

## 鑽石磨輪對成形砂輪之修整研究

# STUDIES ON DRESSING OF PROFILE GRINDING WHEELS WITH DIAMOND FORM ROLLERS

陳德楨\* 楊宏智\*\*

Der-Jen Chen Hong-Tsu Young

\*博士班研究生 \*\*教授

國立台灣大學機械工程學系

\*Graduate student \*\*Professor

Department of Mechanical Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan 10617, R.O.C.

### Abstract

In this thesis, we present a on-line dressing system of profile grinding wheels with wear compensation. We use a non-contact method of measuring the wear of wheels by capture the images before and after the grinding process, analyze the position deviation of the grinding wheel's edge, then evaluate the grinding wheel wear. In comparison to diamond profile rollers and point diamonds, we use diamond form rollers as our dressing tools for the benefit of low dressing force, short dressing time, more flexibility and extremely wear resistant. The wear of diamond form rollers was also be compensated into the toolpath at the same time and the accuracy is about 0.01 mm. In this study, a series of dressing tests with different setting conditions was carried out to improve the reliability and accuracy ---the results are found as good as expected.

**Keywords:** dressing, grinding wheel, wear, diamond form roller.

### 摘要

本研究針對成形砂輪開發出一套具有磨耗補正功能的線上修整系統，以非接觸式光學影像量測技術，經過修整前後分別取像，分析砂輪邊緣位置變化，來求得砂輪的磨耗量。在修整砂輪時，相較於輪廓鑽石、鑽石頭等刀具，本研究採用低修整力、較省時、較彈性、耐磨耗的鑽石磨輪來進行輪廓修整。本系統並同時檢測出鑽石磨輪刀鼻半徑的磨耗值以直接對修整路徑進行補正，使砂輪的修整精度可達 0.01 mm。此外，為驗證其可行性與精確性而對兩種不同粒度的砂輪在不同的修整條件下進行線上修整測試，目前得到之成果印證十分良好，並具高度實用性。

**關鍵詞：**修整、砂輪、磨耗、鑽石磨輪。

## 1. 前言

在精密磨床應用上，砂輪 (Grinding Wheel) 精度的維持扮演著相當關鍵的角色 [1]，尤其是成形砂輪的磨削加工除了輪面磨粒要銳利外，輪廓形狀的尺寸也要保持精確，如此才能得到規格良好的工件。然而，砂輪在長時間的磨削加工後會產生磨耗 (Wear) 而需經常修整，鑽石修刀 (Diamond Dresser) 也會因磨耗須隨時補正，只是由於檢測技術上的困難與修整設備上的欠缺，致實際上很少應用，尤其砂輪修整程式製作多僅限於圓柱磨床的平面修整，而對成形砂輪的修整則是甚少著墨。

目前用來檢測砂輪磨耗，大都是以音洩法 (Acoustic Emission Testing) [2]，或是功率計及音洩計合併法，觸發探頭 (Touch Probe) 及音洩計合併法，

觸發探頭法，及光學三角探頭法等量取，再經由經驗公式轉為實際的磨耗量。此等間接方法，只能算出大約的磨耗值，且必須將砂輪取下量測，以致進一步造成放置上的幾何誤差。本文所使用的非接觸式磨耗偵測量測系統，直接固定在磨床床頭的兩側上，以 CCD 數位影像技術觀測砂輪之輪廓邊緣，經由影像之攝取，將取得的影像轉成數位灰度值，再透過邊緣檢測法取得砂輪或磨輪的邊緣，並利用對應函數法將像素座標轉換成實際座標計算出尺寸大小，此為直接量測之方法。

在成形砂輪修整方面，本文主要利用裝置在旋轉修整器 (Rotary Dresser) 上的鑽石磨輪 (Diamond Form Roller) 來對砂輪進行修整，鑽石磨輪因厚度薄對不同輪廓形狀修整具較大彈性且有低磨耗、低修整力的優點 [3]，再配合有效的磨耗補正控制可得到良

好的修整精度。最後，本研究針對各種不同的砂輪及修整條件之組合進行測試，並將經修整後之砂輪斷面輪廓及輪磨後之工件表面以三次元量測儀來進行實際量測，且得到了良好的比對結果，因此更確認本修整系統之正確性與可靠性。

