

太陽集光器結合人工光源之室內照明應用

張謙允* 黎倩如** 鄭哲瑋***

中原大學室內設計系

* cychris@hotmail.com

** kidult520@gmail.com

*** awenger@pchome.com.tw

摘要

以太陽集光器結合人工光源之室內照明方式，非常適合高日照率的台灣，但國內鮮少有相關研究。為掌握其應用考量，本研究於一 1.33 坪實驗室暗房之屋頂架設一組追日型透鏡式太陽光集光器，使其以二組 20 公尺光纖燈具照射暗房。於二階段的實驗過程中，暗房內搭配二種人工光源（螢光燈及 PAR 燈），以及自動化控制軟、硬體，組成維持室內桌面 600 lux 照度之自動化室內照明節能應用系統。經一年餘之資料蒐集及應用觀察，發現其節能效率以夏季最高，秋季次之，冬季較差。七月份的節能效率最高，可達 44%；縱使是冬季，仍有高達約 20% 之效率。平均每日最高節能約 2422W，一個月可以節省 248 元。除此，可知即使光纖燈具的效率會受到天候左右，其節能效率從季節上來比較是可排除天候因素的影響。

關鍵詞：太陽光、光纖、室內照明、節能

論文引用：張謙允、黎倩如、鄭哲瑋（2011）。太陽集光器結合人工光源之室內照明應用。

設計學報，16（2），45-60。

一、前言

太陽光這種免費的光源，是人類自古以來應用最多的照明光源。今日我們深信太陽光不但能如此創造有特殊品質的光環境、滿足人對自然光的生理與心理上的需求、節約消耗性能源、也知它是穩定的綠色能源。但如何將之有效率地用在建築物內，是隨著科技技術的成長及設計創意長時期被探討的主題（彭巧綾，2005；黃耀德，2006；林建憲等人，2007；邱瑞隆、曾國雄、邱彥鈞，2008）。雖然太陽光給人最舒服的照明，卻因其不斷變化的強弱，帶給室內光環境一些困擾。尤其工作面照度（如桌面或牆面的照度），需要維持一定範圍時，人眼多半不能接受太大的瞬間照度變化。為專心工作，固定的照度或人工光源反而成為人們逐漸偏好的光環境。再者，室內場所本就有不少範圍無法接受到任何直接或間接進來的日光，雖以人工光源取代，也造成人們無法直接接觸太陽光之缺失。然，即使在陽光不強的日子或陰天，其戶外光線仍然比室內充足，如果能將晝光引進室內，可以充份利用自然資源達到節能的目標。建築設計可運用直射或反射的方式，讓戶外光線進入採光井（light shaft）、採光罩、有頂罩中庭、天窗等屬於被動節能的建築設計方法。相較之下，主動的方法，則於開窗之外，額外加上收集戶外光線的機械及光學

設備，不過由於需要額外的設備經費及技術，這些方法在室內設計的應用並不普及。此外，不論採光、導光或光能轉換，對高密度的都會區建築而言，都得付出很高的代價。因為都會空間狹窄及價格高昂，尤其是大型公共場所，如車站、購物中心、停車場，只好延伸到地底下暗無天日的室內空間中。這些場所如要使用太陽光，須倚賴大量的太陽能板、裝置空間及儲電裝置，或者要大面積屋頂、牆面開口，接收陽光。相較之下，佔據較少空間並且維護費用少的「太陽光集光系統」(solar light collection system)，具連接光纖導光入室內之特性有令人耳目一新的功效，值得掌握其特性以檢視其於室內照明節能的優劣。加上台灣的日照率高，可充分應用並加以探究。基於此，本研究有以下二個研究目的：

1. 提出太陽光集光器搭配自動化調光燈具之方法。
2. 探討光纖燈具結合人工光源之節能效率。

二、太陽光節能照明系統

所謂的太陽光集光，理論上包括收集晝光(白天的光線，daylight，或稱日光，是日光及陽光的總稱)、及直射的陽光(unblocked sunlight)。根據李麗玲、黃耀德、潘耀徽(2004)定義，「晝光就是漫射光或天穹反射光。當雲層完全遮住太陽，陽光照射到雲層上，再漫射到地面……意指太陽直射光。」目前一些運用太陽光的探討(Gugliermetti & Gringnaffini, 2001; Molteni, Courret, Paule, Michel, & Scartezzini, 2001; Leslie, Raghavan, Howlett, & Eaton, 2005; Schirber, 2005; Al-Marwaee & Carter, 2006a)，主要分成被動式採光設計(passive light harvesting system)，使建築物接受直射或反射方式讓室內場所獲得陽光；或附加「太陽方位追蹤器」(heliostat)之主動式收集陽光系統(active systems with heliostat)。前者使用的包括屋頂天窗、天井、反射鏡開窗、採光通道等屬於建築構件設計範圍。後者則是較新、較少被探討的主題，因在技術上需要克服導光材質的導光率、光線集中及反射之光學，以及整合陽光追蹤器及陽光凝聚與擴散等光學、機械構造問題，與建築或室內設計距離較遠。依照Steris(2004)分類，集光器可分為兩大類：定日型集光器(stationary collector)以及追日型集光器(sun tracking collector)。另外，依據光線進入室內的方式，集光器可區分成濃縮型集光(concentrating collector)及非濃縮型集光(non-concentrating collector)。至於濃縮集中之目的，則在於設法以聚光方式集中光線使之增強、增加傳送的距離，需要的設備經費較高。最後，還有利用直射及反射法，使光線於特定時間到達室內特定位置。將光線反射的原理延伸，如下頁圖1中將陽光以「潛望鏡原理」，逐步反射至更廣的範圍，所需的只是面積較大、數量較多的鏡子或反射材料，以及等待陽光照射過來的時刻。例如圖2之Anidolic集光設備，可在特定時段內利用外牆面裝置的反射原理，以增加室內之日光照射量。至於更積極的方法，則如圖3之Lightron追日型集光器結合「太陽方位追蹤器」，不需等待陽光何時照來，即可運用的戶外漫射光由屋頂往下反射進屋內。

Anidolic集光設備為確保能多角度有效收集室外漫射陽光，此裝置需置於外牆窗戶上方，開啟半圓狀開口、口端加裝雙層玻璃面向天空收集陽光。所收集之光線反射進入塗滿高反射性光學塗料之光導管，於房間投射端投射下來(Scartezzini & Courret, 2002)；相對地，Lightron集光系統則多半設於屋頂上，利用潛望鏡反射原理，往下垂直或水平方向傳送至其他反射鏡或光線投射器。然而，以上兩種集光法掌握陽光直射的時段不長，反射鏡一旦偏離直射陽光照射的角度，只能收集漫射日光，光強度較弱。比較之下，具有追日機制、完全掌握直射陽光的活動式光纖集光，可較有效率地同時改善上述二者的缺失。

