

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

應用機器視覺於多晶矽太陽能電池之檢測 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 97-2221-E-216-023-
執行期間：97年08月01日至98年07月31日
執行單位：中華大學機械工程學系

計畫主持人：邱奕契

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理人員：許國彥
碩士班研究生-兼任助理人員：廖家鈺

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 98年09月27日

應用機器視覺於多晶矽太陽能電池之檢測
研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 97-2221-E-216-023

執行期間：97年08月01日至98年07月30日

計畫主持人：邱奕契

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理人員：許國彥
、廖家鈺

執行單位：中華大學機械工程學系

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

多晶矽太陽能電池之表面瑕疵檢測

Surface Flaws Inspection of Multicrystalline Silicon Solar Cells

計畫編號：NSC 97-2221-E-216-023

執行期限：97年08月01日至98年07月30日

主持人：邱奕契 副教授 中華大學機械工程學系

共同主持人：無

計畫參與人員：陳治宏 中華大學機械工程研究所

一、中文摘要

多晶矽太陽能電池表面所具有的不規則紋理，提高了瑕疵分割的困難度。再者，太陽能電池表面的抗反射層，也增加了取像的複雜度。為了成功將上述表面瑕疵檢測出來，在硬體設備方面，本研究所發展之太陽能電池檢測機，是由一台線掃描攝影機、兩個紅光 LED 條狀光源、一張影像擷取卡、及一組以伺服馬達驅動之移動平台所構成。在軟體程式方面，本研究使用自行研發之投影瑕疵偵測法進行表面瑕疵的檢測。投影瑕疵偵測法首先將影像二值化，目的是將背景之紋理去除；其次將二值化影像分別投影到水平軸及垂直軸，並計算投影之平均值及標準差；最後則以設定門檻值的方式將可能之瑕疵偵測出來。實驗結果顯示，本系統攫取一張 2048x2048 影像約需 0.4 秒，檢測瑕疵約需 0.78 秒，瑕疵偵測率為 93.98%。

關鍵詞：多晶矽太陽能電池、自動光學檢測、影像分割、瑕疵偵測

Abstract

Due to the non-directional textured background of poly-crystalline silicon solar cells, the difficulty in segmenting desired flaws increases. Besides, the anti-reflection coating layer multiplies the complexity of image capture of solar cells. To successfully detect the aforementioned surface flaws of a solar cell, the developed inspection system, which was constructed to

simulate a real production line, consists of one line scan camera, two red lights LED bar lighting, one image grabber, and one linear stage driven by a servo motor. As to the inspection software, we applied projection flaw detection (PFD) method to reveal defects. The independently developed PFD method first applied Otsu's method to removed background textures from the image. The resulting image was then projected to the vertical axis and horizontal axis sequentially. After projection, the mean values and the standard deviations of the projections were calculated. Finally, the desired flaws were located by setting a suitable threshold value. The experimental results show that it takes about 0.4 seconds to acquire a 2048x2048 image, 0.78 seconds to inspect the image, and the overall flow detection rate is 93.98%.

Keywords: poly-crystalline silicon solar cell, automatic optical inspection, image segmentation, defect detection.

二、緣由與目的

人類對石油的需求與日俱增，然而地球的石油存量有限，因此人們紛紛開始尋找新的替代能源。近年來許多科學家開始尋找可以利用大自然力量生成的能源，例如：風力發電、水力發電、及太陽能發電。2007年11月17日，聯合國跨政府氣候變遷小組(IPCC)在瓦倫西亞所發表的一份氣候評估報告中指出，2100年全球氣溫將會上升攝氏 1.1~6.4 度，海平面則可能上升約 60 公分。值得注意的是，該報告更提出警告說，只要氣溫

上升 1.5~2.5 度，就會有 20~30% 的動植物面臨瀕臨絕種的危機，溫室效應是造成全球暖化的原因。溫室效應的元兇是 CO₂ 的過度排放。乾淨能源指的是不會排放 CO₂ 的能源。核能有安全及核廢料不易處理的問題，反觀太陽能則具有安全及容易處理等優勢。太陽能電池在製造過程中可能出現的瑕疵包羅萬象，每一個瑕疵的產生都有可能降低太陽能電池的光電轉換效率。在目前轉換效率仍不高的情況下，如果能事先發現瑕疵，將可減少瑕疵所造成的成本損失。圖一為常見的太陽能表面瑕疵。本研究將針對太陽能電池的外觀進行瑕疵的檢測，檢測項目包括斷線、破裂、邊緣掉削、汗跡、白點及刮傷。

