

主從式辦公室物聯網照明控制系統

梁瑋傑¹ 李俊德² 朱奐玫^{1*} 謝哲人²

¹正修科技大學企業管理系

²正修科技大學電競科技管理系

摘 要

大部分安裝的照明系統已過時且能源效率不佳，因此目前急需一種能源效率佳、易於安裝、低成本的智慧 LED 照明系統，本文所提出的「主從式辦公室物聯網照明控制系統」便可滿足此需求，透過系統計數器與紅外線人體移動感測器(PIR Sensor) 的協調運作，確認空間中無人存在時，將室內全部 LED 燈一起轉為「弱光模式」，反之，便將室內全部 LED 燈一起轉為「強光模式」。除了可同時改變同一區域的 LED 燈亮度以節省能源外，並可透過物聯網(IoT)的微控制器(Microcontrollers)和 Internet 來直接對 LED 燈進行參數設定。以一般 15W T8 LED 燈管(非感應燈)為例，若將其替換為所提出的辦公室照明系統(假設辦公室每天開啟 10 小時照明，且每小時弱光模式的時間是 20 分鐘)，則其省電率高達 28.13%。

關鍵詞：紅外線人體移動感測器，主從式，物聯網

Master-Slave Smart Office Lighting Control System Based on Internet of Things Technology

Wei-Chieh Liang¹, Chun-Te Lee², Huan-Mei Chu^{1*}, and Che-Jen Hsieh²

¹Department of Business Administration, Cheng-Shiu University

²Department of E-Sport Management, Cheng-Shiu University

ABSTRACT

Most installed lighting systems are outdated and have poor energy efficiency. Therefore, there is an urgent need for smart LED lighting systems that are energy efficient, easy to install, and inexpensive. In this article, a leader-follower smart office lighting control system based on Internet of Things (IoT) technology is proposed to satisfy the goal of saving energy through the coordinated operation of a system counter and an infrared (IR) human movement sensor (passive infrared (PIR) sensor). When no one is present in the space, all indoor LED lights are turned to low-light mode. Otherwise, all indoor LED lights are turned to High-light Mode together. In addition to changing the brightness of LED lights in the same area at the same time to save energy, the parameters of the LED lights can be set directly through microcontrollers via the IoT and the internet. If a general 15 W T8 LED tube (noninduction light) is replaced with the proposed leader-follower office lighting system (assuming that the office is occupied for 10 hours a day and that the hourly low-light mode is 20 minutes), then the power-saving rate is as high as 28.13%.

Keywords: PIR Sensor, Master-Slave, Internet of Things

一、前言

各國近代工業、經濟發展飛速，但也對地球環境造成了無法修復的傷害，當地球無法負荷而導致氣候、環境的反撲與危害後，人們才驚覺事態的嚴重性，因此全球暖化、環保節能、綠能永續發展等議題逐漸被世界各國所重視，並提出相關防護措施，為了響應環保及節能減碳，世界各國極力發展替代能源與綠色永續資源，希望藉此改善對環境產生的破壞與維護資源。

目前全世界的住宅用電迅速增加，對於能源之需求與日俱增，人們對高效率的裝置越來越感興趣，尤其是在油價格翻倍導致電費率上升後[1]。人口的增長帶來了自然資源缺乏的問題，例如電力之類的人造資源已無法應付人口快速增長的需求，在過去的幾十年中，已經採取了各種措施來改善設備和系統設計，以提高生產與傳輸效率並降低功耗[2]。

在美國，建築物消耗的能源約佔能源消耗的 40%，其中住宅建築的照明約佔 10%，商業建築則為 20%[3]，故照明是建築物中耗能佔最多的一部分，各國政府莫不努力減少照明的耗能，而其中 LED 的發展已經對照明行業的產生重大影響[4]-[5]。事實上，在照明系統中使用 LED 技術是可節省能源的[6]，LED 技術的發展和應用日新月異，使用 LED 技術降低照明所需的功率值，並增強它們的低消耗、耐用性與環保[7]-[10]。

目前各國政府莫不積極地推展提高能源效率運動，藉由先前的研究可發現，使用運動傳感器(Motion Sensors) 的簡單照明控制，可有效地減少用於建築物能耗。但智慧的照明控制策略則可實現更大的節能與更好的服務，並提供許多優於簡單開/關控制的優勢[11]。

根據 TrendForce 最新報告《2021 全球 LED 照明市場報告- 照明級封裝與照明產品趨勢(1H21)》顯示，全球 LED 照明市場展望比之前預估更為樂觀，預估 2021 年全球 LED 照明市場規模將有機會成長 5.1%。COVID-19 在全球迅速蔓延，LED 照明產品為人們生產生活之必需品，人們待在家裡，導致家庭用電越來越高，故市場剛性需求依然存在，疫情期間家居照明市場需求不減反升，更是彰顯了這一本質特性。另外，照明產品進一步向數位化智慧調光調控的燈具發展，相信未來照明產業

也將更多地關注產品的智慧系統化、人因健康照明以及細分應用市場需求等。TrendForce 預估 2025 年達到 443 億美金[12]。

到目前為止，由於安裝和維護成本高昂且不易進行改造，智慧的照明控制系統還不算太成功[13]，仍有改進的餘地。先前的系統不止昂貴，還必需面對架設伺服器、重新佈線、大量改造……等問題，本文擬提出一適用於辦公室環境的低成本、易改造的智慧照明控制系統，可保留原燈座、不需佈線、不用架設伺服器，便可達到節能目的，且首度將辦公空間無人時，改以弱光模式運行，不會在上班時間將辦公空間變為黑漆漆。

本文的其餘部分組織如下，第 2 節討論了相關工作，第 3 節介紹所提出的系統，第 4 節針對所提出的系統進行節能的計算和討論，最後我們在第 5 節中作總結。

二、相關研究

LED 照明具有環保特性，但目前仍未普及，主要是其安裝成本仍高於現有照明裝置，隨著 LED 製造技術的進步，其價格正在下降，但整體的照明成本仍然非常昂貴。為此人們仍努力不懈地研究，透過傳感器和網路技術的幫忙來提升 LED 照明的經濟效益。這些 LED 照明系統也已商品化，當用戶不在房間內或房間太亮時，系統透過降低照明的輸出功率來減少能耗，而不是維持相同亮度[14]。

近年來照明領域的能源效率、控制研究成果豐碩，提出了各種技術和解決方案[14-29]，主要分為有線和無線系統兩種方法，但有線設備的維護和安裝費用較高，故無線技術已慢慢將其取代。其中，無線感測網路 WSN(Wireless Sensor Network) 是建築能源控制的有效技術，因為它比有線網路更容易實施，通過使用先進的 WSN 控制和直流電供電的 LED 照明系統，此組合技術的優勢應該會在綠色智慧建築中達到更大的節能[16]。

隨著無線感測網路技術的進步，目前監控工業建築、商業大樓和辦公室比以往任何時候都更加容易，由於 WSN 設備的靈活分佈，WSN 是工業領域、醫療保健、安全和環境監測等多種虛實整合系統(Cyber-Physical Systems) 應用程序的支柱[30]-[32]。每個設備都包含了一個網路節點，該節點集合了計算、

