

居家智慧環控風扇設計與熱舒適度調節效能評估

吳孝原¹ 劉芳聿² 胡志堅^{3*}

摘要

近年來許多研究趨向於採用物聯網技術整合於智慧家庭的系統，試圖產出多樣性的智慧家庭設備或服務以提升居家用戶的便捷性、舒適性、抑或是降低其能源成本。然而，同時考量居家熱舒適與個人化溫熱調節的技術或產品卻鮮少被提出。本研究建置一智慧環控風扇，整合輻射溫度感測器、空氣溫度感測器、以及相對濕度感測器等元件，並嵌入個人化熱舒適控制演算機制與無線通訊模組。所提出的系統可以藉由紅外線控制信號無縫整合控制家用空調系統以調節舒適與節能的最適化個人溫熱居家環境。根據夏季及冬季個人化熱舒適環境控制實驗結果，顯示本研究提出之智慧環控風扇對於改善個人化熱舒適環境具有顯著效果，同時亦可依需求應用於多種居家生活情境。

關鍵詞：熱舒適，控制系統，智慧家庭，熱舒適指標

1. 前言

隨著感測元件以及物聯網(IoT)相關技術的發展，使得居家生活智慧化的應用概念更為廣泛，這股潮流順勢帶動諸多居家智慧化服務。智慧家庭服務系統的運作需仰賴家庭自動化系統(Home Automation System, HAS)與智慧化運算(computational intelligence)能力的相互結合(Froiz-Míguez *et al.*, 2018)，因此整合感測(sensing)輸入、情境感知(context aware)運算、情境控制(scenario controls)、以及物聯通訊(communication)等機制將是有效的解決方案。過去大多數的自動化系統著重於家庭用電設備或相關能耗的資源管控，例如照明、空調、以及家電設備等(Hu *et al.*, 2012；Hu *et al.*, 2014；Hu and Li, 2016)。這些機制通常必須考慮居家環境的物理量(例如：空氣溫度、相對濕度、照

度、耗電量、以及使用者位置等)，藉由資通訊技術(ICT)適時提供適當的控制與處理方式，協調控制不同的家電設備以達成用戶的需求。然而，為了達到此目的必須面臨以下問題：(i) 居家環境的多樣性，往往造成感測與控制系統裝設的困難；(ii) 缺乏共通的標準介面，不同家電設備之間無法藉由應用程式進行訊息的直接傳遞與協調控制；(iii) 受限於居家空間的裝潢與陳設，家電設備與系統之間的整合與布線不易且成本高昂；(iv) 缺乏基於居家環境、家電設備、使用者、以及應用情境等綜合條件之間的情境感知，並無考量最適化調控，以達成環境智慧化的感測與控制目標。

近年來居家健康照護觀念愈受重視，許多研究者投入睡眠輔具的相關研究(Peltokangas *et al.*, 2012；林秤毅，2013；張晏維，2013；Lin and Deng, 2008a；Lin and Deng, 2008b)。

¹ 工業技術研究院綠能與環境研究所智慧節能系統技術組 研究員

² 工研院綠能所智慧節能系統技術組 實習生

³ 國立雲林科技大學智慧學習研究中心、未來學院前瞻學士學位學程、應用外語系 助理教授

*通訊作者電話: 05-5342601, E-mail: hucc@yuntech.edu.tw

收到日期: 2019年08月31日

修正日期: 2020年04月09日

接受日期: 2020年04月21日

相關研究大多數著重於睡眠與疾病的連結 (Peltokangas *et al.*, 2012)、睡眠生理的觀測 (Seale and Conway, 1999)、或是睡眠品質的改善 (Lin and Deng, 2008a)等。然而，這些研究並未探討室內溫熱環境變化對於人類睡眠生理的影響，亦無提出藉由環境調節控制機制來改善居家睡眠環境的熱舒適度。根據臺灣民眾的睡眠調查報告(李佳，2013)，指出一般民眾平均睡眠時間為6小時50分鐘，顯然大多數的人們睡眠時間並不夠充裕。因此，如何讓民眾在有限的休眠時間下，擁有一個健康、合宜的居家睡眠溫熱環境，應是極為重要的議題。

為了改善上述問題，本研究採用家電設備常用的紅外線(IrDA)遙控通訊機制、以及消費性電子設備最常用的藍芽無線(Bluetooth wireless)通訊方式，整合居家電器設備、以及用戶端的智慧型手機(smartphone)，建構家庭物聯感控網路。其中，居家熱舒適環境控制部分，本研究基於PMV熱舒適指標(Fanger, 1972)加以改善，提出一熱舒適控制演算機制，並將該演算機制設計於本研究所提出的智慧環控風扇之中；使得該智慧環控風扇可根據居家環境溫溼度狀態、用戶個人化的生理資訊、以及個人偏好等條件，進行動態且即時的智慧化推論，以求解出最佳控制溫度、以及最佳控制風速等參數。智慧環控風扇除了根據環境狀態調節自己的風扇葉片轉速之外，並會主動以內建於智慧環控風扇內部的紅外線發射器送出控制信號以控制空調設備的設定溫度，調節最佳化的室內環境以達到個人化熱舒適度的改善。

本文首先針對居家熱舒適環境調節相關文獻進行探討，隨即提出智慧環控風扇的系統架構與設計方案，並說明建置於系統中的熱舒適控制演算法。目的在於讓本研究所提出的智慧環控風扇可以主動整合居家空調設備，動態調節個人化熱舒適度。最後進行研究成果的總結。

2. 居家熱舒適文獻探討

熱舒適度指標PMV (predicted mean vote)是由Fanger (1972)藉由大量不同的受測者進行溫熱知覺感受的實驗所推估出的數學模型(Fanger, 1972; Fanger, 1973)，其可根據人體主觀感覺與熱負荷之間的關係，並參照空氣溫度、輻射溫度、相對溼度、風速等環境參數與個人因素量化推估人體對所處環境的冷熱舒適感。PMV將冷熱主觀感受界定於 ± 3 之間的數值，例如： $+3$ 表示感覺很熱(hot)、 $+2$ 表示感覺溫暖(warm)、 $+1$ 表示微溫(pleasantly warm)、 0 表示所處環境的感受冷熱適中(neutral)、 -1 表示微涼(pleasantly cool)、 -2 表示有點冷(cool)、以及 -3 表示很冷(cold)等。由於PMV可將人體對於冷熱的主觀感受透過數學模型予以量化，因此許多研究與系統設計都可以非常方便的透過運算推估出PMV值並導入回饋機制進行多樣化的空調系統工程設計、環境感測控制系統建置、或根據特定需求改良原有的熱舒適度指標(Hu and Li, 2016; Wu and Sun, 2012; Sherman, 1985; Etik *et al.*, 2009; Zhao *et al.*, 2014; Hong *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2018)，再加以應用。Hong *et al.* (2018)基於PMV模型整合模糊邏輯(fuzzy logic)與PID (Proportional-integral-derivative)控制器提出環境分區控制的概念，將辦公室空間區分為兩個區域，分別配置兩個可單獨控制的加熱器(controllable electrical heater)系統，並分別將加熱系統配置一個紅外線舒適度傳感器(IR-based comfort sensor)，可根據區域環境個別的舒適條件相對應區域中所測量的PMV作為受控變量，分別調節每個加熱器的輸出功率，以達到節能效果。由於現有熱舒適控制系統大都採取傳統PMV群體均化(group-based methodologies)舒適度指標做為控制基準，鮮少考量個人生理、衣著、以及感知的個別差異，常造成因個體化差異所產生的不舒適狀態，也因此導致非必要的致冷(cooling)或加熱(heating)所產生的能源損耗。Kim *et al.* (2018)為了提升

個人熱舒適的調控品質，提出一個人化熱舒適模型，並採用該模型建置具回饋功能的個人化舒適系統(personal comfort system, PCS)；根據其實驗結果，藉由該系統可以有效地預測個人的冷熱偏好，並針對個人需求適時進行加熱或冷卻的控制，提高使用者熱舒適滿意度，同時降低能源使用。Liu *et al.* (2018)藉由穿戴式感測器(wearable sensors)取得受測者的生理信號(例如，手腕和踝部的皮膚溫度、心率、以及活動量)及環境參數(例如，氣溫、風速、太陽輻射、降水)等，並要求受試者每小時回報其即時的溫熱感知與偏好(real-time thermal sensation and preference)，再藉由隨機森林演算法(random forest algorithm)發展個人化熱舒適度模型(personal comfort model)，其研究結果認為所發展的穿戴式感測器可應用於無拘束的生活環境(free-living environment)推測個人即時熱舒適偏好(personal thermal preference)。