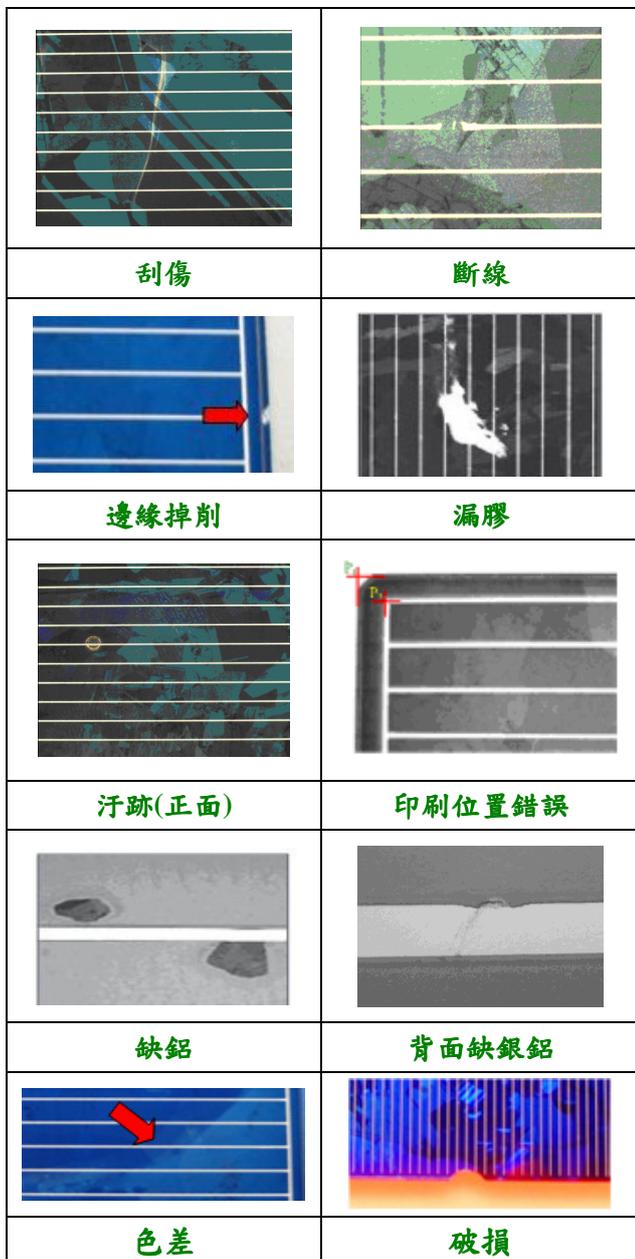


圖 1、太陽能電池各類瑕疵樣本。

表 1、樣本瑕疵種類及數量

瑕疵	破裂	斷線	汗跡	刮傷
數量	1	1	9	6
瑕疵	白點	邊緣掉屑	無瑕疵	
數量	2	4	1	

表 2、瑕疵名稱及檢測規格

瑕疵名稱	瑕疵檢測規格
破裂	不允許破裂及裂痕。
邊緣掉削	允許 1.5 mm (H) x 0.5 mm (V) 之掉削，每片不超過 2 處。
斷線	每片允許一條斷線 ≤ 2 mm 或每片斷線發生 ≤ 3 條，每條 ≤ 1 mm，不允許兩個平行斷線存在。
汗跡	允許汗跡面積 < 1.5 mm ² ，顏色需均勻一致，無明顯色差、手指印、花紋。
正面刮傷	表面無明顯刮傷。

三、研究設備與方法

針對多晶矽太陽能電池的表面瑕疵檢測，本研究分兩部份進行，分別為硬體架構的規劃與設計以及軟體程式的發展。在硬體架構的規劃與設計上，取像設備由線掃描攝影機、鏡頭、自製條狀紅光光源以及影像擷取卡這四大部分組成。系統架構如圖 2 所示，本研究所使用的線掃描攝影機為 DALSA Spyder2 攝影機，其最高解析度為 2048 像素，感測器大小 $14\mu\text{m} \times 14\mu\text{m}$ ，此處影像大小為 2048×2048 ，掃描頻率為 5000Hz，鏡頭採用 55mm/f2.8 之 NIKON 鏡頭。影像解析度為 $26.8\mu\text{m}/\text{pixel}$ 。在軟體程式的發展上，本研究使用 Borland C++ Builder 5.0 以及 MIL 函式庫撰寫軟體程式進行瑕疵的檢測。至於瑕疵檢測則是採以投影為基之投影偵測法進行瑕疵的偵測。研究所用的太陽能電池樣本有 24 片，表 1 為詳細之樣本分類。因為每家公司對瑕疵的定義並無一致的標準，表 2 為廠商給定的瑕疵規格整理資料。本實驗將根據此規格判定是否為瑕疵。

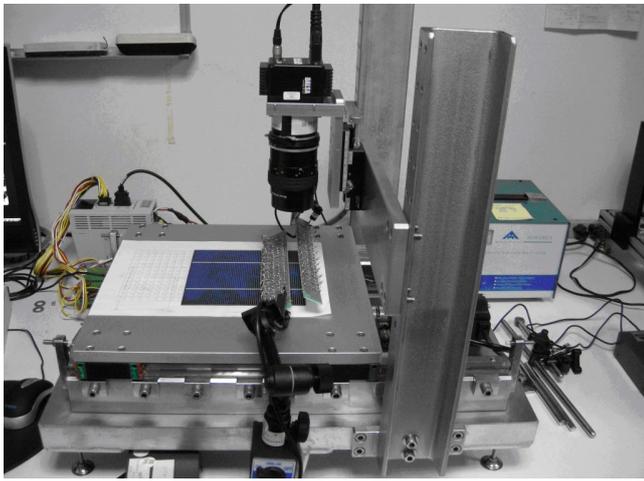


圖 2：研究設備圖

3.1、硬體架構

隨線檢測的硬體架構由移動平台、線掃描攝影機及光源所組成。取像設備為 DALSA Spyder2 高解析度線掃描攝影機，搭配 NIKON 55mm/f2.8 鏡頭。由上述瑕疵檢驗規範得知，瑕疵檢測所需之精度必須小於 0.5mm，倘若能將影像的解析度提高，則可取得較為清晰的瑕疵影像。此處影像解析度為 26.8 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ ，然而受限於機台的行程過短，無法縮短平台的加速區，導致影像出現拉長的現象。有鑑於此，本研究將影像大小設定為 2048x2048，此時之視野為 5.5cm x 5.5cm，一片太陽能電池需分九次擷取。倘若日後解決行程太短的問題後，可將影像大小調為 2048x5800pixel，視野範圍為 5.5cm x 15.6cm。在此解析度下，一片多晶矽太陽能電池需分三次取像即可。若搭配 3 台線掃描攝影機同時進行取像，則只需取像一次。

3.2、軟體架構

隨線檢測的軟體程式部份必須能夠同時控制平台的移動、線掃描攝影機的取像以及即時的瑕疵檢測，因此所發展之軟體程式必須整合此三部份。圖 3 所示為線上檢測軟體流程圖，在開啟程式之後，伺服馬達保持激磁狀態。給予移動訊號之後，伺服馬達透過聯軸器轉動滾珠螺桿進而使平台移動，並且同時啟動線掃描攝影機擷取影像；完成取像後，將影像二值化。接著使用投影瑕疵偵測法，對二值化影像進行瑕疵檢測。完成之後，將瑕疵輸出即完成單張影像的檢測。將上述步驟重複執行九次，即可完成整張太陽能電池的取像及檢測。

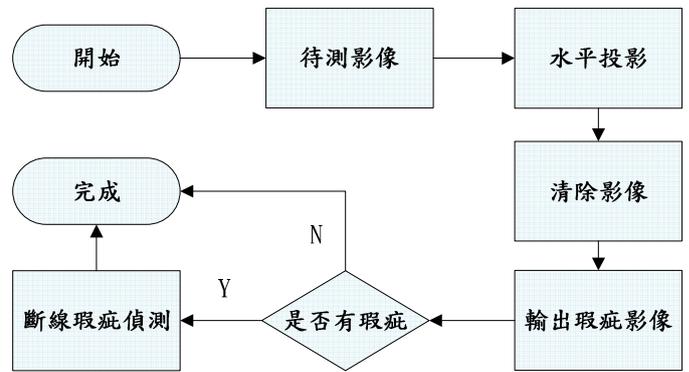


圖 3：瑕疵檢測流程圖

3.2.1、瑕疵分割：由於多晶矽太陽能電池具有較複雜的背景，因此在影像分割時必須慎選分割方法。圖 4.1 與 4.2 係以白點與刮傷瑕疵分別使用平均二值化法、歐蘇法[1]、疊代法[2]、及矩量恆定法[3]作為初步的評估，平均二值化法運算速度快卻有判斷較不精準的缺點。歐蘇法是以機率統計的原理，找出可以有效區分每個灰階濃度的分辨閾值，歐蘇法的優點為速度快且幾乎不受光源影響。疊代法藉由取代原先灰階平均值後去找尋新的閾值，此法運算時間較歐蘇法快，但往往不能得到比歐蘇法好的閾值。矩量恆定法是希望找到一個門檻值，使分割前與分割後的前三階矩量保持不變。

