

結合線上光軸檢測與聲發射訊號於 光學玻璃透鏡定心製程 即時監控與製程決策

高精度光學玻璃透鏡為半導體光微影製程之曝光機關鍵零組件，其光學成像品質與定位精度極為重要，透鏡的光軸精度為影響兩者的關鍵因素，而定心製程正是決定鏡片光軸精度之關鍵製程。定心製程為利用砂輪磨削外緣使透鏡幾何中心軸對正光軸。然而，定心製程在修正光軸的同時，容易產生鏡面傷痕、裂邊、真圓度誤差等缺陷，為解決上述問題，本研究建立智慧定心系統，該系統包含定心線上光軸監診與砂輪磨削監控兩大系統。運用線上光軸檢測模組監控透鏡光軸，並搭配卷積神經網路建立光標軌跡製程決策。另一方面，藉由聲發射感測器讀取砂輪磨削透鏡之訊號，搭配短時傅立葉轉換分析磨削訊號與裂邊、真圓度誤差、砂輪磨耗等異常。兩系統搭配建立智慧定心製程數位雙生系統，可即時反映特定時間之磨削位置、光軸誤差與磨削情形，並提供製程決策。

■ 許孝誠、劉俊葳

關鍵詞：光學玻璃透鏡、定心製程、線上光軸監診、砂輪磨削監控、數位雙生

一、研究緣起

光學玻璃透鏡為半導體光微影製程之曝光機關鍵零組件，該製程技術仰賴高性能、高精度之光學透鏡，在多項光學性能指標中，光軸精度是決定奈米級半導體製程精度的關鍵規格，主要取決於光學玻璃透鏡的定心製程能力。定心製程藉由鑽石砂輪研磨透鏡外緣，使透鏡幾何中心軸對正光軸，在透鏡加工完成後的黏合、裝配等組裝程序，皆仰賴光軸使透鏡精準對位，定心製程為透鏡加工的最後一道製程，也是後段鏡組對心第一道程序，作為光學產品兩階段製程的樞紐，定心在光學玻璃透鏡製程佔有關鍵地位。

然而應用於半導體曝光機的透鏡原料成本高昂、材質硬脆、規格多樣、精度需求

高，在原料有限的情況下，為確保每一片透鏡的製造結果符合規格，必須耗費大量時間與人力成本重複加工與檢驗，逐步逼近目標尺寸與精度。定心製程包含透鏡對心與磨邊兩道程序，利用前後一對鐘型夾具接觸透鏡兩面邊緣，利用軸對稱構型使兩側鏡面中心軸對稱於夾具幾何中心軸，完成對心。接著以單層電鍍鑽石砂輪磨削透鏡外緣，修正透鏡幾何中心軸至與光軸重合，完成磨邊。在對心的過程中，透鏡與夾具透過主軸高速旋轉，使兩者之間的接觸力達到軸對稱力平衡，但由於透鏡光學面與夾具在高速下持續接觸，容易造成鏡面傷痕，且若夾具端面存在誤差， $1\mu\text{m}$ 的高低差便會產生 $30''$ 的光軸誤差，使光軸精度超出規格。砂輪磨邊品質取決於加工參數、夾持情形與光

軸精度，且受加工前尺寸差異、砂輪表面品質、切削液、機台運作情形等不確定因素影響，容易產生光軸誤差、裂邊、真圓度不佳等問題。

為使少量多樣的光學透鏡能在避免加工缺陷產生的前提下達到更高光軸精度，需要能在加工過程中同步監控透鏡光軸與砂輪磨削情形的技術，此外，分析監控數據並提供製程決策，有助於現場師傅即時判斷應對措施，並作為後續製程優化的依據，因此，對於半導體光學玻璃透鏡的高精度定心製程，即時監控與製程決策極為重要。

二、研究目的

本研究以提升光學玻璃透鏡定心加工品質為目標建立智慧定心系統，為優化光軸精度與避免鏡面傷痕，研究並開發定心線上光軸監診系統。為降低磨邊產生裂邊與真圓度誤差等缺陷，利用聲發射感測器開發砂輪磨削監控系統。並整合兩系統資訊，利用自主開發的線上光軸檢測模組與聲發射感測器實現製程雙重感測能力，建立數位雙生系統，實現高精度定心，提高光學玻璃透鏡的加工精度及生產效率。

本研究將自主開發的線上光軸檢測模組，搭建於定心加工機上，藉由讀取光標座

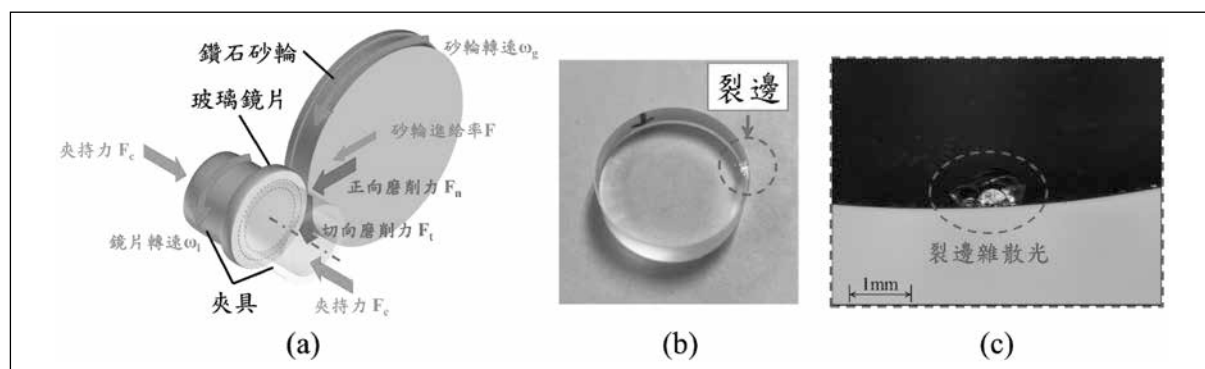
標計算透鏡光軸偏擺角度與方向。以聲發射訊號監控砂輪磨削情形，運用時頻訊號轉換分析訊號特徵以監控磨削缺陷的發生，搭配線上光軸檢測，可得到透鏡缺陷發生的時間點與位置，搭配加工參數設定，歸納加工問題，並建議調整造成缺陷的關鍵加工參數。綜合光軸與聲發射資訊，本研究進一步利用機器學習建立多種模型反饋製程訊息與應對決策，實現定心製程智慧製造。

