

SiC 晶圓超音波研磨砂輪的 2D 振幅與磨耗健康狀態的機上 AOI 量測技術

本研究提出了一種創新的機上 AOI 超音波振幅量測方法，透過正面顯微測量光路設計，可應用於大型尺寸刀具或有空間限制的場合。我們使用頻差閃爍照明原理，使取樣率只有數十 Hz 的一般工業相機，可以量測到數十 kHz 的高頻超音波刀具振動位移。再利用數位影像相關法 (Digital Image Correlation) 分析，估算每張影像微小位移。針對數種圖像清晰度函數 (Image Sharpness Function) 進行研究與比對，並將之應用於最佳閃爍照明的曝光參數自動化選用。最後，本研究以一個直徑為 250mm 的晶圓研磨砂輪在 20kHz 超音波震動量測為例，研究結果顯示本技術實現數十 kHz 以上的超音波振動量測，且量測解析度可達 0.2um。

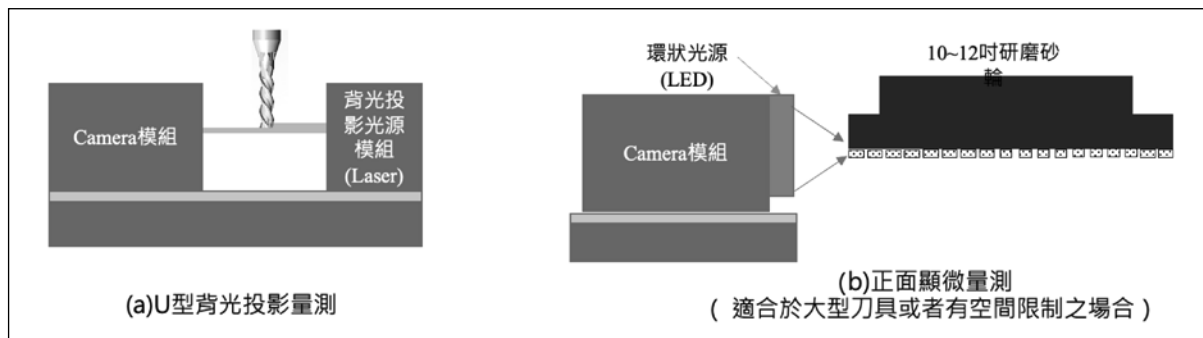
■ 劉展林、江昱霆、涂嘉哲、陳政雄

關鍵詞：正面顯微、超音波振幅量測、頻差閃爍、數位影像相關法、SiC 晶圓研磨砂輪

超音波加工技術是一種先進的加工技術，利用高頻訊號產生機械振動，具有高精度和高效率的加工能力，它在製造業中被廣泛應用 (Thoe, T. B., Aspinwall, D. K., 1998)，這項技術可應用於各種材料的加工，包括金屬、塑料、陶瓷等，並能夠實現微細加工，適用於高精度產品，如半導體元件和脆性複合材料 (Li, Z. C., 2005)。超音波振幅的量測對超音波加工技術來說非常重要，它是超音波加工過程中能量傳遞的關鍵參數。測量超音波振幅可以確保加工的穩定性和一致性，並且能夠監控加工過程中的變化，這對於確保加工品質和提高生產效率有極大的相關性。現今市場上已經存在多種不同類型的超音波振幅量測工具。其中一類是利用光點遮斷原理，透過光感應器的回傳訊號量測刀具，還有一類是利用 U 型背光投影的影像處理技術，使用高速相機來捕捉超

音波加工過程中物體的運動情況。但是背光投影原理的 U 型光機設計，因此在實際應用上對於可量測的刀具尺寸有一個限制，大約僅能量測到數十 mm 刀具直徑，無法適用半導體晶圓研磨的 10~12 吋晶圓研磨砂輪的砂輪磨耗量測。另外，背光投影技術只能能量測刀具輪廓外型，無法量測刀具表面紋路與磨耗的變化狀況。

此外，目前市場上的刀具磨耗的 AOI 量測儀大多屬於離線方式，需要停下機台並將刀把拿到計量檢驗室做檢測。本研究開發一種正面顯微的機上 AOI 刀具量測技術 (如圖一所示)，並搭配頻差閃爍照明與 DIC 數位影像相關法 (Digital Image Correlation; DIC) 用於量測高頻的超音波刀具的振幅量測，且正面顯微可以量測刀具的表面紋路與磨耗狀態。因為採用機上量測的光路設計，使刀具磨耗狀態可以直接在機台上進行量測，使得量測的方便性大幅提昇。