無線通信、電源管理和傳感功能，以便收集和處理來自傳感器的數據，通常作為合作協調活動[33]。WSN 與 LED 燈和先進的驅動相結合，將應用場域中的照明功耗大量降低[21]。

最近，無線感測網路已應用於節能方面，例如光控制[34]、[35]。在[34]中，研究了使用燈光控制在能耗和用戶滿意度之間的權衡。作者使用了考慮用戶位置和照明偏好的效用函數，以便調整照明從而得到最大效益。然而，它沒有考慮到人們在進行不同的活動時，可能需要不同水平的照明。

辦公空間或家庭中的燈光通常由開/關直接控制，當然用戶可以透過將照明設備連接到 PC 來遠端開燈或關燈，但此台 PC 必須每天 24 小時控制運作，消耗相當大的電量[36]-[39]。在某些設計中必須安裝特定的硬體和軟體來控制燈光，從而導致無法接受的成本，此外，此類型的系統無法檢測人體溫度或室內光線強度[40]、[41]。

Kaleem [42]研究了一種基於 ZigBee 的戶外照明系統，系統參數由感測器控制，經實驗證明，該系統可以為室外街道環境節省 70.8% 的能源。Wang [43]研究一種基於 WSN 的智慧照明控制系統，依據光線的照度和均勻性，設計了一種可梯次下降的智慧照明控制演算法。

[44]-[45]研究以紅外線人體移動感測器 (PIR Sensor)、Arduino UNO 和 2 通道繼電器模組所組成的系統，使用 PIR 感測器檢測到運動並以計算機處理來控制燈光，該系統的功能是當有人進入教室時自動開燈，當教室無人時自動關燈。另外，Wahyuni[46]也研究了一類似的智慧照明系統，其工作原理是 PIR 感測器透過體溫和房內的人之運動來檢測人的存在。

Mohamed 等[47]研究運用 2 個 PIR 感測器來檢測入口處人員的進出狀況，然後依據空間的人數來決定照明的亮度，人數越多則亮度越亮，藉此避免能源浪費。但此系統有一個問題，當人數少時，空間的照明會明顯不足，照明的亮度不應以人數多寡來決定。

目前智慧照明系統最顯著的問題是，雖然它們可以減少能源，但通常是成本高、不易安裝且多用於簡單的空間，如廁所、走廊等，但在複雜空間中應用並不廣泛，例如辦公人員較多、執行複雜任務的辦公室等。

因此，本文提出了一種適合辦公空間的

「主從式辦公室物聯網照明控制系統」，一種低成本、無線、易於安裝、適應性強的主從式智慧 LED 照明系統，當系統的計數器為零且紅外線人體移動感測器 (PIR Sensor) 感應不到有人時，系統將室內全部 LED 燈一起轉為「弱光模式」，反之，計數器不為 0 時，便將室內全部 LED 燈一起轉為「強光模式」。除了可同時改變同一區域的 LED 燈亮度以節省能源外，並可透過物聯網 (IoT) 來直接對 LED 燈進行參數設定。

三、主從式辦公室物聯網照明控制系統

3.1 作品介紹

先前有廠商開發一種具弱光模式之新型 LED 感應燈[48]，將一般感應燈的全暗模式改為低功率的「弱光模式」來待機，解決了一般感應燈的許多問題，當有人靠近感應燈時，眼睛不會因強光而感到不舒適，且在無人經過時感應燈呈現弱光狀態，夜歸的人不用再面對漆黑的走廊，達到一舉多得之目的。另外，該新型感應燈弱光模式之燈管耗電量只有強光模式的 1/10，但其亮度約只有強光模式的一半，非常適合大樓停車場、走廊、樓梯間或廁所之感應照明，既可不用換燈座直接替換原本燈管，又可維持基本亮度，如圖 1：



圖 1. LED 新感應節能燈(T8 LED 燈管)[48]

先前的工作[48]有一個缺點，它只適合大樓停車場、走廊、樓梯間或廁所之感應照明，並不適用於辦公空間中的燈光控制，因該新型感應燈雖然可接受連續觸發，如果人員不停地來回走動，則燈光會持續亮著，但如果在辦公空間中的人員靜止不動的話，非常有可能會誤判空間中無人，因而在強光模式維持一段時間後，直接轉為弱光模式。另外，在參考文獻[47]中，只用 2 個 PIR 感測器來搭配計數器計算空間的人數，這也是有盲點的，因為在 2 人肩並肩同時進入時容易誤判。因此，若能將作品改良為「透過系統計數器與紅外線人體移動感測器 (PIR Sensor) 的協調運作，確認空間中無人

存在時，將室內全部 LED 燈一起轉為弱光模式」，如此便可確保辦公空間無人時，改以弱光模式運行(不建議變為全暗，因為在上班時間將辦公空間變為黑漆漆，著實觀感不佳)，不僅可減少電力的消耗，更可達到節能、人性化、物聯網的整合系統。

在辦公室中，繁忙的工作和行程安排有時會讓人忘記關燈，最終造成電力浪費，我們所提出的辦公室照明系統可以降低功耗並優化功率，圖 2 是本系統安裝於辦公室之示意圖，2(a)是側視圖，2(b)是俯視圖。

