

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

油漆噴槍性能預估與測試裝備之設計研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2622-E-002-043-CC3

執行期間：91 年 12 月 01 日至 92 年 11 月 30 日

執行單位：國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系暨研究所

計畫主持人：洪振發

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫為提升產業技術及人才培育研究計畫，不提供公開查詢

中 華 民 國 93 年 3 月 1 日

油漆噴槍性能預估與測試裝備之設計研究

計劃編號：NSC91-2622-E002-043-CC3

執行期限：九十一年十二月一日至九十二年十一月三十日

計劃主持人：洪振發 研究人員：林集嫻 黃萬偉

國立台灣大學工程科學及海洋工程學系

一、摘要

本研究利用雷射光照射截取油漆噴槍噴霧不同方向之斷面影像，應用影像處理技術、模糊評估與資料比對統計方法，來評估油漆噴霧的剖面形狀、噴氣穩定度與噴霧均勻程度等，據以預估噴槍的性能以及品質。

本計畫提出可行的噴槍品質檢測方式與評估標準，建立一套噴槍性能檢測裝置，與性能評估系統，以確定噴槍的品質，使高品質高功能的噴槍，能有合理定位，提高產品價值。

本計畫發展之裝置，也可用於，噴槍的技術改良過程檢測用途，以加速產品改良時程，提昇產品競爭力。

關鍵詞：雷射光，影像處理，油漆噴槍，噴霧斷面形狀，噴槍檢測裝置

ABSTRACT

In this paper the profile of paint spray from spray gun in various cross section will be displayed by laser beam. The shape of spray section, and the distribution of paint material will be analyzed by image processing technique and statistics approaches, in order to predicate the quality of painted coat, and the performance of spray gun.

An algorithm and criteria for performance test of paint spray gun has developed, and the related test device has been established for the quality control of fabricated paint spray gun.

Keywords: laser beam, image processing, paint spray gun, spray profile, test device

二、研究計畫動機與目的

一般油漆經由噴槍噴射於塗裝體表面，完成工作後，其工作品質由噴好的油漆塗層的厚度、均勻度與粗造程度來觀察。噴槍性能好壞決定了塗裝工作的效率與品質。表面塗裝求高的工作，如汽車外殼求精緻，船舶外殼求快速均勻，其與噴霧特性與材料隨工作需求而異[1,2]。市場上性能好且功能特殊的噴槍價格與普通噴槍高出多倍[3]。

本計畫合作廠商從事噴槍製造多年，目前產品

在國際上已可擠入高品質產品之列，唯尚缺一套信實可靠的檢測系統。在國際競爭中雖被外國代理商認為優良產品，但若不能提出合理被肯定的檢測方法，與具體的驗證數據，則無法定位產品的品質位階，無法提高產品價格，而且可能遭受無理的削價。如委託國外檢測，除增加成本外，也常因曠費時日而誤失商機，降低競爭力。此外在研發過程，品質好壞亦不容易有客觀量化的評估標準，對於設計的好壞不易掌握。

一般而言，噴槍的噴頭、噴孔與壓力的設計與噴射塗料之材料特性，如黏性、內含固體顆粒大小與硬度...等，息息相關。從噴霧的速度、形狀、顆粒的大小等分佈的狀況與均勻程度，配合塗料的物理性質，可預估其工作成果的好壞[4,5,6]。此外油漆噴霧對於環境的影響，至少在噴漆附近噴霧對於人體安全之影響，近年來環保要求日益提升[7,8]

在國外的噴槍性能檢測，各大廠有各自的方式與標準，如以噴射顆粒大小、噴射均勻度、噴霧型態[9]、噴流追跡、半理論模擬的定性量測等，檢測方法多以光電技術為主，檢測設施的型態與計量方法各有不同，輔以物理特性的推估。最後仍以噴射後的油漆塗層成果為依據。