根據上述文獻探討得知基於傳統PMV指標的溫熱控制主要針對環境因素(空氣溫度、相對濕度、平均輻射溫度、風速等)、以及個人因素(衣著量、活動量等)，僅採用群體化的冷、熱感受作為控制準則。該指標通常可應用於辦公室、教室等群體使用的公共空間做為室內溫熱環境的調控。然而居家空間的應用顯然不同於上述情境，尤其是睡眠環境的熱舒適調控。通常臥室環境的輻射溫度與空氣溫度會因白天日光的照射而吸熱升高(或是輻射冷卻效應而降低)，吸足熱量的牆面將於夜間以輻射與對流方式放熱，臥室環境的溫度與濕度因而動態變化。個人就寢時的衣著、床墊、被套等形式將影響熱阻值(Lin and Deng, 2008b)，而且人類的基礎代謝率(Seale and Conway, 1999；Zhang *et al.*, 2002；Fontvieille *et al.*, 1994)也會隨著睡眠週期變化而變動。

由於室內空調系統的使用，經常造成室內環境溫度分布不均、垂直溫差大等問題。王曉倩、劉益才、畢麟、以及王曉倩等(2018)採用控制變數法對空調設定溫度、風扇使用兩控制

變因針對坐姿維持1.1 m高度的受試者進行熱舒適度感知測量與統計分析，發現在空調設定溫度一定的情况下，合理的使用吊扇可以改善室內環境，滿足人體對熱舒適的需求，提高工作學習效率。林傑宏等(2014)以節能為要件，採用吸頂扇配合室內空調使室內環境維持舒適度；其實驗設定將室溫固定在26°C以上，透過氣流速度之調節以兼顧舒適度及節能效益。該研究雖然同時考量熱舒適與節能效益問題，然而環境溫度的設定是一預設26°C以上之固定溫度，而且並無考量個人化的衣著量、新陳代謝率(即活動量變化)、環境溫度與濕度的即時變化等動態條件影響。

雖然已有少數以熱舒適度為控制基礎之風扇的類似研究，但是該些研究著重於藉由預先設定之空調設定溫度，再調節風扇之轉速以進行熱舒適度分析，大多偏向於採取熱舒適之敏感度分析的研究角度。而且該些研究並非採取即時(real-time)、動態(dynamic)的控制策略同時控制兩種變因。本研究為了改善已知研究(林傑宏等，2014；王曉倩等，2018)無法即時動態依據環境溫、溼度參數變化、偵測個人熱舒適偏好與需求，而設計一智慧化演算法建置於智慧環控風扇內部，使其可以動態地調控空調系統的設定溫度值、以及智慧環控風扇本身的風速值，可同時操作溫度、與風速兩因子以達成個人化居家熱舒適環境調節的目的。為了驗證所設計之智慧環控風扇的環境熱舒適度調節能力及節能效果，本研究進一步以臺灣新竹地區夏季、以及冬季的實際場域進行實測分析。分析結果顯示所設計之智慧環控風扇不論是控制夏季的冷氣設定溫度、冬季的暖氣溫度設定、以及協同智慧環控風扇的風速調節等運作，皆能達到調節個人化熱舒適與節能效益。

3. 熱舒適控制演算機制

本研究依據傳統PMV (Fanger, 1972；Fanger, 1973)，並基於Lin and Deng (2008a)

所提出之睡眠時的熱舒適指標(PMV for sleep environments, 標示為PMVs)作為睡眠環控演算機制之依據。通常當人體與外界的熱量進出達到平衡時才會覺得舒適,若熱量無法達到平衡時即形成熱負荷。

首先PMVs與環境及個人的多項因素有關,包括空氣溫度(Ta)、體表平均風速(Va)、相對濕度(RHa)、平均輻射溫度(Tr),以及個人化資訊,例如:以個人的睡眠衣著、床墊、以及被套等參數所轉換成的總隔熱值(total insulation values, 表示為Rt),以及由性別、年齡、身高、體重等資訊所推算之代謝率(M)。上述PMVs的函式關係(Lin and Deng, 2008b)可表示為:

$$PMVs = G(Ta, Va, RHa, Tr, Rt, M) \quad (1)$$

以下分別說明上式右側自變數的設定或計算方式,目的在於使左側PMVs的值達到所偏好的範圍內。

關於代謝率(M),概述相關研究如下:經由人體能量消耗(energy expenditure)的觀察,可求出性別、年齡、身高、體重等變因相對於基礎代謝率(basal metabolic rate, BMR)的函數關係(Seale and Conway, 1999; Fontvieille *et al.*, 1994)。Zhang *et al.* (2002)指出睡眠代謝率(sleeping metabolic rate, SMR)的變化與人體身高體重指數(body mass index, BMI)具有顯著關係。另一方面,Seale and Conway (1999)透過實際量測記錄睡眠時的人體能量消耗(energy expenditure),描繪出人體能量消耗與時間的函數關係,由此可知睡眠時的代謝率M與開始睡眠後的時間有關。根據以上研究我們可以運用個人生理資訊與睡眠時間來估算睡眠期間中的人體代謝率(M)。

關於使用者的體表總隔熱值Rt,可由使用者藉由操作介面輸入衣著選項(Bcl)、床鋪選項(Bbd)、與被蓋選項(Bst)等,再經由量測數據歸納之公式推算出Rt ($^{\circ}\text{Cm}^2/\text{W}$)的值。

至於輻射溫度(Tr)與相對溼度(RH_a)則可由

感測器測得。

氣溫Ta與風速Va在本研究中視為可控制的變數,也就是控制演算法藉由空調系統與風扇所要控制的項目。在能夠控制風速之前,我們需要知道風扇在各段開關時對環境造成的風速,因此特別選定一風扇並在風扇前選定不同的距離位置,量測各段風速(m/s),如於風扇前一米位置量測風扇關閉(v_{a0})、轉速1(v_{a1})至轉速7(v_{a7})的量測值,分別表示為v_{a0}=0、v_{a1}=0.15、v_{a2}=0.6、v_{a3}=1.2、v_{a4}=2.0、v_{a5}=2.3、v_{a6}=2.5、以及v_{a7}=2.8等。

一般而言,PMVs = 0被視為最適中(最舒適)的狀態,但在本研究中考慮到個別差異,將用戶個人的冷暖偏好一併納入考量,也就是說,用戶可以選擇自己所喜好的狀態(例如涼爽、適中、稍暖等)這些狀態各有對應的PMVs值,假設用戶選取狀態所對應的值稱為PMVu。

在本研究中為了整合控制氣溫Ta與風速Va,首先定義了一個代價函數,相當於一個綜合的評分指標,其值越低代表控制結果越優良。在此代價函數衡量了兩個項目:其一為舒適度,其二為耗電量。當環境實際PMVs值越接近設定值PMVu時,舒適度越佳,代價函數值越小;當空調(冷氣)設定溫度越高時,耗電量越小,代價函數值也越小。整合控制的方法是逐一評量空調設定溫度與風扇段數的所有可能組合,對每一組合分別計算其PMVs值以及代價函數值,然後找出其中最小的代價函數值,而它所對應的空調設定溫度與風扇段數就是最佳的控制參數,可據此控制空調系統與風扇。

4. 智慧環控風扇技術

居家生活環境的科技應用必須考量系統功能性、實用性、以及運作效益,然而系統本身的易用性(ease to use)更攸關用戶對於科技的接受度。為了降低系統的操作複雜性,本研究

應用物聯網感測及智慧感控演算法等技術，透過整體性的思維，考量空調設備、風扇、居家環境、以及用戶之間的互動關係，發展易於安裝整合的居家環境熱舒適控制系統。藉由此概念，一般用戶不須透過專業人士即可自行簡易地安裝(plug & play)於居家空間，系統即可結合既有的空調設備並運行居家環境智慧化的服務，提供一熱舒適的健康居家環境。

居家多情境熱舒適環控技術系統架構如圖1所示，主控制系統建置於智慧環控風扇內部，包含個人化調節、環境感知、以及最適化控制等三大運算處理模組。個人化參數調節部分，使用者可以透過智慧手機的應用程式(App)

設定個人生理資訊(如身高、體重、性別、年齡等)、冷熱偏好(很涼、涼爽、小涼、適中、稍暖、小暖、暖和)、衣著寢具型式(衣著、床墊、被褥等樣態)等參數、以及訊號發送的週期(如：1分鐘發送一次)，如圖2所示。隨即藉由藍芽無線通訊機制傳遞參數至智慧環控風扇內部的記憶體中。環境感知模組內建空氣溫度、相對濕度、輻射溫度等環境感測器，該些感測器裝設於風扇底部以感測居家環境狀態。系統透過這些感測器量測即時的環境狀態以提供最適化控制模組內部的熱舒適演算法得以依據環境狀態進行推論運算，產出最佳平均風速、以及最適環境溫度等設定值；進一步藉由控制訊