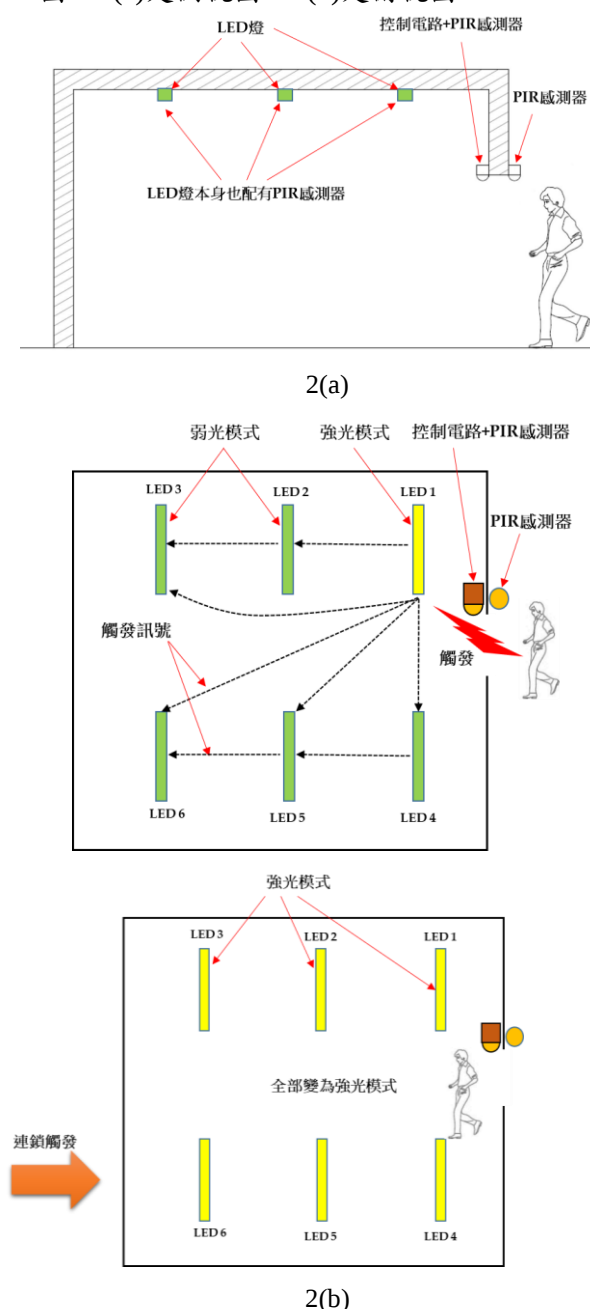


圖 2.安裝於辦公室之示意圖：(a)側視圖；(b)俯視圖

辦公室門口上方裝有兩個 PIR 感測器，藉由兩 PIR 感測器的先後感應次序，來判斷人員是進入或退出辦公室，如果門外的 PIR 感測器先感應到人員的存在，接著門內的 PIR 感測器才感應到，則系統判斷為「進入」，並將系統的計數器+1，反之，則判斷為「退出」，並將系統的計數器-1。

一開始時，系統的計數器=0，當有人從外面進入辦公室時，計數器+1，而最接近門口的 LED 1 也被觸發，只要同一辦公室(區域)的 LED 其頻道都是相同的(設為相同頻道的 LED 燈才會發送或接收到彼此的訊號，下節會詳細說明)，此時便會透過 Wi-Fi 2.4G 無線傳輸模組，將觸發訊息傳遞給同一區域的其他 LED 燈，讓同一區域的 LED 燈都同時變為「強光模式」。

在圖 2 中，當有人靠近 LED 1 時，LED 1 立即將觸發訊號傳遞給 LED 2 至 LED 6，其接收方式有二種，一是可以直接接收由 LED 1 發送來的訊號，另一則是接收其他較早收到訊號的其他 LED，以 LED 6 為例，它可以接收由 LED 1 發送來的訊號，也可接收 LED 5 轉過來的觸發訊號(端看那一個訊號先到達)，而接收到 LED 1(Master)的觸發訊號後，其他的 LED 2 至 LED 6(Slave)也會立即以強光模式來運行，所以 LED 1 至 LED 6 是幾乎同時變為強光模式的，而不同區域的 LED 因為頻道設定不同，所以是不會被觸發的，使用者可依據環境需求設定 LED 所屬區域，當 LED 燈設為同一區域後才會同步作動。

所提出的辦公室照明系統使用之 LED 燈，是類似於參考文獻[48]所提出的感應燈(本身配有 PIR 感測器)，所以當強光時間持續 T 秒後(參數 T 可由使用者經由物聯網(IoT)來設定，其預設值為 30 秒)，LED 燈的 PIR 感測器偵測不到人時，會自動變為弱光模式，但本系統修改為「LED 燈的 PIR 感測器偵測不到人且系統計數器=0」二條件同時存在，確認辦公室中無人存在時，才會將 LED 變為弱光模式，如此方式可避免系統誤判，避免明明有人存在，但因空間中的人員長久時間靜止不動，PIR 感測器偵測不到而誤判。

所以當辦公室已經有人存在時，後面進入的人只會將系統的計數器+1，並不會造成 LED 燈的閃爍(因為本來就是維持強光模式狀態)，若有人退出辦公室，也只會將系統的計

數器-1，也不會變為弱光模式(因為計數器不等於零)，故只有在辦公室最後一人離開 T 秒後(預設值為 30 秒)，全部的 LED 燈才會變為弱光模式。

由於本作品可不須換原 LED 燈之燈座，直接將辦公室舊 LED 燈管或螢光燈管汰換為本新型感應燈，然後在門口內外各加裝一 PIR 感測器，如此簡單的安裝且不需佈線、不用架設伺服器、保留原燈座，便可達到智慧 LED 照明系統的節能目的。

再者，以[26]該文章為例，該篇我們的節能概念是一致的，但他必須架設伺服器以及複雜的佈線，才有辦法控制每個 LED 燈之適合亮度以及感應人經過的路線，必須花費非常多的時間與金錢，才有辦法達到 58%的節能效果。而我們的設計只要將一般 T8 LED 燈管替換為本新型感應燈，不需架設伺服器與佈線，便可達到不錯的節能效果。以圖 2 的辦公室照明系統為例，每支燈管 NT\$600 元，門口的控制電路與 PIR 感測器 NT\$1200 元，其總花費為 $600 \times 6 + 1200 = \text{NT\$}4800$ 元(約 US\$171.43)。

3.2 系統流程與架構

本文所提出的主從式辦公室物聯網照明控制系統之系統流程圖如圖 3 所示：

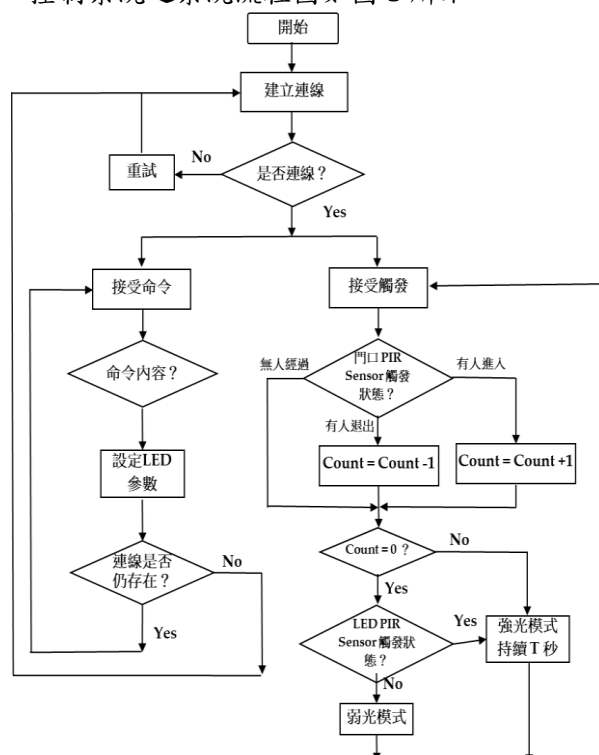


圖 3. 系統流程圖

系統首先與雲伺服器(Cloud Server)建立連接，在沒有連接的情況下，系統會反覆嘗試建立連線，建立連線後，系統一方面等待來自應用程式的命令，另一方面則開始接受外界的觸發。應用程式的命令是設定 LED 參數(強光持續時間 T、強光模式功率%、弱光模式功率%)，然後系統檢查連線是否持續，並重複整個過程。

