

國立交通大學

電機與控制工程學系

碩士論文

使用無線感測網路及電動百葉窗之

室內日光最佳化



Indoor Daylight Optimization

Using Wireless Sensor Network and Motored Blinds

研究生：李昭明

指導教授：蕭得聖 博士

中華民國九十七年八月

使用無線感測網路及電動百葉窗之

室內日光最佳化

Indoor Daylight Optimization

Using Wireless Sensor Network and Motored Blinds

研究生：李昭明

Student：Chao-Ming Li

指導教授：蕭得聖 博士

Advisor：Dr. Te-Sheng Hsiao

國立交通大學

電機與控制工程系



Submitted to Department of Electrical and Control Engineering

College of Electrical Engineering

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Electrical and Control Engineering

July 2008

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十七年八月

使用無線感測網路及電動百葉窗之室內日光最佳化

研究生：李昭明

指導教授：蕭得聖博士

國立交通大學電機與控制工程學系碩士班

摘要

控制科技的進步不僅可以使人們的生活便利，更可以進一步協調使用者與環境的互動。近年來能源成本高漲，但使用者對於科技的需求卻沒有簡少，所以節能與智慧化的研究是相當前瞻而且有迫切須要的發展方向。本論文首創以無線感測網路監測建築室內日光分佈。硬體的內容是建置完整的日光監測平台：包含無線照度感測網路以及電動百葉窗，透過電腦及周邊監控模組與控制器，控制百葉窗的狀態以及蒐集室內日光分布的資料，其最終的目的乃是用以提升環境內使用者的需求與減少人工照明電能，以達到環境智慧化與節能。本研究平台的軟體部份是由 JAVA 撰寫，可執行的功能有：由電腦端設定百葉窗的放下長度及角度、顯示及儲存百葉窗的狀態及無線照度感測器的值。本論文提出一個室內日光預測與最佳化的架構，利用蒐集到的資料建立「回歸模型」，即感測器照度值對應於百葉窗狀態的映射函數，並利用回歸模型及室外的日光條件，推測出百葉窗的角度與長度狀態及日光條件所對應「室內日光分布」。最後，利用 JAVA 呼叫 MATLAB 指令以預測在使用者偏好照度下之最佳的百葉窗狀態並控制百葉窗，然後演算法藉由調整百葉窗狀態，進行回授控制室內單感測點的照度，並觀察紀錄結果，以評估日光最佳化之結果。

Indoor Daylight Optimization Using Wireless Sensor Network and Motored Blinds

Student : Chao-Ming Li

Advisor : Dr. Te-Sheng Hsiao

Institute of Electrical and Control Engineering
National Chiao-Tung University

ABSTRACT

Control technologies could not only make the daily life convenient, but also harmonize the interaction between users and the environment. In recent years, the price of energy resources has been soaring, but the demand for energy is ever increasing. Therefore, to reduce energy consumption and make machines more intelligent is an important and prospective research direction. This thesis establishes a daylight monitoring platform to monitor and optimize indoor daylight distribution. The hardware of the daylight monitoring platform consists of wireless light sensor network and motored blinds. It controls the blinds' states through a computer, peripheral modules and controllers and collects daylight data by wireless light sensors. The software of this platform is written in JAVA. The software functions include setting, sensing and recording the blind lay-down length and the blind tilt angle, monitoring and recording the daylight data. This thesis proposes a daylight prediction and optimization configuration. It uses the collected daylight data for establishing a regression model for daylight sensor reading and the blind state. This configuration also uses outdoor daylight condition and the regression model for estimating indoor daylight response. Finally, it calls MATLAB optimization function by the JAVA program for computing the optimal blind state, and controls the blind to the optimal state. After that, the algorithm feedback controls illumination of the sensing point in the room by adjusting blinds' state. The sensor feedback control results are recorded for assessing optimization results.

誌謝

有關這兩年的研究成果，首先我要感謝指導教授蕭得聖博士，老師對我研究能力的信任與賞識，讓我有幸能夠接下此跨領域的研究任務；雖然研究過程中並非一帆風順，但在老師悉心的指導下，不僅對控制理論有更清楚的認識，對於相關應用研究的認識也是略有增長，可謂獲益良多。

此外，我也要感謝口試委員黃聖傑博士與陳右穎博士。各位老師在口試中對我的研究與初稿給了不少方向與建議，使得這篇論文的内容更加完整與充實。

研究之中，我要感謝資工所學長葉倫武與同學林育瑄，有他們在 JAVA 程式與無線感測網路上的支援，研究才得以順利進行；另外，我也要感謝微算機助教的吳立翔與專題生鄭勝元在日光監控硬體建置上的協助與指教，也感謝同樣是微算機助教的王俊吉，從他身上學到不少程式設計的良好觀念。

兩年的時光很快，最令我難忘的就是實驗室同學們的革命情感，不論是研究討論、閒聊瞎扯，同學們的陪伴使我的研究生崖過的更順利。感謝永州、毅泓、宗明、暉鈞、維民、東欣、茂樵平日的指點與打氣，也感謝同實驗室的士翔、清彥、煜傑、雷俊平時的陪伴。

最後，謹以此文獻給為我摯愛的家人。

李昭明 謹識

中華民國九十七年八月

新竹 交大

目錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
誌謝	iii
目錄	iv
圖目錄	vi
表格目錄	viii
符號表	ix
第一章 緒論	1
1.1 研究動機與目的	1
1.2 問題界定與研究方法	1
1.3 論文貢獻	2
1.4 論文架構	2
第二章 相關研究	3
2.1 良好光環境與需求標準	3
2.2 使用者對於照度的偏好設定	4
2.3 太陽仰角於四季變化的情形	6
2.4 百葉窗的功能與相關研究	7
2.5 使用電動捲簾的照度控制研究	11
2.6 內建模型控制與監督學習	12
2.6.1 內建模型相關文獻之基本架構	12
2.6.2 高斯輻射基底函數類神經網路	14
第三章 電動百葉窗與分散式監控系統	15
3.1 使用感測與致動器之硬體與工作原理	15
3.2 電腦週邊監控模組	16
3.3 控制迴路與控制流程	18
第四章 無線感測網路與日光監控	24
4.1 照度感測器工作原理	24
4.2 無線感測網路之照度感測器建置	25
4.3 日光監測實驗研究與建模方法	27
4.4 室內日光預測與最佳化架構	34
4.5 單感測點照度回授控制	37
4.6 程式結構	41
第五章 實驗數據分析與討論	43
5.1 權值向量的數據驗證與探討	43
5.1.1 使用最小平方法求得權值向量之數據探討	43

5.1.2 使用平均法求得權值向量之數據探討	44
5.2 單位化模型與單位化資料驗證	45
5.3 內建模型輸出與實際感測值之比對	48
5.4 單點照度回授控制數據分析	52
5.5 上午與下午的日光資料分析	54
第六章 結論與展望	55
6.1 研究總結	55
6.2 未來展望	55
參考文獻	56



圖目錄

圖 1：人與環境互動之示意圖	1
圖 2：閉迴路燈光控制流程示意圖	5
圖 3：使用者的滿足程度之一例	5
圖 4：台灣四季太陽仰角與方位圖說	6
圖 5：使用軟體模擬日光分布之模型	7
圖 6：室內 9 個定點對應於百葉窗點光源模擬	7
圖 7：平均百葉窗照度 L_{avg} 分布	8
圖 8：文獻[2]所預測的工作面照度示意圖	9
圖 9：文獻[2]預測結果與實際量測值比較	10
圖 10：太陽角度 15 度時百葉片調整角度以阻擋直射光	10
圖 11：文獻[23]的測試平台	11
圖 12：文獻[23]的控制架構	11
圖 13：文獻[23]的照度控制結果	12
圖 14：環境與正向模型的學習	13
圖 15：環境與逆模型的互動	13
圖 16：內建模模型控制的架構圖	14
圖 17：一個基本的高斯網路	14
圖 18：拉線式電阻尺	16
圖 19：電位計	16
圖 20：感測器位置	16
圖 21：馬達響應於加入偏壓後呈線性關係	16
圖 22：集中管理的概念	17
圖 23：長度控制迴路流程圖	18
圖 24：角度控制流程圖	19
圖 25：電動百葉窗之分散式監控與控制器方塊圖	20
圖 26：長度控制響應：由 13 公分~150 公分約需 47 秒	20
圖 27：百葉片角度控制器硬體架構圖	21
圖 28：小增益 P 控制器	22
圖 29：小增益 PI 控制器	22
圖 30：大增益「切換積分式」PI 控制器	23
圖 31：大增益 P 控制器在改變收斂條件後的響應	23
圖 32：大增益切換積分式 PI 控制器在改變收斂條件後的響應	23
圖 33：完整的日光監控硬體架構	24
圖 34：照度感測器的結構圖	25

圖 35：窗面內側上 5 個無線照度感測器	26
圖 36：無線照度感測器建置剖面圖	26
圖 37：佈署在室內的 3 個無線照度感測器	27
圖 38：照度感測資料與高斯模型	28
圖 39：以直線擬合 y_1 對應 \hat{y}_1 的 8 筆測試資料	29
圖 40：Sensor6 (y_1) 的照度變化	30
圖 41：Sensor7 (y_2) 的照度變化	31
圖 42：Sensor8 (y_3) 的照度變化	31
圖 43：Sensor6 的單位化回歸模型輸出 $\hat{y}_1(\theta, l)$	32
圖 44：Sensor7 的單位化回歸模型輸出 $\hat{y}_2(\theta, l)$	33
圖 45：Sensor8 的單位化回歸模型輸出 $\hat{y}_3(\theta, l)$	33
圖 46：單位化回歸模型建模流程	34
圖 47：預測輸出 $\hat{Y}(X, \theta, l)$ 示意圖	35
圖 48：室內日光預測與最佳化的架構	36
圖 49：照度回授控制器設計之模型參考圖	37
圖 50：切換式日光調變比例控制器	38
圖 51：完整的照度回授控制的流程	40
圖 52：加入照度回授控制的日光最佳化架構	41
圖 53：程式結構	42
圖 54：Sensor6 的單位化照度資料分佈 $\tilde{y}_1(\theta, l)$	46
圖 55：Sensor7 的單位化照度資料分佈 $\tilde{y}_2(\theta, l)$	46
圖 56：Sensor8 的單位化照度資料分佈 $\tilde{y}_3(\theta, l)$	46
圖 57：Sensor6 的 $\hat{y}_1(\theta, l)$ 與 $\tilde{y}_1(\theta, l)$ 的誤差	47
圖 58：Sensor7 的 $\hat{y}_2(\theta, l)$ 與 $\tilde{y}_2(\theta, l)$ 的誤差	47
圖 59：Sensor8 的 $\hat{y}_3(\theta, l)$ 與 $\tilde{y}_3(\theta, l)$ 的誤差	47
圖 60： y_{d1} 設定為 220Lux 的照度回授控制	52
圖 61： y_{d1} 設定為 30Lux 的照度回授控制	52

表格目錄

表格 1：CNS 照度標準	4
表格 2：住宅照度需求	4
表格 3：台灣四季仰角與方位角（單位：度）	6
表格 4：系統在監督學習上的三種誤差	13
表格 5：RS-485 與 RS-232 比較	17
表格 6：最小平方誤差法求得之權值向量數據比對	44
表格 7：平均法求得之權值向量數據分析	45
表格 8：日光最佳化架構中產生的三種誤差	48
表格 9：使用最小平方法權值向量，未放下百葉窗之實際輸出 $Y(X)=[198 \ 90 \ 89]$	49
表格 10：使用平均法權值向量，未放下百葉窗之實際輸出 $Y(X)=[197 \ 83 \ 85]$	49
表格 11：使用最小平方法權值向量，未放下百葉窗之實際輸出 $Y(X)=[408 \ 126 \ 173]$	50
表格 12：使用平均法權值向量，未放下百葉窗之實際輸出 $Y(X)=[410 \ 115 \ 185]$	51
表格 13：預測最佳化結果與單點照度回授控制結果之比較	53
表格 14：上午與下午的日光資料分析	54

符號表

$c_D(\text{user}_i, \text{lux})$: 使用者的照度偏好設定 (CH2)
Uni	: 室內照度的均齊度 (CH2)
y_{avg}	: 室內感測點的照度平均值 (CH2)
L_i	: 虛擬百葉窗取樣點光源 (CH2)
L_{avg}	: 平均窗面眩光程度 (CH2)
τ_v	: 百葉窗照度穿透率 (CH2)
β	: 太陽角度 (CH2)
θ	: 電位計量測到的百葉片角度
θ_r	: 百葉片角度的設定值
L 或 l	: 百葉窗放下的長度
X	: 日光條件 (Daylight Condition)
Y	: 室內日光系統的輸出
W_1, W_2, W_3	: 權值向量 (Weight Vector)
$\hat{Y}(X)$: 尺度向量 (Scaling Vector)
$\hat{y}_1(X), \hat{y}_2(X), \hat{y}_3(X)$: 權值元素，未放下百葉窗的估測輸出
$y_1(X), y_2(X), y_3(X)$: 未放下百葉窗的實際輸出
$y_1(X, \theta, l), y_2(X, \theta, l), y_3(X, \theta, l)$: 放下百葉窗後量測到的日光輸出資料
$\tilde{Y}(\theta, l)$: 放下百葉窗後量測到的單位化日光輸出資料
$\hat{y}_1(\theta, l), \hat{y}_2(\theta, l), \hat{y}_3(\theta, l)$: 單位化回歸模型 (Normalized Regression Model)
U	: 百葉窗狀態
Y_d	: 使用者設定輸出
$\hat{Y}(X, \theta, l)$: 室內感測照度估測輸出
U_o	: 百葉窗初始狀態
U_f	: 百葉窗最佳狀態
U_{fb}	: 單點照度回授控制時的百葉窗狀態

第一章 緒論

1.1 研究動機與目的

控制科技的進步不僅可以使人們的生活便利，更可以進一步協調使用者與環境的互動。近年來能源成本高漲，但使用者對於科技的需求卻沒有簡少，所以節能與智慧化的研究是相當前瞻而且有迫切須要的發展方向。現階段有許多科技發展，皆標榜省能源、環保以及智慧化，以對抗日益高漲的能源成本。有關「智慧化生活空間」的相關研究近年來蓬勃發展，例如建築之微氣候控制、智慧型燈光調控...等，研究目的皆在於減少能源消耗、強調人性化並考慮使用者偏好。目前有關電動百葉窗應用的研究則是相當罕見，主要是因為電動百葉窗成本較高、不夠普及，室內日光系統缺乏明確的系統模式，但是在建築物內部的光環境，百葉窗的控制則是扮演相當重要的角色，然而就目前大部份主流的論文期刊，鮮少收錄有關百葉窗結合無線感測網路於日光監控平台方面的研究。

使用者與環境互動的結構是以使用者為核心，結合電腦、感測器、網路與室內、外的致動器，電腦透過感測網路獲得環境狀態，人則藉由電腦透過網路控制致動器，調整環境狀態，以提高使用者對於所處環境舒適度，如以下圖 1 所示。

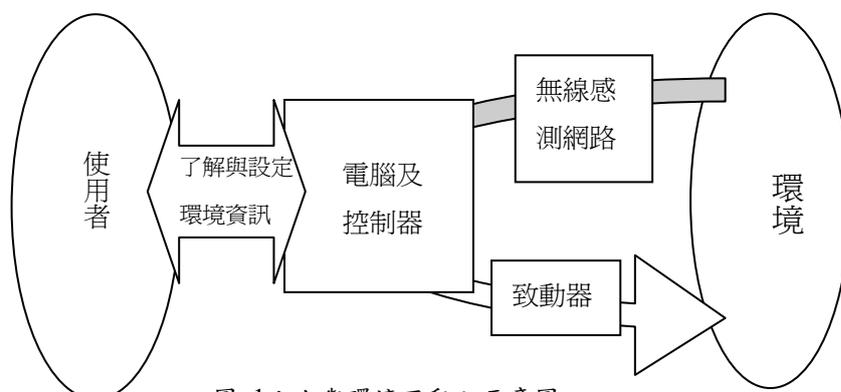


圖 1：人與環境互動之示意圖

1.2 問題界定與研究方法

本研究以圖 1 的概念為出發點，首創以無線感測網路監測建築室內日光分佈，將室內日光環境建構為一個多輸入多輸出系統(MIMO System)，其中所研究的「環境受控對象」為「室內日光分佈」，而「致動器」為「電動百葉窗」，從控制的觀點，建構一個內建模式(Internal Model)的日光「預測與最佳化」以及單感測點照度回授控制架構，預測與最佳化是利用 MATLAB 的函數功能，並由 JAVA 程式呼叫此功能來獲得最佳的百葉窗狀態，以減少演算法開發時間；硬體控制是由 JAVA 程式語言、電腦週邊監控模組及運算放大器實現電動百葉窗的狀態控制。

本研究將此日光控系統的欲設定輸出 y_d 制定為「使用者的偏好」，控制器輸入訊號 u 為「百葉窗的狀態」，「無線感測器的照度值」為系統之輸出 y ，其詳細之內容將在第四章敘述。

1.3 論文貢獻

本研究創新之處包含：自行開發由電腦監控電動百葉窗的軟體及硬體，以及利用無線感測網路建構日光監控平台並進行室內日光最佳化。利用調整百葉窗角度與放下長度進行單感測點之照度回授控制。

1.4 論文架構

第一章簡介了本論文的目標與方法。第二章為相關文獻探討，包含良好光環境需求標準、室內照明需求、使用者偏好、太陽仰角變化、百葉窗相關研究、電動捲簾的日光回授控制以及內建模式控制；第三章說明本電動百葉窗的狀態控制，包含硬體架構及軟體流程圖；第四章提出使用百葉窗的室內日光預測控與最佳化架構，其中包含單位化回歸模型、軟體架構與單點照度回授控制；第五章則是對於第四章所定義出的式子進行數據分析，並紀錄評估整個室內日光最佳化的結果好壞及誤差，並分析其原因；第六章為總結與未來展望。

第二章 相關研究

目前建築學有關日光統計資料的論文相當多，大多是由建築或照明相關學會所發表的，如文獻[13]、[17]，然而由感測器回授日光進行控制的相關論文卻並不多見，原由即是缺乏明確的控制法則，以作為百葉窗 (Blind) 或其他遮陽裝置 (Shading Device) 設計日光控制器的參考依據。儘管如此，還是有相關的研究利用電腦輔助軟體進行模擬建築日光分佈，甚至是進行室內日光最佳化，這種方法為「基於模擬控制」法 (Simulation-Based Control)，如文獻[1]、[11]、[12]、[25]、[26]，其中文獻[1]、[12]與[25]是利用 RADIANCE 建築光學模擬軟體建立室內光環境，即稱為 RADIANCE-Based 的作法。

有關日光與人工照明互動的文獻如[9]、[14]、[15]、[16]、[24]，其中文獻[9]、[14]、[16]為近年來相當熱門的無線感測網路的應用，而有關無線感測網路中，照度感測器的抗干擾強健性可在文獻[16]找到其詳盡的探討。

本論文所指的百葉窗是指「威尼斯式」百葉窗 (Venetian Blind)，其廣泛地用於各種室內場所，探討百葉窗對室內人工照明或溫度影響的論文如文獻[2]、[18]、[19]、[20]、[21]。

本章第一節介紹室內光環境與使用者需求，其中提到照度的單位為 Lux；第二節的參考文獻為使用無線感測網路進行室內燈光調控，該論文提供了使用者對照度滿足程度的函數；第三節為太陽仰角在四季變化的情形；第四節第一部份介紹美國喬治亞理工學院的智慧窗 Smart Façade，此研究即是使用建築光學模擬軟體 RADIANCE 進行室內日光控制之最佳化；第二部分介紹百葉窗角度與日光穿透率的研究，該研究以此法來預測室內工作面的日光照度分佈；第三部份之文獻：D. L. DiBartolomeo [22] 為美國勞倫斯柏克萊國家實驗室的電動百葉窗之日光控制研究；第五節為使用電動捲簾的照度控制研究；第六節介紹監督學習與內建模型控制。

2.1 良好光環境與需求標準

光照射之物體，於單位面積上所受之光束，稱為照度。單位為勒克司(Lux)。在一個光環境中維持適當的照度是對使用者最基本的需求。以下表格 1、2 為良好室內光環境的需求標準，其中表格 1 的內容是根據中國國家標準(CNS)資料庫。

均齊度是用來分析室內光環境的指標，其指的是作業面上之最低照度與平均照度的比值。另外，眩光也是指標之一，可分為「直接眩光」與「間接眩光」，如：眼睛直視光源時感到的眼眩光，如直視太陽或夜間對方來車車燈，閱讀時的直接眩光，即看燈時的刺眼眩光；光源投至某物件後反射至眼睛的刺眼光線，一般常稱反光，此種眩光對舒適影響最大。

表格 1：CNS 照度標準

場 所	CNS 照度標準(Lux)
客 廳	30 ~ 75
廚 房	50 ~ 100
餐 廳	50 ~ 100
臥 室	10 ~ 30
衛 浴 室	200 ~ 500
作 業 面	500 ~ 1,000

表格 2：住宅照度需求

場所	照度(Lux)
門牌、信箱、門鈴鈕、陽台	30 ~ 75
衣櫃、寢室、廁所、樓梯、走廊	70 ~ 150
洗水槽、娛樂室、客廳、團聚、玄關(內側) 鏡子	150 ~ 300
讀書、化妝、廚桌、調理、電話	300 ~ 750
寫作、作業	500 ~ 1,000
手工藝、裁縫	750 ~ 2,000

