

光能驅動無線感測器網路於 便利商店舒適環境應用

Application of a Light Powered Wireless Sensor Network for Providing a Comfortable Environment in a Convenient Store

陳誌生、李達生、陳炳輝

Chih-Sheng Chen, Da-sheng Lee, Ping-Hei Chen

本文介紹一套光能驅動之無線感測器網路，用於建立便利商店內顧客舒適環境，並在舒適條件下進行有效的節能控制。在 M2M (men to machine, machine to men) 舒適度節能控制系統下，以光能驅動無線感測網路收集空間中所需物理量，並且利用 RFID 無線傳輸技術準確收集各節點之溫濕度及風速，以舒適度指標 (PMV) 為控制回饋，找出空調最佳控制設定。控制前賣場內部舒適度分布在 0–0.5 之間，控制後賣場內部舒適度維持在 0.4 之間，而空調耗電量控制前耗電量每小時約為 1.8–2.0 kWh，控制後每小時約為 1.2–1.8 kWh，節省 15% 以上之耗電量，創造便利商店實現智慧監控、節能管理等兩大功能。

The aims of this study are not only to provide customers a comfortable environment by controlling the temperature and lighting in a shopping area with a wireless sensor network but also to save power consumption. In a Men to Machine, Machine to Men (M2M) platform, a wireless sensor network powered with indoor-lighting is used to collect environmental data of temperature, humidity, and air velocity data. The collected data are transmitted to the platform by using a Radio Frequency Identification (RFID) technique for determining the optimal settings of air-conditioning. Before implementing the proposed M2M platform in a convenient store, the indoor Predicted Mean Vote (PMV) of the convenience store is 0–0.5 and the power consumption of air-conditioning is 1.8–2.0 kWh. After implementing the proposed M2M platform in a convenient store, the PMV is kept around 0.4 and the power consumption of air-conditioning system is reduced to a value of 1.2–1.8 kWh. The proposed platform can not only save 15% of power consumption of air-conditioning of the convenient store but also to keep the same comfortable environment of shoppers in the convenient store.

一、前言

便利超商林立於台灣的大街小巷中，已成為國人生活中的必備場所，然而便利商店為了賺取更多

的營業額，想盡辦法地物盡其用著這小小的場所。便利商店內受到各式各樣冷熱空氣的供給，如外氣在夏天時為熱空氣，在冬天時為冷空氣；空調提供冷氣；熟食區提供熱氣；飲品開放櫃提供冷氣等，

這造成走進便利商店時，在某些區域會有不舒適的感受。

在 21 世紀的現在，全世界最關注的就是地球暖化現象，近年來便利商店配合政府政策實施節能減碳及汰舊換新活動，在照明耗電量及空調耗電量上均有明顯的改善，照明設備汰舊前後約省能 26%，空調設備汰舊前後約省能 30%⁽¹⁾。

雖然便利商店對於省電節能方便不餘遺力，但只有針對設備的汰舊方面節能，並沒有針對用電狀況來進行節能，所以有必要針對其用電狀況進行節能策略規劃。

二、便利商店內能量回收效率評估

由相關文獻可知，便利商店內可收集到的能量有雜散的熱能能量、振動能量與光輻照能量，空間中雜散能量比較如表 1 所示，太陽能為單位密度所能產生的能量最高者⁽²⁻⁴⁾，但因其電路配置之故，太陽能板整體之發電能力多受到無謂之損耗。

三、無線通訊改良與能量回收技術實現配置後不理之感測器網路

無線通訊技術之進步，省卻感測器需配置信

號線之不便，使感測器網路更臻實用⁽⁵⁻⁸⁾。對應於此，感測器網路市場亦急速成長，市調公司 In-Stat 發表報告指出，2009 年 IEEE 802.15.4 架構 (即泛稱之 ZigBee) 節點／晶片組市場的複合年增率達 50%，2009 年的出貨量超過 1.5 億個，整體市場可達三億美金^(9,10)。

儘管預期市場誘人，現實狀況是 ZigBee 仍如網路通訊使用的無線規範 IEEE 802.11，制定之初未臻完美，而有 a、b、g、n 的改版，IEEE 802.15.4 同樣亦需經由使用經驗回饋，修改其標準，促使其功能更為完備。如 Microchip 公司便於 2007 年 7 月發表了另一個 IEEE 802.15.4 協議堆疊，被稱為 MiWi 協議。該協議架構網路層比 Zigbee 協議大約小 70%⁽¹¹⁾。

現行標準定義了相當嚴謹的網路架構，儘管結構嚴謹可確保通訊品質與加密性，然而在真實應用上，卻可能反因過於嚴謹的網路架構層堆疊，造成通訊節點上功耗過大狀況，不利於實用。本研究亦著眼於此，將修改無線通訊，結合無線射頻識別技術 (radio frequency identification, RFID) 技術，實現一套星狀網路，即以讀取閘道作為中心，將散布之感測器設為等距節點，以 RFID 特有之無線能量偶合，序列讀取感測器量測資料，將感測器網路通訊能量消耗降至最低，但仍保有良好之通訊品質，圖 1