廠商如有具體的噴槍噴射特性量測資訊與成品油漆塗層品質的比較資料，較能為品質優良槍提出有力的證明，以提高產品的競爭能力、同時單價也較高。普通低價位噴槍則無此需求。

油漆噴槍的噴霧中的形狀，油漆的分佈與運動狀況，以及油漆黏性與黏著性，直接影響到噴後油漆塗層的厚薄，均勻程度與表面品質。因此噴霧油漆顆粒的大小與油漆的輸出速度與噴霧柱的形狀，成為設計油漆噴槍的主要參考依據。

本計畫利用雷射光照射截取油漆噴槍噴出霧不同方向之斷面影像，據以分析油漆噴霧的剖面形狀，噴氣穩定度，噴漆均勻程度，以確定噴槍的性能以及品質，並配合油漆的物理性質，推估不同方式噴射的塗層結果。建立一套檢測裝置，以確定噴槍的品質，提高噴槍價值，同時方便噴槍的技術改良，以增加產品競爭力。

影像處理的技術日新月異，選擇一個好的方式來處理圖像，常常會有事半功倍的效果。自 1979 年，NOBUYUKI OUST 運用統計的方式計算出影像的門檻值(threshold)將影像二值化[10]，這個概念沿用至今，成為一個分離影像主體與背景的好方法。

影像像素的灰階或彩色階在空間上形成獨立或短資料分佈的訊號，這種型態的訊號可利用小波

轉換來分離影像中不同訊號的頻帶，小波法目前正被廣泛的運用在各種領域作為識別訊號用途。小波分析方法的提出可追溯到 1910 年 Haar 提出的小波規範正交基底。1988 年 Daubechies 建構了具有正交性 (Orthonormal) 及緊支集 (Compactly Supported) 只有在有限區域中是非零的小波[11]，Daubechies 提出平滑度的定義，並將連續資料與非連續資料間的關係建立一套明確的系統。1989 年，Mallat 以多重解析度分析法突破傳統的計算法，建構了小波函數的構造及信號及小波轉換的分解及重建[12]。

近年來，為了處理暫態訊號，有關小波的演算法也不斷的翻新[13][14]，並且在各個領域上蓬勃發展。本文主要嘗試去訂立一套標準，來評估噴槍的品質，迄今尚未找到用離散小波轉換評定噴槍品質的相關文獻。

本文的研究方向，主要分成兩個方面進行：第一是針對影像失真部分進行處理，第二才是將處理過的影像圖檔作分析，進而得到我們所要的噴槍品質指標。

由於我們所獲得的影像資料是經過 CCD 拍攝取得影像資料，或從印表機輸出圖片由掃描器掃成數位影像後的資料，其間經過多次的轉換造成失真。因此，本文運用影像處理技術，改善影像失真問題。接著，將處理過後的影像，利用二值化法、小波轉換等方法，進行分析，找出其邊界的所在位置、模糊程度、整個剖面偏差的角度及均勻度等等的重要特性，逐項建立評估指標，進而達到量化評估噴霧剖面品質的目的。

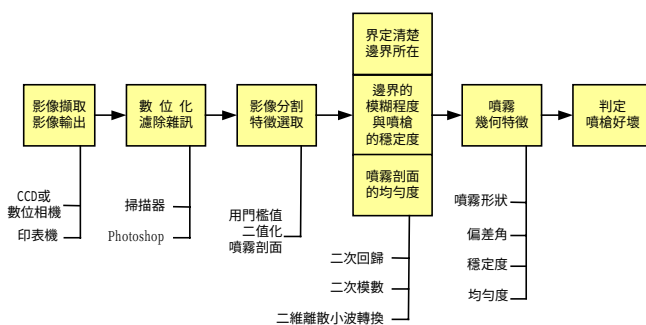


圖 1. 應用影像處理評估噴霧品質的作業程序

三、數位影像處理

3.1 影像二值化

影像的基本單元為像素(pixel)，每個像素的亮度以灰階程度來表示，令灰階高低以 8 位元整數表示，則灰階值 x 分佈在 $0 \leq x \leq 255$ ，數值越大則越亮，0 表示全黑。

