

自動化 PCB 殘膠檢測與雷射移除

目前國內 PCB 廠商在檢測與清除 PCB 製程殘膠上，仍是採取分三站點的方式執行，執行時間較長且耗費人力，且使用的進口機台成本較高。本研究團隊在此背景下，研發自動化光學檢測與雷射修補複合機 (AOIR)。該機台整合光學檢測、雷射清除、精密平台移動等技術，透過先大範圍檢測殘膠，再辨識殘膠輪廓規劃雷射路徑予以掃除的方式自動化處理 PCB 上的殘膠。設計了一種泛用的影像處理流程，並測試出可除膠但不傷銅雷射參數。最後進行全自動一貫作業驗證測試，與國內 PCB 廠商作業時間比較，效率可提升接近 10 倍，確認本研究所研發之 AOIR 機台已具備商業化應用的價值。

■ 梁耀云、林志光、董必正

關鍵詞：自動化光學檢測、雷射清潔、光阻、印刷電路板、技術整合

一、研究緣起

光阻是光罩製程中的重要材料。一般而言，乾膜光阻的成分包括壓克力高分子 (Binder)、光起始劑、多官能基壓克力單體、熱聚合抑制劑、染料及密著促進劑等 (Materialsnet, 2023)。這種光敏組合物被塗佈在聚酯 (PET) 膜上，然後與聚乙烯 (PE) 膜壓合成三明治結構 (Materialsnet, 2023)。在剝膜 (Stripping) 製程去除光阻的過程中，可能由於不均勻溶解等各種因素導致光阻殘留，這可能會在導體上形成光阻殘膠 (Fang & Liu, 2018)。這些殘膠不僅會降低電子器件的性能，還會對後續的製程如壓合、上錫和鍍金等產生不利影響，進而降低製程良率 (Fang & Liu, 2018)。

目前的國內 PCB 廠商在處理光阻殘留問題時採用三站式的處理流程。首先，他們使用自動光學檢測 (AOI) 機台來檢測 PCB 上的光阻殘膠，然後交由人工複檢，最後使用自動光學修復 (AOR) 機台來通過雷射移

除光阻殘膠。由於不是一貫作業，整體處理時間較長。此外，AOI 和 AOR 機台都是從國外進口的，購入成本較高。另外這些進口機台的核心技術皆由國外廠商把持，使得很難調整或修改流程參數和硬體模組來滿足國內 PCB 廠商的需求。

二、研究目的

為了協助國內 PCB 廠商解決這個問題，本研究團隊開發了一種整合技術機台，將 AOI 和 AOR 與同軸雷成像還有精密移動平台控制等其他技術整合。嘗試協助國內廠商提升自主研發能量，降低設備與人力成本，並縮短作業時間，提升廠線自動化與產能。為了使機台可以順利自動化運行，研究內容有以下要點：

- (一) 測試雷射清除光阻殘膠的效果，進行定量分析，找出一組可以除膠但不傷銅的雷射參數。
- (二) 開發一套 AOI 影像處理流程來自動辨

識並定位 PCB 上的光阻殘膠，並嘗試盡量縮短程式運算時間以提升效率。

(三) 測試整體自動化流程運行成效，優化流程，盡量提升運作效率，並與國內廠商的狀況進行比較，驗證機台的可行性與應用價值。

研究方法

一、機台配置

本研究團隊自行購置花崗岩精密移動平台、線性掃描相機、光纖雷射源、掃描振鏡、同軸成像系統等相關硬體模組，並以個人電腦作為上位控制系統，自行撰寫演算法與人機介面，並將相