研究方法

一、定心製程原理

定心為修正幾何中心軸以對正光軸的製程，藉由兩個安裝於旋轉軸的鐘形夾治具夾持固定透鏡，此時光軸便由夾具與鏡面的力平衡而對正於機械旋轉軸上，最後透過砂輪磨削透鏡外緣，使幾何中心軸反過來對正於光軸上。

定心過程中，砂輪磨削容易造成真圓度誤差或裂邊，由於光軸誤差取決於光軸與幾何中心軸的差異，真圓度誤差會使透鏡光軸誤差變大，即使加工過程中光軸完美對正於透鏡旋轉軸上，如圖一所示。砂輪對透鏡邊緣磨削產生的瞬間應力集中會造成裂邊，會使光線在光學系統邊緣意外散射，產生邊緣亮點並影響成像品質，如圖二所示。



圖一 (a) 定心製程原理 及製程缺陷所產生之玻璃透鏡 (b) 裂邊 與 (c) 雜散光

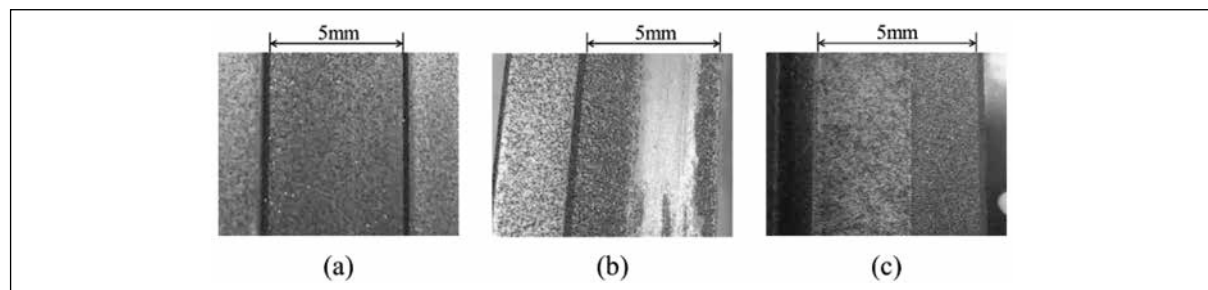
定心磨削過程中，磨削能 grinding energy(u) 是影響透鏡邊緣品質的關鍵因素，並與切向磨削力 F_t 呈正相關，磨削能可參考以下平面磨削公式而得 (Li et al., 2021)。

$$u = \frac{F_t v_s}{d w v_w} \quad (1)$$

其中 v_s 為砂輪轉速， d 為磨削深度， w 為砂輪寬度， v_w 為進給率。定心屬於外圓磨削，因玻璃硬脆，定心過程中的透鏡轉速一般設定在小於 5rpm，以免大量裂邊產生。

定心磨削的磨削能與磨削力大小主要取決於砂輪轉速、透鏡轉速、磨削深度等加

工參數。圖四為不同狀況下的砂輪表面，在固定砂輪粒度與透鏡材質下，若正向磨削力 F_n 提升，則切向磨削力也會提升，除了加大材料移除率外，還會加速砂輪鑽石磨粒損耗，如圖二 (b) 所示，並使磨削點升溫 (Huang et al., 2022)。正向磨削力提升會使透鏡邊緣所受的徑向應力增加，進而使裂邊深度增加。磨削溫度升高會使透鏡材質邊緣軟化且易變形，導致真圓度誤差變大。此外，因磨削溫度上升融化玻璃，會使砂輪表面因沾附熔融玻璃屑而覆蓋住鑽石粒，導致砂輪磨削力降低，如圖二 (c) 所示。



圖二 不同情況的砂輪表面 (a) 正常 (b) 磨損 (c) 熔融玻璃沾附

因磨削製程牽涉到許多砂輪上的鑽石磨粒同時對材料進行移除 (Mao et al., 2022)，除了加工參數外，砂輪表面品質是對製程品質影響最大的因素之一。磨削砂輪與工件表面的互動關係包含切削 (cutting)、犁 (plowing) 與摩擦 (rubbing) (Wu et al., 2021)。其中移除單位材料所需要的磨削能大小依序為：切削 > 犁 > 摩擦，切削的材料移除機制為材料從工件表面斷開形成切屑，而摩擦的材料移除機制為材料加熱直至熔融狀態後脫離工件表面，所需的溫度遠大於其他兩者。

表面鑽石粒磨損的砂輪在進給的過程中，因砂輪表面與透鏡邊緣的互動關係從切削為主轉變成摩擦為主，正向與切向磨削力因材料移除不易而上升，且磨削點因摩擦而

大幅升溫，上述情形最終導致透鏡真圓度誤差與裂邊增加。在量產的過程中無法即時發現砂輪磨耗，便會影響生產良率。此外，由於玻璃屬於硬脆材料，裂邊容易在定心過程中產生，且每顆同一型號透鏡加工前存在大約 0.5mm 的真圓度誤差，定心後加工至真圓度 <0.01mm，在固定加工參數下材料移除情形不盡相同，進而影響磨削過程中的磨削力變化 (Rao et al., 2023)。

