

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

太陽光發電影像追蹤技術研發
Solar Power Generation Image Tracking Technique Development

計畫編號：1002001INER044

受委託機關(構)：國立成功大學

計畫主持人：林穎裕

聯絡電話：(06)2757575*63673

E-mail address：yinlin@mail.ncku.edu.tw

核研所聯絡人員：葉宏易

報告日期： 100 年 12 月 06 日

目 錄

目錄	1
中文摘要	3
英文摘要	4
壹、計畫緣起與目的.....	5
一、計畫之具體成果.....	5
二、工作人員之訓練.....	6
貳、研究方法與過程.....	7
一、影像處理步驟.....	7
(一)太陽影像擷取方法	7
(二)全彩數位影像擷取	7
(三)色彩模型轉換	8
(四)二值化及影像分割.....	11
(五)去雜點處理.....	12
(六)目標物中心計算.....	14
(七)模擬結果與分析.....	18
二、追日影像實測結果分析與比較.....	21
(一)室內測試模擬.....	21
(二)戶外太陽影像實測.....	22
三、追日影像系統控制器設計與硬體模擬	29

(一)太陽運動軌跡模擬裝置設計.....	29
(二)追日系統控制器設計.....	30
參、主要發現與結論.....	36
肆、參考文獻.....	37

中文摘要

本論文主要在研發高精度即時日心估測方法，應用於太陽追蹤器 (Solar Tracker)，以引導高聚光型太陽光電 (High Concentrated Photovoltaic, HCPV) 發電系統之指向。由於日光垂直照射時，HCPV 之集光率及光電轉換效能最高，因此在有效發電日照強度的條件下，即使陰晴天候條件不同，亦需隨時將 HCPV 準確對準日心，產生最高的發電效率。為能準確估測太陽中心位置，本研究設計一影像處理步驟，包括全彩數位影像擷取、色彩模型轉換、二值化及影像分割、去雜點處理、目標物中心計算等流程，使得估算太陽中心位置的模擬誤差最低可降至 0.0007 度，實測誤差則可降至 0.0012 度。其中計算太陽中心步驟，另以四種數學方法測試比較，並選取最適用也最精確的三點求圓心法作為追蹤器之核心估算準則。經實驗室與實地日照測試結果相互對照顯示，本研究所研發之影像處理技術，在計算中心位置，具有極高準確度。為了方便分析追日方法與追蹤器之性能，本研究於實驗室內，建立模擬太陽運動軌跡之動態裝置與閉迴路追日系統硬體模型，包括：太陽軌跡動態模擬模組，太陽追蹤器模組，迴授模糊控制模組，動力與馬達驅動模組，及機構平台模組，以模擬 HCPV 之作業流程。

Abstract

The objective of this research is to develop a high precision method for solar center estimation. The method shall be used in a solar tracker to guide the High Concentrated Photovoltaic (HCPV) electric generation system accurately pointing to the sun. When sunlight impinges vertically on to a HCPV unit, it can achieve the highest concentration effect and obtain the best photovoltaic conversion rate. As such, aiming HCPV unit to the center of the sun precisely under various weather conditions with qualified solar intensity is vital to efficiently generate electricity from the unit. To locate solar center with very high precision, this study has formulated the image processing procedure including, acquisition of solar image, transformation of full color image model, two-value procedure and image isolation, mid-value and target area filtering, and solar center coordinate computation, and the tracker can identify the solar center of a simulated case to the lowest error of 0.0007 degrees and a field test case to the error of 0.0012 degrees. Also, four mathematical formulations were tested and the most suitable and accurate three-point circle center method was chosen to be the estimation method for the solar tracker. Comparison of the actual field tests with the laboratory results indicates that the image processor developed possesses reliable quality and its precision in various outdoor situations remains about the same. For the purpose of conveniently and efficiently analyzing the solar tracking routine, a solar trajectory motion module and a closed-loop solar center tracker and tracking hardware were built in the laboratory to simulate the dynamics of the HCPV system. The tracker and tracking simulation hardware, including solar tracker, feedback fuzzy logic control module, power and motor drive module, and mechanism platform module, to emulate the process of the HCPV solar tracking unit.

壹、計畫緣起與目的

目前商業化太陽能模組發展依太陽能晶胞之不同，分為(1)結晶矽太陽能模組(2)薄膜太陽能模組(3)聚光型太陽能模組(III-V族太陽能模組)。其中聚光型太陽能模組包括[聚光型太陽能晶胞(Concentrator Photovoltaic, CPV)]+[高聚光鏡面菲涅爾透鏡(Fresnel Lenes)]+[太陽光追蹤器(Sun Tracker)]的組合，其太陽能能量轉換效率可達31%~40.7%。在種種優勢下，投資聚光型太陽光電技術付出的成本將低於其他太陽光電技術，使聚光型太陽光電技術受到更多矚目。

聚光型的太陽能發電系統，如果要將太陽光經過聚光透鏡或反射鏡永遠投射在晶片上，必須使用追日器材，將光學系統保持垂直對正於太陽的方向。因此在有效發電陽光的不同天候條件下，需隨時將HCPV準確對準日心，以產生最高的發電效率。

本計畫主要以電荷耦合偵測器(Charged-Couple Detector, CCD)與數位相機加裝濾光鏡與望遠鏡拍攝太陽影像，利用研發之影像處理方法，將影像轉換為畫素(pixels)位址，求取太陽中心，作為聚光型太陽光電系統，追蹤太陽影像之閉迴路指向目標。以下列為本計畫完成之目標：

一、計畫之具體成果

1. 建立太陽影像擷取與處理程式；
2. 即時太陽中心計算程式達到預設精度；
3. 建立閉迴路追日模組軟體追日模組之主要架構；
4. 直接太陽影像追日之模擬與實例測試比較。

二、工作人員之訓練

1. 學習以 CCD 與數位相機太陽影像擷取與處理之技術；
2. 計算太陽中心點估測與去除雜點程式方法；
3. 了解影像處理軟體之特性。
4. 實例測試與精確度分析之經驗

貳、研究方法與過程

一、影像處理步驟

(一)太陽影像擷取方法

本研究利用 CCD 攝影機擷取影像，經由數位影像處理法針對特定顏色進行目標物辨識，計算出目標物中心位置，並應用控制方法驅動制動器達到即時影像追蹤的目的。

影像處理是本研究主要的任務，其方法可分為五個步驟，分別是全彩數位影像擷取、色彩模型轉換、二值化及影像分割、去雜點處理、計算目標物中心，其流程如下圖所示，各個步驟並分述於以下相關小節。

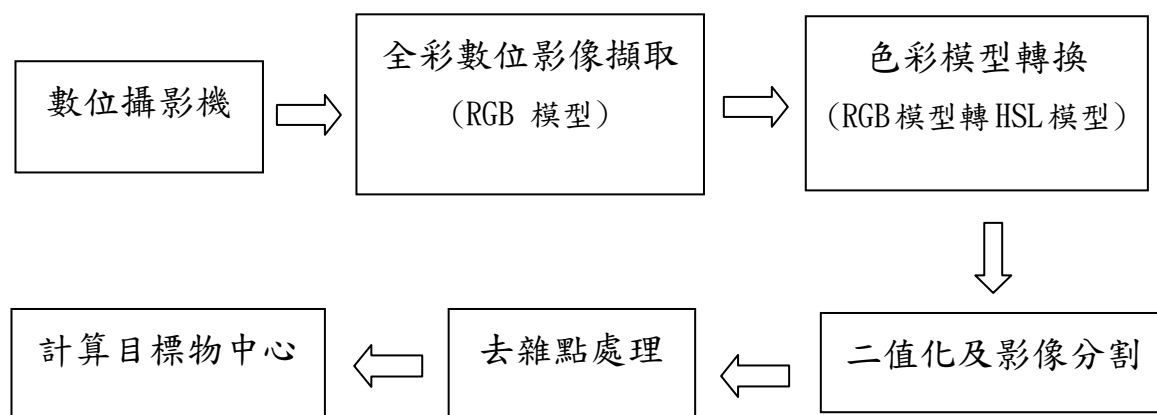


圖 2.1 影像處理流程圖

(二)全彩數位影像擷取

數位影像資訊是將 CCD 攝影機所擷取之訊號，排列成矩陣的方式，矩陣內的每一個元素稱為像素(pixel)。本研究使用全彩 CCD 攝影機擷取影像，所擷取到的影像為 RGB 色彩之模型格式，亦即矩陣

裡每個像素皆由 R(red)、G(green)和 B(blue)三原色所組成。本研究
所使用之擷取影像每個影像矩陣有 640×480 個像素。

(三)色彩模型轉換

色彩模型可分為硬體導向(hardware oriented)與使用者導向(user oriented)兩種，常見的硬體導向模型有供彩色顯示器和彩色電視攝影機用的 RGB(紅色、綠色和藍色)模型，而常見的使用者導向模型有 HSL 色調(Hue)、飽和度(Saturation)、亮度(Lightness)與 HSV 色調(Hue)、飽和度(Saturation)、明度(Value)兩種模型。

RGB 色彩模型

在 RGB 模型中，每種色彩皆以紅(R)、綠(G)和藍(B)三原色之數值來顯現。此模型若以直角座標系統表示，所有 RGB 的值都假定在 $[0,255]$ 的範圍內，如下圖所示：

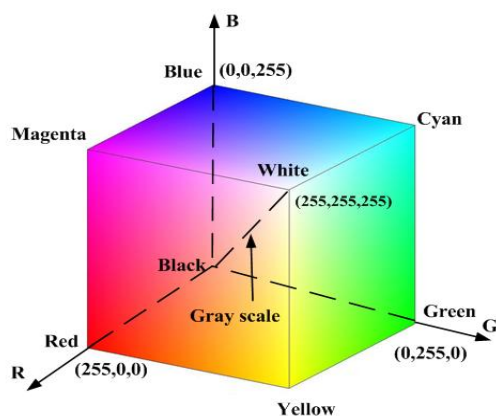


圖 2.2 RGB 色彩模型

黑色在原點(0,0,0)上，而白色是在離原點最遠的頂點(255,255,255)上。以 RGB 色彩模型表示的影像是由三個分量影像所組成，R、G

和 B 各對應一個分量，當送入 RGB 顯示器時，這三幅影像會組合成一幅複合的彩色影像。其中紅色、綠色和藍色原色強度各以一個 8 位元的位址表示，故每個彩色像素皆有 24 位元的顏色組合，因此一個全彩影像的色彩組合總數從黑色到白色有 $(2^8)^3 = 16,777,216$ 個。