將灰階值正規化使得最低值為最高為 1，則影像經過正規化後可以將影像的明亮度對應轉換至 0 ~ 1 這個範圍，在此 0 代表黑，1 代表白。影像點明亮度的機率分佈為：

$$p_i = \text{prob.}(x_i) = \text{prob.}(r_i) = n_i / N$$

其中， N 為影像像素總數， n_i 為像素灰階值 x_i 或 r_i 為灰階值 x_i 或 r_i 的個數。正規化後的數值，如 $0 \leq x_i \leq 255$ ，則 $r_i = x_i / 255$ ， p_i 為灰階值 x_i 或 r_i 的像素數量占所有像素數量的比例，亦即灰階值 i 的像素在整個影像出現的機率。

假設門檻值 k 將全部影像的像素分成 B 與 O 群，其中 B 為灰階值範圍 $[1, 2, \dots, k]$ 的像素群，而 O 為灰階值範圍 $[k+1, k+2, \dots, L]$ 的像素群，此時兩像素群的機率密度總和分別為 ω_B 與 ω_O ； μ_B, μ_O, μ_T 分別為 B 群、 O 群與全部像素的統計平均值，其標準差分別為 σ_B, σ_O 與 σ_T 。令群集間 (between-class) 標準差為 σ_C ：

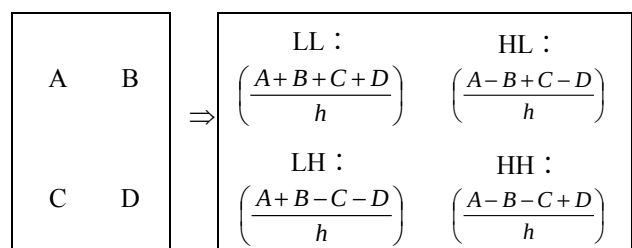
$$\sigma_C^2 = \omega_B \omega_O (\mu_O - \mu_B)^2$$

最佳的門檻值 k^* 的選擇考慮滿足下列條件：

$$\sigma^2(k^*) = \max \{ \sigma_C^2(k) | 1 \leq k \leq L \}$$

3.2 離散小波轉換

將全部影像之像素以 $m \times n$ 矩陣 P 表示，將矩陣 P 依奇數與偶數元素，分成 4 部分 A, B, C, D ，即：
 $A(i, j) = P(2 \times i - 1, 2 \times j - 1); i = 1, 2, \dots, m/2; j = 1, 2, \dots, n/2$
 $B(i, j) = P(2 \times i - 1, 2 \times j); i = 1, 2, \dots, m/2; j = 1, 2, \dots, n/2$
 $C(i, j) = P(2 \times i, 2 \times j - 1); i = 1, 2, \dots, m/2; j = 1, 2, \dots, n/2$
 $D(i, j) = P(2 \times i, 2 \times j); i = 1, 2, \dots, m/2; j = 1, 2, \dots, n/2$
 本文以離散小波轉換 (Wavelet Transform)，將 A, B, C, D 轉換成長波與短波 4 部分：LL、LH、HL、HH。兩者相關示意圖如下：



