 10^3} \quad n \leq 82 \quad (6)$$

$$= 1.632 + 0.032n \quad (ms)$$

其中 n 為封包所載荷資料大小，且 $n \leq 82$ 。由此可知，經由上述公式之推導，將可求得封包發送所需之時間 T ，即如式(7)所示。

$$T = \tau_{ready} + t_{S2} + \tau_{Tx} + t_{S3} + \tau_{idle}$$

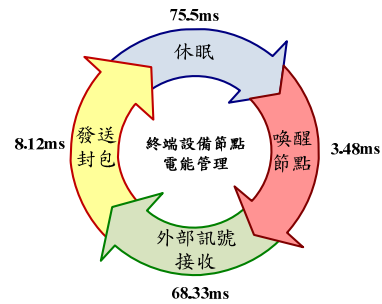
$$= 0.31 + 2.368 + 0.32 + (1.632 + 0.032n) + 0.868 \quad (7)$$

$$= 5.497 + 0.032n \quad (ms)$$

茲假設所載荷資料大小為 82bytes，則發送一單位封包所需時間約為 8.122ms，且根據測試結果可知，封包傳輸速率應小於 700bytes，故以傳輸載荷資料為 82bytes 之封包，則每秒發送之封包數應低於 8 個。

由於本文外部訊號接收係透過 UART 進行傳輸，因此 UART 通訊協定中之鮑率(Baud Rate)設定，將影響外部訊號接收所需耗費之時間，且若今假設鮑率為 9600bps，則一個大小為 82bytes 的外部資料需耗時約 68.33ms，故將上述之各項時間值應用至節點電能管理流程，即如圖四所示。由圖可知，本研究文設定鮑率為 9600bps，而封包載荷資料大小為 82bytes，且封包傳送至父節點之速率不超過 700bytes 的情況下，即可規劃各工作模式設定之最佳執行時間。值得注意的是，於圖中所得之休眠時間，係以不使發送速率超過 700bytes 為條件下，並已扣除狀態切換所造成的延遲時間。

為讓使用者方便觀看即時顯示數值，同時有效降低監控人力成本，本文於遠端監控電腦顯示上，以美商國家儀器公司(National Instrument, NI)所開發之實驗室虛擬儀器工作平台(Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench, LabVIEW)應用軟體工具為核心，本文即係應用此架構將監測端主機與 Zigbee 無線傳輸模組之 UART 傳輸埠相連接，藉此接收感測網路傳送之訊息。圖 5 為本文規劃之監測平台，由圖可知，其可依功能區分為通訊協定設定、即時變化狀態顯示及訊息紀錄三大部分，其中協調器節點係透過序列埠(Serial Port)傳輸介面與監測系統進行資訊之傳輸，故為使通訊線兩端設備能互相辨識傳輸之資料，需在程式執行前，設定節點與監測電腦端之各項傳輸設定。另於監測平台即時變化狀態顯示部分，則藉程式之資料傳輸內容更新功能設計，將感測網路接收之電阻數據經運算處理後，於監測平台上繪出對應波形圖。此外，訊息紀錄功能則係紀錄系統開始運轉後之系統時間與電阻變化狀態，可於平台右下方設定檔案儲存路徑，供使用者隨時查閱。由此可知，本文研製系統監測電阻即時變化資訊融入無線感測通訊網路，不僅提升使用者監測之即時性與便利性，同時可強化網路整體運轉效能。