HSL 色彩模型 與 HSV 色彩模型

相較於 RGB 模型，HSL 與 HSV 模型對於使用者來說更能直接的描述色彩的資訊，例如一物體為紅色，而色調就可指出物體色彩的資訊、飽和度為色彩的純度、亮度則為物體反射光線的多寡。兩者都以圓柱為模型把顏色描述為柱內的一點，繞著圓柱中心軸的角度為色調(Hue)，範圍由 $0^\circ \sim 360^\circ$ ，其中 0° 為紅色、 180° 為青綠色，到中心軸的距離為飽和度(Saturation)，範圍為 0~1，數值越大飽和度越高，而沿著中心軸的距離稱為亮度(Lightness)或明度(Value)，範圍由下至上為 0~1，數值越大亮度、明度越亮。HSL 與 HSV 色彩模型可由 RGB 模型中 R,G,B 之座標經由轉換公式求得。HSL 與 HSV 色彩模型如下：

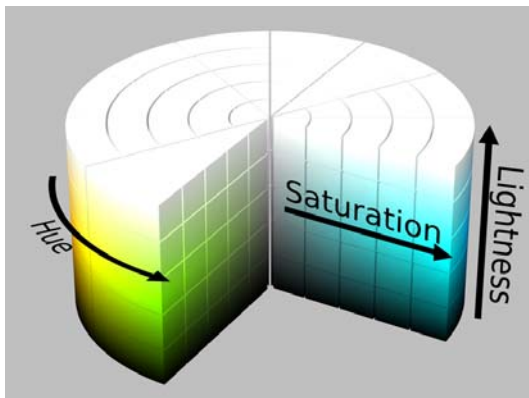


圖 2.3 HSL 色彩模型

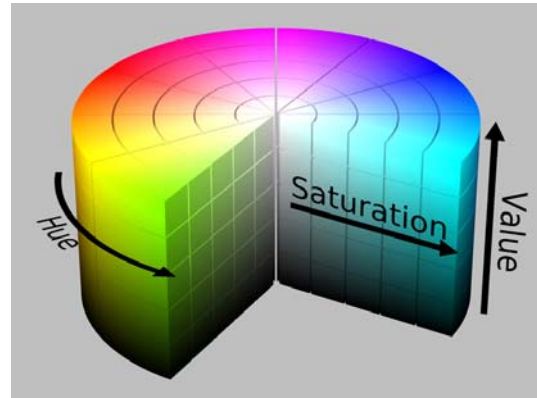


圖 2.4 HSV 色彩模型

色彩模型轉換

設 r, g, b 分別為紅、綠和藍的座標經正規化的值，其值介於 0 到 1 的實數。設 \max 等於 r, g, b 中的最大者， \min 等於 r, g, b 中的最小者。

從 RGB 色彩模型到 HSL 色彩模型的轉換公式如下：

$$H = \begin{cases} 0^\circ & \text{if } \max = \min \\ 60^\circ \times \frac{g-b}{\max-\min} + 0^\circ & \text{if } \max = r \text{ and } g \geq b \\ 60^\circ \times \frac{g-b}{\max-\min} + 360^\circ & \text{if } \max = r \text{ and } g < b \\ 60^\circ \times \frac{b-r}{\max-\min} + 120^\circ & \text{if } \max = g \\ 60^\circ \times \frac{r-g}{\max-\min} + 240^\circ & \text{if } \max = b \end{cases}$$

$$L = \frac{1}{2}(\max + \min) \text{ and } S = \begin{cases} 0 & \text{if } L = 0 \\ \frac{\max - \min}{1 - |2L - 1|} & \text{otherwise} \end{cases}$$

其中 $0^\circ \leq H < 360^\circ$; $0 \leq L \leq 1$; $0 \leq S \leq 1$ 。

從 RGB 色彩模型到 HSV 色彩模型的轉換公式如下

$$H = \begin{cases} 0^\circ & \text{if } \max = \min \\ 60^\circ \times \frac{g-b}{\max-\min} + 0^\circ & \text{if } \max = r \text{ and } g \geq b \\ 60^\circ \times \frac{g-b}{\max-\min} + 360^\circ & \text{if } \max = r \text{ and } g < b \\ 60^\circ \times \frac{b-r}{\max-\min} + 120^\circ & \text{if } \max = g \\ 60^\circ \times \frac{r-g}{\max-\min} + 240^\circ & \text{if } \max = b \end{cases}$$

$$V = \max \text{ and } S = \begin{cases} 0 & \text{if } \max = 0 \\ \frac{\max - \min}{\max} & \text{otherwise} \end{cases}$$

其中 $0^\circ \leq H < 360^\circ$; $0 \leq V \leq 1$; $0 \leq S \leq 1$ 。

由於 HSL 與 HSV 色彩模型皆可將亮度分離，使色彩較不因受光強度的不同，而影響目標物的辨別，故此兩種色彩模型皆適用於本研究。但由於實驗用之影像擷取卡(Matrox CronosPlus)有提供從 RGB 到 HSL 色彩模型的轉換指令，不需自行編寫色彩模型轉換公式，可降低電腦計算的時間，所以本研究採用 HSL 色彩模型。

(四)二值化及影像分割

影像分割是將影像上的目標物與背景分離出來。因為目標物與背景具有不同的灰階特徵，因此我們可先找出目標物的灰階值範圍 (Threshold value)，再進行邏輯判斷，若影像中像素的灰階值在我們設定的範圍內時，則將像素值設為 1(白色)，反之若灰階值在設定的範圍外時，則將像素值設為 0(黑色)，此步驟也可稱為二值化處理。

其運算式如所示：

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{threshold_min} \leq f(x, y) \leq \text{threshold_max} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2-1)$$

其中 $g(x,y)$ 為處理過後的影像， $f(x,y)$ 為輸入影像，像素值 threshold_min 與像素值 threshold_max 為我們所設定閾值的最小值與最大值。經由實驗觀察定義本章節之太陽照片目標物 H 閾值為 $10^\circ \sim 360^\circ$ ，S 閾值為 0~1，L 閾值為 0.6~1。

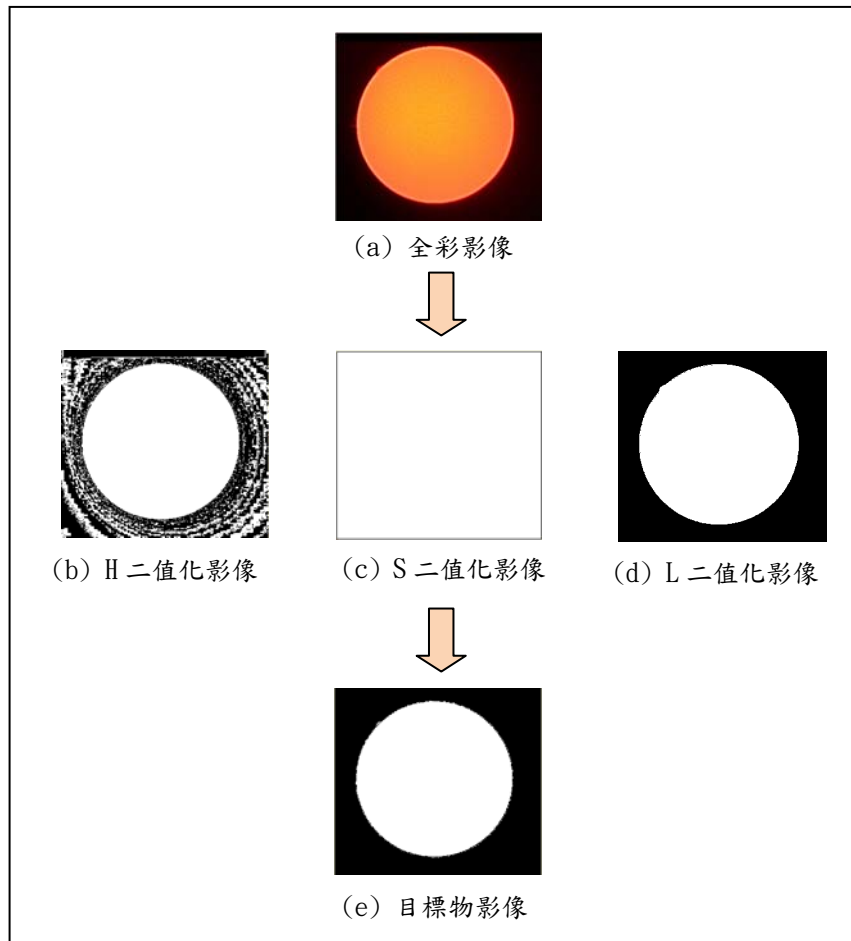


圖 2.5 影像分割圖

當輸入的影像圖 2.5(a)，經過三個不同的閾值運算後會得到三張二值化的圖，如圖 2.5(b)(c)(d)，再將這三張圖做 AND 運算即可得到目標物的影像，圖 2.5(e)，AND 運算以下式表示：

$$\text{Binaryimage} = \text{H_Binaryimage} \ \&\& \ \text{S_Binaryimage} \ \&\& \ \text{L_Binaryimage}$$

(五)去雜點處理

當輸入的彩色影像經過影像分割後會變成一幅黑白的二值化影像，然而在這幅黑白影像上有時會出現雜點，由圖 2.5 (e)可看出，在目標物的周圍有許多雜點出現，實驗上我們經由兩種方法來去除

這些雜點，首先利用侵蝕與膨脹法(Erosion & Dilation)去除較小的雜點，但此法無法過濾掉較大面積的雜點，所以我們再使用比較面積的方法將比較大的雜點給去除掉，以下介紹兩種去雜點的方法。

