

應用機器視覺於鉚釘電氣接點之表面檢測

田方治

教授

國立台北科技大學

工業工程與管理所

e-mail: fctien@ntut.edu.tw

陳玟伶

碩士

國立台北科技大學

工業工程與管理所

e-mail: s4378006@ntut.edu.tw

摘要

電氣接點在各式的開關、斷路器和繼電器中扮演了重要的腳色。本研究目的在運用影像處理技巧，建立一套有效之鉚釘電氣接點之視覺檢測系統。研究內容主要為擷取七種表面瑕疵的空間域特徵資訊來做處理，並依據空間域特徵資訊區別瑕疵種類，像是刮傷、裂痕、凹洞等。本視覺檢測系統分成三個子系統來配合，分別針對接點的正面、側面和反面做檢查，每個子系統使用不同的前處理和不同的瑕疵處理法來檢測或增強細微瑕疵的影像強度，最後系統依據空間域特徵資訊辨識出所發生的瑕疵種類。本研究所建立的鉚釘電氣接點之視覺檢測系統，可以提供企業一個客觀並且標準化之檢測品質。經實驗結果證明，本視覺檢測系統能有效的偵測並辨識出表面瑕疵之種類。

關鍵詞：表面瑕疵檢測、機器視覺、閉合頂帽轉換、真圓度、區塊分析

Abstract

Electric contacts for switches, breakers and relays play a very important role in electric industry. In this paper, we propose an automated visual inspection system for electric contact rivets using computer vision. The system is developed based-on spatial domain information of defects,

and classifies the surface defects including cracks, breaks, and scratches. The proposed system consists of three sub-systems, which inspects the top, side, and bottom views of electric contact rivets respectively. For each view, we use different image pre-processing and feature extraction methods to enhance and detect the surface defect. Experimental results show the proposed system is effective to identify the defects.

1. 緒論

本研究探討的鉚釘接點，是用銅線和銀合金線在一定比例下所製成，應用範圍包括：各式開關、斷路器、電磁接觸器及繼電器等等。在各種自動化裝置、火箭、潛水艇、電腦、核裝置以及通訊系統中，所有設備都含有大量的接觸點，而使用期間，每個接觸點要工作上百萬次，為了能承受這樣嚴格的工作要求，接觸點必須耐磨以及性能可靠。而鉚釘接點在沖壓、打造的過程中，會因為機械設定參數不佳而產生毛邊、面裂、凹凸、座裂等不良現象，進而影響鉚釘接點的導電性、導熱性和外觀賣相。

在現今的產業環境中，大部分企業對於金屬零件仍然採用人工目視的傳統檢測方式，但人眼通常無法勝任太細微的缺陷，並且有判斷主觀和不易控制檢查品質的毛病。雖然人類經訓練後可以輕易的適應瑕疵的多樣性，但檢查的

精確性卻會隨著單調、重複的例行性工作而持續遞減。因此本研究希望以機器視覺代替人類來做嚴格的品質把關及瑕疵分類，以電腦程式的高效率和精準性取代現有的人工目視檢測之缺點。

視覺檢測的基本涵義，就是拿一張影像或是一小部份的影像去比較和對照一個事先定義好的標準影像樣板。實務上，產品視覺檢測被廣泛運用在汽車業、紡織業、木材製造業、玻璃工業與金屬相關製品工業上。一般而言，一套工業影像處理系統由「數位影像擷取」、「數位影像分析」、「數位影像內容解釋」三個基本功能所組成，而自動化視覺檢測的工作可概略分為下列幾個階段(Chin, 1988):

(1) 教學(Teach): 由工程人員指定關於檢測的特徵項目和特徵數據。

(2) 成像(Imaging): 利用數位變焦鏡頭將物件影像投射到 CCD(Charge Coupled Device, 電荷耦合元件)上, 也就是投射到數位相機的感應器上面, 藉由此一電荷耦合元件, 把相機鏡頭所採取到的影像, 轉換成數位影像訊號, 透過電子線路的處理, 把數位影像訊號儲存在儲存媒體之中, 再經由電腦處理器來分析這些數位影像的資料。

(3) 特徵(Features): 特徵代表的意義為一個物件在事先定義的模式下透過擷取(extract)而產生出來的資訊。這種使用物品特徵資訊的模式普遍被應用在瑕疵檢測技術上, 將受檢測物件上所取得的特徵資訊去比對(match)瑕疵模組中所定義的瑕疵條件(definition of defects), 以確定物品是否有非常態性的特徵數據並構成瑕疵條件。

(4) 分類(Classify): 在物品沒通過產品檢驗的情況下, 自動化視覺檢測系統便開始執行分類工作, 將該物品歸類到預先定義的某個瑕疵型態當中。

本視覺檢測系統分成三個子系統, 分別針對鉚釘電氣接點的正面、側面和反面做檢查。七

種瑕疵項目分述如下:

- (1) 正面: 毛邊、頭膜破、面裂
- (2) 反面: 座裂、偏心
- (3) 側面: 橫紋、側裂

瑕疵之文字定義如下表 1 所示。

表 1. 瑕疵之文字定義

項目	瑕疵定義
毛邊	頭部表面的鍍料多出一段片狀物
頭膜破	頭部表面的鍍料多出一塊團狀物
面裂	頭部表面之邊緣有缺口或破洞
座裂	頭部反面有一道溝痕
偏心	頭部反面的圓心座標與底座圓柱的圓心座標之誤差超過 0.1mm 以上
側裂	頭部之側面有細長型刮痕
橫紋	頭部之側面有明顯的兩條金屬層接縫(表面銀金屬與反面銅金屬的接合處不平整)