2.2 使用者對於照度的偏好設定

M.-S. Pan [9] 探討並實做了使用無線感測網路進行室內燈光調控，該研究中的燈

光控制是屬於閉迴路的控制法，如圖 2 所示。

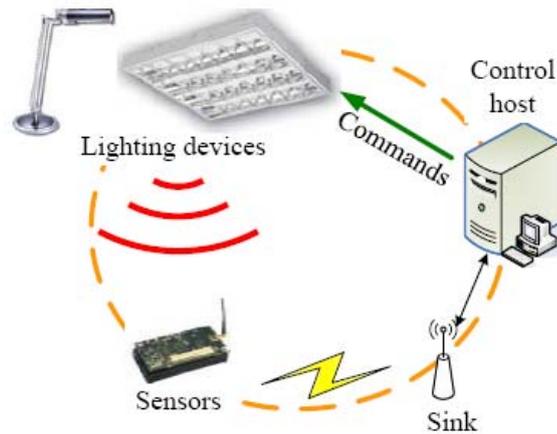


圖 2：閉迴路燈光控制流程示意圖

該論文的燈光控制考慮到使用者的活動與偏好，使用者偏好為一個設定值，此設定值與實際照度的誤差可影響使用者的滿足程度(Satisfaction level)，使用者的滿足程度與照度值可用單位化的高斯函數來描述，如圖 3 的高斯函數可描述為：

$$c_D(user_i, lux) = \exp\left(\frac{-(lux - \mu_D(user_i))^2}{2 \cdot (\sigma_D(user_i))^2}\right) \quad (1)$$

其中 $(\mu_D(user_i), \sigma_D(user_i)) = (400, 100)$ ，圖中表示使用者設定照度值為 400Lux，而若是滿足程度的臨界值為 0.3，表示經過對應後使用者可以容忍的照度誤差範圍為 155Lux。

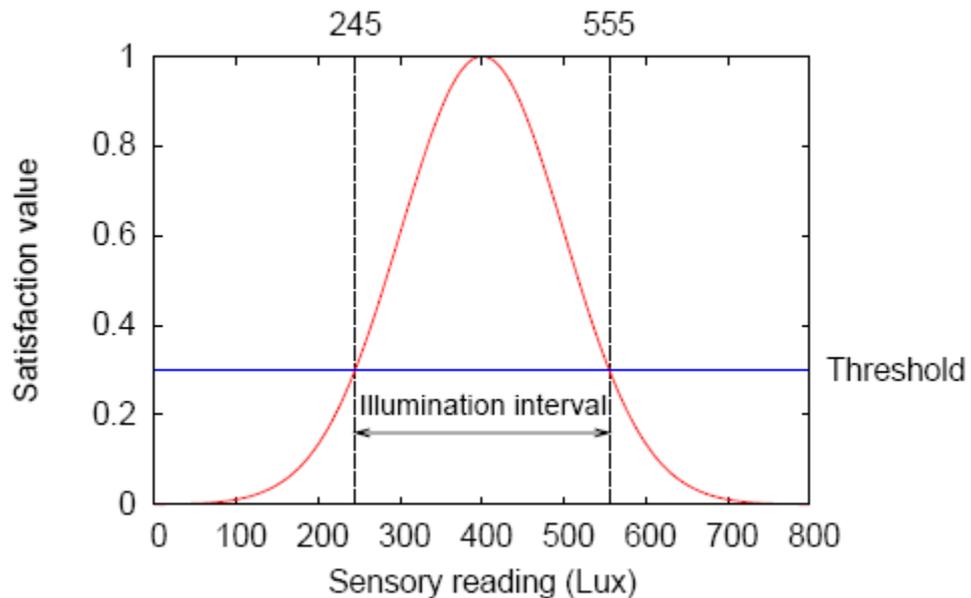


圖 3：使用者的滿足程度之一例

2.3 太陽仰角於四季變化的情形

根據我國中央氣象局[10]的資料，太陽的仰角隨季節(月份)改變的示意圖如圖 4，詳細資料如表格 3。由圖 4 可以看出在正午 12 時，夏至(6 月 21 日)的太陽仰角是最大的，可達約 89 度；春分(3 月 20 日)與秋分(9 月 22 日)仰角皆稍微偏南，正午時仰角達 65 度；冬至(12 月 21 日)的太陽最為偏南，正午時仰角達約 42 度。

由此可推論，不同月份的日光，對於室內的日光分布、強度，都會有不同的影響，而關於此現象在本文 5.3 節的數據探討可發現。

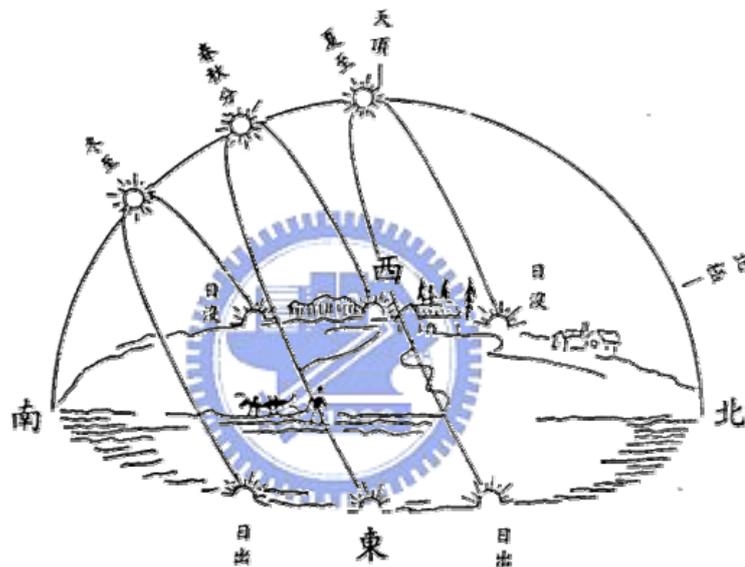


圖 4：台灣四季太陽仰角與方位圖說

表格 3：台灣四季仰角與方位角（單位：度）

台 北 (北緯25.03度, 東經121.5度)															
季節	時	6	7	8	9	10	11	中天	12	13	14	15	16	17	18
夏至	仰角	11.3	24.1	37.3	50.7	64.2	77.8	88.5	87.8	74.7	61.1	47.6	34.2	21.1	08.4
	方位	069.1	074.1	078.6	082.9	087.4	094.4	180.0	226.4	267.8	273.7	278.1	282.4	287.0	292.1
春分	仰角	01.9	15.1	28.5	41.3	53.0	61.9	65.0	64.9	60.2	50.4	38.4	25.4	12.1	
	方位	090.7	097.3	104.7	114.2	128.2	150.9	180.0	184.1	215.4	235.6	248.3	257.2	264.3	
冬至	仰角		04.2	15.6	25.9	34.3	39.8	41.5	41.4	38.8	32.6	23.6	13.1	01.7	
	方位		118.3	125.9	135.7	148.3	164.1	180.0	182.1	199.8	214.9	226.8	236.0	243.2	
台 中 (北緯24.15度, 東經120.68度)															
季節	時	6	7	8	9	10	11	中天	12	13	14	15	16	17	18
夏至	仰角	10.3	23.1	36.4	49.8	63.4	77.1	89.3	88.9	75.4	61.8	48.2	34.7	21.5	08.7
	方位	068.7	073.5	077.7	081.6	085.4	090.0	180.0	232.4	269.3	275.1	278.9	282.8	287.0	292.0
春分	仰角	01.3	14.5	28.0	41.0	52.9	62.3	65.8	65.8	61.3	51.5	39.4	26.3	12.9	
	方位	090.4	096.7	103.8	112.9	126.4	148.5	180.0	182.3	214.9	235.7	248.4	257.2	264.1	
冬至	仰角		04.0	15.5	26.0	34.6	40.4	42.3	42.3	39.9	33.7	24.8	14.1	02.6	
	方位		117.9	125.3	134.8	147.2	162.9	180.0	181.1	199.1	214.5	226.5	235.7	242.9	

2.4 百葉窗的功能與相關研究

1. C. S Park[1] 在文中提到日光表現主要有幾項功能指標：工作面的照度、室內日光分部的均齊度，還有太陽直射的眩光程度，以下三點是該篇論文主要探討的議題。

均齊度(Uniformity)，在此篇論文定義為室內照度最暗的點與室內平均照度的比

率，即 $Uni = \frac{y_{\min}}{y_{\text{avg}}}$ 其中 $y_{\text{avg}} = \frac{\sum_{i=1}^{11} y_i}{11}$ ， y_i 是感測點面向天花板的虛擬感測點讀值，室內

總共平均分布了 11 個虛擬的感測點，而感測照度的點如圖 5 所示：

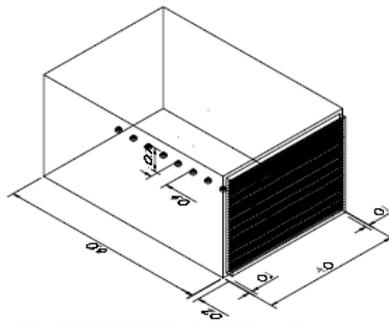


圖 5：使用軟體模擬日光分布之模型

室內定點面對百葉窗照度模擬：該模擬代表使用者面向窗面時，所感受到的眩光程度(眼睛直視光源時感到刺眼的程度)，其所使用的方法是將百葉窗視為一片照度不均勻的光源，並且在百葉面上取點光源 L_i ，模擬所有點光源對應室內定點的照度，最後將所有照度相加即為室內該點之亮度，如圖 6 所示，百葉窗面共有 99 個取樣點光源，而室內有 9 個固定點，百葉窗對於其中一個固定點的照度 L_j 可描寫為：

$$L_j = \frac{\sum_{i=1}^{99} L_{i,j}}{99} \quad , \text{其中 } L_i \text{ 為取樣點光源：}$$

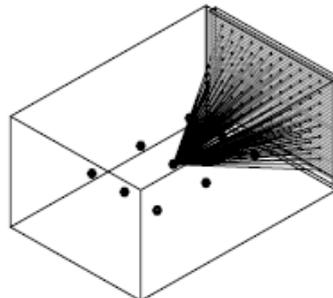


圖 6：室內 9 個定點對應於百葉窗點光源模擬

取得單獨固定點照度後，作者又定義了平均百葉窗照度 L_{avg} ，以作為使用者感受

到的平均窗面眩光程度，如圖 7 所示，其中 $L_{avg} = \frac{\sum_{j=1}^9 \sum_{i=99} L_{i,j}}{891}$ ，為 9 個點 L_j 的平均值：

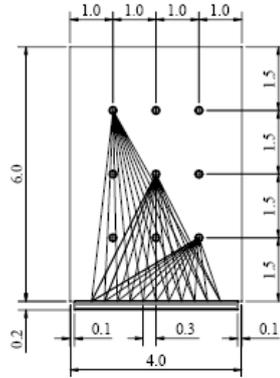


圖 7：平均百葉窗照度 L_{avg} 分布

室內日光表現最佳化：在定義了以上幾種參數，接下來就是定義用來描述最佳化的成本函數(cost function)，成本函數 J 描述如下：

$$J = \int_{t_1}^{t_2} [r_1 pf(y_{avg}) + r_2 pf(Uni) + r_3 pf(L_{avg}) + r_4 pf(\theta) + r_5 pf(DA)] dt \quad (2)$$

其中 $r_1 \sim r_5$ 代表權值， pf 為懲罰函數(penalty function)， y_{avg} 、 Uni 、 L_{avg} 如先前所定義，另外 θ 為百葉片角度，角度定義範圍為從 -90 度 ~ 90 度，角度為負表示視野朝地面，角度為正表示視野朝向天空，角度愈接近 0 度表示使用者能看到窗外景色的機會愈大； DA (Daylighting Autonomy) 定義為靠近窗邊 3 公尺內不使用人工照明的程度。

在定義了(2)式的懲罰函數之後，該研究使用了MATLAB的最佳化指令”fmincon”，以求出函數最小化所得到的百葉窗狀態，而使用fmincon函數的理由是因為(2)式懲罰函數是「非線性」函數，且所得的解是有限制的，即此問題為有限制(Constrained)、非線性規劃(Non-linear Programming)的最佳化問題。

2. A. Tzempelikos[2] 在論文中首度提到威尼斯式百葉窗的模型化以及計算，以運用在預測控制演算法(Predictive Control Algorithm)上；其模型化的方式是建立「日光穿透率」對應於「百葉窗角度」的回歸函數，此回歸函數之型式為：

$$\tau_v(\theta, \beta) = 0.55 \cdot e^{-(170-\theta)^2/1900} \cdot (-4.917 \cdot 10^{-7} \cdot \beta^4 + 0.00009 \cdot \beta^3 - 0.00567 \cdot \beta^2 + 0.13 \cdot \beta - 0.00437) \quad (3)$$

其式中 τ_v 為百葉窗之穿透率， θ 為百葉片角度， β 為太陽角度，基於上式，可以假定室內日光照度對應於百葉片角度的函數，為一個近似高斯函數的分布；此外這也間接說明了在 2.3 節所討論的每季所改變的太陽仰角，也會對室內的照度分部產生影響；而關於函數近似的討論會在本論文第四章予以探討。

此外，文獻[2]也有探討到室內工作面的照度預測計算，如圖 8。該論文所使用的方法是 2.6 節所提「白箱模型化」的計算法，在計算工作面照度時，除了窗面到工作面的光線傳導率(某處的照度與另一處照度比值)(View Factor)外，也需要先取得建築內部各種不同表面(牆面或天花板)的反射率(Surface Reflectance)以及光線的傳導率...等物理量，以求得在牆面或天花板所反射至工作面的日光，此法可能比較適用於房間佈置較單純或房間形狀較有規律的情況，若房間擺設較複雜，則需要的取得更多的物理量以利計算。相較於文獻[2]的作法，本研究所採用類似 2.6 節所提的「黑箱模型化」的作法。

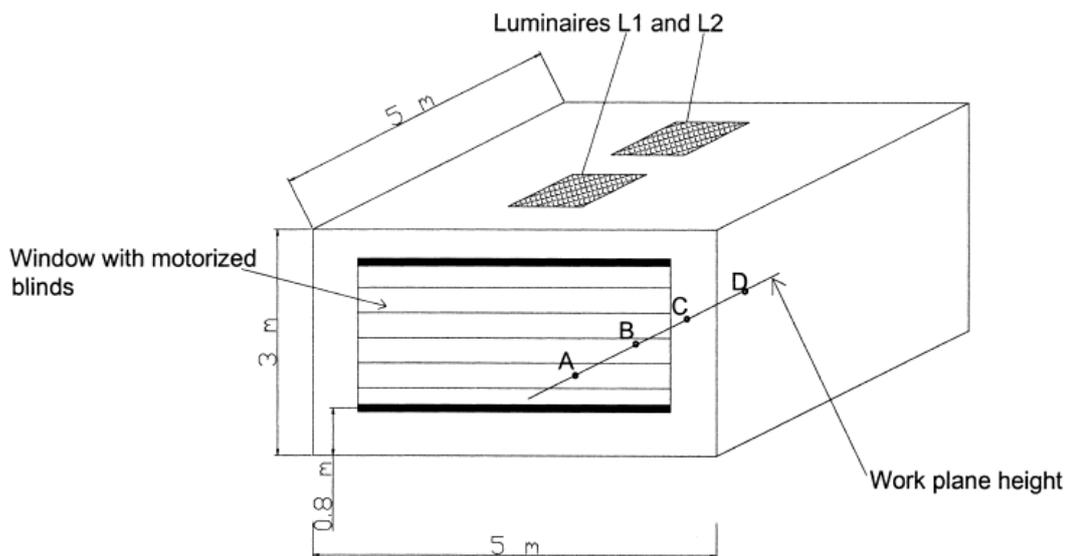


圖 8：文獻[2]所預測的工作面照度示意圖

該研究顯示照度計算的結果與實際量測值比較的結果如圖 9 所示，與窗戶距離 1 公尺時預測較不準確，而接近 1.8 公尺時誤差最小。

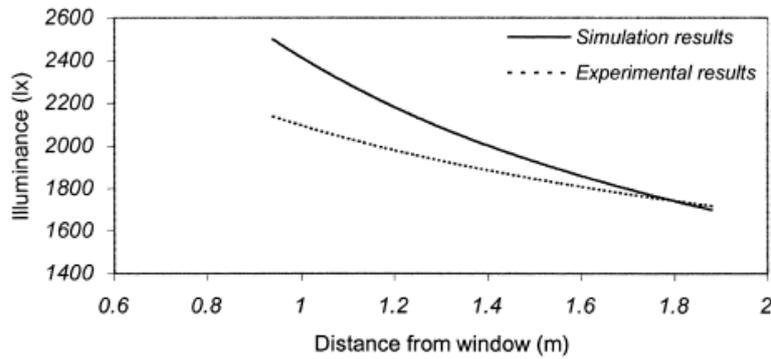


圖 9：文獻[2]預測結果與實際量測值比較

3. D. L. DiBartolomeo [22] 在論文中提到該研究建構了一個完整的室內照度控制的實驗室，包含電動百葉窗、可調照度日光燈、照度感測器，其控制的目標主要有三個：一為阻擋太陽直射光，二為調整百葉片使工作面達設定要求，三為啟用人工照明來補足日光的不足。

該研究中，為了達成阻擋太陽直射光的目標，其安裝了由勞倫斯柏克萊實驗室 (LBNL) 所開發的太陽角度感測器 (Sun Angle Sensor)，計算適當的百葉片角度以阻擋太陽直射光，如圖 10 為太陽角度於 15 度時所調整的百葉片角度。

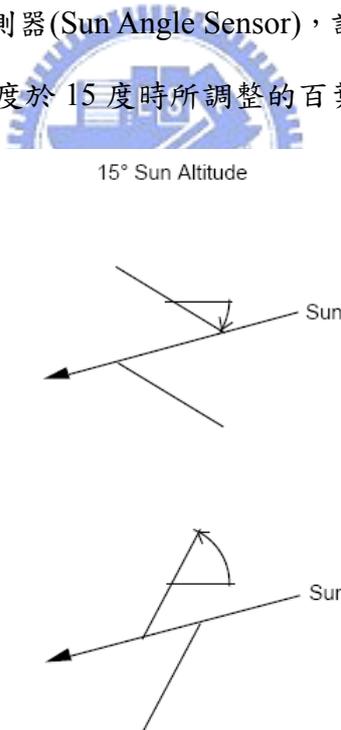


圖 10：太陽角度 15 度時百葉片調整角度以阻擋直射光

另外，該研究中之調整百葉片以達成工作面照度設定(該論文之設定值為 485~675Lux)的控制演算法中，並未提供有關照度數學的運算式或是百葉片的照度回授控制運算架構；而該論文提到其室內燈光控制則是採用閉迴路的，燈具為安裝了可

調光電子安定器的日光燈。

2.5 使用電動捲簾的照度控制研究

M. T. Lah [23] 的研究中，使用了電動捲簾 (Roller Blind) 進行室內的照度回授控制，該研究建構了一個測試平台，如圖 11，其所採用的控制法為模糊控制器 (Fuzzy Controller)，控制架構如圖 12，其利用照度感測器回授值與使用者設定值相比較的訊號，送入模糊控制器找出需要調整的電動捲簾位置，再將位置誤差訊號送入 PID 控制器進行位置控制。圖 13 為其控制結果，圖中有照度設定值(Set Point)與感測器量測值 (Inside Illuminance)，圖中的縱軸為照度值，橫軸為時間。



圖 11：文獻[23]的測試平台

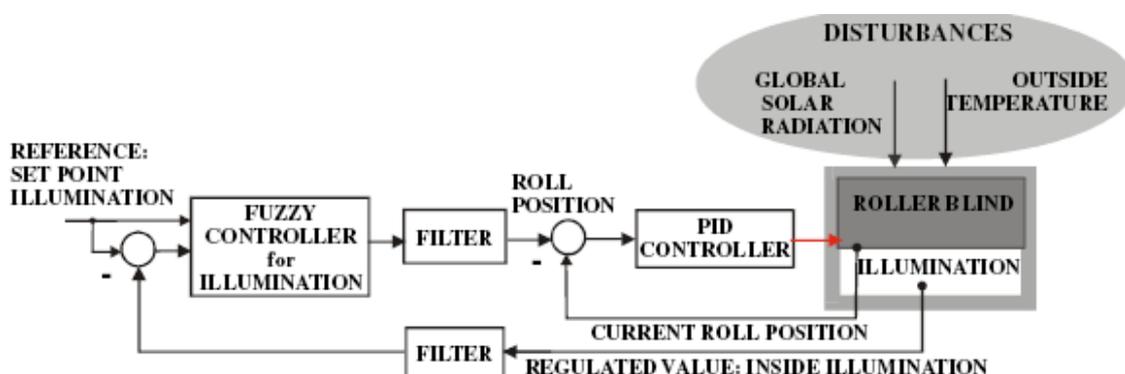


圖 12：文獻[23]的控制架構

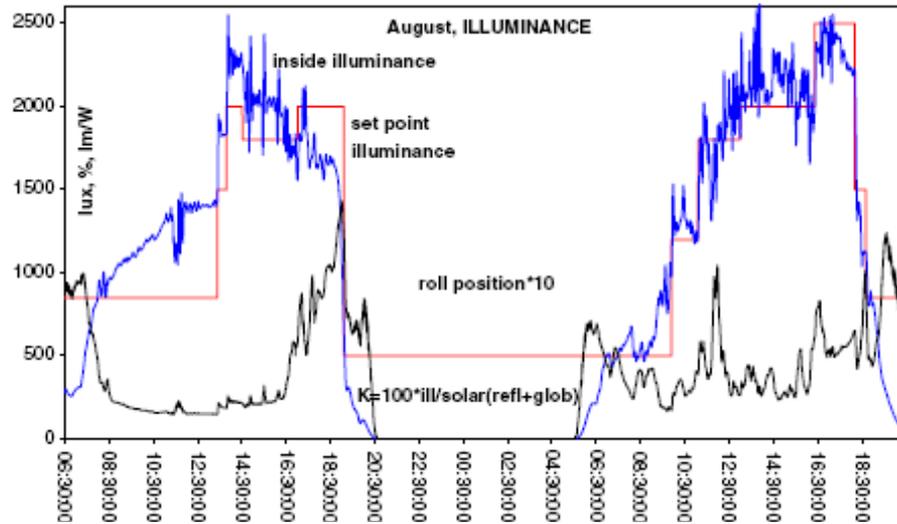


圖 13：文獻[23]的照度控制結果

2.6 內建模型控制與監督學習

建立具系統對象行為特性之模型稱為模型化 (Modeling)。控制系統時必須要知道控制對象的數學模型。表示數學模型常用的方法為以下兩種：

白箱模型化 (White-Box Modeling)：有明確的物理法則可以描述統。此方法也稱為物理模型化。

黑箱模型化 (Black-Box Modeling)：將對象看作黑盒子，採用系統識別或是統計學習來模型化。

本節將介紹兩篇有關內建模型 (Internal Model) 極具參考價值之論文，此二篇論文的模型皆採用類神經網路，只要藉由輸入值與輸出值進行參數訓練，類神經網路就會自動學習與自動組成，這種方法就是屬於黑箱模型化。而類神經網路搭配其他各種演算法，可具有調適性 (Adaptive)。