其中 h 為轉換係數。

小波轉換將原影像資料矩陣 P 轉換成 4 個頻寬的示意圖如下：

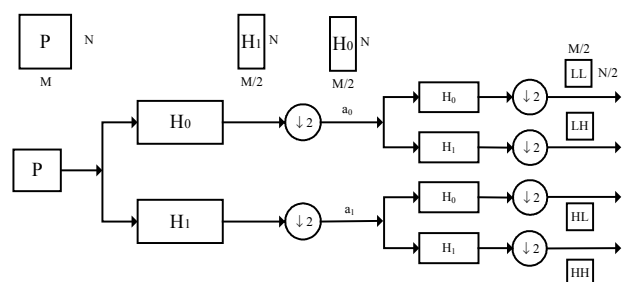


圖 2. 影像資料經小波轉換成 4 個頻域示意圖

以噴槍噴霧式樣 1 為例，如圖 3，經過二維離散小波轉換成 4 個不同的子頻帶，可表現不同方向的高頻信號。圖 4 中可以清楚的看出，在 LH 區看到水平方向的特徵，在 HL 區看到垂直方向的特徵，而 HH 可看出模糊的對角線特徵。

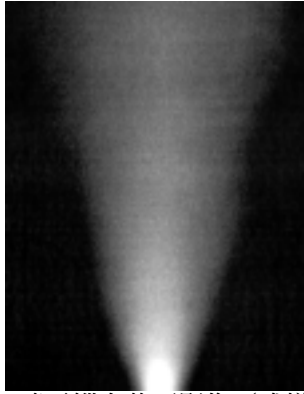


圖 3. 噴霧縱向截面影像（式樣 1）

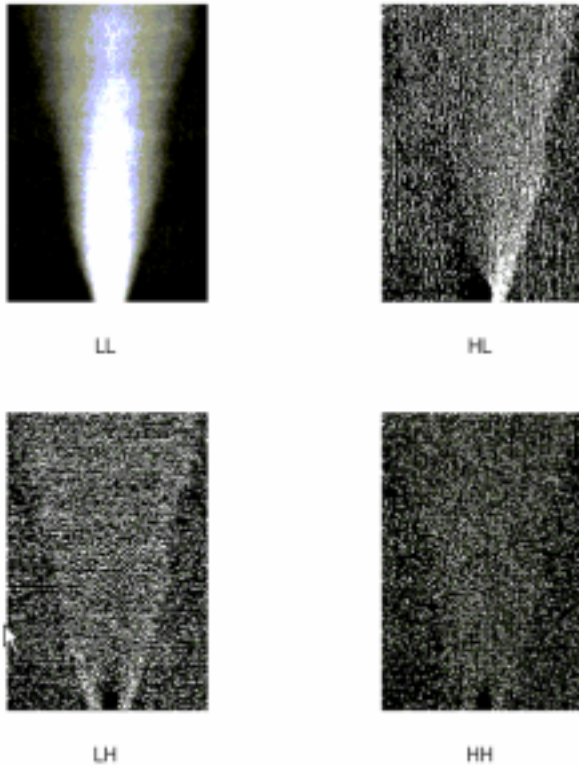


圖 4. 噴霧縱向截面影像（式樣 1）經過二維離散小波轉換成 4 個頻帶

四、噴霧剖面的評估標準

本研究對噴槍噴霧評估分為兩個部分：一是針對噴霧的形狀、二是噴霧的均勻度。

4.1 噴霧邊界

從噴霧影像之像素亮度，從左右兩邊界向中間作列搜尋，找尋超過門檻值的像素，如果發現有像

素灰階值連續 n_s (n_s 為選定的模糊邊界計量點數) 個點都超門檻值，標記第一個超過門檻值的點，並且將此點的位置記錄下來，繪出每列符合上述情形之第一點如下圖，可得一模糊邊界。