2. 影像處理

本研究以機器視覺方法取得鉚釘接點影像進行自動化檢測, 取像光源選擇紅光LED環型燈, 因為金屬表面的反光特性, 光源太強會使得影像模糊不清, 而光源太弱又會無法有效的反射鉚釘接點的表面至CCD攝影機中, 在多次試驗後選擇的LED其光源強度能有效的反應鉚釘接點上的瑕疵影像。瑕疵的可能區域共分成三大塊, 分別是鉚釘接點頭部、鉚釘接點頭部之側面、鉚釘接點底座。檢測鉚釘接點的三個方向如圖1(a)、(b)、(c)所示。因為不同區域上所產生的瑕疵種類不同, 因此在影像處理方法上也不一樣, 本研究針對三個可能區域各自提出專屬於該區域的影像處理方法, 於本章節中再分列三小節介紹之。

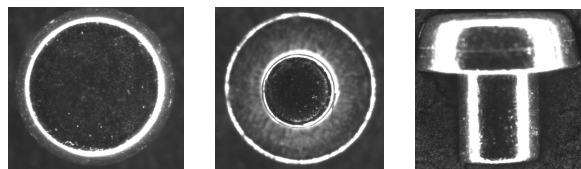


圖 1. 鉚釘電氣接點檢測方向圖

程式系統架構如圖 2 所示。每個階段之過程各自簡述如下：

- (1) 取像：本研究系統採用二維灰階影像。因為金屬反光重的特性，因此在背景全黑的情況下進行取像，黑色背景能夠吸收鉚釘接點週遭不必要之反射光線。
- (2) 受檢物之方向分類：在程式執行前先做鉚釘接點的方向性分類，依照鉚釘接點的三個方位，程式只個別處理該方位所需執行的影像分析演算法，如此一來在檢測該方位時可以省下另外兩方位的程式執行時間。
- (3) 影像前處理：物件影像經由 CCD 攝影機擷取後，數位化影像資料被送入電腦中，在影像資料開始分析前，先將原始的影像資料作一前處理，前處理的主要目的就是使得處理後的影像比原始影像更合用。
- (4) 瑕疵分割：不同的瑕疵項目使用不同的影像處理方法，目的在增強瑕疵影像後使其與背景分離。
- (5) 瑕疵類別判定：從背景分離出來的瑕疵，依據該瑕疵的特徵特性判別該瑕疵的種類為何，進一步通知檢驗員以考慮是否需要調整製程參數。

2.1 鉚釘接點正面區域之影像處理

所謂鉚釘接點之正面區域，指的是鉚釘接點頂部的銀面區域。此區域產生的瑕疵種類共有三項，包括：毛邊、頭膜破和面裂。正面瑕疵之影像分析流程如圖 3 所示。

2.1.1 毛邊瑕疵與頭膜破瑕疵之檢測

毛邊與頭膜破呈現的瑕疵情況為正常銀面區域

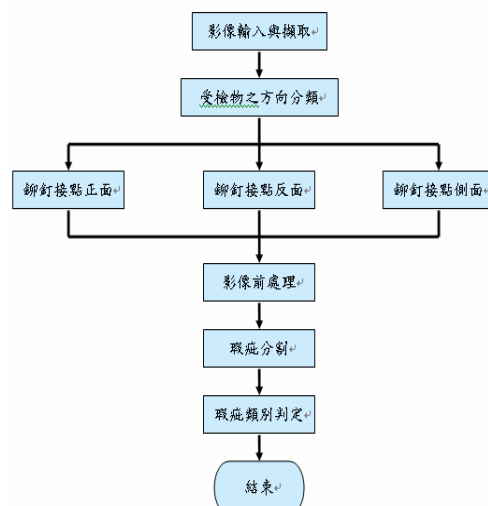


圖 2 程式系統架構圖

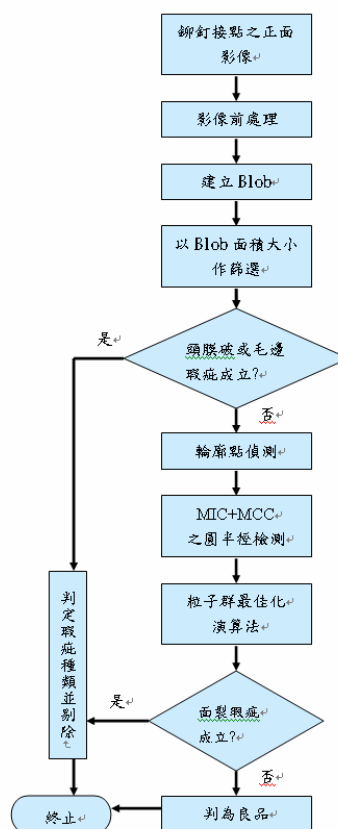


圖 3 正面瑕疵之影像分析流程

之周圍產生多餘的金屬條塊或團塊，因為銀金屬擁有高反光的特性，在影像中屬於灰階強度較高的區塊，因此透過二值化、中值濾波器、侵蝕等前處理後可以使用區塊分析找出影像中的瑕疵所在。在本節將介紹毛邊瑕疵以及

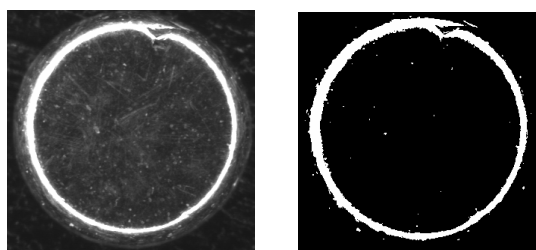
頭膜破瑕疵之影像分析方法，基本上是以相同的影像處理方式來做檢測，最後再使用瑕疵影像區塊之 Feret bounding box 的長度特徵值，作為毛邊瑕疵和頭膜破瑕疵的分類依據。

2.1.1.1 影像二值化

二值化技術(Thresholding)在影像處理當中是一項基本的也是不可或缺的處理工具，主要目的就是從影像背景中分割出物件的像素集合，換句話說，就是把背景和感興趣之物體做分級，運用機率統計之原理找出最佳之門檻值，如果影像本身灰階值高於門檻值之像素點便令其為亮點(白點，灰階值為 255)，反之灰階值低於門檻值之像素點，便令其為暗點(黑點，灰階值為 0)，最後從原本的灰階影像轉換成為一幅二值化影像。二值化影像 $g(x,y)$ 一般定義為：

$$g(x,y) = \begin{cases} 255 & f(x,y) > T \\ 0 & f(x,y) \leq T \end{cases} \quad (1)$$

