

# 模糊理論應用於太陽能電池基板污點檢測

## Solar Cell Wafer Surface Stain Defect Inspection with Fuzzy Theory Method

林志威  
私立逢甲大學  
自動控制工程研究所  
學生  
[lz\\_wei@msn.com](mailto:lz_wei@msn.com)

林宸生  
私立逢甲大學  
自動控制工程研究所  
教授  
[lincs@fcu.edu.tw](mailto:lincs@fcu.edu.tw)

陳錫杰  
台灣茂矽電子股份有限公司  
處長  
[ralph\\_chen@mail.mosel.com.tw](mailto:ralph_chen@mail.mosel.com.tw)

### 摘要

太陽能電池生產過程中因為人為因素或是製程因素而產生污點，進而影響產品品質。所以，本篇論文擬提出一個以模糊理論(Fuzzy Theory)為基礎的多晶矽太陽能板污點影像檢測。在本篇論文中採用雷射投影光斑取得太陽能板污點影像進行影像處理分析。在影像處理方面，利用模糊理論的規則庫(rule base)以模糊推論(Fuzzy Inference)方式，進行影像的二值化處理。並輔以模糊類聚 C-平均值分析(Fuzzy Cluster C-Means Analysis)進行影像特徵的突顯。最後擷取的影像特徵值，做為類神經網路的輸入，經由倒傳遞類神經網路判斷影像是否為污點。

**關鍵詞：**模糊推論、模糊類聚 C-平均值分析、倒傳遞類神經網路

### Abstract

In the manufacturing process of solar wafer the stain is an important factor for product quality. Therefore, this paper presents an image processing techniques based on the fuzzy theory in the application of solar cell surface dirt defect inspection. Laser spot projection is used to acquire solar wafer dirty defect image. In image processing step, the fuzzy theory with fuzzy inference rule base is used in image processing of the binarization. Then the image feature can be obtained with the fuzzy C-Mean clustering analysis. Finally, the system judge the wafer is dirty defect or not by Back-propagation Neural Network method.

**Keywords:** Fuzzy inference rule base、C-Mean

clustering analysis、Back-Propagation Neural Network

### 1. 前言

在油價高漲的時代，石油又不斷的開採，終究會消耗殆盡的一天，各個國家也積極找尋、研發替代能源。太陽能更是一種取之不盡，用之不竭的天然能源，是近年來各國積極開發的替代能源，希望可以減少對石化能源的依賴。太陽能電池(Solar Cell)是近年來太陽能源的新興應用，是一種經由太陽光照射在光電半導體，可以直接將光能轉換成電能的發電技術，也可稱為光伏電池(Photovoltaic)。

本篇論文，將提出一個以模糊理論為基礎的影像處理方法，應用於多晶矽太陽能板的污點檢測。在取像過程中，是以雷射光點照射在多晶矽太陽能電池板表面污點，進而擷取反射所產生的光斑影像，以利後續進行影像分析。雷射投影光斑法又稱為焦散術[1]。是一種用雷射光照射在待測物太陽能電池板，進而產生干涉效應而得到的強度分布影像[2]。當雷射光斑照射在太陽能電池板，觀察反射處的光點影像後可以發現反射光點呈現高亮度且接近圓形的影像。而在反射點附近則呈現許多不規則且隨機分佈的微小斑點影像。當物體表面粗糙度不同時，散射的雷射光的方向及相位亦隨之改變，導致斑點之分佈的情形跟著變化[2]。下頁圖1所示為太陽能板雷射投影光斑影像。

模糊理論可以將不確定性資訊，經由歸屬函數(Member Function)量化為0~1區間數值及模擬人類決策過程等的特點。而基於模糊推論的影像處理演算法，是先規則庫(Rule Base)中存放以專家知識所建立的規則，再經由模糊推論方式，模擬人類的決策行為為模式，而達到影像處理目的。



圖 1. Solar Cell 雷射投影光斑圖

多晶矽太陽能板因表面呈現不規則狀的排列方式，難以建立出一般的數學模型，並輔以精確解的方式，進行影像處理分析。因此使用模糊理論進行太陽能板的表面影像分析，進而達到表面的污點檢測為本篇論文的重點。

