

An Energy Saving Control System for Intelligent Buildings with Sensor Networks

Kun-Cheng Tsai Jing-Tian Sung Chung-Yu Wang
Institute for Information Industry, Taiwan, R.O.C.
garytsai@iii.org.tw today@iii.org.tw fujima@iii.org.tw

摘要

本研究根據室內外環境因子與使用者行為進行自然調節，並控制電機設備以進行建築內部微氣候調整，改善現有空調的回授控制系統常常造成耗能與不舒適的問題。本研究主要貢獻在於應用感測網路於建築外層，使其具備溫度預測、恆溫控制、舒適度感知與自然調節等功能，以達成省能環保目標之智慧化建築。

關鍵詞：熱舒適度、感測網路、智慧外層、智慧建築

Abstract

The traditional air-conditioner system improves the indoor climate according to the environment information and feed back control mechanism. However, this method consumes much power and can not achieve comfortable condition. The main contribution of this study is creating a control system using wireless sensor networks to coordinate the smart skin equipments and air conditioners to improve the thermal comfortable with lower power consumption.

Keyword: thermal comfort, wireless sensor networks, smart skin, intelligent building

1. 前言

近年來，為了提升居住品質並有效的利用能源，發展智慧型居住空間已成為重要的研究議題。所謂智慧型居住空間是由智慧型建築和相關技術所構成。在以往智慧型建築的研究中，大多數著重在自動化控制技術，信號傳輸及建築系統管理等技術上。而隨著資訊通訊科技的進步，透過網路將各種環境感知設備導入建築設計中，使建築外層如同人類的皮膚具有環境條件感受能力。裝置在智慧型建築中的感測器網路（wireless sensor networks, WSNs）[1,2]會主動地感知外部環境的變化，並判斷內部使用空間的需求。進一步透過訊息傳遞及設

備系統控制，將環境調節成最適宜的使用情況。因此，建築外層被賦予更多功能，例如：建築節能、室內物理環境調節、資通訊功能、能源產生與安全防護。藉此使建物達成健康、舒適、節能、潔能的目標。這也是設計智慧化居住空間的重要方向。

在下一節中，我們會介紹如何透過標準化的指標來定義舒適的程度。在第三節則說明我們所提出的控制方法。第四節展示我們實驗結果與說明分析。最後在第五節總結了本文的工作並說明未來的發展方向。

2. 文獻探述

在智慧型建築中，維持舒適的環境是基本需求，本文採用被國際標準組織定為熱舒適評估指標的 ISO 7730 [5]為基準。

2.1 PMV 熱舒適度指標

根據 ISO 7730 的定義，熱環境上的舒適為「當人的下意識對所處之熱環境表示滿意時的狀況」。人體對熱環境感到滿意的基本條件是人體與環境保持熱平衡。其評估方法，包括預測平均熱感覺 (Predict Mean Vote, PMV) 與預測不滿意百分率 (Predict Percentage of Dissatisfaction, PPD) 兩方面。該指標以 Fanger 所提出的熱舒適方程式[4]為基礎，導出 PMV 值與影響人體熱舒適的關係式。其方程式如下所示：

$$\begin{aligned} PMV = & (0.303e^{-0.036M} + 0.028)\{M - W - 3.05 \times 10^{-5} \\ & [5733 - 6.99(M - W) - P_a] - 0.42[M - W - 58.15] \\ & - 1.7 \times 10^{-5} M(5867 - P_a) - 0.0014M(34 - t_a) \\ & - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] \\ & - f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a)\}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.290I_{cl}, & I_{cl} \leq 0.078 \\ 1.05 + 0.645I_{cl}, & I_{cl} > 0.078 \end{cases}, \quad (2)$$

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028(M - W) - I_{cl} \{3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)\} \quad (3)$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25}, & 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} > 12.1\sqrt{V_a} \\ 12.1\sqrt{V_a}, & 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} < 12.1\sqrt{V_a} \end{cases} \quad (4)$$