2.6.1 內建模型相關文獻之基本架構

1. MI Jordan[3]在論文中提到「監督學習」(Supervised Learning)的架構，包含「正向模型」(Forward Model)、環境(Environment)及「逆模型」(Inverse Model)，所謂正向模型即是利用類神經網路，對環境進行「系統識別」與「適應性學習」，如圖 14，將環

環境的狀態 x 與輸入值 u 輸入給正向模型，即可得到「環境輸出估測值 \hat{y} 」，正向模型以環境的輸出值 y 作為監督者，以學習演算法調整模型內的參數。；而逆模型的功能是求環境可能的最佳輸入值，使用者將「欲設定環境輸出」(Desired Output) y_d 作為逆模型的輸入，即可得受控環境的最佳的輸入值 u ，如圖 15。

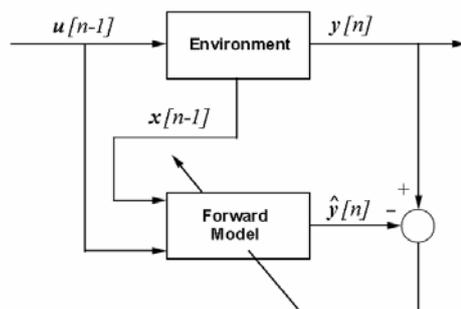


圖 14：環境與正向模型的學習

除了正向模型外，內建模型控制架構還包含「反求受控環境的最佳輸入值」，此結構稱為「逆模型」，該篇論文的正向模型及逆模型皆為類神經網路。

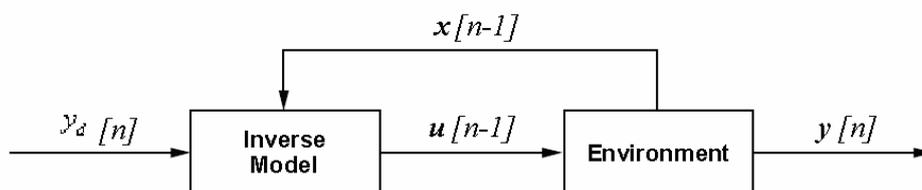


圖 15：環境與逆模型的互動

另外作者也明確地定義出三種不同的輸出 y_d , y , \hat{y} 與誤差，如表 4：

表格 4：系統在監督學習上的三種誤差

	Name	Source
$y_d - y$	performance error	environment, environment
$y - \hat{y}$	prediction error	environment, model
$y_d - \hat{y}$	predicted performance error	environment, model

- Hunt, K.J[4]在內建模型控制(Internal Model Control)的架構中，使用了高斯輻射基底函數之類神經網路(Gaussian Radial Basis Function Neural Network)，或簡稱高斯網路(Gaussian Network)，以作為受控廠的模型及控制器的結構，如圖 16，其中標示的控制器 C 與受控廠的模型 M 皆為高斯網路，另外圖中標示的 F 為濾波器，P 為受控廠。

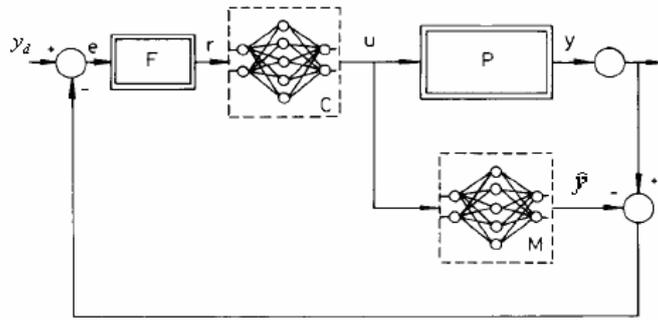


圖 16：內建模型控制的架構圖

2.6.2 高斯輻射基底函數類神經網路

類神經網路的元素包含權值(weight)與激發函數(Activation Function)，激發函數通常有三種：Saturation、Sigmoid、Gaussian，高斯輻射基底函數類神經網路(Gaussian RBF Neural Network)、或簡稱高斯網路(Gaussian Network)，其所使用的激發函數是屬於高斯函數，結構如下圖 17：輸入值(inputs)分別乘上一組權值並相加，然後再透過一個高斯函數進行非線性映射，獲得的值為神經元(Neuron)的輸出值，最後將所有神經元的值相加即為高斯網路的輸出(Output)。其中神經元的激發函數為高斯函數。

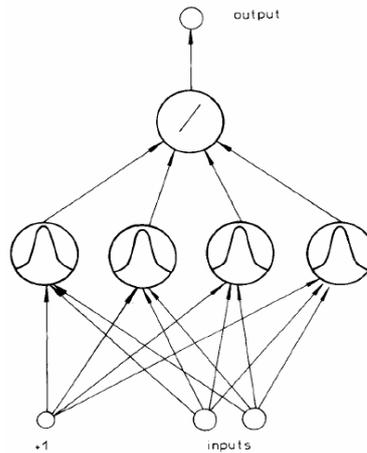


圖 17：一個基本的高斯網路

此外，M.M. Gupta [5] 在其著作中提到，高斯網路(或高斯函數的疊加)的輸出函數符合 Stone-Weierstrass 定理，所以可以作為通用的函數近似器(Universal Function Approximator)，亦即任何函數皆可以使用高斯網路來表示其近似值。

第三章 電動百葉窗與分散式監控系統

本論文控制電動百葉窗的方法，係利用電腦周邊串列通訊介面發送及接收監控模組訊號，此法常用於工業製程的自動化監控。本章將說明本研究所使用的分散式監控系統及電動百葉窗與感測器，屬於整個日光控制架構的「致動器端」，正如圖 1 的制動器方塊部分。

本電動百葉窗所使用的馬達為直流管狀馬達，製造商為法國 Somfy。由於百葉窗設計的機構，不論是控制百葉窗放下的長度或是百葉片角度，皆是使用同一顆馬達進行，所以就必須用到繼電器進行切換控制。而馬達在進行精密角度控制時，也會改變到放下的長度，所以電動百葉窗的狀態監控，就必須要有感測器。

3.1 使用感測與致動器之硬體與工作原理

為了監控百葉窗的狀態，我們使用了「拉線式電阻尺」量測百葉窗所放下的長度，如圖 18。另外使用電位計量測百葉片的角度，如圖 19。而這兩種感測器建置的位置則如圖 20 所示。這兩種感測器都是類比電壓輸出，其中電壓與長度的關係可分別用一次線性方程式描述：

$$\begin{aligned} V_{\text{angle}} &= a * \text{angle} + b \\ V_{\text{length}} &= c * \text{length} + d \end{aligned} \tag{4}$$

其中 V_{angle} 表示電位計輸出的電壓， angle 為百葉片角度，角度的擺幅為-70~75 度； V_{length} 表示拉線式電阻尺輸出電壓， length 為百葉窗所放下之長度，長度的範圍為 13~200 公分；而 a 、 b 、 c 、 d 為常數。



圖 18：拉線式電阻尺



圖 19：電位計

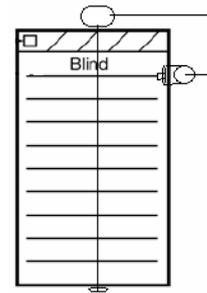


圖 20：感測器位置

另外，由於馬達在電壓-5 伏到 8 伏之間有一段「無反應區」(Dead Zone)，也就是輸入-5~8 伏的電壓，馬達不會轉動，所以我們設計了直流偏壓電路，假使原本輸入電壓為「負」，電路就偏壓-5 伏；同理，假使原本輸入電壓為「正」，電路就偏壓 8 伏，使得控制器輸入電壓與馬達轉速呈線性關係，如圖 21 所示意。

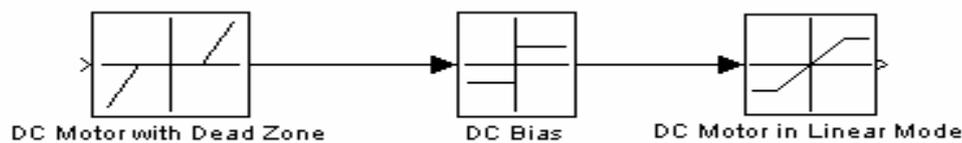


圖 21：馬達響應於加入偏壓後呈線性關係

3.2 電腦週邊監控模組

由於工業生產技術的進步，使用自動化監控技術於各種生產設備是工業上的趨勢，工廠的工程師可以利用電腦監控整個生產流程，例如溫度、壓力、流量...等。一般來說，被監控的機器不只一台，而且可能分散在各地，假如感測器距離監控設備太遠，則會有訊號衰減的問題；因此，感測器的訊號處理工作必須在監測位置就予以完成，處理完後的結果再回傳即可(由電腦輪流查詢)，這種分散各地的監控工作，統一由電腦輪流查詢就是集中管理的架構 [6]，如圖 22：在主控電腦下層為監控模組，而最下層為受監控的設備。

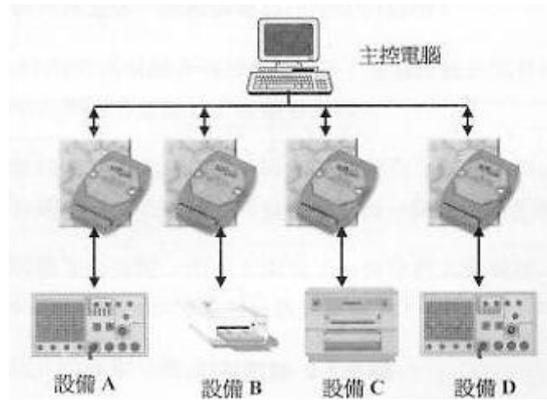


圖 22：集中管理的概念

由於串列通訊的模式是基礎而且廣為大家使用的一種通訊模式，因此集中由電腦管理的概念也可以引用串列通訊的手法予以實現。串列通訊的傳輸標準有 RS-232 及 RS-485，RS-485 匯流排是 RS-232 匯流排的改良標準，在軟體設計上它與 RS-232 匯流排基本上一致，但 RS-485 在通訊速率、傳輸距離、多機連接等方面比 RS-232 提高了許多，所以在工業系統中多使用 RS-485 匯流排，其傳送或接收資料是採用差動傳輸方式，同時使用兩條線（正、負）作傳送或接收，所以傳送過程若有雜訊干擾，接收到的差動訊號對自然會將雜訊消除雜訊。此外，RS-485 傳送距離可達到 1200 公尺之遠，傳送速率最大為 10 Mb/s，以下表 5 為 RS-485 與 RS-232 的性能比較。

表格 5：RS-485 與 RS-232 比較

傳輸協定	RS-232C	RS-485
工作方式	單端	差分
節點數	1 發 1 收	1 發 32 收
最大傳輸速率	20kbps	10Mbps
最大傳輸電纜長度	15 公尺	120 公尺
最大驅動輸出電壓	25V	-7~+12V

本研究有使用到的監控模組包含：RS232-RS485 轉換器、類比電壓輸入模組 (ADAM4024)、類比電壓輸出模組 (ADAM4017) 及繼電器模組 (ADAM4068)，其工作模式於下一節說明。

3.3 控制迴路與控制流程

本研究之電動百葉窗控制目標有兩項：百葉片的「角度」與百葉窗放下的「長度」，因此控制架構中須要有兩個迴路來各別回授控制這兩種狀態：長度控制與角度控制迴路。控制長度時，首先由電腦經由 RS232 端發送字串命令給監控模組，將馬達與電源之間的繼電器(Relay)短路，使得馬達開始轉動，然後長度相差小於 1 公分時，就把繼電器開路，而其中與正負不同電源連接的繼電器，分別可使馬達正轉與反轉，詳細流程如圖 23 與圖 25，長度控制的時域響應如圖 26。角度控制也是同樣的先將繼電器短路，同時送字串命令設定類比電壓輸出模組，此時電位計的角度訊號與設定角度電壓訊號一同送給角度控制器，也就是含有繼電器的 PI 控制器，然後角度誤差小於三度時，繼電器就開路，角度控制完成，詳細流程如圖 24 與圖 25。本節中，電動百葉窗控制所使用的軟體控制，皆由 JAVA 完成。

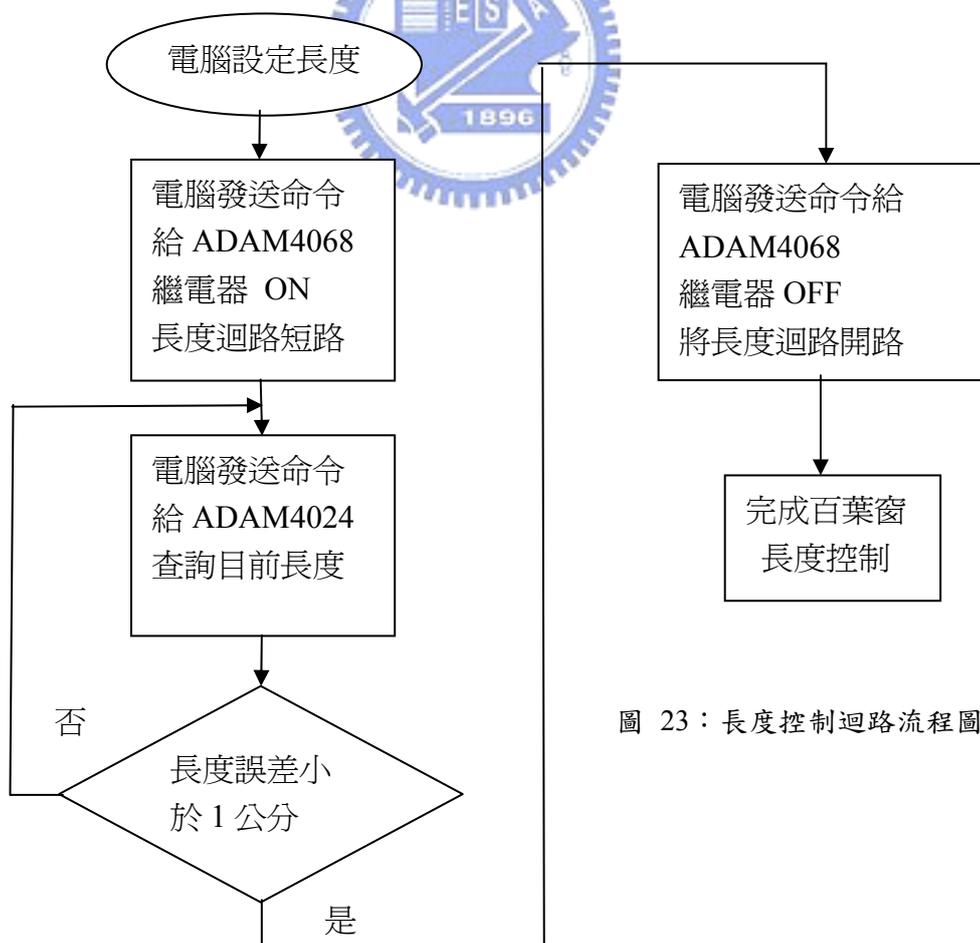


圖 23：長度控制迴路流程圖

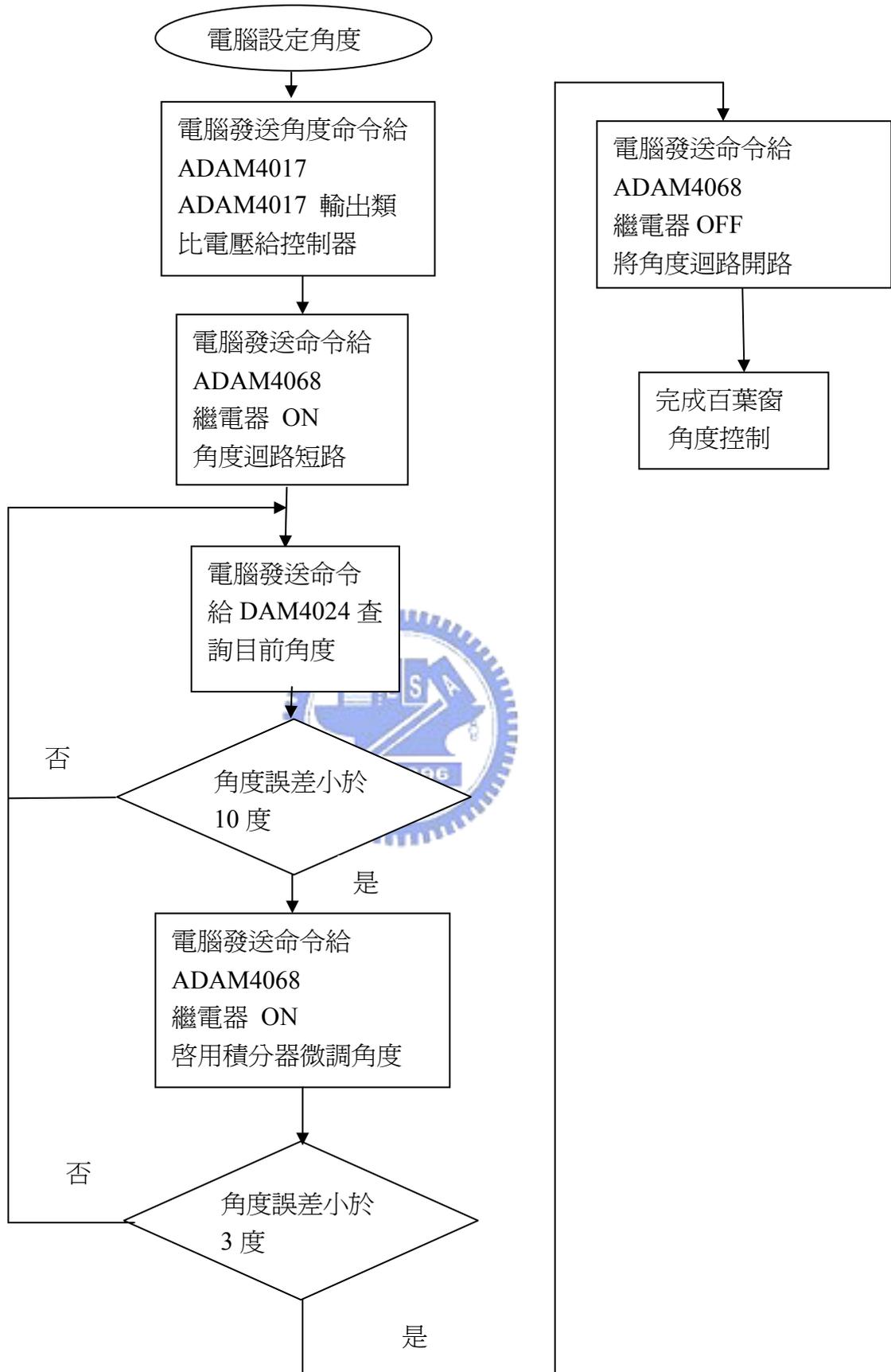


圖 24：角度控制流程圖

以下圖 25 為整個百葉窗狀態(角度與長度)的控制迴路，其中包含轉換器與 3 塊 ADAM 模組、電源、切換式積分角度控制器(I 控制器可由 Relay 切換開啟)以及受控的電動百葉窗馬達；圖中變數 θ 為電位計量測到的百葉片角度， θ_r 為百葉片角度的設定值，而 L 為拉線式電阻尺量測到的百葉窗放下長度。