### 2. 系統架構

本系統之基本架構，如圖 1 所示。光源的平行光打過砂輪輪廓，透過 CCD (Charge Coupled Device) 攝影機，將其影像攝取並由影像處理卡 (Image Card)，轉換成數位資料，再經系統分析比對處理計算出修整量；系統運作同時加入刀具磨耗補正量一起修正修整個程式再傳送至控制器以驅動床台及修整器進行砂輪修整，各項修整相關細節將在下文中詳述。

至於，修整流程是首先依成形砂輪斷面尺寸製作 NC 程式，再傳輸至磨床對已磨耗的砂輪進行修整，修整完畢接著開始研磨工件，並隨時利用 CCD 數位影像量測設備監控砂輪與磨輪，若達到修整的標準，即開始修整的工作依序循環，如圖 2 所示。

#### 2.1 修整運動

本研究對成形砂輪的修整方法，乃是利用裝置在旋轉修整器上的鑽石磨輪及鑽石頭，來對砂輪輪廓進行修整。旋轉修整器被安置於磨床床台上，其旋轉軸垂直於砂輪的輪軸。在鑽石磨輪接觸砂輪輪廓表面後，即沿著砂輪輪軸以軸向 (Axial Direction)、徑向 (Radial Direction) 運動，再配合旋轉軸的擺動等三軸同動將正確的輪廓形狀修整產生，如圖 3 所示。

#### 2.2 修整策略

砂輪修整分成粗修初胚 (Rough Shaping) 與精修外形 (Finish Shaping) 兩種，操作上以主程式呼叫副程式來進行，主程式控制砂輪之修整與磨耗補正，副程式控制砂輪之修整路徑。修整過程中為避免磨輪與砂輪內、外輪廓發生干涉需隨時修正偏擺角度，在程式規劃時將輪廓上圓弧、直線等圖素予以分割成足夠的線段組合，分割量以線段至弧最大弦高  $M_{cd}$  (Maximum Chordal Deviation) 達到精度要求為判斷標準，如圖 4 所示。

磨輪偏擺角度(姿態)概分三種類型，在均勻接觸方式考量時為免集中磨耗則以磨輪圓鼻接觸角均分原則規劃，僅在徑向 (Z axis) 切深後刀具沿路徑移動，基本上刀具不擺動，每完成一次修整循環 (Pass)，刀鼻與砂輪均勻接觸，磨耗均勻且量小，但實際切深隨接觸位置不同時而有所改變，容易發生過切 (Over-cut) 現象，甚至在垂直轉角處會有燒痕 (Burn Mark) 產生，如圖 5 所示。