侵蝕與膨脹處理

侵蝕與膨脹處理可去除較小的雜點，侵蝕的原理為建立一個 3×3 的遮罩，若遮罩內任一點像素值為 0，則遮罩中心點以 0 來取代，而膨脹的原理與侵蝕原理相似，一樣建立一個 3×3 的遮罩，若遮罩內任一點為 1，則遮罩中心點以 1 來取代，下圖為侵蝕與膨脹處理示意圖：

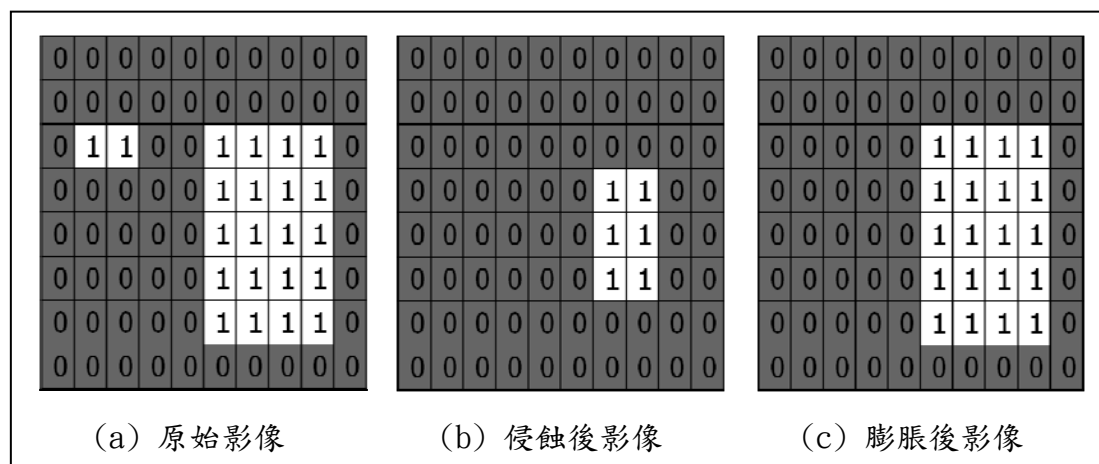


圖 2.6 侵蝕與膨脹示意圖

比較面積處理

當雜點的面積過大時侵蝕膨脹法並無法將之全部濾掉，所以在侵蝕膨脹法後我們再使用比較面積的方法將較大面積的雜點濾除。

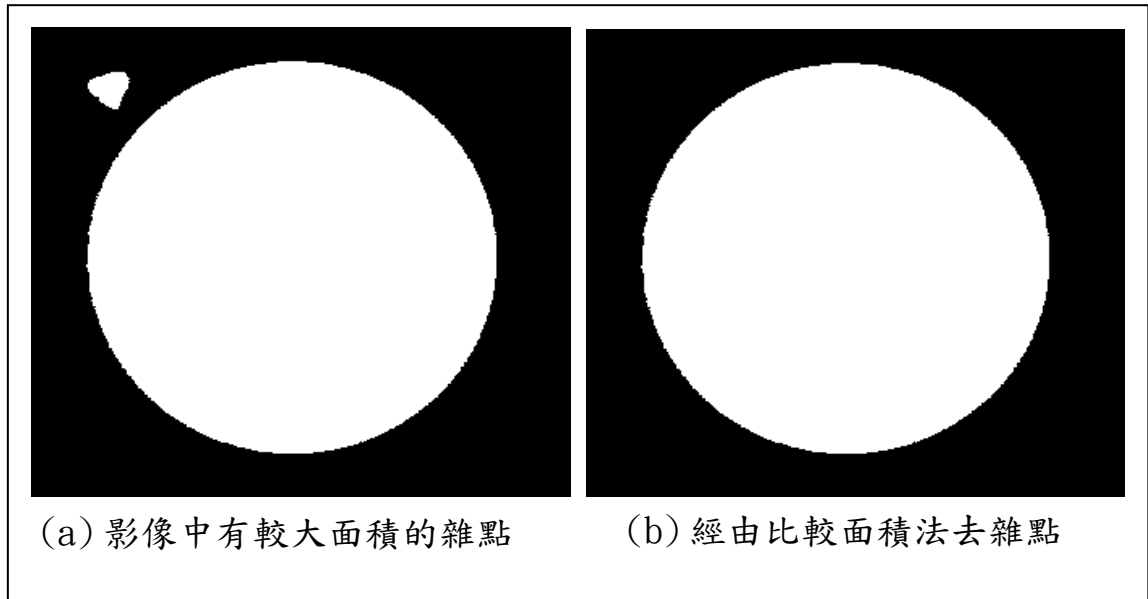


圖 2.7 比較面積法示意圖

如圖 2.7(a)所示，在影像的左上角有一塊較大面積的雜點，經過比較面積的方法後如圖 2.7(b)即可將此雜點濾除。

(六) 目標物中心計算

經過二值化影像分割與去雜點處理後，將目標物與背景分離即可計算目標物中心位置。計算中心的方法，本研究將比較四種方法的優缺點，重心法、霍夫轉換法(Circle Hough Transform Method)、最大直徑法及三點求圓心法，並選用最適合於本研究的方法。

進行之前將輸入的影像做 Sobel 邊界偵測並找出邊界上各點的位置，Sobel 運算是用來對二維資料取梯度的一種方法，在影像上為建立兩個 3×3 的遮罩分別對 x 方向與 y 方向取偏微分，即可求出物體的邊界，其遮罩型式如下：

$$x \text{ 方向偏微遮罩為 } \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, y \text{ 方向偏微遮罩為 } \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}。$$

重心法

重心法為一般較常用來計算目標物形心的方法，公式如下所示

$$X_c = \frac{\sum_i^m \sum_j^n f(X_i, Y_j) \times X_i}{\sum_i^m \sum_j^n f(X_i, Y_j)} \quad \text{and} \quad Y_c = \frac{\sum_i^m \sum_j^n f(X_i, Y_j) \times Y_j}{\sum_i^m \sum_j^n f(X_i, Y_j)} \quad (2-2)$$

其中 X_c 、 Y_c 分別為 X 與 Y 軸形心位置，m 與 n 為影像的水平方向與垂直方向最大像素值。由於我們的目標物是太陽，需要求取的點為太陽中心點，但當太陽部分被雲層遮蔽時重心法計算出來的形心位置與原本太陽中心位置有所偏差。

霍夫轉換法

霍夫轉換的目的是用來尋找影像中某直線的參數，但後來此方法擴展到其他形狀上，而圓形為我們主要研究的形狀。利用圓形霍夫轉換找出圓心，首先把邊界上各點的位置當作圓心以物體的半徑畫圓，找出這些圓的交點，交點最多者即為圓心。數學計算式如下

$$(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 = r_1^2 \quad (2-3)$$

$$(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 = r_2^2 \quad (2-4)$$

其中 $x_1, y_1, r_1, x_2, y_2, r_2$ 分別為邊界的 x、y 座標與物體半徑。

將式(2-3)與式(2-4)相減整理可得

$$y = mx + k, \quad (2-5)$$

$$\text{其中 } m = \frac{x_1 - x_2}{y_2 - y_1}, \quad k = \frac{r_1^2 - r_2^2 + x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2}{2(y_2 - y_1)}。$$

將(2-5)代入(2-4)整理可得

$$(1+m^2)x^2 + 2(mk - my_2 - x_2)x + (x_2^2 + y_2^2 + k^2 - 2ky_2 - r_2^2) = 0。$$

利用公式 $\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$ 即可求得交點的 x 座標。

同理將式(2-4)與式(2-3)相減整理可得交點的 y 座標。

此方法雖然對於部分被遮蔽的圓可以還原其原本的圓心，但由於在畫圓時須先知道物體的半徑，若畫圓使用的半徑與觀測物體真實半徑不相等就會影響到最後計算圓心的準確度。

最大直徑法

由於一個圓的直徑會通過本身的圓心，所以可利用尋找直徑的方法來找出物體的圓心，首先將輸入的影像做 Sobel 邊界偵測並找出邊界上各點的位置，再取邊界上最高的一點為起始點與邊界上其他各點連線並計算此直線的長度，依序由各點為起始點計算連線長度，將線段最長者當作直徑，而此線段的中點即為圓心，其式如下：

$$Diameter = Max\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n [(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2]^{1/2}\right) \quad (2-6)$$

其中 n 為邊界上點的數量， x_i 、 y_i 、 x_j 、 y_j 為邊界上第 i 點與第 j 點位置。圓心(X_c, Y_c)計算式如下

$$\begin{cases} X_c = (x_i + x_j) / 2 \\ Y_c = (y_i + y_j) / 2 \end{cases} \quad \text{if } ((x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2)^{1/2} = Diameter \quad (2-7)$$

此種方法的優點為只要邊界上任兩點的連線為物體的直徑就可找出圓心，計算上也比霍夫轉換簡單，但如果物體被遮蔽的面積大於一半以上時，此方法找出的直徑就不是物體原本的直徑，求得的圓心也就會有所偏差。

三點求圓心法

首先將二值化後目標物的影像做 Sobel 邊界偵測，再利用邊界上三點可求得圓心的方法找出目標物的圓心，設邊界上三點位置為 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ ，計算圓心的公式如下：

$$(x_1 - x_2)x + (y_1 - y_2)y + \frac{x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2}{2} = 0 \quad (2-8)$$

$$(x_1 - x_3)x + (y_1 - y_3)y + \frac{x_3^2 - x_1^2 + y_3^2 - y_1^2}{2} = 0 \quad (2-9)$$

將(2-8)及(2-9)改寫為

$$\begin{cases} a_1x + b_1y + c_1 = 0 \\ a_2x + b_2y + c_2 = 0 \end{cases} \quad \text{其中} \quad \begin{aligned} a_1 &= x_1 - x_2 \\ b_1 &= y_1 - y_2 \\ c_1 &= \frac{x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2}{2} \end{aligned} \quad \begin{aligned} a_2 &= x_1 - x_3 \\ b_2 &= y_1 - y_3 \\ c_2 &= \frac{x_3^2 - x_1^2 + y_3^2 - y_1^2}{2} \end{aligned}$$