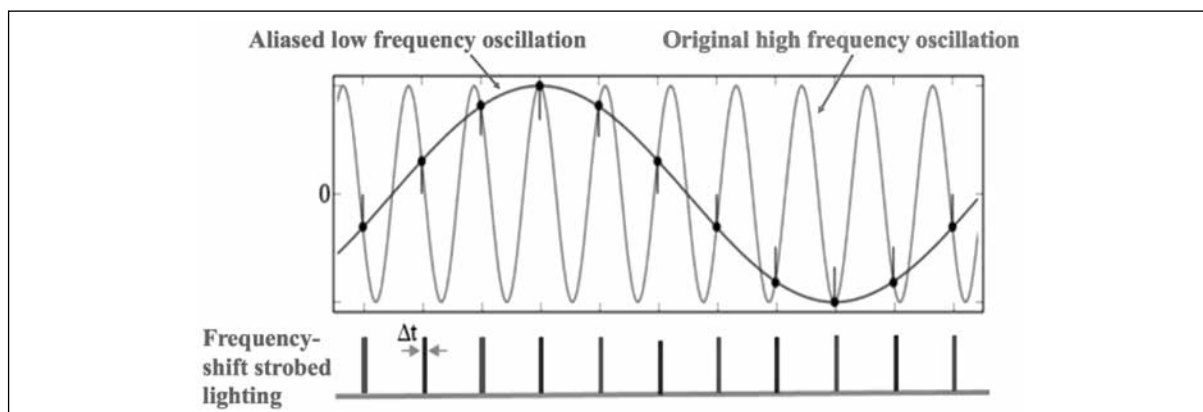
圖一 傳統 U 型背光投影與本研究正面顯微量測架構之比較

原理與研究方法

一、閃頻原理 (Stroboscopic Effect)

由於能拍攝數十 kHz 以上的超高速攝影機，不僅體積龐大與空間架設問題無法使用於 CNC 機台上，進行機上 AOI 量測。且高速攝影機不僅價格昂貴，且資料量龐大，在記憶體與傳輸上需要高達數小時以上的資料後處理時間，不適用機上量測的及時性與

空間限制的需求。因此，本研究採用數位採樣的假象原理 (aliasing)，首先使用頻差閃爍照明原理，將週期性超音波刀具的振動位移轉換為低頻數 Hz 的假象 (alising) 週期性運動 (如圖二所示)，再搭配取像速率只有數十 Hz 的一般工業相機，使其可以量測數十 kHz 的高頻超音波刀具振動位移。



圖二 頻差閃爍照明量測原理

二、數位影像相關法 (Digital Image Correlation; DIC)

由於數位相機的相素尺寸 (pixel size) 通常在數微米左右，而超音波刀具的振動位移量測解析度需要達到次微米 (submicron)，我們除了使用數倍放大的顯微鏡量測技術外，為了精密估算超音波刀具的振動位移週期性運動的假象影像，我們利用數位影像相關法 (Digital Image Correlation; DIC) 進行分

析，估算出每張影像的微小位移，並使量測解析度能達到 sub-pixel 的解析度。

數位影像相關法 (Digital Image Correlation; 簡稱 DIC) 是一種在數位影像處理和中的技術，常用於分析和測量影像中的位移、變形、應變，基本原理是通過比較連續的影像來計算位移場和應變場。在 DIC 中，影像被切割成小的子區域 (subset)。再

利用相關函數計算這些子區域在不同影像之間的相似性或相關性，進而獲得位移場以及應變場，以下為數位影像相關法的各種名詞解釋：

(一) 子區域 (Subset)

在數位影像相關法中，子區域指的是將參考影像和目標影像分成較小的區塊，如圖四所示，這些子區域通常是一個固定大小的正方形或矩形區域，其大小可以根據特定應用或算法的需求而調整。子區域是數位影像相關法中用來進行匹配和相似度計算的基本單元。

(二) 相關函數 (Correlation Equation)