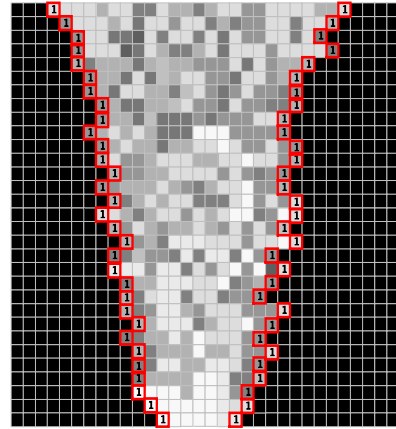


圖 5. 噴霧縱向截面影像的模糊邊界（式樣 1）

由於噴嘴所噴出的噴霧形狀理論上接近橢圓錐體，圓錐體橫剖面的邊界為二次曲線，故將模糊邊界做二次回歸分析，所得出來的兩條曲線視為基準邊界，如圖 6(a)。基準邊界將模糊邊界分隔成內外兩部分，先分別對兩部分求出每個列 (row) 的標準差，再對兩個部分的標準差作二次迴歸分析，會得到兩條曲線如圖 6(b)，稱為模糊邊界的上標線與下標線，由兩曲線的距離可看出模糊邊界的寬與窄。

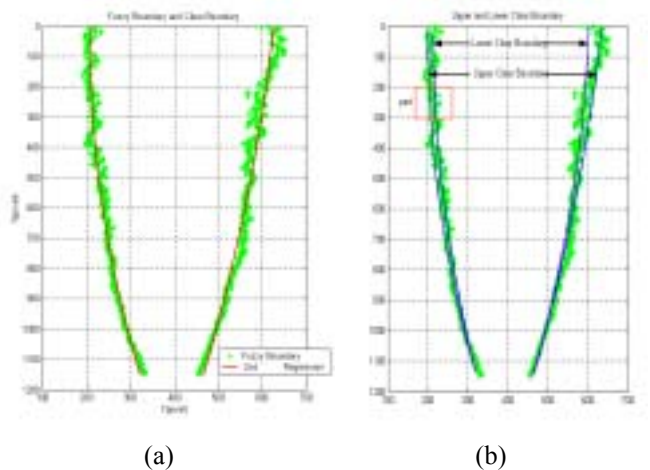


圖 6. 噴霧縱向截面影像的基準邊界模糊邊界（式樣 1）

將兩模糊邊界上下標線的列座標差之均方根值定義為模糊邊界的「模糊度」：

$$L_f = \left(\sum_{k=1}^n (y_{bk} - y_{uk})^2 \right)^{1/2}$$

其中 y_{bk} 與 y_{uk} 為兩模糊邊界上下標線的第 k -列座標

4.2 噴霧剖面的中心線與中心基準線

對噴槍噴霧形狀的評估之前，需確定其中心基準線與剖面中心線的位置與兩者間的夾角，以便作影像資訊的校正用途。

本研究噴霧剖面的中心線、基準線以及偏差角 θ ，定義如下：

- I. 中心線：將各列模糊邊界中的座標值各點橫座標值取平均值 y_{ck} (如圖 7 中央分佈點)，把各列平均座標值沿列方向做一次線性回歸，所得的直線定義為此噴霧剖面的中心線 (如圖 7 之中央虛線)。
- II. 基準線：上述各個平均點的 y_{ck} 座標值平均，此平均座標作垂直線，為噴霧剖面的基準線。
- III. 偏差角：中心線與基準線偏差的角度，定義為偏差角。偏差角 θ 若為負值，代表中心線往右偏離基準線，應旋轉噴槍往左，以達校正角度的目的。

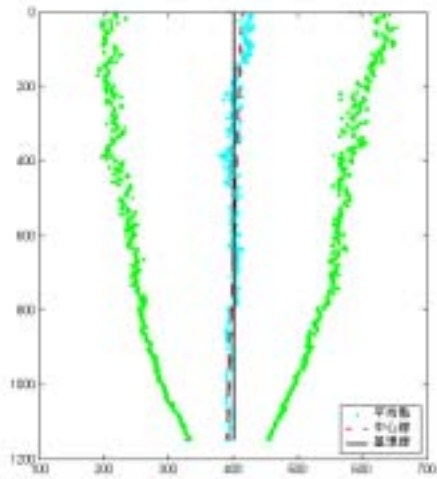


圖 7. 噴霧縱向剖面影像的中心線與基準線

4.3 噴槍的噴氣量穩定度

噴槍出氣的穩定度影響了噴霧的濃淡分佈品質，理想的狀況下，噴霧的灰階度與噴出的距離為一二次曲線。將噴霧縱剖面上每數列(row)的灰階值取平均，對圖 X 軸繪出曲線圖，會得到一條從頭到尾抖盪的噴氣曲線 (如圖 8 上圖)，此震盪的曲線可以描述噴嘴沿著 X 軸出氣的情形。X-軸噴氣量分佈可視為噴氣量隨時間的變化狀況。

