

應用於 CIGS 薄膜太陽能電池的陣列取像裝置及檢測系統

An Image Capturing Array Device and Inspection System for CIGS Thin Film Solar Cells

陳志文、陳銘福、林儀豪

Chih-Wen Chen, Ming-Fu Chen, Yi-Hao Lin

太陽能電池是作為光電能源轉換的重要基本元件，而光電轉換效率與製造成本是最重要的兩大關鍵因素。CIGS 薄膜太陽能電池可以節省大量原料又具可撓特性，寬廣的吸收光譜範圍與 18% 以上的光電轉換效率，被認為具有很好的發展潛力。CIGS 薄膜電池在生產製程中會經過3道劃線製作程序，包括雷射劃線與機械劃線，但可能出現劃線的線寬或線距的變化，劃線扭曲，劃線深度不足或崩裂等等不良現象。傳統抽樣離線檢查已不能符合現今量產需求，薄膜電池製造商急需能與產線製程結合的線上全檢系統。因此，設計開發一套陣列式光學取像裝置與檢測系統，作為 CIGS 薄膜電池的線上全檢 AOI 系統。該 AOI 系統設計配置4組取像模組與高亮度線型光源，對長約 1200 mm × 寬約 600 mm 的大型薄膜太陽能板進行快速數位化掃描與影像處理分析，單片太陽能板的 AOI 作業流程能在 60 秒以內完成，完全符合生產線上的速度要求，整套 AOI 系統的穩健性與檢測精確性同時通過產線驗證。

Photovoltaic conversion efficiency and manufacturing cost are the two most crucial factors for solar cells. Because CIGS thin film has excellent properties such as material saving, flexibility, wide absorption spectrum range and photovoltaic conversion efficiency of 18% or more, it is suitable as an absorber layer of solar cells. There are three scribing procedures during the production processes of CIGS thin-film solar cells, including laser and mechanical scribing which might cause line width and spacing variations, broken and twisted lines as well as insufficient line depth. However, the traditional offline sampling inspection cannot meet the demands for the mass production of solar cells. Therefore, an online image capturing array device and inspection system (an AOI system) has been proposed and developed for the production line of CIGS thin-film solar cells. The AOI system, which equips four sets of image capturing modules and an equal number of high-brightness linear light sources, has performed fast digital scanning and image processing of large-scale solar panels (1200 mm × 600 mm). The inspection duration of one single solar panel must be within 60 seconds, which meets the requirement. The robustness, as well as the accuracy of the AOI system, has also been verified by the practical production lines.

一、前言

眾所周知太陽能是一種取之不盡的乾淨能源，在現今及未來的人類發展歷程中，太陽能絕對是不可或缺的極為重要關鍵能源之一。從小至可供應 3C 個人用品充電，大至路燈、綠建築⁽¹⁾、農漁業、汽車及民生用電，更遠至人眼所不能及的衛星及太空探測器，太陽能幾乎無所不在。從太陽表面輻射出的能量換算成電力大約為 $3.8 \times 10^{23} \text{ kW}^{(2)}$ ，而太陽光輻射至地球並穿越大氣層到地表後，仍有約 $1.08 \times 10^{14} \text{ kW}^{(2)}$ ，這個數值約為全球能源消耗 $1.84 \times 10^{10} \text{ kW}^{(3)}$ 的近萬倍大。如果能善加利用此一天然潔淨能源，不僅可以解決地球能源日益短缺問題，同時又可改善已迫在眉睫的環境汙染與地球暖化現況。

早期太陽能發展以單晶矽為主，其後擴展至多晶矽、非晶矽與化合物半導體等等材料。而薄膜式太陽能電池因為可以節省大量原材料又具有可撓的特性，因此被認為具有很大的發展潛力⁽⁴⁾。其中 CIGS (copper indium gallium selenide, CIGS) 薄膜具有 350 nm – 1200 nm 廣範圍的吸收光譜 (大於矽材吸收光譜範圍) 與高光吸收係數 ($> 10^5 \text{ cm}^{-1}$)⁽⁵⁾，所以只需薄薄一層微米厚度，就有良好的吸收率，非常適合用作薄膜太陽能電池中的吸收層⁽⁶⁾，而它的光電轉換效率可達 18% 以上⁽⁷⁾。CIGS 薄膜太陽能電池的結構示意如圖1，由下而上，分別為玻璃基板、金屬鉬 (Mo) 背電極、CIGS 吸收層、ZnS 緩衝層以及透明導電薄膜 (TCO)。CIGS 薄膜太陽能的製程如圖 2 所示，先以玻璃作基板，鍍上一層鉬，接著以雷射劃線將鉬層劃開^(8, 9, 10)，再依序沉積 CIGS 吸收層與緩衝層，後以機械劃線方式將吸收層與緩衝層劃開^(11, 12)，然後沉積透明導電薄膜 TCO，再一次進行機械劃線方式將其劃開，最後進行封裝並接上正負極，即可完成 CIGS 電池模組。在生產製程中，共經過 3 道劃線程序，第一道雷射劃線程序 (簡稱 P1)，第二道機械劃線程序 (簡稱 P2)⁽¹³⁾ 及第三道機械劃線程序 (簡稱 P3)。使用機械劃線機進行劃線程序，劃刀成陣列式排列，在實際生產線上進行機械劃線程序時，容易出現以下情況，如劃線的間隔逐漸變寬或變窄，劃線的線寬不均，劃線深度過深或不足，劃線線條扭曲及劃線邊緣崩裂等等。生產線上原先以人工抽樣方式離線進行局部顯微檢測，但這種品管的檢測時間冗長且抽樣代表性不足，對於大型太陽能板只能作局部觀測無法檢視全貌。因為太陽能板製程上造成的劃線誤差或瑕疵，無法即時得知，不能立即採取相對應措施來進行製程調整或改善，不能有效率的降低次級品或不良品的數量，當然更無法提前得知作參數調整以預防即將發生的誤差。因此，迫切需要一種能夠快速、精確且全面檢測的技術與生產線結合以協助太陽能板的品質監控。經過產線製程現地評估與部分樣品檢測分析後，認為具