圖 4.1(a)及圖 4.2(a)為白點及刮傷瑕疵影像的原始影像，在使用此四種分割法進行影像分割評估，圖 4.1(b)及圖 4.2(b)為平均二值化的分割結果，圖 4.1(c)及圖 4.2(c)為歐蘇法的分割結果，圖 4.1(d)及圖 4.2(d)為疊代法的分割結果，圖 4.1(e)及圖 4.2(e)為矩量恆定的分割結果，由圖 4.1 中可以看出歐蘇法的分割效果較佳，可順利把背景去除並且保留瑕疵與電極線，另外三種方法無法成功的將背景去除，影像中留下的矽晶背景，將導致後續處理時的誤判。由圖 4.2 中可以看出使用歐蘇法及疊代法這兩種方法可以得到較佳的分割效果，但此分割結果還是無法順利將矽晶背景去除。經由分析灰階值之後得知，造成此結果的原因為瑕疵灰階值與背景灰階值過於相近，導致計算上的誤判，無法成功的將影像分割。綜合以上之結果，本研究是以歐蘇法進行影像二值化。

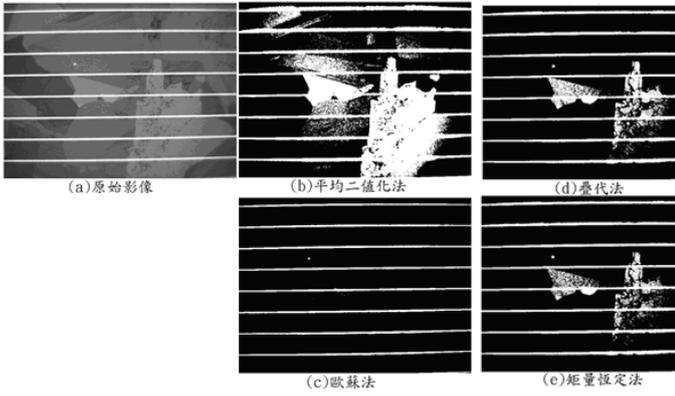


圖 4.1：白點瑕疵影像分割比較圖

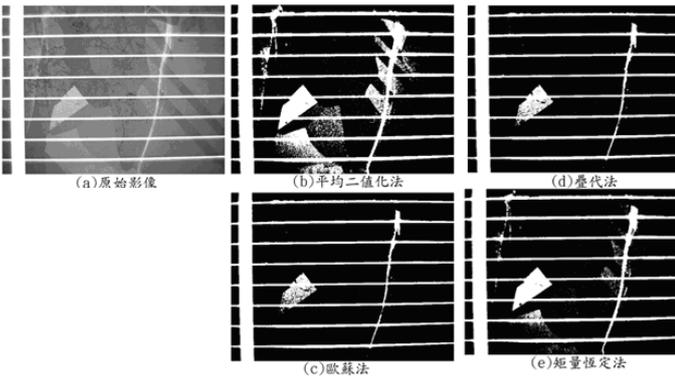


圖 4.2：刮傷瑕疵影像分割比較圖

3.2.2、投影瑕疵偵測法：本研究採以投影為基之投影偵測法進行瑕疵的偵測。投影偵測法是將二值化後之影像，分別投影至垂直軸及水平軸，接下來以投影的平均值做為閾值，進行瑕疵的判斷。此法可順利解決斑點檢測法，當瑕疵與電極線相連接時所造成的誤判。有鑑於經過二值化後之多晶矽太陽能電池影像，主要是由相互平行的電極線(grid finger)及垂直的電極線(bus bar)所組成，本研究提出以投影法為基之檢測法(稱為投影瑕疵偵測法)進行瑕疵的檢測。以下先就垂直投影及水平投影[4]進行說明。

垂直投影：垂直投影的方式是將每一行的點像素值投影至 x 軸，並根據式(1)總計該行的投影值 $P_v(x)$ 。令 $m \times n$ 代表影像大小， $f(x, y)$ 代表位於 (x, y) 之像素的像素值。

$$P_v(x) = \sum_{y=1}^n f(x, y) ; \text{ for } x=0 \sim m . \quad (1)$$

計算完每行的行投影值(P_v)後，接著計算行投影平均值及行投影標準差。首先累加每一行的行投影值 $P_v(x)$ ，再求取行投影值的平均值 μ_{p_v} ，其數學表示式如下：

$$\mu_{p_v} = \frac{1}{m} \sum_{x=0}^m P_v(x) \quad (2)$$

得到行投影平均值後，即可求取行投影標準差， σ_{p_v} 其數學表示式如下：

$$\sigma_{p_v} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{x=0}^m (P_v(x) - \mu_{p_v})^2} \quad (3)$$

水平投影：水平投影的方式是將每一列的點像素值投影至 y 軸，並利用式(4)總計該列的列投影值 $P_h(y)$ 。令 $m \times n$ 代表影像之大小， $f(x, y)$ 代表位於 (x, y) 像素的像素值。

$$P_h(y) = \sum_{x=1}^m f(x, y); \text{ for } y=0 \sim n . \quad (4)$$

計算完列投影值後，接著計算列投影平均值及列投影標準差。計算列投影平均值的方式是先累加列投影值 $P_h(y)$ ，再求取其平均值。求取列投影平均值 μ_{p_h} 之數學表示式如下：

$$\mu_{p_h} = \frac{1}{n} \sum_{y=0}^n P_h(y) \quad (5)$$

得到列投影平均值，即可計算列投影標準差。求取列投影標準差 σ_{p_h} 之數學表示式如下：

$$\sigma_{p_h} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{y=0}^n (P_h(y) - \mu_{p_h})^2} \quad (6)$$

3.2.3、檢測流程：輸入待測影像後，經過二值化之後的影像只剩下相互平行的電極線(grid finger)、與 grid finger 垂直的電極線(bus bar)、及瑕疵(圖 5)，首先使用歐蘇法將影像二值化。經過二值化之後的影像只剩下 grid finger、bus bar 及瑕疵，接著進行投影瑕疵偵測法。圖 6 所示為垂直投影瑕疵偵測法的流程圖，垂直投影偵測法的步驟說明如下：

- 步驟1：輸入待測影像。
- 步驟2：使用歐蘇法將影像二值化。
- 步驟3：進行垂直投影，並分別計算行投影值及行投影平均值。
- 步驟4：利用此平均值 μ_{p_v} 做為閾值，將影像分成兩個群組，分別為 G_u 、 G_l 。 G_u 為行投影值大於行投影平均值之行， G_l 則是行投影值小於行投影平均值之行。
- 步驟5：將行投影值 $P_v(x)$ 小於行投影平均值 μ_{p_v} 之待測影像輸出，也就是將群組 G_l 之待