關軟硬體整合，完成建構自動化光學檢測與雷射修補複合機 (AOIR)。圖一展示機台完工之外觀實照，表一針對圖一中各項機台硬體進行功能介紹。



圖一 AOIR 機台配置

表一 機台各項硬體裝置介紹

標號	裝置名稱	功能說明
①	花崗岩精密移動平台	光學尺解析度：0.1 μm / 作動重複精度：1 μm 以 X、Z 軸帶動線掃相機與同軸系統，Y 軸帶動真空吸盤來進行作業，並在底部加裝 4 個防震氣墊。
②	陶瓷多孔隙真空吸盤	出廠負壓保吸值：-70 kPa (全面區域吸附) 將 PCB 吸附於吸盤上，防止 PCB 於作業時移動，並於振鏡下方加裝空氣噴嘴，防止膠體雷射後再次沾黏。
③	線型高精度掃描相機	成像精度：5.2 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ / FOV：寬 89 mm，長度自訂 搭配平台 Y 軸移動，拍攝高解析度 PCB 影像，提供給粗定位演算法辨識殘膠。
④	雷射源	紅外線皮秒光纖雷射 / 波長：1060 nm 脈衝寬度：170 ps ~ 3.3 ns / 重複頻率：2~1000 kHz 光斑大小：31.85 μm
⑤	雷射振鏡 + 場鏡	最大掃描區域大小：56.5 X 56.5 mm^2 振鏡控制雷射光斑移動，場鏡將雷射聚焦於平面
⑥	面陣高精度同軸相機	成像精度：2.22 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ / FOV：6.119 X 4.589 mm 與雷射振鏡中心同軸，用於精定位時拍攝小範圍 PCB 殘膠高解析影像，辨識殘膠精確輪廓以產生雷射路徑
⑦	同軸系統	包含④雷射源、⑤雷射振鏡、⑥面陣同軸相機，以雷射振鏡控制雷射光斑高速移動進行雷射掃除作業。
⑧	機邊控制電腦	於 C# .Net 框架上撰寫控制程式與人機介面，整合各項裝置的 SDK，控制機台運行自動化除膠流程。

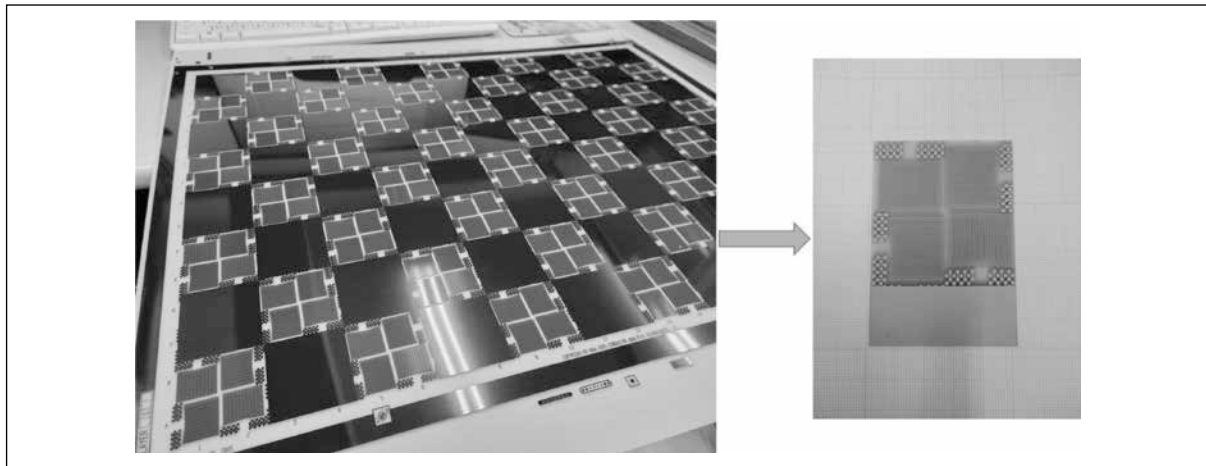
二、試片製備

為了模擬實際 PCB 製程中光阻殘膠附著在銅表面的情況，我們從合作廠商得到了

測試用的 PCB。如圖二左邊所示，這個測試板經過蝕刻製程，已生成銅線路，但尚未進行剝膜的階段，銅線路的表面仍有一層深

藍色的乾膜光阻。所使用的乾膜光阻厚度為 25 微米，屬於負性光阻。銅材料為高純度電解銅 (99 % Cu)，基板材料為 FR-4。將 PCB 切成小塊 (約 $5 \times 7 \text{ cm}^2$)，然後將剝膜液加熱至 65°C ，將試片完全浸泡在剝膜液