本研究使用之二值化方法為最小殘差平方法，去查影像中所不必要的灰階資訊，如圖 4 所示：



(a)面裂原始影像圖 (b)物件經過二值化

圖 4 二值化說明圖

2.1.1.2 中值濾波器

本研究使用 3×3 的中值濾波器(median filter)來消除不連續且面積過小的反光(白點)雜訊。中值濾波器是最有名的統計排序濾波器，統計排序濾波器是由濾波器所包圍之影像區域中所含像素的排序結果來決定中心像素的灰階值。而中值濾波器就是該濾波器之中心像素值被排序之後的中間值取代。數學式表示如下：

$$f(x,y) = \text{median}\{g(s,t)\}_{(s,t) \in S_{xy}} \quad (2)$$

其中 (x,y) 代表中心點為 (x,y) 且大小為 $m \times n$ 之矩形影像的座標集合， $g(s,t)$ 為座標集合中任一點的原始影像， $f(x,y)$ 為此矩形影像的中間值。中值濾波器的功能是強迫該像素的灰階度更接近其近鄰灰階。實際上，因為中間值的定義，比其鄰近點亮或暗且面積小於濾波器面積一半的單獨像素群集，會被一個的中值濾波器所消除，也就是強迫其值為近鄰灰階的中間值強度。

2.1.1.3 侵蝕

本研究使用侵蝕(erosion)來去除二值化影像中不相干的細節，使得二值化物件影像的邊緣雜訊更少。侵蝕的作用是用白點物體的邊緣向內縮一個或一個以上像素點，也就是將白點物體的邊緣由黑點取代。A 被 B 侵蝕表示成 $A \ominus B$ ，數學形式表示如下：

$$A \ominus B = \{z | (B)_z \cap A^c \neq \Phi\} \quad (3)$$

其中 A、B 為一集合，Z 為所形成的新集合。侵蝕是一種用在二值化影像中的運算，運算過程上，利用結構元素 (Structuring element) B 矩陣在影像矩陣中由上而下、由左至右全面平移，並查看它在影像中何處可以完全放置進去，然後只輸出結構元素的中心值。侵蝕的過程說明如下：

1	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	1	1	1	0
	0	1	1	1	0
	0	1	1	1	0
	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0

(a)垂直結構元素 B (b)影像矩陣 A

	0	0	0	0
	0	0	0	0
	1	1	1	0
0	1	1	1	0
0	1	1	1	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

(c) 平移到影像幾個位置上的結構元素

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	1	1	1	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

(d) 侵蝕後的影像

圖 5 侵蝕說明

圖 5(a)是由三個像素所組成的垂直型結構元素，中間用黑框表示結構元素的原點。而圖 5(b)中最暗的方格表示垂直型結構元素在三種影像位置上的平移情況，三個結構元素的原點(中心點)分別為:[2,1]、[3,2]、[4,3] (註:[列,行])。因為只有原點[4,2]、[4,3]、[4,4]滿足結構元素 B 的情況，因此這三個原點都被標示為 1 值。

2.1.1.4 區塊分析

區塊(Blob)指的是一張影像中，具備相同條件或屬性的像素互相接觸或相鄰所連結而成的像素區域或面積，而區塊分析(Blob analysis)就是在一張影像中把相同特性的像素區塊辨識出來並分析每個像素區塊的特徵資訊，Blob 的特徵資訊包括面積、位置、形狀、方向、周長、Ferret 直徑、重心、質心等幾何特徵，一般來說 Blob analysis 可用在物件搜尋、定位、外包裝檢測、印刷缺陷檢測等方面。區塊分析執行的步驟分述如下：

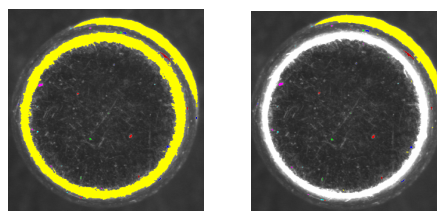
(1)影像分割：一張影像經過雜訊去除或影像平滑等特定目的的前處理後，得到一張更適合做影像分割的新影像，區塊分析的首要步驟就是

對此新影像做二值化分割。依據不同的分析需求，二值化可選擇單門檻值或雙門檻值。不論是單門檻值或雙門檻值，低於臨界值的像素被設定為 0，高於臨界值的像素被設定為 1，而介於雙臨界值中的像素點則不被歸類到 blob 之中。在分析鉚釘接點正面影像時，臨界值選定為 255。

(2)blob 建立：影像經過二值化後，利用影像處理函式庫 EasyAccess 之函數 Build-Objects 來建立 blob。因為毛邊、頭磨破等瑕疵在影像中為白色的反光區域，所以本研究選擇灰階度為 255 的像素點作為 blob 建立的依據。

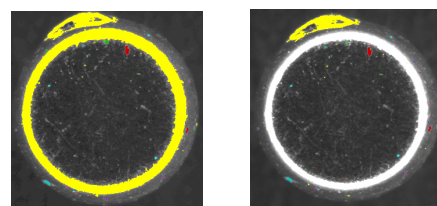
(3)計算每個 blob 特徵值：影像處理函式庫 EasyAccess 提供計算多樣的 blob 特徵值，例如 convex 周長、feret 直徑、blob 面積等幾何資訊，以及最大最小灰階值、灰階值變異數等統計資訊。正面的各瑕疵經過二值化與 blob 建立後僅會留下銀面邊緣反光區域和瑕疵反光區域，因而可使用面積大小做為瑕疵判定的依據。

(4)blob 選擇：根據所得的各 blob 面積大小，刪去最大面積的 blob 後，剩餘的 blob 面積大小若達到一定水準就判定為不良品，並根據剩餘 blob 的形狀特徵來認定瑕疵種類。各瑕疵的 blob 選擇情形如下圖 6、7 所示：