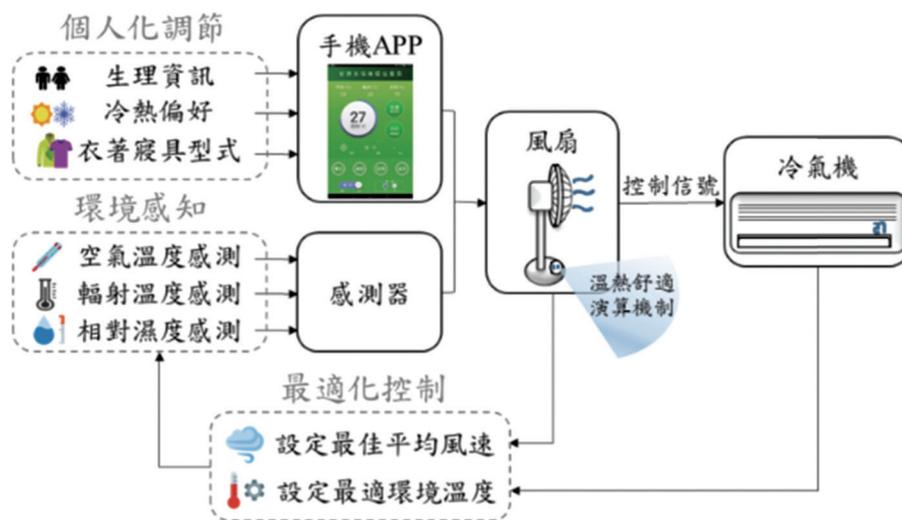


圖1 居家智慧環控風扇系統架構(本研究繪製)

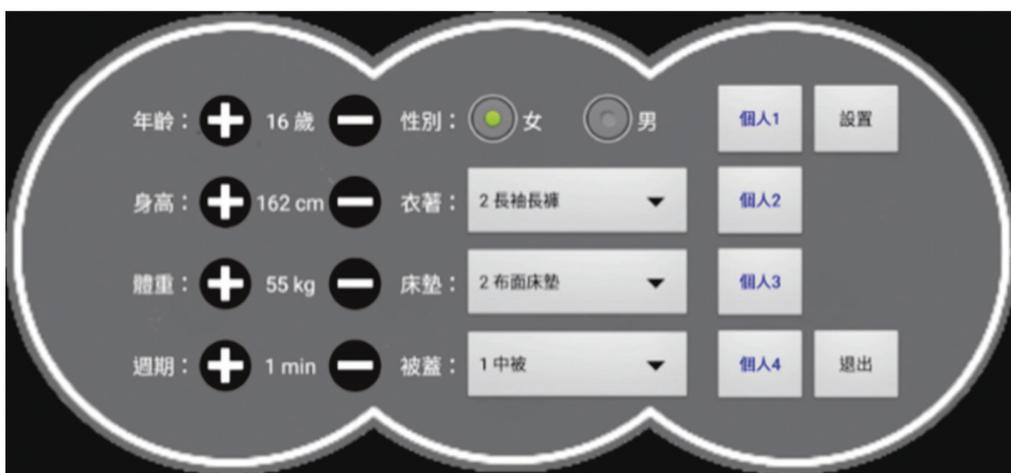


圖2 個人化參數設定(本研究之APP)

號依據設定值驅動直流馬達以帶動風扇旋轉，營造該環境的最適化風速，同時透過紅外線(IrDA)發射器傳送最佳環境設定溫度控制信號至空調設備進行居家環境的最適化控制。控制過程中環境的空氣溫度、輻射溫度及相對濕度會跟著動態改變，每分鐘都會完成一次控制循環與狀態更新，居家環境便會逐漸地達到熱舒適的狀態。

本研究所建置的居家智慧環控風扇如圖3所示。該系統內部主控制系統硬體架構如圖4，中央處理單元採用RTL8762AK，此晶片是以

ARM Cortex M0為核心的低功耗藍芽(Bluetooth Low Energy, BLE)晶片組，除了負責無線資料通訊傳輸外還具備演算處理的能力；溫濕度感測器(SHT 30)及輻射溫度感測器(TMP006)等則藉由I2C傳遞感測資料給RTL8762AK，一組紅外線接收器可接受外部的控制命令，一組紅外線接收發射模組(MG69P361)其具有學習遙控碼機制可採用載波學習多種空調品牌的遙控碼，紅外線發射器則使用TSUS520做為紅外線發射元件；因此，可根據演算法推論之最佳設定溫度，產出對應的紅外線控制碼以傳送給家用空

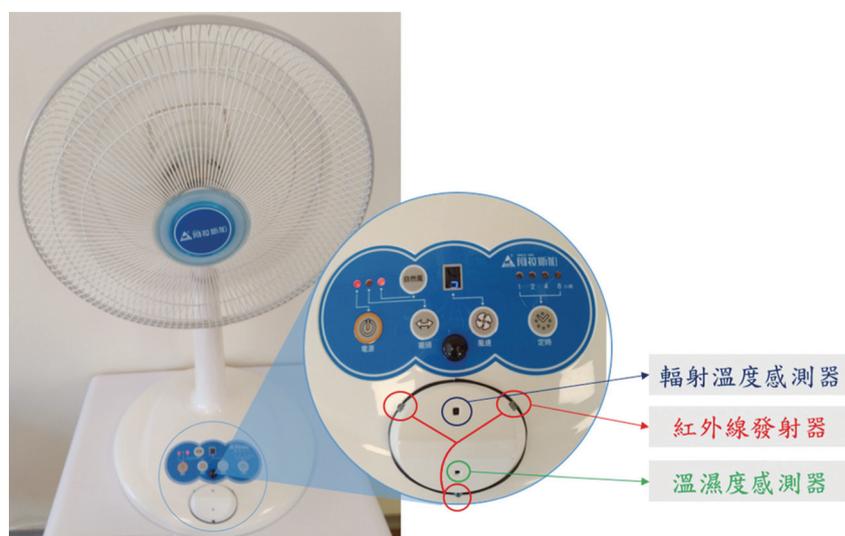


圖3 居家智慧環控風扇(本研究設計之風扇)

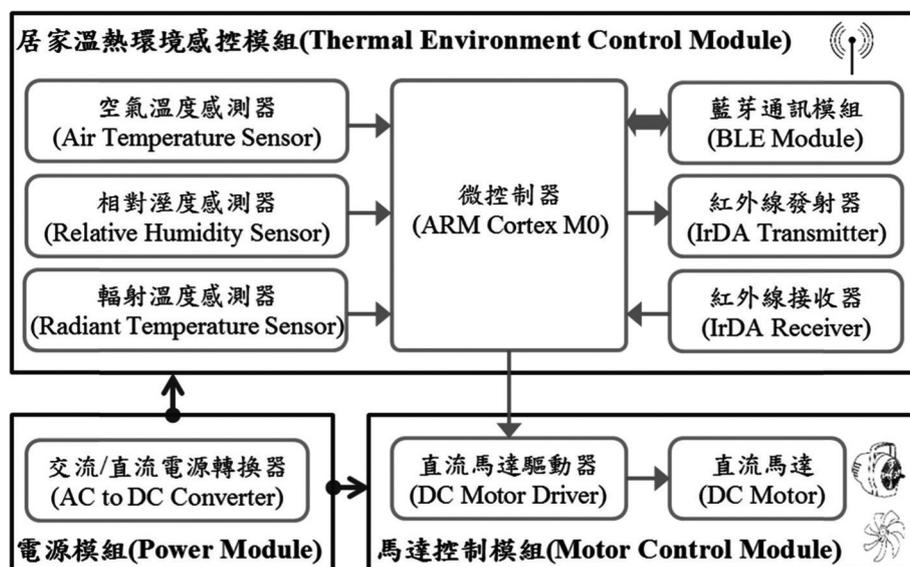


圖4 主控制系統硬體架構(本研究繪製)

調機系統，控制環境溫度。最適化風速的調控命令由ARM Cortex M0內部的熱舒適控制演算機制計算求解後，並將控制命令傳送至直流馬達驅動控制板，調整直流風扇的轉速，產生最合宜的環境風速。上述主控制電路如圖5所示，直流風扇擺頭方位控制電路如圖6所示，風扇轉速控制可藉由運算放大器(LM358)設計一非反向放大電路進行電壓調節並以PWM信號輸出控制信號並驅動直流馬達。