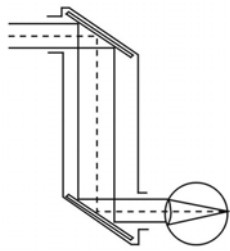


圖 1. 潛望鏡原理

(資料來源：維基百科，2009, p. 1)

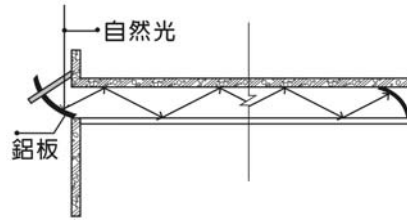


圖 2. Anidolic 集光系統

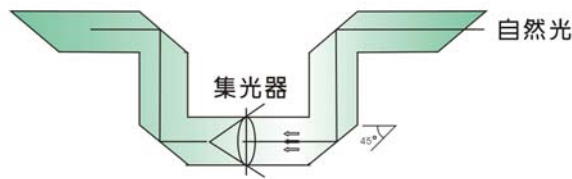


圖 3. Lightron 反射鏡示意圖

自 2000 年以來，各國發展出來的追日型光纖集光系統，計有四種。其中三種採壓克力材質菲涅爾透鏡集光 (Fresnel Lens)，如圖 4-圖 6，一種使用反射鏡，參考圖 7。直射陽光的能量大，如凹面鏡聚焦方式加以集中，能產生高亮度的光束。同理，可以用透鏡「濃縮」(concentrate) 大量光線，集中到光纖開端，藉著導管細小、隨處伸展之特性，傳遞陽光進入室內。經照射的光纖因管徑小，所以可在任一點穿過建築物的結構，並於 20~50 公尺外的另一端將日光投射至室內指定位置。因此，相較於 Anidolic 及 Lightron 類系統的導光通道，光纖導光不需要佔用空間的光通道，僅以細小線徑替代，可說是較有效率的系統。但不論採用何種系統，顧及陰雨天無陽光的日子，集光系統都要搭配人工光源達到節能之目的。

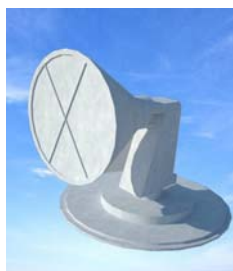
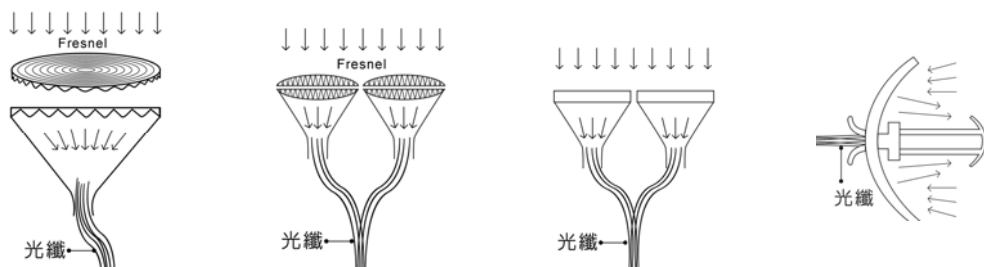


圖 4. 德國集光器系統



圖 5. 日本集光器系統



圖 6. 中國大陸集光系統



圖 7. 美國集光器系統

表 1. 四種集光器之比較表

項目	國別 德國系統 (UFO, Lightron)	美國系統 (HSL)	大陸系統 (Pookin)	日本系統 (Himawari)
體積	最大	大	中	大、中、小
成本*	最昂貴 USD 1,585,500-	偏貴 USD40,000-	中等 USD20,000-	最便宜 (此為小型價格) USD18,460-
追日功能	有	有	有	有
集光原理	直射 利用稜鏡原理	反射 拋物鏡面做二次反射	直射 利用稜鏡原理	直射 利用稜鏡原理
主要集光構件	直徑100公分 菲涅爾光學透鏡 (Fresnel Lens)	直徑121.92公分 之拋物線高反射性圓型 反射金屬碟 (the primary mirror)	每片直徑40公分 菲涅爾光學透鏡 (Fresnel Lens)	每片直徑9.5公分 菲涅爾光學透鏡 (Fresnel Lens)
結構	其裝置可概略分為 太陽方位追蹤器、垂 直及水平自動旋轉 軸、100cm直徑之平 面式菲涅爾光學透 鏡、第二片吸熱透 鏡、壓克力保護罩、 以及液態光纖。	具有衛星定位微處理 器，120cm直徑之拋物線 高反射性金屬碟、驅動 馬達、垂直及水平旋轉 軸、光電池、吸熱反射 鏡、塑膠導光光纖 (plastic optical fiber) 集 中接受反射光線。	系統採用400 mm菲 涅爾透鏡一到三片 不等、外加著壓克力 材質保護罩。太陽方 位自動追蹤器感應 器、太陽位置微處理 計算器、以及石英光 纖。	架構上具有太陽方 位自動追蹤器感應 器、太陽位置微處理 計算器、有兩個旋轉 軌道、驅動馬達、菲 涅爾凸透鏡以及第 二片吸熱透鏡、石英 光纖。
光導材質	液狀光導纜線 (liquid FO cable)	塑膠光纖 (the plastic optical fibre)	石英光纖 (glass optical fiber)	石英光纖 (glass optical fiber)
傳輸距離	15M時70%的亮度	1300M時，50%	最多可傳至50M	200m，可達99%
光損失	每一公尺約2%	每一公尺約0.03%	每公尺約6%	每一公尺約0.49%
應用於 室內照明 之缺點	光損失率為目前集 光器中售價與光損 失最高，且最占空間 之集光器。	集光器為開放碟型面， 長期維護不易且體積 大。	無法提供穩定 工作面照度。	無法提供穩定 工作面照度。