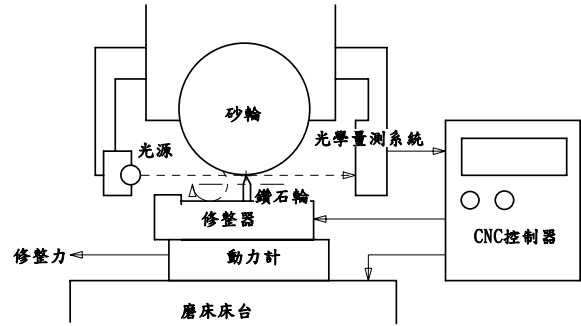


圖 1 砂輪修整架構圖

Fig. 1 Basic setup of the dressing system

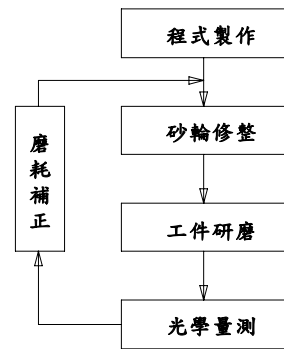


圖 2 修整流程圖

Fig. 2 The flowchart of dressing process

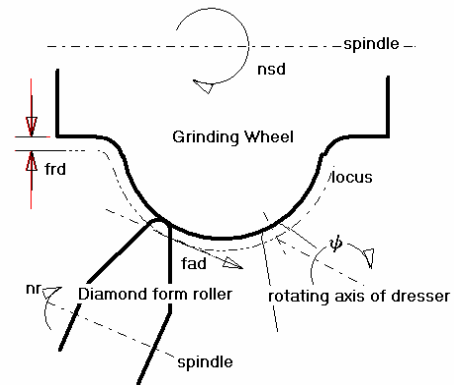


圖 3 修整運動

Fig. 3 Dressing process of profile grinding wheel with diamond form roller

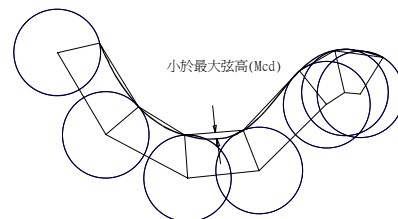


圖 4 圖素分割產生之最大弦高 Mcd

Fig. 4 The maximum chordal deviation of the cut increment

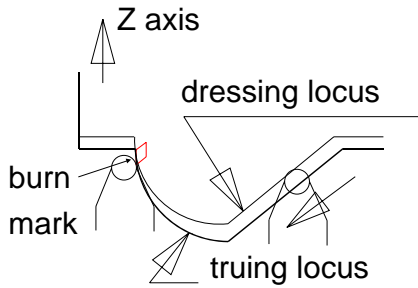


圖 5 均勻接觸

Fig. 5 Uniform contact model

在單點接觸方式時為防止發生過切而以垂直分割線段為之，在徑向 (Z axis) 與軸向 (X axis) 同時切深後刀具沿路徑移動，基本上刀具不斷擺動垂直路徑方向，每完成一次修整循環，接觸集中刀鼻端點，磨耗量大但實際切深保持一定，不隨位置不同時而有改變，十分穩定且不會有過切現象發生，如圖 6 所示。而當磨輪偏擺角度大於接觸點與臨界點形成之最大角即會發生干涉的情形下則採用定角處理。因修整器的旋轉中心在圓鼻中心對過切的影響可降至最低，應盡可能保持與砂輪表面均勻接觸避免過度集中單點磨耗，以提高刀具使用壽命。

粗修時路徑之規劃與車、銑床加工不同，粗修採用由中間向左右分修之作法，以自動循環來簡化刀具路徑，可以節省時間並能避免受到修整機構外部干涉的影響，如圖 7 所示。

精修時的路徑規劃以砂輪左、右兩側選定一高點為起使點，再分單向進行循環修整，圖 8 所示，如此可避免因修整器上齒隙的影響。若齒隙甚小則可利用雙向往復修整，如此更可提升效率、降低成本。

### 2.3 光學量測

利用 CCD 攝影機，將砂輪影像轉換成類比的 RS-170 訊號，傳輸送到插在電腦插槽上的影像處理卡，轉換成數位式的訊號，同時再輸出類比訊號到監視器 (Monitor)，由螢幕上判斷 CCD 所照的範圍是否為所需的部份，影像大小是否適當，聚焦是否完成及之前所進行的處理是否正確 (圖 9 所示為光學影像量測系統)。影像經數位化後，資料是許多像素 (pixel) 所組成，其亮度的灰度值各代表砂輪表面某特定點特定的座標，灰度值急遽變化的部分即為砂輪邊緣，經過二值化處理與 Look-Up Tables (LUT) [4] 轉換之後，再利用最小平方法 (Least Square Method) 來求其迴歸直線、迴歸圓的方程式。