表 1. 空間中雜散能量比較表。

雜散能量類型	能量來源	回收機制	估計可產生能量密度 (單位平方公分面積)
熱能	開啟空調對室內降溫、以熱幫浦或電熱內室內加溫、太陽輻射造成室內溫升、室內電器開啟後排熱、人員活動發熱	熱電晶片 (Thermoelectric chip) 兩端溫差發電	15 μ W/10 $^{\circ}$ C
振動動能	室內人員活動造成震動、室內大動力機具，如馬達等造成震動	壓電材料發電 (Piezoelectric)	200 μ W
		電容感抗發電 (Electrostatic)	50 – 100 μ W
		電磁發電 (Electromagnetic)	1 μ W
光能	太陽輻射、室內照明開啟	太陽能光電板發電 (Photovoltaic)	陽光直射 15 mW
			陽光斜射 150 μ W
			室內照明 500 – 1500 lux
			直下曝照 5 – 15 mW
			斜照 50 – 150 μ W

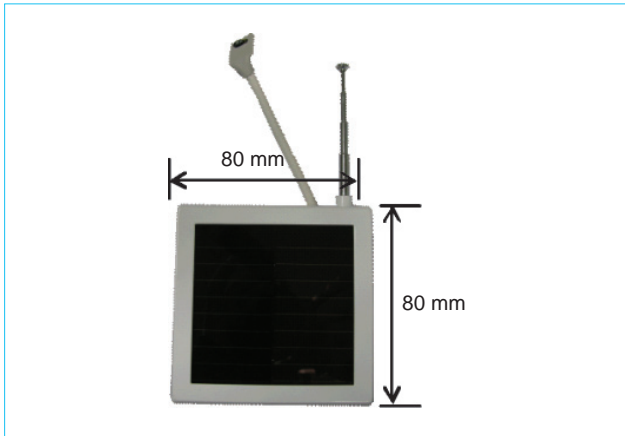


圖 1. 運用 RFID 通訊實現感測資料蒐集之感測節點。

為開發利用 RFID 實現感測器通訊之節點與閘道讀取器。

在利用 RFID 技術使通訊功耗降至最低情況下，本研究進一步利用能量回收技術，結合太陽能光電板之使用，回收空間中雜散之照度能量，作為感測器、相關線路與通訊支援電力之用，由此，實現在感測器節點上，完全不需電力線或電池電源配置，即能長時運轉，蒐集感測資料。結合能源與電子通訊科技之發展，架構設置後不理 (deploy and forget) 之感測器網路，大幅降低了運行維護成本，也讓配置於便利商店內感測器網路更為強健。

能量回收技術實現關鍵在於一獨特之 CMOS-MEMS 晶片開發，利用高輸入阻抗的運算放大器實現之切換線路 (switching circuits)，改變變壓比例，用於儲存電力 (energy storage) 時配合儲存媒介，如電容、黃金電容或是蓄電池，進行充電變壓調整，提高充電效率。而在驅動下端線路之微處理器與無線通訊模組等，經常進行啟動－休眠模式轉換之元件，則可由切換線路高速應答，實現高電流轉換速率 (high slew rate) 之切換，此時奈米流體填注之磁心，則可發揮抑制電壓震盪之效果。若需驅動低電壓但電流量需求大的感測器元件時，則可調變線圈至低比例增壓，達成有效電流驅動。由運算放大器與微結構螺線管進行調制後，驅動後端電子線路，有效運用其能量，達成下端線路各項元件有效驅動，其功能可類比於電子產品中普遍配置之功率管理晶片，調整元件驅動節省電力，或達成電池

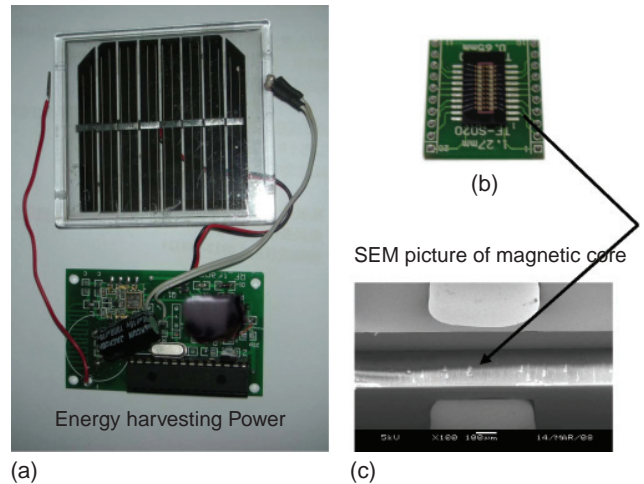


圖 2. 開發能量回收晶片技術，可以回收空間中雜散能量，用於微處理器與感測元件驅動，進行智慧建築或高科技廠務自動化管理。(a) 電源供應器本體，(b) 系統核心，能量回收晶片實體，(c) 能量回收晶片關鍵技術，微機電製程製備磁心結構。