用這些資料點進行二次回歸，可以得到一條二次曲線，稱為噴霧穩定基準線 (如圖 8 上圖)。

計算噴氣曲線與穩定基準線間的偏差分佈可表示噴霧穩定程度 (如圖 8 下圖)，定義此偏差量的均方根值為噴氣不穩定性指標。噴氣不穩定性指標越大表示噴氣越不穩定。

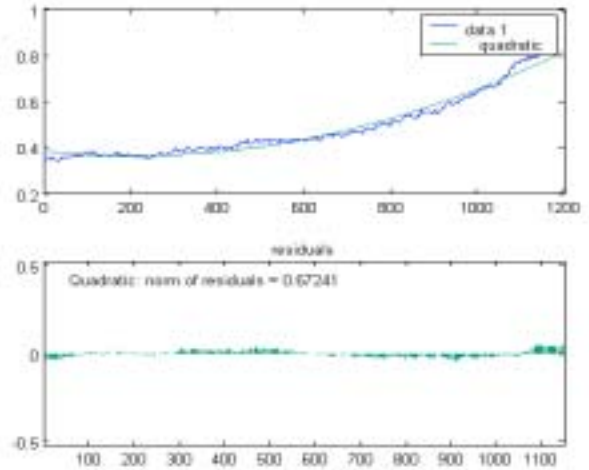


圖 8. 噴霧的噴氣曲線與噴氣穩定基準線 (上圖)，噴氣曲線與噴氣穩定基準線之偏差分佈

4.4 噴霧剖面的均勻度

在定義噴霧的均勻程度前，本文做了一個重要的假設：如果邊界內有一像素的灰階值大於邊界內部的門檻值(threshold)，代表噴漆有噴到該像素所在的位置，而且噴漆的濃度達到我們的要求；換言之，噴霧剖面內灰階值超過內部門檻值的像素越多，噴霧的剖面越均勻。

分析的噴霧剖面，若噴嘴位置在圖下方，則邊界形狀近似於倒三角形，噴霧亮度由底部到頂部呈現逐漸變暗的情形，這是因為噴霧會隨著噴出的距離而變的分散，而影像強度也隨之減弱。由於每台電腦螢幕解析度的不同，有些時候，肉眼無法對兩張差距不大的噴霧剖面影像做判斷，何者噴的比較均勻？在此我們利用人眼對高頻部分的不敏感的特性，利用二維離散小波轉換，找出整張噴霧剖面的中高頻部分，將高頻部分做線性疊加並且訂出一個通用的指標值。

將原噴霧剖面影像資料經離散小波轉換得到四個子頻帶(subband)，LL、LH、HL、HH，將這四個頻帶的灰階值存成四個矩陣 M_{LL} 、 M_{LH} 、 M_{HL} 、 M_{HH} ，濾調低頻 LL 區，將 M_{LH} 、 M_{HL} 、 M_{HH} 矩陣內每個元素取絕對值後累加，除以三矩陣內所有元素的總個數和，會得到一個大於零的指標值，即為噴霧的均勻程度指標：

$$Lu = \left(\sum_{i=1}^{m/2} \sum_{j=1}^{n/2} \left(|M_{HLij}| + |M_{LHij}| + |M_{HHij}| \right) \right) / (3/4 \times m \times n)$$