測影像輸出。

步驟6：此步驟為斷線瑕疵之檢測，檢測之前需再次計算群組 G_u 中的行投影平均值及行投影標準差。檢測方式是將群組 G_u 中，行投影值 $P_v(x)$ 大於行投影平均值 μ_{p_v} 及行投影標準差 σ_{p_v} 之和(7 式)者，則視為斷線瑕疵。

$$P_v(x) > (\mu_{p_v} + \sigma_{p_v}) \quad (7)$$

步驟7：由式(7)判斷是否有瑕疵的存在。

步驟8：若無瑕疵，則清除待測影像。

步驟9：若有瑕疵，則輸出瑕疵影像。

步驟10：將兩個不同群組的影像進行整合，並輸出瑕疵影像。

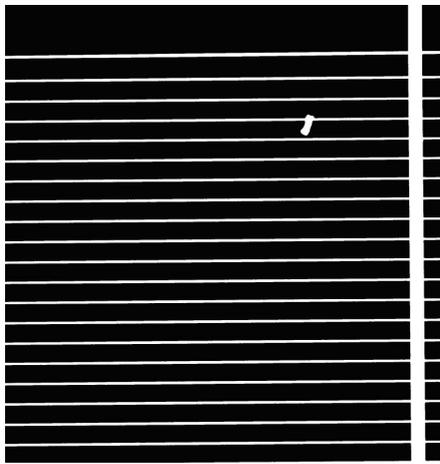


圖 5：二值化影像

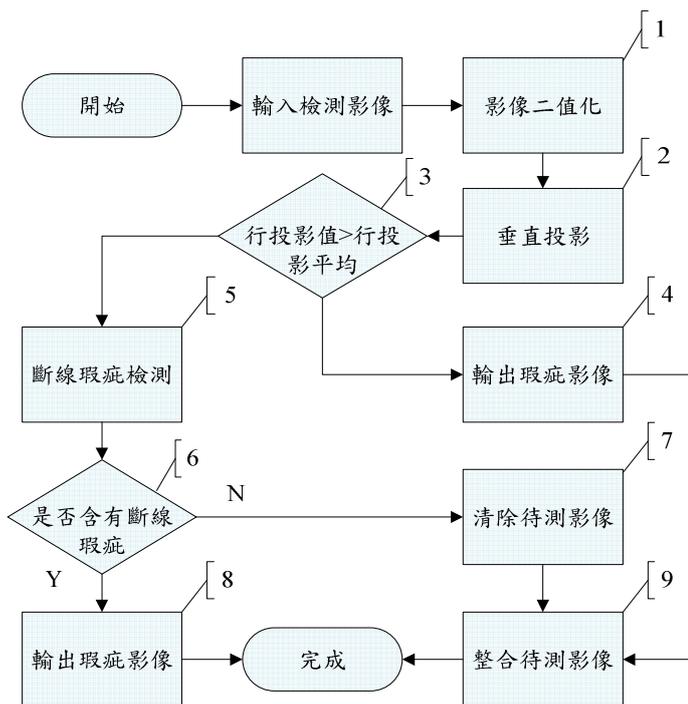


圖 6：垂直投影瑕疵偵測法流程圖

在垂直投影法檢測瑕疵時，首先使用二值化將影像中的瑕疵以及背景分離。接著計算每一行的投影值及行投影平均值，並使用行投影平均值當作閾值將影像分成兩個群組 G_u 、 G_l 。並計算群組 G_u 的行投影平均值及行投影標準差，若行投影值大於群組的投影平均值及行投影標準差之和，則代表有斷線的情形；反之，則代表沒有斷線。如果沒有斷線，則將群組 G_u 的影像清除。即完成垂直投影瑕疵偵測之結果，如圖 7、圖 8 所示。影像中只剩下瑕疵及 grid finger，則繼續進行水平投影檢測。水平投影瑕疵偵測法與垂直投影瑕疵偵測法差不多。圖 9 為水平投影瑕疵偵測法的流程圖，說明如下。

步驟1：輸入待測影像，影像中只包含 grid finger 及瑕疵。

步驟2：進行水平投影，並分別計算列投影值及列投影平均值。

步驟3：利用此平均值 μ_{p_h} 做為閾值，將影像分成 G_l 及 G_u 兩個群組，其中 G_l 指的是列投影值小於列投影平均值之列， G_u 指的是列投影值大於列投影平均值之列。

步驟4：將群組 G_l 之列像素直接輸出，此處輸出之影像即為瑕疵影像。

步驟5：此步驟為斷線瑕疵檢測，檢測之前需要再次計算群組 G_u 中的列投影平均值 μ_{p_v} 及列投影標準差 σ_{p_v} 。檢測方式為群組 G_u 中的列投影值 $P_h(y)$ 大於列投影平均值 μ_{p_v} 及列投影標準差 σ_{p_v} 之和(8 式)者，則視為斷線瑕疵。

