

21. 鋸片成形銑刀之三維檢測系統

林瑞璋 教授、邱世豐 虎尾科技大學 機械設計工程學系
王永成 助理教授 雲林科技大學 機械系

摘要

隨者工業科技的發展以及高速自動化生產技術的進步，在兼顧快速生產與品質保證的原則之下，藉由自動化檢測系統之輔助，將對檢測效益、品質提升與成本降低有相當大影響。

本系統利用數位影像處理原理與幾何量測原理建構一台鋸片成形銑刀參數之動態量測系統，用來量測鋸片成形銑刀的齒頂半徑、工作高度、全齒高度、壓力角、齒距等多項檢測功能，作為鋸條刀具加工前之控管依據。研究成果顯示，「鋸片成形銑刀參數之動態量測系統」速度快，穩定性及準確度高，可將所擷取的鋸片成形銑刀影像作尺寸參數量測。

這樣既耗時沒效率，且含有人工檢測誤差，會造成產品的品質、效率降低。

本系統的目的是利用幾何量測原理與數位影像處理技術，搭配CCD、LED背光板、伺服馬達旋轉軸與X-Y雙軸向移動平台，開發「鋸片成形銑刀之三維檢測系統」。採用自動抓取鋸片成形銑刀影像量測座標資料，降低人為操作之誤差。透過自行規劃之影像量測軟體，取得之座標點資料，進行鋸片成形銑刀尺寸參數量測。其功能可用來檢測鋸片成形銑刀的齒頂半徑、工作高度、全齒高度、壓力角、齒距等多項檢測功能，並且有明確的數據作為鋸片成形銑刀加工機修正誤差之依據，也使檢驗速度加快，且可藉由電腦自動判斷，進行分類，以提升產品的品質、良率。

1. 前言

在講求快速生產之時代，高生產力及品質佳兩者兼顧為加工與成形工廠中重要的課題。而要考慮此兩方面之提昇，就必須正確地掌握住檢驗及生產方式。

由於目前市面上雖有刀具的檢測產品，但並無專門為鋸片成形刀具開發的自動化檢測相關產品，因而無法提供鋸片成形銑刀加工機修正誤差之量化數據。一般傳統工業是採用投影機觀察鋸片成形銑刀滾製出之鋸條刀具是否有符合所需尺寸，再經由鋸條刀具尺寸對鋸片成形銑刀進行尺寸研磨修整。此方法在夾角與各部份尺寸容易造成量測視覺上之誤差，對於產品檢驗速度有所限制，無法有效率的對產品進行全面檢測，且由於鋸片齒數多、齒型小、生產量又龐大，若以檢驗人員每一齒做視覺量測，不僅耗時費力，其中亦頗多依賴檢驗人員的判定，因此檢驗出來的結果可能忽略了瑕疵處，

2. 量測原理

2.1 影像處理

本系統之影像量測，經由CCD與影像擷取卡所擷取灰階影像。若像素(pixel)的灰階值以一個byte儲存，其灰階值分佈於0~255之間。於影像判別時，灰階影像以區域分列，其每個區域是由灰階值相接近的像素所組成。當相鄰像素的灰階值產生明顯的差異時，可能為影像中待測部位與背景的臨界位置。因此可利用臨界處灰階值差異性大的特質，分離出待測部位與背景，再對待測部位影像做後續影像處理。

2.1.1 二值化處理

二值化(thresholding)處理是一種重要的影像切割方法，其方法可用於區分出影像中待測部位與背景，定義如(1)式：

$$f_T(x,y) = \begin{cases} 255 & \text{if } f(x,y) > T_0 \\ 0 & \text{if } f(x,y) \leq T_0 \end{cases} \quad (1)$$

在上式中，假設座落在座標值(x,y)的像素點，其灰階影像為f(x,y)，且灰階值分佈在0~255之間的範圍，並設定一個臨界值(T₀)，當影像中任一點灰階值大於或等於臨界值時，其灰階值為255，反之，小於值時為0，這樣即可將灰階影像轉換成只有黑跟白兩色的二值化影像，式中f_T為二值化後的影像灰階值。