驅動裝置長時間運轉。圖 2 為創新之能量回收晶片及其架構之電源供應器，可回收空間中雜散能量，用於功耗 mW 等級電子設備驅動。

實現能量回收晶片，關鍵在於微螺線管結構以及奈米磁流體製備，用於灌注螺線管中央槽道產生感應磁心。此奈米磁流體係與台灣大學微機械熱流控制實驗室合作，以兩階段製程製備磁性奈米流體，第一階段是先利用加工方法把強磁性物質變成超微粒子，第二階段以界面活性劑包住強磁粒子，目的在於防止粒子彼此之間的聚集。本研究將使用化學共沉法製作磁性奈米流體，化學共沉法將兩價與三價鐵離子溶液依特定比例混合，接著加入鹼性溶液，使之化學作用生成奈米級磁性顆粒，再添加界面活性劑讓磁性顆粒穩定形成最終流體。

晶片中微螺線管結構以微機電技術 (MEMS) 製造，且為使本研究開發晶片能易於量產，迅速將研發概念轉化為商品，故選擇以台積電標準 2p2m 製程為基底，再以後製程 (post-process) 製作微螺線管，此稱為 CMOS-MEMS 之製程技術，完成製作後即可達成整合微結構與驅動線路之開發。

整合 RFID 通訊系統與能量回收技術，由

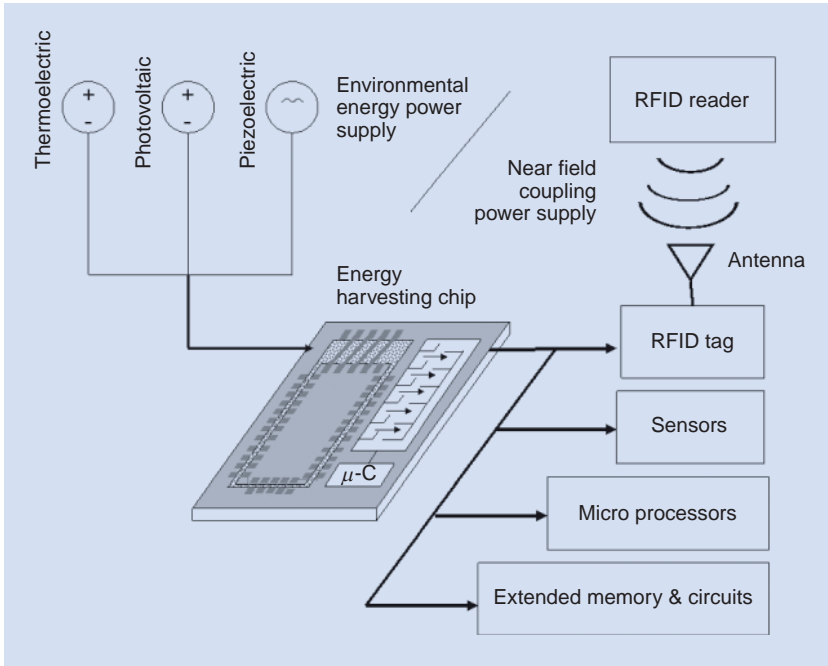


圖 3. 結合 RFID 通訊與能量回收技術實現感測器網路節點上無需電源供應之配置方塊圖。

RFID 可實現耦合通訊，使訊號傳輸可以無源方式進行，而微處理器與感測器則能以能量回收方式驅動，兩項特性實現未來感測器網路配置，在節點全無電源配置必要狀況下，達成配置後無需維護管理而能持續運行之目的，可說為近年來在建築自動化研發關鍵之技術突破，相關研究成果已發表於 SCI 期刊上⁽¹²⁾。圖 3 為整合無線通訊改良與能量回收技術之感測節點方塊圖，圖 4 則為本團隊研發雛型實

體，及其配置於便利商店內之實景。

本研究植基於 RFID 技術實現之通訊系統改良，以及 CMOS-MEMS 晶片達成之能量回收技術，打造一配置後無需更換電池維護之感測器網路，以其強健特性，可永續為城市提供智慧服務。