圖 1. CIGS 薄膜太陽能電池的結構示意。

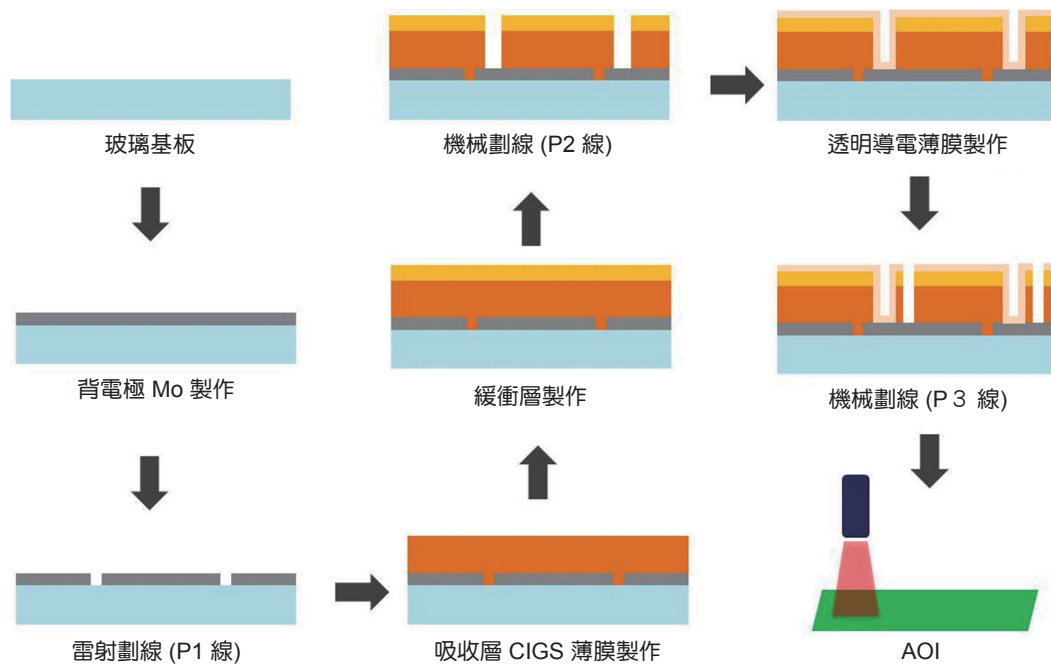


圖 2. 結合 AOI 技術的 CIGS 薄膜太陽能電池的生產流程。

有速度快、重現性高及失誤率低等特性的自動光學檢測 (automatic optical inspection, AOI) 技術，可以嘗試導入原有 CIGS 薄膜太陽能電池的生產製程中。規劃安排在完成機械劃線 P3 製程後以機械手臂將電池板載入精密定位與移動滑台上，利用自行設計開發的光學取像裝置以高速度對太陽能板進行數位取像和影像分析。因為 AOI 處理速度夠快故可配合產線流程，對生產線上的每一片太陽能板都記錄唯一的生產編號，經過 AOI 技術處理後的量檢測資訊 (如劃線線寬／線距，鍍膜瑕疵等) 均儲存於磁碟陣列中，製程工程師可以隨時透過人機介面軟體顯示在電腦螢幕上。另可設定當 AOI 檢測出重大誤差或瑕疵時，系統可發出警報，提醒製程工程師作相對應之處理措施，有效提升 CIGS 薄膜太陽能電池的品質與生產良率。

二、系統設計

本文研究主要目的在設計開發可供大型 CIGS 薄膜太陽能電池進行生產線上全面檢測的自動化光學檢測系統。AOI 檢測速度要求必須於 60 秒內完成單片 CIGS 薄膜太陽能板的檢測，60 秒的時間必須包含進行 AOI 技術分析的所有相關聯的程序，如太陽能板的載入 AOI 機台、太陽能板的定位、光學取像、數位影像資料擷取／儲存、影像處理／分析、資料顯示／備份及太陽能板的移出載台等等。受檢測材料為 CIGS 薄膜太陽能板，尺寸長約 1200 mm × 寬約 600 mm。通常，自動化光學檢測方法若以掃描方式作區分，可以簡單區分為面型取像 (area scan) 與線掃描 (line scan) 兩種。面型取像方式是以一面型影像感測器一次擷取一個面型區域的影像，依據受檢物體的尺寸，以 X/Y 軸移動方式，移動特定的距離後依次取像，後續以影像處理方式進行影像拼接，主要適用於小型受檢物。線掃描方式是以線型影像感測器連續不間斷地掃描受檢物，可以得到不用拼接的長條影像，適用於長型/大型受檢物。本研究中的受檢物可歸屬於大型物件，以線掃描方式作為 AOI 系統的規劃是十分恰