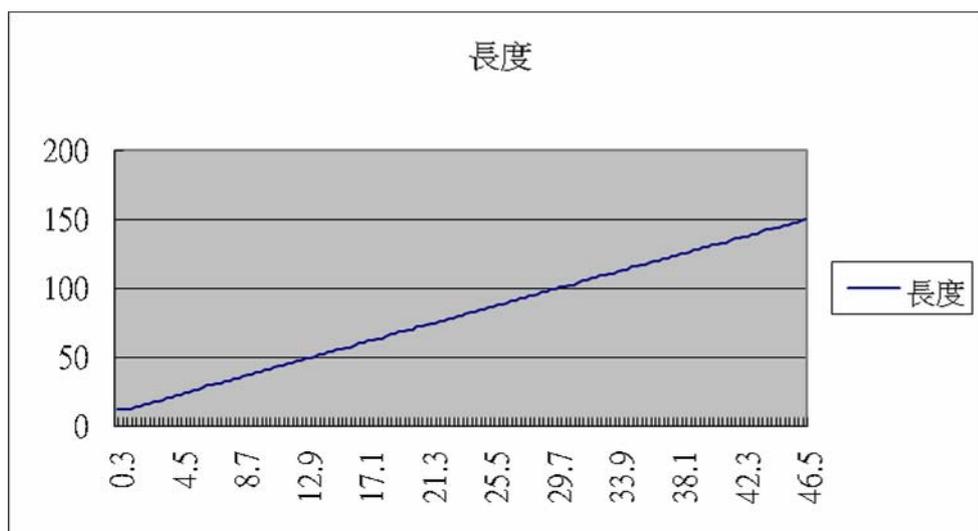
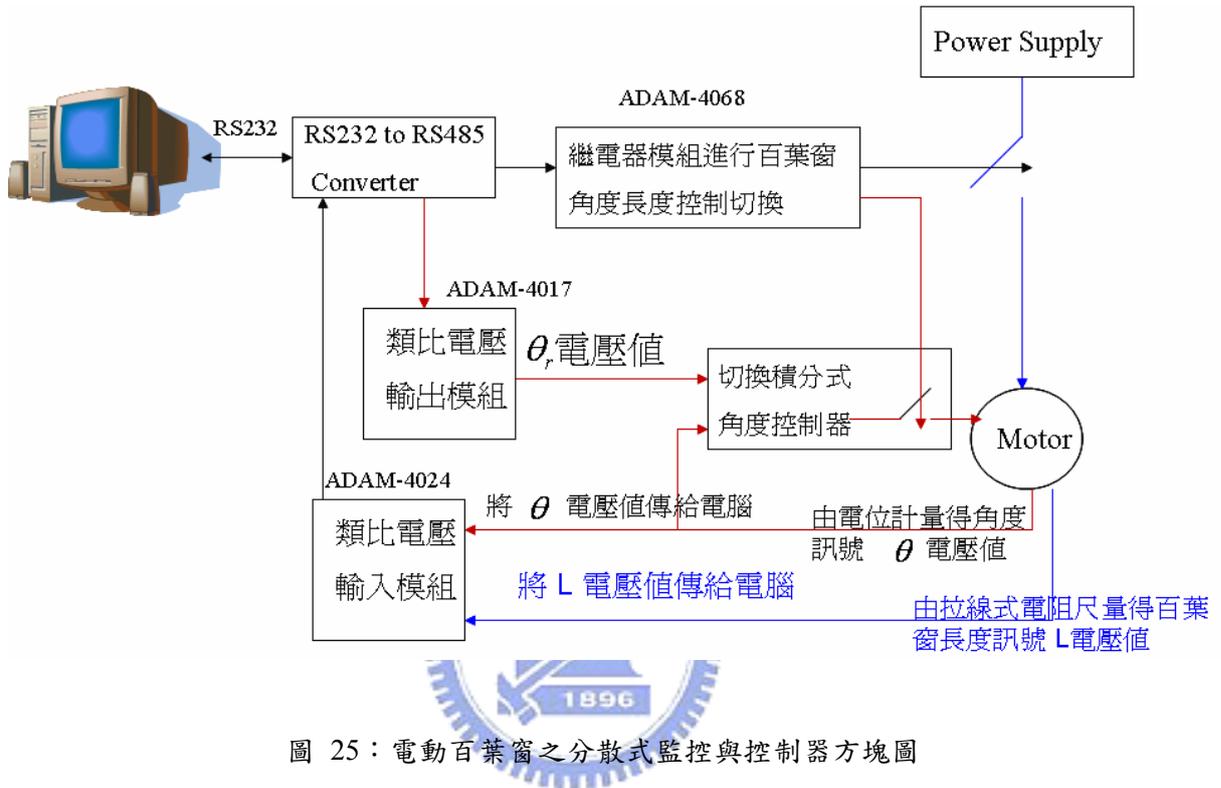


圖 26：長度控制響應：由 13 公分~150 公分約需 47 秒

3.4 角度控制器

根據 B. C. Kuo [7]，一般的直流馬達為”Type 1”系統，當輸入訊號為步級輸入時，其穩態誤差為零，因此理論上只需要設計 P 控制器(比例控制器)就可以控制好。但是本研究所使用的電動百葉窗馬達為特製管狀馬達，實際的馬達數學模式無從而知，而且電位計回授訊號的接點為百葉片，有時候馬達在反轉時細微轉動並沒有辦法帶動百葉片。所以基於種種考量，我們採用稍微複雜的 PI 控制器(比例-積分控制器)，再嘗試調整其中的增益。角度控制器的硬體實作是採用 OP 放大器進行類比控制。

角度控制器的組成元件主要以 PI 控制器以及直流偏壓為主，輸入級為減法器，產生設定角度與實際角度的誤差訊號，輸出級為功率放大器，用來增強電流以推動馬達，如圖 27。另外，為了縮短角度控制的收斂時間，PI 控制器的增益相當大，但若是依此設定，角度相差較大時則積分器產生的電壓劇烈變化，將會使角度控制的暫態響應變差，故我們設定誤差小於 10 度，再將 I 控制器輸入端的繼電器短路，此即為「切換積分式」角度控制器的設計內容。

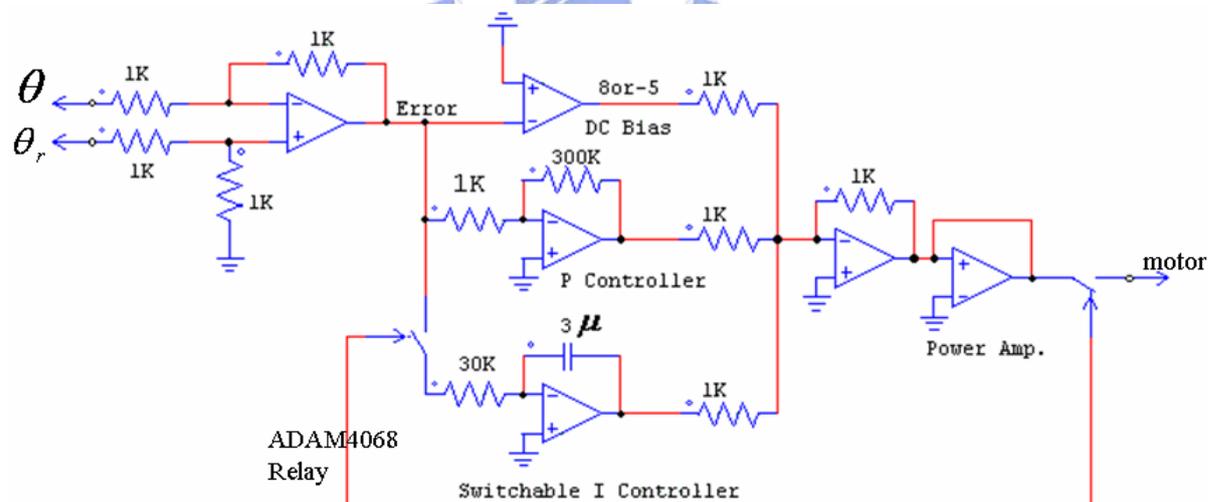


圖 27：百葉片角度控制器硬體架構圖

由於我們不知道電動百葉窗馬達的物理模型，所以在設計 PI 控制器的增益參數時，我們只能由時域響應作為設計的參考，以下幾張圖是不同增益參數及切換策略在 0~60 度角度變化的響應圖，橫軸為時間(秒)，縱軸為電位計角度的電壓值。圖 28 顯示只有小增益 P 控制器進行角度控制，增益為 50，收斂(誤差角度小於 3 度)時間 2.6 秒；圖 29 顯示使用小增益 PI 控制器，其中 P 增益為 50、I 增益為 10，圖 29 之上圖顯示

收斂時間超過 13 秒，由圖 29 之下圖有兩條訊號線，其中一條呈現倒三角形的是積分器輸出的訊號，由此可以明顯地看出暫態響應被積分控制器破壞；圖 30 採用「切換積分式」大增益 PI 控制器，增益分別為 300 與 100，當誤差角度大於 10 度時，只有 P 控制器在運做，而當誤差角度小於 10 度時，則切換為 PI 控制器運作，收斂時間為 1.68 秒。

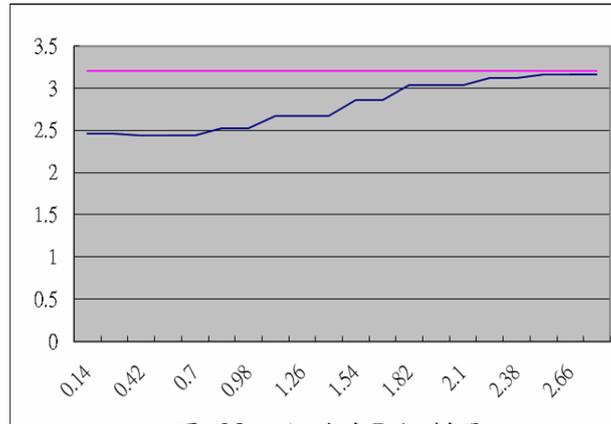


圖 28：小增益 P 控制器

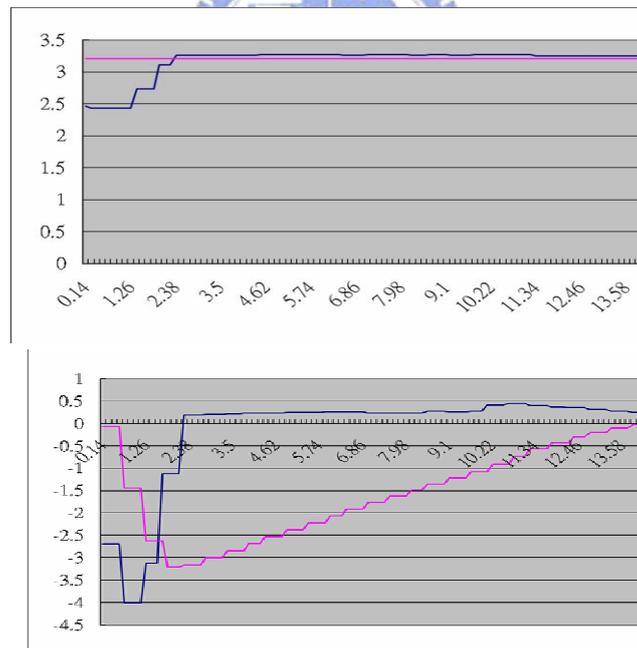


圖 29：小增益 PI 控制器

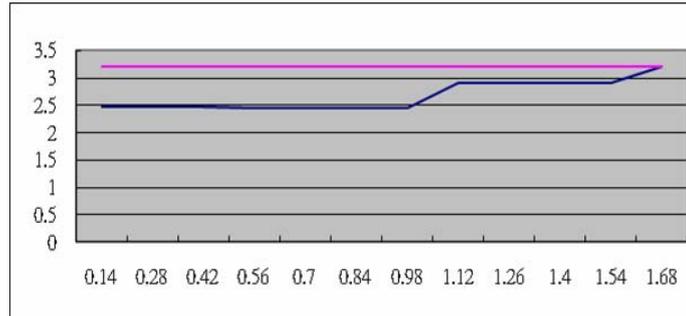


圖 30：大增益「切換積分式」PI 控制器

由多次實驗可發現，大增益 P 控制器與大增益「切換積分式」PI 控制器的時域響應差不多，但如果將收斂條件改為「誤差小於 1.5 度」，並且進行較小的角度改變，則「切換積分式」PI 控制器的收斂時間有較短的趨勢，如圖 31 與圖 32，上圖為大增益 P 控制器響應，收斂時間為 4 秒；下圖為切換積分式 PI 控制器的時域響應，收斂時間為 1.6 秒。圖中橫軸為時間(秒)，縱軸為角度。

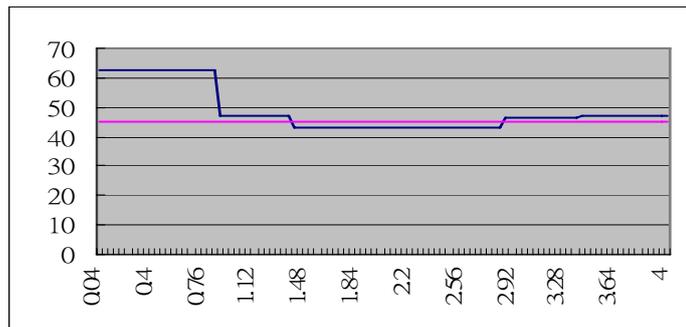


圖 31：大增益 P 控制器在改變收斂條件後的響應

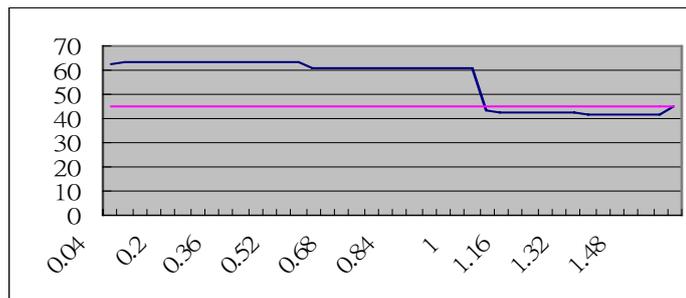


圖 32：大增益切換積分式 PI 控制器在改變收斂條件後的響應

第四章 無線感測網路與日光監控

由於建築照明計算相當複雜，所以許多研究使用建築光學模擬軟體 RADIANCE，RADIANCE 採用 Ray-Tracing 技術，可以進行照度精密模擬計算。本研究有別於其他 RADIANCE-Based 日光控制的研究，創新之處在於使用「無線感測網路」蒐集真實的日光資料，建立「室內日光分布對照百葉窗狀態」的模型，以及利用感測網路監測室外日照情況，以調適模型的尺度大小。

由第三章電動百葉窗控制與本章的無線照度感測器結合，構成了一個完整的日光監控硬體架構，如圖 33。整個硬體結構是利用電腦 RS232 通訊埠，發送命令控制「致動器端」(Actuators)，再將「無線照度感測網路端」(WSN)接收到的訊號，送到其中一個資料接收器(Sink)，最後再送至另一個 RS232 通訊埠回傳給電腦，此日光監控架構與文獻[9]之室內燈光控制架構是類似的。

經過日光照度預測後，接著進行的是日光最佳化，此最佳化對室內三個感測點皆有考慮到，如 4.4 節所述；而最後進行的是單感測點照度回授控制。日光最佳化的過程可視為「粗略調整」，單點照度回授控制則可視為「細微調整」，粗略調整是希望百葉窗能夠快速調整到最佳狀態，一次到位，以減少回授控制時所做的搜尋動作。

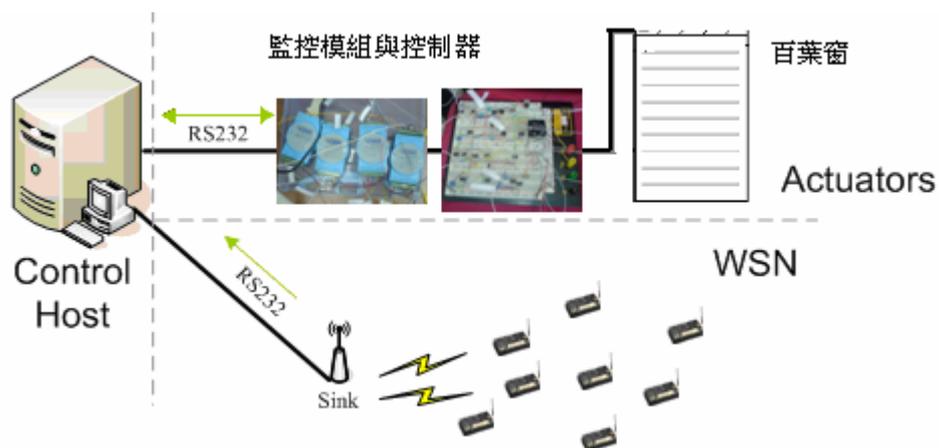


圖 33：完整的日光監控硬體架構

4.1 照度感測器工作原理

本研究所使用的照度感測器是採用德州儀器公司所生產的 TSL230，它是一個照度對頻率的轉換器(Light-to-Frequency Converters)，其中包含的元件有感光二極體(Photodiode)和電流對頻率轉換器(Current-to-Frequency Converter)，如圖 34。

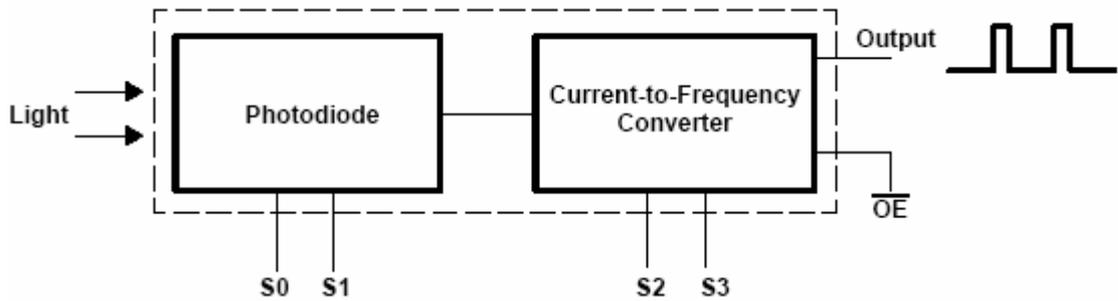


圖 34：照度感測器的結構圖

由圖 33 之無線感測網路端，資料接收器(Sink)會將各個感測器的數值傳給電腦 RS232 端，其中所傳的數值是由交大資工所所設定的，本研究再將此數值與精密的照度計相比較，發現該數值與照度呈現一線性關係，所以我們利用類似(4)式的線性函數，將此數值轉為照度(Lux)。

4.2 無線感測網路之照度感測器建置

照度感測器有兩個功能：監測「室外日照強度」與「室內日光分布」。監測室外日照強度的感測器建置在玻璃窗面內側，如圖 35 及圖 36：玻璃面上平均佈置 5 個感測器，是假設感測器的垂直分布所得到的感測值與太陽的照射角度(或觀測時間)有關，而且多個感測器比起單一個感測器得到的感測值，更具有參考價值。所以有了這 5 個感測值，就可以定義向量

$$X = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5]^T \quad (5)$$

X 稱為日光條件(Daylight Condition)，是用來表示室外日照強度的向量，其作用為預測室內照度的其中一個調節照度大小的向量，在 4.3 與 4.4 節有詳盡的敘述。而在文獻[25]中有提到日光因子(Daylight Factor)一詞，該篇論文提到室內照度的預測值等於室外照度值乘以日光因子。

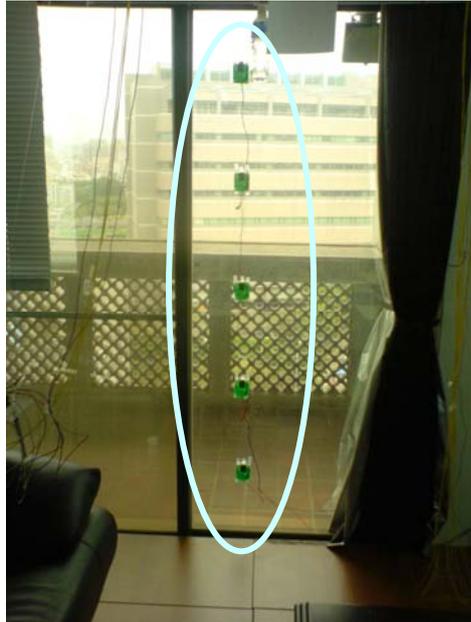


圖 35：窗面內側上 5 個無線照度感測器

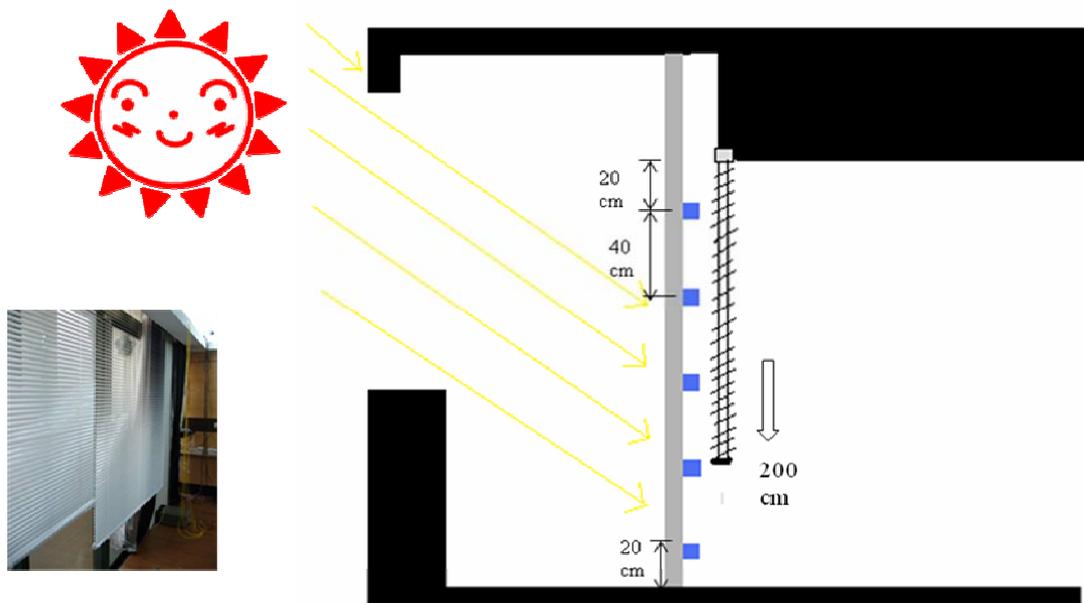


圖 36：無線照度感測器建置剖面圖

另外，監控室內日光分布的實作部份，是在室內佈署 3 個感測器，如圖 37(編號 6、7、8)，並將這 3 個感測器讀值定義為整個室內日光系統的輸出 Y ：

$$Y = [y_1 \quad y_2 \quad y_3]^T \quad (6)$$

其中感測器 6 對應於 y_1 ，感測器 7 對應於 y_2 ，感測器 8 對應於 y_3 。

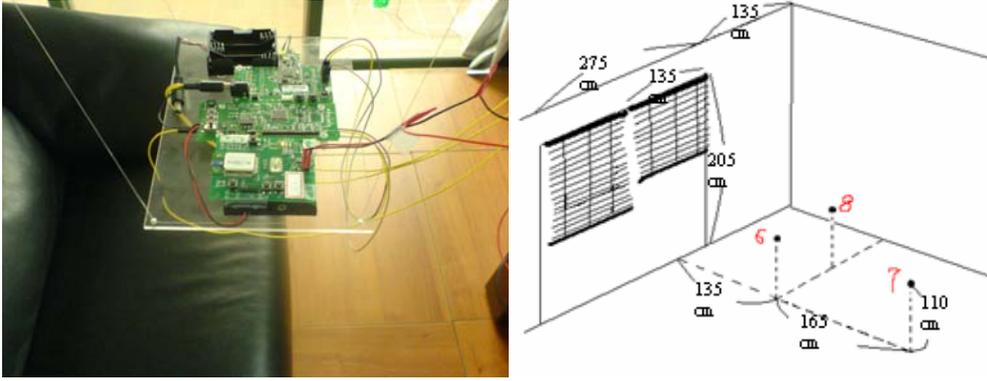


圖 37：佈署在室內的 3 個無線照度感測器

4.3 日光監測實驗研究與建模方法

本節的目標是要解說如何建立「單位化回歸模型」(Normalized Regression Model)；但由於室內日光分佈資料的搜集需要大量資料而且長時間觀察，所以我們先簡化目標，首先利用百葉窗不同的角度與佈署在室內的三個感測器的感測值，建立一個「照度對應於角度」的回歸曲線模型，如圖 38 所示，圖中座標橫軸為百葉片角度，縱軸為感測到的照度。回歸曲線係利用 MATLAB 軟體的 Curve Fitting Toolbox 的高斯模型來建立，其擬合的程度良好。高斯模型(Gaussian Model)可表示為：

$$\hat{y}(\theta) = \sum_{i=1}^n a_i \cdot \exp\left[-\left(\frac{\theta - b_i}{c_i}\right)^2\right] \quad (7)$$