中約 15 秒。剝膜液和光阻之間的化學反應可以軟化光阻並斷裂光阻與銅表面之間的鍵結，使其分離。剝膜後的 PCB 試片如圖二右邊所示。

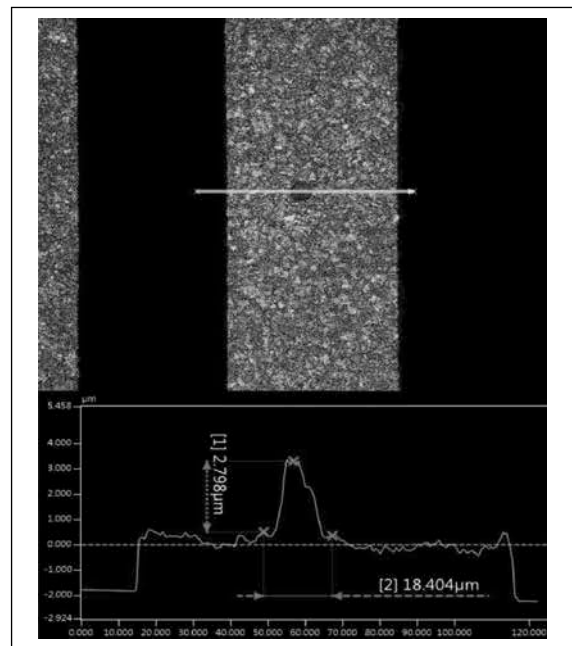


圖二 測試用的 PCB 與剝膜後的試片

試片用於模擬真實生產線上去光阻後的 PCB，銅表面可能僅有少量光阻殘膠。圖三顯示了使用雷射共軛焦顯微鏡 (LSCM) 捕捉的銅表面光阻殘膠的表面形態，其中黃線表示輪廓測量的位置和方向。圖三下方為輪廓測量的結果。在試片中，光阻殘膠的寬度通常小於 $20 \mu\text{m}$ ，高度小於 $5 \mu\text{m}$ 。經與合作廠商確認後，這個尺寸與工廠中的相似。

三、雷射清潔參數測試

本研究使用紅外線皮秒光纖雷射搭配雷射振鏡來對光阻殘膠進行燒蝕掃除，雷射的優點為乾淨、快速、可控性 (Svelto, 2010)，且雷射本質上為高能量光線，對於 PCB 銅面這類高反光性金屬材料吸收率較低 (Svelto, 2010)，適用於在這類材料上進行異物的移除同時不損傷底材。但若使用過高的功率仍會對銅面造成影響，受到過高功率



圖三 使用 LSCM 量測試片上光阻殘膠的高度輪廓

的雷射照射的銅面損傷主要體現於表面粗糙度上升、表面形成氧化銅而變色。在使用雷射振鏡針對殘膠進行掃除時，為了完整覆蓋殘膠範圍，必定會有部分雷射路徑超出殘膠

直接接觸銅面，使用雷射掃除就會直接接觸銅面。因此，需找到一組就算直接照射銅面也不會造成損傷，同時可以除去殘膠的雷射參數來進行除膠作業。

首先對乾淨的銅面進行直接雷射掃描測試，來找到不會傷銅的雷射參數範圍。然後再在這個範圍內，使用自製含有光阻殘膠的 PCB 試片，進行雷射清潔參數測試，經過

一系列的測試後，得到一組可以清除殘膠但是不會傷到 PCB 銅面的雷射參數，如表二所示。經測試，使用此雷射參數對殘膠進行掃描 3 次，即便是高度接近 25 μm 的完整殘膠，都可以被順利清除乾淨且不傷銅面，確認所使用的雷射參數可以在實際應用中應付這種 PCB 上的任何殘膠情況。