臨界值(Threshold)亦稱為閾值，閾值可經由統計式門檻值決定法(Otsu's Method)來取得。如圖1統計直方圖所示，Otsu統計式門檻值決定法主要是在找一個二值化之最佳臨界值(K)，使待測物與背景影像兩族群之灰階變異數加權總和σ_ω²為最小，其處理流程如下：

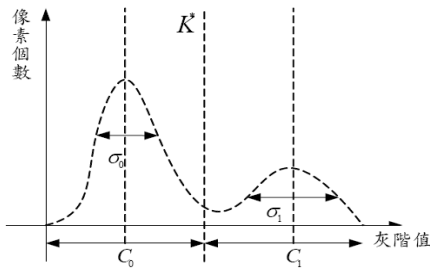


圖1 統計直方圖

假設影像中有L個灰階度，n_i代表灰階值為i之像素點個數，其影像中像素點總和為 N = n₁ + n₂ + + n_L，則影像中每個灰階度的發生機率可表示為(1)式：

$$P_i = n_i / N \quad (1)$$

設定灰階門檻值為K，此門檻值將影像分為C₀與C₁兩個群集，C₀代表灰階度1~K的群集，C₁代表灰階度K+1~L的群集。則C₀像素個數佔的比率ω₀為(2)式：

$$\omega_0 = \sum_{i=1}^K P_i \quad (2)$$

而C₁像素個數佔的比率ω₁，其與ω₀滿足ω₀ + ω₁ = 1，因此ω₁可寫成(3)式：

$$\omega_1 = \sum_{i=K+1}^L P_i = 1 - \omega_0 \quad (3)$$

當有了C₀與C₁的像素個數佔的比率之後，可得到C₀與C₁的期望值μ₀與μ₁，其公式如(4)、(5)所示：

$$\mu_0 = \sum_{i=1}^K (i \times P_i) / \omega_0 \quad (4)$$

$$\mu_1 = \sum_{i=K+1}^L (i \times P_i) / \omega_1 \quad (5)$$

利用μ與μ₁，可以算出C₀與C₁的變異數σ₀²、σ₁²為(6)、(7)式：

$$\sigma_0^2 = \sum_{i=1}^K (i - \mu_0)^2 \times P_i / \omega_0 \quad (6)$$

$$\sigma_1^2 = \sum_{i=K+1}^L (i - \mu_1)^2 \times P_i / \omega_1 \quad (7)$$

將C₀的變異數加上的C₁變異數，其和σ_ω²為(8)式：

$$\sigma_\omega^2 = \omega_0 \sigma_0^2 + \omega_1 \sigma_1^2 \quad (8)$$

即C₀與C₁之間的變異數σ_B²可表示為(9)式：

$$\sigma_B^2 = \omega_0 (\mu_0 - \mu_K)^2 + \omega_1 (\mu_1 - \mu_K)^2 \quad (9)$$

在此μ_K代表整個原始影像的平均值，表示為(10)式：

$$\mu_K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^L (i \times n_i) \quad (10)$$

σ_ω²、σ_B²和σ_K²之間有(11)式的關係：

$$\sigma_\omega^2 + \sigma_B^2 = \sigma_K^2 \quad (11)$$

此處σ_K²是原始影像的變異數為一定值，所以C₀和C₁之間變異數最大化問題，等於其變異數和最小化問題，故只要將灰階值0~255依序帶入上述式子中，以求得每個灰階值的σ_ω²，再從最小的σ_ω²找出其對應的灰階值K，即為最佳的臨界值。圖2、圖3、圖4為鋸條刀具灰階影像經由濾波、選擇臨界值而轉換成二值化影像。