二、線上光軸監診系統

(一) 光軸檢測原理

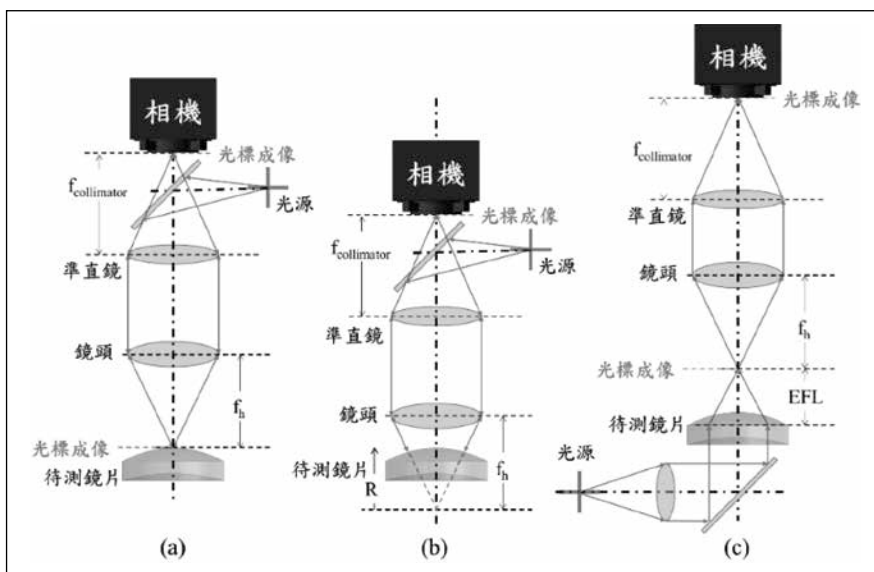
光軸檢測的原理為利用光源光標通過定心透鏡後，經由相機鏡頭聚焦於內部感光元件，以此成像並將影像傳輸至電腦內部進行運算。根據透鏡的量測需求，光軸量測可

分為反射式與穿透式兩種。

反射式光軸量測法可針對透鏡單面進行光軸量測，透過上鏡面反射光標至感光元件，量測上鏡面的光軸，如圖四 (a) 所示。反射式光軸量測過程中，會進行兩次成像：第一次鏡頭聚焦在待測透鏡上表面，由於面心斜率為零，光線原路徑反射至

感光元件，十字光標會成像在鏡面和感光元件上；第二次移動鏡頭，使鏡頭焦點與待測鏡面曲率球心重合，光線射向鏡面球心（鏡頭焦點）會垂直射向鏡面，因此光線原路徑反射至感光元件，十字光標僅在感光元件成像，如圖四 (b) 所示。

穿透式光軸量測法可量測整個透鏡或透鏡系統的光軸，原理如圖三 (c) 所示。光源



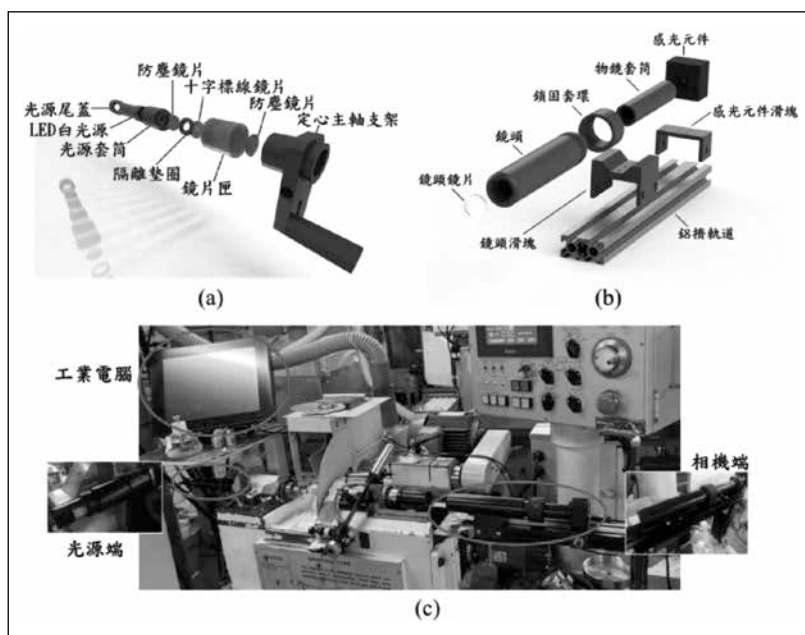
圖三 光軸量測原理 (a) 反射式面心反射成像 (b) 反射式鏡面再次反射成像 (c) 穿透式光軸量測

改從與感光元件相反的方向朝照射，通過待測透鏡後聚焦於一點。經由調整鏡頭位置，使透過待測透鏡產生的成像，透過鏡頭可聚焦於感光元件上。

(二) 線上光軸檢測模組設計與線上架設

本研究之線上光軸檢測模組架設於湘南 502N 臥式定心加工機台上，如圖四 (c) 所示，在定心機台的透鏡夾持軸一端架設汞燈光源，通過

十字光標朝透鏡照射，並在另一端架設相機檢測穿過透鏡的光標，相機的影像會傳輸到顯示器上。當透鏡旋轉時，由於光軸與旋轉軸的偏差，投射出來的光標會繞圓移動。在計算透鏡與相機之間的距離以及光標的相對偏移量時，可由演算法即時推算透鏡的光軸誤差，以此為依據調整透鏡來校正光軸。