### 2.4 磨耗補正

在一般的切削加工中要得到良好的加工精度，除了要給予正確的加工路徑與加工條件外還要能進行

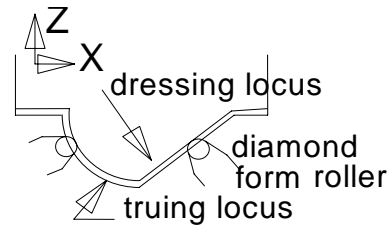


圖 6 單點接觸

Fig. 6 Normal contact model

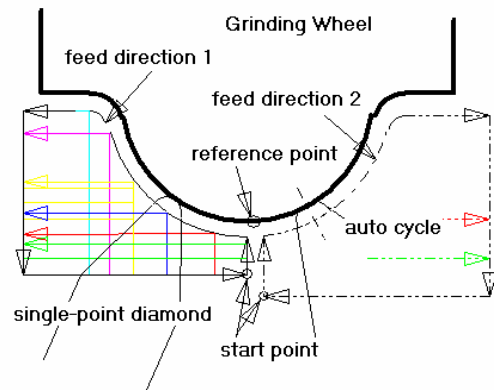


圖 7 粗修路徑圖

Fig. 7 Rough shaping operation

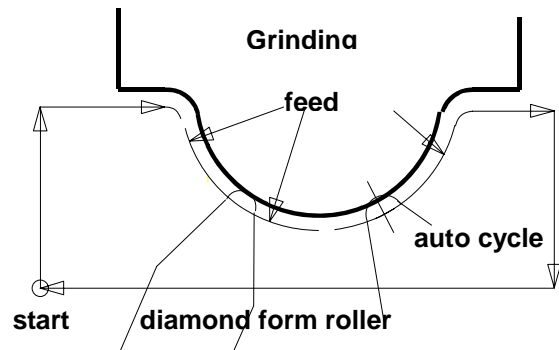


圖 8 精修路徑圖

Fig. 8 Finish shaping operation

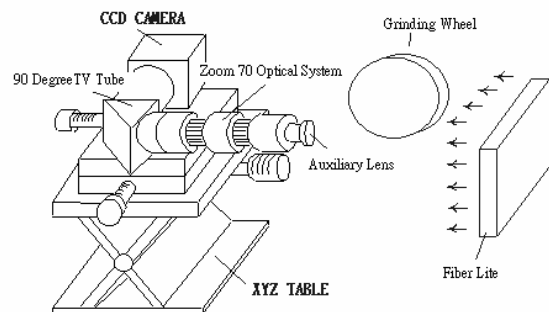


圖 9 光學影像量測系統

Fig. 9 The optical measuring system

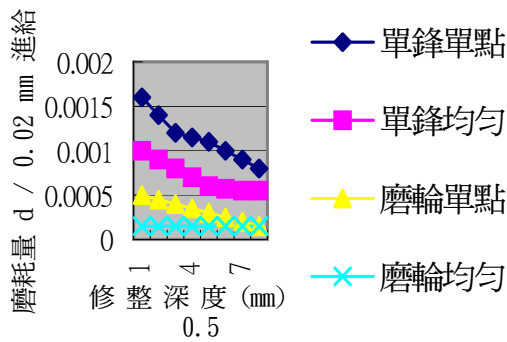


圖 10 磨耗量補正值

Fig. 10 The value of wear compensation

刀具補正，否則就會產生過切的問題，無法得到正確的尺寸，這也是傳統式的磨床無法被進一步推廣的主要原因之一。

砂輪如同車、銑刀需要進行位置與刀鼻半徑的補正，位置補正的做法與觀念無太大差異，但刀鼻半徑的補正因本身易於磨耗需時時檢測其半徑變化值並及時補正才是大問題。本研究為有效解決此問題採用刀鼻半徑與磨耗補正同時進行的方式，一方面透過磨耗資料庫的建立取得磨輪修整時的磨耗變化量，另一方面及時線上 CCD 量測出刀鼻半徑值，隨動作補正到每次修整路徑中。圖 10 所示，是以刀鼻半徑  $r_p = 0.5 \text{ mm}$  之鑽石頭 (Single Diamond Point) 與鑽石磨輪在進刀量  $f_{rd} = 0.02 \text{ mm}$  下對 WA120K8V 砂輪，以單點磨耗和均勻磨耗兩種接觸方式經實際磨耗實驗量測所得磨耗量數據，而其他進刀量如  $f_{rd} = 0.01 \text{ mm}$ ， $0.005 \text{ mm}$  等的磨耗量數據均被存在磨耗資料庫以提供修整時磨耗補正之引用。