其中 a_i 是大小值(Amplitude)， b_i 是中點(Centroid)、 c_i 是峰寬(Peak Width)，而 n 是波峰個數(Peak Number)。

照度預測值採用角度的高斯函數的原因是：由於百葉窗的照度對應角度的分佈，照度的大小值、最亮時的角度、照度隨角度變化的緩急皆可由 a_i 、 b_i 、 c_i 調整，以及文獻[2]採用角度的高斯函數作為日光的穿透率；此外，如同 2.6.2 節所提之文獻[5]中提到，高斯函數的疊加符合 Stone-Weierstrass 定理，可以用來表示成任何函數，或是用來擬合各種資料分佈。

圖 38 中 3 個感測器量到的值皆 2 個高斯波峰($n=2$)進行擬合，其中 y_1 可表示為： $\hat{y}_1(\theta) = 218.6 \cdot \exp\left(-\left(\frac{\theta - 28.13}{39.6}\right)^2\right) + 218.8 \cdot \exp\left[-\left(\frac{\theta + 8.61}{52.15}\right)^2\right]$ ，其中函數 $y_1(\theta)$ 的變數只有

角度 θ ，如此可以控制的維度只有一維，而且(7)式也與室外日照強度 X 無關，所以在接下來的介紹會繼續擴展此式，成為 $\hat{Y}(X, \theta, l)$ 。

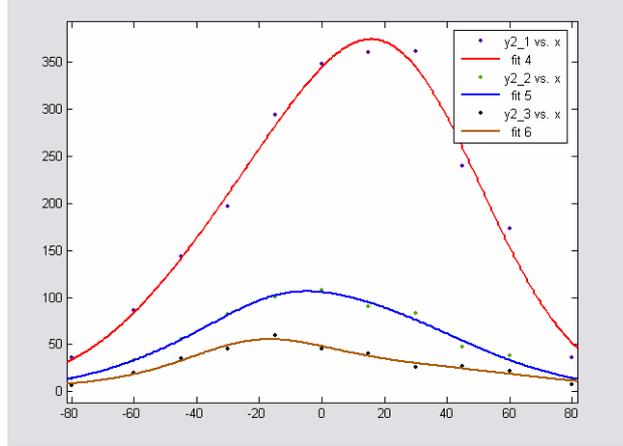


圖 38：照度感測資料與高斯模型

為了將日光條件 X 以及百葉窗放下長度加入輸出函數 l 的變數、並且擴展(7)式，本論文提出一個嶄新的方法：首先將「未放下百葉窗的估測輸出」求出。在本篇研究，「未放下百葉窗的估測輸出」定義為尺度向量 (Scaling Vector) $\hat{Y}(X) = [\hat{y}_1(X) \quad \hat{y}_2(X) \quad \hat{y}_3(X)]^T$ ，即估測此輸出目前只受到日光條件影響，而與百葉窗狀態無關(百葉窗完全拉上)。 $\hat{Y}(X)$ 其中的 3 個元素如(8)式：

$$\begin{aligned} \hat{y}_1(X) &= W_1 \cdot X = [w_{11} \quad w_{12} \quad w_{13} \quad w_{14} \quad w_{15}] \cdot [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5]^T \\ \hat{y}_2(X) &= W_2 \cdot X = [w_{21} \quad w_{22} \quad w_{23} \quad w_{24} \quad w_{25}] \cdot [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5]^T \\ \hat{y}_3(X) &= W_3 \cdot X = [w_{31} \quad w_{32} \quad w_{33} \quad w_{34} \quad w_{35}] \cdot [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5]^T \end{aligned} \quad (8)$$

此目的是為了將完整的資料 $Y(X, \theta, l)$ 進行單位化(Normalize)；而上式其中的向量 W_1 、 W_2 、 W_3 分別為產生 $\hat{y}_1(X)$ 、 $\hat{y}_2(X)$ 、 $\hat{y}_3(X)$ 權值元素。求得權值向量 W_1 、 W_2 、 W_3 有兩種方法：一種是利用最小平方誤差法，將5月27日~5月30日觀測得到的18筆測試資料代入演算法，如(9)式：

$$\begin{aligned} W_1 &= (X_{test}^T \cdot X_{test})^{-1} \cdot X_{test}^T \cdot Y_{1_test} \\ W_2 &= (X_{test}^T \cdot X_{test})^{-1} \cdot X_{test}^T \cdot Y_{2_test} \\ W_3 &= (X_{test}^T \cdot X_{test})^{-1} \cdot X_{test}^T \cdot Y_{3_test} \end{aligned} \quad , \quad X_{test} \in R^{18 \times 5} \quad , \quad Y_{test} \in R^{18 \times 1} \quad (9)$$

由(8)式，可以得到結果 $W_1 = [-0.1970 \quad 0.2965 \quad -0.0035 \quad 0.0494 \quad -0.0541]$ 、

$$W_2 = [0.0324 \quad 0.011 \quad 0.0244 \quad -0.0394 \quad 0.0172]、W_3 = [0.0209 \quad -0.0015 \quad 0.1446 \quad -0.2205 \quad 0.1358]。$$

$\hat{y}_1(X)$ 、 $\hat{y}_2(X)$ 、 $\hat{y}_3(X)$ 尺度元素的第二種求法，本研究稱為「平均法」求得權值向量，即是向量中每一個元素值都是相同的，首先分別定義 3 個平均權值向量為(10)式：

$$\begin{aligned} W_1 &= factor1 \cdot [0.2 \quad 0.2 \quad 0.2 \quad 0.2 \quad 0.2] \\ W_2 &= factor2 \cdot [0.2 \quad 0.2 \quad 0.2 \quad 0.2 \quad 0.2] \\ W_3 &= factor3 \cdot [0.2 \quad 0.2 \quad 0.2 \quad 0.2 \quad 0.2] \end{aligned} \quad (10)$$

上式中 $factor$ 為一個常數，求法如(11)式：

$$\begin{aligned} factor1 &= \frac{y_{1test}(X)}{[0.2 \quad 0.2 \quad 0.2 \quad 0.2 \quad 0.2] \cdot X} \\ factor2 &= \frac{y_{2test}(X)}{[0.2 \quad 0.2 \quad 0.2 \quad 0.2 \quad 0.2] \cdot X} \\ factor3 &= \frac{y_{3test}(X)}{[0.2 \quad 0.2 \quad 0.2 \quad 0.2 \quad 0.2] \cdot X} \end{aligned} \quad (11)$$

上式中 X 為先前(5)式提到的日光條件，而 $y_1(X)$ 、 $y_2(X)$ 、 $y_3(X)$ 則是我們另外定義的「未放下百葉窗的實際輸出」，其為感測器所感測到的「真實」照度，與先前提到(8)式尺度元素的估測照度 $\hat{y}_1(x)$ 、 $\hat{y}_2(x)$ 、 $\hat{y}_3(x)$ 相對應；test 表示某一筆測試資料，為了測試(10)式的準確度，我們取「利用(10)式得到的 8 筆尺度元素」分別與 8 筆實際輸出相比較，如圖 39，蒐集的時間是從 5 月 27 日~5 月 29 日。此線斜率可作為權值向量的修正係數。故可擴展(10)式為(12)式，因此(12)式包含了 8 筆測試資料的資訊。

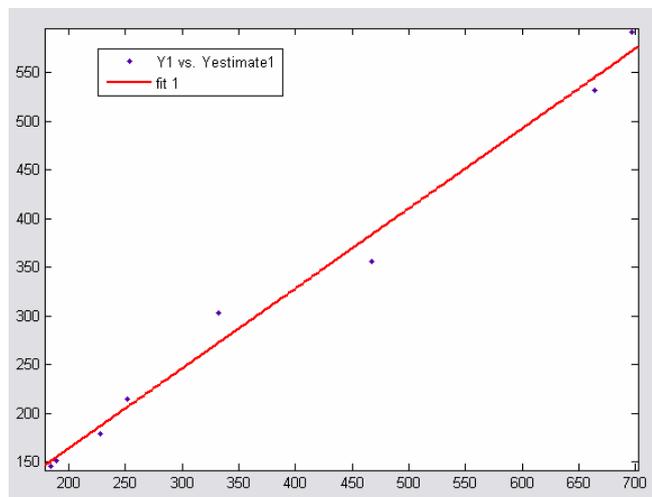


圖 39：以直線擬合 y_1 對應 \hat{y}_1 的 8 筆測試資料

$$\begin{aligned}
W_1 &= slope1 \cdot factor1 \cdot [0.2 \ 0.2 \ 0.2 \ 0.2 \ 0.2] \\
W_2 &= slope2 \cdot factor2 \cdot [0.2 \ 0.2 \ 0.2 \ 0.2 \ 0.2] \\
W_3 &= slope3 \cdot factor3 \cdot [0.2 \ 0.2 \ 0.2 \ 0.2 \ 0.2]
\end{aligned} \tag{12}$$

上式中 slope 表示圖 30 中直線的斜率，作為統計後修正權值向量的係數。由(12)式，我們可以得到權值向量： $W_1=[0.0247 \ 0.0247 \ 0.0247 \ 0.0247 \ 0.0247]$ 、 $W_2=[0.0093 \ 0.0093 \ 0.0093 \ 0.0093 \ 0.0093]$ 、 $W_3=[0.0156 \ 0.0156 \ 0.0156 \ 0.0156 \ 0.0156]$ 。

接下來蒐集「百葉窗放下」的日光資料，即 $Y(X, \theta, l)$ ，取樣的方法是：首先固定長度 $l=25$ 公分然後調整角度，取 10 個角度(75,60,45,30,15,0,-15,-30,-45,-60 度)時所感測到的資料，每筆資料包含照度輸出值 $Y(X, \theta, l)$ ：(6)式中 3 個感測值與日光狀態(5)式中 5 個感測值共 8 個值，如此可獲得一組照度對角度變化的資料，然後再複製此法取長度 $l=45$ 公分時，取得另一組照度對角度變化的資料，依此每隔 20 公分取一組資料，取到長度 $l=185$ 公分共 9 組，所以總共有 90 個百葉窗狀態的取樣資料。而 90 個百葉窗狀態對應於 $y_1(X, \theta, l)$ 、 $y_2(X, \theta, l)$ 、 $y_3(X, \theta, l)$ 的資料取樣經過內插處理，分別如圖 40、圖 41、圖 42 所示，其中平面兩軸為百葉窗的狀態，縱軸大小為照度(lux)。而這三筆用來建立模型的資料，是搜集於 5 月 29 日上午 10 點半左右。

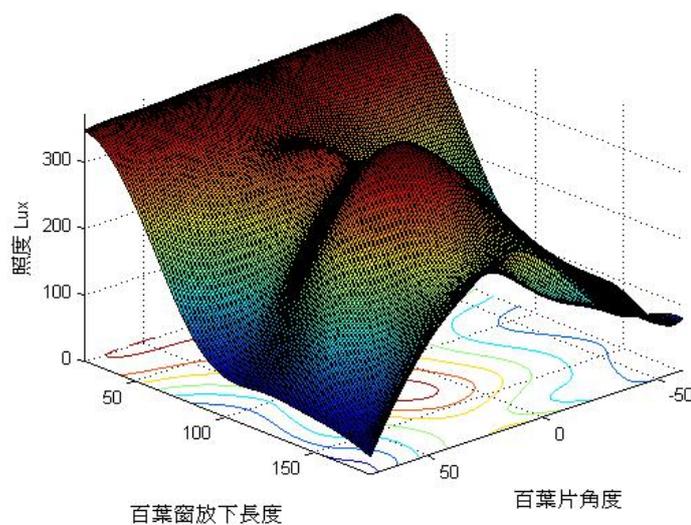


圖 40：Sensor6 (y_1) 的照度變化

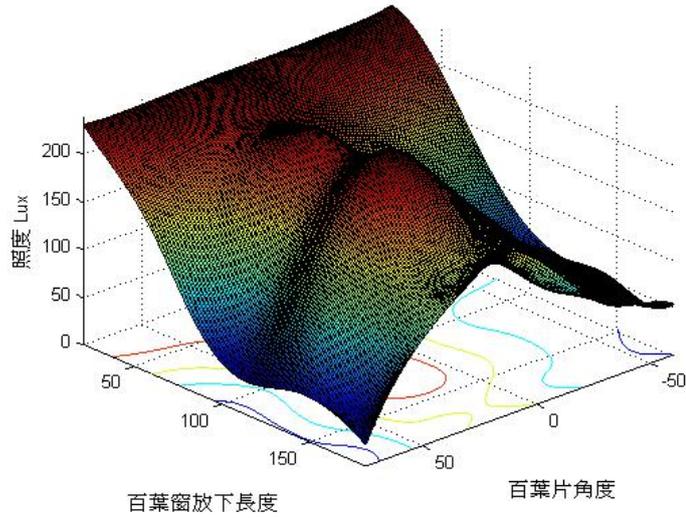


圖 41：Sensor7 (y_2) 的照度變化

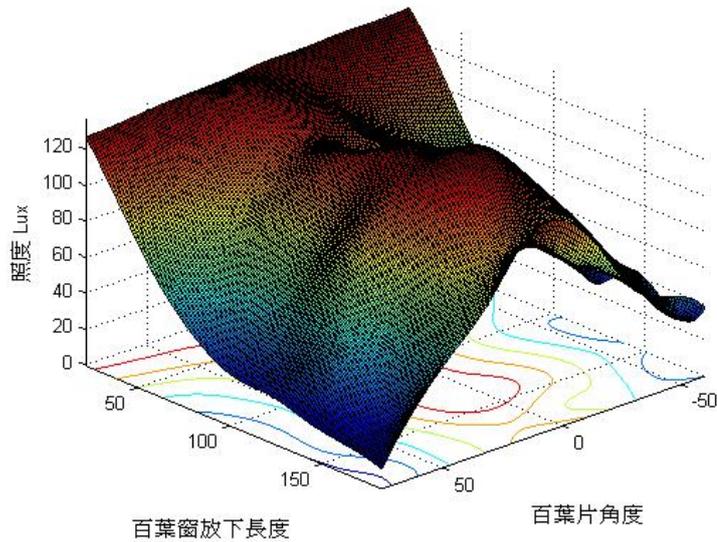


圖 42：Sensor8 (y_3) 的照度變化

在獲得了包含日光條件的 90 筆照度資料，接下來的步驟就是將這筆資料單位化 (Normalize)，並接著利用單位化的資料建立回歸模型。資料單位化的方法，即把百葉窗放下的感測資料值 $Y(X, \theta, l)$ ，除以(8)式尺度向量 $\hat{Y}(X)$ 的元素，如(13)式，這裡定義單位化資料為 $\tilde{Y}(\theta, l)$ 。

$$\begin{aligned}
 \tilde{y}_1(\theta, l) &= \frac{y_1(X, \theta, l)}{\hat{y}_1(X)} \\
 \tilde{y}_2(\theta, l) &= \frac{y_2(X, \theta, l)}{\hat{y}_2(X)} \\
 \tilde{y}_3(\theta, l) &= \frac{y_3(X, \theta, l)}{\hat{y}_3(X)}
 \end{aligned} \tag{13}$$

得到如(13)式的單位化資料以後，接著就可以建立單位化回歸模型。首先將 90 筆資料依固定長度、變動角度，來建立高斯函數，如前述(7)式，共可得到 9 個高斯函數；然後將這 9 個高斯函數的係數 a_i 、 b_i 、 c_i ，改變為 l 的函數，也就是再建立 3 個回歸模型。

$$\begin{aligned}
 a_i &= k_a \cdot l^{m_a} + n_a, \text{ 其他} \\
 &= k_a \cdot l^3 + m_a \cdot l^2 + n_a \cdot l + p_a, \hat{y}_3 \text{ 的 } a_2 \\
 b_i &= k_b \cdot l^{m_b} + n_b \\
 c_i &= k_c \cdot l^{m_c} + n_c
 \end{aligned} \tag{14}$$

上式中 k_a 、 k_b 、 k_c 、 m_a 、 m_b 、 m_c 、 n_a 、 n_b 、 n_c 、 p_a 皆為常數。因此(14)式的結果可代入(7)式中擴展，最後得到的單位化回歸模型輸出 $\hat{Y}(\theta, l)$ 如(15)式。

$$\begin{aligned}
 \hat{y}_1(\theta, l) &= (2.257 \cdot l^{-0.266}) \cdot \exp\left[-\left(\frac{\theta - 37.37 \cdot l^{-0.1107}}{4.28 \cdot 10^5 \cdot l^{-2.218} + 29.15}\right)^2\right] \\
 &\quad + (0.165 \cdot l^{0.1356}) \cdot \exp\left[-\left(\frac{\theta - 376.2 \cdot l^{-0.5059}}{32.38 \cdot l^{0.1257}}\right)^2\right] \\
 \hat{y}_2(\theta, l) &= (0.9245 \cdot l^{-0.01126}) \cdot \exp\left[-\left(\frac{\theta - 0.006126 \cdot l^{1.374}}{4.37 \cdot 10^5 \cdot l^{-2.283} + 48.82}\right)^2\right] \\
 \hat{y}_3(\theta, l) &= (-0.8545 \cdot l^{0.1113} + 2.24) \cdot \exp\left[-\left(\frac{\theta - (42.39 \cdot l^{0.0447} - 29.25)}{2.703 \cdot 10^5 \cdot l^{-1.99} + 25.32}\right)^2\right] \\
 &\quad + (2.317 \cdot 10^{-7} \cdot l^3 - 0.0001064 \cdot l^2 + 0.0155 \cdot l - 0.3497) \\
 &\quad \cdot \exp\left[-\left(\frac{\theta + 107.3 \cdot l^{-0.01144}}{33.08 \cdot l^{0.1351}}\right)^2\right]
 \end{aligned} \tag{15}$$