*本價格以目前官方公布之最小型系統售價為標準（資料來源：本研究整理）

進一步比較三種透鏡式集光的菲涅爾透鏡 (Fresnel lens)，可知規模有大有小，如表 1 所示 (UFO: 直徑 100cm；HSL:直徑 121.92cm；POOKIN: 直徑 40cm；HIMAWARI:直徑 9.5cm)，大者直徑約 100 公分，其設計者認為欲獲得較大量陽光，需要大口徑透鏡 (Wilson et al., 2002)，如 Universal Fiber Optic System (UFO) 系統照射一整束液芯光纖 (liquid light guide，如圖 4，傳送日光可深達 30m 而幾無損耗。中型尺度如 Pookin 系統，如圖 6，使用 1~3 片透鏡(約直徑 30 公分)，連接塑膠材質光纖，可產生 14,000 流明 (luminous flux, lm) 發光量，相當於 4.2 組 20W (Watt) T8×4 螢光燈之發光量。小者 (9.5 公分) 如 Himawari 系統，如圖 5，可利用 6、12、36 至 198 個透鏡，分別照射一小束石英玻璃材質光纖。另外，四種不同集光系統的發光量比較中，依據 Wilson 的測試，UFO 系統可發出 15,000 流明 (相當於 4.5 組 20W T8×4 螢光燈之發光量)，提供 15 m²房間 400 lux 之平均照度。小者，依據 Andre & Jutta (2002) 的測試，Himawari 系統每條光纖可傳導近 1,630 lux 的光線到達深約 200m 遠的距離。並且當戶外陽光的照度達 98,000 lux 時，一組光纖燈具可使 2m 距離的桌面獲得 420 lux 的平均照度。不過以閱讀寫字之工作照度，必須有 500~800 lux 之要求，則不夠。依據照明學教師石曉尉 (2007)，人眼最舒適的閱讀基本照

度為 350lux；國內公共工程採購之國中小，以致於大學教室的照明設施採購驗收標準皆為 500 lux，少數設定 600 lux，因為牽涉經費之多寡。以 600 lux 為最低標準，係針對大量使用眼睛於工作之照明需求。而唯一採用反射鏡的 HSL 系統，參考圖 7，則使用 120 公分直徑之拋物線金屬碟，將反射光線聚焦於 8 條各為 1.8cm 的塑膠材質光纖。以體積而論，UFO 及 HSL 系統採用較大集光焦距，於安裝及動態運轉時，需要較大的活動空間；小型 Himawari 及 Pookin 系統由於採用小鏡片，佔用空間少，可靈活運用。最後，從經濟（UFO: USD1,585,500；HSL: USD40,000；POOKIN: USD20,000；HIMAWARI: USD18,460）與應用性以比較四種太陽光集光系統，得知目前最經濟並且不占空間之選擇，為 Himawari 六組透鏡系統及 Pookin 單一鏡片光纖集光系統，其餘皆屬大型、費用昂貴之產品，非民眾可能運用之對象。台灣之春、夏日，扣除下雨的日子，由南到北都有直射陽光，在日射量的年變化方面，台灣的日射量在夏季七月達最高峰，冬季的十二月及一月份最低（徐明同、陳正改、林蘭貞，1975），尤其是夏季需要大量冷氣用電的季節，其用電量恰與太陽日照量成正比（黃秉鈞，1997），非常適合應用這類太陽光集光方式的節能照明。

三、研究方法

為探究相關問題，本研究採購一組上述系統比較中，體積最小、價格最低之 Himawari 集光器，架設於實驗室三樓屋頂，使光纖以 20m 距離傳送陽光至實驗室中，以量測其照明設計參數，推算其照明效率。用於實驗的房間，長 1.8m × 2.4m 之長方形暗房（如圖 8），樓層淨高 3.45m（如圖 9）。為搭配照度量測及燈具更換方便性，選擇離地坪 3.0m 高度搭設 60cm × 60cm 輕鋼架白色礦纖系統天花板（如圖 10），以量測 2m 投光距離之桌面及地面照度分佈（如圖 11）。牆面及門面平整漆上平光乳膠漆，地面則平鋪平光 PVC 塑膠拼花地磚，以使室內光線有較高的反射率（刷漆前後之反射率為 0.55/0.75）。

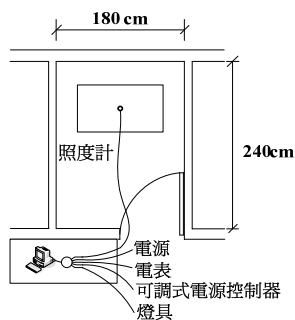


圖 8. 實驗室平面配置圖

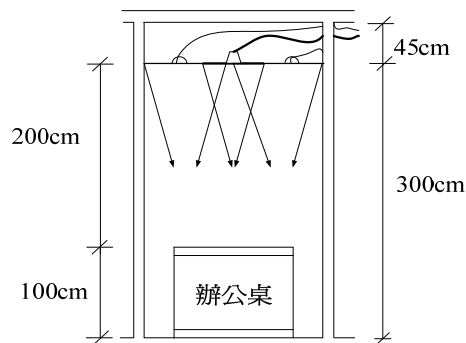


圖 9. 實驗室剖面圖

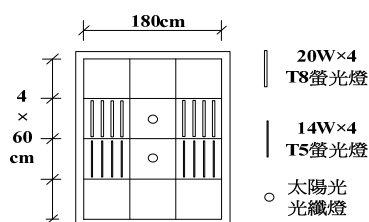


圖 10. 實驗室天花板燈具配置圖



圖 11. 實驗室照度計及光纖燈具投光

雖然光纖傳導進入室內的光線為陽光，在室內是否適用於閱讀、辦公工作猶未得知，可先探討其與室內燈具結合的可行性、照明參數、照度分佈等問題。畢竟人們多已習於在太陽光下進行戶外活動，變成燈具的光源倒是缺乏經驗，值得進一步探討。比較基礎的問題反而是找到系統運轉的恰當方法，使之成為用之不盡的能源，有效率地滿足室內照明的需求。為此，實驗分成二個階段，分別採用螢光燈及 PAR 燈 (parabolic aluminized reflector light) 搭配同一組集光器 (含有二組太陽光光纖燈具) 以比較適用性。第一、二階段分別於 2007 年 10 至 11 月份與 2008 年 6 到 12 月進行。台灣北部 (桃園地區) 日照約始於早上 6 點。直射陽光至少需要 30,000 lux 方能啟動集光器；下午則於 4:30 左右陽光減弱，集光器停止運轉。實驗裝置包括了：

1. 輕鋼架明架礦纖天花板。
2. 兩組太陽光 (光纖) 燈具。
3. 兩種可調光 (dimnable) 輕鋼架嵌入型螢光燈 220V T8 燈管 20W×4；220V T5 燈管 14W×4。
4. 不斷電、每分鐘傳遞訊號給電腦之照度計。
5. 不斷電、隨時傳遞訊號給電腦之可調式電源控制器 (Lite-puter EDX-610)。
6. 不斷電、監控燈具用電參數 (功率、功因數、電流、電壓) 並傳遞訊號給多功能電表。
7. 整合上述所有訊號，並自動儲存所需參數之電腦與其控制軟體。
8. 可調整高度之 70cm×120cm 平台。
9. 可同時整合燈具用電量、照度計量測值、智慧型調光器等訊號之介面卡。
10. 人工量測戶外陽光照度、光纖燈具之室內照度、桌面照度分佈，以及節能狀況。