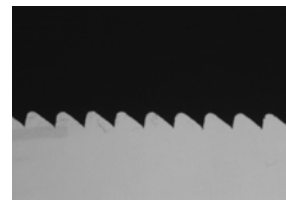


圖2 鋸條刀具灰階影像

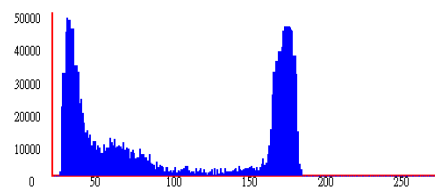


圖3 鋸條刀具灰階影像統計直方圖



圖4 鋸條刀具二值化影像

2.1.2 影像濾波器

設計影像濾波器的主要目的，在於影像濾波的過程中除了要能將雜訊移除，還能保持影像原來的結構與細節的部分。現今已發展出許多方法來消除影像中的雜訊且改善影像的品質，如中值濾波器 (median filter)、向量中值濾波器(vector median filter)和向量方向濾波器(vector directional filter)等。其中，中值濾波器為最常被使用的影像濾波器，其方法是以一個固定大小的視窗 $W(N \times N)$ 掃描整張影像的每一個像素，再將視窗中的每一個像素值做排列，並以這些排列過後像素值的中位數為結果的輸出，以取代原來的像素值，詳見圖5的處理步驟：

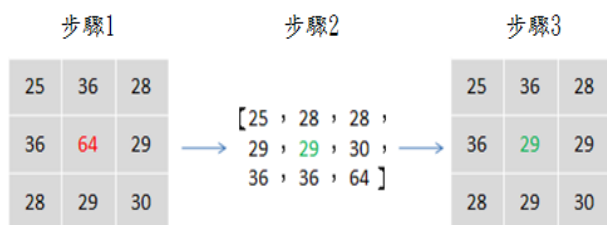


圖5 中值濾波器處理步驟

以 3×3 視窗為例，在圖5的步驟1中，原來的像素值為64，經由中值濾波器由小到大重新排列後，得到步驟2的順序排列(25, 28, 28, 29, 29, 30, 36, 36, 64)，排列之中位數29即為中值，再以中值29取代原來的像素值64，如步驟3，這樣藉由中值取代像素值的方法，以達到清除雜訊的功能，這個過程就稱之為中值濾波。

2.2 光源分析

照明是影響影像量測系統輸入的重要因素，它直接影響輸入數據的質量和應用效果，照明系統按其照射方法可分為：背向照明、前向照明、結構光和頻閃光照明等。其中，背向照明是待測物放在光源與相機之間，如圖6所示。此法能對待測物的輪

廓、外型產生極高的對比效果，適用於測量物體尺寸、定位。

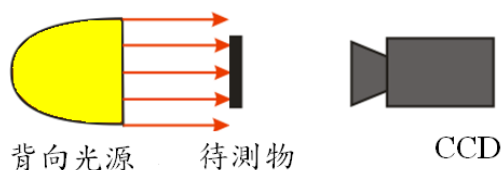


圖6 背向照明

2.3 鋸片成形銑刀參數量測原理

鋸條成形銑刀專用於滾製鋸條刀具，其與滾齒刀一樣，也分為刀身、刃齒、刀軸孔等三個主要部分。圖7為刀身與刀軸孔示意圖，刀身為鋸條成形銑刀本體，刃齒附在本體上，含有螺旋角與導程角，刀軸孔是使鋸條成形銑刀安裝於成形銑刀機主軸。圖8為刃齒示意圖，包括刃齒厚度、全齒高、齒頂高、齒工作高、齒頂半徑、壓力角、直線部分等等。