相關函數是數位影像相關法中用於計算影像子區域之間相似度或相關性的數學公式。在相關法中，相關係數值是一個介於 -1 和 1 之間的數值，代表兩個子區域之間的相關程度，當相關係數為 1 時，表示兩個子區域完全相同，其在數位影像配準、特徵匹配和相似度評估中是一個重要的指標。

三、圖像清晰度函數

由於本機上量測使用脈衝閃爍照明與顯微鏡量測，若曝光不足或者曝光過度，都會使得拍攝影像的圖像解析度與空間頻率產生劣化，使得影像品質不佳而影響 DIC 分析結果。因此本研究也對數種圖像清晰度函數 (Image Sharpness Function) 方法，進行評估與探討，使能達到自動化選擇最佳的曝光照明參數。

圖像清晰度函數 (Image Sharpness Function) 是一種用來量化圖像清晰度或銳度的數學公式或算法。圖像的清晰度可以精確地評估圖像的品質和特徵，圖像清晰度函

數通常基於圖像的梯度、對比度或者像素之間的差異來計算。以下是幾種常見的圖像清晰度函數：

(一) Brenner Function (Brenner 函數)

這個函數通過計算相鄰像素灰度差的平方和，以評估圖像的清晰度。它假設圖像中的細節和邊緣具有較大的梯度，因此灰度差的平方和越大，圖像越清晰。其數學表示式如下：

$$E = \sum_x \sum_y [f(x+2, y) - f(x, y)]^2 \quad (1)$$

其中， $f(x, y)$ 表示圖像 f 對應像素點 (x, y) 的灰度值

(二) Tenengrad Function (Tenengrad 函數)

這個函數使用 Sobel 算子來計算圖像的水平和垂直梯度值，然後將其平方和相加。較大的梯度值表示圖像中存在較多的邊緣和細節，暗示著更高的清晰度。其數學表示式如下：

$$E = \sum_x \sum_y [S(x, y)]^2 \quad (2)$$

這裡， (x, y) 表示像素位置，而 $S(x, y)$ 表示 Sobel 算子的卷積運算結果，其計算如下：

$$S(x, y) = \sqrt{G_x^2(x, y) + G_y^2(x, y)} \quad (3)$$

(三) Laplacian Function (Laplacian 函數)

這個函數使用拉普拉斯算子來計算圖像的二次導數，有助於檢測圖像中的細節和邊緣。正的拉普拉斯值表示亮度變化，而負的值則表示暗度變化。其數學表示式如下：

$$\nabla^2 f(x, y) = f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) - f(x, y-1) - 4f(x, y) \quad (4)$$

(四) variance Function (變異函數)

這個函數計算圖像像素的灰度值相對於

平均灰度的差異的平方和。它用來評估圖像中的灰度變異性。當圖像中的灰度變化較大時，方差值也較大，暗示著更高的清晰度。其數學表示式如下：

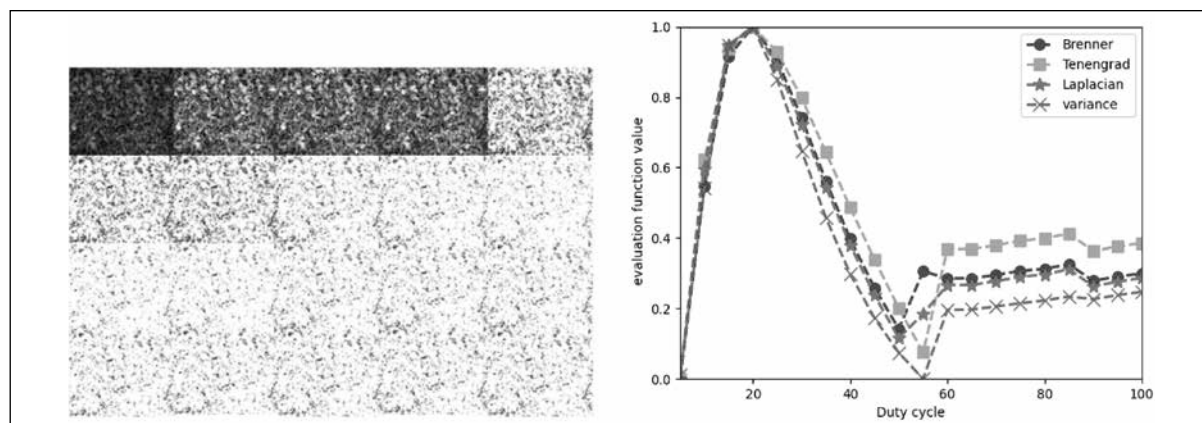
$$E = \sum_x \sum_y [f(x, y) - u]^2 \quad (5)$$