利用帶入消去法求得圓心(x,y)為

$$x = \frac{b_2c_1 - b_1c_2}{a_2b_1 - a_1b_2} \quad y = \frac{a_2c_1 - a_1c_2}{a_1b_2 - a_2b_1}$$

取點示意圖如下

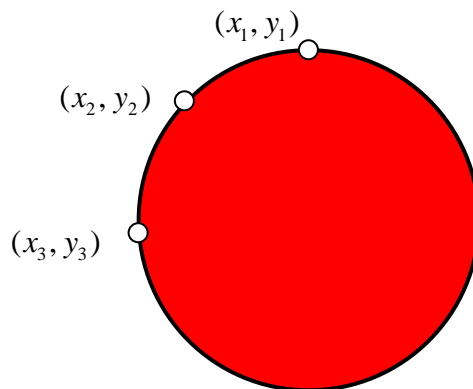


圖 2.8 取點示意圖

在本實驗中邊界上任三點取樣的方法為

$$\sum_{i=0}^{(n/11)-2} (x_i, y_i) 、 \sum_{j=i+1}^{(n/11)-1} (x_{11j}, y_{11j}) \text{ 與 } \sum_{k=j+1}^{(n/11)} (x_{11k}, y_{11k})$$

其中 n 為邊界點的數量，而間隔 11 個點當作取樣點是為了加快程式執行速度，此種方法的優點在於當物體被遮蔽面積過大，仍可以還原圓心位置。

(七)模擬結果與分析

為了瞭解前述方法之適用性，本節使用天文攝影家實際拍攝之太陽照片，其格式為 1000×913 ，再利用照片編輯程式模擬太陽受雲層遮蔽之情形，以上述四種方法做處理比較，圖中白色點為各方法找出之圓心位置。其中定義座標原點為照片左上角位置， x 軸向右為正， y 軸向下為正。定義 Method1:重心法; Method2:霍夫轉換法; Method3:最大直徑法; Method4:三點求圓心法。

Case1



圖 2.9 模擬太陽不受雲層遮蔽

表 2.1 Case1 實驗結果表

	Center(pixel)	Diameter(pixel)
Method1	(480,443)	760
Method2	(481,443)	764
Method3	(482,436)	764
Method4	(480,443)	760

Case2



表 2.2 Case2 實驗結果表

	Center(pixel)
Method1	(453,502)
Method2	(481,442)
Method3	(482,436)
Method4	(480,443)

圖 2.10 模擬太陽部分受雲層遮蔽

Case3



表 2.3 Case3 實驗結果表

	Center(pixel)
Method1	(436,712)
Method2	(409,858)
Method3	(387,675)
Method4	(480,444)

圖 2.11 模擬太陽大部分受雲層遮蔽

太陽不受雲層遮蔽時，重心法算出之位置應與其圓心位置重合，且由 Case1 結果可發現，三點求圓心算出之結果與重心法算出之結果一致，則可確定太陽中心位置為(480,443)，因此我們以此中心為標準，比較其他各方法算出之中心位置誤差，其誤差結果如下：

表 2.4 各 Case 之影像處理誤差結果 單位:pixel

	Case1	Case2	Case3
Method1	0	64.88	293.74
Method2	1	1.41	421.03
Method3	7.28	7.28	249.94
Method4	0	0	1

由表 2.1 可看出，在 Case1 當太陽沒有被遮蔽時，最大直徑法找出之中心位置誤差最大，約為 7.28pixel，而三點求圓心法無誤差。在 Case2 當太陽部分被遮蔽時，重心法算出之中心位置誤差最大，約為 64.88pixel，而三點求圓心法無誤差。在 Case3 當太陽被遮蔽的部分較大時，霍夫轉換法算出之誤差最大，約為 421.03pixel，三點求圓心法誤差最小，為 1pixel。綜合以上結果可發現，當太陽受不同程度遮蔽時，利用三點求圓心的方法算出之太陽中心位置誤差最小，因此本研究選擇三點求圓心的方法來找太陽中心。

由 Case1 知此影像之太陽直徑為 760pixel，太陽視角為 0.54° ，利用此關係可算出此張照片每個像素的精度為 $\frac{0.54}{760} = 0.0007^\circ / pixel$ ，故 Case3 中三點求圓心法之計算誤差為 0.0007° 。

二、追日影像實測結果分析與比較

為能使影像處理方法應用於實際之日照，本研究將 CCD 攝影機移至戶外拍攝太陽影像，並利用影像處理技術分析比較與室內模擬之太陽影像的差別，做為修正影像處理軟體的依據。

(一) 室內測試模擬

在實驗室內測試時，以紅色保麗龍球模擬太陽，利用 CCD 攝影機進行拍攝，再將拍攝後之影像做處理，找出太陽中心位置。拍攝後之影像處理與其分析結果如下圖所示：

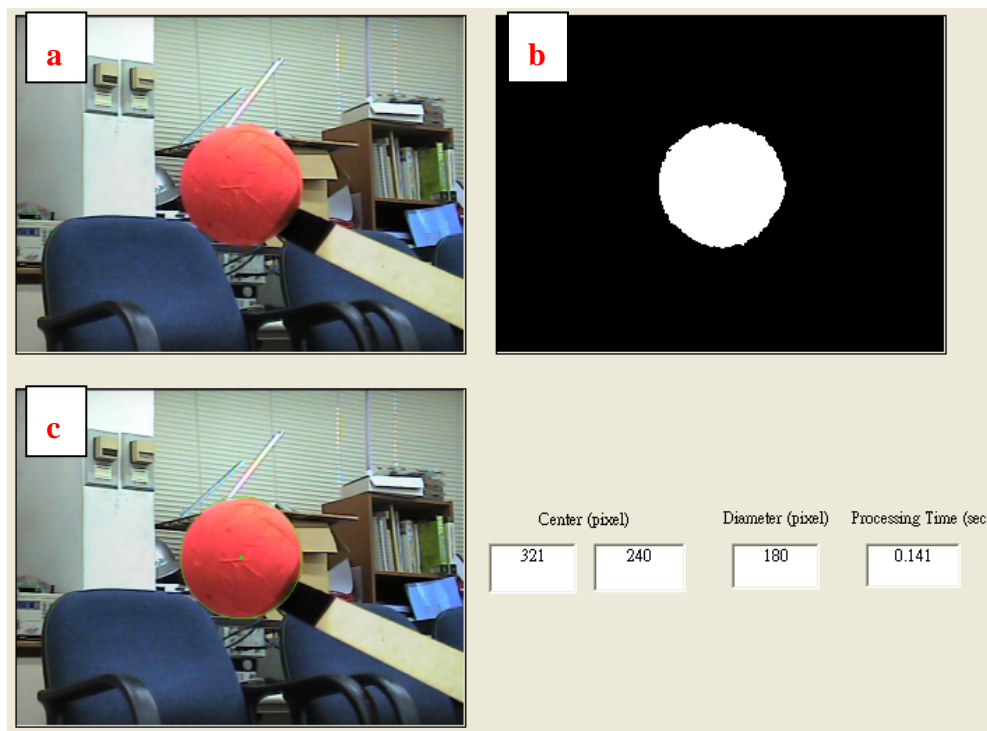


圖 2.12 模擬之太陽影像分析結果

圖 2.12(a)為拍攝之原始影像，中心為模擬之太陽，背景為實驗室內雜物;圖 2.12(b)為二值化後之影像，其中只取出紅色之模擬太

陽，背景則經影像處理後去除;圖 2.12(c)為最終影像處理結果，其中綠色點為經過影像處理後，找出之太陽中心位置，綠色圓為以太陽中心點為圓心，影像處理結果之直徑畫出之圓。將綠色圓與太陽邊界做擬合，若兩者重合即可確定影像處理後之太陽中心位置正確。

由圖 2.12(a)可看出，雖然模擬之太陽受上方日光燈影響，呈現上半部較亮，下半部較暗之情形，且目標物周圍環境複雜。但經由本研究設計之影像處理技術，適當調整太陽目標物之 HSL 閾值範圍，即可將背景去除，找出太陽目標物，如圖 2.12(b)。再利用三點找圓心的方法找出太陽中心位置。由圖 2.12(c)可看出，其綠色圓完全與太陽邊界重合，則可確定影像處理後太陽中心位置(321,240)結果正確。

(二)戶外太陽影像分析

利用實驗室發展之方法，將 CCD 攝影機移至戶外，實際進行太陽影像擷取，並對影像進行分析，拍攝地點為台南市成功大學航太系館四樓。戶外拍攝時，因太陽光線非常強烈，為避免太陽直接照射 CCD 攝影機感光元件，導致元件燒壞，使用前置式太陽濾鏡安裝於攝影機鏡頭前方，將太陽入射光線大量減弱，藉以保護 CCD 攝影機之感光元件。實驗中使用的太陽濾鏡是由美國 THOUSAND OAKS OPTICAL 公司生產，其型號為 THOUSAND OAKS OPTICAL TYPE 2 PLUS，其透光率為十萬分之一，且可將紅外光與紫外光濾除。為

了能得到較大的太陽影像，增加影像解析度，將 CCD 攝影機與望遠鏡做結合，將太陽影像放大後再進行拍攝，所使用之望遠鏡型號為 Microtech F90-TR。太陽濾鏡與天文望遠鏡實圖如下：