$$P_h(y) > (\mu_{p_h} + \sigma_{p_h}) \quad (8)$$

步驟6：利用式(8)判斷是否有瑕疵。

步驟7：利用式(8)判斷 G_u 群組是否有瑕疵，若無則將影像清除。

步驟8：利用式(8)判斷 G_l 群組是否有瑕疵，若有則輸出瑕疵影像。

步驟9：將步驟 4、7 及 8 的影像整合，輸出完整的瑕疵影像。

步驟10：由於步驟 9 輸出之瑕疵影像中含有許多小線段，這些線段並非瑕疵，而是影像偵測時鋸齒狀邊界所留下來的線段，因此本步驟的目的是使用 1 字型中值濾波

器，將小線段去除。

步驟11：利用瑕疵的面積、長及寬，判定瑕疵是否合乎定義之瑕疵規格。

步驟12：若瑕疵符合檢驗規格，則輸出瑕疵影像。

步驟13：若瑕疵未符合檢驗規格，則清除瑕疵影像。

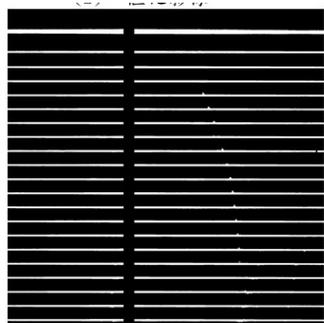


圖 7：垂直投影偵測法
檢測刮傷之結果。

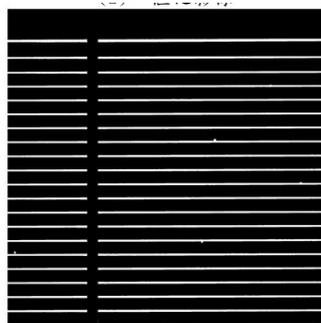


圖 8：垂直投影偵測法
檢測汗點之結果。

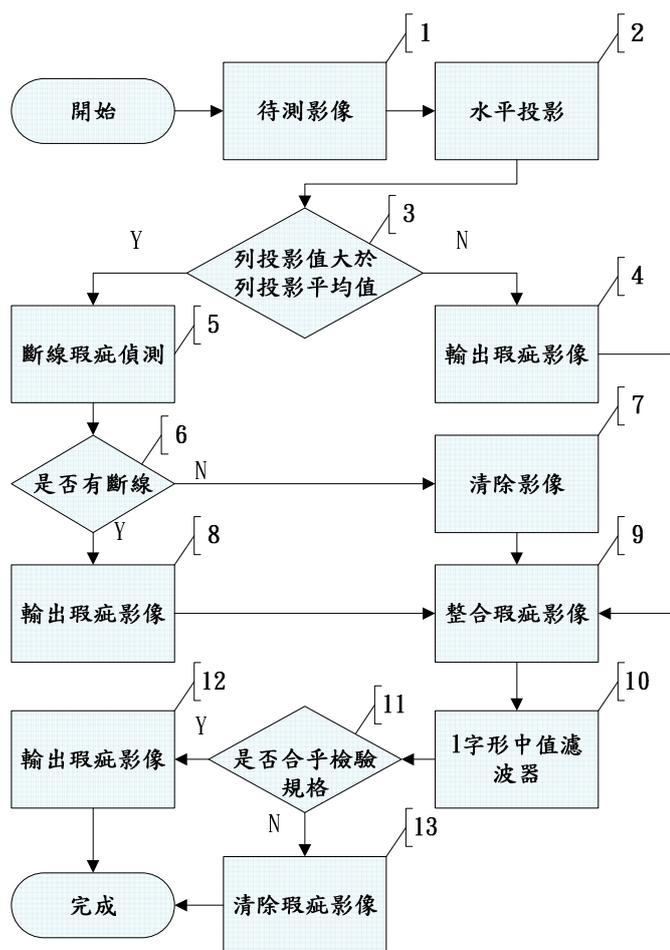


圖 9：水平投影瑕疵偵測法流程圖

3.3、尺寸量測

每間公司所生產的太陽能電池尺寸不盡相同，本實驗室所取得的太陽能電池為六吋多晶矽太陽能電池。grid finger 的寬度為 $200\mu\text{m}$ ，bus bar 的寬度為 2mm ，由於電極線過寬或過細皆會影響光電轉換效率，因此電極線的尺寸量測也是檢測的項目之一。

3.3.1、Bus Bar 之尺寸量測：多晶矽太陽能電池之電極線有 bus bar 及 grid finger 兩種，在檢測 bus bar 時，為了避免因為 grid finger 的存在造成檢測時的誤判，本研究在檢測 bus bar 之前，先以垂直投影的方式將 grid finger 去除，接著再使用水平投影的方式檢測線寬，詳細之檢測流程如圖 10 所示，並且說明各步驟。

步驟1：輸入待測影像。

步驟2：使用歐蘇法將影像二值化。

步驟3：進行垂直投影，並計算每一行的行投影值及行投影平均值。

步驟4：為避免 grid finger 可能造成的誤判，使用行投影將 grid finger 消除。

步驟5：由於 bus bar 的長度等於影像的高度 (2048 個像素)，判斷行投影值是否大於行投影平均值。

步驟6：若行投影值大於行投影平均值，則保留該行影像。

步驟7：若行投影值小於行投影平均值，則清除該行影像。

步驟8：此時影像中將只剩下 bus bar。

步驟9：計算每一列的列投影值，此時的列投影值就是 bus bar 的寬度。

步驟10：對於 bus bar 線寬的檢測方式如下：

1. 若該列的投影值大於設定的容許值，則視為瑕疵並保留該列。
2. 若該列的投影值小於設定的容許值，則代表無瑕疵並清除該列。

步驟11：bus bar 之線寬為 2mm ，在解析度 $26.8\mu\text{m}$ 下，線寬約為 75 個像素。本研究將誤差值設為線寬的 5%，若誤差值超過 5% 視為印刷擴散；或誤差值小於 5%，則視為線寬不足。

步驟12：清除影像。

步驟13：輸出瑕疵影像。

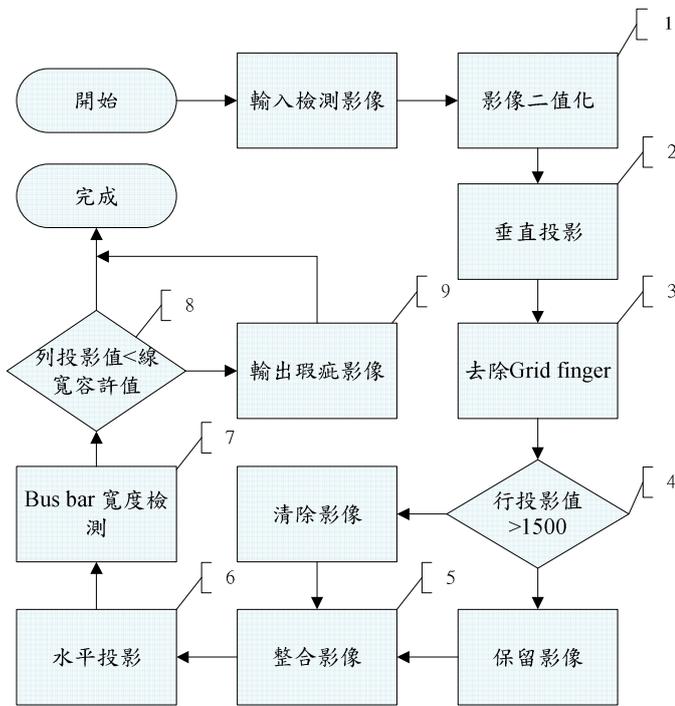


圖 10：bus bar 尺寸量測流程圖。

3.3.2、Bus Bar 檢測結果：圖 11(a)所示為自製具有針孔及線寬擴散瑕疵之樣本影像，圖 11(b)為其二值化後之結果影像。圖 11(c)為利用垂直投影去除電極線 grid finger 後之影像，影像中包含針孔及 bus bar，藉由水平投影計算線寬後，發現影像中有多處線寬擴散瑕疵及針孔瑕疵，如圖 11(d)所示。影像中所出現之 bus bar 為具有線寬擴散的 bus bar，紅框所示為針孔瑕疵。