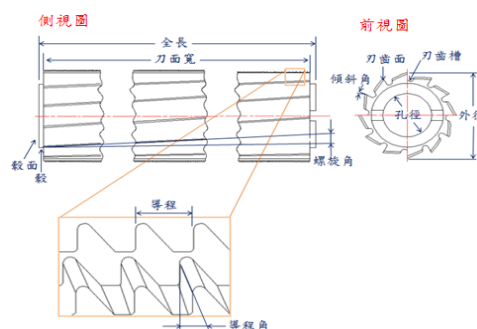


圖7 刀身與刀軸孔示意圖

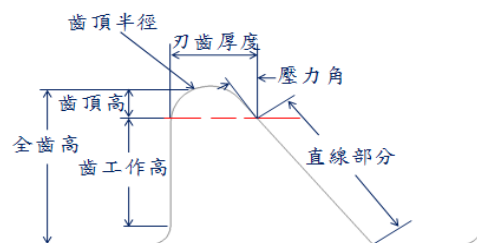


圖8 刃齒示意圖

2.3.1 刀具角度誤差分析與量測平台架設

由圖7可發現，鋸條成形銑刀含有傾斜角、導程角與螺旋角三個角度，因此必須對三個角度進行角度誤差分析，再分別對三個角度進行量測平台架設，以量測鋸片成形銑刀參數尺寸。

首先，傾斜角由於每一齒相差角度相同，且含有累積角度，因此，傾斜角之角度誤差可以利用控制伺服馬達轉動鋸片成形銑刀來達到角度補正之目的。導程角對於全部的齒來說，其不含有累積角度，第一齒至最後一齒導程角依然都是相同的角度，將 CCD 攝影機偏擺並固定一個與導程角相同之角度，控制伺服馬達驅動移動平台即可補正導程角。最後，由於螺旋角為空間角度，需計算出螺旋線對於影像投影面造成之誤差量，圖 9 為附屬在鋸片成形銑刀上之螺旋曲面，其投影至平面示意圖為圖 10，利用公式(12)即可算出誤差量。表 1 為刀具角度誤差分析整理表。



圖9 鋸齒螺旋曲面

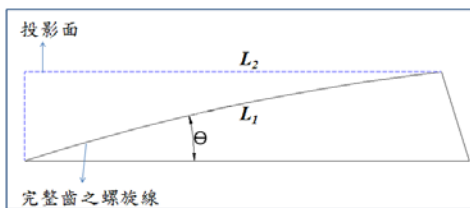

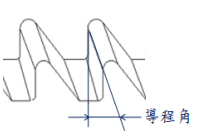
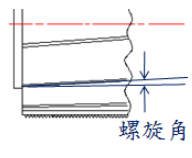


圖10 鋸齒螺旋曲面投影至平面示意圖

$$E(\theta) = L_1 - L_1 \cos \theta \quad (12)$$

表 1 刀具角度誤差分析整理表

角度	示意圖	角度誤差分析
傾斜角		說明：每齒相差角度相同，含有累積角度。 解決：控制旋轉軸馬達，轉動刀具。
導程角		說明：每齒角度相同，不含有累積角度。 解決：控制移動平台，將 CCD 偏擺與固定一與導程角相同之角度。

螺旋角		說明：螺旋角為空間角度 解決：需計算出螺旋曲線對於影像投影造成之誤差。
-----	--	--

因此，本系統鋸片成形銑刀之量測方式為每次只針對一齒量測。量完一齒後，旋轉軸伺服馬達、移動平台馬達同步驅動，再對下一齒進行量測，其架構如圖 11 所示。

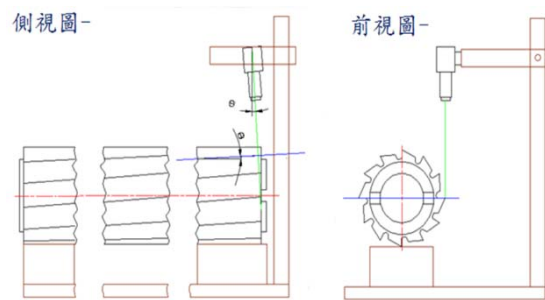


圖11 量測架構示意圖

2.3.1 鋸片成形銑刀之齒頂半徑量測

利用單一閾值運算與Otsu演算法對鋸條成形銑刀影像做影像處理，再使用最小平方近似圓法求出齒頂半徑，以下為最小平方近似圓法之理論：

已知一般圓之方程式如(13)式，在任一量測點之誤差可表示為(14)式，而平方和誤差寫成(15)式：

$$X^2 + Y^2 + aX + bY + c = 0 \quad (13)$$

$$E_i = X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c \quad (14)$$

$$E = \sum_{i=1}^n E_i^2 \quad (15)$$

分別對係數a、b、c一次偏微分等於零，可得：

$$\frac{\partial E}{\partial a} = \sum_{i=1}^n 2(X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c)(X_i) = 0$$

$$\frac{\partial E}{\partial b} = \sum_{i=1}^n 2(X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c)(Y_i) = 0$$

$$\frac{\partial E}{\partial c} = \sum_{i=1}^n 2(X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c)(1) = 0$$