圖 2.13 前置式太陽濾鏡



圖 2.14 Microtech F90-TR 望遠鏡

太陽影像拍攝及處理結果：拍攝時間：2011/6/3 9:48 AM

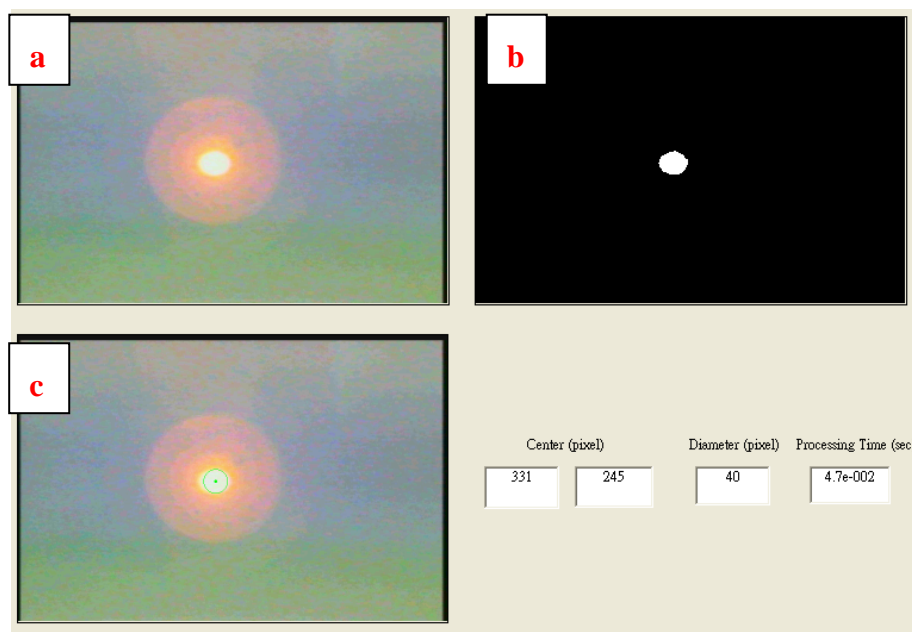


圖 2.15 CCD 攝影機+前置式太陽濾鏡實拍影像及處理結果

由於本研究使用的 CCD 攝影機，價格較便宜且感光元件較小的一般家用監視型攝影機，所以在入射光線較弱的情況下，拍出之影像畫質較差，如圖 2.15(a)。CCD 攝影機使用視角為 20 度之鏡頭，用來拍攝視角 0.5 度的太陽時，拍攝出之太陽影像相對較小，解析度較差，邊界容易產生鋸齒狀。若利用鋸齒狀的邊界來找圓心，準確性將會降低。

首先將前置式太陽濾鏡安裝於望遠鏡前方，降低太陽入射光的強度，再將 CCD 攝影機固定於望遠鏡目鏡處進行拍攝。由於使用望遠鏡搭配視角 20 度的攝影機拍攝時，太陽目標物太大，會超出螢幕範圍，所以更換攝影機視角為 70 度之鏡頭進行拍攝。

以下為拍攝結果及分析，拍攝時間:2011/6/3 9:59 AM

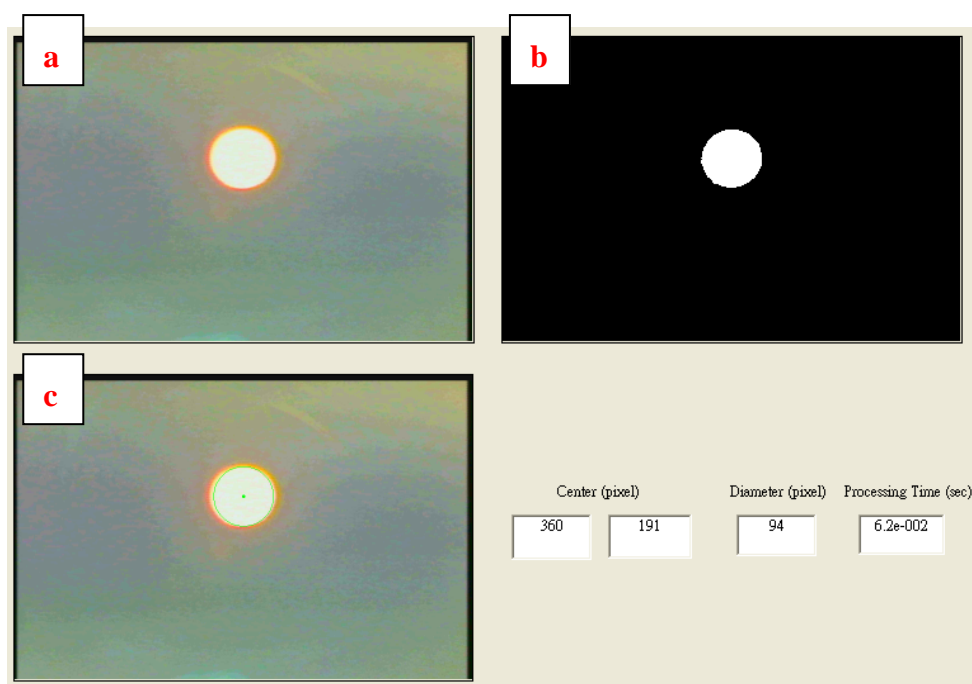


圖 2.16 CCD +天文望遠鏡+太陽濾鏡實拍影像及處理結果

由圖 2.16 結果可發現，雖然加上望遠鏡拍攝可使太陽影像變大，但 CCD 攝影機未更換，所拍出影像畫質仍然較低，影像略呈橢圓形，且周圍有光暈出現。因太陽影像為橢圓形，所以經由影像處理所得之綠色圓無法與之擬合，無法確定影像處理結果是否正確。

為得到較高畫質太陽影像，測試影像處理結果的準確性，選用數位相機取代原本 CCD 攝影機進行拍攝。實驗中的數位相機型號為 Canon A3300 IS，其規格有效像素為 1600 萬像素，CCD 尺寸為 1/2.3 吋，光圈為 F2.8-5.9，焦距為 28mm-140mm，光學變焦為 5 倍。

首先將前置式太陽濾鏡裝於望遠鏡前端，將數位相機固定於遠鏡目鏡處，並調整適當的數位相機光圈值，光圈值越大拍攝之太陽影像越大，在此我們設定數位相機光圈值為 F4.0 進行拍攝。以下為拍攝結果分析，拍攝時間:2011/5/9 11:59AM

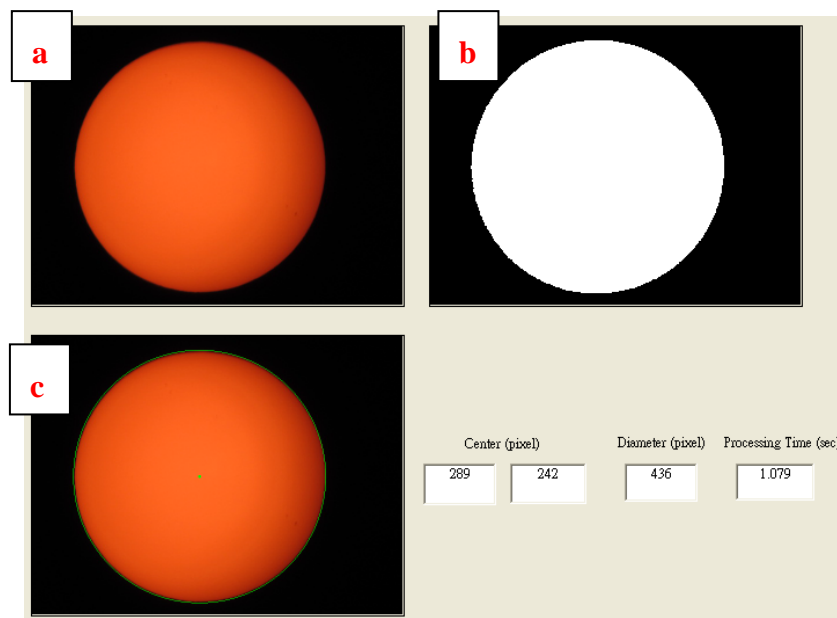


圖 2.17 數位相機+天文望遠鏡+太陽濾鏡實拍影像及處理結果

由圖 2.17 結果可發現，利用數位相機拍攝可得到較大且清晰的太陽影像。由於太陽影像清晰，周圍無光暈產生，進行影像處理時容易將太陽目標物與背景區分出來，影像邊界較規則且平滑，影像處理時準確度較高。並由圖 2.17(c)看出綠色擬合圓與太陽邊界重合，可確定影像處理結果之準確性。

綜合以上分析得知，若想準確求得太陽中心位置，必須先拍出一幅清晰的太陽影像。想拍出一幅清晰的太陽影像，可藉由提升拍攝設備的感光元件大小來取得，因為感光元件的尺寸越大，拍出之影像畫質越好。由於本研究使用的 CCD 攝影機感光元件大小為 1/4 吋，尺寸較小，拍攝之影像畫質較差。而數位相機 Canon A3300 IS 使用的感光元件大小為 1/2.3 吋，尺寸較大，拍攝之影像畫質較佳。因此日後若希望拍出一幅高畫質的太陽影像，則可將 CCD 的感光元件更換為較大的尺寸，再進行拍攝。