當。接著要考量光學取像裝置的整體硬體建置成本與完成單片大尺寸太陽能板檢測的總時間成本。當以節省光學取像裝置硬體建置成本而言，線掃描相機的掃描方向適合以太陽能板的長邊方向為先，但若以縮短掃描的總時間做考量，則可以改由太陽能板的短邊方向作為線掃描相機的掃描方向。受檢物太陽能板的寬度高達 600 mm，如果只想用單一支相機涵蓋整個太陽能板的寬度，則搭配的鏡頭勢必要選用非常低倍的工業用鏡頭，例如 0.1x 或更低倍率。若以線掃描相機的像素尺寸 (pixel size) $5\ \mu\text{m}$ 而言，該相機的像素數目即已高達 12K。若以相機 pixel size $3.5\ \mu\text{m}$ 來計算，像素數目更高達 16K 以上，這已超過市面上一般高像素數目相機約 12K–16K 的範圍。所以如果用在受檢物的解析度需求為 $35\ \mu\text{m}$ – $50\ \mu\text{m}$ 範圍，應該可以勝任，但如果要用在受檢物的解析度需求約 $5\ \mu\text{m}$ – $7\ \mu\text{m}$ 範圍，則明顯地是不可能的任務。經過斟酌取捨後，決定以多相機同時進行掃描。太陽能板的最小解析度在物空間希望能達到 $5\ \mu\text{m}$ ，相機選擇 16K 線掃描單色相機，每單一鏡頭的視場 (FOV) 可涵蓋物空間約為 80 mm。假若太陽能電池製程中檢測站是以單向載入及移出方式，則需要規劃至少 8 顆鏡頭以涵蓋單一太陽能板的寬幅。在考量現有產線製程規劃，太陽能板是由機器手臂抓取後放置在精密定位移動滑台上，以線性馬達帶動進行往復運動並同時進行光學掃描，之後再由機器手臂抓取後移出滑台。因此，可以利用太陽能板在精密移動滑台上往復來回一次的特性，規劃由同一台線掃描相機進行 2 次掃描，則取像的相關硬體建置成本可以減半，8 顆鏡頭也可以減少為 4 顆鏡頭，硬體建置成本大幅減輕，光學取像裝置規劃如圖 3 所示，藍色區塊編號 #1–#4 代表 4 組光學取像模組 (含鏡頭、相機、機構件等)，而紅色區塊編號 #1'–#4' 代表 4 組光學取像模組移動到新的位置進行同一片太陽能板的第 2 次掃描。非常重要的要求，必須配合原有太陽能電池的生產流程，單站的 AOI 作業流程必需控制在 60 秒以內。依據光學取像裝置的架構規劃，另分別搭配 4 台工業級高規格電腦 (IPC，內建多核心雙 CPU 及 64 GB RAM) 進行資料傳輸、儲存與分析，主控電腦 (Host-IPC) 作為 AOI 系統程控電腦，另外並建置一組磁碟陣列以進行 AOI 數據資料的備份，整體 CIGS 薄膜太陽能電池的線上 AOI 機台之系統架構如圖 4 所示。