圖四 本研究設計之 (a) 光標發射機構 (b) 光標接收機構 (c) 線上光軸檢測模組架設於湘南 502N 定心加工機

(三) 線上光軸檢測成果

本研究以光軸誤差量測做為軌跡追蹤誤差評估標準，針對產線量產透鏡連續測試 20 片，利用安裝有線上光軸檢測模組的湘南 502N 臥式定心機進行定心加工，同步進行光標軌跡追蹤與定心加工測試。加工前於定心機線上進行光標軌跡追蹤測試，數據如圖中虛線，計算光軸量測上下限之差異，軌跡追蹤誤差為 2”。定心加工測試結果為加工後使用 Trioptics Opticentric 300 光軸機離線量測光軸誤差之數據，如圖中實線，線上量測與實際量測結果比較，誤差為 2.5”。

線上光軸檢測模組可以收集到定心加工中透鏡光軸中心的 2D 座標位置，之後透過資料分析將座標位置轉換成座標圖以便計算光軸誤差大小和方向，以搭配砂輪磨削監控系統建立數位雙生系統。

(四) 光標軌跡分類與製程決策

理論上，當透鏡繞幾何中心軸自轉時，光軸會以幾何中心為圓心做公轉，因此光標也會繞著幾何中心公轉，其光標軌跡會呈現正圓形。然而若透鏡夾持軸有偏差，導致旋轉軸與夾持軸未對正，或旋轉時有震動產生，就會讓光標軌跡偏斜或包含雜點。綜上所述，光標軌跡型態分析及檢測資料庫建置有助於診斷定心機的夾持軸偏差。透過對實際產線生成之光標軌跡進行型態分類、定義各類型態特徵，並記錄相對應製程參數與人工判斷之製程決策，建置資料庫儲存資料集作為未來製程決策之依據。本研究利用線上光軸機蒐集實際產線十字光標檢測數

據，並對影像做剪取、二值化與循跡，讓軌跡特徵更顯著後，進行光標軌跡型態分類，如圖 X 所示，以實現線上光軸機智慧化。

光標軌跡大致可分為單點、圓形、非圓形和不規則四種，單點為定心後理想情況，表示光軸誤差極小，製程可繼續保持；圓形表示定心後透鏡帶有一定程度的光軸誤差，需微調透鏡或修整夾具以改善光軸校準；非圓形起因於透鏡受到推動或本身真圓度不佳，大多出現在直徑較大或鏡面曲率低的透鏡量測上；不規則軌跡來自機台震動影響太大，若不旋轉透鏡量測會發現光軸誤差不為零，大多發生在小型透鏡的量測上。目前產線師傅會因光標軌跡變異狀況而作不同定心製程決策，故本研究發展光標軌跡型態識別技術，利用深度學習模型模擬師傅於光標軌跡圖像辨識之分類模型，配合檢測資料庫資料進行訓練，協助新人做出相對應製程決策並降低誤判率。

線上光軸量測模組在透鏡定心加工的過程中量測透鏡光軸，透鏡在加工前先執行定位，使得螢幕上的十字光標對準畫面中心，接著在透鏡旋轉時量測光軸誤差。加工過程中，線上光軸量測系統除了量測光軸誤差外，也儲存紀錄光標軌跡影像。**表一**為各類光標軌跡所對應的實際可能發生情況與後續製程決策。

受到砂輪磨削的影響，加工過程中的光標軌跡與尋心過程的光標軌跡略有不同，在加工結束後，系統依據光標軌跡提出適當的製程決策，再由操作員手動依建議數值調整加工參數。

表一 各類型光標軌跡發生情況與後續製程決策

圖形 編號	單點 1	圓形 2	非圓形 3	不規則 4
隨機取樣圖形				
發生情況	高精度光軸平面鏡	正常誤差	夾持不穩 進給率過大 夾持軸偏擺	切削液汙染 鏡面像差 機台振動
製程決策	保持原狀	砂輪推動微調透鏡	重新尋心並提 升夾持力 降低砂輪進給率	吹氣清理 排除透鏡 機台運作檢查

因定心製程之物理機制複雜且光軸精度要求高，品質的穩定度多取決於作業人員的經驗。理論上，當透鏡繞幾何中心軸自轉時，光軸會以幾何中心為圓心做公轉，因此光標也會繞著幾何中心公轉，其光標軌跡呈現正圓形。然而若透鏡夾持軸有偏差，導致旋轉軸與夾持軸未對正，或旋轉時有震動產生、加工時砂輪推動透鏡，就會讓光標軌跡偏移或包含雜點。

本研究參考美國國家標準與技術研究所發起整理的數據集 (Modified National Institute of Standards and Technology, MNIST) 和機器學習演算法建立 CNN 光標軌跡分類模型 (LeCun et al., 1995)，利用 640 x 480 的光標軌跡影像訓練 CNN 模型