為了顧及研究信度，燈具及所有儀器設備皆使用新品，儀器也先經過工研院量測中心校正；調整桌面與天花板、牆壁距離則倚賴手持式紅外線測距計 (2006 年 Leica DISTO A3)；實驗室則為全暗暗房。此階段採用 T-bar 螢光燈具之原因，係因此種燈具可加裝調光器，光通量輸出面積廣，成漫射狀，適用於 2m 距離之照明。其次，T8 或 T5 燈管之發光效率 (efficacy, lm/W) 高，可獲得介於 50 lm/W~80 lm/W 間之節能效果，視廠牌而定。這些燈具兩兩相鄰配置，係為方便進行不同燈具分開量測，比較耗能差異及共同量測切換之考量 (如圖 10)。以這些燈具搭配光纖燈具，可使室內照明兼顧聚焦型及漫射型二種照明型態，提供充分的桌面及牆面照明。相較之下，高壓氣體放電燈，如複金屬燈、高壓鈉燈，雖有較高的發光效率 (約 80~120 lm/W)，以較長距離投光為主，無法連接調光器，不適用於此。第一階段提出螢光燈具及太陽光光纖燈具的節能照明系統 (如圖 12)，蒐集了 2007 年 10~11 月份有直射陽光的輔助照明實驗資料。其目的在於執行前導性實驗，據以掌握此種實驗性系統未來長期 (例如一整年) 使用的節能情形，以及系統運轉可能產生的問題。其每日之執行過程包括如下：

1. 於電腦視窗設定早上 6 點至下午 5 點照射至桌面正中央之照度計。照度計設定成每分鐘擷取 1 次照度值，並限其超過 600±50 lux 時，由 0%~100% 逐漸啟動安裝於太陽光光纖燈具旁之螢光燈具，使桌面照度始終維持於 550~650 lux 之間。
2. 先以一組太陽光光纖燈具下照 (down lighting) 正下方之桌面，其左右各搭配一組可調光式 220V T8 40W×4 T-bar 輕鋼架，嵌入形下照螢光燈組，收集數日桌面照度分佈以及節能資料。
3. T8 資料蒐集完成後，另以一組太陽光光纖燈具下照 (down lighting) 正下方之桌面，其左右各搭配一組可調光式 220V T5 14W×4 T-bar 輕鋼架嵌入形下照螢光燈組，收集數日之桌面照度分佈及節能資料。

4. 再以上述二種螢光燈具，合計四組 T-bar，結合二組太陽光光纖燈具同時照射至實驗室中央的桌面（如圖 13 及圖 14），收集數日之桌面照度分佈（如圖 15），以及節能資料。
5. 記錄無太陽光情況下，兩盞 T8、兩盞 T5、及四組 T-bar 之照度及用電資料，以代表最大耗能值。
6. 記錄全天陽光充足之人工光源用電量，以代表最低耗能值。
7. 以 Microsoft Excel 軟體計算用電資料，並繪製照度及耗能曲線圖。
8. 測量不同時段之戶外太陽光及太陽光光纖燈具投光照度。

由於陽光會受空中雲層遮擋，引進室內的陽光強度是隨機變化的，所以連接的光纖燈具並無法維持穩定的照明。當戶外照度為 110,000~118,000lux 時，太陽光光纖燈具能提供的最大照度為 650~755 lux；戶外照度降為 50,000~80,000 lux 時，該燈具提供的最大照度降為 20~200 lux。使用一組太陽光光纖燈具可以提供工作面超過 600 lux 的有效照度並維持 4 個小時；使用 2 組太陽光光纖燈具可以提供工作面超過 600 lux 的有效照度並維持 6 個小時。

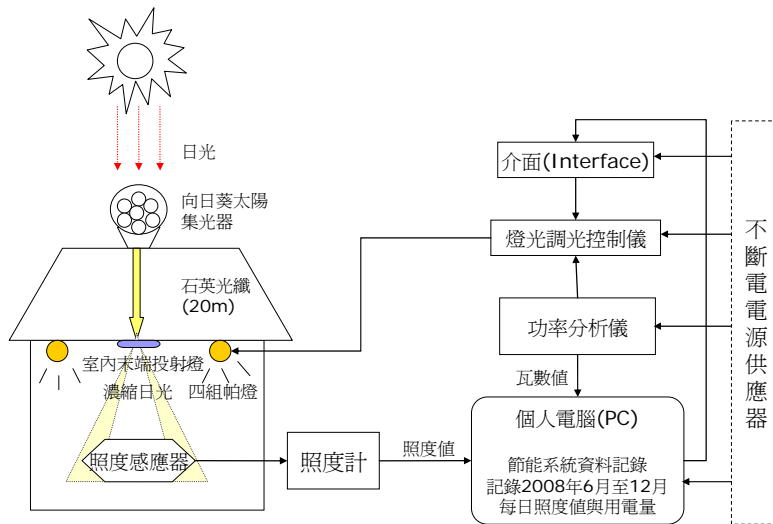


圖 12. 太陽光節能照明系統架構圖



圖 13. 螢光燈具太陽光光纖同時投光



圖 14. 僅太陽光光纖投光

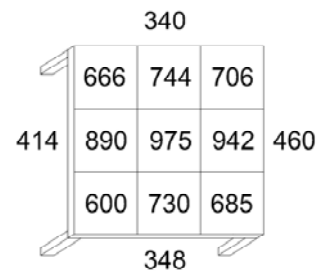


圖 15. 早上 10 點桌面及地面之光纖照度分佈

四、資料分析

在第一階段實驗裡（2007 年 10 月起），經過 37 天的資料蒐集，可分析研究目的所關連的問題。基本上，在陽光充足的日子（如地面照度照度大於 30,000 lux），6:30~16:30 之間可讓光纖燈具射出陽光，強弱不同而已（如室內照度介於 10~1000 lux）。早上 7:00 以後，無法使集光器開始啟動。8:00 以後直射陽光若超過 30,000 lux，室內光纖燈具開始產生投光，使實驗室桌面開始有十位數的照度值。在雲層干擾較少的狀況下，陽光的照度值會穩定增加；風大的日子，雲層飄動快速，陽光的強度逐漸增加而產生劇烈變化。因此，8:30~11:00 及 13:30~14:30 這兩個時段的照度，介於 80,000~100,000 lux。中午前後一小時之間，是最強陽光發生之時段，此時戶外平均照度為 11,550lux，可使一組光纖燈具於 2m 距離下得到至少 650~700 lux 之照度。然而，16:30 之後，對集光器的直射陽光可說已經消失，而無法達到有效的節能。總計一天可用的直射光約有 6~8 個小時。