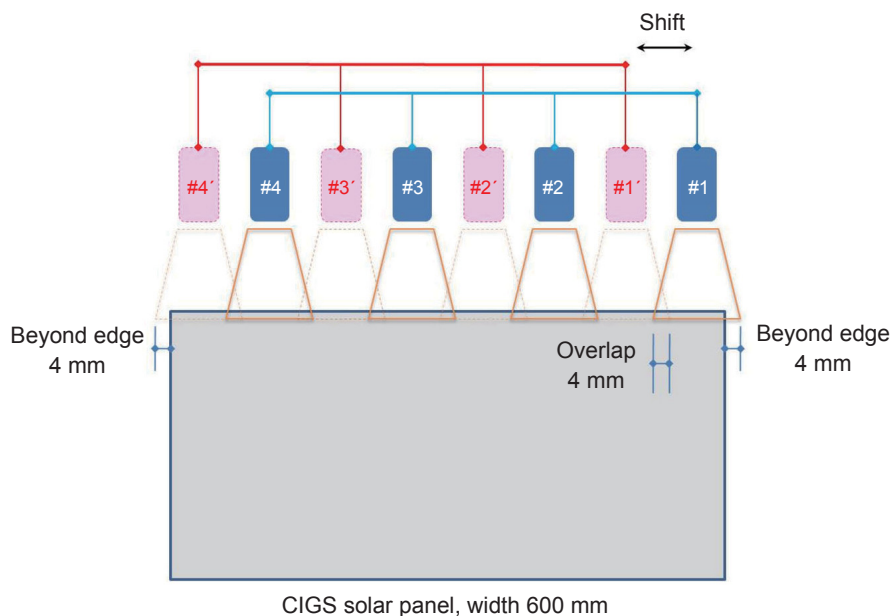


圖 3. 光學取像裝置的配置與位移示意。

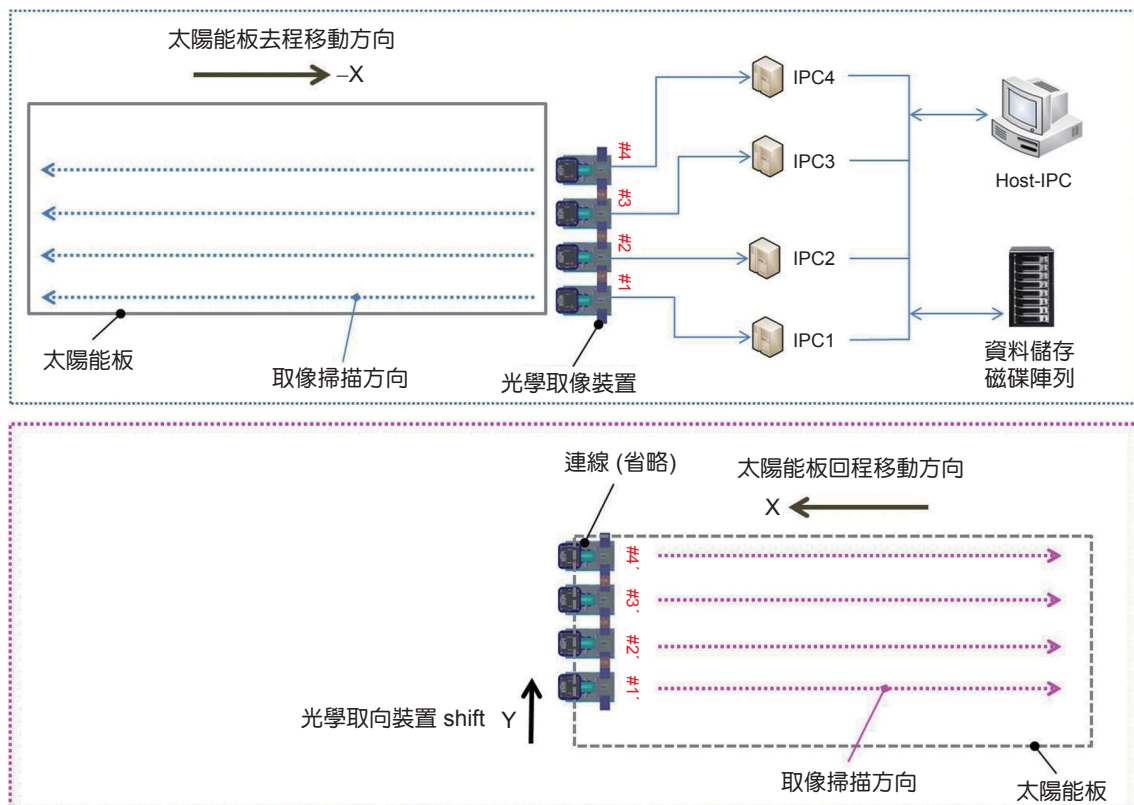


圖 4. CIGS 太陽能板之線上 AOI 系統機台之架構示意。

三、軟硬體規劃

CIGS 薄膜太陽能電池的線上 AOI 系統主要由以下幾個次系統所組成，包括陣列式高解析力光學取像裝置、影像處理與檢測軟體、定位與精密線性滑台、巨量影像資料備份裝置以及使用者人機介面等等，系統方塊圖如圖 5 所示，以下分別說明各次系統之主要功能。

1. 陣列式高解析力光學取像裝置

本裝置的作用在能快速擷取 CIGS 太陽能板的高解析力影像，是整個 AOI 系統的關鍵裝置與主要核心之一。若想得到優異的檢測結果，前提是必須要能取得受檢物的良好原始數位影像。依據系統分析，本裝置是由 4 組相同配置的光學取像模組所組成，裝置內包括 16K 高畫素線型單色相機 (畫素尺寸為 $3.5\ \mu\text{m}$)、高解析度工業用鏡頭、超高亮度線型光源、鏡筒、鋁擠型支撐件、調整滑台與背板等等所設計而成。透過具高速傳輸的 camera link 傳輸線連結至影像擷取卡，將太陽能板之數位影像資料由相機感測器快速傳送至工業電腦記憶體中儲存。照明光源採用外同軸光源方式對太陽能板進行照射，搭配相機內電子快門速度的調整，可以達成快速取像的目的。每組光學取像模組擷取的長條幅影像另可依據電腦硬體規格與影像處理速度要求，再分割成數個影像檔，例如，本文中分割成 4 個影像檔以方便後續計算處理。AOI 系統要求單片太陽能板之影像擷取作業需在 20 秒內完成。

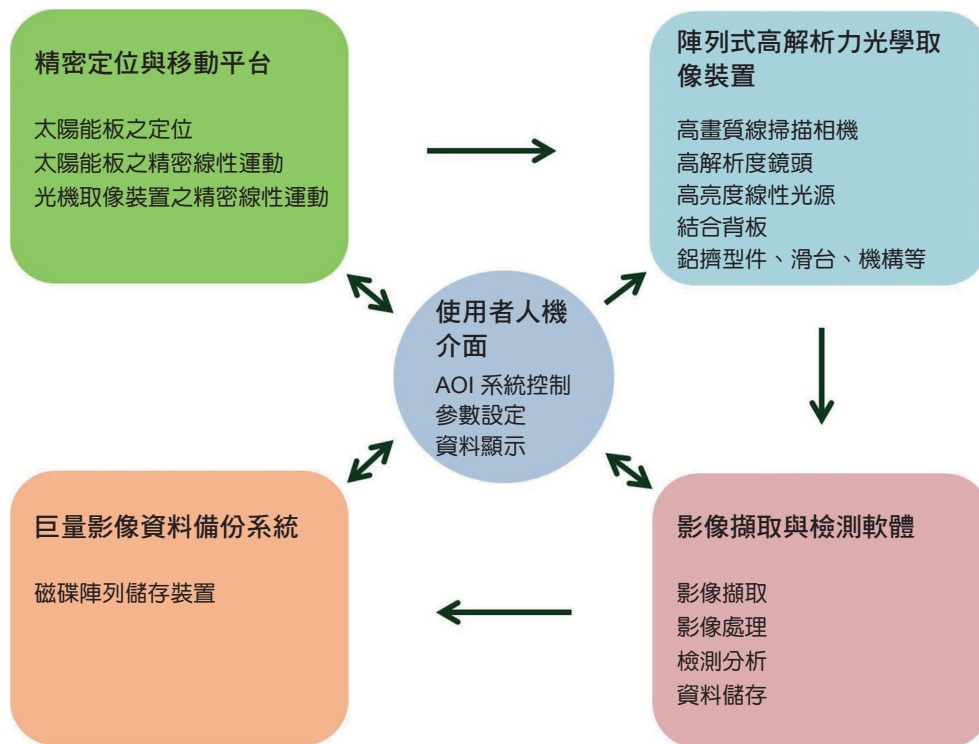


圖 5. CIGS 薄膜太陽能電池的線上 AOI 系統方塊圖。

2. 影像處理與檢測軟體

每組光學取像模組所擷取的高解析力數位影像透過影像擷取卡先儲存於所對應工業電腦 (IPC) 的記憶體中，例如編號第 1 組的光學取像模組有對應資料儲存的編號 1 的 IPC，依序共有編號 2、3、4 等共 4 台 IPC。然後將影像資料另儲存至 IPC 內的磁碟裝置中。4 台 IPC 同時進行影像處理與檢測作業，每台 IPC 均配置多核心雙 CPU 及 64 GB RAM，以滿足上述多工處理程序。影像處理與檢測軟體主要功能為讀取各 IPC 中 RAM 所暫存經分割過的條幅影像，依據所訂的檢測項目，以自行設計的檢測演算法來進行分析與辨識，如線寬尺寸或瑕疵尺寸及位置等等資訊，儲存於各 IPC 中後再進行傳送至 Host-IPC。