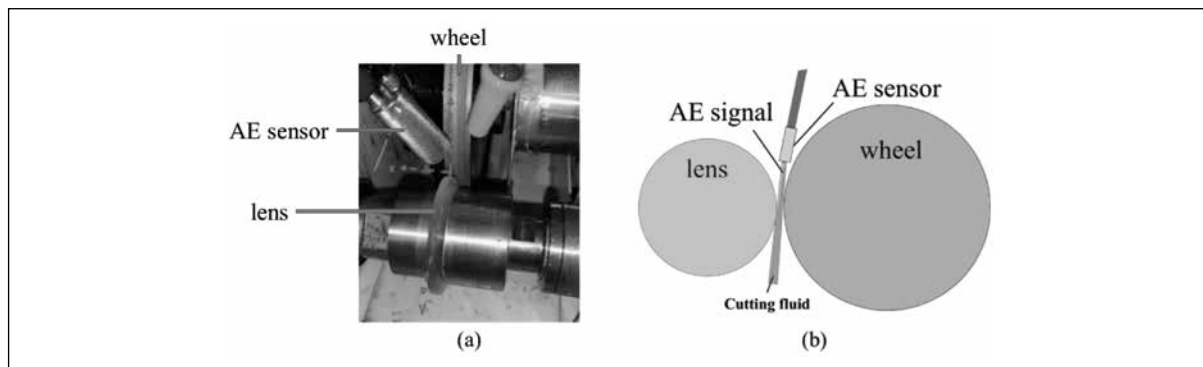
本研究共收集了線上光軸量測中四種類型的標軌跡圖形，每組各 734 筆軌跡圖，共 2936 筆。其中 2360 筆約 80 % 作為訓練數據，剩下的 576 筆作為測試數據檢驗 CNN 的識別準確率，測試後所得到的平均預測準確度為 96.18 %。

三、砂輪磨削監控系統

(一) 聲發射感測訊號與實驗架設

聲發射 (Acoustic emission, AE) 是當固體結構因外部機械力作用而產生不可逆變形時，彈性應力波產生的現象。這種無聲的高頻現象可作為固體材料狀態變化的非破壞性指標。因此，該現象的能量由聲發射感測器以超聲波信號測量並轉換成電信號。在研磨工業中，聲發射信號常用作研磨情況的指標。與其他測量方法不同的是，聲發射的頻率範圍比周圍環境頻率高得多，使其不受干擾，適合進行過程監測。

本研究使用湘南 502N 臥式定心機進行實驗，搭配粒度 #230 電鍍鑽石砂輪。實驗架設如圖五所示，水聽式 AE 感測器安裝於切削液油管出口，使切削液能經過 AE 感測器噴注於磨削點上，由砂輪磨削產生的聲波訊號便會經由切削液傳遞至 AE 感測器。為了最小化機台震動所造成的訊號干擾，接觸式感測器無法在本研究中被採用，因感測到的雜訊會大到無法濾除，即使其能更有效地接收到磨削點的加工訊號。AE 感測器訊號會連接至電腦，將 AE 訊號同步處理並輸入至預測演算法中。



圖五 (a) 聲發射感測器實體架設 (b) 聲發射訊號接收方式示意圖

(二) 聲發射訊號處理

本研究用於定心製程監控的 AE 訊號取樣頻率為 1MHz，可觀察到定心製程中的細部訊號變化，然而高取樣頻率的資料總量龐大，導致訊號處理的高度負擔。在高採樣率的數據下進行訊號分析可能會造成後續模型準確度下降，因為數據中包含大量特徵，難以全面分析。

由於 AE 訊號每秒有 1 百萬筆數據，高度密集的數據使得訊號特徵不易顯現。圖六右上方為砂輪磨削 AE 訊號的局部放大圖，圖中顯示 1 秒共 1000000 筆數據，根據此放大數據圖，砂輪磨削透鏡的過程中，AE 訊號以特定頻率出現極短時間的大振幅波包，其時程大約 0.01-0.02 秒，在本研究稱為「AE 磨削特徵」(AE grinding feature)。

根據先期研究 (Liu et al., 2022)，材料移除與 AE 訊號呈正相關，當砂輪對透鏡進行材料移除時，AE 訊號振幅上升。當砂輪進給移除透鏡材料的過程中，並非隨時都在移除材料，而是以一定的規律對透鏡表面進行高頻率切削。圖六為進給率 0.01mm/s、砂輪轉速 1500rpm 的第 35-36s 定心實驗 AE

訊號，圖中 1 秒內共有大約 33 個 AE 磨削特徵，剛好等於砂輪的旋轉頻率 ($1500\text{rpm} = 25\text{rev/s}$)。

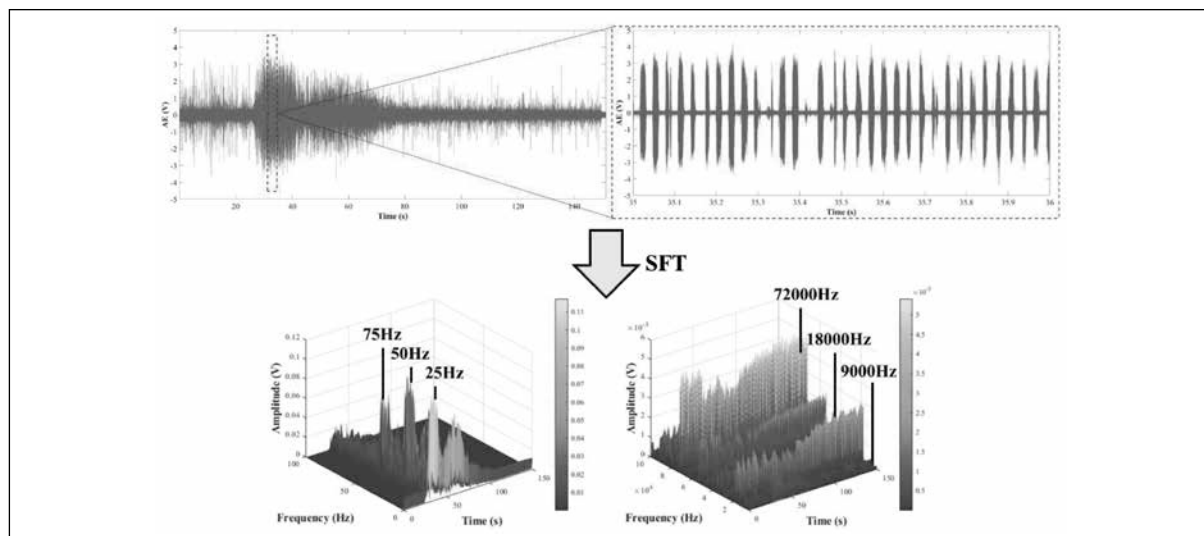
本研究利用短時傅立葉轉換 (Short Fourier Transform, SFT) 分析定心製程 AE 訊號，以評估磨削訊號與未磨削訊號之頻譜分佈，並進一步確認訊號中 9000Hz 共振頻率的產生來源。此外，由於製程監控與即時決策需要有快速分析固定時段訊號的能力，SFT 的應用可提供線上監控頻域的資訊。