實務上而言，利用太陽能板驅動之感測節點，可利用其配置位置上便利超商 24 小時開啟之燈光，持續為感測器提供能量，而能長時間運轉，無

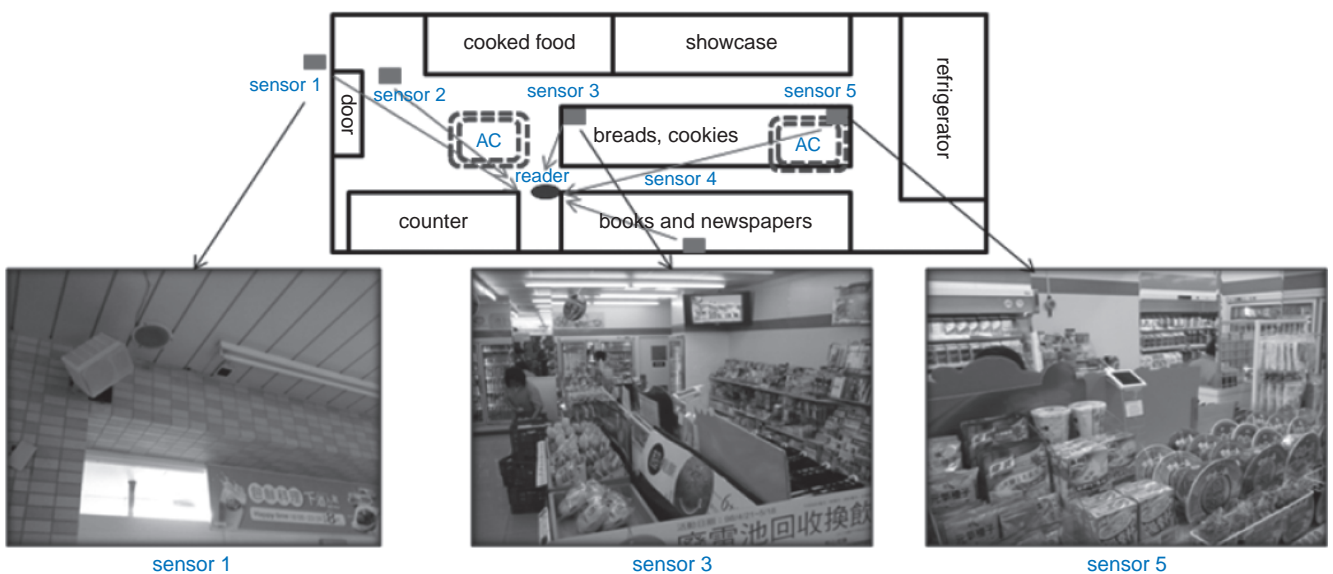


圖 4. 結合 RFID 通訊與能量回收技術實現感測資料蒐集之感測節點雛型及其配置於便利商店內之實景。

需考慮回收能量不足。而安裝感測節點之工程，僅需便利超商些許空間，完全無需電力配線，因此不干擾店內任何配置。由此，能量回收技術實現安裝感測節點配置上便利性，從而使城市感測網路於實體裝置上真正有其可行性，而無需大興土木，配線供電。

四、PMV 量測

目前便利商店所使用之空調皆以回風口近蒸發器處單點溫度感測，作為回授控制依據，但缺乏其環境資料蒐集，而無法對應於室內分布之舒適度指標作出有效的控制回饋。

空調舒適度控制已有很多相關研究，發展出在不同環境下的 PMV 數學邏輯運算⁽¹³⁻¹⁸⁾，而舒適度控制仰仗人們正確的使用觀念外，本研究針對人們活動範圍內區域布置光能驅動無線感測器節點，量

取舒適度需要的數值。

如何以量測技術來量化舒適度，多數研究均指出採用多物理量量測並計入人體狀況來決定舒適度等級⁽¹⁹⁻²⁴⁾，其中 Fanger 研究將人體舒適度的調查結果與能量平衡關係建立完整的理論模式，明確指出人體的熱舒適性受到溫度、風速、空氣濕度、平均輻射溫度、人體活動量以及衣著量等六個參數的影響。Fanger 的舒適度量化評估方法包括預測平均熱感覺 (PMV) 與預測不滿意百分率 (PPD) 兩方面，以熱舒適方程式為基礎，導出 PMV 指標的產生是來自於許多受測試者，在特定的量測環境裡，對一些環境條件所做出的主觀評估，最終在各種活動量、衣著量和環境等各種因素之排列組合下，達成可能的熱舒適感覺預測，並分為七個等級，範圍由寒冷 -3 延伸至炎熱 +3，中立點 0 代表熱舒適度適中的狀況。PMV 指標所代表之熱感覺分別為如表 2 所列。

$$PMV = (0.303e^{-0.36M} + 0.028) \left\{ \begin{array}{l} (M - W) \\ -3.05 \times 10^{-3} [5733 - 6.99(M - W) - P_a] \\ -0.42[(M - W) - 58.15] \\ -1.7 \times 10^{-5} M(5867 - P_a) \\ -0.0014M(34 - t_a) \\ -3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] \\ -f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \end{array} \right\}$$

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028(M - W) - I_{cl} \left\{ 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \right\}$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} & \text{for } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} \geq 12.1v_a \\ 12.1\sqrt{v_a} & \text{for } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} \leq 12.1v_a \end{cases}$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.29I_{cl} & \text{for } I_{cl} \geq 0.078 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W} \\ 1.05 + 0.645I_{cl} & \text{for } I_{cl} \leq 0.078 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W} \end{cases}$$