### 3. 光學量測理論

#### 3.1 取影

本系統選用 Optem 的 Zoom 70 鏡頭，再配合一個 0.5X 的輔助物鏡來擷取影像，最高放大倍率是  $2.4 \text{ mm} \times 1.8 \text{ mm}$ ，而所使用的影像捕捉卡的空間解析能力為  $640 \times 480$ ，理論上本系統所能達到之最高的空間解析度為：

$$dX = 2.4 \times 1000 / 640 = 3.75 (\mu\text{m})$$

$$dY = 1.8 \times 1000 / 640 = 3.75 (\mu\text{m})$$

本系統再透過 subpixel 的軟體處理可得到最小解析度為  $0.375 \mu\text{m}$ 。

#### 3.2 尋邊

影像經數位化後，得到每個像素 (Pixel) 的灰度

值 (Gray Level) 對應於所攝物體表面某一點。灰度值的大小由物體表面對應點之亮度來決定，其值以 8 個位元來表示，由 0 (黑) 變化到 255 (白)。值越大，表示此點越亮。本系統採用二值化 (Binarization) 的影像處理方法，將灰階影像轉換為二值影像，藉著自動閾值的選取，將砂輪及背景部分分離，以便取得砂輪邊緣的位置。二值化將灰度值不到某臨界值的畫素訂為 0 (全黑)；大於或等於某臨界值的畫素訂為 255 (全白)，此臨界值稱為閾值 (Threshold)。在數學上，二值化影像處理可表示為：

$$P(g_q) = \begin{cases} 0 & g_q < t \\ 255 & g_q \geq t \end{cases} \quad (1)$$

其中， $t$  即代表閾值、 $g_q$  代表任意一點  $q$  的灰度值、 $P$  代表一種點運算 (Point Operation)，此種方法會因閾值 (Threshold Value) 不同而有極大差異，因此本系統選用衝量保持法 (Momentum-Preserving Principle) [4] 來取得最佳閾值，再將其代入 LUT 轉換函數中，在本系統中，則利用如 (2) 的轉換，以達到二值化的目的：

$$g(x) = f(x) - \left[ \frac{f(x)}{255} \right] \times 255$$

$$\text{where } f(x) = a + \frac{x}{10} \quad x = 0 \sim 255 \quad (2)$$

其中  $x$  代表輸入的灰度值， $g(x)$  代表經過 LUT 轉換後的灰度值， $[\ ]$  為高斯函數， $[f(x)/255]$  定義為不大於  $f(x)/255$  的最大整數， $a$  則是閾值大小的控制參數，在此若設定  $a$  值為 245，則得到閾值為 100。這種尋邊方式只需經過一次 LUT 轉換、一次邏輯判斷即可找出邊緣位置，而不需要在軟體中作大量的數值運算處理。

#### 3.3 轉換

利用 CCD 攝影機來決定物體影像的座標，必須先對會造成誤差的相關變數 [5] 予以校正。但因程式運算太費時間不符合需求，再者須使用雷射干涉儀來校驗相當不便。本系統改以不直接求出相關變數來對影像上每一像素之座標做補償，而直接找出量測平面的空間座標與 CCD 攝影機像平面的影像座標之間的關係，即所謂「對應函數法 (Mapping Function Method)」[6]。選取空間中已知距離之特徵點 (本系統之特徵點為標準 MASK 上各方塊之四角)，經由 CCD 攝影機擷取其影像，這些特徵點在 CCD 攝影機上會有其各別相對應的影像。若可以找出兩者間之關係，

並能正確補齊空白資料點部份所對映之數值，如此再配合次像素分割技巧，即可精確計算出兩影像座標點間的距離了。

### 3.4 校正

本系統量測一以蝕刻法做出精度達  $1\mu\text{m}$  的光罩標準試片，如圖 11 所示。試片上各方格的四個角落點即為我們所設定的特徵點，在依設定的特徵點的空間座標和所求得之影像座標，以二次函數進行最小迴歸分析，我們即可得到所需之對映函式(即比例尺)。

在此所應用之二次函數形式如下：

$$x = a_1u^2 + b_1uv + c_1v^2 + d_1u + e_1v + f_1 \quad (3)$$

$$y = a_2u^2 + b_2uv + c_2v^2 + d_2u + e_2v + f_2 \quad (4)$$

$(x, y)$ ：空間座標 ( $\mu\text{m}$ )

$(u, v)$ ：相對應之影像座標 (pixel)