系統首先接受門口 PIR Sensor 觸發，若偵測到有人「進入」時，將系統的計數器+1，若有偵測到有人「退出」時，將系統的計數器-1，若無人進出時，則計數器維持不變，接著系統判斷計數器的值，若計數器不為 0，將所有 LED 設為「強光模式」，時間自行持續 T 秒，若計數器=0，則立即檢查每個 LED 的 PIR Sensor 是否有被觸發，若有被觸發時(表示辦公室內仍有人存在)，則一樣會將所有 LED 設為「強光模式」，若 LED 的 PIR Sensor 沒有被觸發，表示此時計數器=0 且無人在辦公室內，故我們此時才會將所有 LED 設為「弱光模式」(會等強光的 T 秒倒數計時完才會變弱光)。

故當計數器>1 時，後面進入的人只會將系統的計數器+1，若有人退出辦公室，也只會將計數器-1，LED 燈一樣都是維持強光狀態，只有在辦公室最後一人離開 T 秒後且 LED 的 PIR Sensor 沒有被觸發時，全部的 LED 燈才會變為弱光模式。

當「LED 燈的 PIR 感測器偵測不到人且系統計數器=0」二條件同時存在，才會將 LED 變為弱光模式，如此方式可避免許多誤判情形，例如，一開始辦公室無人，但有 2 個人肩並肩同時進入，此時計數器會誤判為 1，當有 1 人走出辦公室時，計數器會變為 0，但此時 LED 燈的 PIR 感測器會偵測到還有人在辦公室，故不會將 LED 燈變為弱光模式，且在最後 1 人離開辦公室時，計數器會維持為 0(我們設定計數器不為負值)，此時 LED 燈才會變為弱光模式。在參考文獻中，有的僅有裝設系統計數器，有的只用 PIR 感測器來偵測，這都非常容易誤判人數而誤動作(明明有人卻將燈關閉，或者無人在時燈還亮著)。本系統架構圖如圖 4 所示：

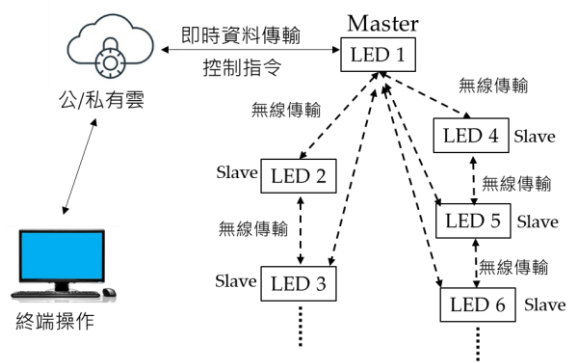


圖 4. 系統架構圖

所提出的辦公室照明系統可藉由 Wi-Fi 2.4G 無線傳輸將 LED 的強光持續時間、強光模式功率%、弱光模式功率%等參數及主從模式等控制資料上傳至雲端，並由終端設備進行參數設定，終端設備可以是手機、平板或是電腦，當 Master LED 燈接收到雲端上面的命令資訊後，會立即藉由 Wi-Fi 2.4G 無線傳輸將命令轉傳至其他 Slave LED 燈，所以屬於同一區域的 LED 燈之參數可輕鬆一併設定，不用一一分別設定。

圖 5 顯示了所提出的主從式辦公室物聯網照明控制系統的硬體方塊圖。電源供應模組為 110/220V 通用電壓，中央處理器(MCU)依據通訊模組傳送過來的參數值，下指令給「LED 亮度控制模組」，決定 LED 強光、弱光的功率比例以及強光持續時間。而通訊模組是 Wi-Fi 2.4G 無線傳輸模組，負責與雲端的數據傳輸與基於物聯網的智慧 LED 燈之間的傳輸。

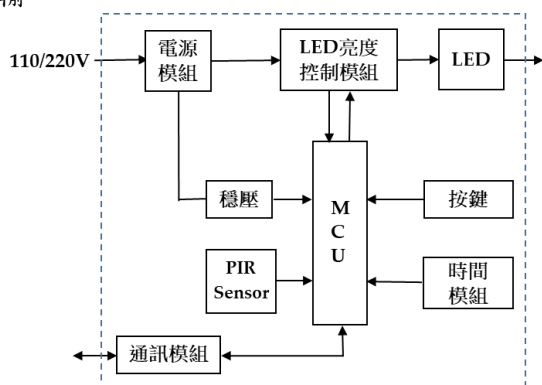


圖 5. 單一 LED 燈之硬體方塊圖

所提出的辦公室照明系統之 LED 燈參數可設置範圍和預設值見表 1，其可以設定的參數有強光持續時間 T、強光模式功率 W_H 、弱

光模式功率 W_L ，這些參數皆設定好預設值以適合辦公室照明，使用者可透過 Internet 連線到 LED 燈加以修改，其可設定範圍如表所示，而修改完的參數值也會透過 Wi-Fi 2.4G 無線傳輸模組上傳至雲端，以便進行大數據分析，可以供日後設定參數值之建議。所提出的辦公室照明系統之 LED 燈原型如圖 6 所示。

表 1. LED 參數的預設值與調整範圍

參數	可設定範圍	預設值
強光持續時間 T	10-60 秒	30 秒
強光模式功率 W_H High-light Mode	80-100%	100%
弱光模式功率 W_L Low-light Mode	10-30%	10%



圖 6. 所提出的辦公室照明系統之 LED 燈原型

辦公室的 LED 燈在無人狀態時，會同時以弱光模式運行，當辦公室的任一盞 LED 燈偵測到有人經過時(如圖 7 所示)，便會透過 Wi-Fi 2.4G 無線傳輸模組，將觸發訊息傳遞給同一區域的其他 LED 燈，並將亮度同時調整為「強光模式」，而不是依序將一個個 LED 燈點亮。

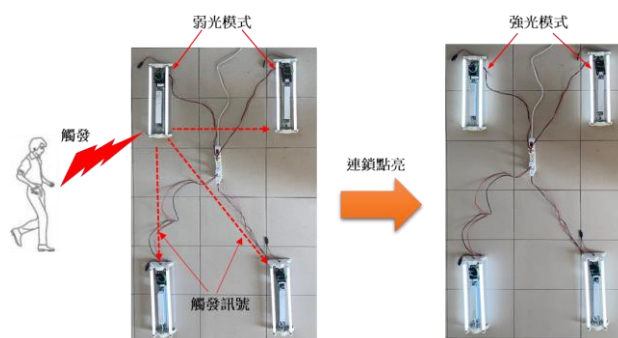


圖 7. 本作品實測圖

圖 6 的通訊模組為 Wi-Fi 2.4G 無線傳輸模組，負責與雲端的資料傳輸與 LED 燈間彼

此的傳輸，而 LED 燈間的傳輸方式為「設為相同頻道的 LED 燈才會發送或接收對方的訊號」。例如，圖 8 的 Master LED 燈之頻道設為'000'(Dip Switch 設為'000')，則可藉由 Wi-Fi 2.4G 無線傳輸，將設定之參數轉傳至其他頻道也設為'000'之 Slave LED 燈，至於其他頻道的 LED 燈，則無法接收此資料。