圖四：本文建議節點於各階段運轉下之時間規劃



圖五：遠端監測平台介面

四、實體系統測試結果

為驗證本文所提方法之可行性與正確性，本文已於實驗室設計雛形系統進行所提方法之實測。本節將分別進行實際電路測試及遠端監視平台建立、ZigBee 無線傳輸效能之評估分析。在本測試中，由於無線網路易受傳輸距離與阻隔物等週遭環境因素，因此本文則建構多項無線傳輸之情境，以評估無線網路資訊傳輸之效能，其中於執行效能測試驗證時，本文選用 5dBi 全向形天線及 ZigBee 無線傳輸技術作為測試平台建構之依據。其中於無線傳輸中，協調器係整個網路系統之樞紐點，多數資料皆透過協調器轉送，因此協調器傳輸頻寬之大小，係影響整體網路系統資料傳輸多寡之最重要因子，故本文將藉由控制調整傳輸速率之快慢，評估資料封包於不同傳輸速率之接收完整性。換言之，本文藉由終端節點逐一傳送 1000 筆封包至協調器，並透過電腦端 UART 通訊介面監測資料傳輸之情況，以分析於各傳輸速率下之封包接收完整性，進而探討協調器所能接收之最大乘載量，且此測試結果應有助於佈建無線感測網路系統之參考依據。基於此，本試驗首先將 ZigBee 協調器擺放位置與終端節點相距 100 公尺，以建構本試驗之測試平台，並設定終端節點每次傳輸資料之大小為 1000 筆封包，且以每秒 100 bytes 作為起始傳輸速率，同時於每次試驗依序增加 50 bytes 之傳輸速率，且直至傳輸速率達 1000bytes 為止，方停止此測試，俾作為探討封包資料傳送成功率之依據。圖六即為調整不同資料傳送速率所得封包成功接收之實測結果，其中當傳輸速率介於每秒 100 bytes 至 700 bytes 時，封包傳送之成功率將高達 100%，然當傳輸速率高於每秒 750 bytes 時，因傳送速率過高造成接收緩衝器飽和，致使封包傳送成功率將隨傳輸速度升高而遞減，進而導致無法預期之資料傳輸錯

誤。因此由上述模擬結果可進一步推論，當協調器之通訊頻寬設於每秒 700 bytes 以下，應有較佳之傳送效能，故本研製系統之無線感測網路頻寬，將設定為每秒 700 bytes。

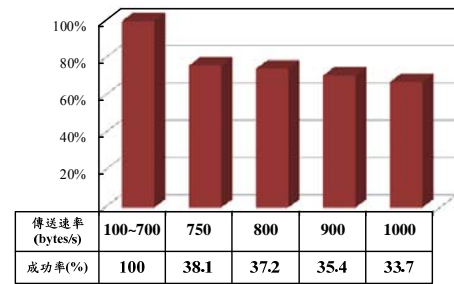
另在 ZigBee 運轉電能狀態之測試分析方面，本文對利用 ZigBee 無線晶片模組建置之傳輸節點進行實際量測，並探討與分析 ZigBee 模組運轉之最佳節能排程，俾使電能損耗降至最低。另於本測試中皆係以直流電源供應器供應穩定 3V 之直流電壓，並對不同工作模式之能耗進行量測，且經儀表量測可知，當 ZigBee 模組處於閒置狀態時，其所消耗之平均電流皆約為 10.1mA，而當工作模式處於待機狀態時，則約耗費 2.5mA 之電流。圖七即為封包傳輸過程之完整電流波形，其中封包載荷訊息大小為 30byte，且符號 S1、S2 與 S3 分別為 ZigBee 模組處於閒置、等待與傳送之工作模式，同時可將整個封包傳送過程概分為 6 個時段，即如下所述：

- (1) 區間 $t_0 \sim t_1$ 及 t_6 以後：分別為封包發送前後之電流狀態（即為 S1 狀態），平均消耗電流大小約為 10.1mA。
- (2) 區間 $t_1 \sim t_2$ ：狀態 S1 轉換至 S2 之延遲時間，且由量測數據可知，此段延遲時間約為 0.308ms，而消耗總電流量約為 4.59 μ A。
- (3) 區間 $t_2 \sim t_3$ ：此區間為封包發送前之狀態，此時微處理器將先進行資訊之封裝，並傳至傳輸緩衝器 (Tx/Rx Buffer) 中，同時進行傳輸通道上的載波偵測 (Carrier Sense Multiple Access, CSMA)，以偵測該傳送通道上是否為空閒狀態；若否，則隨機等待一段時間再進行發送之動作，以避免信號的衝突產生，且該階段亦為 S2 階段，而此時之平均電流消耗量約為 4.03mA。
- (4) 區間 $t_3 \sim t_4$ 及 $t_5 \sim t_6$ ：其分別為射頻電路發送封包前後之暫態波形，其總消耗電流分別約為 6.75 μ A 及 16.9 μ A。
- (5) 區間 $t_4 \sim t_5$ ：此區間即為射頻電路進行封包發送時所消耗之電流波形，其發送時間亦與封包大小成正比之關係，且其平均消耗電流量為 22.1mA。