基於時窗訊號處理，每次定心製程的 AE 訊號以 1 秒為單位封包收集，每個封包 1 百萬筆數據，可確保訊號分析延遲時間不到 1 秒。以每秒為單位用 SFT 轉換，即可得到在不同頻段下的訊號變化，或是某個時間的頻譜。儘管 SFT 因涵蓋時間、頻率、振幅等三個維度的數據，確切數值不易判讀，其轉換結果有利於評估整個製程在不同時間與頻段的訊號趨勢。

圖六下方之定心製程 AE 訊號在低頻段和高頻段的 SFT 轉換結果。從低頻段的時頻分佈可知，當砂輪磨削透鏡時，低頻段訊號振幅上升，主要訊號為基頻 25Hz 的共振，

等同於砂輪的旋轉頻率，驗證此訊號為砂輪磨削透鏡所造成的，與材料移除相關。高頻段的訊號以基頻 9000Hz 的共振為主要訊號，其振幅遠小於砂輪磨削時的低頻訊號，且在磨削階段，高頻訊號有受到抑制的傾向，推

測部分訊號在磨削過程中被透鏡和砂輪所吸收，因此，基頻 9000Hz 的共振訊號並非由砂輪磨削產生，表示其訊號來源不在加工，而是與訊號收集共同發生的切削液流動，9000Hz 極有可能為切削液的自然頻率。

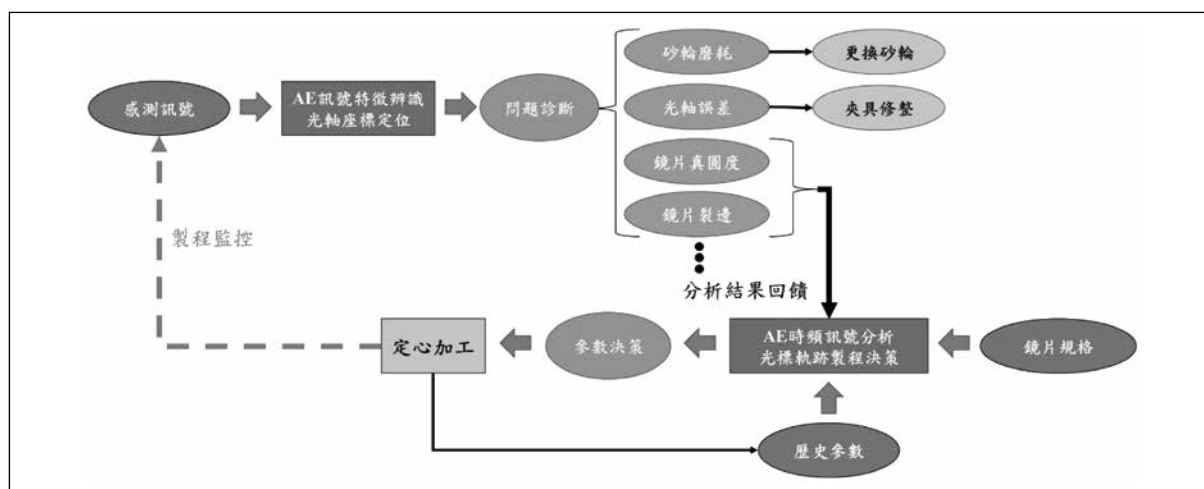


圖六 由 SFT 轉換的 AE 低頻訊號 (左下) 與高頻訊號 (右下)

四、智慧定心數位雙生系統

本研究以虛實閉環為基礎，開發定心製程數位孿生系統，定心閉環系統架構如圖七所示，根據透鏡規格給出參數決策並記錄至歷史參數資料庫，定心加工過程中，多重感知系統即時收集製程訊號並回饋至機邊電腦

進行運算，利用 AE 訊號特徵辨識與光軸座標定位診斷加工問題並告警，其中如光軸誤差、真圓度、傷痕、裂邊等缺陷資訊將回傳至資料庫優化系統，以利系統下一次提供更高精準度的誤差預測與參數優化，便能實現閉環系統，建立數位雙生的基礎。



圖七 定心加工閉環系統架構

結果與討論

本研究以石英透鏡進行模型驗證，每次製程決策測試 5 顆透鏡，總共進行連續 10 次製程決策與 50 顆透鏡定心加工測試，並量測光軸誤差、真圓度、裂邊和光標軌跡變異。光軸誤差利用線上光軸模組量測；真圓度的量測方法為使用螺旋測微儀每 30 度角量測一次外徑，再計算出最大外徑偏差；裂邊透過眼規量測深度；而光標軌跡變異則是利用線上光軸量測模組所擷取的光標軌跡分析，計算軌跡上所有點座標與中心的距離變異數，計算公式如下