不同日照條件拍攝之影像分析

在確定影像處理的準確性後，我們再拍攝當太陽受雲層遮蔽時之影像，測試本研究設計之影像處理技術，是否能在不同日照條件下，準確找出太陽中心位置。以下為拍攝結果與分析，

拍攝時間:2011/5/7 3:10 PM

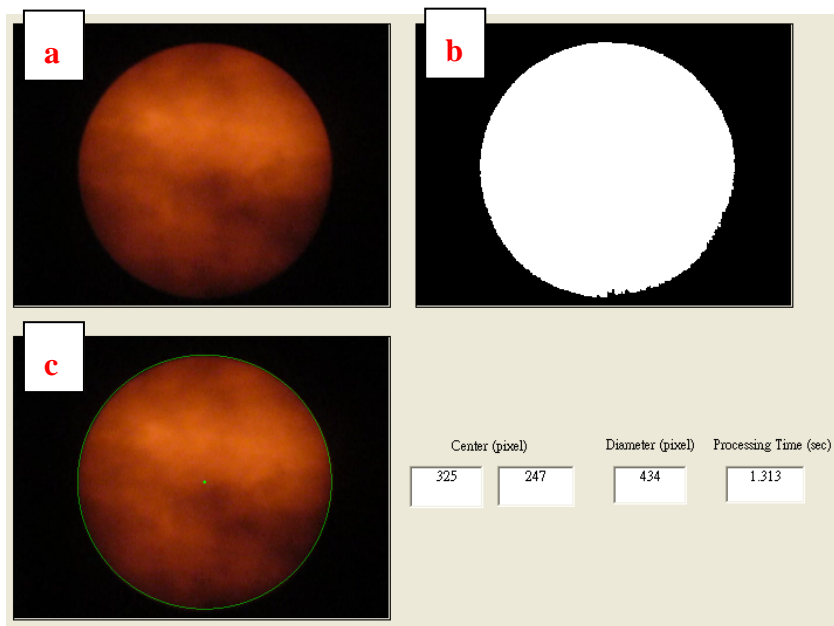


圖 2.18 太陽被稀薄雲層遮蔽

拍攝時間:2011/5/7 3:12 PM

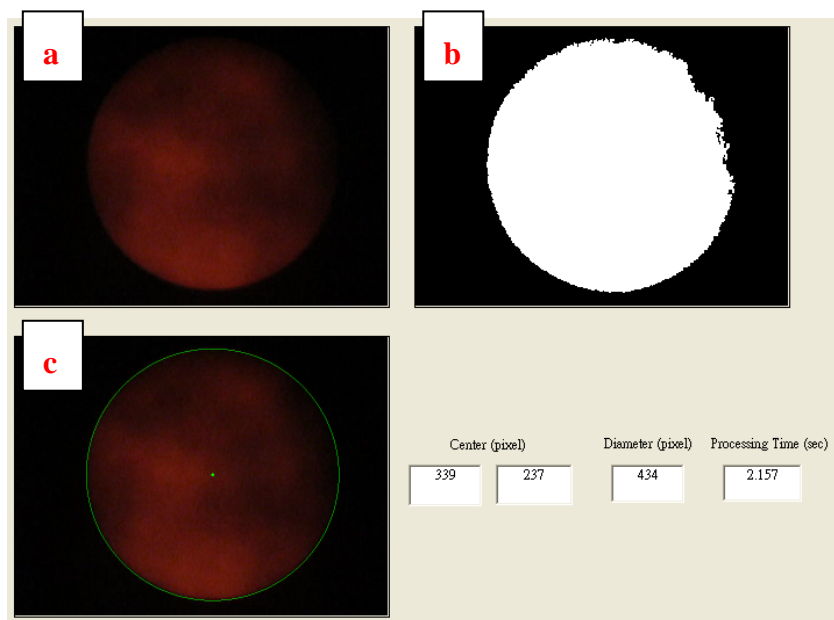


圖 2.19 太陽被較厚雲層遮蔽

拍攝時間:2011/5/7 3:14 PM

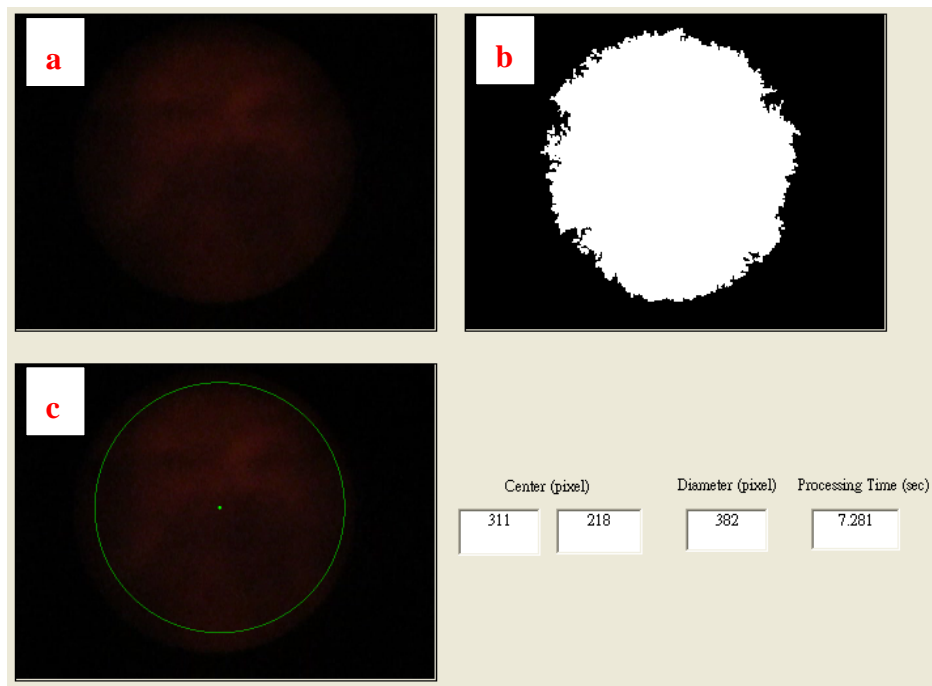


圖 2.20 太陽幾乎完全受雲層遮蔽

由圖 2.18 當太陽被稀薄雲層遮蔽時，雖然太陽影邊界有不規則形狀產生，但與整個邊界相比，其比例較小。在做影像處理時，仍具備高準確性。再觀察圖 2.19 當太陽被較厚雲層遮蔽時，太陽影像邊界不規則區域變多，其比例仍不足以影響影像處理之準確性。最後觀察圖 2.20 當太陽幾乎完全被雲層遮蔽時，太陽影像邊界不規則區域明顯變多，且其占了大多數比例。在做影像處理時容易擷取到不規則的邊界，導致影像處理之結果不正確。

綜合以上各圖結果，本研究設計之影像處理技術，在不同日照條件下，大部分都可準確算出太陽中心位置，唯有在太陽幾乎完全被雲層遮蔽，太陽邊界較不規則時，才會降低影像處理之準確性。其直徑與無雲層遮蔽時比較，誤差為 52pixel。且因其邊界數量較多，所需之計算時間較長，約為無雲層遮蔽時的 6.7 倍。

三、追日影像系統控制器設計與硬體模擬

追日影像之設計乃以 CCD 攝影機底片之中心點為參考原點，與太陽影像投射中心點之間可定義兩個獨立之誤差值，以獨立操控及分別修正底片與太陽中心之方位角(Azimuth)與仰角(Elevation)。本研究設計兩套模糊控制器與驅動馬達，根據影像量測誤差值分別計算各角度誤差及所需之修正控制訊號，執行追日任務。為了研究實驗的便利性，另設計一模擬太陽運動軌跡裝置，方便在實驗室內進行追日控制器之研製與分析。以下分別介紹太陽運動軌跡模擬裝置與系統控制器的設計。

(一)太陽運動軌跡模擬裝置設計

本研究以直徑 15 公分的紅色保麗龍球模擬太陽，並將保麗龍球固定於長 130 公分的桿件頂端，再以馬達帶動此桿件模擬太陽白天時相對於地表之運動。另安裝速度控制器調整模擬太陽的移動角速度，使其近似於實際太陽運動角速度。由於地球的赤道平面與繞著太陽公轉運行的軌道平面，或是太陽相對繞行地球的平面(稱為黃道面)，夾角可從-23.45 度到+23.45 度，所以在帶動馬達下方加裝一木塊使馬達能傾斜各種角度，模擬不同緯度及節氣時所見太陽運動軌跡。太陽運動軌跡模擬裝置如下圖所示：

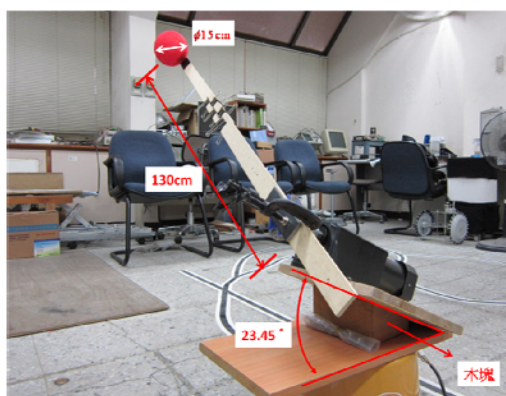


圖 2.21 太陽運動軌跡模擬裝置

此裝置中用來轉動桿件所使用的馬達為如陽公司的交流馬達 M560-501F。馬達額定轉速為 1700rpm，由於此轉速太快不適合用來模擬太陽運動，我們加裝了兩個 10:1 的中間減速機與一個 150:1 的減速機，其型號分別為 5GU10XK 及 5GU150KB，降低馬達轉速更近似於實際情形並藉此增加其扭力。加裝後其減速比為 15000:1，轉速降為 0.11rpm。我們另加裝一速度控制器 US560-01，此控制器可控制馬達轉速範圍為 0.006~0.1rpm。雖然此時馬達轉速還是比太陽運動速度(0.0007rpm)快，但已大幅降低並接近實際值。為了測試追日系統之控制方法，本研究使用此轉速範圍來模擬太陽運動速度。

(二)追日系統控制器設計

一般在設計控制器時，必須先求得受控系統的轉移函數，當系統越複雜時，越難求得其轉移函數。使用模糊控制則不需受控系統的精確數學模型，可簡化控制法則設計的複雜性。所以本研究使用模糊控制理論，分別設計追日系統的方位角與俯仰角控制器。

模糊控制器之設計

模糊控制器主要由模糊化介面(Fuzzification Interface)、模糊規則庫(Fuzzy Rule Base)、決策邏輯(Decision Making Logic)與解模糊化介面(Defuzzification Interface)所組成，如下圖：

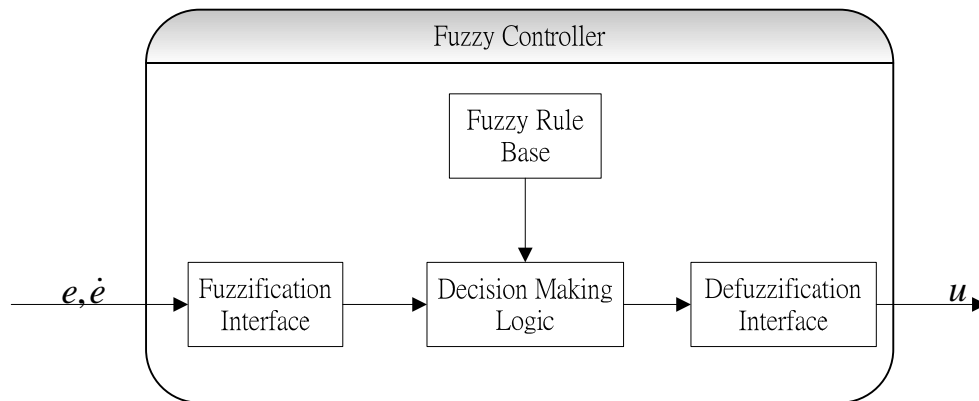


圖 2.23 模糊控制流程圖

其中 e 、 \dot{e} 為系統誤差與誤差變動量， u 為控制器輸出控制量。

其流程是先將輸入的變數依其所屬模糊集合歸屬程度，給予 0 到 1 之間的數值，進行模糊化處理，再經由使用者定義之模糊規則庫，產生決策邏輯推論，最後經由解模糊化介面求出所需的控制量。模糊控制之步驟說明分述如下。