這裡， u 表示圖像的平均灰度級，通過計算圖像的所有像素值的平均值來獲得。

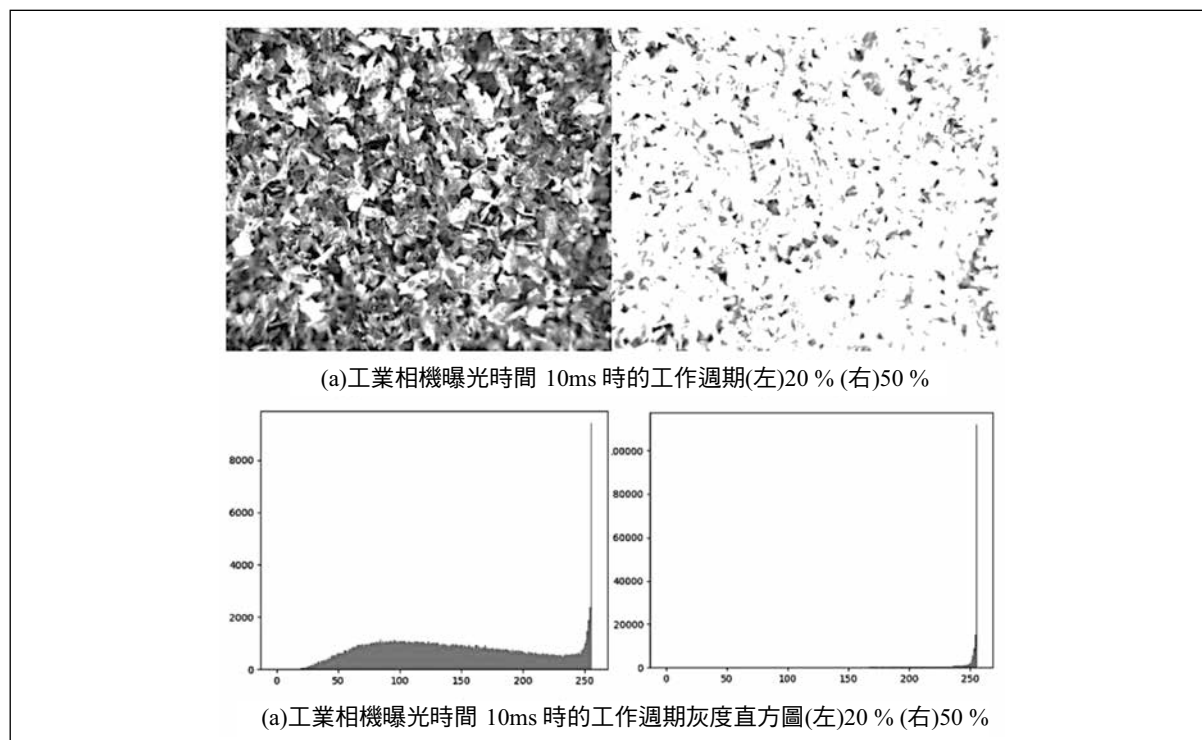
如前所述，曝光不足或者曝光過度，對拍攝影像的圖像空間解析度產生劣化。我

們使用圖像清晰度函數進行評估分析，透過調整曝光時間與工作週期得到最佳影像。將不同參數下實驗數據進行評估，當曝光時間設定為 10ms 時，環形光源的工作週期調整為 20 % 可得到最佳的影像品質（如圖三）。