其矩陣形式為(16)式：

$$\begin{bmatrix} \sum X_i^2 & \sum X_i Y_i & \sum X_i \\ \sum X_i Y_i & \sum Y_i^2 & \sum Y_i \\ \sum X_i & \sum Y_i & \sum 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sum (X_i^2 + Y_i^2) X_i \\ -\sum (X_i^2 + Y_i^2) Y_i \\ -\sum (X_i^2 + Y_i^2) \end{bmatrix} \quad (16)$$

將鋸齒之曲線上1到n點的座標點 $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ 代入(16)式，如圖12，利用克拉瑪公式，求得a、b、c係數值。代入公式(17)、(18)式，可求得圓心o齒頂半徑r：

$$o = \left(-\frac{a}{2}, -\frac{b}{2}\right) \quad (17)$$

$$r = \frac{\sqrt{a^2 + b^2 - 4c}}{2} \quad (18)$$

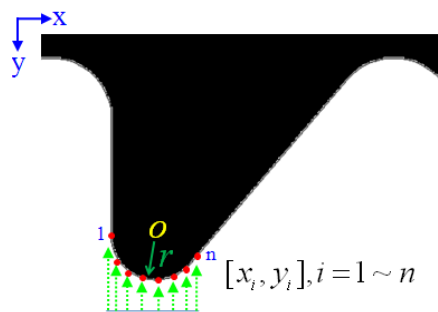


圖12 鋸片成形銑刀之齒頂半徑量測

2.3.2 鋸片成形銑刀之工作高度量測

利用單一閾值運算與Otsu演算法對鋸條成形銑刀影像做影像處理，由最小平方近似圓法求得齒頂半徑r與圓心座標(a,b)，此時工作高度等於齒頂直徑，如圖13所示，利用公式(19)即可求出工作高度。

$$h = 2r \quad (19)$$

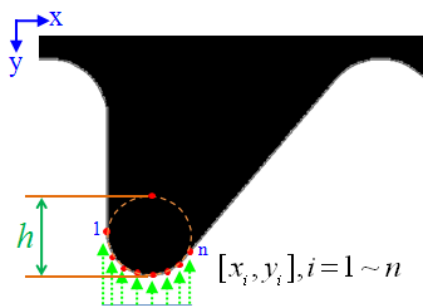


圖13 鋸片成形銑刀之工作高度量測

2.3.3 鋸片成形銑刀之全齒高度量測

利用單一閾值運算與Otsu演算法對鋸條成形銑刀影像做影像處理，如圖14所示，將輪廓a與b之齒頂圓與齒根圓之(x,y)座標點帶入最小平方近似圓法公式求得齒頂半徑與齒根半徑，由齒頂半徑與齒根半徑反推齒頂座標D與齒根座標F，如公式(20)、(21)，將齒頂座標與齒根座標之y座標相減即可得到全齒高度，如公式(22)。

$$D = \left[-\frac{a_1}{2}, -\left(\frac{b_1}{2} + r_1\right)\right] \quad (20)$$

$$F = \left[-\frac{a_2}{2}, -\left(\frac{b_2}{2} - r_2\right)\right] \quad (21)$$