3. 定位與精密線性滑台

精密線性滑台的作用在提供太陽能板之定位，真空吸附與精密線性往復運動等功能以及陣列式高解析力光學取像裝置的精密雙軸向 (Y/Z 軸) 線性運動，滑台的運動行程範圍至少需涵蓋可取得整片太陽能板的數位影像。

4. 巨量影像資料備份裝置

系統配置一組高儲存容量的磁碟陣列儲存裝置 (裝置容量可達 80 TB 以上)，設定可以手動或定時方式將 4 台 IPC 硬碟資料備份至磁碟陣列中，並定時清除原 IPC 內硬碟資料，以便空出硬碟空間儲存生產線上後續的太陽能板的數位影像資料。

5. 使用者人機介面

主要功能為提供圖形化的系統機台操作介面，便利工程師與作業員進行系統管理、參數設定、流程控制、監控、數據顯示及異常狀況處理等等。由 Host-IPC 顯示最終太陽能板的分析結果，例如線寬值、線距值、瑕疵面積與等級分類、瑕疵所在位置標示及太陽能板 GO/NG 結果等等。

四、光機設計

陣列式光學取像裝置將來應用於生產線上時，可能是全時運轉狀態，整套裝置的穩健性與妥善率非常重要，在設計之初時需特別留意鏡頭與相機的選用與搭配、取像裝置結構的穩定性、容易組裝與拆卸、容易進行個別模組的調整等等。在光學機構設計上，整套光學取像裝置設計架構由 4 組相同規格的取像模組與 4 台相同規格的線型高亮度 LED 光源成橫向陣列所組成。每單一取像模組又分別由鏡頭、相機、鏡筒、調焦環、數個可調整滑台所組成。線型高亮度 LED 照明光源由於尺寸及重量等因素，與取像模組是分開設計。每支取像模組設計成可以進行 X/Y 軸的粗調整，以及 Z/ ρ/β 軸的細調整。線型高亮度 LED 照明光源是採用外同軸光源架構，內置玻璃材質的稜鏡，稜鏡上的鍍膜設計成 50-50 的折反射係數。因為希望得到最大的照度，所以機構設計原則上將線型光源的位置擺放在靠近太陽能板的正上方，這是因為受檢物的照度會隨著與光源的距離平方成反比。照明光源的機構設計成可以進行 Y/Z 軸的粗調整，Y 軸粗調整作為配合上方之取像模組，Z 軸粗調整作為改變與太陽能板之距離。整套光學取像裝置的主結構支撐件是選用雙溝槽鋁擠型商用標準料件，將主結構支撐件設計成類似工字型結構，如圖 6 所示，上方作為固定取像模組，下方作為固定光源，中間用 2 支較短的鋁擠型件加以連結固定，組裝上不僅方便做調整，同時達到減輕重量的目的。主結構支撐件另以多個 L 型角件固定在一稱作背板的鋁板上，該背板正中央上方留一缺口供作 Z 軸馬達維修用。光學取像裝置的組裝程序依序是先將背板固定在機台 Z 軸傳動軸的機構件上，次將鋁擠型主結構支撐件固定在背板上，然後再分別將 4 個取像模組依設計之間距依序安裝於鋁擠型主結構支撐件的上方，最後將 4 個照明光源機構模組安裝於取像模組正下方的主結構支撐件上，整套陣列式光學取像裝置完成組裝後如圖 7 實體照片所呈現。

1. 機構調整

倍率調整，由於製造加工等等均存有誤差，組裝完成後每支取像模組均需進行倍率校正。選用 Edmund 校正片 (生產商：Edmund，名稱：Low Reflect Grid Distortion Target，型

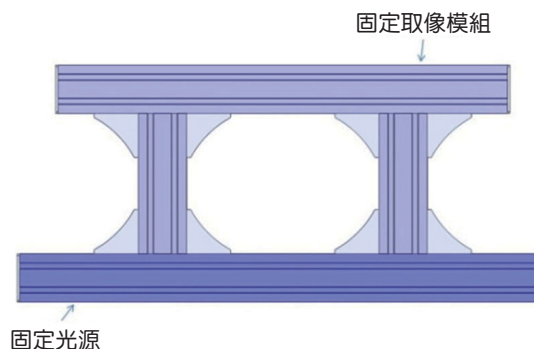


圖 6. 主結構支撐件。

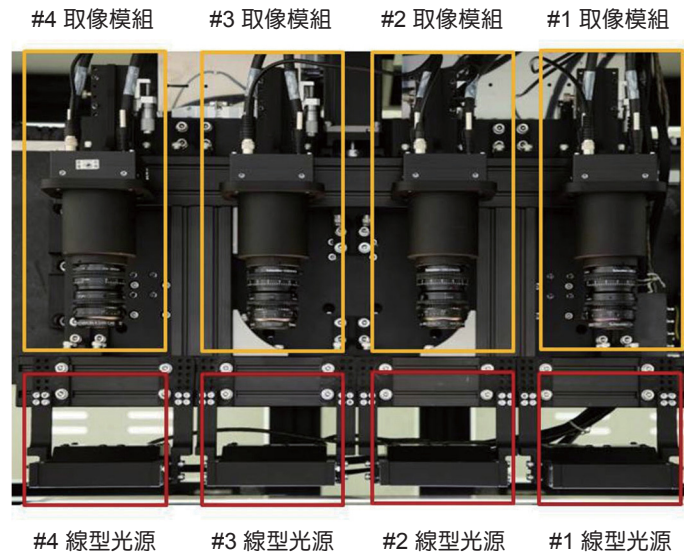


圖 7. 陣列式光學取像裝置實體照。

號：#62-949) 作為倍率調整之用。方式是將校正片放置於一線性螺桿推動的平台上，將單支取像模組架設於平台正上方，搭配適合電子快門時間後以定速度移動校正片通過鏡頭下方。將所得影像選取正中心附近 10 個圓點的距離，量測數據後與校正片上的規格數值做比對，即可推算出組裝後的倍率。如果倍率值與實際不符，則調整後焦調焦環的數值，重複上述步驟即可。