## 2. 模糊推論

以模糊理論為基礎的影像處理方法，通常可以分為三個步驟(如圖2所示)：模糊化(fuzzification)、歸屬函數運算及解模糊化(defuzzification)[3]。

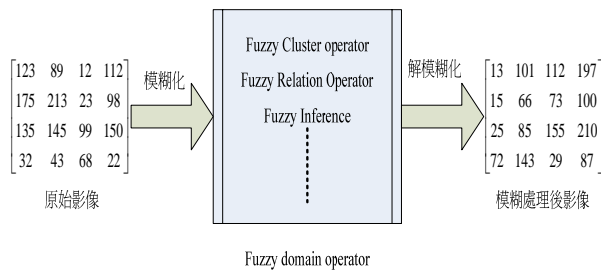


圖 2. 模糊影像處理架構圖

模糊化是經由歸屬函數(member function)將影像由實數集合量化為0~1區間的模糊集合(Fuzzy set)，通常將影像模糊化，有三種方式可供參考：灰階模糊化(histogram-based gray-level fuzzification)、影像特徵模糊化(feature fuzzification)及區域影像模糊化(local fuzzification)[3]。當影像轉為模糊集合後，即可以開始運用模糊集合運算，如模糊關係推論或模糊推論等運算。當運算完畢後，必須將模糊集合，還原為實數集合，此一過程即是解模糊化。

本篇論文主要是以模糊理論為基礎所衍生的影像處理演算法。當載入影像後，首先必須先以二值化(Binarization)的方式進行影

像處理，以過濾其它不相關的資訊。而在進行二值化影像處理時，在實務上常常發生待處理影像有許多雜訊，而無法直接使用二值化的方式，通常都必須借助其它的影像處理技巧，先濾除影像。而在本篇論文中，使用模糊推論(Fuzzy Inference)進行影像的二值化處理，以達到濾除雜訊，並突顯影像特徵。

### 2.1 二值化

由 CCD 所取得的影像為 RGB 格式影像，而必須擷取的特徵影屬於高亮度的區域，所以可以直接以影像的亮度為模糊化依據。

在本篇論文中，假設待處理的影像 I 在座標(x,y)的像素灰階值表示為  $I(x,y)$ 。而在該像素 I(x,y)的3x3周圍影像的最大灰階值表示為  $M_{3 \times 3}(x,y)$ 。輸出的影像 Y 在座標(x,y)的像素灰階值表示為  $Y(x,y)$ 。在影像模糊化，以亮度模糊函數  $\mu_B(x,y)$  代表亮度的模糊化(Brightness)、灰度模糊函數  $\mu_G(x,y)$  代表灰度的模糊化(Gray)及暗度模糊函數  $\mu_D(x,y)$  代表暗度的模糊化(Dark)。如圖3所示。

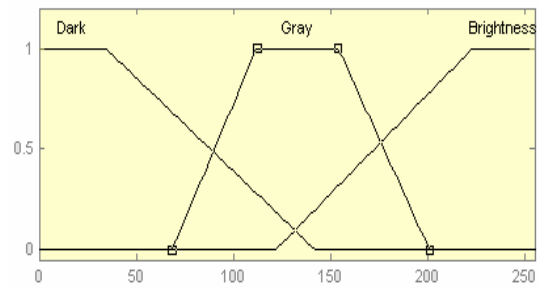


圖 3. 影像模糊化歸屬函數

模糊推論的規則庫設定方面規則數的設定，設定為3，所以在規則庫的設定總共為三條規則。而在  $y'$  代表模糊推論的三個輸出。模糊規則庫設定如以下公式(1)~(3)所示[4]：

$$\text{if } I(x,y) \text{ is Brightness then } y'_w \text{ is White} \quad (1)$$

$$\text{if } I(x,y) \text{ is Dark then } y'_b \text{ is Black} \quad (2)$$

$$\text{if } I(x,y) \text{ is Gray then } y'_m \text{ is Middle} \quad (3)$$

當推論的模糊規則成立後，則會得到一個模糊輸出。在本篇論文中的三個模糊輸出函數，如圖4所示，其模糊輸出分別以  $y'_w$  代表 White 輸出，灰階值為255， $y'_m$  代表 Middle 輸出，灰階值為128及  $y'_b$  代表 Black 輸出，灰階值為1。