氣候條件，隨著季節交替，對於居家熱環境與臥室空間的熱舒適度具有顯著的影響。由於大多數臺灣的相關研究著重於夏季冷氣系統的控制，對於冬季時暖氣的控制著墨甚少。況且，即使有部分家用空調機宣稱具有基於熱舒適度的控制機制，然而大多數空調設備為了避免因感測器系統的設計與建置而增加成本，僅根據室內溫度、以及運作時間長度的變化反饋於空調系統設定溫度遞增/遞減控制。除此之外，目前臺灣家用空調系統絕大部分採用紅外線遙控器進行設定溫度的控制，因此如何無縫地整合風扇轉速控制、以及空調設定溫度的控制，以解決居家熱環境的調節控制顯得極為重要。

5. 系統效能評估與分析

臺灣地處亞熱帶夏季酷熱、冬季寒冷的

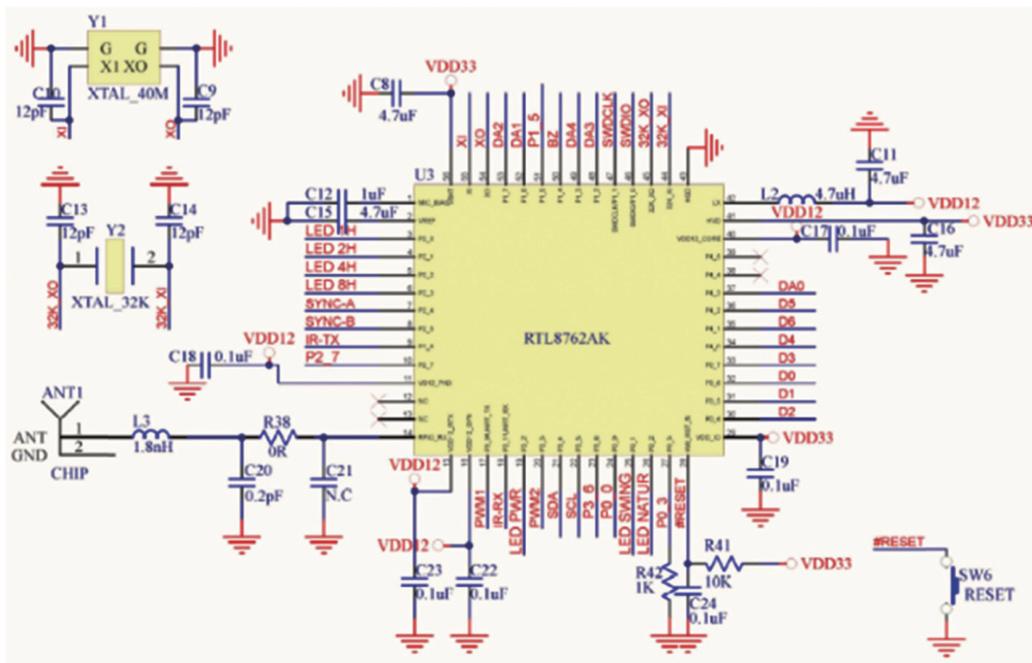


圖5 主控制電路(本研究繪製)

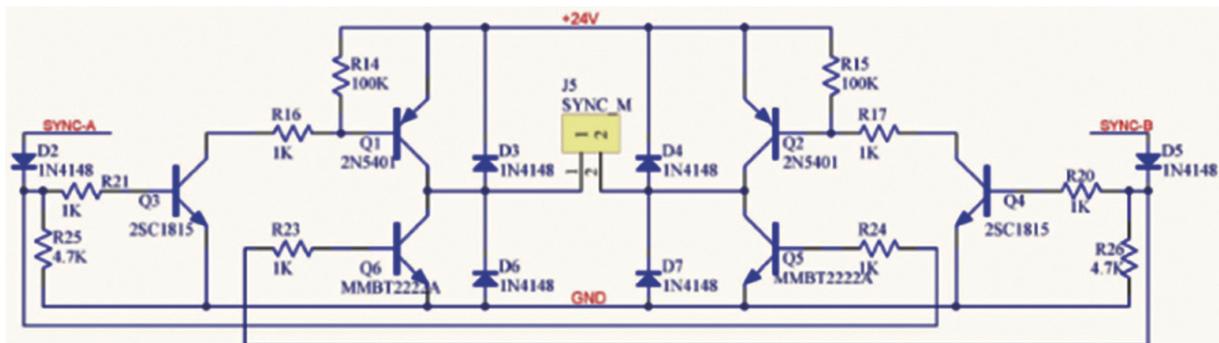


圖6 智慧環控風扇擺頭方位控制電路(本研究繪製)

因此，本研究除了採用實際場域夏季冷氣房的睡眠模式控制實驗外，還有進行冬季暖房的睡眠模式控制實驗，以分析居家智慧環控風扇技術的運作效能。

為了避免外在環境氣溫、熱輻射溫度等氣候因素，造成對於實驗標的評估的差異性所造成之不確定因子。因此不論是夏季、或冬季對於本研究標的智慧環控風扇之評估設計，皆採用坐落於新竹縣竹東鎮的同一棟建築物位於一樓的一室內空間(24°46'40.4"N 121°02'34.6"E)，空間大小為8.3 m(L) × 4.2 m(W) × 3.2 m(H)，如圖7所示。該空間設置一冷暖氣機供智慧環控風扇以紅外線控制信號調節控制其冷暖氣機之設定溫度。因此實驗空間的建築物座向、建築開口、洩漏、蓄熱、以及空調系統的冷卻能力等條件因素皆為一致，藉此得以衡量本研究提出之智慧環控風扇在不同情境下的控制效益。

本研究智慧環控風扇，採用14吋扇葉、直流馬達、溫溼度感測器、熱輻射感測器、紅外線控制信號發射器、以及一內建感應控制演算法的控制模組。各個感測器對應的參數為空氣溫度(T_a^{fan})、輻射溫度(T_{int}^{fan})、相對濕度(RH_a^{fan})，智慧環控風扇內含有紅外線發射器(空調系統冷暖氣機之設定溫度之紅外線控制碼，可藉由本研究設計之手機應用程式先行學習後存入主控電路)及熱舒適控制演算法，可搭配智慧手機應

用程式控制智慧環控風扇。實驗前將智慧環控風扇高度調至70公分的高度(適合方人坐姿時的高度)，且在智慧環控風扇正前方1.5公尺、離地70公分處為中心量測點(S_c)； S_c 中含有複合式感測器(LM8000)，內含風速計、溫度感測計及相對濕度感測計，其對應的參數為風速(V_a^{sc})、空氣溫度(T_a^{sc})及相對溼度(RH_a^{sc})；另外，以 S_c 為中心點，半徑70公分的外圍四個角落，離地70公分，分別設置一組溫度感測器(HOBO UA-002-64)，共設置四組溫度感測器($S_1 \sim S_4$)記錄空氣溫度變化，將其所記錄的空氣溫度參數標示為 $T_a^{s1} \sim T_a^{s4}$ ，另外在實驗環境外也放置了一溫度感測器(HOBO UA-002-64)記錄室外空氣溫度，其記錄參數為 T_a^{out} 。本文所提出之智慧環控風扇內部具有熱舒適控制演算法會決定最適風速與最佳空調設定溫度，可控制風扇葉片的轉速、並根據所學習的控制碼設定空調溫度(夏季控制冷氣設定溫度，冬季控制暖氣設定溫度)透過調節環境風速、空調設定溫度來達到個人化最適熱舒適度。這種無縫整合的設計，使得一般家庭用戶僅需取得本文所提出之智慧環控風扇即可整合協同控制已安裝於居家空間的既有各式廠商生產之不同品牌的空調系統，並進行熱舒適環境之調控。不但提高系統相容性，降低系統安裝的複雜性與系統整合時通訊協議不一的門檻，同時也降低了空調系統的重置成

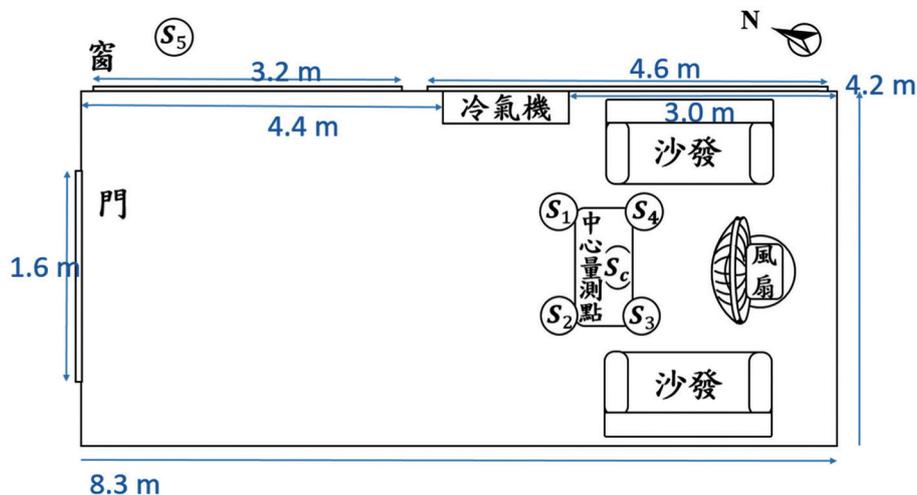


圖7 實驗環境設置(本研究繪製)