$$H = D_y - F_y \quad (22)$$

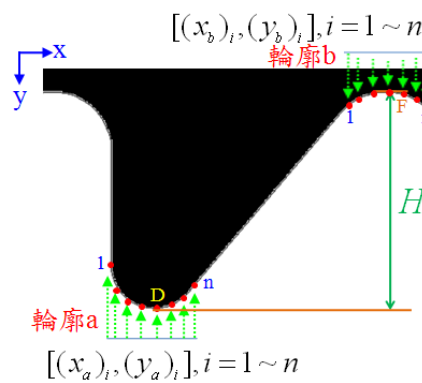


圖14 鋸片成形銑刀之全齒高度量測

2.3.4 鋸片成形銑刀之壓力角量測

利用單一閾值運算與Otsu演算法對鋸條成形銑刀影像做影像處理，採用最小平方法求出斜線方程式，再取反正切函數求得壓力角，以下為最小平方法之理論：

令斜線方程式如(23)式，其最小平方合法寫成(24)式，將鋸齒斜線上所有的座標點 $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ 代入(24)式，分別對(24)式之a、b變數偏微分並令其為零。解其聯立方程式，可求得a、b係數值，如(25)式。

$$f(x) = ax + b \quad (23)$$

$$F = \sum_{i=1}^n (f(x_i) - y_i)^2 = \sum_{i=1}^n (ax_i + b - y_i)^2 \quad (24)$$

$$\hat{a} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (25)$$

$$\hat{b} = \bar{y} - \hat{a}\bar{x}$$

將a、b兩係數代回(23)式，可求得鋸齒斜線方程式，其中a為斜線方程式之斜率，對其取反正切函數，如(26)式，即可求得壓力角 θ ，如圖15所示。

$$\theta = \tan^{-1} a \quad (26)$$

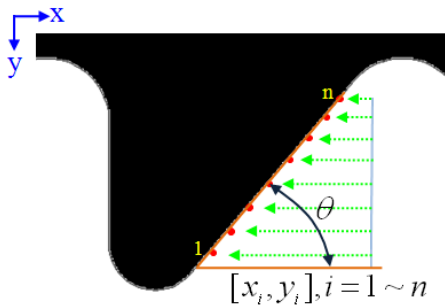


圖15 鋸片成形銑刀之壓力角量測

2.3.5 鋸片成形銑刀之齒距量測

利用單一閾值運算與Otsu演算法對鋸條成形銑刀影像做影像處理，由最小平方法求出a、b直線方程式與斜線方程式，如圖16所示，將直線與斜線方程式解聯立求交點，利用公式(27)即可求出齒距P。

$$P = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2} \quad (27)$$

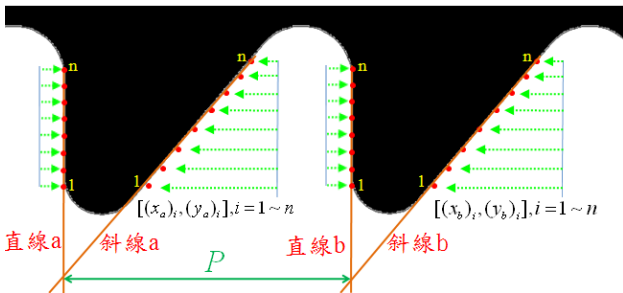


圖16 鋸片成形銑刀之齒距量測

3. 量測系統架構

本鋸片成形銑刀量測系統架構，其待測鋸片成形銑刀夾持於夾治裝置中。而夾治裝置與伺服馬達輸送裝置固定，經由數位相機擷取待測刀具影像，再將刀具影像利用 Visual Basic 編譯軟體所撰寫之量測程式進行鋸片成形銑刀各尺寸參數之量測。此量測系統可概略分為三個部份，其中包括影像擷取裝置、鋸片成形銑刀夾置裝置與鋸條量測裝置，如圖 17。