經由實際校正，可得係數為：

$$\begin{aligned} a_1 &= 0.00000, & a_2 &= 0.00000 \\ b_1 &= 0.00000, & b_2 &= 0.00000 \\ c_1 &= 0.00001, & c_2 &= 0.00001 \\ d_1 &= 3.75139, & d_2 &= 0.03368 \\ e_1 &= -0.03506, & e_2 &= 3.66189 \\ f_1 &= -313.57671, & f_2 &= -158.32445 \end{aligned}$$

### 3.5 直線與圓的計算

在本系統中，因成形砂輪的輪廓形狀是由直線及圓所構成，當我們判斷出影像的邊緣後，必須將這些點群與原始的資料相比對去 fit 成一直線或是一圓，並利用最小平方方法 (least square method) 來求其迴歸直線、迴歸圓的方程式。

本系統求迴歸直線採用 Using Distance from Each Point to Fitted Line 的方法，在一組資料中找出資料重心的座標和通過此重心座標的直線和  $x$  軸相交的角度大小。直線的方程式如下：

$$(y - y_0) \cos \theta - (x - x_0) \sin \theta = 0 \quad (5)$$

$$y_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = y_m \quad (6)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{2I_{xy}}{I_y - I_x} \right) \quad (7)$$

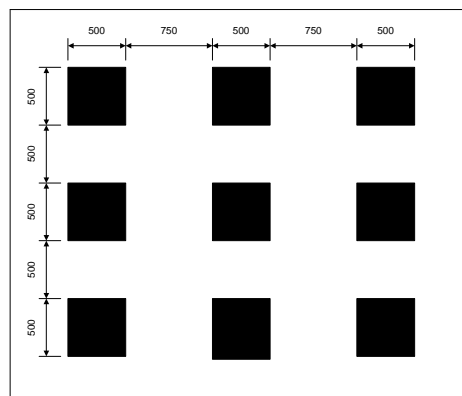


圖 11 校正用 MASK 尺寸圖

Fig. 11 The mask dimension for calibration

其中  $y_0 = y_m$  為資料點在  $y$  軸方向的重心，而  $\theta$  則為此直線和  $x$  軸的夾角，當  $I_y = I_x$  時，表示直線和  $x$  軸的夾角為  $45$  度。求迴歸圓時本系統採用真圓度最小平方圓的方法。圓的方程式如下：

其目標函式  $S$

$$S = \sum \delta_i^2 = \sum (x_i^2 + y_i^2 + Ax_i + By_i + C)^2 \quad (8)$$

令目標函式  $S$  值為最小

$$x^2 + y^2 + Ax + By + C = 0 \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i \\ \sum x_i & \sum y_i & \sum 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sum x_i (x_i^2 + y_i^2) \\ -\sum y_i (x_i^2 + y_i^2) \\ -\sum (x_i^2 + y_i^2) \end{bmatrix} \quad (10)$$

解出常數  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 。便可得到最小平方圓的方程式。

## 4. 試驗結果與討論

本研究試驗目的是要確認整個成形砂輪修整系統之可行性與精確度，而以兩種磨粒大小的砂輪 (WA120K8V, GC90U9V) 在修整量  $0.02\text{mm}$ /次，進給速度  $250\text{mm}/\text{min}$  條件下來進行試驗，利用鑽石磨輪、鑽石頭兩種修整刀具在不同的加工條件下進行包含距離、角度、半徑等輪廓尺寸精度的測試，其修整結果並經光學量測、三次元量測來進行比對驗證。

砂輪 (WA120K8V) 經鑽石磨輪修整後之光學量測與三次元量測半徑誤差值約  $0.01\text{mm}$ ，角度誤差值約  $0.08$  度，寬度誤差值約  $0.01\text{mm}$ ；鑽石頭之誤差值約  $0.012\text{mm}$ 。角度誤差值  $0.02$  度、寬度誤差值  $0.02\text{mm}$ ，如表 1~3 所示。鑽石磨輪修整誤差較鑽石頭小是較佳選擇，光學量測如改善現場光源不足不易對焦影響其量測值將更接近三次元量測值。

表 1 輪廓量測值 (半徑  $r = 4\text{mm}$  圓弧)

Table 1 The measured results of profile grinding wheel dimensions radius ( $r = 4\text{mm}$ ) measurement