本。

為了評估居家智慧環控風扇的效能，實驗過程採用研究提出之智慧環控風扇對特定空間內的空調設備進行動態且即時的設定溫度控制。所設計之個人化熱舒適演算法可根據環境變因判定合適的設定溫度，再藉由紅外線控制信號設定該處環境的空調設定溫度以達到理想室溫。由於各式廠商生產之不同品牌的空調系統對於如何驅動其壓縮機以達到設定之目標溫度，其演算法、驅動機制、以及程序方法等可能皆有所不同；然而，為了使空調系統的運作可以精準地達到設定目標溫度之目的卻是一致的。本研究假設安裝於室內之空調系統的除熱能力、及加熱能力皆能達到特定空間之負荷量，因此採用智慧環控風扇所決定之設定溫度，得以讓該些空調系統依其本身產品特性，逐步將環境溫度調節以達到智慧環控風扇所要求之設定溫度。

實驗設定一使用智慧環控風扇的個人化參數(女性、16歲、身高162公分、體重55公斤、衣著為長袖長褲、使用布面床墊並覆蓋中型棉被)做為使用者個人化熱舒適度評估的依據。並刻意將控制情境為睡眠模式，控制週期為每一分鐘一次，模擬受測者躺臥於圖7標示「中心量測點」的位置進行實驗，若風扇因演算控制機制調節轉速而產生不同的風速，則以風速計(LM8000)實際量測值除以四來表示為人體體表

風速(V_{af}^{sc}) (假設風扇吹到人的正面且只吹到半身)，並進行評估運作狀態，倘若風扇未被啟動則採密閉室內風速0.05 m/s進行評估。實驗設計包含實驗組(以智慧環控風扇以及其內建熱舒適控制演算機制進行設定溫度與風速的環境調節控制)、控制組1(採用空調機內建的自動控制模式)、以及控制組2(完全不控制)等三種情境。實驗時，採用溫度感測器(HOBO UA-002-64)記錄環境空氣溫度，同時並使用溫濕度感測器(SHT 30)、以及熱輻射感測器(TMP006)量測，並記錄中心量測點的空氣溫度、相對濕度、以及輻射溫度值。

冬季實驗環境參數空氣溫度(T_a^{sc})、最佳控制設定溫度(T_{sp}^{sc})、平均輻射溫度(T_{mrt}^{sc})、以及相對溼度(RH_a^{sc})等參數動態變化記錄如圖8所示，當日(01-16-2019)所量測的實驗環境外圍約8.5小時平均氣溫為15.99°C(標準差0.49°C)。當日實驗前，先將實驗環境的室內環境以25°C的空調設定溫度預暖約20分鐘後，開始進行實驗並記錄，所記錄的中心量測點的空氣溫度溫度(T_a^{sc})、平均輻射溫度(T_{mrt}^{sc})、相對溼度(RH_a^{sc})等變化、以及基於熱舒適控制演算機制所推論出的最佳控制設定溫度(T_{sp}^{sc})皆記錄於圖8。初期實驗環境的空氣溫度(T_a^{sc})為20.8°C、平均輻射溫度(T_{mrt}^{sc})為21°C、相對溼度(RH_a^{sc})為76.9%，當時「智慧環控風扇」基於所感知的環境參數經演算法推算後，以紅外線控制信號送出24°C的設

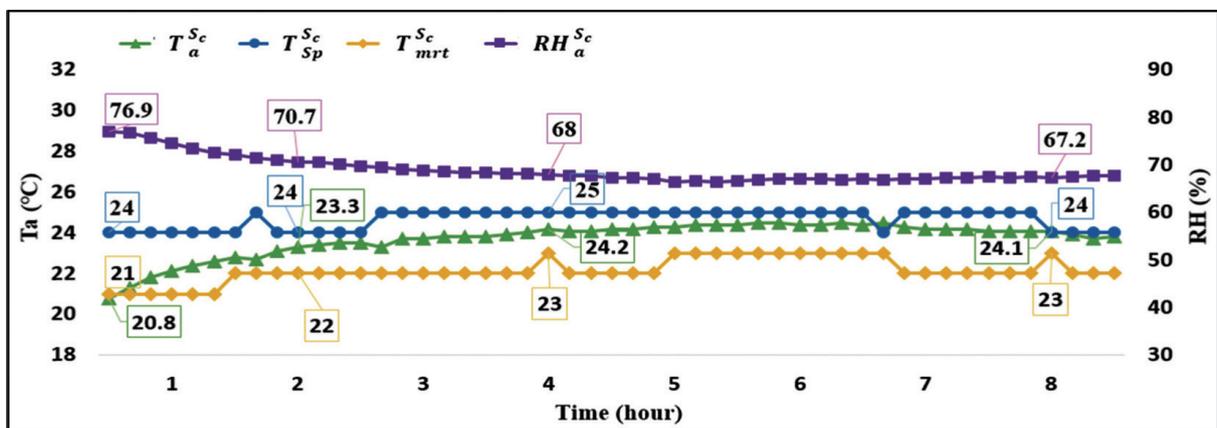


圖8 冬季的空氣溫度(T_a^{sc})、最佳控制設定溫度(T_{sp}^{sc})、平均輻射溫度(T_{mrt}^{sc})、以及相對溼度(RH_a^{sc})等環境參數的動態變化(本研究繪製)

定溫度(T_{sp}^{sc})控制實驗環境內的空調系統。透過上述反饋控制流程持續2小時後，觀察實驗環境的空氣溫度(T_a^{sc})為 23.3°C 、平均輻射溫度(T_{mrt}^{sc})為 22°C 、相對溼度(RH_a^{sc})為 70.7% ，空氣溫度與平均輻射溫度皆有逐步上升，相對溼度稍微下降；此時，「智慧環控風扇」將實驗環境內的空調系統設定為 24°C 。當實驗過了4小時後，實驗環境的空氣溫度(T_a^{sc})已達到 24.2°C 、平均輻射溫度(T_{mrt}^{sc})為 23°C 、相對溼度(RH_a^{sc})為 68% 。進一步，「智慧環控風扇」將實驗環境內的空調系統設定(T_{sp}^{sc})為 25°C ，此時空氣溫度已明顯接近該環境的最佳設定溫度。

依當時環境參數狀態，實驗組風扇在本研究提出之熱舒適控制演算法的運作下並無啟動風扇，避免寒冷的氣溫及較大的體表風速造成用戶覺得太冷，此情況的體表風速(V_{af}^{sc})約為 0.05 m/s 。

圖9顯示在冬季天候採取不同控制策略時，實驗環境中空氣溫度的動態變化。當採取本研究提出之熱舒適控制演算機制所產生之熱舒適環境的空氣溫度變化表示為 T_a^{PMVs} ，當不加入任何控制策略時無空調環境的背景空氣溫度變化表示為 T_a^{none} ，若採取空調系統內建的自動控制機制所得到的環境空氣溫度則表示為 T_a^{auto} 。當不啟動空調系統時該實驗環境的背景氣溫(T_a^{none})變化在第2小時為 18.2°C 、第4小時為 17.7°C 、第8小時為 18.1°C 。將該背景氣溫的

PMV_s 並描繪出如圖10中的“None control”所對應的 PMV_s 曲線，可以發現，當未使用空調時的環境 PMV_s 的平均值為 -2.4 (標準差 0.32)， PPD_s 約為 91% ，表示會有 91% 以上的用戶不滿意於此睡眠環境的熱舒適度。相同氣候條件下若採用空調系統內建的自動控制模式(Air conditioning based control)進行該環境調節，量測到的自動控制模式環境氣溫(T_a^{auto})變化(如圖9)在第2小時為 18.5°C 、第4小時為 19.1°C 、第8小時為 20.1°C ，將其描繪如圖10中“Air conditioning based control”所對應的 PMV_s 曲線，觀察到使用空調系統內建的自動控制模式時的環境 PMV_s 的平均值為 -1.9 (標準差 0.17)，對應於 PPD_s 為 73% 。由此可知，即使採取該空調系統內建的自動控制模式調節該空間，亦會有 73% 以上的用戶覺得太冷，將不滿意於該熱舒適環境。