(a) 建立 blob (b) 分割出毛邊 blob

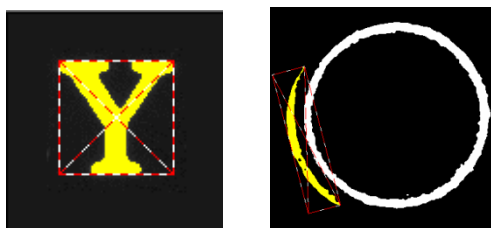
圖 6 毛邊瑕疵之區塊分析



(a) 建立 blob (b) 分割出頭膜破 Blob

圖 7 頭膜破瑕疵之區塊分析

(5)瑕疵分類: 若影像經過上述處理步驟後, 留下一塊 blob 並且面積大小達到一定水準, 則再進一步分析此 blob 的 Feret bounding box 之長和寬的資料。Feret bounding box 之示意圖如下圖 8 所示:



(a) Feret bounding box (b) 毛邊區塊之 Feret bounding box 說明圖

圖 8 區塊之 Feret bounding box

由圖 8 中可知, Feret bounding box 指的是將目標區塊整體圈住的最小外接正方形, 在影像處理函式庫 EasyAccess 中可以指定 Feret bounding box 的方向為標準(如圖 8(a))、翻轉 45 度角或是自動檢測之最佳方位(the best orientation)(如圖 8(b))。本研究在判斷毛邊瑕疵與頭膜破瑕疵的標準上, 採用的是 Feret bounding box 的長度(height)值, 這是區別毛邊瑕疵與頭膜破瑕疵的最明顯特徵。從實驗數據中得知, 毛邊瑕疵之 Feret bounding box 長度範圍落在 170 到 250 個 pixels 之間, 而頭膜破瑕疵之 Feret bounding box 長度範圍落在 55 到 132 個 pixels 之間, 在考慮兩瑕疵之形狀特徵不同(毛邊多為狹長型, 頭膜破多為短橢圓型)的情況下, 選定長度 145 為兩瑕疵的分類臨界值。

2.1.2 面裂瑕疵

面裂瑕疵之定義為鉚釘接點頭部表面的邊緣有缺口或破洞, 不同於上節毛邊與頭膜破的檢測方式是切割出亮點(灰階值 255)面積落在雜訊點面積以上且頭面正常反光區面積以下的亮點區塊, 再進一步判定其瑕疵種類, 面裂瑕

疵的檢測方式為先取得頭面正常反光區之邊界點, 再運用邊界點計算其最大內切圓和最小外接圓之半徑。在計算最大內切圓半徑(MIC)和最小外接圓(MCC)半徑的步驟上, 本研究使用粒子群最佳化演算法(Particle Swarm Optimization, PSO)來求解這兩個數學模型。經實驗結果顯示, 粒子群最佳化演算法在求解 MIC 與 MCC 上有良好的精確度和求解速度。

2.1.2.1 邊界偵測

令 R 為一個影像中像素的子集, 若 R 是一個連通性集合, 則稱 R 為影像中的區域(region)。而邊界(boundary, 又稱作邊(border)或輪廓(contour))之定義為鄰接點不在 R 區域中的像素的集合, 並且形成封閉的路徑。不同於邊界的封閉性, 邊緣(edge)通常指的是影像中灰階強度的不連續處。

邊界偵測主要目的在搜尋物件與背景之間的分界, 如果正確地將邊界點找出, 便可得到物件形狀及位置等資訊。但在搜尋的過程中, 往往容易產生一些雜訊(如斷點、分枝等), 干擾邊界偵測的正確性, 為確保此情形不至於發生, 便需要先對影像作一些局部處理。例如: 建立影像邊緣像素點的相似性: (1)產生邊緣像素點的梯度運算子之響應強度; (2)計算梯度方向的向量, 假設 P 為像素點 (x,y) 鄰域中的一點, 如果 P 之強度大小跟梯度方向都滿足預設的條件準則的話, 那麼 P 就與像素點 (x,y) 相連接。邊緣偵測方式常用的有拉普拉斯(Laplace)、索貝爾(Sobel)等運算元, 皆屬於導數濾波器(Derivative filter), 主要差別在於偵測方向數的不同。邊緣檢測演算法通常伴隨著將邊緣像素連接成有意義的邊界的邊緣連接程序(繆紹綱譯, 2003、吳成柯, 2001、Wang, M. J. J., 1994)。

本研究之邊界偵測(Boundary detection)方式是採用 8-近鄰的概念, 首先在二值化影像中先選定一個起始點, 而鄰接性的灰階值設定為

255, 然後再以順時針方式搜尋物件邊緣座標, 使物件邊緣座標呈現連續性的序列向量, 並儲存程式的路徑向量之中。

2.1.2.2 真圓度模型

本研究運用真圓度量測 (Roundness Measurement) 法於面裂瑕疵檢測上, 並使用粒子群最佳化演算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 來計算面裂鉚釘接點之真圓度。粒子群最佳化演算法為一具有模仿生物群體依賴相似特性之群體智慧 (Swarm Intelligence) 的概念方法, 且具有粒子經驗交換及傳承次代之演算模式, 其利用粒子族群具有探測 (Exploitation) 與開發 (Exploration) 的特色, 於問題空間中搜尋全域的最佳解 (蔡宗翰, 2006)。

真圓度的定義為「圓是與某一固定點等距離的所有點集合」。通常真圓度是以真圓尺寸的大小來表示, 也就是圓形工件輪廓偏離理想圓的程度。真圓度亦可用其實際輪廓相對於理想圓的徑向偏移量來表示, 亦即相對於同一圓心之最大半徑與最小半徑的差值。不同的真圓度定義用意皆在定義出理想圓周或圓心, 再用此理想圓定義出徑向距離差為其真圓度 (姜俊賢, 1993、利德源, 1987)。