雙軸傾斜調整，線掃描相機的調焦過程比面型相機麻煩，如果鏡頭視角大再加上搭配的鏡頭景深較淺，都會增加調焦過程的時間。機構設計中加入一雙軸傾斜調整功能，則可以方便修正影像單邊模糊問題。

4 組取像模組的個別調焦與連動性調焦，以其中一組取像模組的鏡頭作為參考標準，例如最右邊編號 #1 鏡組，將整套光學取像裝置以機台 Z 軸電動馬達驅動，先依據鏡頭的規格調整工作距離，進行取像分析，如果影像不夠清晰，則將 Z 軸電動馬達作上下微動，重複進行取像分析，直到影像清晰後停止。接續，調整第 2 鏡組，但此時將 Z 軸電動馬達固定不動，利用機構設計上下微調鏡組進行調焦，以所取得的影像作為分析判斷，直到清晰後停止。依此方法，依序進行第 3 以及第 4 鏡組的調整。最後，將 4 組鏡組以連動方式進行取像，並定出每組鏡組的景深範圍，最終務必使 4 組鏡組的連動取像都能消除外在因素的誤差，得到全範圍的清晰影像。

五、AOI 系統測試與影像處理/檢測分析

1. AOI 系統的檢測速度測試

完成 AOI 各次系統的整合後，除了進行單片太陽能板的反覆重現性測試外，最重要是進行 AOI 系統的試量產 (pilot run) 作業，觀察 AOI 系統在上線後可能出現的問題以及 AOI 在量產狀態下的檢測速度能否達標。整個 AOI 作業程序規劃起自以機械手臂抓取太陽能板，置入定位與移動滑台，滑台開始線性移動後並觸發光學取像裝置開始擷取太陽能板的數位影像資料並傳遞至 IPC 內記憶體中，檢測軟體進行影像處理與量測辨識，分析數據儲存

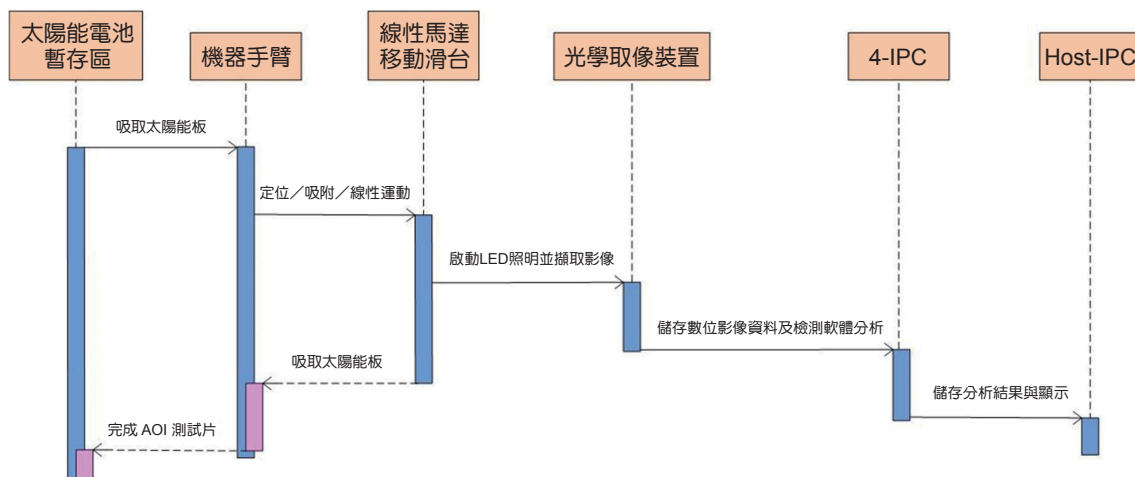


圖 8. 太陽能板的線上 AOI 作業之時序說明。

與顯示，至最後以機械手臂移出太陽能板為止，作業總時間控制在 60 秒以內，完全符合生產線之檢測速度要求。太陽能板的線上 AOI 作業可以簡化如圖 8 所顯示之時序圖。

2. 系統穩健性 (Robustness) 測試

AOI 系統中，數位影像品質的好壞與影像品質的穩定性是影響 AOI 能否成功的優先關鍵。不佳的光學取像裝置設計或不當的光源設計，均可導致受檢物數位影像品質不佳或不穩定，容易造成檢測軟體的誤判，嚴重甚至造成系統當機。本文所設計之陣列式光學取像裝置經安裝於 AOI 機台上，並對太陽能板進行數月以上時間的實際測試，觀察分析所得之數位影像品質一直保持清晰與穩定，足可驗證整套光學取像裝置的設計組裝十分穩健，通過生產線的實測考驗。