模糊化介面(Fuzzification Interface)

模糊化介面的主要功能為量測輸入變數的值，並將此數值對應到所屬的模糊歸屬函數(Membership Function)。在設計模糊化介面時，須先定義輸入與輸出的變數，並設計模糊歸屬函數使用三角形歸屬函數(Triangular Membership Function)。

本研究方位角控制器中輸入的兩組變數分別為方位角誤差 e_A 與誤差變動量 \dot{e}_A ，輸出的變數為方位角參數 A ，模糊歸屬程度分別為 $m(e_A)$ 、 $m(\dot{e}_A)$ 及 $m(A)$ 。而俯仰角控制器中輸入的兩組變數分別為仰角誤差 e_E 與誤差變動量 \dot{e}_E ，輸出的變數為仰角參數 E ，模糊歸屬程度分別為 $m(e_E)$ 、 $m(\dot{e}_E)$ 及 $m(E)$ 。

兩個模糊控制器使用的歸屬函數皆為三角形歸屬函數，並定義歸屬函數名稱為 NB(Negative Big)、NS(Negative Small)、N(Negative)、ZE(Zero)、P(Positive)、PS(Positive Small)與 PB(Positive Big)。以下為方位與俯仰兩組控制器輸入與輸出變數的歸屬函數圖：

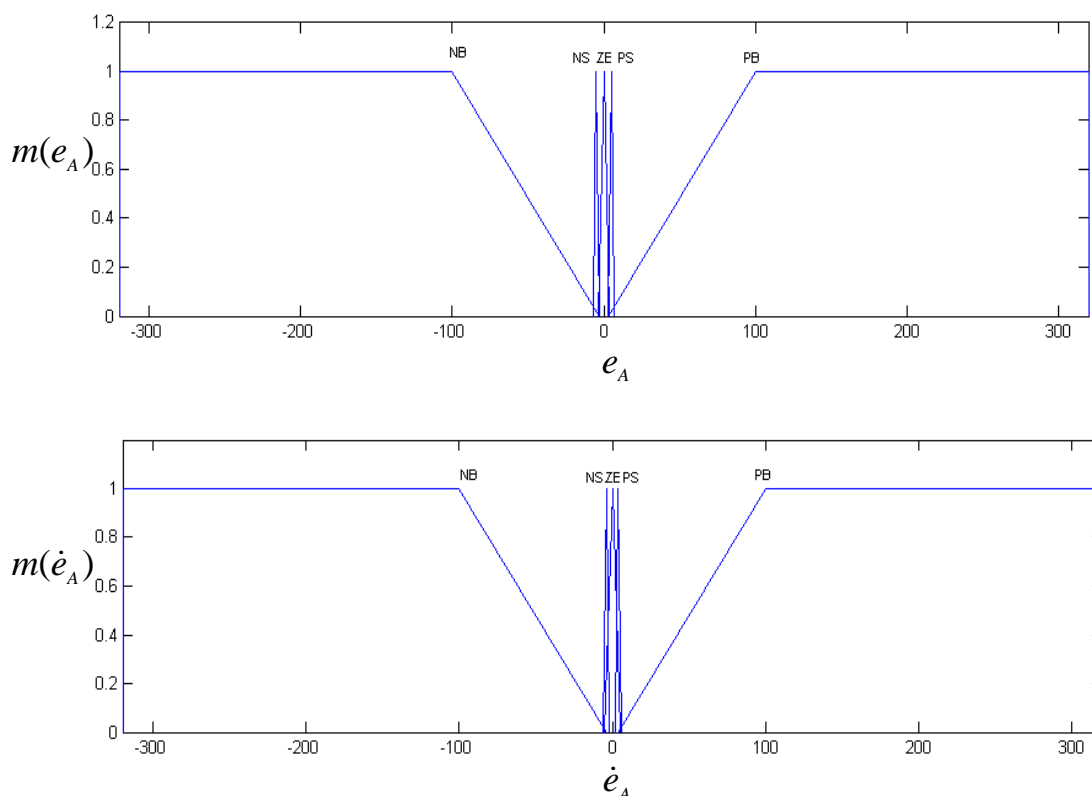


圖 2.24 方位角控制器輸入變數歸屬函數圖

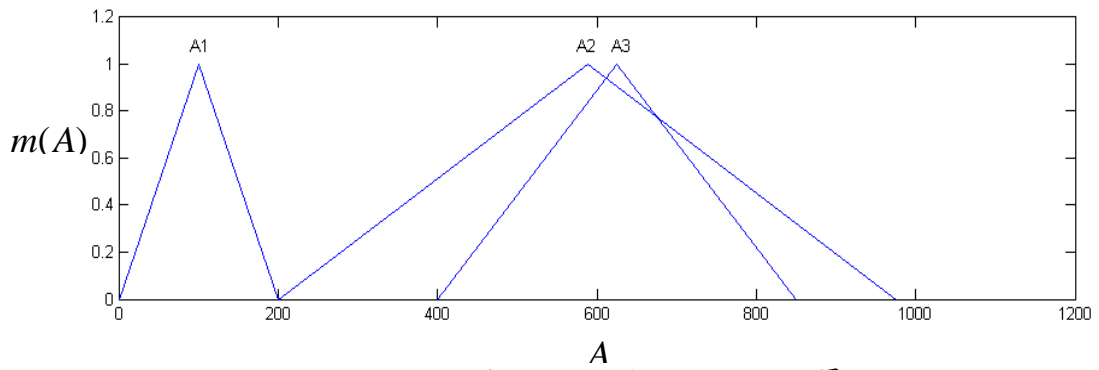


圖 2.25 方位角控制器輸出變數歸屬函數圖

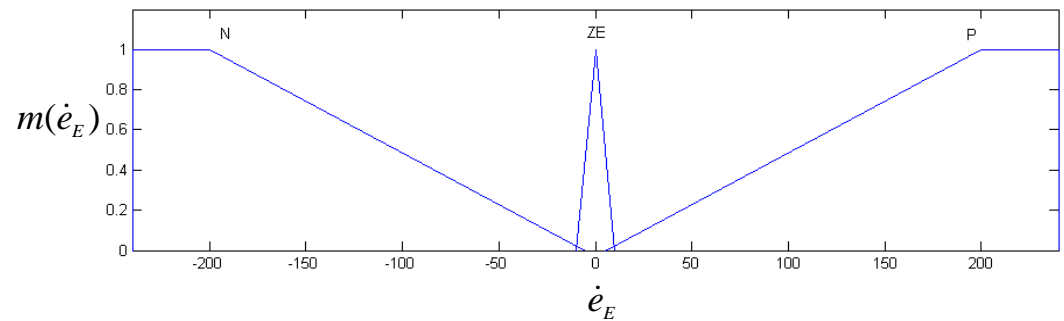
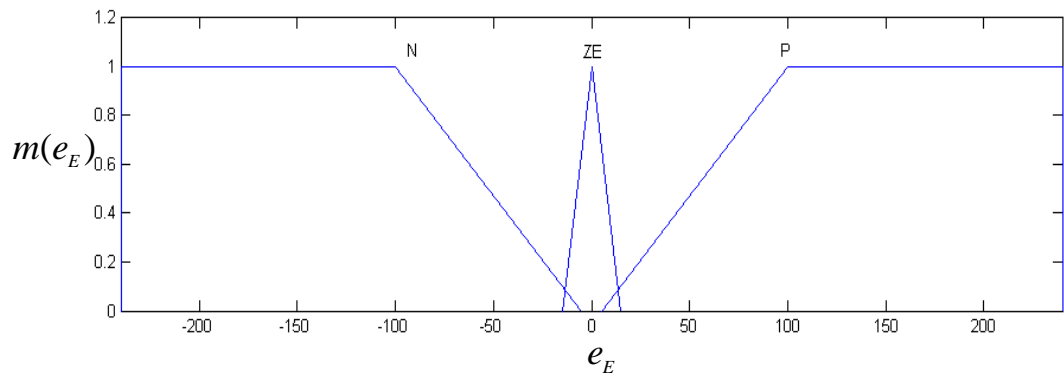


圖 2.26 俯仰角控制器輸入變數歸屬函數

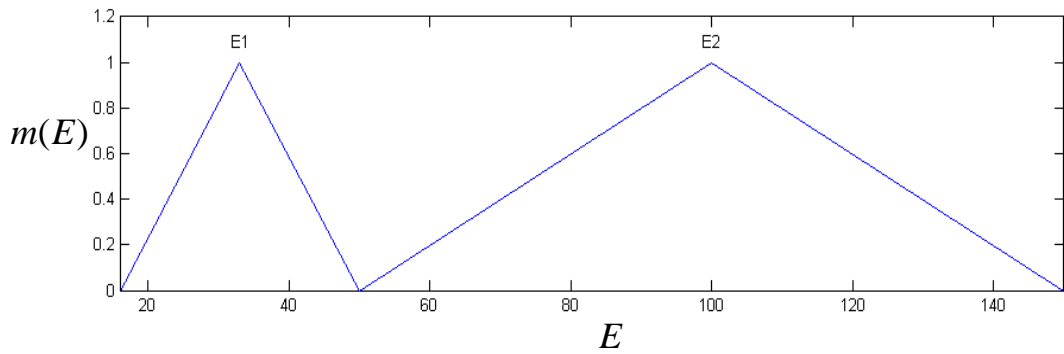


圖 2.27 俯仰角控制器輸出變數歸屬函數圖

由於太陽移動速度緩慢，在追蹤過程太陽中心位置較靠近螢幕中心，因此設計之方位角歸屬函數較靠近 ZE。但由於從台南觀測之太陽方位角在夏至中午時段變化較快速，因此必須考慮當系統誤差變大時，快速做修正。設計了 PB 及 NB 歸屬函數藉以適時修正系統誤差。由於太陽仰角變化較慢，所以在正常追蹤情況下，俯仰角控制器只會用到 ZE 歸屬函數做控制。當系統剛啟動誤差較大時，才會使用到 P 及 N 兩個歸屬函數。