真圓度量測之數學模型法則可分為四種: (1) 最小平方圓 (LSC); (2) 最大內切圓 (MIC); (3) 最小外接圓 (MCC); (4) 最小環帶圓 (MZC)。本研究依據面裂瑕疵之特性, 進一步選定最大內切圓法 (Maximum Inscribing Circle) 和最小外接圓法 (Minimum Circumscribing Circle) 為計算面裂瑕疵之真圓度量測模型。分別敘述如下:

● 最大內切圓

又可稱為塞規圓心法 (Plug-Gauge Center), 其為完全被外形所包圍而無相交之最大圓, 如圖9所示。其數學模型定義如下:

Maximize R

$$ST: [(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2]^{\frac{1}{2}} \geq R, i=1,2,\dots,N \quad (4)$$

$$R_L \leq R \leq R_U; \quad x_L \leq x \leq x_U; \quad y_L \leq y \leq y_U$$

其中 R_L , x_L 和 y_L 為 R , x_c 和 y_c 之下界; R_U , x_U 和 y_U 為 R , x_c 和 y_c 之上界。最大內切圓其真圓度誤差 e_{MIC} 可定義為沿圓周上至已知邊界點上的最大徑向距離, 如下列所示:

$$e_{MIC} = \max_{i=1,2,\dots,N} \{e_i = [(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2]^{\frac{1}{2}} - R\} \quad (5)$$

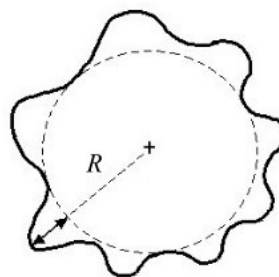


圖 9 最大內切圓

● 最小外接圓

又可稱為環規圓心法 (Ring-Gauge Center), 其為完全封閉外形而不相交的最小圓, 如圖10所示。其數學模型定義如下:

Minimum R

$$ST: [(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2]^{\frac{1}{2}} \leq R, i=1,2,\dots,N \quad (6)$$

$$R_L \leq R \leq R_U; \quad x_L \leq x \leq x_U; \quad y_L \leq y \leq y_U$$

最小外接圓其真圓度誤差 e_{MCC} 可定義為沿圓周上至已知邊界點上的最大徑向距離, 如下列所示:

$$e_{MCC} = \max_{i=1,2,\dots,N} \{e_i = R - [(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2]^{\frac{1}{2}}\} \quad (7)$$

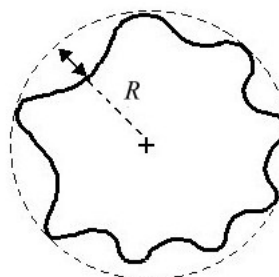


圖 10 最小外接圓

2.1.2.3 應用粒子群最佳化演算法於真圓度量測

應用粒子群最佳化演算法流程主要可分為六大步驟：(1)設定粒子個體表示方式及相關參數；(2)設定 PSO 法相關參數；(3)隨機產生各粒子的初始速度及位置；(4)評估計算各粒子之適應值函數；(5)紀錄粒子個體最佳記憶以及群體最佳記憶並運用速度更新規則更新個體速度以及位置；(6)判定是否到達停止準則。其演算流程如下所示：

步驟(1): 首先決定粒子個體的表示方式。在求解最佳化問題中，粒子最佳化演算法粒子結構可由決策變數以向量方式表示為 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ ，而本研究所欲求得之解和決策變數僅有受測物件之中心以及半徑，故由向量所表示的粒子結構設定為 $S = \{x_c, y_c, R\}$ 。其中粒子初始解為使用邊界值 R_U 、 R_L 隨機組合出來之值。

步驟(2): 運用已知偵測邊界點集合 P

$(P = \{p_i = (x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, N\})$ ，來估計最大內切圓、最小外接圓之決策變數半徑 R 與中心點 (X_c, Y_c) 的上下界值。中心點 (X_c, Y_c) 之上界值以及下界值分別由已知偵測點中之最大值以及最小值來評估，而決策變數半徑 R 之上下界則運用以下公式計算：

$$R_U = 1.5 \times r_a \quad (8)$$

$$R_L = 0.5 \times r_a \quad (9)$$

$$r_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[(x_i - x_a)^2 + (y_i - y_a)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

$$x_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (11)$$

$$y_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (12)$$

步驟(3): 設定相關參數。蔡宗翰(2006)運用五項粒子速度更新法則量測最大內切圓及最小外接圓中發現，以最大速度限制、慣性權重並用之法則可得到演算速度較快且最優之解，其中又以粒子數目設定為 20、最大速度設定為 20 以及權重設定為 0.6 之參數可得到演算速度最快且無任何變異之解。除此之外，本研究設定之最大演算迭帶數為 500，以及適應值連續未改善次數達 200 次時停止。

步驟(4): 計算各粒子之適應值函數，以判斷每個粒子的好壞。本研究求解之真圓度數學模型(最大內切圓、最小外接圓)均為非線性且具有限制式之數學模型，參考其他大多數解非線性且具限制式之數學模式中均會使用加入懲罰函數(Penalty Technique)之技巧，因此適應值函數 $F(S)$ 除了目標函數 $f(S)$ 外，另外加入懲罰函數 $p(S)$ 。在最大化問題(MIC)中，適應值函數 $F(S)$ 為：

$$F(S) = f(S) - p(S) \quad (13)$$

反之在最小化問題(MCC)中，適應值函數 $F(S)$ 為：

$$F(S) = f(S) + p(S) \quad (14)$$

其中懲罰函數定義為：

$$p(S) = \begin{cases} 0 & \text{當 } S \text{ 為可行解} \\ > 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

步驟(5): 選擇速度更新規則。本研究使用合併最大速度限制及慣性權重之方法為本研究之速度更新規則。其偽代碼如下列所述：

```

for (int i = 0; i < No. Particles; i++)
{
     $V_{id} = W \times V_{id} + C_1 \times rand_1 \times (P_{id} - X_{id})$ 
     $+ C_2 \times rand_2 \times (P_{gd} - X_{id})$ ;
    if (  $V_{id} > V_{max}$  )
         $V_{id} = V_{max}$ ;
    else if (  $V_{id} < -V_{max}$  )
         $V_{id} = -V_{max}$ ;
     $X_{id} = X_{id} + V_{id}$ ;
}