以上 3 個單位化回歸模型圖形分別如圖 43、44、45 所示。

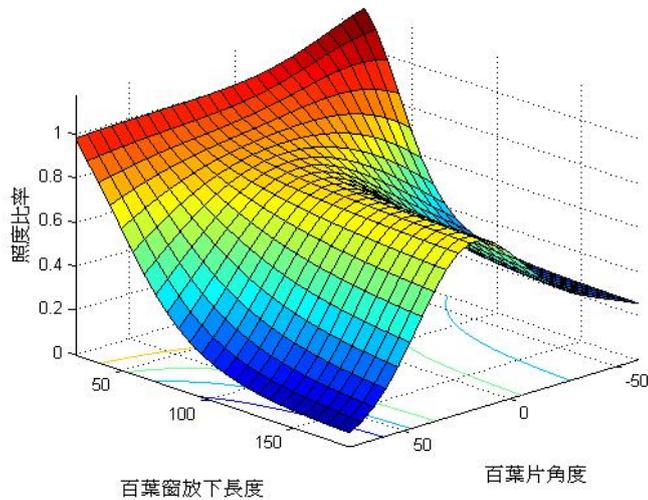


圖 43：Sensor6 的單位化回歸模型輸出 $\hat{y}_1(\theta, l)$

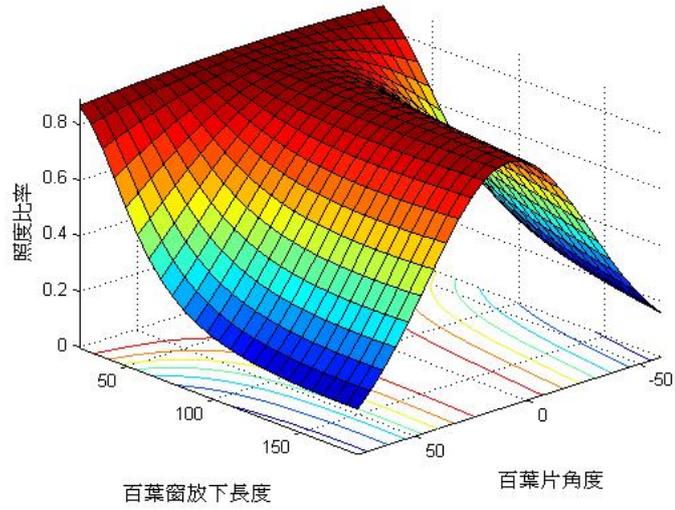


圖 44：Sensor7 的單位化回歸模型輸出 $\hat{y}_2(\theta, l)$

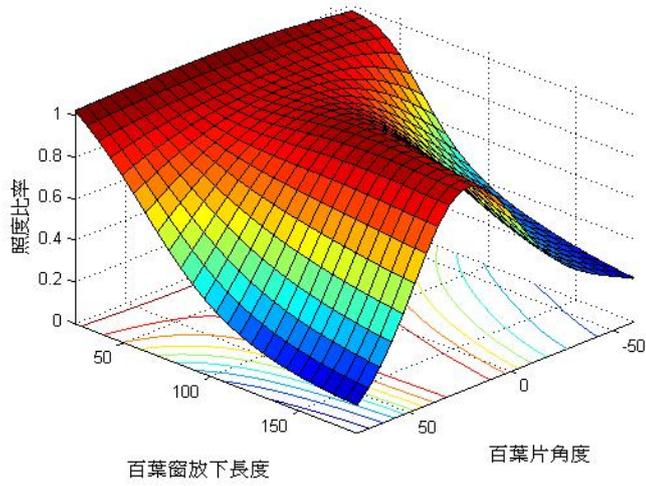


圖 45：Sensor8 的單位化回歸模型輸出 $\hat{y}_3(\theta, l)$

本節討論的單位化模型，可以作為下一節探討的預測最佳化的內建模型。單位化模型建模的簡易流程如圖 46。

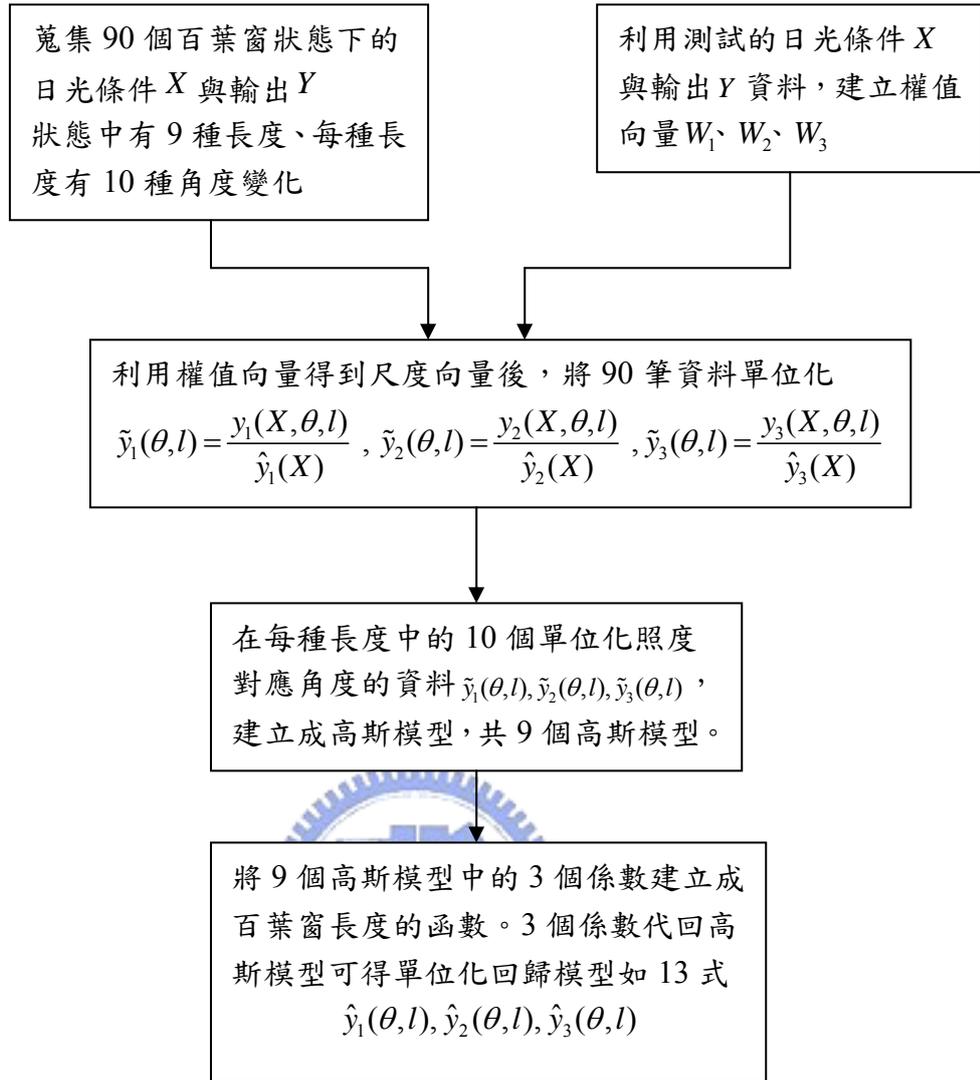


圖 46：單位化回歸模型建模流程

4.4 室內日光預測與最佳化架構

本節我們將「內建模型」、百葉窗狀態以及最佳化演算法結合起來，就構成了一個室內日光預測與最佳化的架構。首先本節先定義百葉窗狀態為向量 U ：

$$U = [\theta \quad l]^T \quad (16)$$

式中 θ 為百葉窗角度， l 為百葉窗放下的長度。另外定義使用者設定輸出定義為 Y_d ：

$$Y_d = [y_{d1} \quad y_{d2} \quad y_{d3}]^T \quad (17)$$

有了以上兩個向量後，再加上模型預測的輸出就可以得到完整的預測與最佳化架

構。模型的估測輸出即是將百葉窗狀態輸入，可以得到室內感測照度輸出的估測值 $\hat{Y}(X, \theta, l)$ ，而此估測值為上節所提到(15)式的「單位化回歸模型輸出」與(8)式尺度向量中元素的乘積，如(18)式，示意圖如圖 47：

$$\begin{aligned} \hat{y}_1(X, \theta, l) &= \hat{y}_1(X) \cdot \hat{y}_1(\theta, l) \\ \hat{y}_2(X, \theta, l) &= \hat{y}_2(X) \cdot \hat{y}_2(\theta, l) \\ \hat{y}_3(X, \theta, l) &= \hat{y}_3(X) \cdot \hat{y}_3(\theta, l) \end{aligned} \quad (18)$$

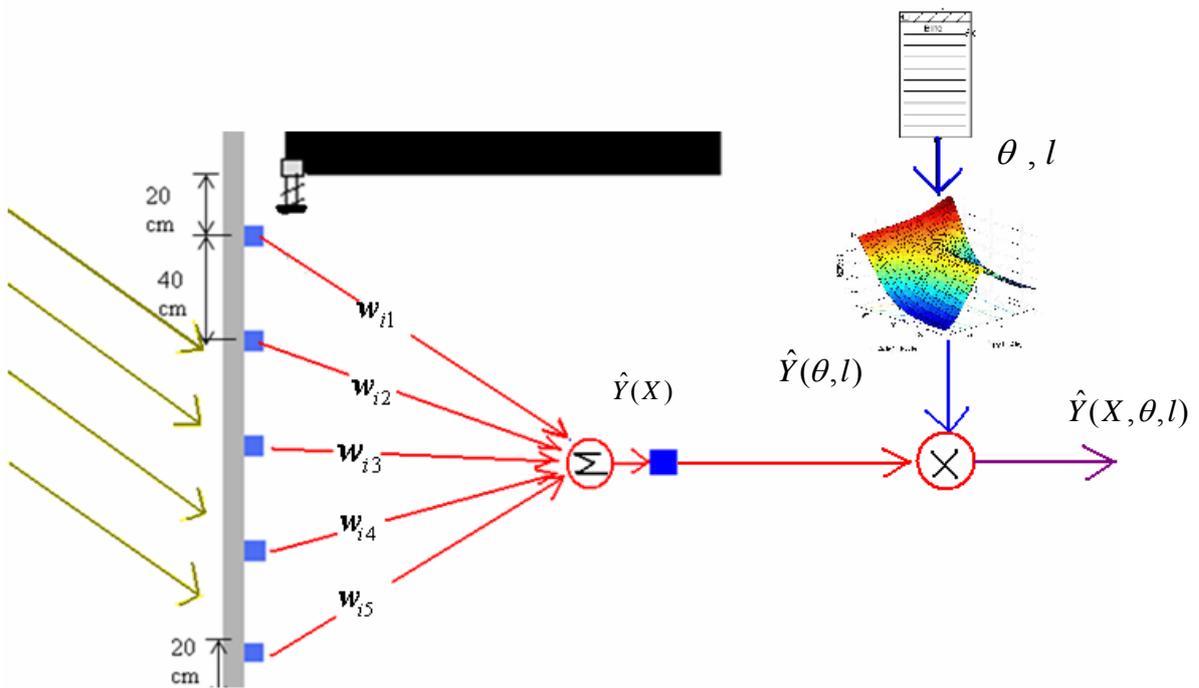


圖 47：預測輸出 $\hat{Y}(X, \theta, l)$ 示意圖

由(18)式與上圖可以發現，「室內的預測輸出照度值」會隨「室外的日光條件」而改變，如同在 4.2 節所闡述的，此概念與文獻[25]中的日光因子(Daylight Factor)為類似的觀念。

然後，將以上定義之向量以及(5)式的日光條件代入預測控制的架構中，就可以得到如圖 48 的結構，此架構是參考 2.6.1 節之內建模型控制而設計。

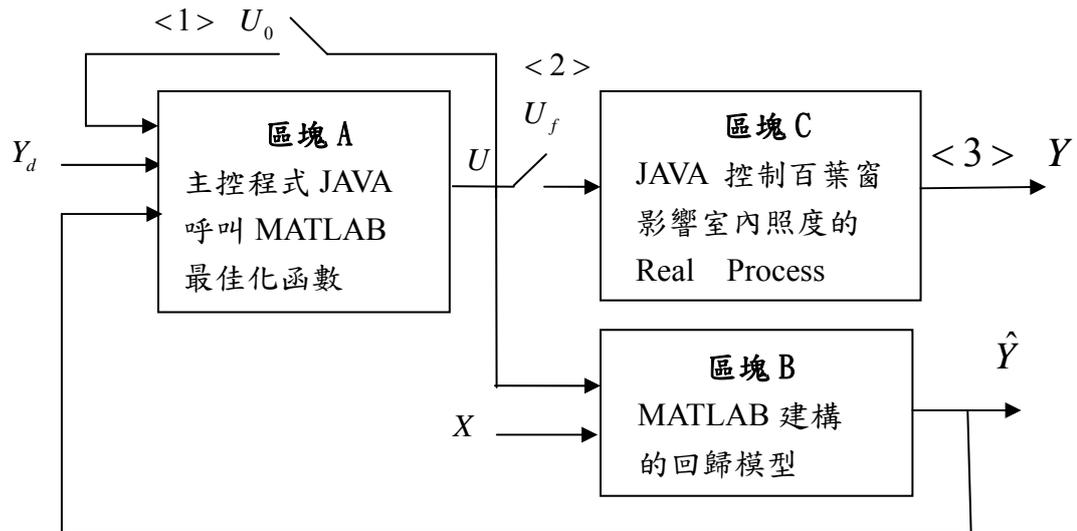


圖 48：室內日光預測與最佳化的架構

上圖中「區塊 B」所扮演的角色，就如圖 14 的 Forward Model；「區塊 A」則可對應為圖 15 的 Inverse Model；「區塊 C」則可對應為圖 14、圖 15 的 Environment。區塊 A 進行最佳化的方法，是利用 MATLAB 指令”fmincon”將 Y_d 與 \hat{Y} 的誤差最小化，如(18)式，此處採用 fmincon 函數的理由與 2.4 節相同，主要是誤差函數為非線性函數。

最佳化的步驟如下：首先由使用者輸入一組 Y_d ，此時圖中標記<1>的百葉窗初始狀態也輸入給最佳化函式，以作為最佳化函式搜尋的起始點；接著 MATLAB 會讀取目前的日光條件 X 並求出照度的預測輸出值 \hat{Y} ，代入誤差函數(18)式後不斷地尋找最佳解；然後將求出最小化誤差時得到的最佳百葉窗狀態如圖中標記<2>的 U_f ，傳送回給 JAVA 程式並控制電動百葉窗狀態；經過百葉窗調整完以後，就得到圖中標記<3>照度感測器的讀值 Y 。而限於百葉窗硬體的限制，上述所使用的 fmincon 最佳化指令為有限制的最佳化，我們限制最佳解的狀態極小值限制為長度 13 公分、角度-60 度，極大值限制為長度 185 公分、角度 75 度。

$$Error = (y_{d1} - \hat{y}_1)^2 + (y_{d2} - \hat{y}_2)^2 + (y_{d3} - \hat{y}_3)^2 \quad (19)$$

上式中的 $Error$ 即是 Y_d 與 \hat{Y} 的誤差的平方和。另外，最佳化演算法是使用數值方法搜尋運算，所以演算法要輸入運算搜尋起始點(Initial Point)，在圖 48 的架構裡是採用啟動演算法當時的百葉窗狀態 U_o ，如此設計是期望可以求出距離 U_o 最近的局部最

佳百葉窗狀態，而不同的搜尋起始點則有可能求出不同的最佳解。

以控制的觀點，本節所介紹的預測與最佳化結構為開迴路控制，在 5.3 節有詳盡的數據探討，模型的準確度將是控制結果好壞的關鍵之一，因此下一節將引入照度回授控制以補強開迴路控制的不足。

4.5 單感測點照度回授控制

4.4 節最佳化架構的實驗結果記錄在 5.3 節，而根據 5.3 節的數據來探討，我們發現若是照度設定值合理(預測的效能誤差小)，造成效能誤差變大的主因即是預測誤差變大，尤其是 y_1 (Sensor6 的照度值)與 y_{d1} 的誤差最大，所以本節就針對改善 y_1 的誤差，進行單感測點(或簡稱單點)的照度回授控制。

由於本日光監控平台採用 Rs232 傳輸，而且照度感測器在改變照度值時需要約 1 秒多的時間才會到達穩態，所以照度的回授控制採用的是「逐步」搜尋最佳百葉窗狀態，而不是即時控制，所謂的逐步是指每調整完成一次百葉窗後，再讀取照度值，然後再由照度的誤差等資訊去調整百葉窗。本研究所設計的單點照度回授控制器是屬於比例控制器，下圖 49 為此控制器設計的原理，此原理參考了照度對應角度的模型而設計。

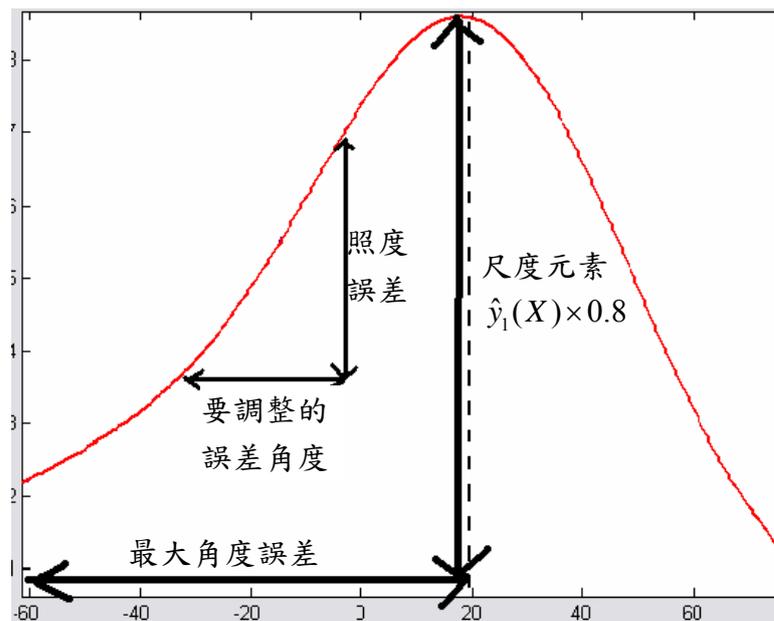


圖 49：照度回授控制器設計之模型參考圖

根據圖 49 的推論來設計百葉片角度的控制法則，我們先將角度調整的方向分成兩種不同的情況，這兩種情況以照度最大值發生處(圖中虛線處)：20 度作為判斷條件，原因是斜率的正負，或是更明確地說，是由於改變角度時所造成的照度變化剛好相反，所以如同(20)式所設定，當目前角度小於 20 度時，新設定的角度等於原本的角度加上要調整的誤差角度；若目前角度大於 20 度時，則新設定的角度 θ_{i+1} 等於原本的角度 θ_i 減掉要調整的誤差角度：

$$\begin{aligned} \theta_{i+1} &= \theta_i + \theta_{error}, \text{ if } \theta > 20^\circ \\ \theta_{i+1} &= \theta_i - \theta_{error}, \text{ if } \theta \leq 20^\circ \end{aligned} \quad (20)$$

上式中的 θ_{error} 為要調整的誤差角度，其求得的方法可參考圖 49 中兩個相似三角的比例，如(21)式：

$$\frac{\theta_{error}}{\text{最大角度誤差}} = \frac{y_{d1} - y_1}{0.8 \times \hat{y}_1(X)} \quad (21)$$

上式中的 $y_{d1} - y_1$ 即為照度誤差，接著將(21)式改寫並將最大角度誤差代入 60 度(不超過 20 度右邊的最大角度誤差 5 度)可得(22)式：

$$\theta_{error} = \frac{60}{0.8 \times \hat{y}_1(X)} \times (y_{d1} - y_1) \quad (22)$$

如此設計不僅考量到角度誤差為照度誤差的比例，更考慮到照度隨百葉窗角度改變的變化率，而使得角度調整能夠收斂而不至於發散。所以在(22)式中的比例項 $\frac{60}{0.8 \times \hat{y}_1(X)}$ 會隨著日光條件而改變，再搭配(20)式的角度切換選擇，本研究就針對此照度回授控制稱為「切換式日光調變比例控制器」，如圖 50。

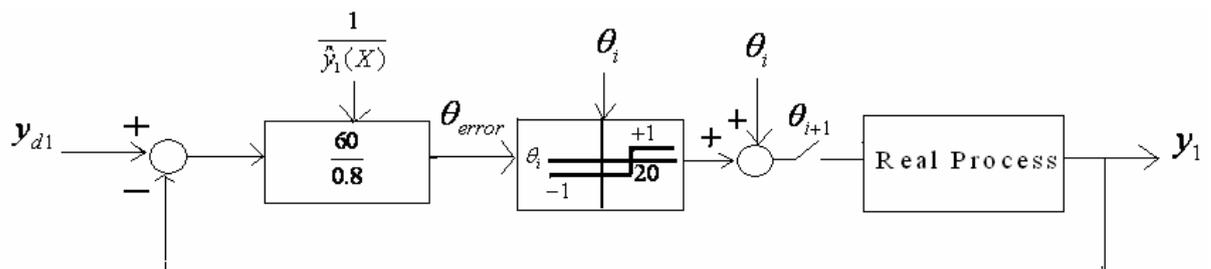


圖 50：切換式日光調變比例控制器

照度回授控制除了調整百葉片角度外，百葉窗放下的長度有時也是需要調整的，由圖 43 的模型 $\hat{y}_1(\theta, l)$ ，當長度較小時，擺動角度對照度的影響並不大，所以當照度設定較小時，程式就要由照度誤差來判斷目前百葉窗下放的長度，是否有必要增加；另外，流程在開始時就利用尺度元素來判斷照度的設定值，是否超越了目前日光控制的極限，以設定新的設定值作為收斂條件運算。圖 51 結合了切換式日光調變比例控制器與長度條件推論控制，顯示了完整的照度回授控制的流程。而收斂條件設定為當照度誤差絕對值小於 20Lux，即完成照度回授控制。