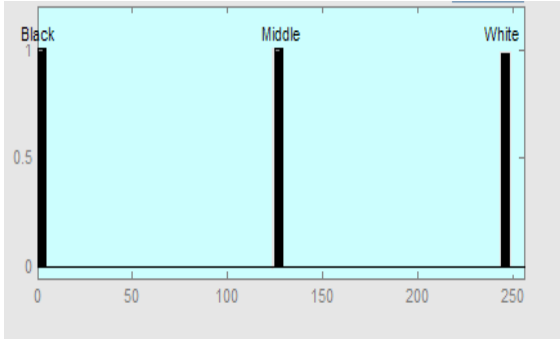


圖 4. 模糊推論輸出函數

因為檢測的影像其特徵影像，屬於高亮度區域。所以在模糊規則庫的設定方面，除了是以影像二值化為目標，並希望可以突顯出影像的高亮度區域。所以在模糊推論方面是以讓影像的高亮度的像素提高亮度，低亮度的像素減低亮度。但影像在由高亮度區域至低亮度區域存在者劇烈的變化，轉換成二值化後會有鋸齒狀的情形。而這一部份可以使用膨脹運算 (Dilation Operator)，以解決此一現象，並可以得到更平滑的影像。所以規則三可以修正成多規則模式，如下公式4。

$$\begin{aligned}
 &\text{If } I(x,y) \text{ Dark-Value not very Dark} \\
 &\quad \text{and } M_{3 \times 3}(x,y) \text{ is Over-Brightness1 then} \\
 &\quad \quad \quad y' \text{ is White} \\
 &\text{Else if } M_{3 \times 3}(x,y) \text{ is Over-Brightness2 then} \\
 &\quad \quad \quad y' \text{ is White} \\
 &\text{Else if } I(x,y) \text{ is Dark then} \\
 &\quad \quad \quad y' \text{ is Black} \quad (4)
 \end{aligned}$$

在公式4中的參數 Over-Brightness1 及 Over-Brightness2，用以決定是否使用膨脹運算。當影像  $I(x,y)$  周圍的最大灰階值大於 Over-Brightness1，而該點的像素影像  $I(x,y)$  的暗度不是很明顯，即可以進行影像的膨脹運算。而另一個規則設定，不論  $I(x,y)$  的暗度為何，只要  $I(x,y)$  周圍的最大灰階值大於 Over-Brightness2，即進行影像的膨脹運算。最後若以上最非則執行一般的運算。

當模糊推論得到模糊輸出結果後，則必須進行解模糊化。在本篇論文中所使用的是高度解模糊化 (Height Defuzzification) [5]。如公式5所示。

$$Y(x,y) = \frac{y'_w \times \mu_B(x,y) + y'_m \times \mu_G(x,y) + y'_b \times \mu_D(x,y)}{\mu_B(x,y) + \mu_G(x,y) + \mu_D(x,y)} \quad (5)$$

## 2.2 特徵擷取

擷取特徵影像是影像辨識的一個重要步驟。當執行模糊影像二值化後，影像上將只會有黑色像素與白色像素布佈。而在本篇論文中的特徵影像因分佈在影像的二側，所以本論文採用模糊聚類分析 C 平均值法分成二類，載入特徵影像的中心，以進行擷取特徵影像及切割。二值化後的影像上，可以假想成分佈在二維空間的資料集合，如下圖5所示。