在上式中的符號定義如下：

- M ：人體能量代謝率， W/m^2 ；
 W ：人體所做的機械功， W/m^2 ；
 P_a ：人體周遭空氣的水蒸氣分壓力；
 t_a ：人體周遭空氣溫度， $^{\circ}C$ ；
 t_r ：空間的平均輻射溫度， $^{\circ}C$ ；
 f_{cl} ：衣著表面係數，與服裝熱阻有關；
 I_{cl} ：衣服熱阻， $m^2 \cdot K/W$ ；
 t_{cl} ：衣服的表面溫度， $^{\circ}C$ ；
 h_c ：表面傳熱係數， $W/(m^2 \cdot K)$ ；
 V_a ：空氣流速， m/s 。

而預測不滿意百分率 PPD 用以下方程式表示：

$$PPD = 100 - 95 \exp(-0.3353PMV^4 - 0.2179PMV^2) \quad (5)$$

在影響 PMV 的因素中，有四個與環境有關：溫度、相對濕度、空氣速度及平均輻射溫度；另外兩個與人體有關：人體活動量以及衣著量絕緣值。而 PMV 指標共分為 7 個程度。範圍由-3(冷)延伸至+3(熱)，中立點 0 代表熱感適中的狀況。其各值所代表之熱感覺分別如表 1 所示。

表 1 PMV 數值及其代表意義

PMV數值	代表意義
+3	熱
+2	暖
+1	稍暖
0	舒適
-1	稍涼
-2	涼
-3	冷

此外 ISO 7730 所推薦的舒適範圍為 $-0.5 < PMV < 0.5$ 。也就是讓 90%以上的室內居住者對其所處的熱環境感到滿意。

2.2 智慧外層

建築物智慧外層之概念始於1981年由英國建築師Mike Davies 所提出多效能玻璃面(multiple-performance glazing)之構想[3]。將建築物外層簡化為多層的合成元素，運用其自我調節控制系統，提昇室內環境之舒適性。建築物外層又可稱為建築物表皮或建築物皮層，是建築內外空間的交界處。Michael Wigginton 與 Jude Harris指出建築外層乃是建築物外立面，主要為包圍建築內部功能的建築構件，亦指建築物外圍護結構 [7]。建築外層是建築內外空間之介面。透過觀察建築史與建築技術之演進，建築外層功能由承重結構逐漸轉變為具有決定建築物整體造型美觀之重要元素。建築外層透過建築構造技術之進步，賦予建築物機能如：建築節能（日照採光、溫度控制與調節）與安全防護（防盜、防災）之重要作用。

邱茂林指出智慧外層乃是能對於環境反應的建築表皮(responsive skin)。由感測器、運算機制以及作用器三個主要部份所構成 [10]。溫琇玲指出建築外層的主要功能表現在建築的內部空間與建築外部空間的關係上，概括可分為圍蔽和交流兩個方面[8]。建築外層既需要在一定程度上與外部空間相分隔，隔絕外部環境對建築空間使用的不利性因素（噪音、雨水、輻射熱、廢氣、灰塵等），同時必須對外部空間開放達成能量交換（風、日照、熱量等）的目的。顧宗沛則在文獻[6]中指出，自然環境之作用因子與建築物外層性能之關係中，其所謂外層應包含：透過、傳達、遮斷反射、吸收與保持等性能。分別與自然環境之作用因子做關係說明，則可定義出建築外層所具備之特性與性能。

2.3 無線感測器網路

無線感測器網路是由數個感測器和資料融合單元(fusion center)所構成。這些感測器佈建在環境中並感測環境的各種變化。透過無線傳輸技術，將測得的結果傳到資料融合單元。由於無線感測網路不需要用傳輸線來傳送資料。所以在布建上相較於傳統的方式更為方便。此外，由於大型積體電路技術的進步，感測器的成本也越來越低廉，更能使建設智慧居住空間的成本降低。

在本文中，我們將無線感測器網路與智慧建築結合，以實現建築物智慧外層的概念。在下一節會進一步說明研究的方法。

3. 研究方法

本研究應用 ISO-7730 綜合性熱舒適性 PMV 指標，以 PMV 為基礎之運轉效率最佳化控制技術為核心，依照人體活動程度、衣服熱阻、空氣溫度、平均輻射溫度、空氣流動速度和空氣濕度等六個因素，協調運用建築外層設備(遮陽、採光、通風設備)與空調系統，改善環境之熱舒適度並降低能源耗用量。並且在本研究所建置之智慧外層實驗屋進行準確度與效能評估實驗。