這是為了大型場域而設計的功能，因為在大型場域中，需設定的 LED 燈可能多達數百個，要設定這麼多數量的 LED 燈是一個巨大的工程，故可將頻道值相同之 LED 燈，一起同時設定為相同的參數值，如此可省去非常多的工作。以圖 2(b)的辦公室為例，可將同一辦公室所有 LED 燈之頻道設為'001'，不同辦公室便設為不同頻道，如此便可輕易地設定大量的 LED 燈。使用者可依據環境需求設定 LED 所屬區域，當 LED 燈設為同一區域後便會同步作動。



圖 8. 頻道設為'000'之 LED 燈

除了透過 LED 控制電路的 Dip Switch 來設定的各項參數外，也可透過手機 APP 來設定，如圖 9 所示：

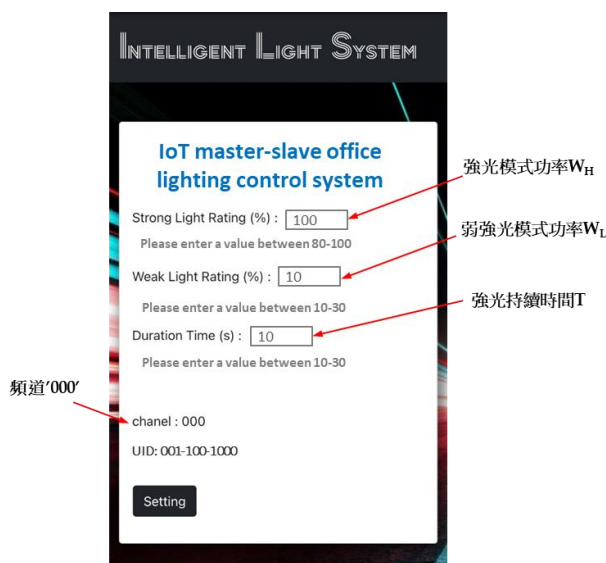


圖 9. APP 設定畫面

所提出的辦公室照明系統的 LED 燈主要之硬體元件如表 2 所示：

表 2. 主要之硬體元件

NO	名稱	說明
1	通訊模組	2.4G Wi-Fi Module
2	PIR 感測器	紅外線人體移動感測器
3	微控制器 (MCU)Arduino nano MCU	Controller with ATMEL Chip

四、節能計算與討論

所提出的辦公室照明系統的 LED 燈有強光模式與弱光模式之分，故在計算消耗電能時比較複雜，不像一般非感應 LED 燈單純。影響消耗電能因素有：人員出入辦公室的頻率、強光持續時間 T 、強光模式功率 W_H 、弱光模式功率 W_L 、有無連續觸發……等，為了方便導出公式，採用參考文獻[2],[48]的消耗電能計算方式，來計算每盞新型 LED 感應燈每小時、每年所消耗之電能，且與非感應 LED 燈相比較，來計算其節能率(ESR, Energy-Saving Rate)、節省的用電度數、節省的費用、減少的碳排放量等。最後以某公司為例，來試算其所有辦公室的總節省費用。

4.1 消耗電能與節能率之計算

圖 10 為新型 LED 感應燈每小時消耗功率曲線，利用此圖來說明如何計算新型 LED 感應燈「每小時所消耗之電能」：

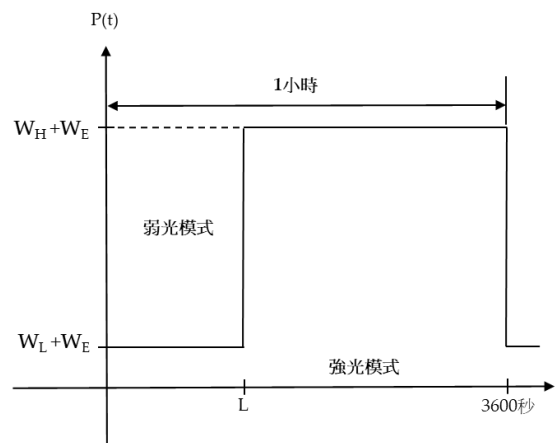


圖 10. 新型 LED 感應燈每小時消耗功率曲線

P(t)用來描繪有使用新型 LED 感應燈每小時消耗功率變化，其他參數之意義如下：

L：每盞 LED 燈每小時弱光模式累積之秒數

W_H：LED 燈強光模式之功率，本產品預設強光模式功率為 15W(預設值為 100%)

W_L：LED 燈弱光模式之功率，本產品預設弱光模式功率為 1.5W(預設值為 10%)

W_E：LED 燈之電路平均消耗功率(含控制電路與 PIR Sensor 之能耗)，本產品

W_E 值約為 1W

由圖 10 可知，使用新型 LED 感應燈在 1 小時中有 L 秒是維持啟動之狀態(累積總共 L 秒是弱光模式狀態，並不是 0~L 秒是弱光模式)，而有 3600-L 秒是維持強光模式狀態，故我們用計算面積之方式，便可計算出新型 LED 感應燈每小時所消耗之電能 E_{ph}：

$$\begin{aligned} E_{ph} &= \left(\int_0^L P(t) dt + \int_L^{3600} P(t) dt \right) J \\ &= \left(\int_0^L (W_L + W_E) dt + \int_L^{3600} (W_H + W_E) dt \right) J \\ &= (L \times (W_L + W_E) + (3600 - L) \times (W_H + W_E)) J \\ &= (L \times (W_L - W_H) + 3600 \times (W_H + W_E)) / \\ &3.6 \times 10^6 \text{ kw}\cdot\text{h} \end{aligned} \quad (1)$$

另外，我們假設某公司辦公室之新型 LED 感應燈每天開啟 10 小時，則一年總共開啟 10×365=3,650 小時，故每盞新型 LED 感應燈每年所消耗之電能 E_{py} 為：

$$E_{py} = \sum E_{ph} = 3,650 \times E_{ph} \text{ kw}\cdot\text{h} \quad (2)$$

相對於非感應 LED 燈，因為非感應 LED 燈永遠都是維持在啟動狀態，故其每盞 LED 燈每年所消耗之電能 F_{py} 為(其中 F_{ph} 為非感應 LED 燈每小時所消耗之電能)：

$$\begin{aligned} F_{py} &= \sum F_{ph} = 3,650 \times F_{ph} \text{ kw}\cdot\text{h} \\ &= 3,650 \times ((W_H + W_E)/1000) \\ &= 3.65 \times (W_H + W_E) \text{ kw}\cdot\text{h} \end{aligned} \quad (3)$$