指標值越大代表高頻的部分越多，亦即噴霧剖面越不均勻。圖 9 左右兩圖由目視可明顯分辨，(a)圖較均勻，其指標值也較低。

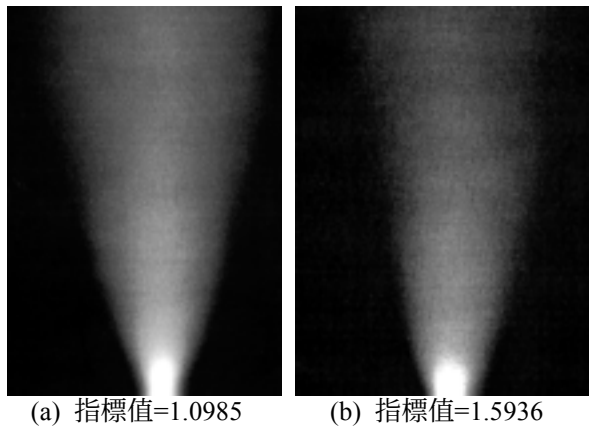


圖 9. 噴霧的均勻程度指標

五、雷射光擷取噴槍噴霧剖面

本研究利用雷射光經由柱狀鏡頭展成光頁，割截噴霧斷面，示意圖如下。雷射光在試驗箱兩邊射出兩個三角錐形光頁，使得光頁強度較為均勻，噴槍噴霧被光頁切割部分可顯示，利用攝影機鏡頭，連接 CCD 將影像攝下，傳到接在電腦的影像擷取卡，記錄影像。圖 10 表示雷射光擷取噴槍噴霧剖面資訊示意圖。圖 11 與圖 12 分別為噴霧顯像的狀況與噴槍 CCD 配置示意圖。

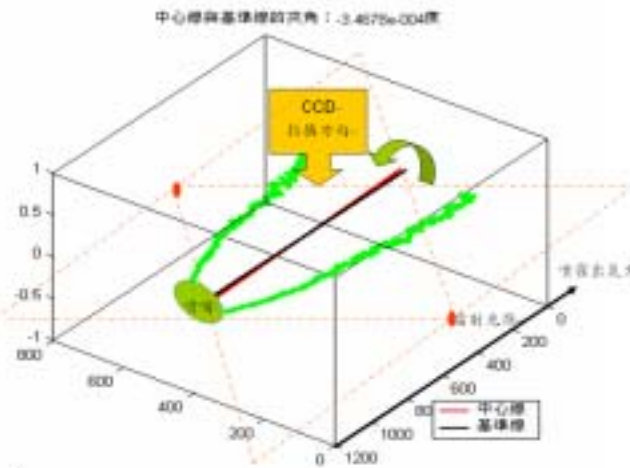


圖 10. 雷射光頁擷取噴槍噴霧剖面資訊示意圖



圖 11. 噴槍與 CCD 配置示意圖



圖 12. 噴槍與 CCD 配置示意圖

六、結論

本研究發展擷取噴槍噴霧傑面影像的技術，並配合噴霧剖面影像，提出評估噴霧幾何特性與噴霧均勻程度的評估方式。歸納本研究所完成的成果，可得下列幾項結論：

1. 針對多次影像資料格式轉換可能產生影像資訊的失真，利用影像訊前，需作資料影像前處理以改善原獲取圖形影像的品質。
2. 以列搜尋的方式，逐一搜尋影像像素點，並且用 The Otsu's Method 將影像二值化，可分辨影像中噴霧的分佈，與邊界位置。
3. 本研究提出噴霧剖面模糊邊界資訊的二次模數 (Norm of residuals)，稱為邊界「模糊度」將邊界的模糊程度量化。邊界的「模糊度」越大表示邊界模糊程度越大，反之則越小。邊界的「模糊度」越小則噴槍的品質越佳。
4. 本研究提出噴霧剖面噴霧分佈穩定狀況的噴氣不穩定性指標。噴氣不穩定性指標越大表示噴氣越不穩定。噴氣不穩定性指標越小則噴槍的品質越佳。
5. 本文定義噴霧剖面影像資訊的中心線及中心基準線，並計算出偏差角，以此建立噴嘴的校正機制。
6. 以二維離散小波的方式，分離影像的各個頻帶，並建立評估噴霧剖面均勻度的指標值。指標值越小，噴霧剖面越均勻，噴槍品質越佳。