其中， f_{cl} 為衣著表面積係數、 M 為人體新陳代謝率 (W/m^2)、 W 為對外作工率 (W/m^2)、 I_{cl} 為衣服絕緣值 ($\text{m}^2 \cdot \text{°C/W}$)、 P_a 為水蒸氣分壓 (Pa)、 t_a 為室內空氣溫度 ($^{\circ}\text{C}$)、 t_r 為平均輻射溫度 ($^{\circ}\text{C}$)、 v_a 為氣流速度 (m/s)、 h_c 為對流熱損失係數 ($\text{W/m}^2 \cdot \text{°C}$) 及 t_{cl} 為衣服表面溫度 ($^{\circ}\text{C}$)。

五、M2M 舒適度節能控制系統

感測器網路由多個感測器散布於空間中組成，其基礎概念為各別感測器模組將量測原始資料數據回傳到中央系統，由中央系統運算分析後，取得空間中資訊後進行決策或據以遂行控制。傳統感測器

網路研究，其一為依據現代控制理論所闡述的觀測器設計，另一則是由 Neyman-Pearson 準則推演的最佳化感測器配置，以降低感測器網路測量誤差機率，相關理論已相當完備⁽²⁵⁾。

M2M 包含了機器對機器 (machine-to-machine)，更包括了人對機器 (man-to-machine)、機器對人 (machine-to-man) 與人對人 (man-to-man) 之間的連線，並從而實現在結合環境空間與人員舒適度量測的情況下，可依現場狀況與設備分配不同，進行適應性調整的節能控制系統，建立 M2M 關係的即時溝通，如圖 5 所示，除可進行設備控制間的自動同步調整，更可衍生作為空間最佳舒適度控制以及依照空間中人員分布進行適應性節能控制的參考回授。欲達成此目的，佈建便利超商之感測器網路為不可或缺之要素，由多個感測器散布於空間中組成網路，收集環境量測物理量並邏輯運算出人體舒適度，以控制空調機溫度或風速調節達到最佳舒適度及最佳耗電量狀況，乃至於空間中人員分布之資訊，實現空調設備動態控制。

六、量測結果

1. 於實驗室內量測

首先利用實驗室級之多功能精密量測儀器 testo 400 與開發之無線感測網路節點比較，在相同的空調設定環境下，依照溫度、相對濕度及風速等

表 2. PMV 指標不同等級範圍代表之熱舒適感覺。

Value	Heat comfort feeling
+3	Hot
+2	Warm
+1	Slight warm
0	Neutral
-1	Slight cool
-2	Cool
-3	Cold

三物理量比較，如圖 6 所示，說明了溫度感測器與 testo 400 所量出來的溫度相近，最大溫差約 0.5 °C，而各無線感測器節點與實驗室儀器量測所得數值，誤差值均在 5% 之內，尤其風速感測器只有 0.01 m/s 以下的差距，由此證明光驅動無線感測器配置之感測器足以有效用於空間中舒適度相關資訊之蒐集。

2. 於便利超商量測

本研究的實驗地點是位於台北市中山區辦公大樓樓下之便利超商，此便利超商人潮較多時段約在星期一至星期五早上 8:30—9:30、中午 12:30—13:00 及下午的 15:30—16:00。便利超商內之無線感測器節點共擺放 4 個位置，分別為入口處 (sensor 2)、熟食區 (sensor 3)、書報區 (sensor 4) 及後場開放櫃區 (sensor 5)，另外，在門口外擺放 1 個。

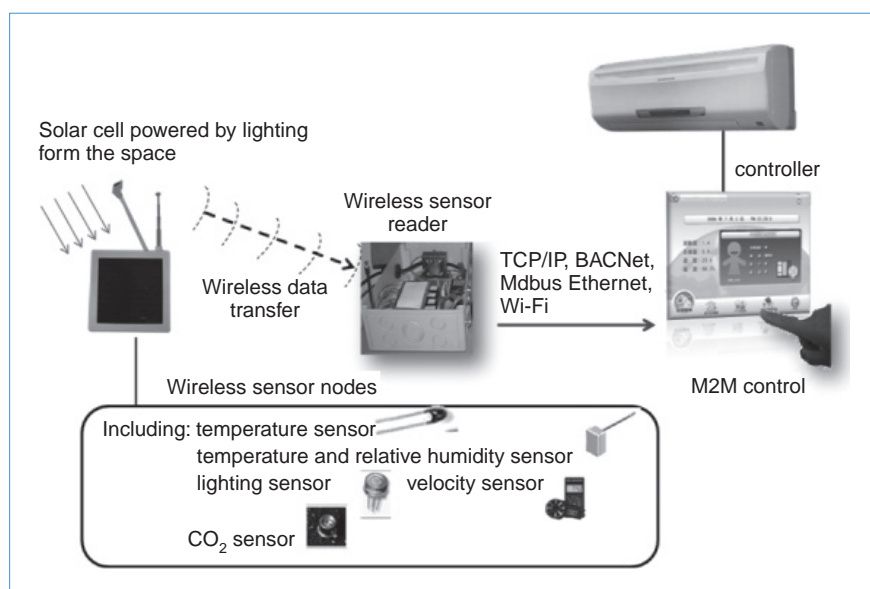


圖 5. M2M 舒適度節能控制系統。

實驗量測時間從 9 月 21 日早上 10 點開始，直到 9 月 24 日早上 10 點結束，實驗為期四天，其天氣狀況相似，均為晴朗炎熱的氣候。在 9/21、9/22 兩天為無任何空調調整，以空調之單點溫度回授