(1) 影像擷取裝置：包含數位相機、相機鏡頭、背光板。

- (2) 刀具夾置裝置：包含輸送裝置、鋸片成形銑刀夾治裝置。
- (3) 刀具量測裝置：包含電腦及 visual basic 編譯軟體所撰寫之量測程式。

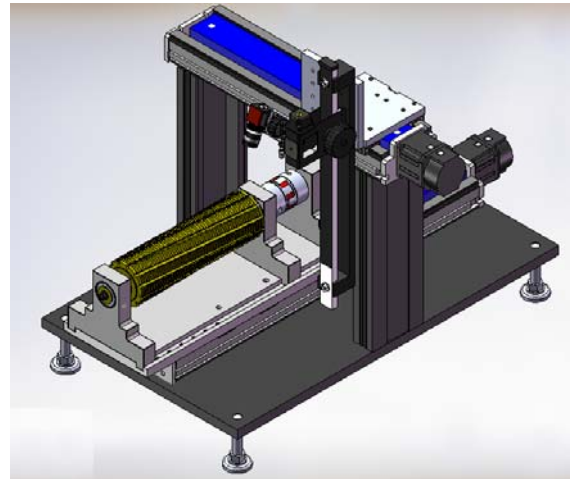


圖 17 系統架構圖

此量測程式利用VB作為開發平台，其介面設計以操作簡單便利為設計方向，如圖18、圖19，功能包含：鋸片成形銑刀之齒頂半徑量測、工作高度量測、全齒高度半徑量測、壓力角量測、齒距量測。

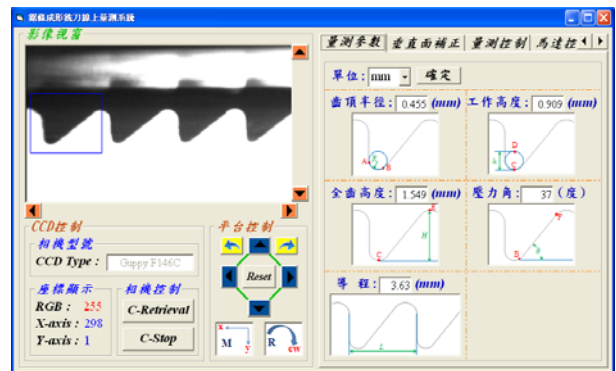


圖18 量測軟體介面

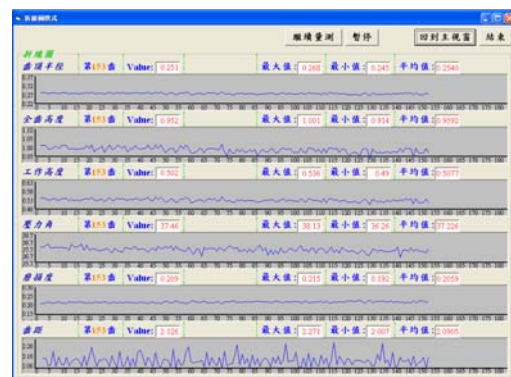


圖19 量測結果顯示介面

4. 量測結果與分析

4.1 系統準確度分析

本量測系統的量測結果將與三次元座標量測儀進行準確度比較，由於鋸片成形銑刀其齒數過多，本系統分別採取前、中、後各10齒進行比較，比較結果如表2、表3、表4。

表2 本量測系統之準確性比較(前10齒)

刀具參數	三次元量測系統量測平均值	本量測系統量測平均值	平均值差距值
齒頂半徑	0.1654 mm	0.1898 mm	0.0244mm
工作高度	0.3308 mm	0.3796 mm	0.0244mm
全齒高度	0.7964 mm	0.7766 mm	0.0198mm
壓力角	38.71度	38.45度	0.26度
齒距	1.3722 mm	1.3541 mm	0.0181mm

表3 本量測系統之準確性比較(中間10齒)

刀具參數	三次元量測系統量測平均值	本量測系統量測平均值	平均值差距值
齒頂半徑	0.1651 mm	0.1903 mm	0.0252mm
工作高度	0.3302 mm	0.3806 mm	0.0252mm
全齒高度	0.8096 mm	0.7889 mm	0.0207mm
壓力角	38.48度	38.6度	0.12度
齒距	1.3528 mm	1.3731 mm	0.0203mm

表4 本量測系統之準確性比較(後10齒)

刀具參數	三次元量測系統量測平均值	本量測系統量測平均值	平均值差距值
齒頂半徑	0.1701 mm	0.1899 mm	0.0198mm
工作高度	0.3402 mm	0.3798 mm	0.0198mm
全齒高度	0.8047 mm	0.7881 mm	0.0166mm
壓力角	38.72度	38.51度	0.21度
齒距	1.3842 mm	1.4018 mm	0.0176mm