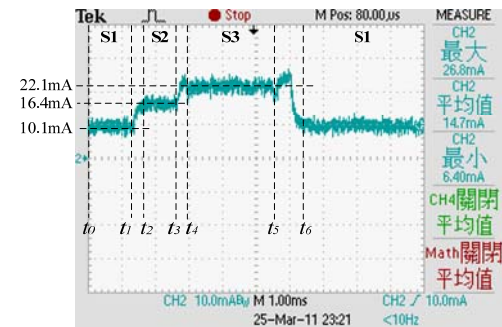
圖八即為各狀態及切換瞬間所造成之額外能耗情況，其中各工作狀態上之電流，即代表維持於該狀態下所消耗之平均電流，而各工作狀態間之數值，則分別代表切換所消耗之總電流及切換造成之延遲時間，且由圖可知，由休眠狀態轉至閒置狀態瞬間需較多之能耗，且於閒置狀態所需消耗之平均電流業僅次於運轉狀態，故於規劃 ZigBee 模組之工作排程，應儘量避免 ZigBee 模組處於閒置狀態。

五、 結論

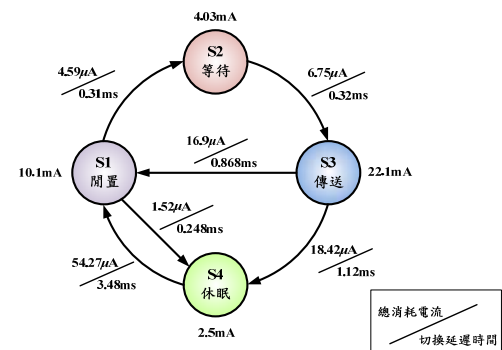
本文已完成應用於塑膠射出成型機之抗干擾型訊號感測離型電路，並完成無線感測網路數據傳輸與遠方監測控制之功能。本文同時分析無線感測網路訊號傳遞及系統監視之效能，由實驗結果可知本文所架設之無線感測網路系統能量損耗相當低，可提升塑膠射出成型機訊號感測電路之使用時間。



圖六：傳輸率與封包傳送成功率之關係圖



圖七：封包發送過程之電流波形



圖八：工作狀態切換瞬間所造成額外能耗及延遲時間

參考文獻

- [1] J. Lee, C. Chuang, and C. Shen, "Applications of short-range wireless technologies to industrial automation: a ZigBee approach," IEEE International Conference on Telecommunications, Venice/Mestre, Italy, pp.15-20, May 2009.
- [2] S. S. Riaz Ahamed, "The role of ZigBee technology in future data communication system," Journal of Theoretical and Applied Information Technology, pp.129-135.
- [3] Y. G. Ha, "Dynamic integration of ZigBee home networks into home gateways using OSGi service registry," IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 55, No. 2, May 2009.
- [4] G. Dini and M. Tiloca, "Considerations on security in ZigBee networks," IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing, California, U.S.A., pp. 58-65, June 2010.
- [5] L. Cao, Y. Liu and S. Yang, "Wireless networked security system based on ZigBee technology," IEEE International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Dalian, China, pp. 1-4, October 2008.
- [6] B. Yang, "Study on security of wireless sensor network based on ZigBee standard," IEEE International Conference on Computational Intelligence and Security, Beijing, China, Vol. 2, pp. 426-430, December 2009.