如表 2 所示，僅依賴光纖投光的情況下，1 組光纖燈具僅能提供超過 600 lux 3 個小時的有效工作面照度（11:00~14:00）；同時使用 2 組光纖燈具時，則有效照度可增加至 6 個小時（10:00~16:00）。在其他時段中，則需要輔助光源使工作面的照度維持 600 lux。

再者，此集光系統之石英玻璃光纖，投光至桌面時其中心照度較低，距離中心 30cm~40cm 之內的光環反而有最大的照度值。其光線色彩由中心至周遭呈現白、黃、淺藍之可目視辨別之色環，如圖 16、圖 17。此外，因為實驗中採用的燈具為圓錐狀嵌燈，光纖末端固定於錐體燈具之頂端；底座直徑開口 13cm，高度 9cm。這種燈具發射出約 60° 截光角（cut-off angle）之光線，於 2m 處的投光寬度可達 2.4m 直徑範圍；於牆面則可照射到實驗室 1.5m 以下高度，房間上部較暗。以這種燈具投光並非均勻，其垂直面向桌面的圓形照度分佈如表 3 所列。由之可知，若欲於 2m 距離桌面獲得至少 600 lux 的照度，以照度可以相加的原則而言，至少需使兩組光纖燈具之中心距離相距 80cm。

表 2. 不同時段的戶外照度與光纖燈具提供工作面照度

時段	照度值	戶外照度值 (lux)	一組光纖燈具照度值 (lux)	二組光纖燈具照度值 (lux)
6:00~7:00		10,000~20,000	undetectable	undetectable
7:00~8:00		20,000~50,000	10~20	10~20
8:00~9:00		50,000~83,000	20~200	0~600
9:00~10:00		83,000~92,000	200~400	500~800
10:00~11:00		92,000~110,000	400~650	800~975
11:00~12:00		110,000~115,700	600~685	900~1,020
12:00~13:00		110,000~118,000	600~755	900~1,020
13:00~14:00		110,000~115,700	600~685	800~1,020
14:00~15:00		110,000~115,500	400~650	800~1,000
15:00~16:00		80,000~110,000	200~400	600~800
16:00~17:00		20,000~35,000	20~200	200~300
17:00~18:00		10,000~20,000	undetectable	undetectable

表 3. 一組太陽光燈具（光纖）之垂直照度分佈

垂直距離 半徑	50 cm	100 cm	150 cm	200 cm
中央	6,850 lux	1,800~3,150 lux	770~1,825 lux	770~1,825 lux
40 cm	150 lux	1,020~1,920 lux	730~880 lux	730~880 lux
50 cm	93 lux	500~86 lux	554~650 lux	554~650 lux
60 cm	61 lux	131~60 lux	407~355 lux	407~355 lux
70 cm	48 lux	57~110 lux	125~300 lux	125~300 lux
80 cm	33 lux	50~80 lux	55~120 lux	55~120 lux
90 cm	10 lux	46~70 lux	44~65 lux	44~65 lux



圖 16. 一組光纖燈具傍晚時段之發光

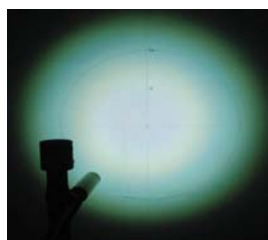


圖 17. 光纖燈具的投光形狀

24-Oct耗電量曲線圖

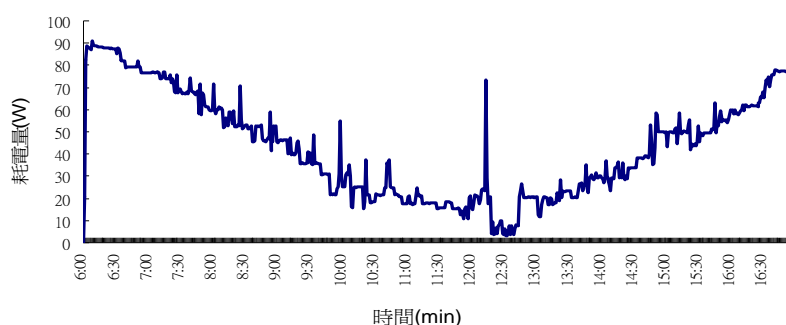


圖 18. 10 月 24 日中兩組 T8 燈具與一組光纖之耗能

因此接著進行 T5 與 T8 四組螢光燈同時與兩組光纖燈具之實驗。四組螢光燈具同時開啟後，二組光纖燈具大量增加了桌面照度，雖較只有二組螢光燈具同時開啟需要更多的供電，卻減少了需要點亮螢光燈的時機，進而得以省下更多的電。經過實測，如表 2 所示，得知有陽光的日子，太陽開始升空，產生約有 30,000lux 的地面照度時，可使光纖燈具微亮，傳遞少許陽光進入室內。早上 8:00 左右，陽光的地面照度開始攀升，由 50,000lux 開始增加，達 60,000lux 左右時，實驗室中可充滿大量陽光，整個桌面照度超過 600 lux；中央部位多者甚至達 1,240 lux。以 11 月 14 日為例，圖 19 與圖 20 為四組螢光燈具加上兩組光纖燈具的照度及耗能情形。由圖可知，戶外照度超過 60,000lux 時，即可以兩組光纖的陽光完全取代螢光燈。總計這段節能的時間有約 6~7 個鐘頭左右的長度，可省下四組螢光燈的用電，每天約可節省 769.79Whr (約 0.77 度) 的用電。改以 11 月 14 日的 965.5W 最高節能計，估計一年約節省 210 度用電。對於 1.33 坪的暗房來說，大約早上 8:00 至下午 3:00 多可享有 600~1,020 lux 的桌面照度；150~300 lux 的牆面照度；300~450 lux 的地面照度，是相當充足的照明環境。然而，並不是每天都有足夠強的陽光。就桃園縣地帶年平均日照時數 2109.7 (桃園縣環保科技園區，2007) 來看，保守地估計每天約有 5 小時免用人光源，210.97 天的日子中可有 1,054.85 小時不用人工光源，總節能約有 210 度用電。