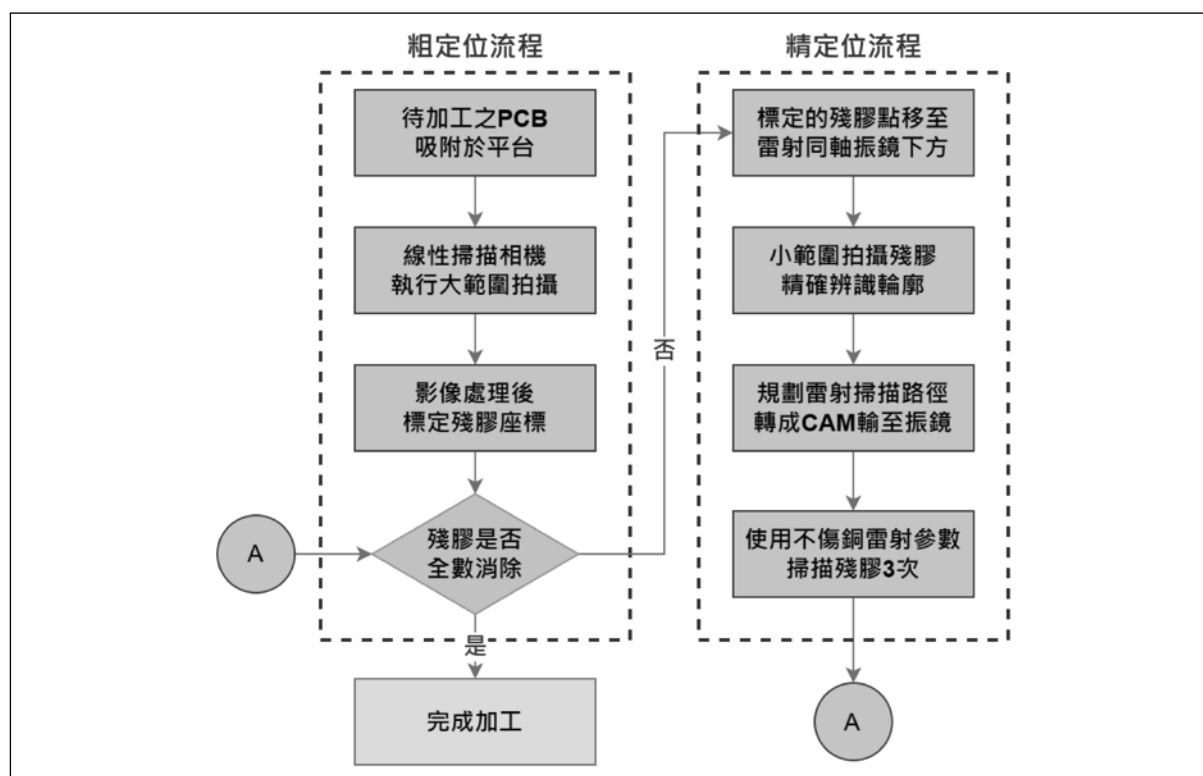
表二 雷射清潔參數

平均功率	脈衝寬度	重複頻率	掃描速度	掃描間距
3 (W)	1.09 (ns)	1,000 (kHz)	1,000 (mm/s)	15 (μm)

四、自動化清潔流程與影像處理演算法

本研究的自動化流程主要由兩大部分組成，命名為粗定位與精定位，用意為在工業上產線中的 PCB 板大多較為龐大，若直接使用面陣小範圍相機進行瑕疵偵測將耗費較多時間。在粗定位中，使用線掃相機在大範

圍內擷取 PCB 影像，檢測並定位殘膠的位置。精定位則使用工業相機進行高精度的殘膠輪廓辨識並規劃雷射路徑與以掃除，圖四展示了整體自動化運行的流程，以下對處理步驟進行詳細的介紹。



圖四 自動化清潔流程圖

將待處理的 PCB 放置在陶瓷真空吸盤上，啟動真空產生系統以固定 PCB。隨後開始自動化處理流程。首先進行粗定位流程。線掃相機配合 Y 軸平台（陶瓷真空吸盤）的移動，對 PCB 進行掃描。相機即時將數據傳輸到機邊電腦，電腦將線圖像數據組合成完整且高解析的 PCB 表面影像。隨後，使用設計的粗定位影像處理演算法對 PCB 影像進行檢測。該算法根據設定的過濾標準在影像上檢測疑似的光阻殘膠。然後記錄這些殘膠在影像上的像素坐標。接下來，進行座標轉換，將這些殘膠點位的像素坐標轉換為機台的機械坐標。計算這些點與同軸雷射成像系統中心之間的機械距離，將這些殘膠依次移動到振鏡和工業相機的中心，然後進入精定位流程。

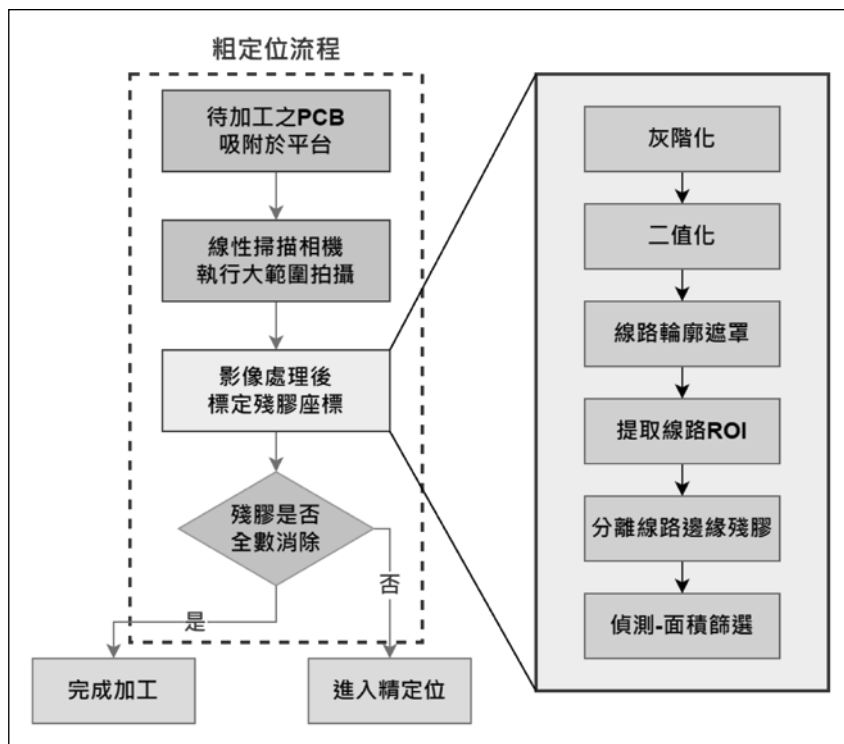
在精定位流程中，光阻殘膠被移動到同軸雷射成像系統的中心，該中心與工業相機和雷射振鏡對齊。使用工業相機獲取了高精度的小範圍 PCB 影像，僅處理圖像中心周圍的一個小區域，使用精定位影像處理算法來辨識殘膠的輪廓。然後，使用辨識出的輪廓來規劃雷射掃描路徑。透過自行開發的演算法在影像上生成覆蓋殘膠區域的線條。然後，將這些線條導入雷射控制程式以生成實際掃描路徑。隨後，開啟雷射，使用所選參數清除殘膠，同時不傷及 PCB 銅面。完成一個殘膠點的清除後，機台由粗