```

步驟(6): 設定停止準則。本研究同時使用兩種停止準則，當符合其中一項準則時結束演算迭代。兩種停止準則為：(1)在運算之前即設定好之最大迭代；(2)實驗中可能達到之連續失敗次數即為在演算中適應值函數連續未改善之次數。

面裂影像在經過二值化、中值濾波器、侵蝕等前處理後，接著便開始邊界搜尋的動作以取得一完整、封閉之物件輪廓(contour)邊界點，並使用此邊界點計算其最大內切圓和最小外接圓的半徑差距。為了增加真圓度量測檢查面裂瑕疵的強健度(robust)，本研究同時檢測鉚釘接點表面反光處的內外輪廓曲線，因為面裂瑕疵之定義為鉚釘接點頭面的邊緣上出現破洞或缺口，而破洞或缺口出現的位置、形狀及大小皆有一定程度的差異，因此同時檢查內外輪廓曲線可以避免因為破洞位置沒有落在邊緣上而造成的檢測誤判。因為破洞而造成鉚釘接點頭面邊緣上的不規則凹凸，對同一個輪廓曲線而言，其最大內切圓和最小外接圓之半徑長度會出現明顯的落差。由實驗結果的統計數據中可知，良好的鉚釘接點頭部之 MIC 與 MCC 的半徑差距平均為 4.2125 ± 1 pixels，而不良的鉚釘接點頭部之 MIC 與 MCC 的半徑差距平均為 $10.7271 - 3$ 和 $10.7271 + 5$ pixels，因此將判定水準定在 7 pixels 以上為瑕疵品應屬合理。

2.2 鉚釘接點反面區域之影像處理

本研究所使用的鉚釘接點樣本是由銀合金與銅所打造而成，銅面即是鉚釘接點的反面區域，在銅面下方連結一圓柱型腳座。反面區域產生的瑕疵種類共有兩項，分別為偏心瑕疵與座裂瑕疵。偏心瑕疵之定義為鉚釘頭部反面的圓中心點與圓柱型腳座之圓中心點的差距，以實際經驗來說，當兩圓心誤差大約為 0.1mm 以上時，可以判定為偏心瑕疵。座裂瑕疵之定義則是銅面上出現白色塊狀溝痕。反面瑕疵之影像分析流程如下圖 11 所示：

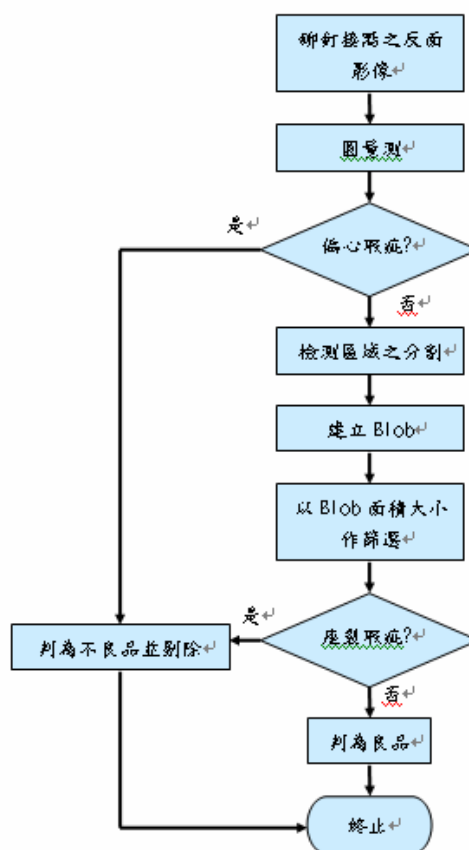


圖 11 反面瑕疵之影像分析流程圖

在紅色 LED 環型光的照射下，鉚釘接點反面區域的最外邊緣以及中心處與圓柱型腳座連結的地方，均會產生一連續的環狀反光區域。當處理偏心瑕疵時，這些環狀反光區域在影像分析判斷上比較不會造成太大影響，因為可以

由人眼事先判斷哪些灰階不連續處是鉚釘接點實際的圓邊緣，也就是我們應該作圓量測的地方，因此在執行偏心品檢項目時，不需要任何影像前處理的步驟，只需要直接量測出銅面外圓和圓柱型腳座外圓後計算兩圓心相距的像素點個數。而執行座裂品檢項目時，則需要多一道檢測區域分割之步驟，因為座裂缺陷發生的地方有可能與銅面外緣反光的區域相連結，如此一來會影響後續步驟 blob 分析的判斷正確性，所以需要一影像前處理將座裂發生可能區域和銅面外緣反光區域分開。在考慮每一顆鉚釘接點是否可能省略影像前處理的步驟下，本研究流程架構設計為每一顆鉚釘接點先進行偏心瑕疵檢測，若無偏心的不良現象發生則再進行座裂瑕疵檢測項目。在這樣的流程設計之下，就避開了每一顆鉚釘接點都必須經過影像前處理的情況，進而提升了整體的檢測效率。

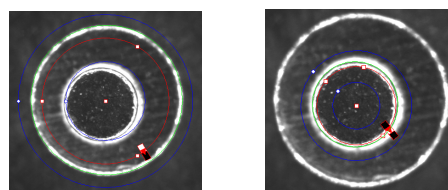
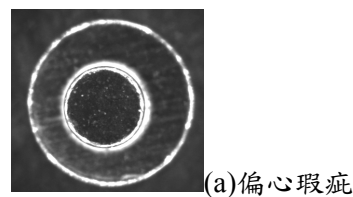
2.2.1 偏心瑕疵之檢測