3. AOI 量測／檢測的分析結果

數位影像處理是一門發展很久的技術，時至今日，仍不斷持續演化進展。數位影像處理技術大致包含影像增強與濾波、彩色影像處理、小波轉換 (wavelet transform)、影像壓縮、形態學處理、分割與物體識別等等⁽¹⁴⁾。將陣列光學取像裝置所擷取之薄膜太陽能板的數位影像資料，經由數位影像處理後所要進行的量測/檢測分析項目主要有機械劃線 P2/P3 的線寬、P2/P3 的線距、P3 與相鄰 P2 的總寬度以及鍍膜製程/機械劃線上的瑕疵辨識等等。因為單片太陽能板的數位影像資料量非常龐大，系統設計中已考量到各 IPC 中所搭配的 CPU 的速度與記憶體容量。

3-1. 鍍膜製程的瑕疵辨識

鍍膜製程上的瑕疵，主要為鍍膜剝落或是微粒附著，此二者在 AOI 影像上所呈現的形貌十分類似，在主要電池區塊中 (AOI 影像中呈現暗色區域)，突然呈現出不規則形狀的明亮小區塊。因為 CIGS 電池的劃線是規則性的，所以可以容易地定義出非劃線區域作為影像分析用之 ROI (region of interest)，再以門檻值 (threshold) 找出較亮的像素點集合並加以連結定義出各別瑕疵的面積以及重心位置，如圖 9(a)、(b) 所顯示。此外，在主控電腦螢幕上顯示出鍍膜瑕疵的所在位置，如圖 10 所示，黃色大矩形區塊代表整片太陽能板的面積，座標

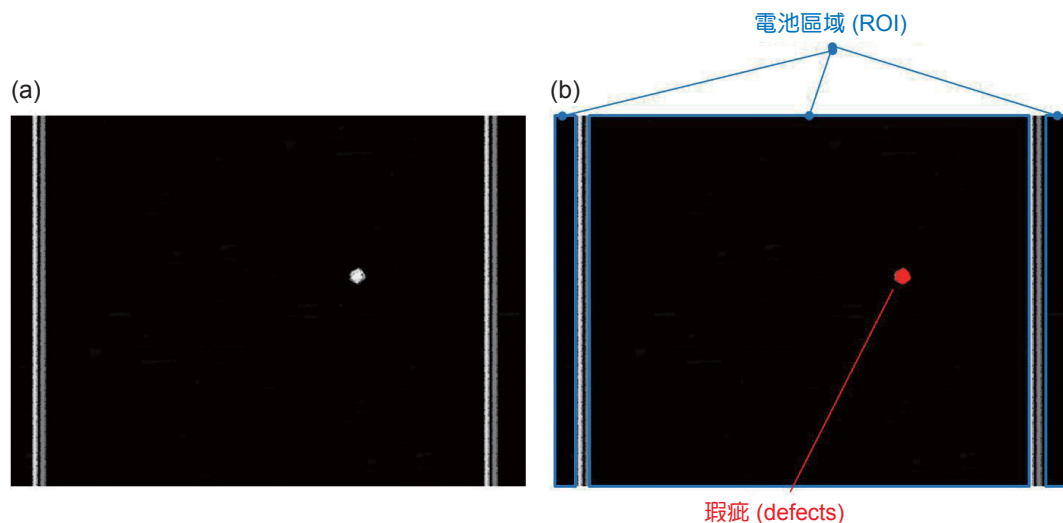


圖 9. (a) 太陽能板的掃描影像 (示意圖)，(b) ROI & defects (示意圖)。

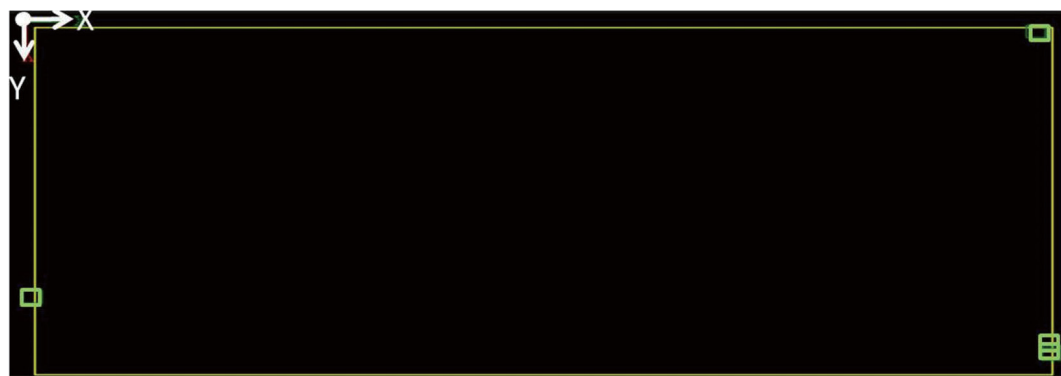


圖 10. 鍍膜瑕疵在單片太陽能板的位置標定。

XY 軸原點定義在太陽能板左上角位置，將影像分析過後的鍍膜瑕疵以淺綠小方塊標示於太陽能板上，可供製程人員與品保人員了解鍍膜區域的品質狀態。

3-2. 機械劃線的瑕疵辨識

當進行 P3 機械劃線時，若 P3 線與 P2 線的位置十分靠近時，則容易產生崩裂現象，在數位影像上可見 P3 線 (亮線) 的兩側，特別是靠近 P2 線的一側容易出現不規則區塊的亮帶，此稱之為 P3 劃線崩裂，如圖 11 與圖 12 的左側原始數位影像所顯示。同樣地，以影像分析進行辨識，如圖 11 及圖 12 的右側影像中藍色區塊代表 ROI，紅色區塊顯示崩裂之所在，並同時計算崩裂瑕疵的面積、重心位置以及數量等等資訊。

3-3. 量測分析

量測分析項目主要有 P2/P3 線寬，P2/P3 線距，P2 與相鄰 P3 總寬度等，均以平均值±標準差作為表示。特別注意 P2 與相鄰 P3 總寬度，並加以定義該總寬度值之上下極限範圍，凡超出該範圍值區域，均以紅色字體於 Host-IPC 螢幕中顯示。