定位程式控制移動下一個殘膠到雷射系統中心，然後重複精定位流程，直到所有在粗定位中檢測到的殘膠被清除。至此，自動化清潔流程完成。

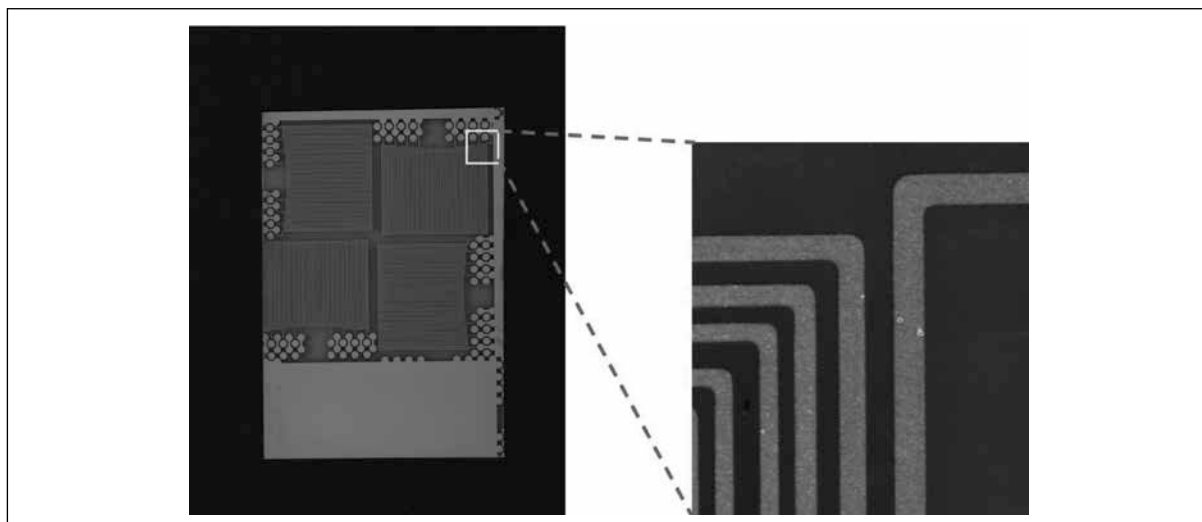
（一）粗定位程式流程

粗定位程式使用影像處理演算法去處理由線性掃描相機掃描的 PCB 圖像，以檢測 PCB 線路上的光阻殘膠，並定位它們的位置，以利後續的精定位流程進行雷射清除。所使用的圖像處理庫是 EmguCV。經過反覆程式設計撰寫與測試後，成功開出一套適用於 PCB 上檢測殘膠瑕疵的影像處理流程，使用線路遮罩的方式避免誤判 PCB 基板區域，並針對線路邊緣的辨識能力進行強化調整，程式流程如圖五所示。掃描圖片與辨識結果如圖六所示。