分析圖10中“None control”所量測時域範圍的環境熱舒適度，對於睡眠時的用戶感知大都是過於寒冷。“Air conditioning based control”的控制策略雖然對該環境的熱舒適度稍有改善，但並不顯著，且整體環境溫度依然偏冷。原因在於該空調系統的特殊運作行為所致，當室溫在 25°C 以上該空調系統進行冷氣運轉，並將設定溫度控制為 25°C ；當室溫為 $20\sim 25^{\circ}\text{C}$ 之間時，該空調系統進行除濕運轉；當室溫為 20°C 以下時，則該空調系統進行暖氣運

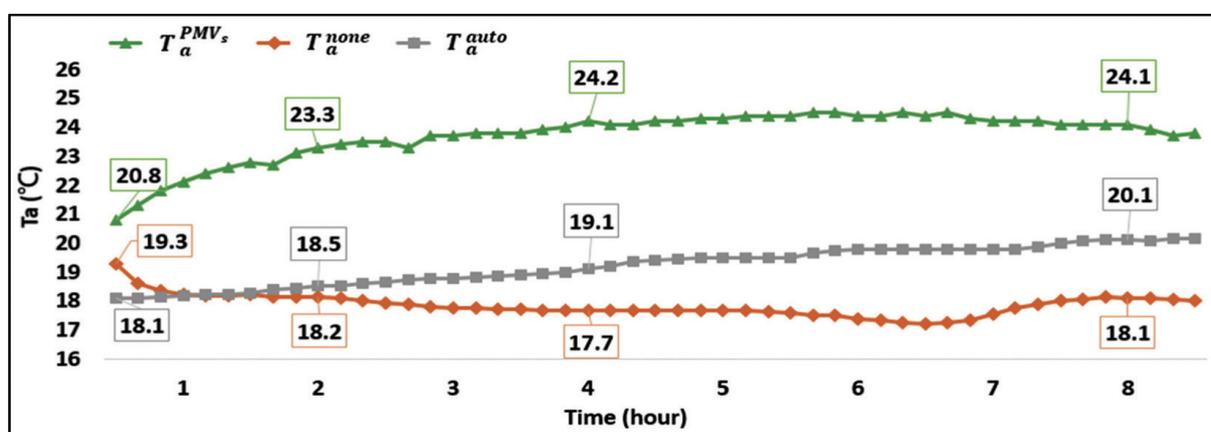


圖9 冬季環境參數動態變化下，採取不同控制策略的空氣溫度變化：本研究熱舒適控制演算機制(T_a^{PMVs})、無空調環境背景(T_a^{none})、以及空調系統內建控制機制(T_a^{auto}) (本研究繪製)

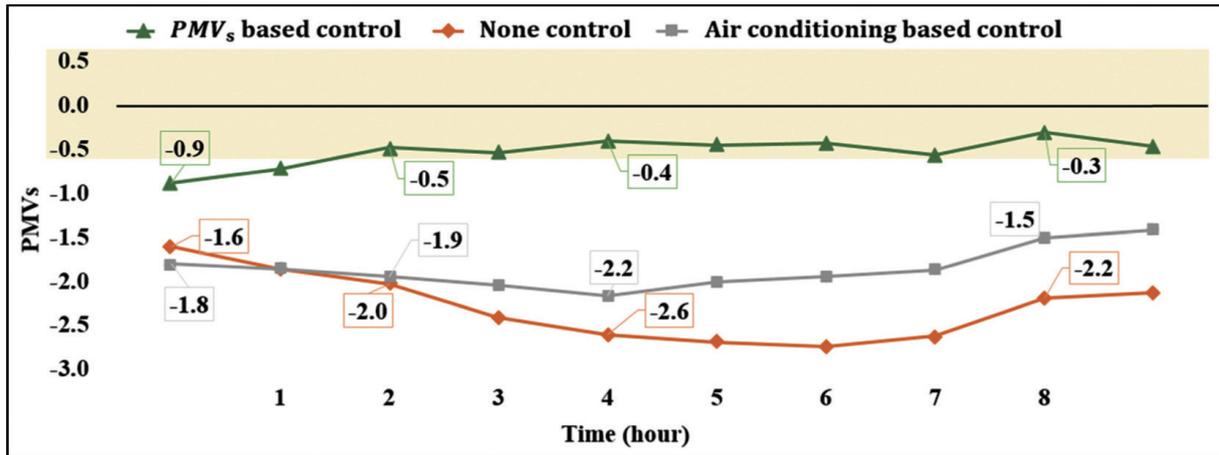


圖10 冬季不同控制策略的PMV_s變化(本研究繪製)

轉並將控制溫度設定為20°C。

相同天候條件，若採用本研究提出的熱舒適控制演算機制進行熱舒適環境控制，可利用所量測的睡眠熱舒適氣溫($T_a^{PMV_s}$)描繪出如圖10中“PMV_s based control”所對應的PMV_s曲線。研究發現時域範圍內的PMV_s平均值為-0.5(標準差0.11)，睡眠時熱舒適度的不滿意度百分比PPD_s約11%，表示89%以上的用戶滿意於本研究設計的智慧環控風扇及其睡眠控制機制。

夏季實驗當日(07-30-2019)所量測的實驗環境外圍約8.5小時平均氣溫為32.23°C(標準差0.85°C)。當日實驗所記錄的中心量測點的空氣溫度(T_a^{sc})、平均輻射溫度(T_{mrt}^{sc})、相對溼度(RH_a^{sc})以及最佳控制設定溫度(T_{sp}^{sc})等變化皆記錄於圖

11。夏季的實驗為了配合冬季實驗所設定的個人化參數(長袖長褲、中被子)，所以智慧環控風扇內建之演算法所推論出的最佳設定溫度相對會較低。實驗初期，量測該環境的空氣溫度(T_a^{sc})為31.1°C、平均輻射溫度(T_{mrt}^{sc})為30°C、相對溼度(RH_a^{sc})為72.5%，紅外線控制信號送出22°C的設定溫度(T_{sp}^{sc})給實驗環境內的空調系統將其設定溫度控制為22°C。控制流程持續2小時後，觀察實驗環境的空氣溫度(T_a^{sc})為23.8°C、平均輻射溫度(T_{mrt}^{sc})為26°C、相對溼度(RH_a^{sc})為60.1%，「智慧環控風扇」將實驗環境內的空調系統設定為23°C，此時，空氣溫度已明顯接近該環境的最佳設定溫度，2.5小時後的控制效果明顯地都在最佳控制溫度左右。

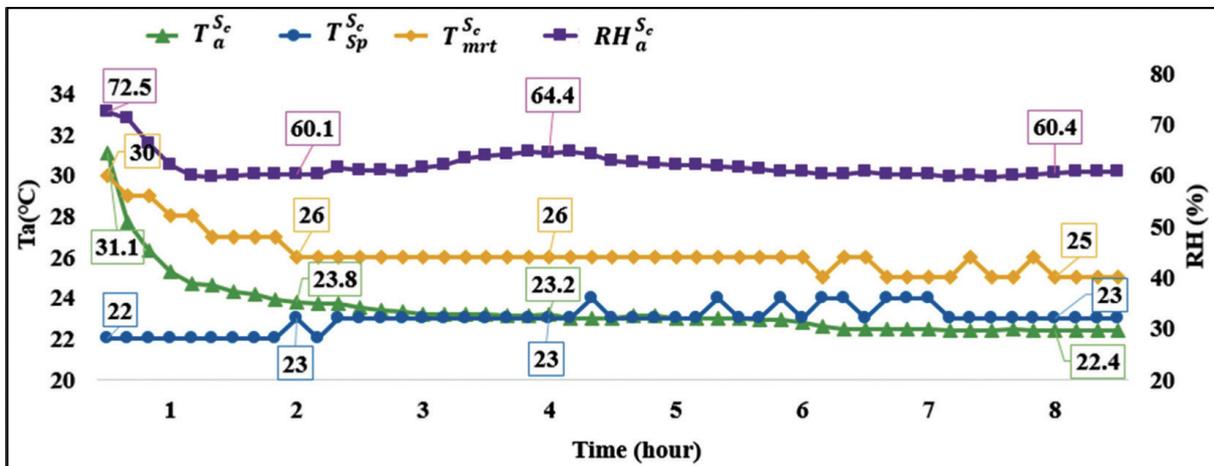


圖11 夏季的空氣溫度(T_a^{sc})、平均輻射溫度(T_{mrt}^{sc})、相對溼度(RH_a^{sc})以及最佳控制設定溫度(T_{sp}^{sc})等環境參數的動態變化(本研究繪製)