3.1 PMV 與環境感測因子

本研究的熱舒適度 PMV 指標，目前透過感測器直接偵測室內外的空氣溫度、濕度。在室內空氣流速方面，是以設備實際運轉時以儀表預先量測所得為參考值。平均輻射熱在室內無日光直接照射處是近似於空氣平均溫度。而衣著係數與人體活動量這兩項使用者變數則透過研究文獻資料作預估。因此，本研究可以有效估算出使用者的熱舒適度指標。

本研究將應用我們在 Wireless sensor network 所累積的研發成果[10]。發展出具備收集與分析室外氣候與室內環境因子的無線感測網路。在實際佈建之前，我們將運用 wireless network planning tool 規劃網路各節點適當的佈建位置。在實際佈建進行中與佈建後，也將配合 RF site survey 針對各節點位置再做微調。當系統開始運行後，我們將在中控平台執行 network monitor。定期持續監測各節點的功能是否正常。

在佈建階段，除了考慮感測網路的覆蓋(coverage)與感測網路連結性(connectivity)之外，也需要感測節點位置與環境因子特性及所屬空間(zone)的關聯性。我們將空間分割為不同的 zone 區間，在每一個 zone 的室內空間與室外的牆面佈建感測點(例如，溫/濕/光度/CO₂ 四合一感測器)，藉以偵測與辨識每一個 zone 的微氣候變化。運用建築微氣候環境因子調整技術，在不犧牲環境舒適品質的情形下，盡量避免不必要的能源損耗，以達成高效率的節能環境控制。

3.2 控制方法

為了提高環境品質估算的精準度與節能效益，研究中以估計設備調控後的環境 PMV 指標變化值技術替代溫度估計技術。此技術針對自然換氣設備、空氣流速設備、遮陽隔熱設備、致冷空調設備、除濕空調設備分別設計其

PMV 影響估算模組，與控制參數調控模組。

設備基本上依據建築立面功能將立面分為三段思考，上段部主要考量光線導入與換氣(熱空氣排出)；中段部則以遮陽、視覺穿透為設計重點；下段部之設計則側重於換氣(冷空氣導入)、隔熱為主。

智慧建築外層系統在運轉期間將藉由感測網路蒐集環境資訊，並以下列的控制邏輯選用適當的設備以改善環境舒適度：

1. 感測室內外環境因子：以式(1)及式(5)的運算方式融合估測室內環境舒適度指標 PMV 與 PPD；
2. 判斷各項設備運轉後對於環境的影響趨勢，評估設備運轉對於環境的影響程度與效能問題。在此我們提出設備運轉效能的方程式如下：

$$\rho_{EP} = \frac{\Delta PMV}{\Delta p} \quad (6)$$

其中 ΔPMV 代表 PMV 值的變化量。
 Δp 代表設備所耗損的功率。 ρ_{EP} 值越高則代表設備的效能越好。

3. 優先啟動以運轉效率 ρ_{EP} 最高之設備；
4. 設備運轉後經由感測網路回饋環境因子以判斷空間的舒適度是否達到使用者需求。

4. 實驗

本研究以實際建置的實驗屋進行系統效能比較。實驗的時間為 2007 年的十二月。其時正為台灣冬季的時候。由於台灣位於赤道附近，所以雖然是冬天，在有日照的時後室內仍會感到微熱。在實驗區的智慧建築外層上之設備包括：通氣採光窗、雙層玻璃百葉窗、百葉式通氣口，排風扇。實驗區與對照區都設有規格一致的照明設備與冷氣既除濕機，其外觀如圖 1 所示。



圖 1 實驗屋實際建置圖

圖 1 為實驗屋的建置情形，屋內規劃為實驗區與對照區。兩區之間的氣流完全隔離，控制設備也完全獨立。用以驗證採用本研究方法的實際效益。在此實驗屋室內與室外我們佈置了七個溫度、溼度、亮度的三合一 ZigBee 感測網路節點[9]，以感測基本的環境因子。感測器的外觀如圖 2 所示，其大小約 4*4*1.2cm。



圖 2 實驗屋實際建置圖

在圖 3 中我們以控制流程圖配合感測網路節點、建築外層設備以及空調系統說明實驗屋的整體環境。此項研究的創新性主要是為了改善現有空調系統獨立調控溫度、濕度、風速環境因子，缺乏整體環境品質調整與過度耗能的問題。如圖 3 所示，我們先將使用者對於環境溫度的需求專化成 ISO 7730-PMV 熱舒適指標，結合感測網路、空調系統、建築外層設備，發展環境品質感測與節能控制解決方案。