經過粗定位影像處理流程後，得到了殘膠在 PCB 掃描影像上像素座標，然後透過座標轉換得到殘膠在實際空間中的機械座



圖五 粗定位流程圖



圖六 掃描影像與殘膠辨識結果

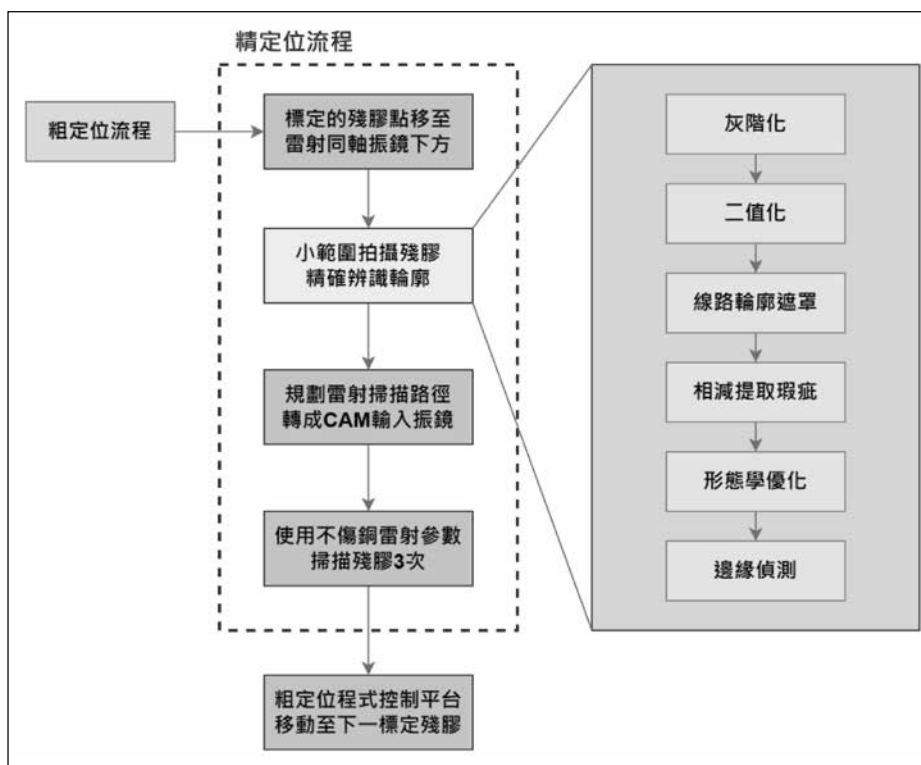
標，計算出將這些殘膠移動到同軸雷射成像系統中心所需的機械距離。接著程式控制機台移動到所需的位置，進入精定位流程。

(二) 精定位程式流程

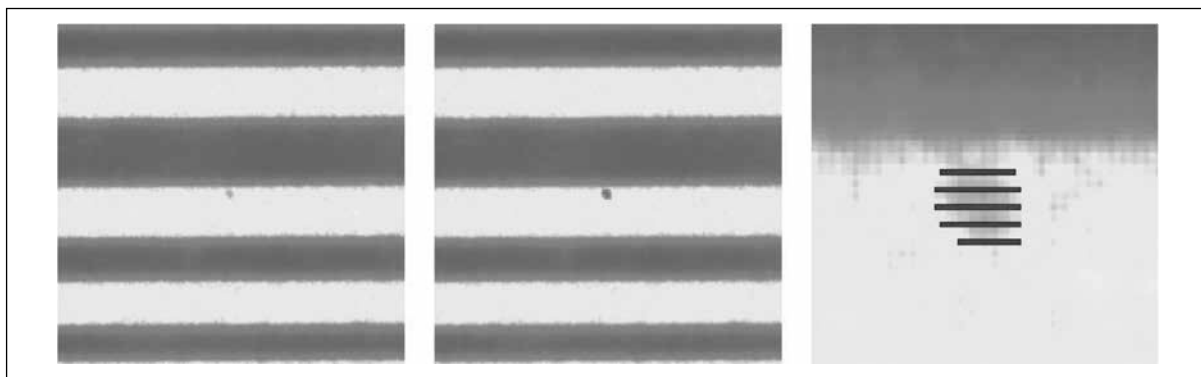
粗定位流程結束後，將標定序列中的第一個殘膠移至同軸雷射振鏡成像系統的中心，開始進入精定位流程，精定位流程如圖七所示，

由同軸相機拍攝小範圍以標定殘膠為中心的小範圍 PCB 影像，將此影像進行一系列的影像處理後獲得殘膠的精確輪廓，然後以此殘膠輪廓作為規劃雷射路徑的參考，如圖八所示，以演算法規劃雷射路徑後，轉為雷射程式所需的 CAM 檔然後

以於程式中呼叫雷射程式的 SDK 開啟雷射然後按照路徑進行 3 次掃除，該點掃除完畢後，粗定位程式控制平台移至下一標定殘膠點，然後再次進入精定位流程辨識並雷射掃除。如此反覆直到將粗定位中所標定的所有殘膠全部掃除完成，至此，自動化除膠流程完畢。



圖七 精定位流程



圖八 精定位影像 (左)，產生雷射路徑 (中)，局部放大 (右)