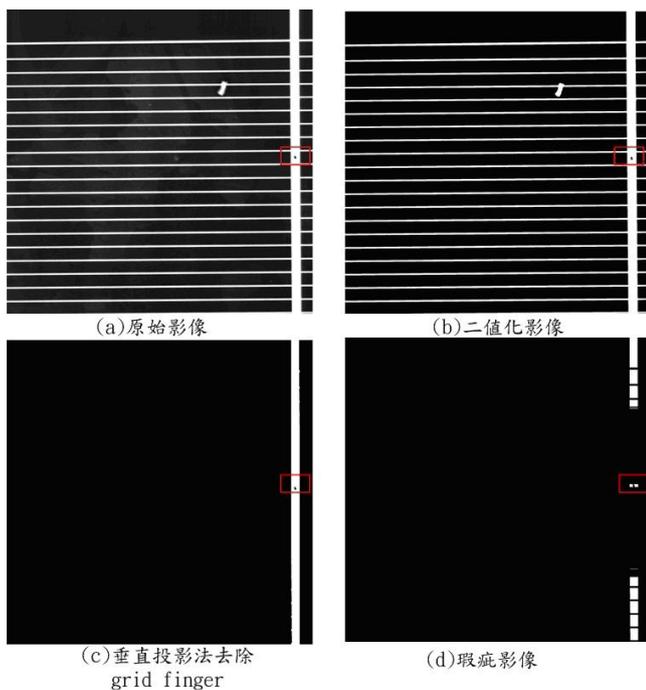


圖 11：電極線擴散及針孔瑕疵檢測結果

3.3.3、Grid Finger 之尺寸量測：由於多晶矽太陽能電池中包含 bus bar 及 grid finger，因此在檢測 grid finger 時，先使用水平投影的方式將 bus bar 去除，接著使用垂直投影的方式量測線寬並判斷尺寸是否在容許範圍內，詳細之檢測流程如圖 12 所示，並且說明各步驟。

- 步驟1：輸入待測影像。
- 步驟2：使用歐蘇法將影像二值化。二值化後之影像將只包含 grid finger 及 bus bar。
- 步驟3：使用水平投影計算每一列的列投影值，並計算列投影平均值。
- 步驟4：為避免誤判，先使用列投影將電極線(bus bar)消除。
- 步驟5：由於 grid finger 之長度就是影像的寬度(2048 個像素)，因此設定若列投影值小於列投影平均值，則將該列影像去除；反之，若列投影值大於列投影平均值則保留該行影像。
- 步驟6：若列投影值小於列投影平均值，則清除該列影像。
- 步驟7：若列投影值大於列投影平均值，則保留該列像素。
- 步驟8：整合待測影像，此時影像中將只剩下 grid finger 影像。
- 步驟9：使用垂直投影，此時先找到電極線邊界之後，以其下方 20 個像素為區域，計算區域內的電極線寬度。
- 步驟10：grid finger 線寬的檢測方式是，若該列的線寬大於設定的瑕疵容許值，則保留該線；若無瑕疵情形，則清除影像並輸出瑕疵影像。
- 步驟11：由太陽能電池示意圖可知 grid finger 的線寬為 $200\mu\text{m}$ ，在解析度為 $26.8\mu\text{m}$ 的情況下，線寬大約是 8 個像素。此處將線寬之容許值設為線寬的正負兩個像素；亦即，若線寬超過 10 個像素，即判定為印刷擴散；若線寬小於 6 個像素，則判定為線寬不足。
- 步驟12：清除影像。
- 步驟13：輸出瑕疵影像。

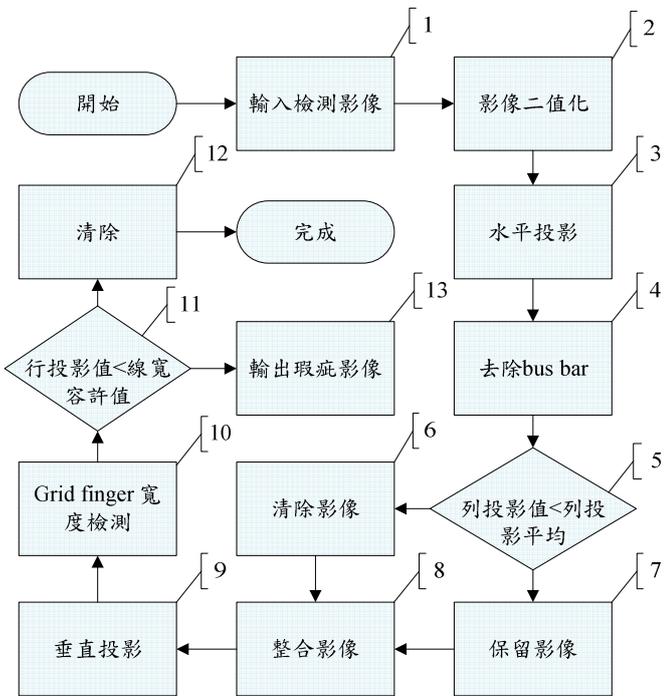


圖 12：Grid finger 尺寸量測流程圖。

3.4、結果與討論

本研究主要是針對太陽能電池的表面進行瑕疵的檢測，檢測項目包括斷線、邊緣掉削、破裂、汙跡、白點及刮傷。實驗用之太陽能電池樣本總共有 24 片，經由自行取像後所得到的瑕疵影像總共有 216 張。檢測的電腦具有 2G 的記憶體，使用之中央處理器為 Intel Core2Duo E6750，其處理速度為 2.66 GHz，檢測單張影像需 0.78 秒。詳細之瑕疵檢測結果如表 3 所示。汙跡影像有 49 張，其中 41 張被成功檢出，8 張失敗。破裂影像只有 1 張，並無法順利被檢出。斷線影像只有 1 張，經過檢測之後可以順利被檢出。邊緣缺角影像有 5 張，全部被成功檢出。白點瑕疵影像有 7 張，皆可正確被檢出。刮傷瑕疵影像有 11 張，其中 7 張被成功檢出，4 張失敗。無瑕疵影像有 142 張，皆正確被判定為無瑕疵影像。

3.3.4、Grid Finger 檢測結果：圖 13(a)為本研究自製具有汙點瑕疵的原始影像，圖 13(b)為二值化後之結果影像，圖 13(c)為完成水平投影並去除 bus bar 後之影像。接著使用垂直投影以便檢測線寬，其步驟為先尋找 grid finger 的邊界，若下方 20 個像素區域內的線寬大於 10 個像素或小於 6 個像素，則判斷為無瑕疵線寬。從圖 13(d)檢測結果中可以發現，只有一條電極線有線寬擴散的現象，為瑕疵影像。

表 3、瑕疵檢測結果

瑕疵類型 \ 檢測結果	汙跡	破裂	斷線	掉削
成功	41	0	1	5
失敗	8	1	0	0
瑕疵類型 \ 檢測結果	白點	刮傷	無瑕疵	
成功	7	7	142	
失敗	0	4	0	