圖四為清晰度最高以及最低之兩張不同參數下的圖像所進行影像品質評估和其灰度直方圖。



圖三 (a) 工業相機曝光時間 10ms 工作週期 5~100 % (b) 四種影像清晰度評估



(a)工業相機曝光時間 10ms 時的工作週期灰度直方圖(左)20 % (右)50 %

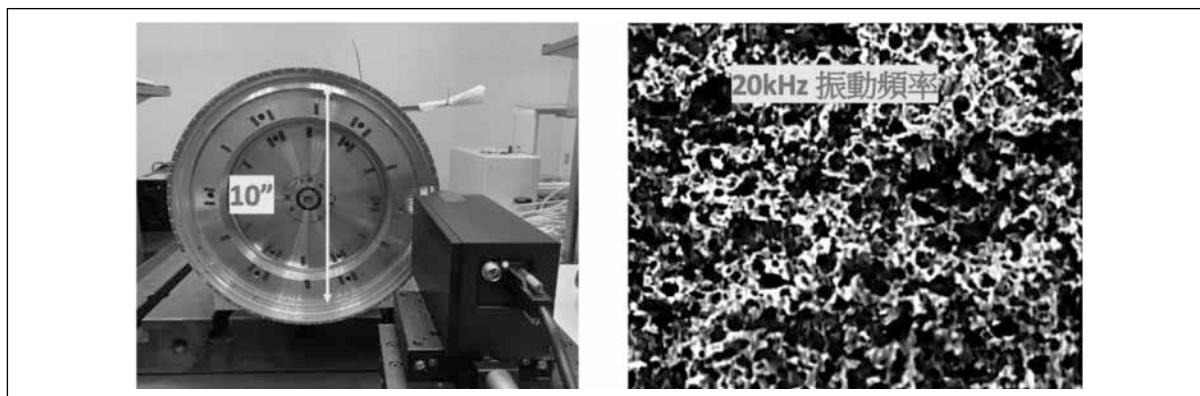
圖四 影像品質評估和其灰度直方圖

實驗結果與討論

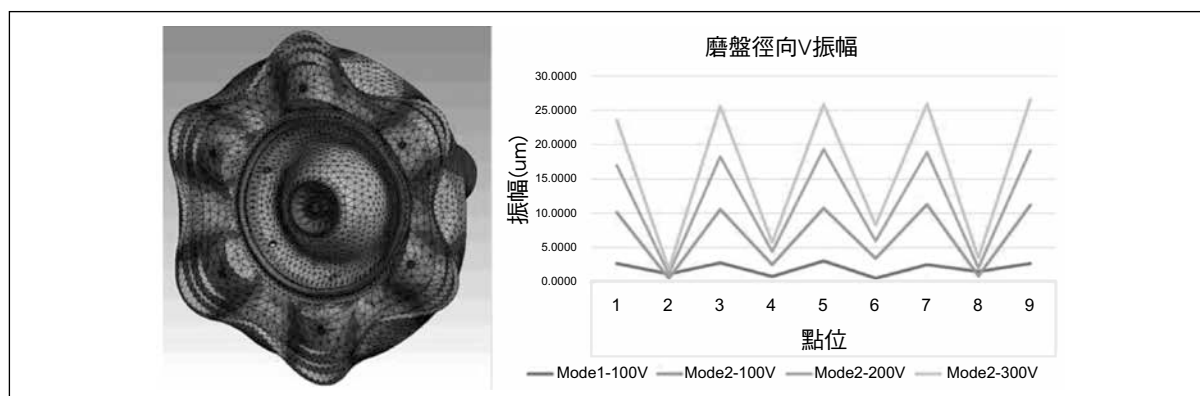
一、晶圓的超音波研磨主軸的 10 吋研磨砂輪的超音波振幅量測

我們以一個 10 吋的晶圓的超音波研磨主軸為量測工件，該磨盤直徑為 200mm，最外圈上具有磨粒，主要拍攝部位為此，外觀及磨粒如圖五所示。

圖六是使用本研究的正面顯微量測功能，量測此晶圓研磨砂輪在 20kHz 振動頻率下，在不同超音波驅動電壓下的不同位置點的振幅，量測結果並與 Ansys 震動模態分析進行比對，顯示本創作的量測結果與 Ansys 震動模態分析結果相當吻合。