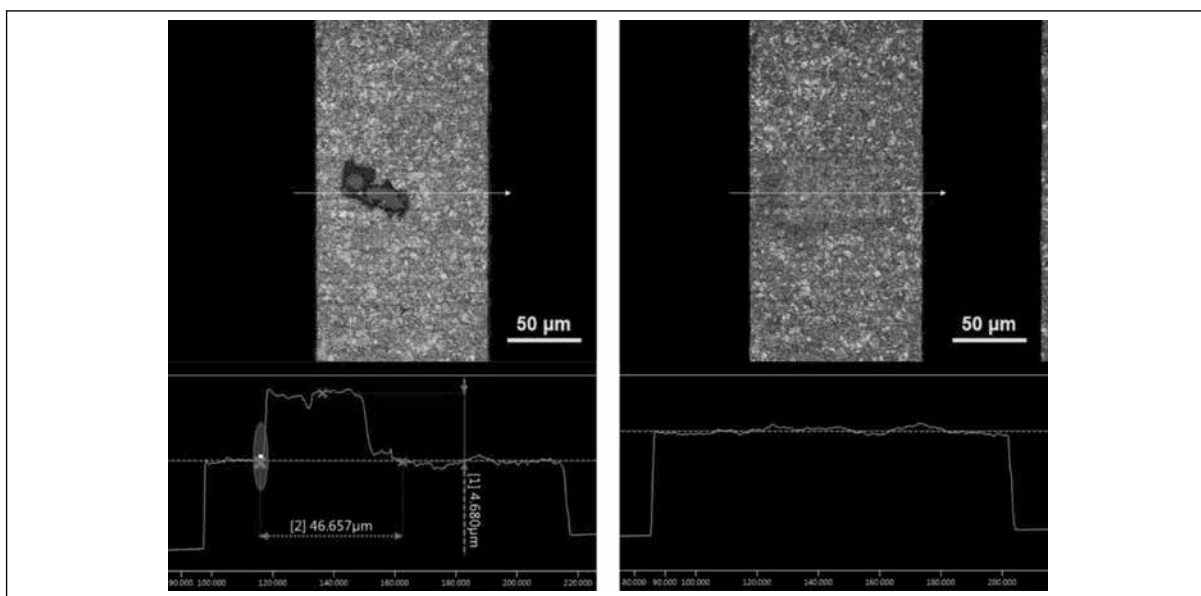
結果與討論

一、自動化清潔結果與驗證

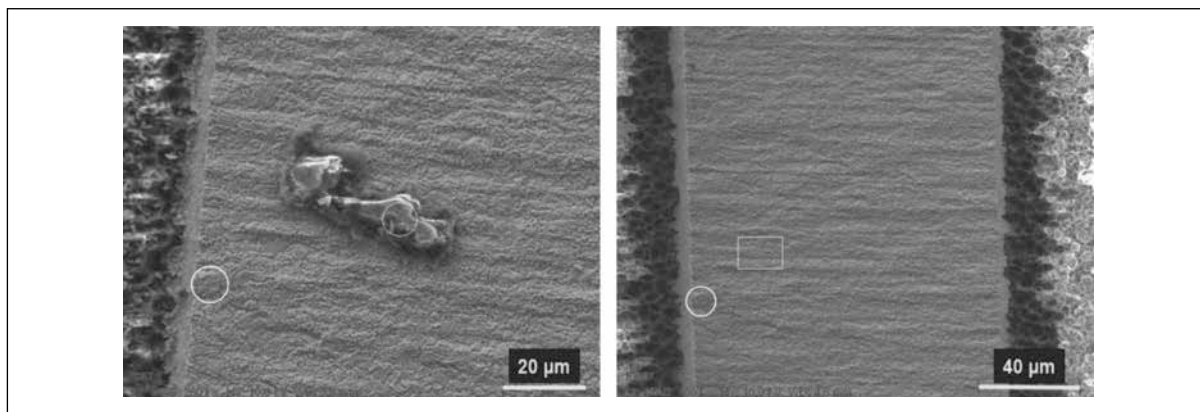
為了驗證自動化流程設計和參數設置的可行性，進行了自動化清潔測試。使用了自製試片，並且通過 LSCM 先確定了試片上的殘膠位置。然後將試片放置於機台，讓機台運行自動化清潔流程。在測試的前後，使用 LSCM 和 SEM 觀察目標殘膠區域。使用 SEM 的目的是更精密地檢查雷射未損壞銅的表面結構，並使用 SEM 中附加的 EDS 進行表面材料成分分析，確認殘膠是否被完整清除。

殘膠在自動清潔測試前後的 LSCM 測量結果如圖九所示。LSCM 的輪廓測量結

果顯示殘膠的高度為 $4.6\ \mu\text{m}$ ，寬度為 $46.7\ \mu\text{m}$ 。在自動清潔後，殘膠被成功去除，留下了一個平坦的銅面。這也由 SEM 觀察證實。圖十顯示了自動清潔前後的殘膠的 SEM 顯微圖。圖中的黃色圓圈和矩形示出了用 EDS 進行材料成分分析的選定區域。由於在自動清潔後很難精確定位殘膠的原始位置，因此採用了相對定位方法。主要參考點是圖十左邊中殘膠左下方的銅面凸起特徵 (白色圓圈)。這樣的白色圓圈也在圖十右邊中標記，作為定位參考。SEM 觀察到的表面結構進一步證實，在雷射掃描後，PCB 銅的表面結構沒有明顯變化。