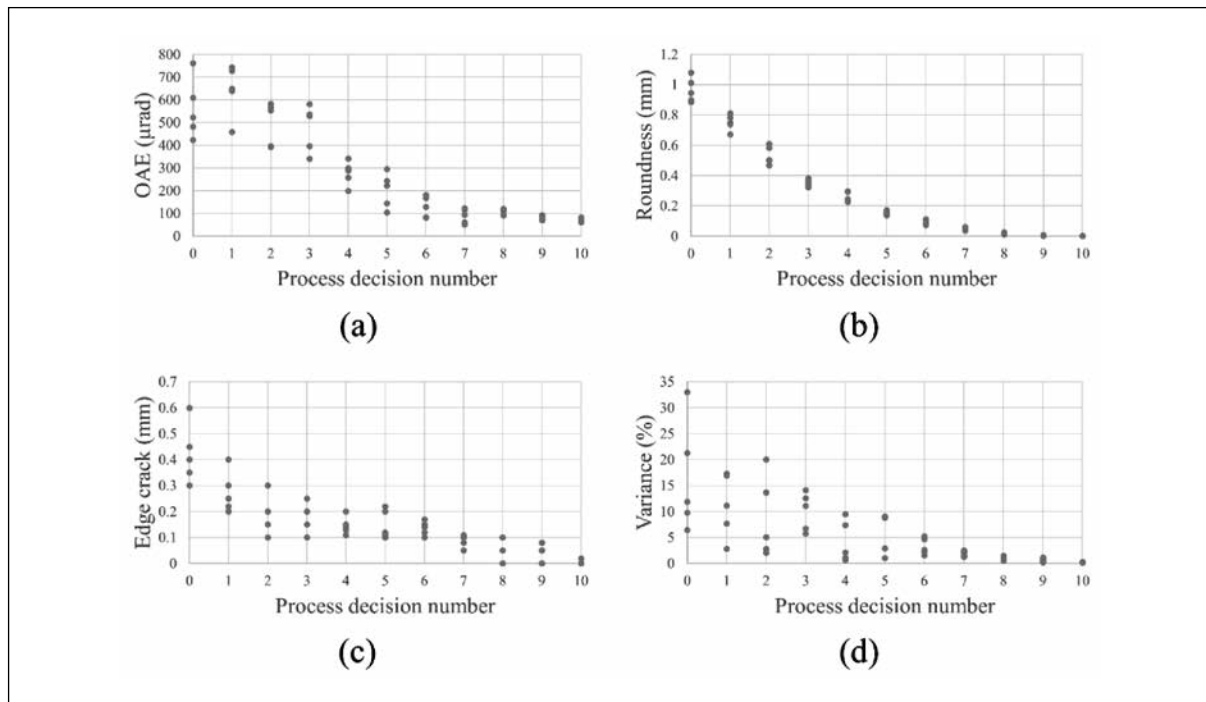
$$V_t = \frac{\sum_{i=1}^n (d_i^2 - \mu_d^2)}{n \times \mu_d^2} \times 100 \% \quad (13)$$

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2} \quad (14)$$

其中 V_t 為光標軌跡變異量， d_i 為軌跡上第 i 個點與軌跡中心的距離， μ_d 為各點距離 d_i 的平均， n 為一個軌跡上的點數量。單

點或圓形的光標軌跡變異趨近於 0，而非圓形與不規則的變異量則不為 0，因此光標軌跡變異量可用來評估非圓形或不規則軌跡的變形程度。

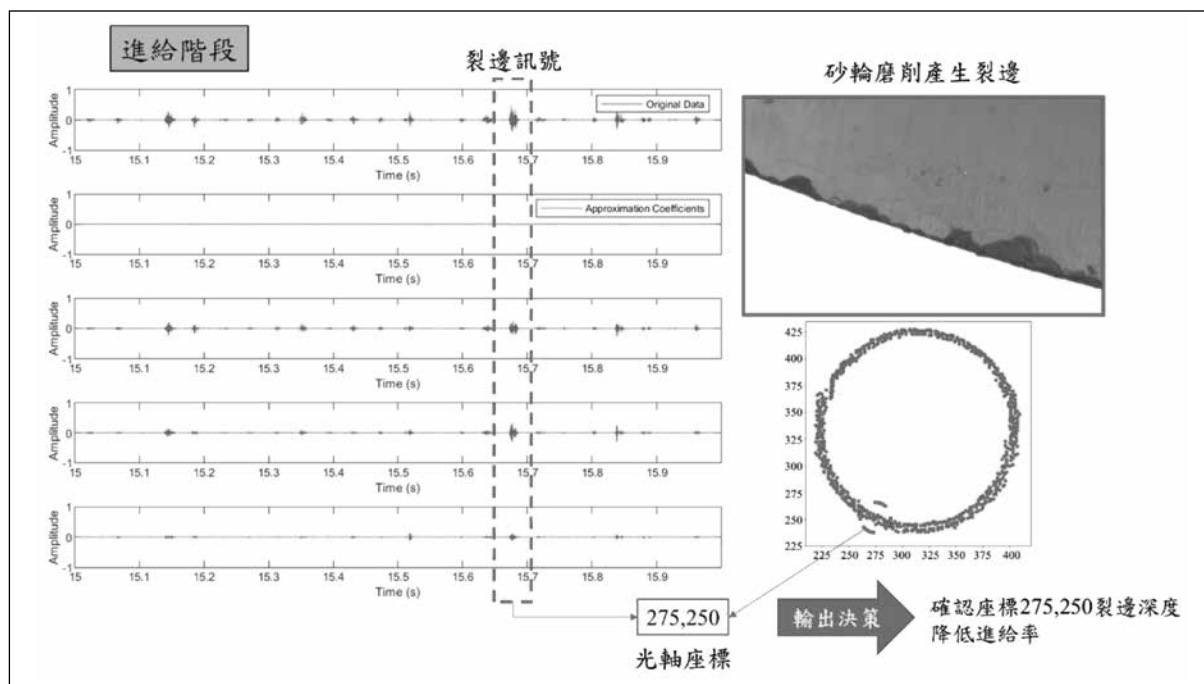
圖八為本研究製程決策實驗的透鏡規格量測結果。圖八 (a) 顯示隨著製程決策執行次數越多，光軸誤差明顯下降，由於一開始的光標軌跡傾向於非圓形或不規則，此時量測到的光軸誤差偏大且較不合理。圖八 (b) 和 (c) 為真圓度與裂邊量測結果，此二規格取決於定心加工參數，透過製程決策修正參數使規格得到明顯的改善，此外實驗結果發現，若光標軌跡為非圓形，真圓度可高達 0.6mm，若為不規則軌跡，則裂邊超過 0.3mm。圖八 (d) 中可知最初光標軌跡變異範圍從 10 % 到 35 %，表示定心加工製程不穩定，隨著製程決策的次數增加，變異量也逐漸減少，且透鏡真圓度與裂邊也逐漸改善。