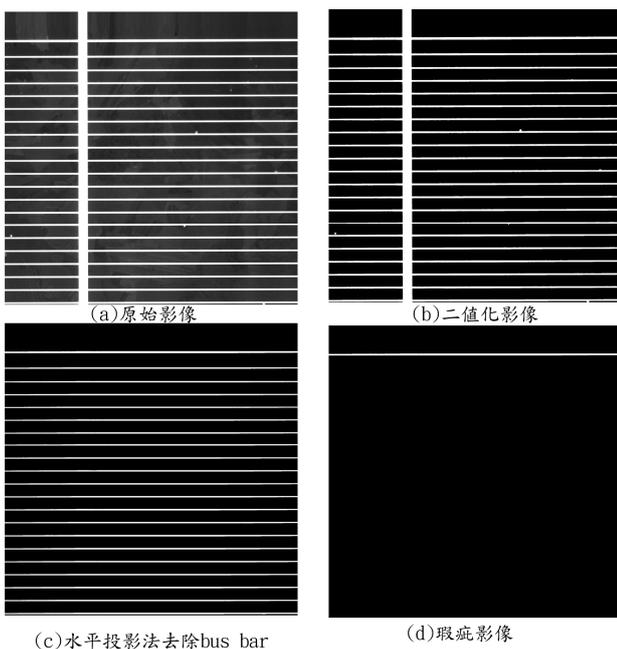


圖 13：汙點瑕疵線寬檢測結果

3.4.1、瑕疵檢測結果與討論

如前所述，具有汙跡瑕疵之影像共有 49 張，其中 41 張影像成功地被偵測出有汙跡瑕疵，另外 8 張影像之汙跡瑕疵則無法順利被找出。圖 14(a)所示為具有汙跡之原始影像，圖中包含許多類似銀鋁膠掉落所產生的汙點。圖 14 (b)為圖 14 (a)經過二值化後的影像，由圖中可以看出，汙點瑕疵已順利被分割出來，背景已順利被去除。投影瑕疵偵測法所輸出的瑕疵影像如圖 14(c)所示，影像中的所有汙點瑕疵都順利被找出。圖 15(a)所示為另一張具有汙跡的原始影像，影像中有三個汙跡。圖 15(b)所示為二值化之影像，影像中只剩下零星的瑕疵點，可見影像經過二值化處理後，因為汙跡瑕疵的灰階值與背景的灰階值相近，在歐蘇法二值化時被歸類為背景，因此無法順利與背

景分離，導致後續檢測時無法順利被偵測出(圖 15(c))。由此看來，雖然無法檢測出完整瑕疵，但還是可將二值化後留下的零星汗跡檢出，藍色方框區域則是未完整檢出瑕疵的區域，因此視為有瑕疵未正確檢出的影像。圖 16(a)為具有汗跡的原始影像，其二值化後的影像如圖 16(b)所示，經過二值化後，汗跡的大部分影像被分割成背景，因此在之後的檢測只能針對分割後所保留下來的影像進行檢測，檢測之結果影像如圖 16(c)所示，由圖中可以發現，經過二值化後所保留的瑕疵影像，可以順利的被檢出，整體來說完整的瑕疵並未被正確的檢出，因此此檢測結果亦視為有瑕疵未正確檢出的瑕疵影像。綜合上述結果可知，進行取像時若無法加強瑕疵與背景間的灰階對比，則後續二值化時瑕疵可能會被歸類為背景，進而造成檢測時無法將完整的瑕疵偵測出來。具有破裂瑕疵的太陽能電池只有一片，取像後所得之影像如圖 17(a)所示。經過歐蘇法二值化後，裂痕的影像幾乎完全被判定成背景，如圖 17(b)所示。因此在後續檢測時，無法正確檢出完整的瑕疵，其檢測結果如圖 17(c)所示，由於無法正確檢出完整瑕疵，因此亦判定為未能正確檢出瑕疵之影像。從具有邊緣掉削樣本所取得的影像共 5 張，經由投影瑕疵偵測法檢測瑕疵後，5 張影像之瑕疵皆可正確的被找到。圖 18(a)為原始影像，經過二值化處理後的結果影像如圖 18(b)所示，可見瑕疵已正確被分割出。檢測結果如圖 18(c)所示，可見經由投影瑕疵偵測法檢測後，瑕疵可正確被檢出。針對具有刮傷瑕疵影像之檢測，在 11 張樣本影像中，其中 8 張影像中之瑕疵可以順利被檢出，另外 3 張影像中之瑕疵則無法被檢出。以圖 19(a)為例，此圖所示為具有刮傷瑕疵的原始影像，由於刮傷影像其灰階值與背景之灰階值差異不大，因此二值化後並無法將刮傷分割出來，如圖 19(b)所示。經過投影瑕疵偵測法檢測後，所得到的結果影像如圖 19(c)所示，其中藍色方框標示之區域為無法完整檢出的刮傷。由檢測結果可知，二值化所分割出來之瑕疵皆可以正確被檢出，但是在影像分割時，瑕疵就被歸類為背景，此部份瑕疵就無法被檢出。由此看來，日後針對此類對比不明顯的瑕疵，在取像上可以考慮使用更高亮度的紅色 LED 光源，以提高瑕疵與背景的對比。