鑽石磨輪		鑽石頭	
光學量測值	三次元量測值	光學量測值	三次元量測值
4.013	4.001	4.000	4.003
4.015	3.995	4.002	4.012
4.010	4.001	4.011	3.974
4.021	4.011	4.016	4.007
4.015	4.012	4.013	3.982

表 2 輪廓量測值 (角度  $\alpha = 30$  度)

Table 2 The measured results of profile grinding wheel dimensions angle ( $\alpha = 30$  degree) measurement

鑽石磨輪		鑽石頭	
光學量測值	三次元量測值	光學量測值	三次元量測值
29.922	29.941	29.663	29.733
29.940	30.002	29.728	29.914

表 3 輪廓量測值 (寬度  $w = 13\text{mm}$ )

Table 3 The measured results of profile grinding wheel dimensions width ( $w = 13\text{mm}$ ) measurement

鑽石磨輪		鑽石頭	
光學量測值	三次元量測值	光學量測值	三次元量測值
12.999	12.986	13.010	12.997
13.001	13.000	12.983	12.981

對不同粒度的砂輪 (A#120, B#90) 而言, 不論是經過鑽石頭或鑽石磨輪修整後, 其在光學量測、三次元量床量測所得結果十分吻合, 如表 4 所示, 誤差值均在  $0.005 \sim 0.010 \text{ mm}$ 。粒度較小的 B 砂輪因表面顆粒較粗大而光學量測值較大。

修整時在不同的進給速度與速度比的情況下, 研磨工件表面粗糙度的變化, 如圖 12 所示。在速度比由 0 向 +1 接近時即砂輪表面近似於撕裂 (crushing) 形態式修整時, 表面粗糙度變的最大, 應避免在此條件下進行修整。進一步可觀察得到在 A、B 兩種不同參數組合下, 也可得到相同的表面粗糙值。

其次, 磨輪刀鼻半徑  $r_p$  越大時表面粗糙值越小。修整參數、刀鼻半徑對垂直修整力的影響如圖 13 所示, 在較小的進給速度 (fad) 下, 速度比 (qd) 對垂直修整力 (Fn) 的影響不大, 但在較大的進給速度 (fad) 下, 速度比 (qd) 變大時垂直修整力會快速增大。磨輪磨耗沒有一定模式, 本文透過試磨耗資料庫以供線上補正的時取用。即因應各種不同的修整器、

表 4 不同粒度砂輪修整之圓弧半徑量測值比較

Table 4 A comparison of profile radius under dressing with different grades of wheels

修整器	光學量測值		三次元量測值	
	鑽石頭	鑽石磨輪	鑽石頭	鑽石磨輪
A(WA120K8V)	4.005	4.011	4.009	4.005
B(GC90U9V)	4.010	4.013	4.010	4.003

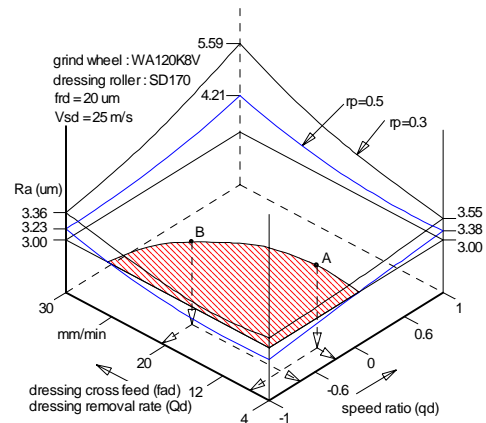


圖 12 進給速度、速度比與表面粗糙度的關係

Fig. 12 Qualitative relation between dressing cross feed, speed ratio and roughness

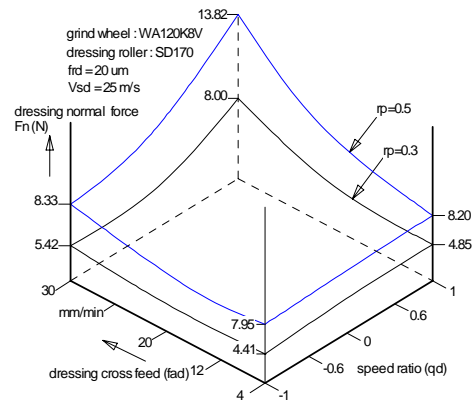


圖 13 進給速度、速度比與垂直修整力的關係

Fig. 13 Qualitative relation between dressing cross feed, speed ratio and normal dressing force