偏心瑕疵意指兩個圓的圓心位置誤差 0.1mm 以上，而兩圓心分別為：鉚釘接點頭部反面之圓心與圓柱型腳座之圓心。

2.2.1.1 圓量測

由圖 12 (a) 中，可以看到鉚釘接點反面區域的最外邊緣以及中心處與圓柱型腳座連結的地方，皆會產生一連續的環狀反光區域。而我們透過大腦與人眼的判斷之後，可以確認哪些灰階不連續處是鉚釘接點實際的圓邊緣處，以此為依據並對影像處理函式庫 EasyAccess 之函數 GetMeasuredCircle 設定參數。本研究對圓量測的判定準則如圖 12(b)、12(c) 所示，圖 12 (b) 中的綠色圓圈代表了銅面的最外邊緣，而圖 12 (c) 中的綠色圓圈則代表了圓柱型腳座的最外邊緣。利用影像處理函式庫 EasyAccess 之函數 Match 和 GetMeasuredCircle，找出大的綠色圓圓心座標點與小的綠色圓圓心座標點之後，計算兩圓心相距的像素點個數，並執行校正

(calibration) 的動作，將像素點距離換算成真實世界的長度距離，即可得知此一鉚釘接點是否落入不合理的偏心誤差範圍。當兩圓心位置誤差 0.1mm 以上時，就可以判定此一鉚釘接點有偏心之不良現象產生。若鉚釘接點在圓量測階段就被判定為不良品的話，就直接由自動化設備剔除之並且不再進行後續的座裂瑕疵品檢項目。



(b) 頭部反面之圓 (c) 圓柱型腳座之圓

match

match

圖 12 偏心瑕疵檢測示意圖

2.2.2 座裂瑕疵之檢測

座裂瑕疵之定義為鉚釘接點的頭部反面有一道溝痕，由目視可看出不良。因為頭部反面的外邊緣有屬於正常情形的反光現象，與座裂瑕疵一樣屬於高灰階強度的像素區塊，在執行區塊分析的時候很容易被歸屬為同一區塊。因此為確保檢測的正確性，本研究使用環型檢測區域來防止正常反光區域的干擾。

2.2.2.1 檢測區域之分割

當鉚釘接點通過圓量測階段的檢測標準後，並不能就此判定為良品而送入良品區，因為還需要通過座裂檢測項目後才能保證此一鉚釘接點在反面區域毫無瑕疵。進行 blob 分析之前，為了讓 blob 分析結果能夠更精確，因此要先隔開銅面外緣反光區域的影像，換句話說就是在銅面上分割出一個環狀的檢測區域。分割

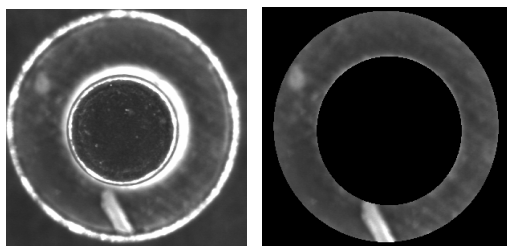
檢測區域的方法是在原始影像中由左往右、由上往下，依此順序逐一檢查每個座標的像素是否要被複製到另一個新影像中。像素點要被複製的條件是該像素點的座標位置落入我們所關心的區域，也就是說計算出該像素點的座標與頭部反面圓心座標之歐基里德直線距離 Δr_1 ，和該像素點的座標與圓柱型腳座圓心座標之歐基里德直線距離 Δr_2 ，如果 Δr_1 小於頭部反面之半徑 r_1 且大於圓柱型腳座之半徑 r_2 ，則該像素點就歸屬於我們所要檢查的範圍之中。判斷是否為檢測區域的數學公式如下：

$$\Delta r_1 = \sqrt{(x_i - x_a)^2 + (y_i - y_a)^2}, i=0,1..M; j=0,1..H \quad (16)$$

$$\Delta r_2 = \sqrt{(x_i - x_b)^2 + (y_i - y_b)^2}, i=0,1..M; j=0,1..H \quad (17)$$

$$(\Delta r_1 < r_1) \cap (\Delta r_2 > r_2) \quad (18)$$

其中 x_a, y_a 為頭部反面之圓心座標， x_b, y_b 為圓柱型腳座之圓心座標， x_i, y_i 為原始影像中的任一座標點， r_1 代表頭部反面之圓心半徑，而 r_2 代表圓柱型腳座之圓心半徑。如果條件式(18)成立，則座標點 x_i, y_i 上的灰階強度就會被複製到另一個新影像上面。檢測區域分割後的情況如圖 13 (a)、圖 13(b)所示：



(a)座裂瑕疵 (b)分割出檢測區域

圖 13 檢測區域之分割

2.2.2.1 座裂瑕疵之區塊分析

利用計算與圓柱型腳座圓心座標點相對位置的方法，從原始影像中分割出的環形檢測區域少了原始鉚釘接點影像中的正常反光現象，因此可以避免掉正常的白點影像被誤判為座裂瑕疵，提高影像分析的正確性與簡易性。當影

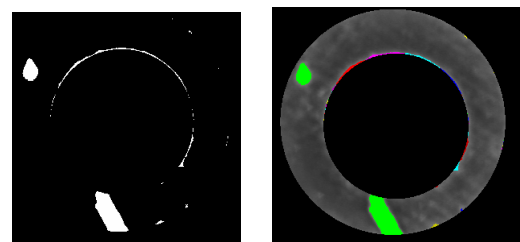
像中只剩下我們所感興趣的瑕疵可能區域時，我們使用與毛邊、頭膜破等瑕疵相同的影像處理方式- Blob 分析來分析座裂瑕疵是否發生。在使用環型檢測區的影像建立 Blob 之前，要先對環型檢測區域的影像作二值化的前處理。本研究使用的影像二值化法是最大熵值分割法 (Maximum of entropy)，最大熵值分割法主要是求出一累加機率 $F(t)$ ，使目標式 $H(F(t))$ 的熵值最大化，而此 t 值即為最佳的分割門檻值 (WONG, 1989)，為了計算出最大熵值，使用了影像的灰階分布圖以及空間域的資訊。最大熵值的數學公式說明如下：

$$F(t) = \sum_{i=0}^t P_i \quad (19)$$

$$\text{Max} H(F(t)) = -F(t) \cdot \log F(t) - (1-F(t)) \cdot \log(1-F(t)) \quad (20)$$