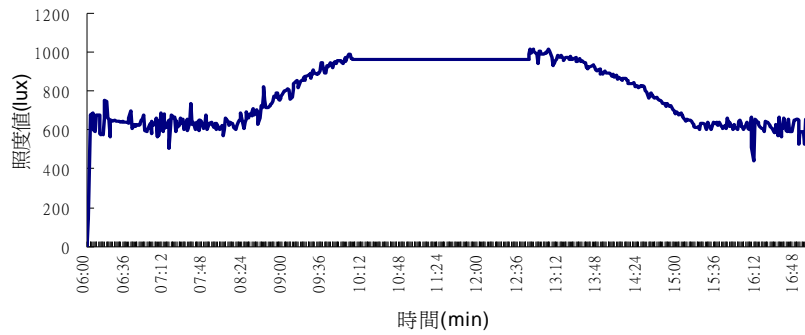


圖 19. 11 月 24 日中四組燈具與兩組光纖之照度

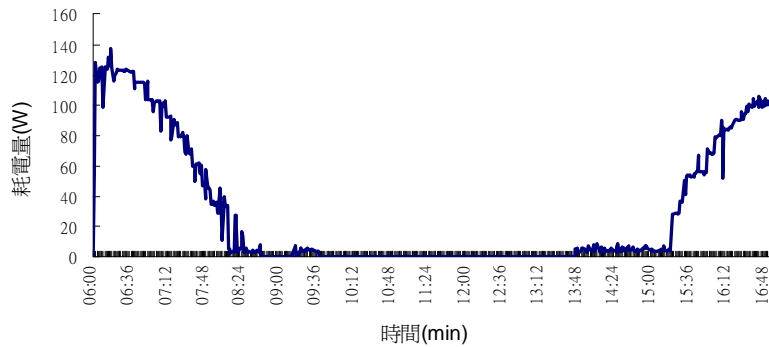


圖 20. 11 月 24 日中四組燈具與兩組光纖之耗能

為進一步探討較長時段下光纖燈具的節能功效，本研究第二階段實驗的紀錄包含了 2008 年 6~12 月份共 214 天之資料。其中 93 天為陰雨天、121 天陽光充足。除了將燈具改成四組 220V~250W PAR 燈外，本階段實驗過程與上一階段完全相同。採用 PAR 燈具之原因，係因此種燈具可較螢光燈適用於快速點滅，光衰速度較緩。圖 21~圖 22 顯示為其應用之照度及耗能情形。由於整個實驗裝置經之前幾個月運轉，已達穩定狀態，其手工操作大量減少。因此，此階段只需於開始時設定測量時段，其餘資料蒐集過程全自動化運轉。

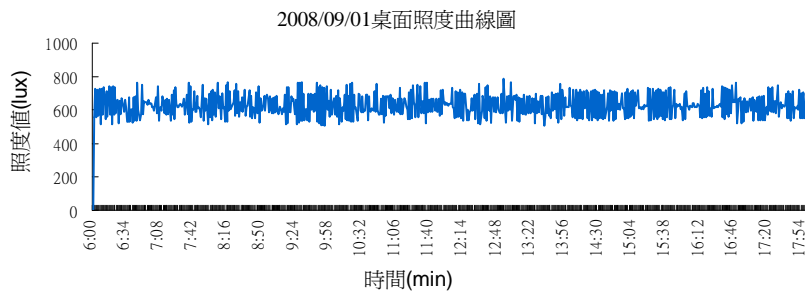


圖 21. 太陽光節能照明系統之全日照度值分佈

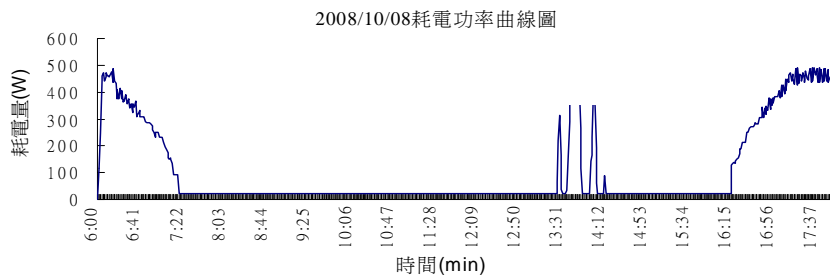


圖 22. 太陽光節能照明系統之全日耗電量分佈

既然自動化蒐集之資料數量龐大，有需要使之以電腦程式軟體自動進行運算。由於多功能電表每分鐘會記錄太陽光節能照明系統，一個小時 PAR 燈用電消耗的瓦數 (W)，因此，令第 n 天的第 i 分鐘記錄值為 $P(i, n)$ ，將每天從早上 6:00 到下午 6:00 記錄的 720 筆平均，可得第 n 天平均一個小時用電消耗的瓦數：

$$P_{hr}(n) = \frac{1}{720} \sum_{i=1}^{720} P(i, n) \quad (1)$$

且第 n 天全日 PAR 燈用電消耗的瓦數為：

$$P_{day}(n) = 12P_{hr}(n) \quad (2)$$

所以太陽光節能照明系統平均一個月的 PAR 燈日用電量 P_{par_sun} ，等於當月所有日用電消耗的瓦數： $P_{day}(n)$ ， $n = 1, 2, \dots, N$ 之總合除以當月天數 N ：

$$P_{par_sun} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N P_{day}(n) = \frac{1}{N} \frac{1}{60} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{720} P(i, n) \quad (3)$$

其中六月、九月、十一月， $N = 30$ ；七月、八月、十月、十二月， $N = 31$ 。全日雨天時，只能使用 PAR 燈照明，耗電量最大，其 P_{day} 定義為 $P_{par_only} = 5550W$ 。再者，光纖燈具沒有作用時即沒有節能，因此平均的日節能可以定義為：

$$P_{save} = P_{par_only} - P_{par_sun} = 5550 - P_{par_sun} \quad (4)$$

P_{save} 的多寡只能看出燈具在不同月份的節能效果，所以平均一個月的「日節能效率」為：

$$R_{save} = P_{save} / P_{par_only} \quad (5)$$

除此，藉由(3)式也可比較光纖節能系統使用不同燈具（如將 PAR 燈置換為 T5 或 T8）之間的節能效果。圖 23 為光纖照明系統於 2008 年 7 月之平均日節能用電量與當月降雨量分佈圖。其中標記「o」之折線代表光纖燈具未發揮作用時，PAR 燈的平均日耗電量 (P_{par_only})；標記「*」之折線代表光纖燈具正常運作時，PAR 燈的平均日耗電量 (P_{par_sun})；標記「△」之折線為當月每日之降雨量，資料來源為中央氣象局。由此可知日耗電量與降雨量有很大的相關性，例如降雨多的日子 PAR 燈耗電量多升高。表 4 為 2008 年 6 到 12 月份之光纖照明系統每個月的平均日用量、平均日節能用電量與平均日節能效率。由之可知節能效率六、七月最大，十一、十二月最小，呈現遞減趨勢。這顯然是因為日照量一般在六到八月最大（夏季）、八到十月次之（秋季）、十一到一月最少（冬季）。然同一季中月份之間的日照量雖然差異不大，卻可能因氣候影響而發生同一季的前後月份節能效率反常之現象（十月之 31%，高於九月之 25%）。從表 4 可知光纖照明系統在夏季的節能效率高達 44%，在冬季的節能效率則低達 20%，根據圖 24 可知照明系統節能的效率是夏季 > 秋季 > 冬季。由此二圖亦可知：即使光纖照明系統的每日節能會受到氣候的影響，其節能效率從季節上來比較倒可以排除氣候的影響。若再改以用電度數及電費估計，以具有最高節能效率的七月為例，其每小時節能： $P_{hr,july} = (2422 \div 12) W = 201.833W = 0.2018KW$ 。亦即，節省的電費為 $(3.3 \text{ 元/度}) \times (P_{hr,july} KW) = 3.3 \text{ 元/KWhr} \times 0.2018KW = 0.6661 \text{ 元/hr}$ 。換言之，光纖照明系統維持桌面保持 600lux 照度，一個月可以節省 $(0.6661 \text{ 元/hr}) \times 12hr \times 31day = 247.771 \text{ 元}$ 。