夏季相較於冬季可有效率地將熱舒適環境控制到最佳狀態，因為根據演算法推論，夏季時的天候藉由風扇轉速變化作動與空調控制溫度的調節設定可以有效地降溫達到較佳的熱舒適環境。相反的，在冬季時若經常啟動風扇或加快體表風速反而造成反效果。夏季實驗所測得的人體體表風速(V_{af}^{sc})如圖12所示。

圖13顯示類似氣候條件下，不同控制機制之實驗環境的空氣溫度變化，其中當不啟動空調系統時該實驗環境的背景氣溫(T_a^{none})變化在第2小時為32.1°C、第4小時為32.1°C、第8小時為31.5°C。實驗環境的PMV_s變化描繪如圖14中的“None control”所對應的PMV_s曲線，可發現未使用空調時的環境PMV_s的平均值為2.5(標準

差0.11)，PPD_s約為93%，表示會有93%以上的用戶不滿意此環境的睡眠熱舒適度。

相似氣候條件，若採用空調系統內建的自動控制模式(Air conditioning based control)進行該調節，量測實驗環境的氣溫(T_a^{auto})變化(如圖13)，觀察發現在第2小時為25.2°C、第4小時為25.1°C、第8小時為25°C。將其描繪如圖14中“Air conditioning based control”所對應的PMV_s曲線，環境PMV_s的平均值為0.5(標準差0.36)，對應於PPD_s為9.1%。

採取該空調系統內建的自動控制模式基於相同個人化參數估算PMV_s，恰巧達預期熱舒適狀態($-0.6 \leq PMV_s \leq +0.6$)，但因“Air conditioning based control”的控制機制並無考

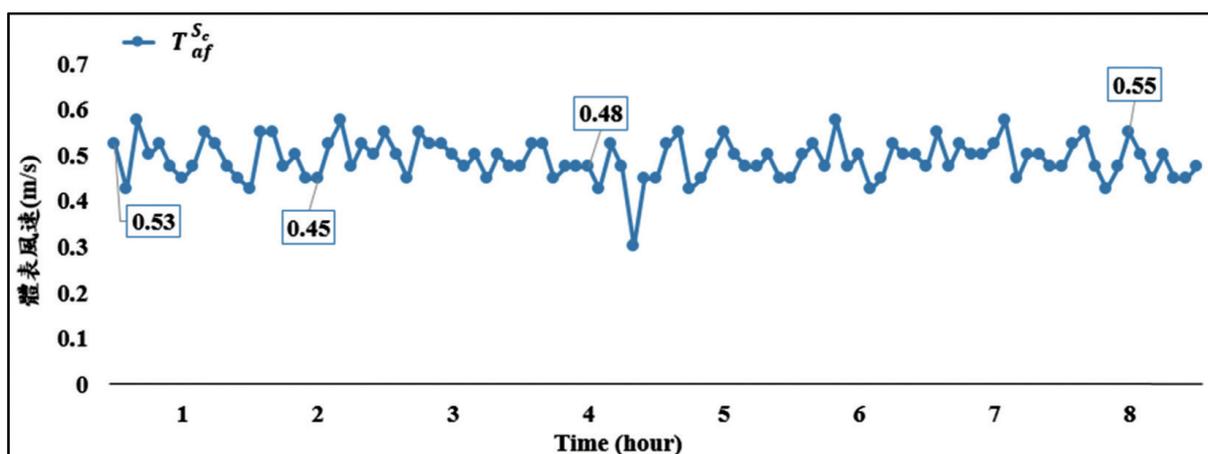


圖12 夏季的人體體表風速(m/s)的動態變化(本研究繪製)

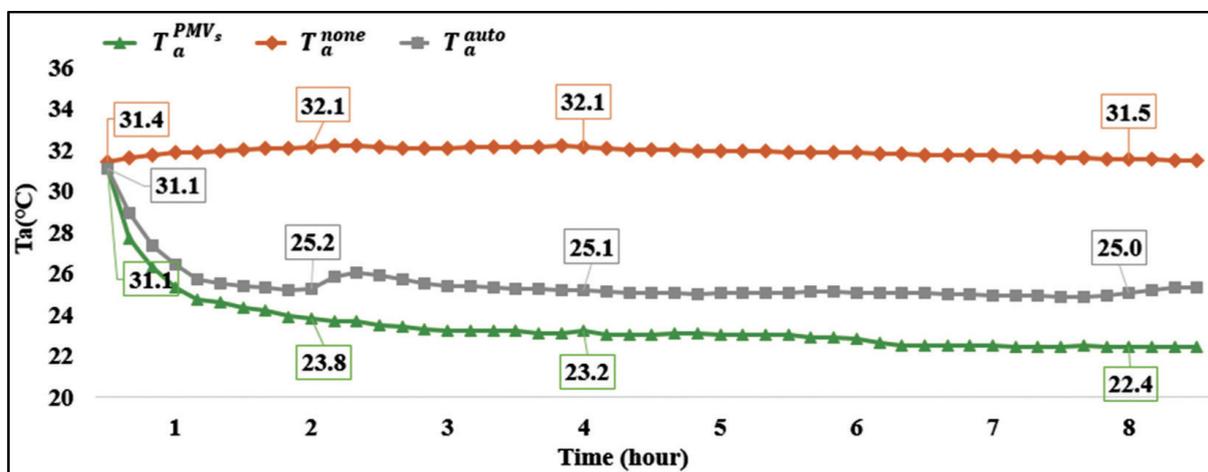


圖13 夏季環境參數動態變化下，採取不同控制策略的空氣溫度變化：本研究熱舒適控制演算機制(T_a^{PMVs})、無空調環境背景(T_a^{none})、以及空調系統內建控制機制(T_a^{auto}) (本研究繪製)

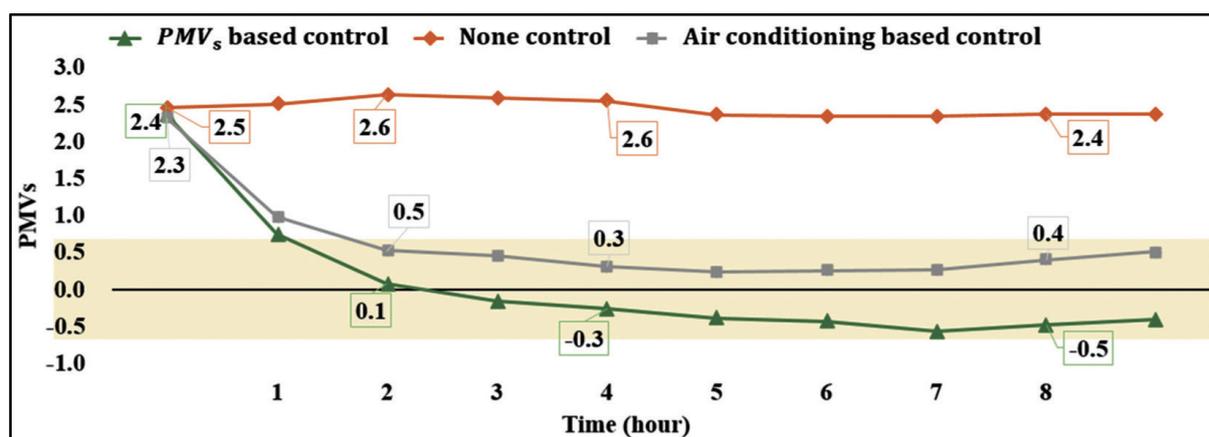


圖14 夏季不同控制策略的PMVs變化(本研究繪製)

慮個人衣著量、新陳代謝率等因子，一旦用戶變更成其他衣著量或新陳代謝率必然明顯降低個人的熱舒適度感受。

若於相似氣候條件下，採用本研究提出的熱舒適控制演算機制調節環境，描繪如圖14中“PMV_s based control”所對應的PMV_s曲線。發現其PMV_s平均值為-0.1 (標準差0.53)，PPD_s約為5%，表示95%以上的用戶滿意本研究提出的舒眠控制機制所改善的熱舒適環境。

由圖8、圖11可觀察到「智慧環控風扇」會根據實驗環境狀態變化，動態對空調系統送出設定溫度(T_{sp}°)的控制命令，隨後空調系統依據設定溫度即時調節實驗環境，藉此得知由本研究提出的熱舒適控制演算機制確實可以有有效的調節環境溫度。採用本研究提出的熱舒適控制演算機制不僅可根據環境感測資訊動態調節控制參數，亦同時考慮個人的衣著量及代謝率，進行個人化熱舒適環境控制，以提升睡眠期間的PMV_s ($-0.6 \leq PMV_s \leq +0.6$)。分析結果顯示本研究提出的熱舒適控制演算機制所調節的熱舒適度顯著優於其他控制機制(獨立雙樣本t檢定； $p < 0.01$)。