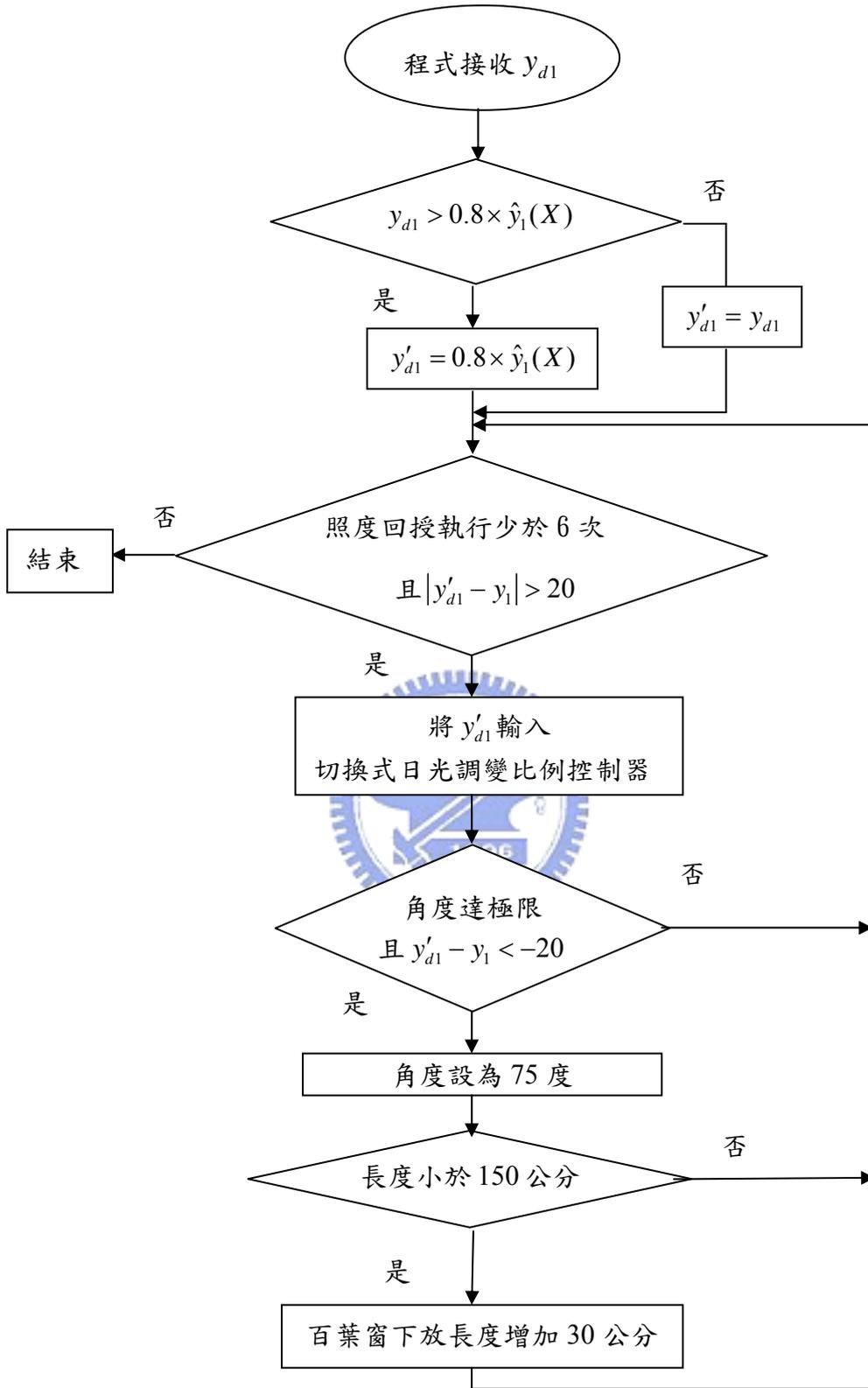


圖 51：完整的照度回授控制的流程

有了照度回授控制，使得整個日光最佳化結構更顯完整，原先圖 48 的日光預測與最佳化結構，可擴充為如圖 52 的架構，當原先圖 48 中標記<1>、<2>、<3>的部分都完成時，最後的動作，就是進行單感測點照度回授控制，如圖 52 區塊 D，其中標記<4>的 U_{fb} 為控制輸入信號，其為逐步調整的百葉窗狀態。

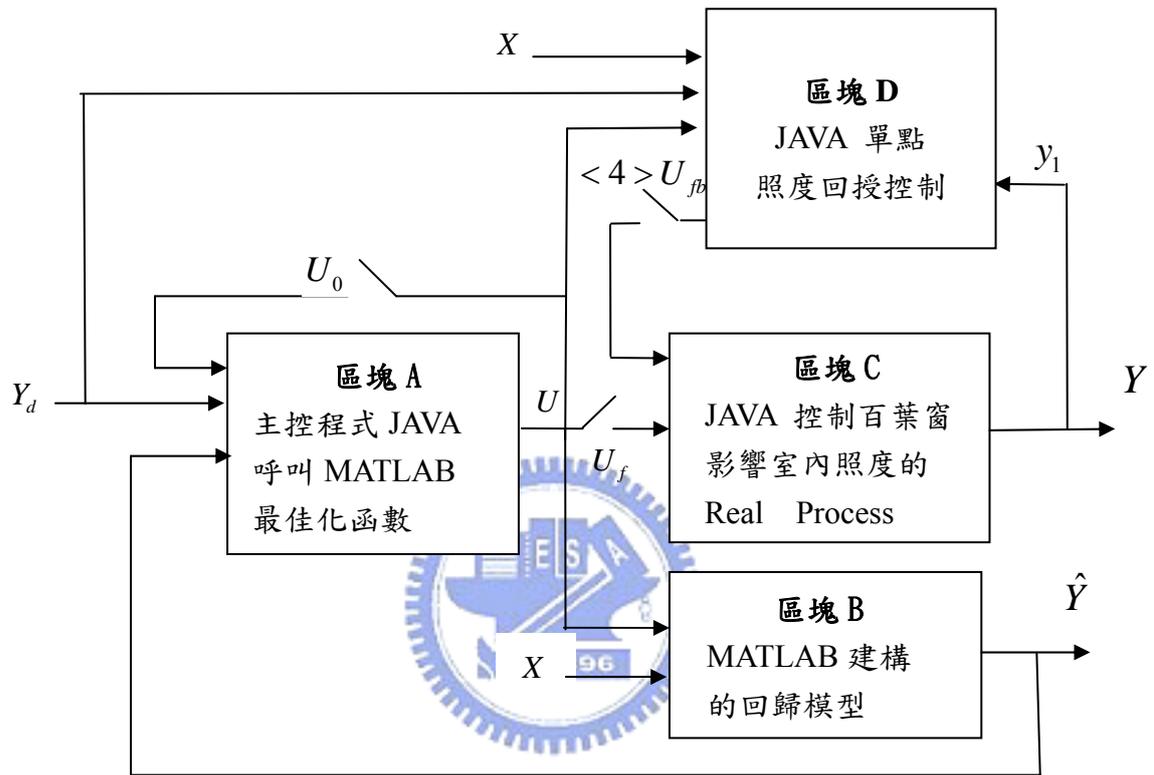


圖 52：加入照度回授控制的日光最佳化架構

4.6 程式結構

本研究所建平台，主要是以 JAVA 撰寫，並輔以 MATLAB 函數，結構如圖 39。每個方塊圖標籤為類別名稱(Class Name)，標籤下方註解為執行內容。

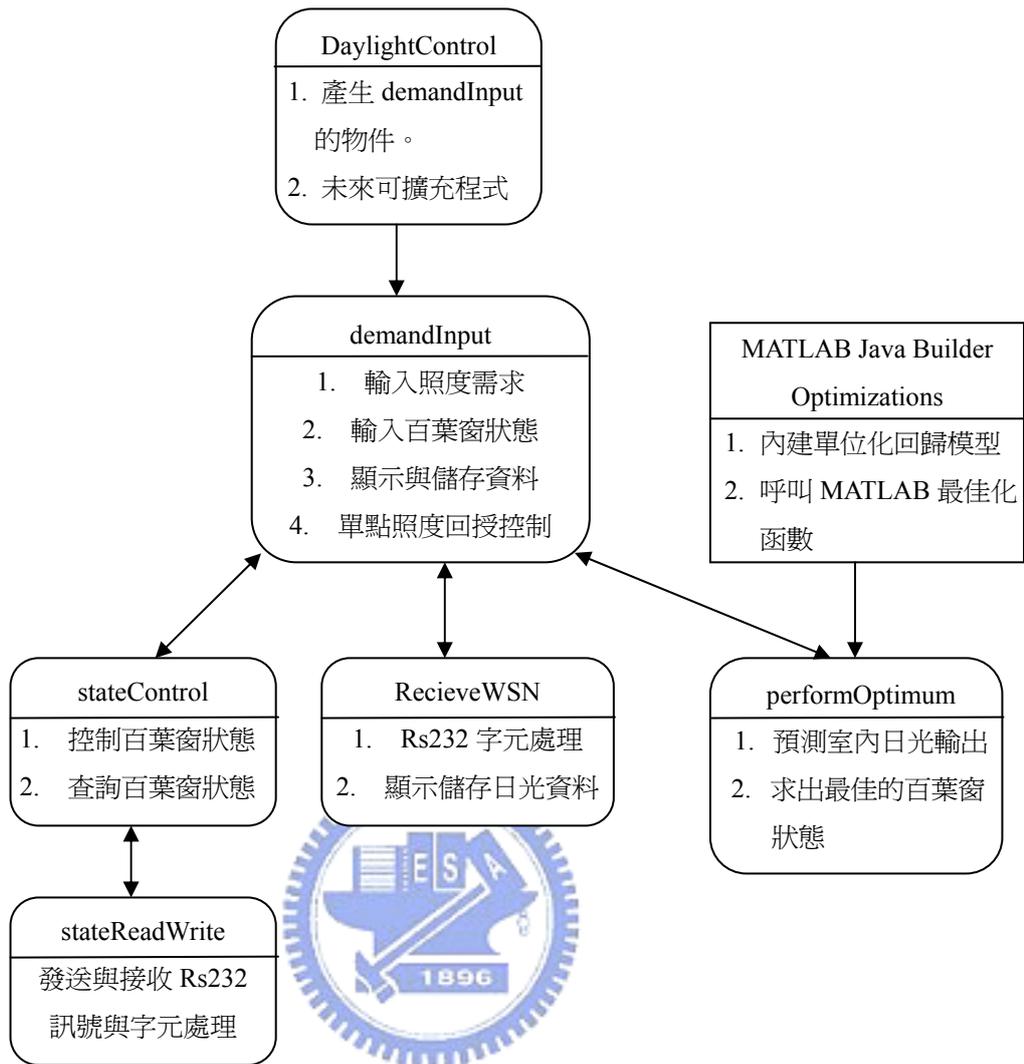


圖 53：程式結構

第五章 實驗數據分析與討論

5.1 權值向量的數據驗證與探討

本節分別就兩種不同方法求得的權值向量進行數據探討。

5.1.1 使用最小平方法求得權值向量之數據探討

由 4.3 節所提到的權值向量，本節將帶入幾組數據進行分析及探討。首先探討使用最小平方誤差法求得的權值向量，如(8)式所獲得的結果：

$$W_1 = [-0.1970 \quad 0.2965 \quad -0.0035 \quad 0.0494 \quad -0.0541]$$

$$W_2 = [0.0324 \quad 0.011 \quad 0.0244 \quad -0.0394 \quad 0.0172]$$

$$W_3 = [0.0209 \quad -0.0015 \quad 0.1446 \quad -0.2205 \quad 0.1358]$$

乘上 18 筆測試資料其中之一的日光條件 X 得 $\hat{Y}(X)$ ，再與 18 筆測試資料其中之一的輸出 $y_1(X)$ 、 $y_2(X)$ 、 $y_3(X)$ 比對；接著將 18 比以外的新資料帶入運算比對，以驗證其估測準確性，比對結果如表格 6



。

表格 6：最小平方誤差法求得之權值向量數據比對

時間	日光條件 X	$\hat{y}_1(X), \hat{y}_2(X), \hat{y}_3(X)$	$y_1(X), y_2(X), y_3(X)$	是否是 18 筆測試資料之一
5月27 9:15	[4100 4854 4771 4668 4789]	586.1, 200.9, 388.6	591, 201, 389	是
5月27 11:48	[3329 3780 3977 3656 2821]	478.8, 150.8, 215.4	471, 159, 247	是
5月28 16:03	[2124 1980 1505 1137 821]	175.0, 96.6, 119.6	179, 97, 107	是
5月30 11:16	[2430 2710 2945 2756 2369]	322.3, 112.5, 186.2	317, 114, 158	是
6月10 11:50	[2743 3098 3156 2776 1925]	399.9, 123.6, 157.9	310, 109, 197	否
7月16 11:52	[1666 2050 2150 2038 1608]	516.6, 143.6, 218.5	526, 151, 223	否
7月17 9:18	[3771 4826 4759 4655 4749]	644.2, 189.5, 377.5	746, 156, 307	否
7月17 9:48	[3043 3715 3945 3499 2666]	516.7, 143.6, 218.5	526, 151, 223	否
7月22 12:02	[3413 3869 4104 3934 3322]	474.8, 155.3, 242.1	509, 124, 224	否

由以上表格 6 可是估測值與時實際輸出值的最大誤差不會超過 30%(誤差除以實際值)，而且大致上誤差都有可能小於 10%，而未來可能以增加權值向量的測試資料，或是將上午與下午所搜集來的資料分開，建立兩種不同權值向量來供整個系統切換使用，來更進一步提高估測準確度。

5.1.2 使用平均法求得權值向量之數據探討

$$W_1 = [0.0247 \quad 0.0247 \quad 0.0247 \quad 0.0247 \quad 0.0247]$$

由 4.2 節(11)式的結果： $W_2 = [0.0093 \quad 0.0093 \quad 0.0093 \quad 0.0093 \quad 0.0093]$ ，如同上

$$W_3 = [0.0156 \quad 0.0156 \quad 0.0156 \quad 0.0156 \quad 0.0156]$$

一小節的作法，驗證 8 筆測試資料中的 2 筆資料的估測值與實際值，再驗證 8 筆測試資料以外的數據，來分析其準確度，如表格 7。

表格 7：平均法求得之權值向量數據分析

時間	日光條件 X	$\hat{y}_1(X), \hat{y}_2(X), \hat{y}_3(X)$	$y_1(X), y_2(X), y_3(X)$	是否是 8 筆 測試資料之一
5月27 9:15	[4100 4854 4771 4668 4789]	572.3 , 216.5 , 360.7	591 , 201 , 389	是
5月28 16:03	[2124 1980 1505 1137 821]	186.9 , 70.7 , 117.7	179 , 97 , 107	是
7月17 9:18	[3771 4826 4759 4655 4749]	562.2 , 212.6 , 354.1	746 , 156 , 307	否
7月22 12:02	[3413 3869 4104 3934 3322]	460.5 , 174.1 , 290.0	509 , 124 , 224	否

由以上兩個表格的比較結果，最小平方誤差法誤差較小，不過這也可能是因為平均法求得權值向量的測試資料較少的關係。

5.2 單位化模型與單位化資料驗證

除了權值向量是預測值外，在第四章所提到的還有單位化回歸模型也是預測值。要驗證單位化回歸模型 $\hat{y}_1(\theta, l), \hat{y}_2(\theta, l), \hat{y}_3(\theta, l)$ ，就必須先將搜集到的資料處理為單位化照度資料分佈 $\tilde{Y}_1(\theta, l), \tilde{Y}_2(\theta, l), \tilde{Y}_3(\theta, l)$ ，以驗證模型預測的準確性，探討其誤差大小。

首先將 4.3 節所提的單位化資料以圖示出，如圖 54、55、56，此即為要用來驗證模型的資料，搜集的時間為 5 月 30 日上午 11 點左右。接著將這三個單位化照度資料分佈圖分別與圖 40、41、42 相比較，並將相減結果示於圖 57、58、59。

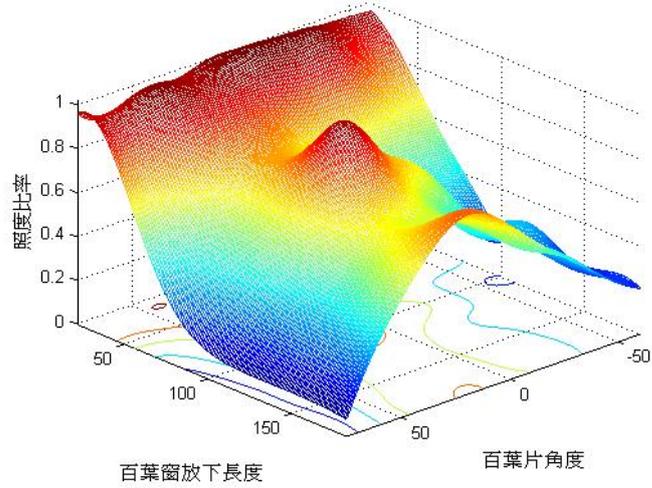


圖 54：Sensor6 的單位化照度資料分佈 $\tilde{y}_1(\theta, l)$

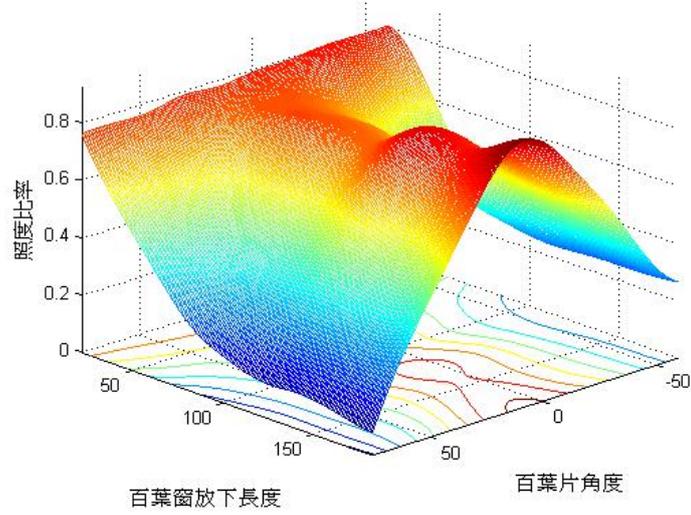


圖 55：Sensor7 的單位化照度資料分佈 $\tilde{y}_2(\theta, l)$

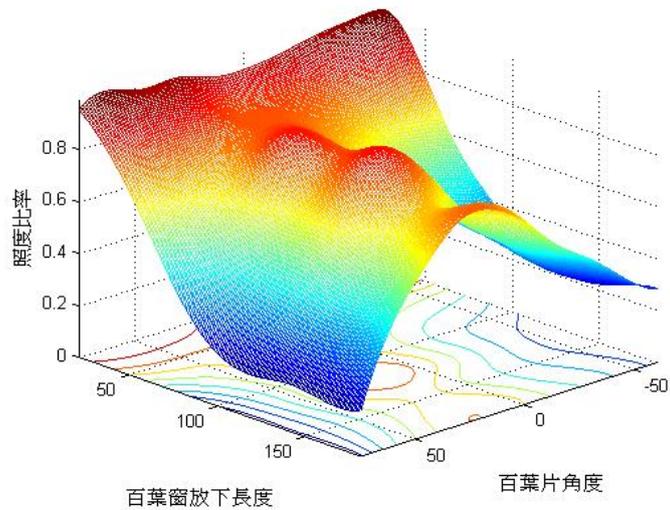


圖 56：Sensor8 的單位化照度資料分佈 $\tilde{y}_3(\theta, l)$

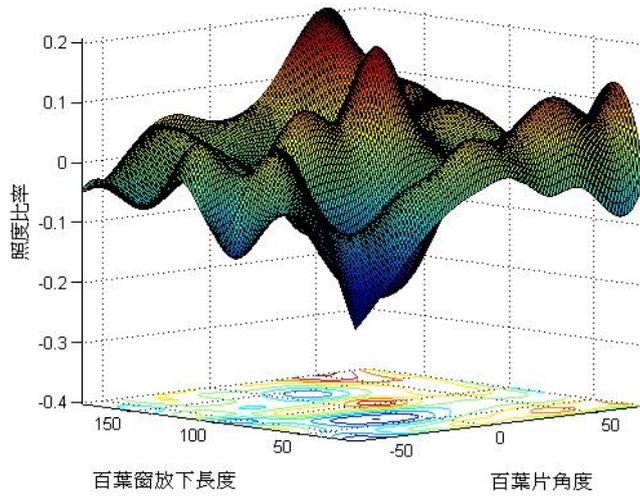


圖 57：Sensor6 的 $\hat{y}_1(\theta, l)$ 與 $\tilde{y}_1(\theta, l)$ 的誤差

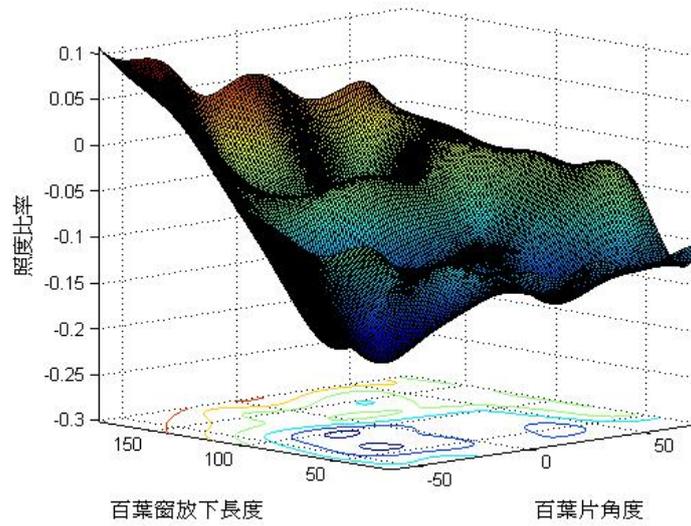


圖 58：Sensor7 的 $\hat{y}_2(\theta, l)$ 與 $\tilde{y}_2(\theta, l)$ 的誤差

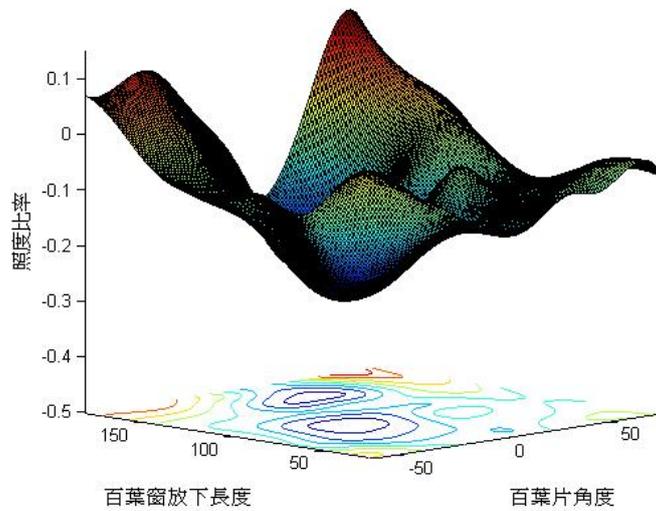


圖 59：Sensor8 的 $\hat{y}_3(\theta, l)$ 與 $\tilde{y}_3(\theta, l)$ 的誤差

由圖 57~59 顯示的結果，5 月 29 日的單位化回歸模型套用於隔天 5 月 30 日的單位化資料，最大誤差不超過 30%，大部分的誤差也都在 20% 以內。