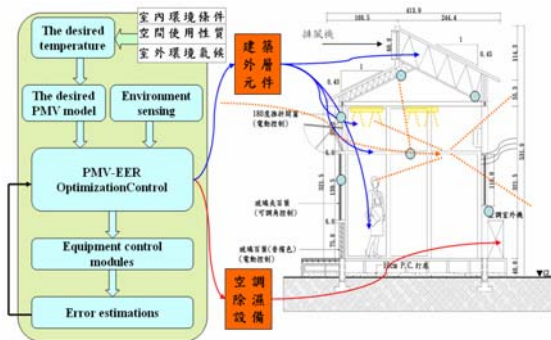


圖 3 控制流程與感測網路配置圖

圖 4 和圖 5 分別表示實驗區和對照區的熱舒適度和預期不滿意的比較分析圖。圖 6 和圖 7 分別表示實驗區和對照區的瞬時和累計耗能分析。實驗區為採用本研究系統的智慧建築空間，對照區則為採用傳統空調系統的建築空

間。

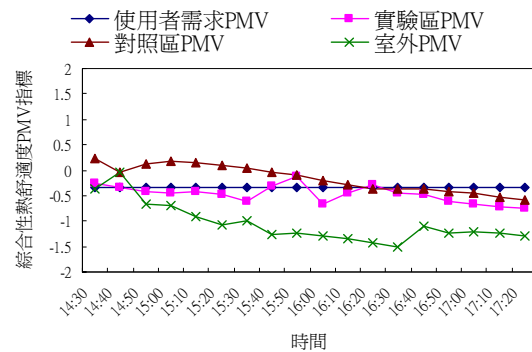


圖 4 室內外 PMV 熱舒適度指標分析

圖 4 中，傳統空調系統雖然可藉由改變特定環境因子，使舒適度改善，卻有無法因應環境其他因子變化而調適的問題；而採用本研究方法的智慧控制系統，能隨著環境各項因子變化，即時計算舒適度指標與使用者需求比對，自動調適建築空間至最適當環境條件。

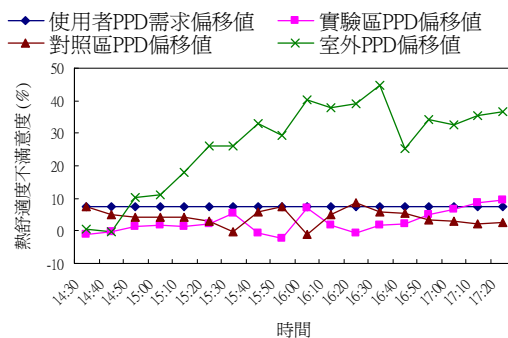


圖 5 室內外 PPD 預期不滿意度分析

圖 5 中顯示智慧建築外層結合空調系統使預期不滿意百分率逐漸趨近 10%。此現象顯示本研究之控制方法，會自動採取最少耗能的方式運轉，以符合使用者之滿意百分率要求。