綜合以上各點，本文可應用影像處理的方式，對噴槍的噴霧剖面做噴槍噴霧品質合理的評估，訂立一套完整的噴槍品質檢測標準。

七、 參考文獻

1. Chen, Heping; Sheng, WeihuaXi, NingSong, MuminChen, Yifan , 2002, **Automated robot trajectory planning for spray painting of free-form surfaces in automotive manufacturing**, *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 11-15, Washington, DC, v 1, 2002, pp. 450-455.
2. Kenson, Robert E, 1996, **Technical and marketing survey of paint spray booth solvent emissions control technology**, *Proceedings of the 1996 Air & Waste Management Association's 89th Annual Meeting & Exhibition*, Jun 23-28 1996, Nashville, TN, USA, 96-TP4C.01, 11p.
3. Ewert, Stephen A, Felstein, Steven R.Martinez, Thomas, 1993, **Low-cost transfer-efficient paint spray equipment**, *Metal Finishing*, v 91, n 8, Aug, 1993, pp. 59-64
4. Morikita, Hiroshi , Taylor, Alexander M.K.P, 1998, **Application of shadow Doppler velocimetry to paint spray: Potential and limitations in sizing optically inhomogeneous droplets**, *Measurement Science & Technology*, v 9, n 2, Feb, 1998, pp. 221-231
5. Balkan, Tuna ; Arikan, M.A. Sahir, 1999, **Modeling of paint flow rate flux for circular paint sprays by using experimental paint thickness distribution**, *Mechanics Research Communications*, v26, n5, 1999, pp. 609-617
6. Hoy, Kenneth L ;Donohue, Marc D, 1989, **Supercritical fluid spray technology. An emission control technology for the future**, *Polymer Preprints, Division of Polymer Chemistry, American Chemical Society*, v 31, n 1, Apr, 1990, Papers Presented at the Boston, Massachusetts Meeting of ACS 1989, Apr 22-27 1989, Boston, MA, USA, pp. 679-680
7. Joseph, Ron, 1996, **Environmental coating problems**, *Metal Finishing*, v94, n7, Jul, 1996, pp. 45-46
8. Lee, Chi-Chang ;Nelson, J. EricDavis, Kermit G.Marras,, William S., 1997, **Ergonomic comparison of industrial spray paint guns**, *International Journal of Industrial Ergonomics*, v 19, n 6, Jun, 1997, pp. 425-435
9. Zaki, A; ;Eskander, M, 2000, **Spray painting of a general three-dimensional surface**, *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, , Takamatsu, Oct 31-Nov 5 2000, v 3, pp. 2172-2177L 2000.
10. Otsu, 1979, **A threshold selection method from gray-level histograms**, *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 9, no. 1, pp. 377-393, 1979.
11. Daubechies, I. 1988, **Orthonormal bases of compactly supported wavelets**, *Communications on Pure and Applied Mathematics*, vol. 41, pp. 909-996, 1988.
12. Mallat, S. G., 1989, **A Theory for Multiresolution Signal Decomposition : The Wavelet Representation**, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 11, on. 7, pp. 674-693, 1989.
13. John, A. S. U. B. Desai, 1997, **Signal De-noising Using the wavelet transform and regularization**, *IEEE international conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing 1997, ICASSP-97*, vol. 3, pp. 1861-1864, 1997.
14. Ivan, W. S. & Levnent Sendur, 2000, **smooth wavelet frames with applicat ion to denoising**, , *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing 2000, ICASSP '00.*, vol. 1, pp. 129-132,2000.