圖八 製程決策實驗結果 (a) 光軸誤差 (b) 真圓度 (c) 裂邊 (d) 變異量

本研究整合線上光軸監診系統與砂輪磨削監控系統，建立智慧定心製程監控與決策系統。圖九為智慧定心製程即時監控與實驗後透鏡檢測結果，對應至光軸檢測與 AE 訊號，可即時推算出透鏡上特定位置磨削時所

發生的缺陷。根據系統實際加工石英透鏡測試結果，其準確度可達 85 %。剩餘的 15 % 誤判中，有 6 % 為缺陷情形誤判，9 % 為實際無缺陷，其準確度已可導入產線使用。



圖九 搭配線上光軸檢測模組與聲發射感測器之定心製程裂邊缺陷辨識

結論

本研究針對光學玻璃透鏡定心製程，整合自開發之線上光軸監診系統與砂輪磨削監控系統，建立智慧定心製程監控與決策系統。線上光軸監診系統可在玻璃透鏡定心加工的同時量測透鏡光軸，確保加工後的透鏡光軸符合規格。此外，藉由導入 CNN 分類光標軌跡型態，可輔助現場操作人員依據其型態執行對應製程決策，降低裂邊與真圓度等加工誤差。根據本研究初步成果，由 CNN 執行的光標軌跡分類準確度可達到 96.18 %，且根據線上光軸監診系統可大幅降低定心加工誤差。

藉由 AE 感測器監控鏡片材料移除情形與砂輪磨耗度，本研究分辨出 AE 感測器環境訊號與砂輪磨削訊號之時域及頻域差異，藉此差異建立砂輪磨削特徵，分析特定頻域之 AE 訊號，監控鏡片裂邊、真圓度誤差或砂輪磨耗等問題。

搭配線上光軸監診系統與砂輪磨削監控系統，本研究於定心製程可即時檢測缺陷所發生的時間點、鏡片磨削位置、光軸偏位，並依據上述資訊與製程參數設置，回饋製程決策以優化定心製程。根據實際加工測試結果，智慧定心製程監控與決策系統準確度可達 85 %，其中 6 % 為缺陷情形誤判，9 % 為實際無缺陷。此外，根據本研究驗證結果，定心加工石英透鏡後之精度規格可達：光軸誤差 <30''、裂邊長 <E0.1mm、傷痕 <L1x0.001、真圓度 <0.1mm。

參考文獻

1. Li P., Chen S., Jin T., Yi J., Liu W., Wu Q. et al. (2021). Machining behaviors of glass-ceramics in multi-step high-speed grinding: Grinding parameter effects and optimization. *Ceramics International*, 47, 4659–73.
2. Huang HC., Ho C.C., Fuh Y, Li T.T. (2022). A novel dry processing technique to construct a high-performance superfine diamond grinding wheel with thermal and material characterizations. *Journal of Manufacturing Processes*, 82, 765–76.
3. Mao C., Long P., Tang W., Xiao L., Luo Y., Shu Z., et al. (2022). Simulation and experiment of electroplated grinding wheel with orderly-micro-grooves. *Journal of Manufacturing Processes*, 79, 284–95.
4. Wu H., Yao Z. (2021). Force modeling for 2D freeform grinding with infinitesimal method. *Journal of Manufacturing Processes*, 70, 108–20.
5. Rao X, Zhang F, Xu J. (2023). Wheel wear behavior and its influence on grinding performance in electrical discharge diamond grinding of reaction-bonded silicon carbide. *Journal of Manufacturing Processes*, 85, 904–14.
6. Y. LeCun, L. D. Jackel, L. Bottou, C. Cortes, J. S. Denker, H. Drucker, I. Guyon, U. A. Müller, E. Säckinger, P. Simard, V. Vapnik (1995). Learning Algorithms for Classification: A Comparison on Handwritten Digit Recognition. *Neural Networks*, 261–276.
7. Liu C-W., Shiu S-C., Yu K-H. (2022) Analysis of the optical quartz lens centering process based on acoustic emission signal processing and the support vector machine. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119, 6321–34.

作者簡介

許孝誠 / 國立清華大學 動力機械工程學系

劉俊葳 / 國立清華大學 動力機械工程學系 / 指導老師