接下來可以來計算，若將某公司所有辦公室之一般「非感應 LED 燈」，改為所提出的

辦公室照明系統的「新型 LED 感應燈」，則其節能率(ESR, Energy-Saving Rate)、每盞新型 LED 感應燈一年所節省的用電度數 D_{py}、一年所節省的費用 M_{py} (假設每度電費 4 NT\$)、一年所減少的碳排放量 C_{py} 分別計算如下(每一度電(Kw·h)可產生 0.623 kgCO₂e 的碳排放量)：

$$\begin{aligned} ESR &= (F_{ph} - E_{ph}) / F_{ph} \times 100\% \\ &= (((W_H + W_E)/1000) - E_{ph}) / ((W_H + W_E)/1000) \times 100\% \\ &= ((W_H + W_E) - 1000 \times E_{ph}) / (W_H + W_E) \times 100\% \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_{py} &= F_{py} - E_{py} \\ &= 3.65 \times ((W_H + W_E)) - 1000 \times E_{ph} \text{ kw}\cdot\text{h} \end{aligned} \quad (5)$$

$$M_{py} = (F_{py} - E_{py}) \text{ kw}\cdot\text{h} \times 4 \text{ dollar} / \text{kw}\cdot\text{h} \quad (6)$$

$$C_{py} = (F_{py} - E_{py}) \text{ kw}\cdot\text{h} \times 0.623 \text{ kgCO}_2\text{e} / \text{kw}\cdot\text{h} \quad (7)$$

4.2 節能率探討

由於使用新型 LED 感應燈的節能率(ESR, Energy-Saving Rate)跟每盞 LED 燈每小時弱光模式累積之秒數 L 密切相關，本節便是要探討「節能率 ESR」與「每小時弱光模式累積之秒數 L」二者之關係，並計算節能率的最大值與最小值。

首先，由方程式(4)可得知，「節能率」與「新型 LED 感應燈每小時所消耗之電能 E_{ph}」成反比，而從方程式(1)可得知，E_{ph} 是與 L 成反比(因為(W_L - W_H)一定是負的)，故由此可知，ESR 與 L 成正比關係，弱光模式累積之秒數越大則節能率越佳。

接下來，為了實際算出節能率，W_H、W_L 與 W_E 必須帶入實際的功率值，LED 燈強光模式之功率 W_H 為 15W，弱光模式之功率 W_L 為 1.5W，電路平均消耗功率 W_E 約為 1W。底下，我們將不同的 L 值帶入 E_{ph} 公式中，以計算出不同 L 值每盞新型 LED 感應燈的 E_{py}、ESR、D_{py}、M_{py}、C_{py} 值為何(與非感應 LED 燈來比較)，下表因篇幅之故僅列出重要部分(T 值間隔 120 秒列出)：

表 3. 不同 L 值每隻 LED 燈的 E_{ph}、E_{py}、ESR、D_{py}、M_{py}、C_{py} 值

L (Sec)	E _{ph} (kw·h)	E _{py} (kw·h)	ESR (%)	D _{py} (kw·h)	M _{py} (NT\$)	C _{py} (kgCO ₂ e)
0	0.0160	58.400	0.00%	0.000	0.000	0.000
120	0.0156	56.758	2.81%	1.643	6.570	1.023

240	0.0151	55.115	5.63%	3.285	13.140	2.047
360	0.0147	53.473	8.44%	4.928	19.710	3.070
480	0.0142	51.830	11.25%	6.570	26.280	4.093
600	0.0138	50.188	14.06%	8.213	32.850	5.116
720	0.0133	48.545	16.88%	9.855	39.420	6.140
840	0.0129	46.903	19.69%	11.498	45.990	7.163
960	0.0124	45.260	22.50%	13.140	52.560	8.186
1080	0.0120	43.618	25.31%	14.783	59.130	9.209
1200	0.0115	41.975	28.13%	16.425	65.700	10.233
1320	0.0111	40.333	30.94%	18.068	72.270	11.256
1440	0.0106	38.690	33.75%	19.710	78.840	12.279
1560	0.0102	37.048	36.56%	21.353	85.410	13.303
1680	0.0097	35.405	39.38%	22.995	91.980	14.326
1800	0.0093	33.763	42.19%	24.638	98.550	15.349
1920	0.0088	32.120	45.00%	26.280	105.120	16.372
2040	0.0084	30.478	47.81%	27.923	111.690	17.396
2160	0.0079	28.835	50.63%	29.565	118.260	18.419
2280	0.0075	27.193	53.44%	31.208	124.830	19.442
2400	0.0070	25.550	56.25%	32.850	131.400	20.466
2520	0.0066	23.908	59.06%	34.493	137.970	21.489
2640	0.0061	22.265	61.88%	36.135	144.540	22.512
2760	0.0057	20.623	64.69%	37.778	151.110	23.535
2880	0.0052	18.980	67.50%	39.420	157.680	24.559
3000	0.0048	17.338	70.31%	41.063	164.250	25.582
3120	0.0043	15.695	73.13%	42.705	170.820	26.605
3240	0.0039	14.053	75.94%	44.348	177.390	27.628
3360	0.0034	12.410	78.75%	45.990	183.960	28.652
3480	0.0030	10.768	81.56%	47.633	190.530	29.675
3600	0.0025	9.125	84.38%	49.275	197.100	30.698

由上表可知，節能率(ESR)的最大值 84.38%發生在 $L = 3600$ 時(表示 1 小時內新型 LED 感應燈都是弱光模式，也就是 1 小時內整間辦公室都沒人)，其他的 D_{py} 、 M_{py} 、 C_{py} 值也是如此，節能率在 L 值為零時最小(ESR=0%)，隨著 L 值增加呈線性上升，在 $L = 3600$ 秒時，節能率上升為 84.38%。下圖是將節能率(ESR)與 L 值的關係圖畫出：

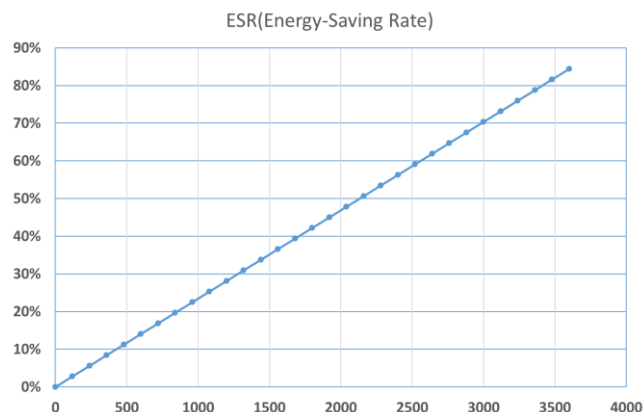


圖 11. ESR(Energy-Saving Rate)與 L 的關係圖

圖 11 中，ESR 為節能率， L 為每盞 LED 燈每小時弱光模式累積之秒數，2 者呈現線性關係，弱光模式累積之秒數越多則節能率越高(沒人在辦公室時才會以弱光模式運行，故會節省較多電能)。

本作品與其他系統之差異與優點如下：

1. 透過系統計數器與紅外線人體移動感測器(PIR Sensor)的協調運作，確認空間中無人存在時，才將室內全部 LED 燈一起轉為弱光模式，不會有誤判的情形
2. 可保留原燈座、不需佈線、不用架設伺服器，便可達到辦公室智慧照明的節能目的。
3. 可透過物聯網(IoT)來直接對 LED 燈進行參數設定。
4. 辦公空間無人時，會以弱光模式運行，不會在上班時間將辦公空間變為黑漆漆。
5. 以一般 15W T8 LED 燈管(非感應燈)為例，若將其替換為所提出的辦公室照明系統(假設辦公室每天開啟 10 小時照明，且每小時弱光模式的時間是 20 分鐘)，則其省電率高達 28.13%。