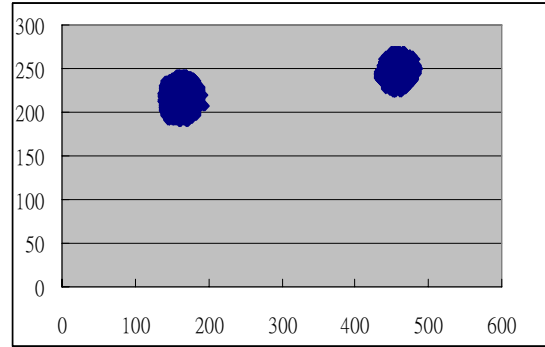


圖 5. 二值化的影像分佈圖

在模糊 C 平均值演算法裡，是針對已知資料的進行，假設 C 個群組的分類演算，對於擷取特徵影像有不錯的成效 [6]。

模糊 C 平均值演算法是由 Bezdek 在 1981 年所提出的分群演算法，主要是針對硬式 c 平均值演算法 (ISODATA)，導入模糊概念後，所形成的演算法。模糊 C 平均值演算法是針對已知的資料集合  $X = \{x_1, x_2, x_3 \dots x_n\}$ ， $X_i \in R^p$ ，進行分類，且計畫要分成 c 類，其  $c \in \{2, 3, \dots, n-1\}$ ，並定義歸屬矩陣  $U_{c \times n}$ ，以表示其 X 集合中的第 i 元素  $x_i$ ，歸屬於某一分類的高低。歸屬矩陣  $U_{c \times n}$  如下所示：

$$U_{c \times n} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} & \dots & \dots & u_{1n} \\ u_{21} & & & \ddots & & \\ u_{31} & & & & \ddots & \\ u_{41} & & & & & \ddots \\ \vdots & & & & & \\ u_{c1} & & & & & u_{cn} \end{bmatrix}$$

因為在分類過程中，某元素必定屬於某一分類，所以在初始化歸屬矩陣必須符合以下公式6 (以 X 集合的第1個元素為例)：

$$u_{11} + u_{21} + u_{31} + \dots + u_{c1} = 1 \quad (6)$$

初始化歸屬矩陣  $U_{c \times n}$  完畢，即可以開始進行



計算第  $j$  群聚中心值  $C$ ，其公式如下所示：

$$C_j = \frac{\sum_{k=1}^n (U_{jk})^m \times x_k}{\sum_{k=1}^n (U_{jk})^m} \quad (7)$$

其中， $m \in (1, \infty)$  為一個加權常數，通常設為 2。

$C_j$  表示為第  $j$  個分類

在整個演算法中是以迭代方式進行運算，整個流程整理如下：

- A. 初始化歸屬矩陣。
- B. 計算群聚中心值  $C_j^l$ 。其中  $l$  表示為迭代次數
- C. 更新歸屬矩陣  $U_{c \times n}$

$$U_{ij}^{(l+1)} = \frac{1}{\sum_{k=1}^c \left( \frac{\|x_j - c_i^l\|}{\|x_j - c_k^l\|} \right)^{\frac{2}{m-1}}} \quad (8)$$

- D. 若  $\|U^{l+1} - U^l\| < \varepsilon$  則停止迭代運算，否則回到步驟(B)。

### 3. 類神經網路

一個典型的倒傳遞類神經網路 (Back-Propagation Neural Network) 架構如圖 6 所示，可以分為三層，輸入層 (Input Layer)、隱藏層 (Hidden Layer) 及輸出層 (Output Layer)。通常接收來自於外界資訊的輸入層不具有計算能力，只是簡單的將外界資訊傳遞到隱藏層。隱藏層則是介於輸入層與輸出層，主要是將輸入層所傳遞的信號特徵傳遞到輸出層。輸出層將網路計算後的資訊傳遞給外界[7]。由此可見，類神經網路是將所有的資訊是儲存在網路中，並且可同時進行資料處理之能力。

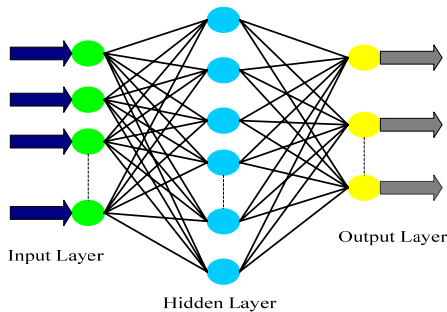


圖 6. 類神經網路架構圖

#### 3.1 網路架構

在本篇論文中，以倒傳遞類神經網路進行

污點的辨識，其架構如圖 6 所示。整個類神經網路分為三層，輸入層設定為 5 個節點，隱藏層設定為 10 個節點，最後輸出層為 2 個節點，分別代表是否為污點的可能性。學習演算法是採用倒傳遞學習演算法。