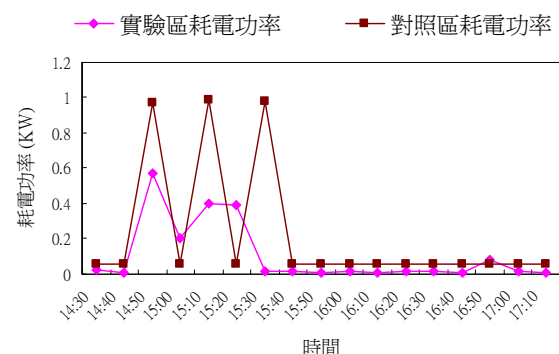


圖 6 實驗區與對照區的瞬時耗能分析

在圖 6 中，當需要運轉設備符合使用者需求時，採用本研究方法的智慧控制系統，因結合舒適度概念與整合控制各項設備，能較傳統

空調系統消耗更少的能源；而在符合舒適度需求的期間，本智慧系統也較傳統空調方式更不易有多餘的持續耗能。

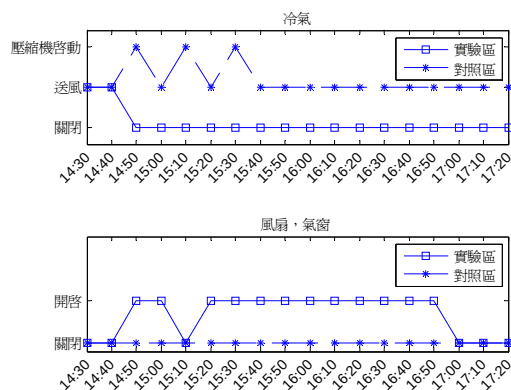


圖 7 實驗區與對照區的累計耗能分析

圖 7 表示了實驗區與對照區的社使用情況。在實驗區可以發現，本研究方法可有效的選擇最省能的方式來改善室內舒適度。

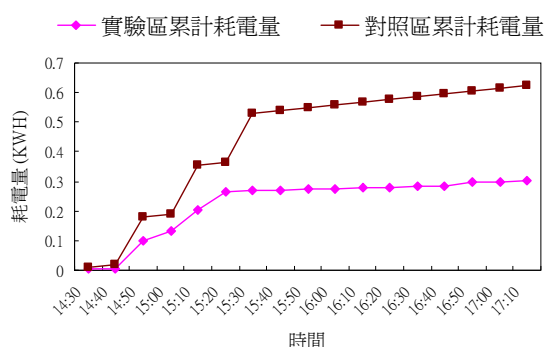


圖 8 實驗區與對照區的累計耗能分析

由圖 8 的耗能累計分析，可看出採用本研究方法的智慧控制系統，其總耗能情形明顯比傳統空調系統更少。故從整體實驗結果可看出，採用本節能控制系統的智慧型建築，可在符合使用者舒適度需求的條件下，比傳統建築的空調方式更加省能。

5. 結論

本研究首創將智慧建築外層與空調系統進行協調控制，以達到既舒適又節能的自然調節的效果。國內外相關技術仍主要停留在單一外牆設備自動控制，而且也還未整合建築外層的設備空調系統。

本研究產出成果與現有空調系統的最大區別是在於應用 PMV model 協調控制空調系統與智慧外牆元件，達到採光、遮陽、隔熱、通風，及溫度控制的功能，以及轉換使用者熱舒

適性需求為基礎，自動調整 ISO 7730 綜合性熱舒適指標，即時融合運算各設備協調運作的節能最佳化參數等特有技術。

誌謝

本研究得以順利完成，要感謝文化大學建築及都市計畫研究所副教授溫琇及其所帶領的建築智慧外層研究團隊給予原始的構想、建築領域專業的指導以及實驗屋設計、施工等多方面的協助。特別感謝基展建設公司提供實驗屋用地、梅花鋁業公司提供雙層玻璃百葉設備、冠亨鋼鋁公司提供通氣設備、齊碩科技提供數位電錶。願我們的研究成果能與上列業界先進共享。

參考文獻

- [1] Ian. F. Akyildiz, Weilian Su, Yogesh. Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci, "A survey on wireless sensor networks," IEEE Communications Magazine, Vol. 40, 2002, pp. 102-114
- [2] David Culler, Deborah Estrin, and Mani Srivastava "Overview of sensor networks," IEEE computer, Vol. 37, 2004, pp. 41-49.
- [3] Davies Mike, Rogers R., "A Wall for All Seasons," *RIBA Journal* 1981; 88(2).
- [4] Fanger, P.O., "Improvement of human comfort and resulting effects on working capacity," *Biometeorology* (II): 31-41, 1972.
- [5] ISO. 1994. *International Standard 7730, Moderate thermal environments — Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions of Thermal Comfort*, 2nd ed. Geneva: International Standards Organization.
- [6] 顧宗沛，"以雙重牆原理探討外牆改修構法"，*國立成功大學建築研究所碩士論文*，2004。
- [7] Michael Wigginton and Jude Harris, *Intelligent Skins*, Elsevier, 2002。
- [8] 溫琇玲，黃瑞廷，劉俊伸，"既有建築之智慧型外層國外案例類型化分析"，*中華民國建築學會第十八屆第一次建築研究成果發表會論文集*，2006。
- [9] 財團法人資訊工業策進會，*III ZigBee Advanced Platform(iZAP)*, <http://zigbee.iii.org.tw/>
- [10] 邱茂林，*透視智慧環境*，建築情報雜誌社，2005。