圖九 自動化清潔前後使用 LSCM 觀測



圖十 自動化清潔前後使用 SEM 觀測

清潔之前的材料成分的 EDS 分析結果碳占 81 wt%、氧占 17 wt%。由於殘膠材料主要由碳和氧組成，這表明在目標區域存在殘膠。清潔後的材料成分分析結果銅占了 94 wt%。這表明殘膠已經成功地被去除，露出底下的銅面。基於這些結果，確認所開發的 AOIR 機器已經實現了在 PCB 上自動檢測和清除殘膠的目標功能。

二、與 PCB 廠商的比較

所開發的 AOIR 機台旨在協助合作的 PCB 廠商解決 PCB 殘膠的處理時間較長，並提高產線良率。因此，有必要將合作廠商的殘膠處理時間和本研究的時間進行比較，以評估所開發的 AOIR 機器的優勢和可行性。表三呈現了處理時間的比較。在 PCB 合作廠商的流程中，PCB 首先經過 AOI 機台的初步檢測，然後再進行人工複查。檢測階段共需 56 秒來檢測尺寸為 $50 \times 60 \text{ cm}^2$ 的 PCB。隨後，使用 AOR 機台利用雷射清除殘膠，每個單獨的殘膠處理需時 60 秒。

在本研究中開發的 AOIR 機器，測試用的 PCB 尺寸較小 ($8 \times 10 \text{ cm}^2$)。為確保時間比較的公平性，先測試了影像處理時間與影像區域大小的關係，使其等效於合作廠商的 PCB 尺寸。在檢測階段，通過粗定位流程檢測殘膠再加上平台移動的時間，總共需要 34 秒。在清除階段，精定位流程和雷射清除過程僅需 3.3 秒來清除一個單一的殘膠。值得注意的是，AOIR 機器在清除階段的處理速度顯著快於 PCB 合作廠商使用的 AOR 機器。以一片有 10 個殘膠的 PCB 為例，合作廠商需要 656 秒來處理它。相比之下，本研究中開發的 AOIR 機器僅需 67 秒。在處理效率方面，它展現了近乎 10 倍的表現。此外值得一提的是，在 PCB 合作廠商工廠中目前是在三個分開的工作站進行處理，需要額外的時間用於工作站之間的運輸。然而，本研究將功能集成到一台單一的機台中，並自動化處理，避免運輸的麻煩並減少人力成本。

表三 與合作廠商比較殘膠處理時間

	PCB 合作廠商	AOIR 機台 (本研究)
檢測時間	56 (秒 / 板)	34 (秒 / 板)
清除時間	60 (秒 / 殘膠)	3.3 (秒 / 殘膠)

結論

1. 測試雷射清潔參數，通過進行三次重複的掃描，可完整清除高度 $25\text{ }\mu\text{m}$ 的殘膠。使用 LSCM 測量表面高度輪廓與粗糙度，確認了銅面未受損。因此，最後選擇了功率為 3 W 、脈衝持續時間為 1.09 ns 、重複頻率為 $1,000\text{ kHz}$ 、掃描速度為 $1,000\text{ mm/s}$ ，以及間距為 $15\text{ }\mu\text{m}$ 的雷射參數，用於自動化清潔流程中。
2. 開發了具泛用性的影像處理流程，針對殘膠在線路邊緣的檢測能力進行強化，同時通過線路遮罩來指定檢測區域，以避免誤判。通過使用 LSCM 對粗定位結果進行驗證，證實其能夠檢測真實的 PCB 殘膠。
3. 對於本研究所使用的乾膜光阻，通過 LSCM、SEM 和 EDS 的表面觀察和元素組成分析證實，本研究所開發的自動化清潔流程可以完全去除殘膠，且不損害銅面。確認了所開發的 AOIR 機台對 PCB 進行自動檢測並清除這類光阻殘膠的可行性和可靠性。
4. 本研究實現了將光學檢測與雷射清除技術整合到一個自動化機台中來檢測並清除 PCB 上的殘膠。與 PCB 廠商目前的方式相比，效率增加接近 10 倍。證實本研究的 AOIR 機台技術已經具有商業化的價值。

參考文獻

1. 書籍
Svelto, O. (2010). Principles of Lasers. Springer Ltd.
2. 期刊
3. 碩博士論文
4. 研討會論文
Fang, Z. & Liu, C. (2018). A Study of Photoresist Residue Defect Induced by Substrate Surface Condition. 2018 China Semiconductor Technology International Conference (CSTIC), Shanghai, China.
5. 研究報告
6. 網站
Materialsnet, (2023, 03). Application of Acrylic Polymer.
<https://www.materialsnet.com.tw/DocView.aspx?id=45256>

作者簡介

梁耀云 / 國立中央大學 機械系

林志光 / 國立中央大學 機械系 / 指導老師

董必正 / 國立中央大學 機械系 / 指導老師