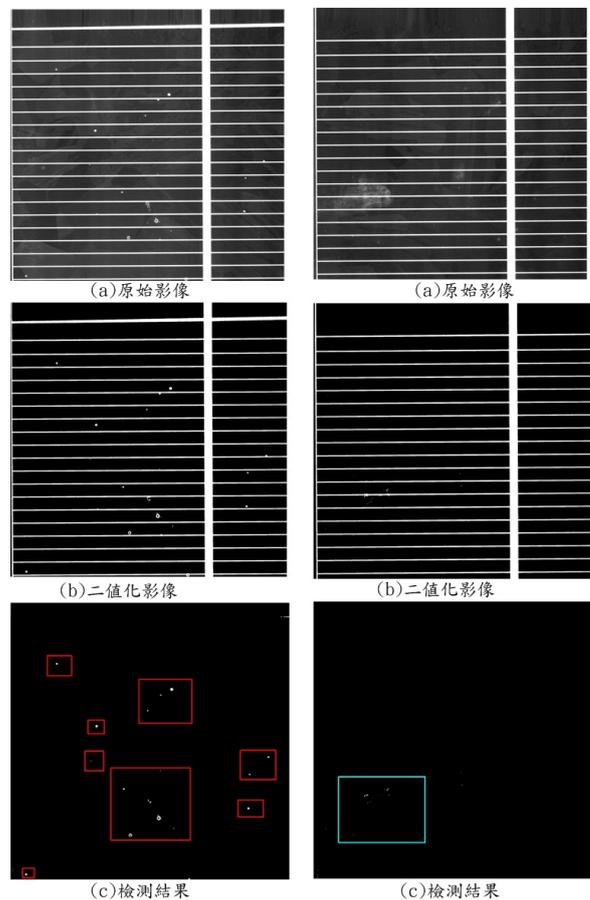


圖 14：汗跡檢測結果 圖 15：汗跡檢測結果

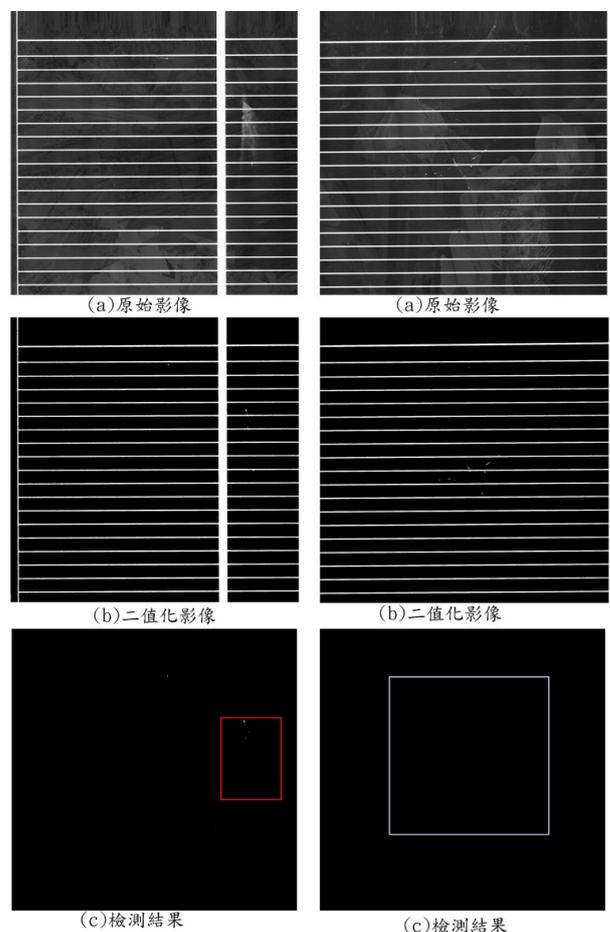


圖 16：汗跡檢測結果 圖 17：破裂檢測結果

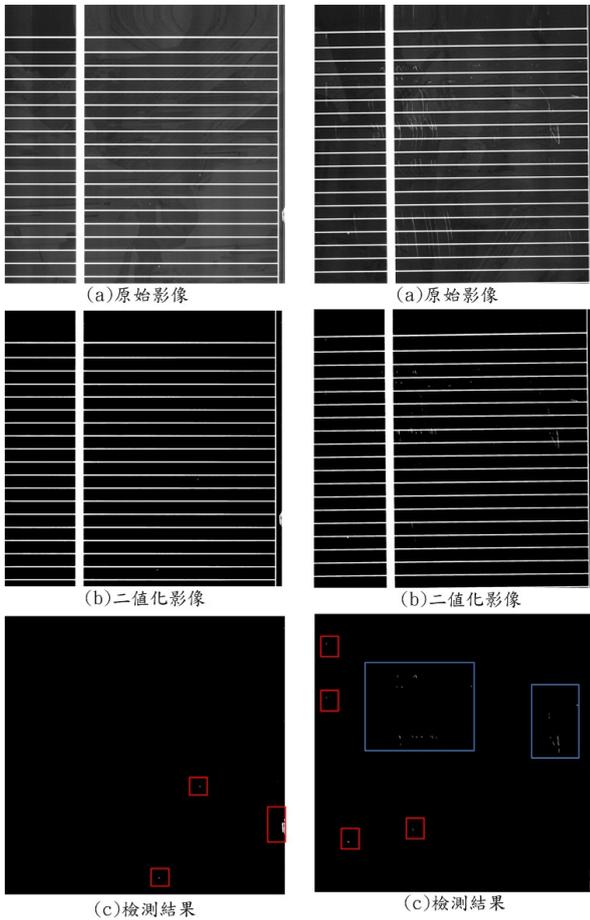


圖 18：掉削檢測結果 圖 19：刮傷檢測結果

3.4.2、討論

由表 3 可得到如表 4 所示之錯差矩陣，有瑕疵影像共有 74 張；正確被檢出有瑕疵的影像有 61 張；無法檢出瑕疵的影像有 13 張；無瑕疵影像共有 142 張，全部判定正確，因此整體偵測率為 93.98%。其中造成瑕疵未能正確被檢出的原因，大都是因為瑕疵之灰階值與背景之灰階值差異不大，導致歐蘇法二值化時，瑕疵無法順利被分割出來。因此後續瑕疵偵測就無法成功。

表 4、瑕疵偵測結果

檢測結果 實際情形	瑕疵	無瑕疵
瑕疵	61	13
無瑕疵	0	142

四、參考文獻

[1] N. Otsu, "A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms," *IEEE Trans. on System,*

Man and Cybernetics, Vol. SMC-9, No. 1, pp.62-66, 1979.

[2] T. W. Ridler, S. Calvard, "Picture Thresholding Using An Iterative Selection Method," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol.8, No.8, pp.630-632, 1978.

[3] W. H. Tsai, "Moment-Preserving Thresholding: A New Approach," *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, Vol. 29, pp. 377-393, 1984.

[4] J. Ramesh, K. Rangachar, S. Brain G., "Machine Vision," McGraw-Hill, New York, pp.35-38, 1995

五、計畫成果自評

本研究旨在應用機器視覺檢測技術，針對多晶矽太陽能電池設計一套自動化光學檢測系統，可對多晶矽太陽能電池表面進行瑕疵檢測，以下就本研究之計畫成果做一個綜合性的敘述：

- 本研究採用線掃描攝影機配合移動平台進行動態隨線取像，平台之移動速度為每秒 12.7cm，取像之頻率為 5000Hz，影像大小為 2048x2048，影像之解析度為 26.85 μ m/pixel。使用投影瑕疵偵測法檢測一張影像所需時間約為 0.78 秒，檢測一張六吋多晶矽太陽能電池則需約 7.02 秒。
- 不同於單晶矽太陽能的單純背景，多晶矽太陽能電池的背景複雜許多，可能導致常用之紋理檢測方法失效。因此光源的選擇相當重要，選擇合適的光源可以讓擷取所得之影像變得較單純，使檢測簡單化。本研究採用紅色條狀 LED 光源來加強瑕疵與背景間的對比，實驗結果顯示，此光源適用於多晶矽太陽能電池的檢測。
- 針對多晶矽太陽能電池取像之後的待測影像，本研究採用歐蘇法進行影像二值化。雖然歐蘇法對於破裂及刮傷瑕疵，可能會因為瑕疵與背景的灰階對比不夠導致誤判，但就大部分影像而言，使用歐蘇法進行影像分割是成功的。
- 針對多晶矽太陽能電池表面瑕疵(包括汙跡、破裂、斷線、邊緣掉削、白點及刮傷)，本研究採用投影瑕疵偵測法。此法是將像素值投影至水平軸及垂直軸，在計算平均值及標準差之後，使用判斷式判別是否有瑕疵的產生，使用此法正判率可達 93.98%。