圖五 (左) 量測架設圖 (右) 磨盤上的磨粒

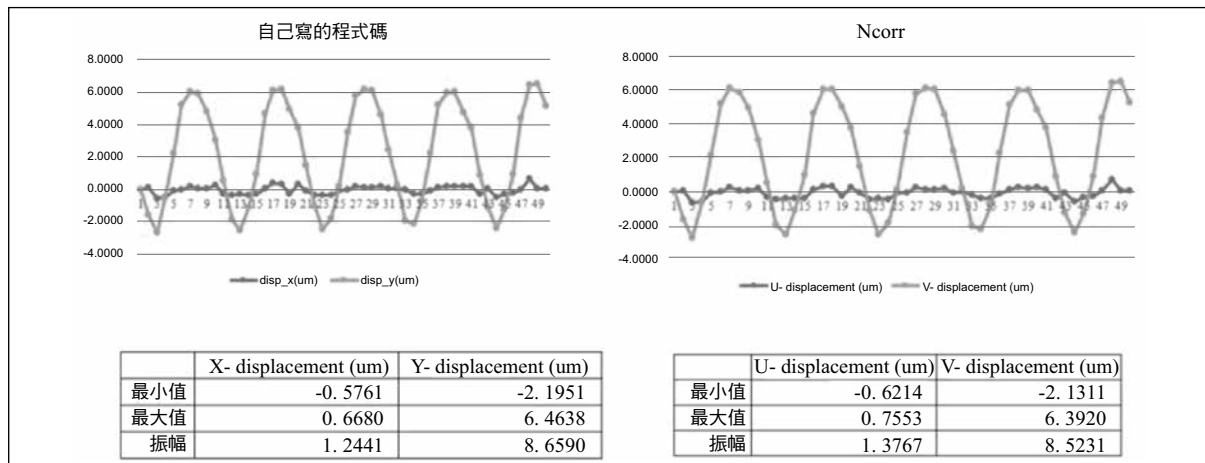


圖六 (左) ANSYS 模擬的磨盤磨態 (右) 本研究量測的徑向 V 軸各點的振幅

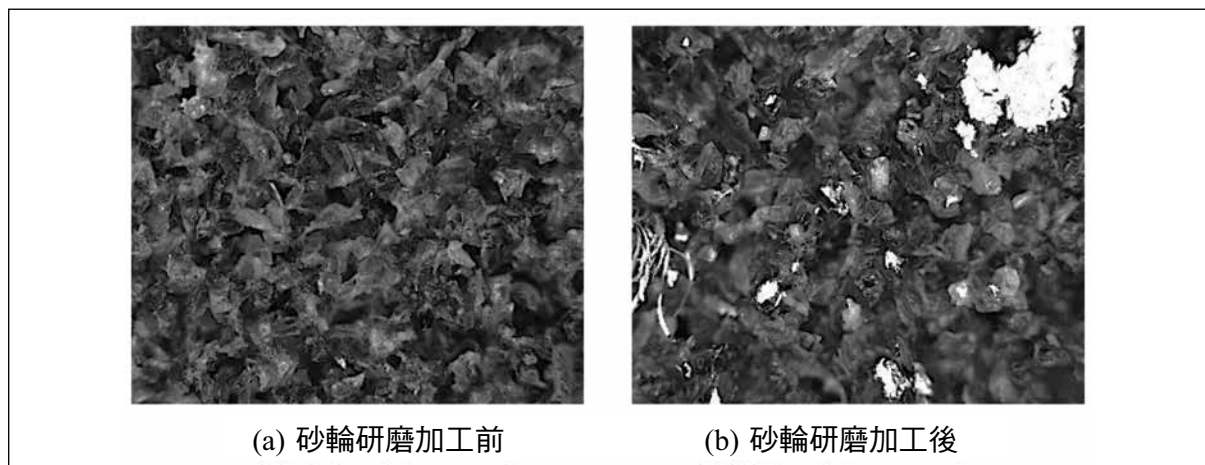
其次是本研究自行撰寫的 DIC 演算法與開源軟體 Ncorr 之間的比較，使用晶圓研磨砂輪軸向以及徑向進行分析。分析結果兩種的振幅值趨勢相同，誤差僅為 1 % (如圖七)，且使用開源軟體 Ncorr 計算所花費的時間要 20 分鐘以上，而自行開發的程式碼計算只需要 40 秒。

二、研磨砂輪的磨耗健康狀態

實際量測一個砂輪研磨在加工前以及加工後的機上刀具磨耗量測功能驗證。從圖八中能觀察到砂輪在研磨過程中的磨損以及表面狀況。顯示本量測儀器的正面顯微量測具有相當高的量測解析度，可以很清楚的觀察刀具的磨耗狀態。