表 4. 太陽光節能照明系統節能數據

月份	平均日用電量 $P_{\text{par_sun}}$	平均日節能 $P_{\text{save}} = P_{\text{par_only}} - P_{\text{sun_par}}$	平均日節能效率 $R_{\text{save}} = P_{\text{save}} / P_{\text{par_only}}$	當月節省電費 $NP_{\text{save}} \times 3.3 / 1000$
六月	3243W	2307W	42%	228元
七月	3128W	2422W	44%	248元
八月	3950W	1600W	29%	164元
九月	4160W	1390W	25%	138元
十月	3666W	1705W	31%	174元
十一月	4434W	1116W	20%	110元
十二月	4092W	1279W	23%	131元
平均	3810W	1688W	N/A	N/A

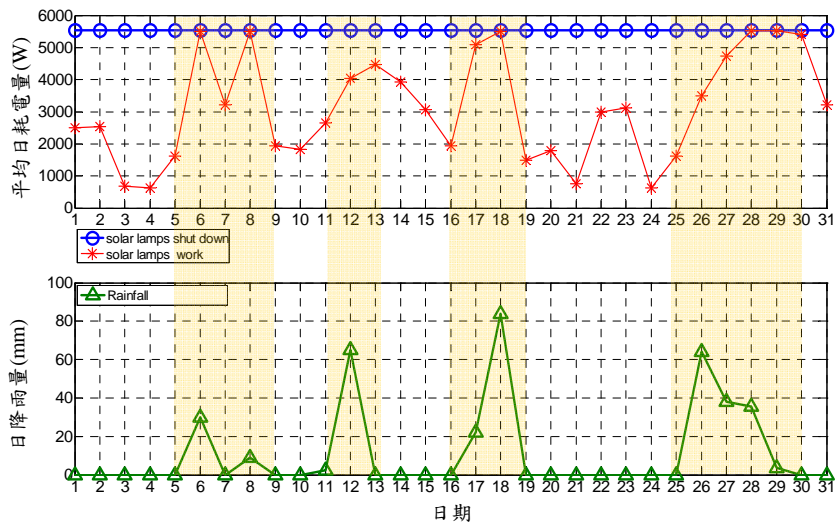


圖 23. 太陽光節能照明系統 2008 年 7 月之平均日耗電量與當月降雨量分佈圖

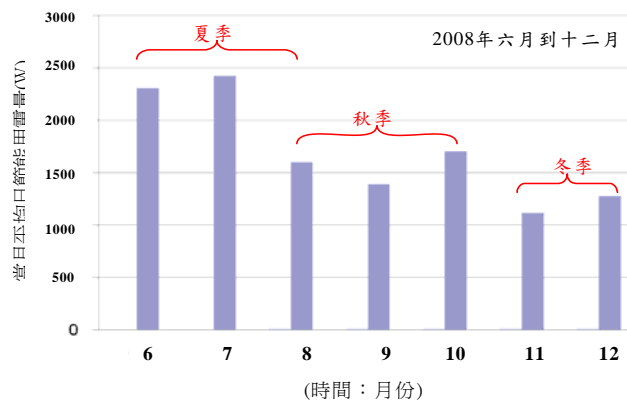


圖 24. 光纖照明系統不同月份之平均日節能圖

五、結論與建議

一、本研究採用最小型的集光器，提出可以一自動化軟硬體系統，監控桌面照度、調整人工光源之自動化裝置，每日調整實驗暗房內四組燈具之強弱，因應光纖燈具投光變化，並記錄每日、每分鐘之日間耗能，全年無休。既然本實驗所選集光系統並無人工光源之組合設計，必須於傳統燈具中挑選，因此比較了螢光燈與 PAR 燈之節能效果。

二、燈具組合應用比較之結果，顯示螢光燈 T5 燈具比 T8 燈具節能，因此可合理推論四組 14W T5 螢光燈具有最佳效果。但再以長時段考量，雖然 PAR 燈總用電量較大，但由於此種燈具可較螢光燈適用於快速點滅及調光，因此仍以 PAR 燈較適合搭配本自動化光纖結合人工光源之照明系統。

三、光纖燈具之照明參數，包括光束投光角、桌面照度分佈、光通量等，因陽光之強度快速變換，不如人工光源，並非固定之數值。結果顯示單組光纖燈具的桌面照度於 1m 直徑內由 45~450 lux 逐漸增加；二組光纖時，則由 60~750 lux 逐漸增加。如果戶外陽光於 8:30~3:30 之間維持 60,000 lux 以上，這期間完全不需使用人工光源。

四、另外，因為光纖末端固定於嵌燈燈具上，其投光形式接近以鹵素燈、鎢絲燈泡為光源之燈具，在照射面形成對稱的圓形投光形狀（如圖 17），以及照度分配。改以搭配不同投光角度之燈具時，適於洗牆、重點照明及工作照明用途。

五、自動化光纖結合人工光源之照明系統，可長期應用於陽光充足地區的節能照明上。以台灣而言，各地四季平均約有 2/3（250 天）日子陽光充足；北部則約有 1/2（200 天）日子陽光充足；南部約有 9/10（336 天），極為適於運用此種照明系統。不論何種集光系統，應以大型、光纖數量多，較能發揮節能功效。但因為造價昂貴，可藉推廣增加使用率降低價格；或探討集光機制之取代方法降低造價，提升投資報酬率。進一步觀察 2008 年 6~12 月份室內照明之平均耗能結果，發現光纖照明系統節能的效率是夏季 > 秋季 > 冬季，且七月份的節能效率最高 44%，能節省 2422W 用電。以一度新台幣 3.3 元計算，一個月可以節省 248 元。綜觀這七個月內的耗能情形，可判斷即使光纖燈具的節能效率會受到天候左右，但其節能效率從季節上來比較，因為取樣時間內，季節性陽光照射總時數差異顯著，雖有晴雨變化，可排除短時間天候變化因素。

參考文獻

1. Al-Marwaei, M., & Carter, D. J. (2006a). A field study of tubular daylight guidance installations. *Lighting Research and Technology*, 38(3), 241-258.
2. Al-Marwaei, M., & Carter, D. J. (2006b). Tubular guidance systems for daylight: Achieved and predicted installation performances. *Applied Energy*, 83(7), 774-788.
3. Andre, E., & Jutta, S. (2002). Day lighting by fiber optic. Unpublished master's thesis, department of environmental engineering division of water resources engineering. *Luleå University of Technology, Luleå, Sweden*.
4. Gugliemetti, F., & Gringaffini S. (2001). Shafts for day lighting underground spaces: Sizing guidelines. *Lighting Research and Technology*, 33(3), 183-194.