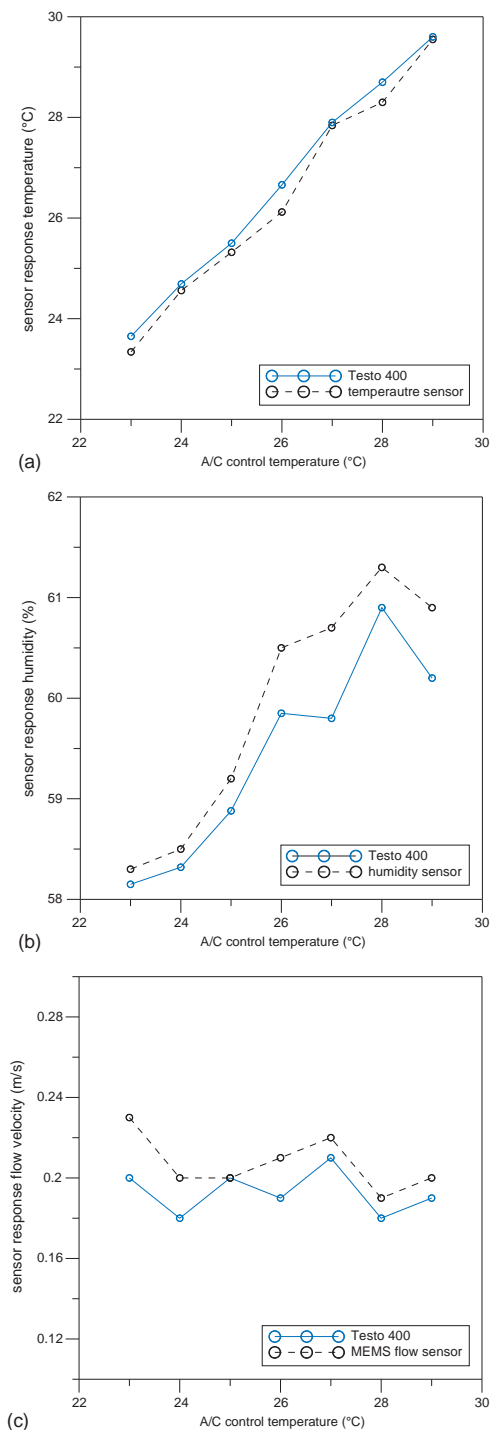


圖 6. 感測器節點之 (a) 溫度、(b) 相對濕度及 (c) 風速與實驗室級量測儀器比較。

控制風量及溫度調整；在 9/23、9/24 兩天為加入 M2M 資訊整合平台，利用 PMV 量測方式，量測各監測點之溫度及風速。

圖 7 為 sensor 5 (後場開放櫃區) 之溫度監控結果，其前兩天發現在夜間時來客數並不多，而空調溫度也沒調高，並且後場溫度受到開放櫃的影響造成溫度整個下降，而溫度是等到早上上班時間因為人潮而再度提升，整體溫度約在 23.5–24.5 °C 之間。後兩天開啟 M2M 資訊整合平台，經過 PMV 計算之後，修正過低的溫度，以提升溫度、調整風量或關閉空調機等方式，調整溫度約在 24–25 °C 之間，得到最佳的環境舒適度。

圖 8 為 sensor 2 (入口處) 之溫度監控結果，因為擺放靠近門口受到外氣的原因，整體的溫度比 sensor 5 之量測高出約 2 °C。中午時段因為人潮眾多，在無 M2M 控制的前兩天溫度受到人群的進進出出，造成室內溫度受到外氣影響而提升，而夜間也受來客數較少，溫度跟著下降，整體溫度約為 25.5–27 °C 之間。後兩天開啟 M2M 資訊整合平台，經過 PMV 計算之後，因為 sensor 2 在中午時段為一較高的溫度，經過修正後，以降低溫度及調高風量等方式，讓環境是在最佳的舒適度，調整溫度約為 26–26.5 °C 之間。