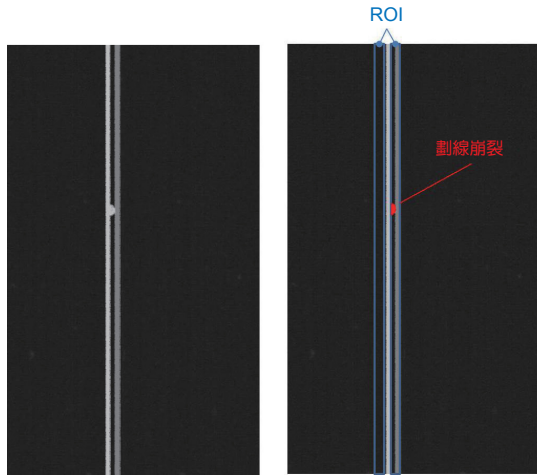


圖 11. 畫線崩裂之一 (示意圖)。

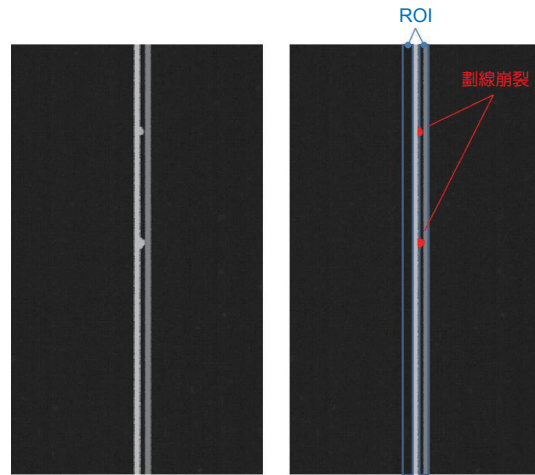


圖 12. 畫線崩裂之二 (示意圖)。

六、結論

本研究透過系統設計分析先規劃出適合於 CIGS 薄膜太陽能板的線上 AOI 系統架構，再展開相關的軟硬體細部規劃，憑藉著豐富的光機設計經驗與成熟的數位影像處理技術，於 P3 機械劃線製程後，以機械手臂吸取太陽能板為始，進行後續一系列的步驟，最終成功地將 AOI 技術整合於大型 CIGS 薄膜太陽能板的生產製程線。憑藉 AOI 技術之應用，對生產線上的每片太陽能板都能進行數位化處理，快速且精確地完成相關的量檢測分析，有此豐富的數位資訊，可以連續監控製程中鍍膜區域與劃線的品質。當發現重大異常品質警訊時，製程工程師可以立即採取適當的處置，或調整製程上之參數，或更換必要之工具或進行必要之檢修等等，以降低次級品與不良品的數量，大幅提昇製程良率。未來此 AOI 技術更進一步可結合發展中的工業 4.0 技術與 AI 人工智慧，以收集到的大數據進行分析與決策，在巨量數據中找出不易發現的關聯性，快速累積相關經驗，成功地作出精準的預測與提出決策，將生產製程提昇至高度智慧化的新境界，將為少子化的台灣帶來新的契機與希望。

參考文獻

1. Basant Agrawal, G.N. Tiwari, *Applied Energy*, **87** (2), 417 (2010).
2. World Energy Resources: Solar, World Energy Council (2013).
3. 呂錫民, 科學發展, **535**, 68 (2017).
4. 關旻宗, 王思淋, 李文貴, 黃中騰, 工業材料雜誌, **354**, 122 (2016).
5. Viswanathan S. Saji, Ik-Ho Choi, Chi-Woo Lee, *Solar Energy* **85**, 2666 (2011).
6. 郭哲瑋, 張仁銓, 謝東坡, 莊佳智, 蔡松雨, 工業材料雜誌, **284**, 101 (2010).
7. Martin A. Green, Yoshihiro Hishikawa, Ewan D. Dunlop, Dean H. Levi, Jochen Hohl-Ebinger, Masahiro Yoshita, Anita W.Y. Ho-Baillie, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **27**, 3 (2019).
8. Paulius Gecys, Gediminas Raciukaitis, Eimantas Miltenis, Alexander Braun, Steffen Ragnow, *Physics Procedia*, **12**, 141 (2011).
9. Friedrich Kessler, Dominik Rudmann, *Solar Energy*, **77** (6), 685 (2004).
10. Gediminas Račiukaitis, Paulius Gečys, "Picosecond-Laser Structuring of Thin Films for CIGS Solar Cells", *Proceedings of LAMP2009 - the 5th International Congress on Laser Advanced Materials Processing*, (2009).
11. Neelkanth G. Dhere, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **95**, 277 (2011).

12. Neelkanth G. Dhere, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **91**, 1376 (2007).
13. Peter T. Lin, East Brunswick, N.J., 1985, Mechanical scriber for semiconductor devices, U.S. Patent No.4502225.
14. Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods, *Digital Image Processing*, 3rd ed., Boston: Addison Wesley, (2007).

作者簡介

陳志文先生為國立中央大學機械研究所碩士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心副研究員。

Chih-Wen Chen received his M.S. in Department of Mechanical Engineering from National Central University. He is currently an associate researcher at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

陳銘福先生為國立臺灣大學機械工程碩士，現為國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心研究員兼任組長。

Ming-Fu Chen received his M.S. in Department of Mechanical Engineering from National Taiwan University. He is currently a research fellow at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.

林儀豪先生為國立中興大學生物機電工程學系研究所碩士，現為財團法人國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心助理研究員。

Yi-Hao Lin received his M.S. in Department of Bio-industrial Mechatronics Engineering from National Chung Hsing University. He is currently an assistant researcher at Taiwan Instrument Research Institute, NARLabs.