5.3 內建模型輸出與實際感測值之比對

本節將呈現使用者輸入欲得的輸出 Y_d ，然後紀錄估測輸出 $\hat{Y}(X, \theta, l)$ 與實際輸出 Y ，並分析數據。本節內容實驗的時間主要是在 7 月 22 日上午約 11 點，距離單位化回歸模型建立的日期相隔 1 個半月以上。故照度預測的結果會有較大的誤差，進而影響最佳化的結果。

另外，為了分析各種輸出的誤差，此處參考了 2.6.1 小節的表 4，定義各種誤差，如表格 8。

表格 8：日光最佳化架構中產生的三種誤差

誤差	名稱	產生來源	意義
$Y_d - Y$	效能誤差	使用者-日光環境	是否達成使用者需求？
$Y - \hat{Y}$	預測誤差	日光環境-回歸模型	模型是否準確？
$Y_d - \hat{Y}$	預測的效能誤差	使用者-回歸模型	Y_d 的設定是否分佈自然？

在上表格 8 中，對使用者來說，日光最佳化最重要的誤差指標是效能誤差，但是對於日光最佳化架構的改進，預測誤差與預測的效能誤差也是重要的參考依據。以下表格 9、10 是在 7 月 21 日下午 2 點半左右，分別使用平均法以及最小平方誤差法取得權值向量，所做的室內日光最佳化結果。

在表格中，最佳化結果的好壞可由效能誤差的大小來判斷，但是誤差到底多大才是好或是不好，這應該是由使用者的感覺來評鑑。所以在本節的資料中，我們引入 2.2 節中使用者的滿足程度 (Satisfaction Level)，當滿足程度愈高表示最佳化的結果愈理想，而滿足程度計算的方法如下：將 $y_{d1} \sim y_{d3}$ 分別代入(1)式中的 $\mu_D(user_i)$ ，同樣地 $y_1(X, \theta, l) \sim y_3(X, \theta, l)$ 也分別代入(1)式的 lux ，但 $\sigma_D(user_i)$ 皆以 100 代入(本節設 100 為使用者的偏好)，如此可得到介於 0 到 1 之間的數值以作為「滿足程度」。

表格 9：使用最小平方法權值向量，未放下百葉窗之實際輸出 $Y(X) = [198 \ 90 \ 89]$

尺度向 量 $\hat{Y}(X)$	Y_d	$optimal$ (θ, l)	$\hat{Y}(X, \theta, l)$	實際輸出 $Y(X, \theta, l)$	效能誤 差 $Y_d - Y$	滿足 程度	預測誤 差 $Y - \hat{Y}$	預測的效 能誤差 $Y_d - \hat{Y}$
[162 103 139]	[90 30 60]	[61 87]	[67 41 79]	[78 25 46]	[12 5 14]	[0.99] 0.99 0.99]	[11 -16 -33]	[23 -11 -19]
[151 101 137]	[150 75 75]	[-60 31]	[120 83 126]	[199 84 86]	[-49 -9 -11]	[0.88] 0.99 0.99]	[79 1 -40]	[30 -8 -51]
[145 98 130]	[100 10 28]	[62 97]	[50 34 63]	[74 24 43]	[26 -14 -15]	[0.96] 0.99 0.98]	[24 -10 -20]	[50 -24 -35]

表格 10：使用平均法權值向量，未放下百葉窗之實際輸出 $Y(X) = [197 \ 83 \ 85]$

尺度向 量 $\hat{Y}(X)$	Y_d	$optimal$ (θ, l)	$\hat{Y}(X, \theta, l)$	實際輸出 $Y(X, \theta, l)$	效能誤 差 $Y_d - Y$	滿足 程度	預測誤 差 $Y - \hat{Y}$	預測的效 能誤差 $Y_d - \hat{Y}$
[182 68 115]	[150 75 75]	[7 53]	[138 60 103]	[192 78 82]	[-42 -3 -7]	[0.91] 0.99 0.99]	[-54 18 -15]	[12 15 -28]
[182 69 115]	[50 20 30]	[-60 67]	[34 33 44]	[154 43 62]	[-104 -23 -32]	[0.58] 0.97 0.95]	[120 10 22]	[16 -13 -14]

由以上表格內容發現，預測誤差變大時，效能誤差也會變得很大，使得滿足程度

大為減少(尤其是表格 10 第二列的資料),這很有可能是因為實驗當天與建立回歸模型已經相隔 50 天以上,而且模型是利用上午的資料建立的,太陽光的入射角度已經改變,造成室內日光分佈不如預期。

接著,以下表格 11、12 為 7 月 22 日上午約 11 點,分別使用平均法以及最小平方誤差法取得權值向量,所做的室內日光最佳化結果。

表格 11: 使用最小平方權值向量,未放下百葉窗之實際輸出 $Y(X)=[408 \ 126 \ 173]$

尺度向量 $\hat{Y}(X)$	Y_d	<i>optimal</i> (θ, l)	$\hat{Y}(X, \theta, l)$	實際輸出 $Y(X, \theta, l)$	效能誤差 $Y_d - Y$	滿足程度	預測誤差 $Y - \hat{Y}$	預測的效能誤差 $Y_d - \hat{Y}$
[335 144 290]	[300 80 120]	[-60 31]	[266 118 193]	[406 110 169]	[-106 -30 -49]	[0.57 0.95 0.88]	[140 -8 -24]	[34 -38 -73]
[332 147 213]	[100 50 70]	[-60 63]	[74 74 91]	[275 67 117]	[-175 -17 -47]	[0.21 0.98 0.89]	[201 -7 26]	[26 -24 -21]

表格 11 的效能誤差相當大,導致在 Sensor6 的區域(感測值 y_1 的地方)中使用者的滿足程度只有 0.57 甚至是 0.21,而在其他部份使用者的滿足成度大多高於 0.85,因此我們設計 y_1 的回授控制機制以補強其誤差過大的缺點。

回歸模型的準確度是最影響效能誤差的原因之一,然而「 Y_d 的設定」是否「合乎日光在室內分佈的自然性」,也是影響到最佳化結果的關鍵

藉由表格 12 的第 3 列與第 4 列資料的比對,正是說明了照度設定 Y_d 分佈也影響最佳化結果的好壞。雖然第 3 列的整體預測誤差較第 4 列的結果小,但整體效能誤差卻比第 4 列的結果大,其原因就在於預測的效能誤差較大(照度設定較不合乎日光自然分佈,即最接近窗戶的照度設定點應該最亮)。

表格 12：使用平均法權值向量，未放下百葉窗之實際輸出 $Y(X)=[410 \ 115 \ 185]$

尺度向量 $\hat{Y}(X)$	Y_d	$optimal$ (θ, l)	$\hat{Y}(X, \theta, l)$	實際輸出 $Y(X, \theta, l)$	效能誤差 $Y_d - Y$	滿足程度	預測誤差 $Y - \hat{Y}$	預測的效能誤差 $Y_d - \hat{Y}$
[340 128 214]	[150 60 90]	[47 145]	[133 62 112]	[238 56 108]	[-88 4 -18]	[0.67] 0.99 0.98]	[105 -6 -4]	[17 -2 -22]
[392 148 248]	[200 50 120]	[56 92]	[175 65 149]	[241 57 116]	[-41 -7 4]	[0.91] 0.99 0.99]	[66 -8 -33]	[25 -15 -29]
[413 156 261]	[50 150 50]	[59 185]	[79 52 65]	[177 46 83]	[-127 104 -33]	[0.44] 0.58 0.94]	[98 -6 18]	[-29 98 -16]
[417 157 263]	[150 150 100]	[-3 175]	[154 131 101]	[297 103 123]	[-147 47 -23]	[0.33] 0.89 0.97]	[143 -28 22]	[-4 19 -1]

總結以上結論，在日光預測與最佳化的開迴路控制結構，若要維持使用者的高滿足程度、減少效能誤差，則「預測誤差」及「預測的效能誤差」都要夠小才能達成。

5.4 單點照度回授控制數據分析

圖 60 顯示日光回授控制的情況，圖中的直線為照度設定值 y_{d1} ，而縱軸為照度，橫軸為步驟(因為此為逐步控制)，其中步驟 1 到步驟 5 的角度分別是 -2、-10、-16、-17、-17，由此可見控制器的微調效果，而在步驟 5 時 y_1 為 239Lux，此時已達收斂條件：誤差絕對值小於 20Lux，所以回授控制結束。

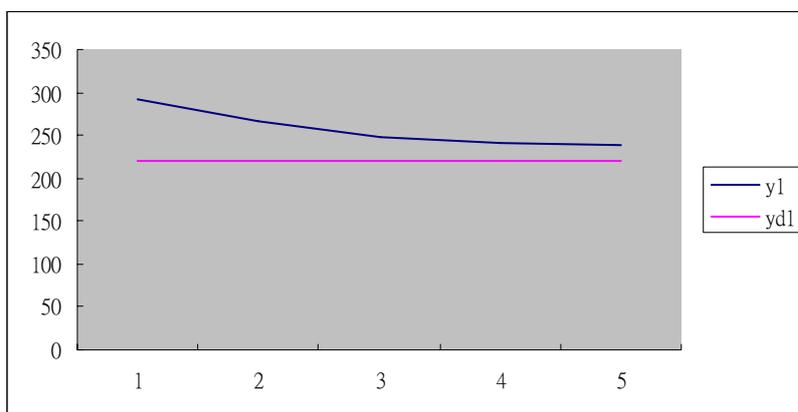


圖 60： y_{d1} 設定為 220Lux 的照度回授控制

圖 61 的 y_{d1} 設定為 30Lux，與圖 60 不同之處在於在步驟 3 的角度變化是直接由條件推論所改變，其角度設定直接設為 75 度，原因是由於 y_{d1} 小於 y_1 達 20Lux 以上，而且百葉片角度已經到達極限(負角度極限)，所以將百葉窗調整為日光最暗的狀態：75 度。其中步驟 1 到步驟 3 的角度分別為 -58、-68、75，步驟 3 的照度為 45Lux，達成收斂條件，照度控制結束。

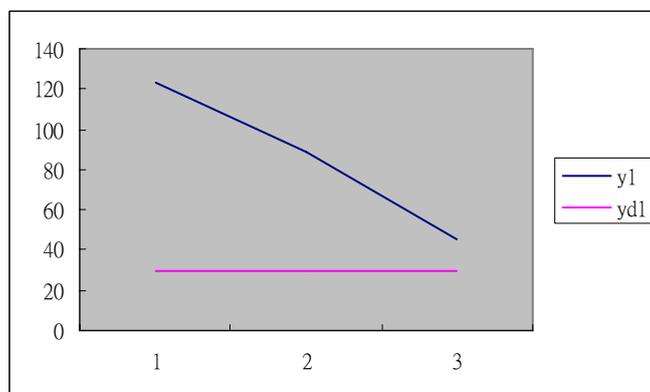


圖 61： y_{d1} 設定為 30Lux 的照度回授控制

由 5.3 節的實驗數據可以知道： Y_d 的設定需要分佈合乎自然性，才有機會得到理想的日光最佳化結果，因此本節的照度設定值大約是按照比例[2.5 1 1.5]來設定。本節所做的實驗時間是 8 月 20 日上午 11 點左右，數據如表格 13。

表格 13：預測最佳化結果與單點照度回授控制結果之比較

照度 設定 Y_d	實際輸出 $Y(X, \theta, l)$	效能 誤差 $Y_d - Y$	滿足 程度	回授 控制後 輸出	回授 控制後 誤差	回授控制 後滿足 程度
[220 80 130]	[291 141 188]	[-71 -61 -58]	[0.77 0.83 0.84]	[240 124 155]	[-20 -44 -25]	[0.98 0.90 0.96]
[300 150 180]	[297 91 203]	[3 61 -23]	[0.99 0.83 0.97]	[297 91 203]	[3 61 -23]	[0.99 0.83 0.97]
[150 70 90]	[189 53 142]	[-39 17 -52]	[0.92 0.98 0.87]	[165 49 116]	[-15 21 -26]	[0.98 0.97 0.96]
[100 50 60]	[136 45 101]	[-36 5 -41]	[0.93 0.99 0.91]	[90 29 83]	[10 21 23]	[0.99 0.97 0.97]
[250 100 150]	[269 96 175]	[-19 4 -25]	[0.98 0.99 0.96]	[268 96 175]	[-18 4 -25]	[0.98 0.99 0.96]
[30 10 20]	[124 60 83]	[-84 -50 -63]	[0.70 0.88 0.82]	[44 16 43]	[-14 -6 -23]	[0.99 0.99 0.97]

由以上表格 13 發現，經過單點照度回授控制的使用者滿足程度，都比原本開迴路的預測與最佳化的滿足程度較高，可見單點照度回授控制可明顯地改善預測與最佳化的結果。此外，在表格 13 的第 2 列與第 5 列，預測最佳化結果與單點照度回授控制結果相同，此表示有時候預測最佳化的結果也已經達到 y_1 回授控制的收斂條件。

5.5 上午與下午的日光資料分析

根據 7 月 21 日下午與 7 月 22 日上午所進行的實驗，我們發現上午與下午的日光條件 X ，以及未放下百葉窗的實際輸出值 $Y(X)$ ，在分佈上有些許不同，如同表格 13 所示。

表格 14：上午與下午的日光資料分析

時間	日光條件 X	未放下百葉窗的實際輸出值 $Y(X)$
7 月 21 日 14:50	[2285 2043 1563 1028 731]	[209 98 91]
7 月 21 日 15:03	[2459 2213 1705 1125 763]	[240 99 94]
7 月 22 日 11:16	[3295 3401 3439 3033 2155]	[478 122 194]
7 月 22 日 11:43	[2962 3267 3483 3281 2893]	[410 115 185]

由上表格 13 我們可以發現：上午的日光條件大致呈現[0.9 0.95 1 0.91 0.72]的比例分佈，而下午的日光條件則是[1 0.9 0.7 0.45 0.31]的比例分佈；另外，上午的 $Y(X)$ 比例分佈為[1 0.27 0.43]，而下午則是[1 0.43 0.4]，顯示日光在下午時較為平行，比起上午來說日光可更進入室內較深處，原因是因為實驗室對面大樓反射西晒的陽光所致。

第六章 結論與展望

6.1 研究總結

如同第一章的陳述，建築智慧化、節能化、人性化已經是一個趨勢，人與環境的互動可以藉由電控與感測網路來達成。本研究提出了一套方法，利用無線照度感測網路建立模型，以及預測日光在室內的分佈情況，並透過最佳化機制以及單點照度回授控制調整電動百葉窗，使得室內的日光分佈近似於使用者所設定偏好的環境。

在第三章介紹的電動百葉窗的監控迴路與第四章的最佳化與單點照度回授控制，除了使用一般常見的比例-積分控制器或比例控制器外，我們也加入了「條件切換」的設計，利用條件判斷切換控制法則，使得控制功能更加齊全。此外，在室內日光預測以及單點照度回授控制的部份，都加入了多感測點的日光條件計算，使得室內日光預測能隨戶外日光的情況調整，單點照度回授控制也能夠考慮到日光隨角度改變的變化率，使百葉片角度調整收斂而不至於振盪、發散。

6.2 未來展望

本論文的日光預測方法，尚未考慮到太陽仰角的因素，所以在 5.3 節數據探討的結論中發現，室內日光預測值誤差稍大，原因在於建立模型的資料是在實驗前一個多月所蒐集的，因此未來在回歸模型建立之時，可加入如 2.3 節所述之太陽仰角以作為變數之一；另外，模型的調適性也是未來可以加強的部份，如同本文 2.6 節所述之類神經網路模型的調適。

此外如第二章文獻探討到，數篇文獻討論到人工照明與日光的互動與控制，甚至是百葉窗對於室內環境的照度或溫度影響，因此本研究的日光監控平台，可與室內人工照明控制結合，即室內環境引入日光以節省照明電能，再以人工照明補足日光的不足，成為更完整的室內光環境監控系統。

參考文獻

- [1] C. S. Park, G. Augenbroe, T. Messadi, “Daylighting Optimization in Smart Façade Systems”, Eighth International IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands, 2003.
- [2] A. Tzempelikos, A. K. Athienitis, “A Methodology for Simulation of Daylight Room Illuminance Distribution and Light Dimming for a Room with a Controlled Shading Device”, Solar Energy Volume 72, No.4, pp.271~281, 2002.
- [3] M. I. Jordan, D. E. Rumelhart, “Forward models: Supervised Learning with a distal teacher”, Cognitive Science, Volume 16, Issue 3 , pp. 307-354 ,1992.
- [4] K. J. Hunt, D. Sbarbaro,” Neural networks for nonlinear internal model control”, Control Theory and Applications, IEE Proceedings Volume 138, Issue 5, pp.431-438, Sept. 1991.
- [5] M. M. Gupta, L. Jin, N. Homma, “Static and Dynamic Neural Networks: From Fundamentals to Advanced Theory”, John Wiley & Sons, 2003.
- [6] 范逸之、廖錦祺，VB.NET 自動化系統監控 RS-232 串列通訊篇，文魁資訊。
- [7] B. C. Kuo, “Automatic Control Systems”, Seventh Edition, Wiley, 1997
- [8] 李顯宏，MATLAB 7.X 程式開發與應用技巧，文魁資訊。
- [9] 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 Journal.
- [10] 中央氣象局 <http://www.cwb.gov.tw/>

- [11] C. F. Reinhart, O. Walkenhorst, "Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test office with external blinds", Energy and Building, Volume 33, Issue 7, pp.683~697, Sept. 2001.
- [12] M. A. Lehar, L. R. Glicksman, "Rapid algorithm for modeling daylight distributions in office buildings", Building and Environment, Volume 42, Issue 8, pp.2908~2919, Aug. 2005.
- [13] F. M. Al-Shareef, D. J. Oldham, D. J. Carter, "A Computer Model for Predicting the Daylight Performance of Complex Parallel Shading Systems", Building and Environment, Volume 36, Issue 5, pp.605~618, Jun. 2000.
- [14] S. Chang, A. Mahdavi, "A Hybrid System for Daylight Responsive Lighting Control", Journal of the Illuminating Engineering Society, 2002.
- [15] V. Singhvi, A. Krause, C. Guestrin, J.H. Garrett, H.S Matthews, "Intelligent light control using sensor networks", Proceedings of the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems, pp.218~229, 2005.
- [16] Y. J. Wen, J. Granderson, A. M. Agogino, "Towards Embedded Wireless-Networked Intelligent Daylighting Systems for Commercial Buildings", Proceeding of the IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing, pp.326~331, 2006.
- [17] H. W. Li, J. C. Lam, "Evaluation of lighting performance in office buildings with daylighting controls", Energy and Building, Volume 33, Issue 8, pp.793~803, Sept. 2001.
- [18] A. Tzempelikos, A. K. Athienitis, "The Effect of Shading Design and Control on Building Cooling Demand", International Passive and Low

Energy Cooling for the Built Environment Conference, May 2005.

- [19] E. S. Lee, D. L. DiBartolomeo, S. E. Selkowitz, “Thermal and Daylighting Performance of an Automated Venetian Blind and Lighting System in a Full-Scale Private Office”, Energy and Building, Volume 29, Issue 1, pp.47~63, Dec. 1998.
- [20] C. F. Reinhart, K. Voss “Monitoring manual control of electric lighting and blinds”, Lighting Research and Technology, Volume 35, No. 3, pp.243-258, 2003.
- [21] M. Foster, T. Oreszczyn, “Occupant control of passive systems: the use of Venetian blinds”, Building and Environment, Volume 36, Issue 2, pp.149~155, Feb. 2001.
- [22] D. L. DiBartolomeo, E. S. Lee, F. M. Rubinstein, S. E. Selkowitz, “Developing a Dynamic Envelope/Lighting Control System with Field Measurements”, Journal of the Illuminating Engineering Society, 26 (1), pp. 146~164, 1997.
- [23] M. T. Lah, B Zupančič, J. Peternej, A. Krainer, “Daylight Illuminance Control with Fuzzy Logic”, Solar Energy, Volume 80, Issue 3, pp.307~321, 2006.
- [24] C. F. Reinhart, “Lightswitch-2002: A Model for Manual and Automated Control of Electric Lighting and Blinds”, Solar Energy, Volume 77, Issue 1, pp.15~28, 2004.
- [25] D. Lindelöf, “A Fast Daylight Model Suitable for Embedded Controllers”, Solar Energy (Article in Press).
- [26] A. Mahdavi, “Simulation-Based Control of Building System Operation”, Building and Environment, Volume 36, Issue 6, pp.789~796, Jul. 2001.