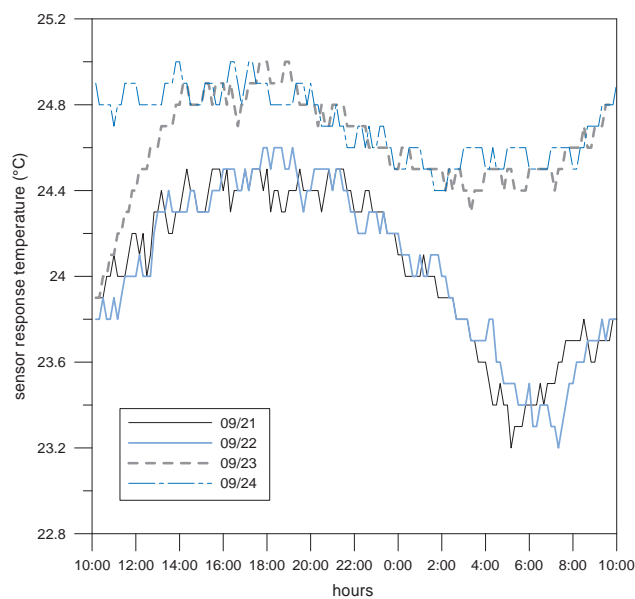


圖 7. 便利商店 sensor 5 之溫度變化情形。

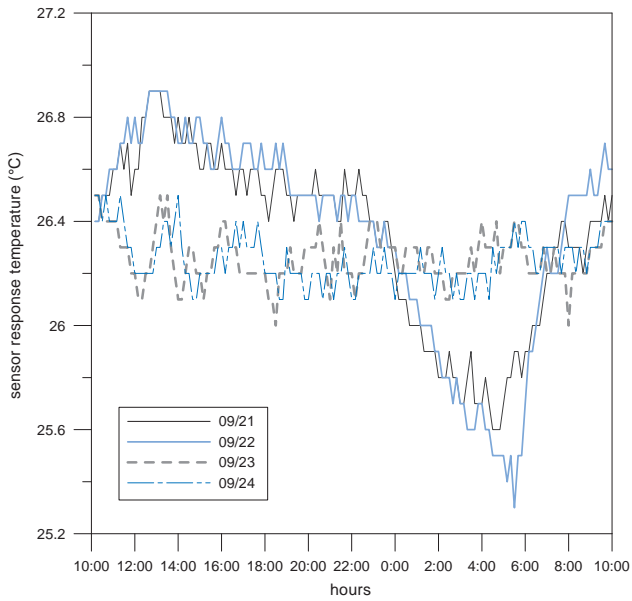


圖 8. 便利商店 sensor 2 之溫度變化情形。

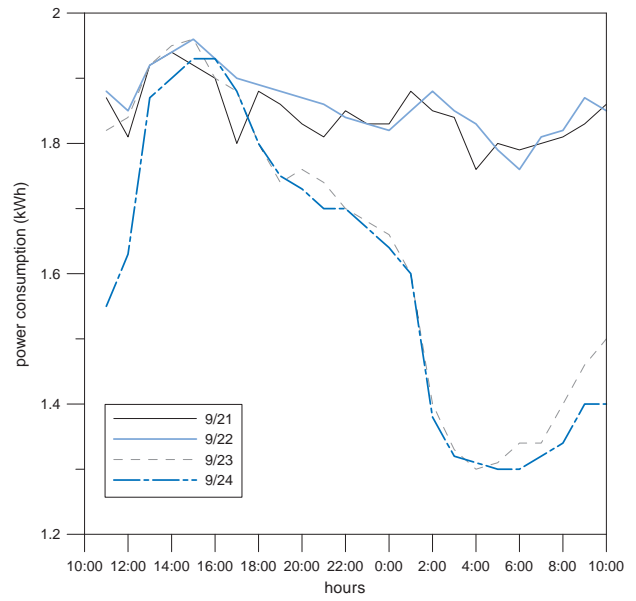


圖 10. 監控前後之空調耗電量。

七、結果與討論

便利商店之舒適度量測以感測器收集空間中溫度、濕度及風速等物理量，以較為客觀方式判斷環境是否舒適，修改以往較主觀的舒適度問卷調查方式。四天的實驗結果如圖 9 所示，整體環境 PMV 值約落在 0.4，是在舒適的環境下；在無

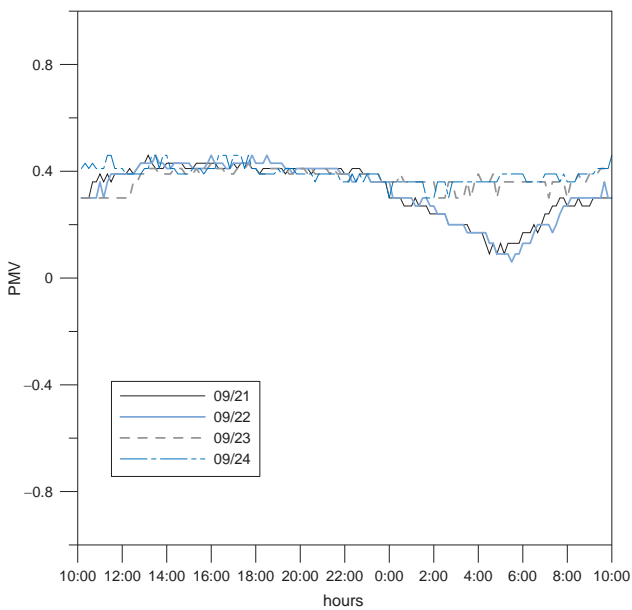


圖 9. 監控前後之 PMV 值。

M2M 控制的期間，因為夜間來客數較少，PMV 值從 0.5 降到 0，是在非常舒適的環境下，而後兩天在 M2M 舒適度節能控制系統修正下，夜間來客數較少時段提升空調溫度，將整個便利商店溫度維持在一變動較小的環境，PMV 值約落在 0.4 附近震盪。