五、結論

本文提出了一種能源效率佳、易於安裝、無線、低成本的「主從式辦公室物聯網照明控制系統」，非常適合裝設於大型公司或工廠的辦公室，其透過系統計數器與紅外線人體移動感測器(PIR Sensor)的協調運作，確認空間中無人存在時，才將室內全部 LED 燈一起轉為弱光模式，不會有誤判的情形。可輕易地完成大型「智慧 LED 照明系統」的節能、方便控制等功能，讓人以為裝設了大型「智慧

LED 照明系統」，但卻只花費其 1/10 的價格，不須換原 LED 燈之燈座、不需佈線、不用架設伺服器，便可達到「智慧 LED 照明系統」的節能目的。

除了可透過物聯網(IoT)來直接對 LED 燈進行參數設定外，相對於一般的感應燈而言，在辦公空間無人時，所提出的辦公室照明系統會以弱光模式運行，不會在上班時間將辦公空間變為黑漆漆，以一般 15W T8 LED 燈管(非感應燈)為例，若將其替換為所提出的辦公室照明系統(假設辦公室每天開啟 10 小時照明，且每小時弱光模式的時間是 20 分鐘)，其省電率高達 28.13%。

另外，當系統計數器為 0，但辦公室中還有人存在時，若是存留在辦公室中的人員完全靜止不動，PIR Sensor 仍是無法感應，故未來我們會將策略做微調，增加一條「若計數器為 0，但 PIR Sensor 多次感應到辦公室仍有人存在時，強制將計數器改為 1」策略，如此便可解決目前的困境。

相對的，若 2 人肩並肩同時離開辦公室時，系統亦容易產生誤判，此時會出現室內已無人計數器卻未歸零的情況，反而無法啟動弱光模式進行省電。此為系統的盲點，因為顧及到有可能是辦公室中的人員在休息中，有可能完全靜止不動，故無法強制將計數器歸零。

參考文獻

- [1] C.-T. Lee, P.-T. Ho, Y.-Y. Lee, and L.-B. Chen, "A research on the 4th generation intelligent energy-saving solar water heating tank," *Electronics*, vol. 9, article 1941, Nov. 2020.
- [2] H.-M. Chu, C.-T. Lee, L.-B. Chen, and Y.-Y. Lee, "An expandable modular Internet of things (IoT)-based temperature control power extender," *Electronics*, vol. 10, article 565, Feb. 2021.
- [3] J.-C. Hsieh, D. T. W. Lin, and C.-H. Cheng, "Optimization of thermal management by integration of an SCGM, a finite-element method, and an experiment on a high-power LED array," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 58, no. 4, pp. 1141–1148, Apr. 2011.
- [4] N. L. Ploch et al., "Effective thermal management in ultraviolet lightemitting diodes with micro-LED arrays," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 60, no. 2, pp. 782–786, Feb. 2013.
- [5] H. Yang, T. C. W. Schenk, J. W. M. Bergmans, and A. Pandharipande, "Enhanced illumination sensing using multiple harmonics for LED lighting systems," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 58, no. 11, pp. 5508–5522, Nov. 2010.
- [6] M. A. Ozcelik, "Light sensor control for energy saving in DC grid smart LED lighting system based on PV system," *J. Optoelectron. Adv. Mater.*, vol. 18, pp. 468–474, 2016.
- [7] O. F. Farsakoglu and I. Atik, "Analysis of the factors affecting operation and efficiency of power LED drivers and circuit design," *Optoelectron. Adv. Mat.*, vol. 9, no. 11-12, pp. 1356-1361, Nov.-Dec. 2015.
- [8] H.-J. Chiu, Y.-K. Lo, J.-T. Chen, S.-J. Cheng, Y.-L. Chung, and S.-C. Mou, "A high-efficiency dimmable LED driver for low-power lighting applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 2, pp. 735-743, Feb. 2010.
- [9] M. Arias, D. G. Lamar, J. Sebastián, D. Balacco, and A. A. Diallo, "High-efficiency LED driver without electrolytic capacitor for street lighting," *IEEE Trans Ind. Appl.*, vol. 49, no. 1, pp. 127-137, Jan./Feb. 2013.
- [10] S. Li, H. Chen, S.-C. Tan, S.-Y. Hui, and E. Waffenschmidt, "Power flow analysis and critical design issues of retrofit light-emitting diode (LED) light bulb," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 7, pp. 3830-3840, Jul. 2015.
- [11] M. Magno, T. Polonelli, L. Benini, and E. Popovici, "A low cost, highly scalable wireless sensor network solution to achieve smart LED light control for green buildings," *IEEE Sensors J.*, vol. 15, no. 5, pp. 2963-2973, May 2015.
- [12] LEDinside. 2021 Global LED Lighting Market Outlook and Analysis of Opportunities and Challenges. Available online: <https://www.ledinside.com.tw/research/20210204-37172.html> (accessed on 24 July 2021).
- [13] D. Caicedo and A. Pandharipande, "Distributed illumination control with local sensing and actuation in networked lighting