在本篇論文中，擷取影像面積比例、弧度、平均亮度、亮度變異量及影像長寬比等屬性。進行污點判斷。觀察圖 7、8，可以發現當雷射光斑投射在污點及非污點上二者之間的差異性。在無污點的影像上如圖 7，所投影出來的特徵影像弧度是比較接近圓形，且光暈也平均的分佈在特徵影像週圍。而在有污點的影像上如圖 8，所呈現的特徵影像弧度是較屬於非圓形的情形。

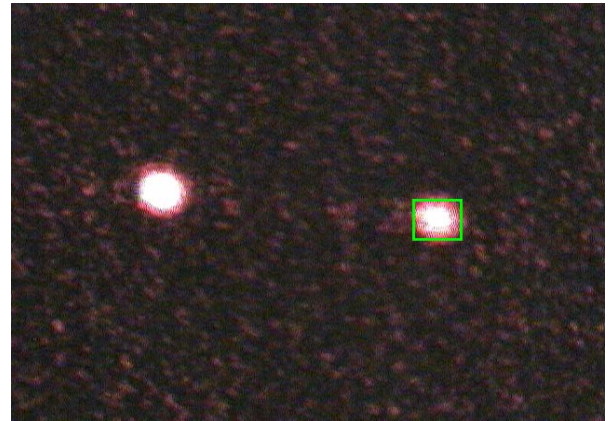


圖 7. 類神經網路架構圖

表 1. 圖 7 影像特徵值

影像特徵值	
影像面積比例	0.289204
弧度	0.020537
平均亮度	0.420156
亮度變異量	0.8838
特徵影像長寬比	1.148936

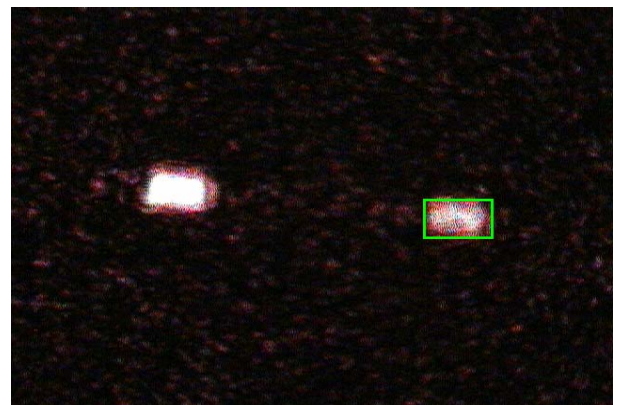


圖 8. 類神經網路架構圖

表 2.圖 8 影像特徵值

影像特徵值	
影像面積比例	0.219597
弧度	0.058151
平均亮度	0.507188
亮度變異量	0.7264
特徵影像長寬比	1.5

#### 4. 污點辨識演算法

在本篇論文中，的污點辨識演算法流程，如圖9所示。

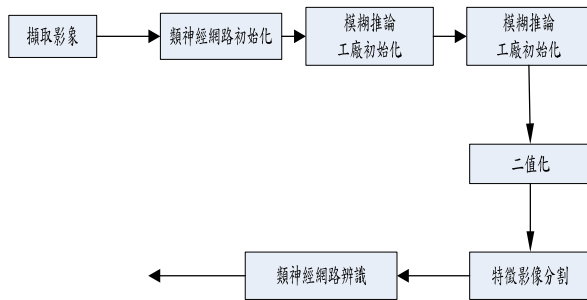


圖 9. 污點辨識演算法流程圖

下列表3及表4是實驗取像階段所使用的 CCD 及雷射光源規格表。

表3. 雷射光源規格表

光源規格	
光源	氬氫雷射
輸出頻率	632nm
輸出功率	0.3W

表4. Digital Camera 規格表

Digital Camera 規格	
電腦介面	USB 2.0
感光元件	Color CMOS with 350K pixels
解析度	VGA (640 x 480)
每秒張數	30 fps at VGA (640x480)
色彩	Up to 16.8 million true color (24-bit)
電源	5V(USB Support)
作業系統	Windows XP
驅動程式	WDM driver, TWAIN interface
功能	Color (R/G/B) and Brightness Adjustment Gamma Correction Hue and Gain Control