模糊規則庫(Fuzzy Rule Base)

模糊規則庫是由多個 if-then 所組成，常見的規則庫有單輸入單輸出 **IF** x is A **THEN** y is B，與雙輸入單輸出的形式 **IF** x is A **AND** y is B **THEN** z is C。下表為本研究設計之模糊規則庫：

表 2.5 方位角控制器模糊規則庫

A		e_A				
		NB	NS	ZE	PS	PB
\dot{e}_A	NB	A3	A3	A1	A2	A3
	NS	A3	A2	A1	A2	A3
	ZE	A3	A2	A1	A2	A3
	PS	A3	A2	A1	A2	A3
	PB	A3	A2	A2	A3	A3

本研究使用的兩個模糊規則庫皆為雙輸入單輸出型式。方位角控制器輸入的兩個變數分別為誤差 e_A 與誤差變化量 \dot{e}_A ，輸出的變數為方位角參數 A 。俯仰角控制器輸入的兩個變數分別為誤差 e_E 與誤差變化量 \dot{e}_E ，輸出變數為仰角參數 E 。

表 2.6 俯仰角控制器模糊規則庫

E		e_E		
		N	ZE	P
\dot{e}_E	N	E2	E1	E2
	ZE	E2	E1	E2
	P	E2	E2	E2

決策邏輯(Decision Making Logic)

決策邏輯是整個模糊控制器的核心，當模糊控制器經過規則庫選擇適當的輸出函數後，此步驟將進行模糊輸出函數的合成運算，求得所需的模糊控制量。合成運算有許多種方法，本研究採用最小合成法做運算，其步驟為：首先找出輸入參數 e 與 \dot{e} 分別對應的歸屬函數值，並選擇兩者中較小的值，再將最小值帶入模糊規則庫決定的輸出歸屬函數，並取最小值以下的面積，最後將此兩面積結合。

以下示範最小合成法的運算

(一) **IF** e_A is NS **AND** \dot{e}_A is NB **THEN** A is A3

(二) **IF** e_A is NS **AND** \dot{e}_A is NS **THEN** A is A2

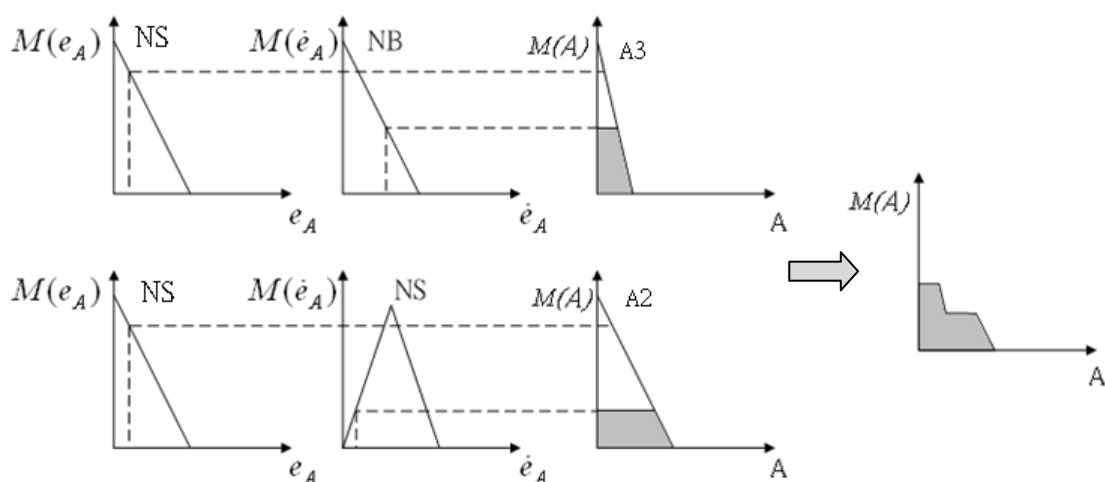


圖 2.28 最小合成法運算圖

解模糊化介面(Defuzzification Interface)

經由決策邏輯後所得的結果為一個模糊輸出量，而解模糊化的目的是將此模糊輸出量經由適當的計算轉換成實際控制的輸出量。較常用的解模糊方法有:重心法(Center of Area Method)、最大歸屬度平均法(Mean of Maximum Method)及高度法。本研究使用重心法進行解模糊，其計算公式如下:

$$u = \frac{\int_y y \times m(y) dy}{\int_y m(y) dy}$$

其中 u 為模糊控制器實際輸出量， y 為模糊函數輸出變數， $m(y)$ 為 y 所對應的歸屬函數值。

參、主要發現與結論

實驗結果顯示，本研究所建構之影像處理技術應用於追日模組，對於估算太陽中心位置具有高準確性，配合所開發之光電系統控制器穩定性高且具有高追蹤精度。於本研究利用簡單且低成本的 CCD 攝影機與數位相機、影像擷取卡、個人電腦與電子元件進行整合，開發出一套閉迴路追日系統且具備高追蹤精度，對於往後追日系統商業化有相當的參考價值。

本研究在設計閉迴路追日方法應用於 HCPV 光電系統之追日模組，其中比較以 CCD 攝影機及數位相機加裝天文望遠鏡與太陽濾鏡拍攝太陽影像，再利用影像處理技術估算太陽中心位置，二者之優缺點。並由追日模組將太陽中心位置傳至本研究開發的模糊控制器，解取方位角與仰角所需之系統修正量，作為未來實際系統操控之參考。

肆、参考文献

1. Araki, K., Kondo, M., Uozumi, H., Kemmoku, Y., Egami, T., Hiramatsu, M., Miyazaki, Y., Ekins-Daukes, N. J., Yamaguchi, M., Siefer, G., Bett, A. W. (2004) "A 28% efficient, 400× and 200 WP concentrator module," 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition.
2. Araki, K., Uozumi, H., Yamaguchi, M., Kemmoku, Y. (2005) "Development of a new 550× concentrator module with 3J cells - performance and reliability," 15th Inter. Photovoltaic Science & Engineering Conference.
3. Sierra, C., Vazquez, A. J. (2005) "High solar energy concentration with a Fresnel lens," *J. Materials Science*, 20: 1339-1343.
4. Algora, C. (2007) "Very-high-concentration challenges of III-V multijunction solar cells," *Concentrator Photovoltaics*, Chapter 5, Springer-Verlag.
5. Yamaguchi, M., Araki, K., Takamoto, T. (2007) "Concentrator solar cell modules and systems developed in Japan," *Concentrator Photovoltaics*, Chapter 15, Springer-Verlag.
6. Cancro, C., Graditi, G., Leanza, G., Pascarella, F., Sarno, A., Mancini, D. (2007) "Field testing of the PhoCUS solar tracker by means of a novel optoelectronic device," 4th International Conference on Solar Concentrators for the Generation of Electricity or Hydrogen, San Lorenzo del Escorial, Spain, 12-16.
7. Cowley, S., Horne, S., Jensen, S., MacDonald, R. (2007) "Acceptance angle requirements for point focus CPV systems," 4th Inter. Conf. on Solar Concentrators for the Generation of Electricity or Hydrogen. Delta-T (2007) <http://www.delta-t.co.uk/>
8. Hakenjos, A., Wüllner, J., Lerchenmüller, H., (2007) "Field performance of flatcon high concentration photovoltaic systems," 33rd IEEE photovoltaic specialists conference.
9. Shin, H. Y., Hong, H. F., Wu, C. H., Cheng, C., Tzeng, Y. C. (2007) "The development of a 5 kW HCPV system at INER," 4th Inter. Conf. on Solar Concentrators for the Generation of Electricity or Hydrogen, San Lorenzo del Escorial, Spain.

10. Luque-Heredia, I., Moreno, J.M., Magalhaes, P.H., Cervantes, R., Quemere, G., Laurent, O. (2007) "Inspira's CPV sun tracking," *Concentrator Photovoltaics*, Chapter 11, Springer-Verlag.
11. Stalter, O., Burger, B., Bacha, S., Roye, D. (2009) "Integrated solar tracker positioning unit in distributed grid-feeding inverters for CPV power plants," *Industrial Technology, 2009. ICIT 2009. IEEE International Conference* p. 1-5.
12. Liou, H. M. (2010) "Overview of the photovoltaic technology status and perspective in Taiwan," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14:1202-1215.
13. Xianqzhi, B., and Fuqen, Z., "Edge Detection Based on Mathematical Morphology and Iterative Thresholding," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Computational Intelligence and Security*, Vol. 2, pp. 1849-1852, Nov. 2006.
14. Yang, Y., Yuhua, P., and Zhaoquanq, L., "A Fast Algorithm for YCbCr to RGB Conversion," *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, Vol. 53, No. 4, pp. 1490-1493, Nov. 2007.
15. Davis, M., et al., "Machine Vision as a Method for Characterizing Solar Tracker Performance," *33rd IEEE, PVSC*, 2008.
16. Lin, Y.Y. and Liao, M.Y., "Image Processor and Fuzzy PID Controller Design for Robot-Car Intercept Mission," *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers*, Vol.30, No.5, pp.401-408, 2009.
17. Arturo, Minor M. and Alejandro, Garcia P., "High-Precision Solar Tracking System," *Proceedings of the World Congress on Engineering 2010 Vol. II, WCE 2010, June 30 – July 2, 2010, London, U.K.*
18. 台灣業餘天文攝影愛好者論壇
<http://astro.freebbs.tw/viewthread.php?tid=508&extra=page%3D22>
19. T. D'Orazio, C. Guaragnella, M. Leo, A. Distanto, "A new algorithm for ball recognition using circle Hough transform and neural classifier". *Pattern Recognition* 37 (2004) pp.393-408.
20. 繆紹綱譯，普林斯頓國際有限公司，“數位影像處理”，2004年，pp.610-624。