5. Leslie, R. P., & Raghavan, R., Howlett, O., & Eaton, E. (2005). The potential of simplified concepts for daylight harvesting. *Lighting Research and Technology*, 37(1), 21-40.
6. Molteni, S. C., Courret, G., Paule, B., Michel, L., & Scartezzini, J. L. (2001). Design of anidolic zenithal lightguides for daylighting of underground spaces. *Solar Energy*, 69(supplement), 117-129.
7. Scartezzini, J. L., & Courret, G. (2002). Anidolic daylighting systems. *Solar Energy*, 73(2), 123-135.
8. Schirber, M. (2005). *Bringing a little sunshine into our lives: Hybrid solar lighting may be next big thing*. Retrieved October 22, 2008, from <http://www.msnbc.msn.com/id/7287168>
9. Steris, A. K. (2004). Solar thermal collector and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(3), 231-295.
10. Wilson, M., Jacobs, A., Solomon, J., Pohl, W., Zimmermann, A., Tsangrassoulis, A., & Fontoyont, M. (2002). Sunlight, fibers and liquid optics: The UFO Project, Low Energy Architecture Research Unit (LEARN). London: London Metropolitan University.
11. 石曉尉 (2007)。室內照明設計原理。台北：淑馨出版社。
Shih, S. W. (2007). *Shih Nei Jhao Ming She Ji Yuan Li*. Taipei: Shu Sin. [in Chinese, phonetic translation].
12. 李麗玲、黃耀德、潘耀徽 (2004)。自然光導引系統及太陽能運用。《照明學刊》，21 (24)，15-24。
Li, L. L., Huang, Y. D., & Pan, Y. H. (2004). Natural light guidance system and solar energy application. *Journal of Illuminating Engineering*, 21(24), 15-24. [in Chinese, semantic translation].
13. 林建憲、戴維倫、蘇志杰、楊文賢、趙念慈、張明文 (2007)。綠色建築節能晝光導光介紹與應用設計。《機械工業雜誌》，287，6-21。
Lin, J. S., Dai, W. L., Su, J. J., Yang, W. S., Jhao, N. C., & Jhang, M. W. (2007). An introduction and application for the design of energy-saving green building. *Journal of the Mechatronic Industry*, 287, 6-21. [in Chinese, semantic translation].
14. 邱瑞隆、曾國雄、邱彥鈞 (2008)。人工光源與太陽光源差異性之比較研究。《照明學刊》，25 (3)，22-33。
Ciou, R. L., Ceng, G. S., & Ciou, Y. J. (2008) Comparison and studies of artificial lighting and natural lighting. *Jouranal of Illuminating Engineering*, 25(3), 22-33. [in Chinese, semantic translation].
15. 徐明同、陳正改、林蘭貞 (1975)。台灣氣象與太陽能發展之關係。《能源季刊》，6 (2)，62-79。
Syu, M. T., Chen, J. G., & Lin, L. J. (1975). A study on relationship between meteorology and development of solar energy in Taiwan. *Energy Quarterly*, 6(2), 62-79. [in Chinese, semantic translation].
16. 桃園縣環保科技園區網站 (無日期)。桃園縣地區年平均日照時數。2007年11月4日，擷取自：
http://testp.tyepb.gov.tw/invest/invest1_2.html。
Taoyuan Environment Protection Park web site (n.d.). *Average hours of sunshine a year in Taoyuan County*. Retrieved Nov 4, 2007, from http://testp.tyepb.gov.tw/invest/invest1_2.html [in Chinese, semantic translation].
17. 黃秉鈞 (1997)。我國太陽能發展現況與展望。《光訊》，68，9-14。
Huang, B. J. (1997). A study on the current status and future of solar energy development in Taiwan. *OPTO News & Letter*, 68, 9-14. [in Chinese, semantic translation]
18. 黃耀德 (2006)。自然光與綠建築關係之探討。《照明學刊》，23 (7)，11-22。
Huang, Y. D. (2006). A discussion of relativity for the natural light and green building. *Jouranal of Illuminating Engineering*, 23(7), 11-22. [in Chinese, semantic translation]
19. 彭巧綾 (2006)。《亞洲地區光纖照明產業未來發展趨勢之研究》。中華大學科技管理研究所碩士論文。

Peng, C. L. (2006). *A study on the development trend of optical fiber lighting industry in Asia*. Unpublished master's thesis, Department of Technology Management, Chung Hua University, Hsinchu, Taiwan. [in Chinese, semantic translation].

Application of Hybrid Solar Light Collectors and Artificial Light Sources on Interior Lighting

Chian-Y. Chang^{*} Chien-Ju Li^{**} Che-Wei Cheng^{***}

Department of Interior Design, Chung Yuan Christian University

* cychris@hotmail.com

** kidult520@gmail.com

*** awenger@pchome.com.tw

Abstract

Fiber optic solar lighting combined with artificial lighting for interior illumination is adequate to Taiwan where sun exposure is high enough. However, it is an emerging issue up to date in Taiwan. To probe into such an issue, a set of solar light collector is set up on the rooftop of a 4.3 m² darkroom where two sets of fiber optic luminaries project sunshine transported via two 20m fiber optic cables. In the two stage experiment, two types of supplemental light sources, fluorescent tubes and parabolic tungsten light bulbs, together with computer software and light control hardware, form an automated hybrid energy conserving lighting system that constantly provide an average of 600 lux illumination for the darkroom. Through one year data collection and observation, this study found that energy efficacy of the lighting system decreases in the order of summer, fall and winter. The highest effect reaches 44% in July; still, it comes to 20% in winter. In the sunny July, the fiber optic solar lighting conserves up to 2422W a day; this helps save around 248 NT dollars per month. Based on holistic research data, it can be inferred that energy efficacy of such a hybrid lighting system may disregard weather factors even though daily energy efficacy sways according to weather change.

Keywords: Daylight, Fiber Optics, Interior Illumination, Energy Saving.