然而本研究察覺所提出的演算機制於系統啟動初期的最佳控制設定溫度(T_{sp})與中心量測點的空氣溫度(T°)差距頗大，必須持續調節控制約1到2小時之後，設定溫度(T_{sp})與空氣溫度(T°)的差距才會變小且漸趨一致。主因為空調

系統本身的加熱與冷卻的負載能力不一致，可於所提出演算法中加入期初啟動的預熱或預冷程序，即可明顯改善。另外，若用戶尚不滿意所控制的PMV_s狀態，亦可藉由智慧手機的應用程式(App)微調個人化的冷暖偏好(PMV₀)參數，客製化控制期間的PMV_s狀態，即可達到依用戶冷熱偏好調整控制策略的效果。

效能評估分析結果表明智慧環控風扇技術，搭配合適的空調系統對於個人化、以及多功能性的熱舒適環境調節具有顯著性，例如：改善夏季或冬季睡眠溫熱環境的舒適度。

6. 結 論

本研究提出以熱舒適度為基礎之居家智慧環控風扇設計的系統架構、以及熱舒適控制演算法，並實際建置一智慧環控風扇。該系統可藉由感測器偵測空氣溫度、相對濕度、平均輻射溫度等室內環境感測值，並透過智慧行動裝置取得個人生理參數、個人偏好等資訊，並以本研究改良的熱舒適環控演算法推導睡眠時最佳空調系統控制設定溫度、及最佳用戶體表平均風速等，動態調節智慧環控風扇的轉速，並發送控制命令控制外部空調系統的設定溫度以調節合宜的熱舒適居家環境。為了評估本技術的效用，本研究採用實際場域比較分析冬季與夏季居家睡眠熱舒適環控的運作效能。評估結

果顯示，採用本研究提出的技術對於改善個人化熱舒適環境相較於一般控制方式具有顯著效果。

基於熱舒適環控演算法所發展的技術，未來可以擴展出更多元的應用情境，包含日間熱舒適環控、以及夜間睡眠熱舒適環控等整合感控系統的應用。另外，由於空調系統之加熱與冷卻的能力關係到居家環境氣溫調節的效率，建議未來可結合預熱或預冷程序於熱舒適控制演算機制中使整體系統更為完善。

誌 謝

本研究承經濟部能源局之經費支持，特此致謝。

參考文獻

- 王曉倩，劉益才，畢麟與劉紹文，2018。空調環境下吊扇對熱舒適影響的研究。第十四屆全國電冰箱(櫃)，空調器及壓縮機學術年會論文集。
- 林秤毅，2013。穿戴式裝置之睡眠品質偵測演算法分析與評估，國立臺北科技大學電腦與通訊研究所碩士論文。
- 林傑宏，蘇讚儀與侯雅壹，2014。風扇整合智慧控制輔助室內舒適度及節能效益之探討。《健康與建築雜誌》，1(4)，1-8。
- 李佳，2013。臺灣民眾的睡眠調查研究，國立雲林科技大學工業設計系碩士論文。
- 張晏維，2013。床板傾斜角度改變對睡眠品質之影響，國立雲林科技大學工業設計系碩士論文。
- Etik, N., N. Allahverdi, I. U. Sert and I. Saritas, 2009. Fuzzy expert system design for operating room air-condition control systems. *Expert Systems with Applications*: 36(6), 9753-9758.
- Fanger, P. O., 1972. *Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering*. New York: McGraw-Hill.
- Fanger, P. O., 1973. Assessment of man's thermal comfort in practice. *British journal of industrial medicine* : 30(4), 313-324.
- Fontvieille, A. M., R. Rising, M. Spraul, D. E. Larson and E. Ravussin, 1994. Relationship between sleep stages and metabolic rate in humans. *American Journal of Physiology-Endocrinology And Metabolism*, 267(5), E732-E737.
- Froiz-Míguez, I., T. Fernández-Caramés, P. Fraga-Lamas and L. Castedo, 2018. Design, implementation and practical evaluation of an IoT home automation system for fog computing applications based on MQTT and ZigBee-WiFi sensor nodes. *Sensors*, 18(8), 2660.
- Hong, S., J. Lee, J. Moon and K. Lee, 2018. Thermal Comfort, Energy and Cost Impacts of PMV Control Considering Individual Metabolic Rate Variations in Residential Building. *Energies*, 11(7), 1767.
- Hu, C. C. and H. L. Li, 2016. Deducing the classification rules for thermal comfort controls using optimal method. *Building and Environment*, 98, 107-120.
- Hu, C. J., C. C. Cheng, H. Y. Wu and N. T. Chao, 2012. A study of the lighting control system for a daylit office. In *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology* (No. 67). World Academy of Science, Engineering and Technology.
- Hu, C. J., C. C. Cheng, H. Y. Wu and N. T. Chao, 2014. An Ontology Based Recommendation Mechanism for Lighting System Design. In *Computer, Consumer and Control (IS3C)*, 2014 International Symposium on (pp. 239-243). IEEE.

- Kim, J., Y. Zhou, S. Schiavon, P. Raftery and G. Brager, 2018. Personal comfort models: predicting individuals' thermal preference using occupant heating and cooling behavior and machine learning. *Building and Environment*, 129, 96-106.
- Lin, Z. and S. Deng, 2008a. A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics—developing a thermal comfort model for sleeping environments. *Building and Environment*, 43(1), 70-81.
- Lin, Z. and S. Deng, 2008b. A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics—Measuring the total insulation values for the bedding systems commonly used in the subtropics. *Building and Environment*, 43(5), 905-916.
- Liu, S., M. Jin, H. Das, D. Spanos and S. Schiavon, 2018. Personal thermal comfort models based on physiological parameters measured by wearable sensors. In *Proceedings of the Windsor Conference* (pp. 431-441).
- Peltokangas, M., J. Verho and A. Vehkaoja, 2012. Night-time EKG and HRV monitoring with bed sheet integrated textile electrodes. *Information Technology in Biomedicine, IEEE Transactions on*, 16(5), 935-942.
- Seale, J. L. and J. M. Conway, 1999. Relationship between overnight energy expenditure and BMR measured in a room-sized calorimeter. *European journal of clinical nutrition*, 53(2), 107-111.
- Sherman, M. A., 1985. Simplified model of thermal comfort. *Energy and buildings*: 8(1), 37-50.
- Wu, S. and J. Q. Sun, 2012. Two-stage regression model of thermal comfort in office buildings. *Building and Environment* : 57, 88-96.
- Zhang, K., M. Sun, P. Werner, A. J. Kovera, J. Albu, F. X. Pi-Sunyer and C. N. Boozer, 2002. Sleeping metabolic rate in relation to body mass index and body composition. *International Journal of Obesity & Related Metabolic Disorders*, 26(3).
- Zhao, Q., Y. Zhao, F. Wang, J. Wang, Y. Jiang and F. Zhang, 2014. A data-driven method to describe the personalized dynamic thermal comfort in ordinary office environment: From model to application. *Building and Environment*: 72, 309-318.

Smart DC Fan Design and Evaluation Based on Thermal Comfort

Hsiao-Yuan Wu¹ Fang-Yu Liu² Chih-Chien Hu^{3*}

ABSTRACT

In recent years, many applications have intended to integrate Internet of Things technology into smart home systems, trying to produce a variety of smart home devices or services to enhance the convenience and comfort of home users, and improve energy efficiency. However, studies and applications that consider both human thermal comfort and personalized thermal comfort controls are rarely proposed. In this study, a control system is built, which integrates a radiation temperature sensor, an air temperature sensor, a relative humidity sensor, a wireless communication module, and a thermal comfort control algorithm for an application of a smart DC fan. The proposed smart DC fan can coordinate with home air conditioning system to dynamically regulate an indoor thermal comfortable environment. The results shows that the proposed smart DC fan can significantly and effectively improve the thermal comfort based on user's varying requirements.

Keywords: Thermal comfort, Control system, Smart home, PMV.

¹ Researcher, Green Energy and Environment Research Laboratories, ITRI.

² Internship student, GEL, ITRI.

³ Assistant Professor, Research Center for Smart Learning, Bachelor Program in Interdisciplinary Studies, College of Future & Department of Applied Foreign Languages, National Yunlin University of Science & Technology.

* Corresponding Author, Phone: +886-5-5342601, E-mail: hucc@yuntech.edu.tw

Received Date: August 31, 2019

Revised Date: April 9, 2020

Accepted Date: April 21, 2020