4.2 量測系統之標準偏差

本研究所設計的鋸片成形銑刀檢測系統，主要針對鋸片成形銑刀之尺寸參數進行量測。其中量測的項目包含：鋸片成形銑刀之齒頂半徑、工作高度、全齒高度、壓力角、齒距等參數。本研究使用田口法之標準偏差(standard deviation)分析本量測系統。其做法是先算出總量測資料之平均值，如(28)式，再將平均值代入標準偏差公式，如(29)式，即可得到量測系統之標準偏差，如表5。

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (28)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (s_i - \bar{S})^2}{n-1}} \quad (29)$$

表5 量測系統之標準偏差

鋸片成形銑刀之尺寸參數	系統量測平均值	系統之標準偏差
齒頂半徑	0.1669 mm	0.006 mm
工作高度	0.3337 mm	0.006 mm
全齒高度	0.8036 mm	0.008 mm
壓力角	37.226°	0.05°
齒距	1.3697 mm	0.007 mm

5. 結論

由本文中針對鋸片成形銑刀檢測系統的研發，及針對系統所進行之標準差及準確性分析，可總結出下列幾點結果：

1. 本量測系統與三次元座標量測系統在準確度分析比較下，齒頂半徑誤差值 0.0252 mm，工作高度誤差值 0.0252 mm，全齒高度誤差值 0.0207 mm，壓力角誤差值 0.26°，齒距誤差值 0.0203 mm。
2. 本系統量測齒頂半徑之平均值為 0.1669 mm，工作高度為 0.3337 mm，全齒高度為 0.8036 mm，壓力角為 37.266°，齒距為 1.3697 mm。透過標準差分析，齒頂半徑之標準偏

差為 0.006 mm·工作高度之標準偏差為 0.006 mm·全齒高度之標準差為 0.008 mm·壓力角之標準偏差為 0.05°·齒距之標準差為 0.007 mm。

由以上的結果·若想要改善量測精度·可以採用更高解析度之工業攝影機·以提高量測影像解析度·或使用自動對焦功能之工業攝影機·以避免手動對焦造成影像換算上的誤差·藉以改善與提升量測精度與準確性。

參考文獻

- [1] Kawasue K and Ishimatsu T, "3D Measurement of Moving Particles by Circular Image Shifting", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1997.
- [2] 唐永新·莊士青·「機械視覺感測技術應用於刀具狀況監控之發展」·機械月刊第二十五卷第三期·工具機專輯·pp.503-507·1999。
- [3] 蕭裕昌·「應用影像量測技術於微小元件之外型尺寸量測之研究」·淡江大學·碩士論文·2004。
- [4] R. S. Lu., Y. F. Li, Q. Yu, "On-line measurement of the straightness of seamless steel pipes using machine vision technique", Sensor and Actuators A94, 2001, pp.95-101.
- [5] M. Sortino, "Application of statistical filtering for optical detection of tool wear", International Journal of Machine Tool & Manufacture 43, 2003, pp.493-497.
- [6] 王迪藝·「非接觸式單CCD義齒鑲製關鍵邊緣線掃描量測系統」·大同大學·碩士論文·2008。
- [7] 梁俊傑·「DVD 與 VCD 光碟表面瑕疵檢測系統之開發」·屏東科技大學·碩士論文·2002。
- [8] 莊有達·「應用電腦影像處理於辨別微鑽頭分離之檢測研究」·逢甲大學·碩士論文·2002。
- [9] 張國峰·「影像處理在多移動目標之追蹤」·國立交通大學·碩士論文·2002。
- [10] Alasdair McAndrew, *Introduction to*

Digital Image Processing with MATLAB, Thomson Course Technology, 2004.

- [11] N. Otsu, "A threshold selection method from gray-level histograms," *IEEE Trans. System Man Cybernet*, Vol. 9, No. 1, pp. 62-69, 1979.
- [12] 吳成柯·程湘君·戴善榮·雲立實·「數位影像處理」·儒林圖書有限公司·1996。
- [13] 連國珍·「數位影像處理」·儒林圖書有限公司·2004。