多晶矽太陽能電池基板，除了表面呈現不規則紋路，不易以一般空間域的影像處理演算法進行分析。加上本身材料屬於易碎材料，所

以在檢測時，需採取非接觸式的影像，以本篇論文所提出的雷射投影光斑法，即是非常適合檢測太陽能電池基板。

特徵影像分割是進行污點辨識過程中的重要步驟。而類神經網路的輸入值是以特徵影像的特徵值做為輸入。在本篇論文中分別是擷取特徵影像面積比例、弧度、平均亮度、亮度變異量及影像長寬比等屬性做為類神經網路的輸入值。

特徵影像的弧度計算，是以下公式(9)計算。

$$e = \frac{4\pi \cdot A}{l} \quad (9)[8]$$

其中，A 為影像面積

l 為影像週長

e 為計算所得的弧度

假設計算半徑 r 的圓形面積為  $\pi r^2$ ，週長為  $2\pi r$ ，代入公式(9)，e 值等於 1。由此可知當影像面積愈接近圓形 e 值也愈近 1，相反的影像愈複雜其 e 值也愈小。

#### 5. 實驗結果

以本篇論文所提出的模糊影像處理方法，所得的結果，如圖10與圖11所展示。在圖10的影像是模糊二值化但不包含膨脹運算。圖11的影像是模糊二值化包含膨脹運算。可以明顯的看出未經膨脹運算的二值化影像邊緣具有鋸齒狀的情形，而經由膨脹運算的二值化影像則明顯的改善此一現象。

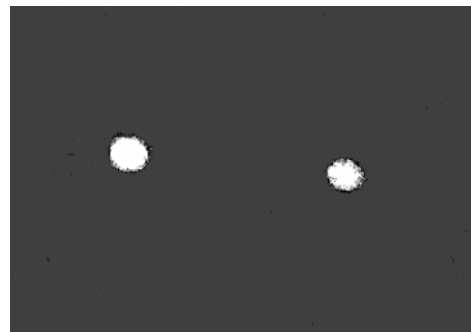


圖 10. 模糊二值化運算，不包含膨脹運算



圖 11. 模糊二值化運算，包含膨脹運算

經由以上的模糊影像處理後，得到特徵影像的屬性，並預先將資料分為學習樣本及測試樣本。在進行污點辨識前，須先對類神經網路，進行學習，讓網路得以學習其辨識污點能力。而類神經網路的輸入參數，則為經由模糊影像處理後，所擷取到的特徵影像屬性，進行學習並調整影像網路權重。經由倒傳遞類神經網路學習後，其辨識能力可以高達 90% 以上。

## 6. 結論

在本篇論文中，提出的模糊影像處理方法，針對複雜的影像，具有過濾其它不相關的背景資訊能力，而在影像辨識時，並具有容忍雜訊能力，且不須建立複雜的數學模型。而這正是模糊影像處理與一般的影像處理方法的差異性。太陽能電池為近幾年的新興產業，再加上其表面的晶元排列方式屬於不規則方式，以一般的影像取像及影像處理演算法，並不容易處理及分析。而這方面的文獻也不多，希望本篇文章能達到拋磚引玉之效。

## 致謝

本研究經費由國科會計畫 NSC 96-2221-E-035-028-MY3 提供，在此特別致謝。

## 參考文獻

- [1] 林宸生教授個人教學網頁 <http://140.134.32.129/nowsci/cau/index.html>
- [2] 傅書賢、林宸生，應用雷射光斑技術於太陽能基板粗糙度檢測系統，光電研討會，2009。
- [3] Tizhoosh, H.R. "Fuzzy Image Processing: Potentials and State of the Art" 5<sup>th</sup> International Conference on Soft Computing, Iizhka, Japan, 1998, pp. 321-324.
- [4] Etienne E. Kerre. "Fuzzy Techniques in Image Processing" New York: Physica-Verlag, 2000, pp137-171.
- [5] J. M. Mendel, "Fuzzy Logic Systems for Engineering: A Tutorial" Proceedings of the IEEE, vol.83, pp345-377, Mar. 1995.
- [6] 汪惠健譯，模糊理論與應用，台灣培生教育，2006。
- [7] 顧力栩譯，人工智慧：智慧型系統導論(第二版)，台灣培生教育，2007。
- [8] 吳上立，林宏墩譯，C 語言數位影像處理，全華科技，2006 年 3 月。