表 5 磨輪磨耗補正前、後之圓弧半徑量測值比較

Table 5 A comparison of profile radius under dressing with or without wear compensation

修整器	未執行磨耗補正		已執行磨耗補正	
	鑽石頭	鑽石磨輪	鑽石頭	鑽石磨輪
A(WA120K8V)	4.025	4.022	4.005	4.011
B(GC90U9V)	4.062	4.045	4.011	4.013

砂輪及修整條件之組合，以磨耗測試經光學量測出結果構建而成。磨耗補正納入主程式之前與後，其輪廓半徑可由 4.025mm 改善至 4.005mm，因而大大提升相關尺寸精度，如表 5 所示。刀具磨耗量由 CCD 直接量測的結果 (圖 10)，鑽石磨輪單點磨耗的磨耗曲線呈線性關係，均勻磨耗的磨耗曲線呈一常數，此關係直接建於補正程式中方便操作者使用 (一般砂輪修整進刀量少於 0.02mm)，有利於此修整系統的商品化。

## 5. 結 論

本研究發展一套線上非接觸式光學量測之方法有效的應用在成形砂輪修整上，經輪廓角度、寬度、半徑等尺寸的測試、比對到驗證，其誤差在 5~10 $\mu$ m 以內，初步結果令人滿意。本系統量測時不須拆卸砂輪沒有放置上的幾何誤差且使用簡便，其對精度與效率提升上均有所助益。執行磨耗補正前、後的尺寸量測值顯示圓弧半徑精確度由 0.03mm 改善到 0.01mm，不論是鑽石頭或鑽石磨輪均有此結果，且對不同粒度的砂輪 (A#120, B#90) 亦無影響。可見本系統所發展修整器之線上磨耗補正確實發揮效用。

不同的修整參數設定也可以得到良好的表面粗糙度，避免在過大的速度比下採用大的進給速度可降低修整力而得到好的修整結果。修整磨耗資料庫的建立則是因應各種不同的修整器、砂輪及修整條件之組合，以磨耗測試經光學量測出結果構建而成。本資料庫構建容易且與實際磨耗情況吻合，透過操作介面使

用者十分容易選用，因此適合工業界之應用。但砂輪及修整器規格甚複雜，廣泛性的應用實施之前則有待更進一步的探討。

## 參考文獻

- [1] Anon, *Grinding Wheels and Grind Wheel Dressing*, Springfield. Valntis-National Technical Information Service, 1994.
- [2] I. Inasaki, "Monitoring of dressing and grinding process with acoustic emission signals," *Annals of the CIRP*, Vol. 34, No. 1, 1985, pp. 277-280.
- [3] E. Salje and H. G. Mackensen, "Dressing of conventional and CBN grinding wheels with diamond form Rollers," *Annals of the CIRP*, Vol. 33, No. 1, 1984, pp. 205-209.
- [4] Y. T. Roger, "An efficient and accurate camera technique for 3D machine vision," *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1986, pp. 364-374.
- [5] A. Tabatabai, "Edge location and data compression for digital image," Ph.D. dissertation, School of Elect. Engrg., Purdue University, 1981.
- [6] Y. T. Roger, "A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the shelf TV cameras and lenses," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. 3, No. 4, Aug. 1987, pp. 323-344.



陳德楨 (Der-Jen Chen) 民國 78 年獲得台灣科技大學機械工程研究所碩士。目前是楊宏智教授博士班學生。



**楊宏智 (Hong-Tsu Young)** 台大機械系教授，民國 66 年畢業於台大機械系，民國 75 年獲得澳洲新南威爾斯大學 (UNSW) 製造暨機械工程博士，曾任電廠設計顧問工程師，目前研究興趣在硬脆性晶圓加工、金屬切削分析及加工自動化等方向。

---

收稿日期 93 年 1 月 8 日、修訂日期 93 年 5 月 6 日、接受日期 93 年 5 月 18 日  
Manuscript received January 8, 2004, revised May 6, 2004, accepted May 18, 2004