- systems,” *IEEE Sensors J.*, vol. 13, no. 3, pp. 1092–1104, Mar. 2013.
- [14] J. Byun and T. Shin, “Design and implementation of an energy-saving lighting control system considering user satisfaction,” *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 64, no. 1, pp. 61–68, Feb. 2018. doi: 10.1109/TCE.2018.2812061.
- [15] S. Matta and S. M. Mahmud, “An intelligent light control system for power saving,” in *Proc. 36th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc. (IECON)*, Nov. 2010, pp. 3316–3321.
- [16] J. Lu, D. Birru, and K. Whitehouse, “Using simple light sensors to achieve smart daylight harvesting,” in *Proc. ACM Workshop Embedded Sens. Syst. Energy-Efficiency Building*, Zürich, Switzerland, 2010, pp. 73–78.
- [17] M. Erol-Kantarci and H. T. Mouftah, “Wireless sensor networks for cost-efficient residential energy management in the smart grid,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 2, no. 2, pp. 314–325, 2011.
- [18] Y.-W. Bai and Y.-T. Ku, “Automatic room light intensity detection and control using a microprocessor and light sensors,” in *Proc. 2008 IEEE International Symposium on Consumer Electronics (ISCE)*, 2008, pp. 1–4.
- [19] S. J. W. Tang, V. Kalavally, K. Y. Ng, C. P. Tan, and J. Parkkinen, “Real-time closed-loop color control of a multichannel luminaire using sensors onboard a mobile device,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 54751–54759, 2018. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2872320.
- [20] P. Elejoste, I. Angulo, A. Perallos, A. Chertudi, I. J. G. Zuazola, A. Moreno, L. Azpilicueta, J. J. Astrain, F. Falcone, and J. Villadangos, “An easy to deploy street light control system based on wireless communication and LED technology,” *Sensors*, vol. 13, 6492–6523, 2013. <https://doi.org/10.3390/s130506492>.
- [21] J. Byun, I. Hong, B. Lee, and S. Park, “Intelligent household LED lighting system considering energy efficiency and user satisfaction,” *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 59, no. 1, pp. 70–76, 2013.
- [22] F.J. Bellido-Outeirino, J.M. Flores-Arias, F. Domingo-Perez, A. Gil-de-Castro, and A. Moreno-Munoz, “Building lighting automation through the integration of DALI with wireless sensor networks,” *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 58, no. 1, pp. 47–52, Feb. 2012.
- [23] M.-S. Pan, L.-W. Yeh, Y.-A. Chen, Y.-H. Lin, and Y.-C. Tseng, “A WSN-based intelligent light control system considering user activities and profiles,” *IEEE Sensors J.*, vol. 8, no. 10, pp. 1710–1721, Oct. 2008.
- [24] A. Pandharipande and D. Caicedo, “Daylight integrated illumination control of LED systems based on enhanced presence sensing,” *Energy Build.*, vol. 43, no. 4, pp. 944–950, Apr. 2011.
- [25] T.-J. Park and S.-H. Hong, “Experimental case study of a BACnet-based lighting control system,” *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 6, no. 2, pp. 322–333, Apr. 2009.
- [26] Y. Uhm, I. Hong, G. Kim, B. Lee, and S. Park, “Design and implementation of power-aware LED light enabler with location-aware adaptive middleware and context-aware user pattern,” *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 56, no. 1, pp. 231–239, Feb. 2010.
- [27] J. Zhang and H.-J. Kim, “Design of smart LED lighting switch with learning user’s light controlling pattern,” in *Proc. Int. Conf. ICT Converg.*, Seoul, South Korea, Sep. 2011, pp. 656–657.
- [28] S. Bhardwaj, T. Ozcelebi, R. Verhoeven, and J. Lukkien, “Smart indoor solid-state lighting based on a novel illumination model and implementation,” *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 57, no. 4, pp. 1612–1621, 2011.
- [29] Y. S. Cho, J. Kwon, S. Choi, and D.-H. Park, “Development of smart LED lighting system using multisensor module and Bluetooth low energy technology,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Sens. Commun. Netw.*, Singapore, Jun. 2014, pp. 191–193.
- [30] T. Torfs, et al., “Low power wireless sensor network for building monitoring,” *IEEE Sensors J.*, vol. 13, no. 3, pp. 909–915, Mar. 2013.
- [31] M. Magno, D. Boyle, D. Brunelli, E. Popovici, and L. Benini, “Ensuring

- survivability of resource-intensive sensor networks through ultralow power overlays,” *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 10, no. 2, pp. 946–956, May 2014.
- [32] M. Magno, N. Jackson, A. Mathewson, L. Benini, and E. Popovici, “Combination of hybrid energy harvesters with MEMS piezoelectric and nano-Watt radio wake up to extend lifetime of system for wireless sensor nodes,” in *Proc. 26th Int. Conf. Archit. Comput. Syst. (ARCS)*, Feb. 2013, pp. 1-6.
- [33] S. D. T. Kelly, N. K. Suryadevara, and S. C. Mukhopadhyay, “Toward the implementation of IoT for environmental condition monitoring in homes,” *IEEE Sensors J.*, vol. 13, no. 10, pp. 3846–3853, Oct. 2013.
- [34] V. Singhvi, A. Krause, C. Guestrin, J. H. Garrett, Jr., and H. S. Matthews, “Intelligent light control using sensor networks,” in *Proc. ACM Int. Conf. Embedded Netw. Sensor Syst. (SenSys)*, San Diego, CA, USA, Nov. 2005, pp. 218-229.
- [35] F. O’Reilly and J. Buckley, “Use of wireless sensor networks for fluorescent lighting control with daylight substitution,” in *Proc. Workshop Real-World Wireless Sensor Netw. (REANWSN)*, Stockholm, Sweden, Jun. 2005.
- [36] C. Bae, J. Yoo, K. Kang, Y. Choe, and J. Lee, “Home server for home digital service environments,” *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 49, no. 4, pp. 1129-1135, Nov. 2003.
- [37] A. Z. Alkar and U. Buhur, “An internet based wireless home automation system for multifunctional devices,” *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 51, no. 4, pp. 1169-1174, Nov. 2005.
- [38] Y.-P. Tsou, J.-W. Hsieh, C.-T. Lin, and C.-Y. Chen, “Building a remote supervisory control network system for smart home applications,” in *Proc. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics\ (ICSMC '06)*, vol. 3, pp. 1826-1830, Oct. 2006.
- [39] A. R. Al-Ali and M. Al-Rousan, “Java-based home automation system,” *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 50, no. 2, pp.498-504, May 2004.
- [40] C.-H. Lien, C.-H. Lin, Y.-W. Bai, M.-F. Liu, and M.-B. Lin, “Remotely controllable outlet system for home power management,” in *Proc. IEEE Tenth International Symposium on Consumer Electronics (ISCE)*, 2006, pp. 7-12.
- [41] A. Alheraish, “Design and implementation of home automation system,” *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 50, no. 4, pp.1087-1092, Nov. 2004.
- [42] Z. Kaleem, “Energy efficient outdoor light monitoring and control architecture using embedded system,” *IEEE Embedded Systems Letters*, vol. 8, no. 1, pp. 18-21, 2015.
- [43] L. Wang, “Home intelligent lighting control system based on wireless sensor,” *Journal of Engineering, Design and Technology*, vol. 18, no. 5, pp. 1231-1240, 2020. <https://doi.org/10.1108/JEDT-07-2019-0187>.
- [44] R. Perkasa, R. Wahyuni, R. Melyanti, Herianto, and Y. Irawan, “Light control using human body temperature based on Arduino Uno and PIR (Passive Infrared Receiver) Sensor,” *Journal of Robotics and Control (JRC)*, vol. 2, no. 4, pp. 307-310, Jul. 2021. doi: <https://doi.org/10.18196/jrc.2497>
- [45] U. Lestari, E. Fatkhiyah, and A. F. Prakoso, “Application of home light control system using Arduino with mobile based Wifi media,” *International Journal of Information System and Computer Science (IJISCS)*, vol. 2.2, pp. 67-75, 2019.
- [46] R. Wahyuni and Y. Irawan, “Web-based employee performance assessment system in PT. Wifiku Indonesia,” *Journal of Applied Engineering and Technological Science (JAETS)*, vol. 1.2, pp. 60-69, 2020.
- [47] R. R. Mohamed, M. A Mohamed, K. Azmi, E. Rao, and W. Hashim, “Indoor smart lighting controlling using human detection,” *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, vol. 9, no. 1.1, pp. 566-570, 2020.
- [48] C.-T. Lee and P.-T. Ho, “Energy-saving research on new type of LED sensor lamp with low-light mode,” *Electronics*, vol. 9, article 1649, 2020.