圖七 超音波研磨盤實驗 - 徑向 (左) 自行開發的程式碼 (右) 開源軟體 Ncorr



圖八 砂輪研磨在加工前後的磨耗狀態

結論

目前市場上針對刀具震幅的量測裝置在量測原理上主要分成兩種，雷射遮斷式以及影像式，利用前種技術成功研發出產品的有 HEXAGON、Blum、Renishaw 等廠商，而利用後者的則有 Marposs、BIG DAISHOWA、KEYENCE 等廠商。這些量測裝置主要都是為了量測 CNC 加工機中，主軸上刀具的刀長、刀徑以及動態迴轉偏擺等會影響加工補償及校正的參數，他們的共通點為機構設計皆為 U 型，這會造成光源必須穿透待測物才能使光感元件或工業相機得到目標訊號。雷射遮斷會受待測物的大小體積限制，如果待測物過小則會出現無法遮蔽光點的問題；影像式也有這方面的限制，待測物若過大超出 U 型內側空間則無法做量測，且因為背光投影的成像方式失去表面的細部特徵，無法做刀具狀態的觀察。

機上正面拍攝刀具磨耗的量測裝置則有 HEIDENHAIN 最為著名，該公司結合自家控制器，研發出一套自有量測系統。該量測裝置能針對不同刀具、不同部位做細部的觀察與磨耗計算，每次拍攝都必須停止刀具位移、轉動的關係，除磨耗之外的刀具相關參數都無法量測。

本研究提出了一種創新的超音波振幅量測方法，不僅改善因為待測物體積而受到任何量測的限制，還能量測 10~12 吋的 SiC 晶圓研磨砂輪。光源採用正光照明的方式，透過圖像清晰度評估得到最佳圖像，使圖像模糊及對焦因素導致待測物產生誤差的情況大幅下降。得到待測物表面影像後搭配本實驗室長年研究的閃頻原理 (Stroboscopic Effect) 及混疊原理 (Aliasing Effect) 降低高頻訊號，再透過結合數位影像相關法 (Digital Image Correlation, DIC) 和自行開發的程式量測刀具超音波振幅。

參考文獻

1. 大昭和精機株式会社 (DAISHOWA SEIKI KABUSHIKI KAISHA). (2017). 『工具形状測定装置』 (W.O. Patent PCT/JP2015/068760).
2. 上海交通大学, 中华人民共和国国家知识产权局. (2012). 「用于检测历险刀磨损状态的正交视觉检测系统」, Patent No. 201110400626.8.
3. 長春理工大学, 中华人民共和国国家知识产权局. (2019). 「微径铣刀磨损检测方法」, Patent No. 201710009775.9.
4. 大昭和精機株式会社 (DAISHOWA SEIKI KABUSHIKI KAISHA). (2017). "工具形状測定装置." W.O. Patent PCT/JP2015/068760.
5. Kabushiki Kaisha Keyence. (2022). "光学測定装置." J.P. Patent 2020-193509(P2020-193509).
6. BIG DAISHOWA 株式会社. (2022). "回転工具のバランス及び振れ調整システム、バランス及び振れ計測装置、バランス及び振れ調整方法、及び、工具ホルダ." J.P. Patent 2020-503223(P2020-503223).
7. Blaber, J., Adair, B., & Antoniou, A. (2015). "Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software." *Experimental Mechanics*, Vol. 55, pp. 1105.
8. Li, Z. C., Jiao, Y., Deines, T. W., Pei, Z. J., & Treadwell, C. (2005). "Rotary Ultrasonic Machining of Ceramic Matrix Composites: Feasibility Study and Designed Experiments." *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, pp. 1402-1411.
9. MARPOSS SOCIETA' PER AZIONI. (2013). "Method for Positioning a Tool of a Machine Tool in the Visual Field of a Visual System and Relative Machine Tool." W.O. Patent PCT/EP2013/058117.
10. Renishaw PLC. (2007). "Tool Detection." W.O. Patent PCT/GB2007/000533.
11. Thoe, T. B., Aspinwall, D. K., & Wise, M. L. H. (1998). "Review on Ultrasonic Machining." *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 38, pp. 239-255.

作者簡介

劉展林 / 國立中興大學 機械工程學系所

江昱霆 / 國立中興大學 機械工程學系所

涂嘉哲 / 國立中興大學 機械工程學系所

陳政雄 / 國立中興大學 機械工程學系所 / 指導老師