空調耗電量如圖 10 所示，無 M2M 舒適度節能控制系統之期間每小時的空調耗電量約為 1.8–2.0 kWh，後兩天因為受到 M2M 舒適度節能控制系統控制，其空調耗電量約為 1.2–1.8 kWh，控制前後耗電量約節省 15% 以上。

誌謝

感謝全家便利商店配合，提供實驗場所，讓此實驗研究及驗證順利成功，特此致謝。

參考文獻

1. 便利商店節能技術手冊, 經濟部能源委員會, 台北市 (2001).
2. D. M. Rowe, Thermoelectrics, *Renewable Energy*, **16**, 1251 (1999).
3. H. A. Sodano, D. J. Inman and G. Park, *The Shock and Vibration Digest*, **36** (3), 197 (2004).

4. E. O. Torres and G. A. Rincsn-Mora, Energy-harvesting chips: The quest for everlasting life, http://www.eetasia.com/ART_8800378146_765245_1fe14900_no.HTM (2005).
5. R. Viswanathan and P. K. Varshney, *Proceedings of the IEEE*, **85** (1), 54 (1997).
6. Z. B. Tang, K. R. Pattipati, and D. L. Kleinman, *IEEE Trans. Syst., Man Cybern.*, **23**, 211 (1993).
7. V. Megalooikonomou and Y. Yesha, *IEEE Trans. on Comm.*, **48** (2), 181 (2000).
8. S. C. A. Thomopoulos and L. Zhang, *Inform. Sci.*, **66** (1), 91 (1992).
9. R. R. Garcia, Understanding the Zigbee Stack, http://www.eetasia.com/ARTICLES/2006JAN/PDF/EEOL_2006JAN02_RFD_NETD_TA_01.pdf (2006).
10. In-Stat Inc. 2004 至 2009 年 ZigBee 市場複合年增率將達 200%, http://www.eettaiwan.com/ART_8800368974_675327_51b921cf.HTM (2006).
11. www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodeId=2113¶m=en520414
12. D. S. Lee, *Sensors*, **8** (12), 7690 (2008).
13. F. Yamada, K. Yonezawa, S. Sugawara, and N. Nishimura, Development of Air-conditioning Control Algorithm for Buidling Energy Saving, *the 1999 IEEE International Conference in Control Applications* (1999).
14. J. Kang and S. Park, *Sensors and Actuators A*, **82**, 302 (2000).
15. K. H. Yang and C. H. Su, *Building and Environment*, **32** (1), 25 (1997).
16. K. Yonezawa, F. Yamada, Y. Wada, and Y. Hanada, *26th Annual Conference of the IEEE*, **3**, 1737 (2000).
17. C. M. Chu, T. L. Jong, and Y. W. Huang, *Energy Conversion and Management*, 1579 (2005).
18. D. Kolokotsa, G. Saridakis, A. Pouliezios, and G. S. Stavrakakis, "Design and installation of an advanced EIBTM fuzzy indoor comfort controller using MatlabTM", *Energy and Buildings*, in press (2006).
19. ANSI/ASHRAE Standard 55, Thermal environmental conditions for human occupancy, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2003).
20. P. O. Fanger, *Thermal comfort*, New York: McGraw-Hill (1972).
21. ISO standard 7730, Moderate thermal environments-Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort, Geneva: Internation Standards Organisation (1995).
22. ANSI/ASHRAE Standard 55, Thermal environmental conditions for human occupancy, Atlanta ,American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (1992).
23. N. Fergus, *Survey of thermal comfort in Pakistan, Towards new indoor air temperature standards*, Oxford Brookes University, Oxford (1994).
24. J. Kang and S. Park, *Sensors and Actuators A*, **82**, 302 (2000).
25. R. Viswanathan and P. K. Varshney, *Proceedings of the IEEE*, **85** (1), 54 (1997).



陳誌生先生為國立台北科技大學機電科技研究所博士班學生。

Chih-Sheng Chen is currently a Ph. D. student at the Institute of Mechanical and Electrical Engineering of National Taipei Technology University.



李達生先生為國立台灣大學機械工程博士，現任國立台北科技大學能源與冷凍空調工程系副教授。

Da-Sheng Lee received his Ph.D. in mechanical engineering from National Taiwan University. He is currently an associate professor at the Department of Energy, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineering of National Taipei Technology University.



陳炳輝先生為美國明尼蘇大學博士，現任國立台灣大學機械工程學系特聘教授。

Ping-Hei Chen received his Ph.D. in mechanical engineering from University of Minnesota. He is currently an distinguished professor at the Dept. of Mechanical Engineering of National Taiwan University.