參數 t 代表某一特定灰階強度， P_i 代表灰階值 i 出現的機率， $F(t)$ 為小於灰階值 t 的累積機率； $H(F(t))$ 表示灰階強度為 t 時影像之熵值，其中 $1-F(t)$ 為大於等於灰階值 t 的累積機率。求得目標式(20)後，即可得到分割該張影像的最佳門檻值。

二值化後的二元影像接著開始建立 Blob 群組，再依據 Blob 的面積大小作為是否判斷成不良品的依據。圖 14 (a) 為圖 13 (b) 的二值化影像，圖 14 (b) 為圖 14 (a) 的 Blob 建立情形：



(a)二值化影像 (b)區塊群組

圖 14 座裂瑕疵之區塊分析

根據實驗結果，Blob 的面積大小界定在 200 個 pixels 以上時可以有效隔絕掉影像中的雜訊並分離出座裂瑕疵來，如果要放寬或是縮緊品質要求標準，只要調整 Blob 的像素點面積即可。

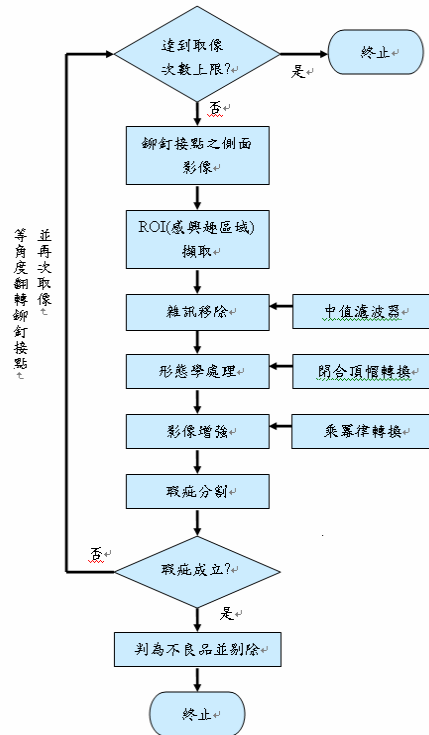
2.3 鉚釘接點側面區域之影像處理

單顆鉚釘接點如果在正面與反面檢測區域都沒有任何不良現象出現的話，就需再進一步觀察其側面區域，反之，該顆鉚釘接點被視為不良品並從檢測平台上剔除。由圖 1(c)中可以看到鉚釘接點之側面方向，但實際上影像分析的範圍僅限於鉚釘接點的頭部側面區域，頭部下方的圓柱型腳座不在大同中外貴金屬公司給予的瑕疵樣本當中。在鉚釘接點側面方向上可能產生的瑕疵種類包刮側裂瑕疵與橫紋瑕疵，側裂之不良現象定義為金屬側面有長條型刮痕，橫紋則是銀合金與銅金屬接面的地方有顯著的橫紋出現。側面瑕疵之影像分析流程如下頁圖 15 所示。

由於金屬的反光特性，拍攝鉚釘接點頭部之側面區域影像時也出現嚴重的反光現象干擾後續分析，因此必要的工作就是先去除這些門型反光地帶。本研究運用影像處理函式庫 EasyAccess 之函數 Match，可以有效的找到我們所感興趣的區域(Regions of Interest, ROI)卻沒有反光影像的干擾。在本研究僅使用一台 CCD 攝影機的情況下，一次只能拍攝鉚釘接點側面小部份的影像，為了完整檢查鉚釘接點 360 度之側面影像，所以本研究將側面影像的取像次數定為 6 次，採順時針方向拍攝，一次拍攝約 60 度的鉚釘接點側面。

2.3.1 側裂瑕疵與橫紋瑕疵之檢測

側裂瑕疵與橫紋瑕疵的影像處理步驟相同，分割出感興趣區域(Regions of Interest)，使用中值濾波器移除雜訊、閉合頂帽轉換(closing top-hat)增強瑕疵的影像強度及像素連續性以及乘冪律轉換延展瑕疵的灰階範圍後，可得到完整清晰的瑕疵影像。但在影像背景之中存在一個問題，那就是感興趣區域裡仍然會涵蓋到些微的反光區域，造成乘冪律轉換後與瑕疵之灰階強度類似。本研究利用感興趣區域的二次切割，可以解決此一問題的發生。

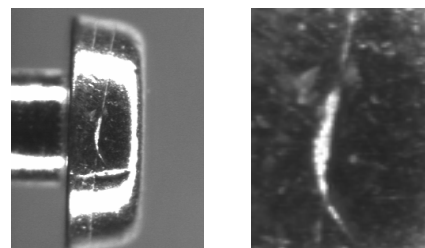


側面瑕疵之影像分析流程圖

圖 15 側面瑕疵之影像分析流程

2.3.1.1 ROI 影像擷取

本研究選定的 ROI 尺寸大小為 70*110pixels，尺寸太大的 ROI 會包含到不必要的反光影像，而尺寸太小卻又無法成功的 match 到本研究所要的檢測區域，經不同的尺寸數據實驗後，最後 ROI 尺寸大小選定為 70*110pixels，而此大小的 ROI 影像之周圍仍然不可避免會碰到些微的反光地帶，因此需要用其他的影像工具來做處理。一張原始側裂影像經過影像處理函式庫 EasyAccess 之函數 Match 執行後的結果如下圖 16(b)所示：



(a)側裂瑕疵整張影像 (b)ROI 影像放大圖

圖 16 感興趣區域之擷取

由圖16(b)可知，圖16(a)中跟著鉚釘接點輪廓所產生的反光地帶皆可以被隔絕在ROI影像之外面。

2.3.1.2 雜訊移除

利用中值濾波器(median filter)來減少影像上的隨機白點雜訊。與前面的使用相同，本節也採用 3×3 中值濾波器。

2.3.1.3 閉合頂帽轉換

側面的 ROI 影像中含有金屬反光造成的白點、側裂瑕疵造成的連續白點和雜訊白點，在全部的瑕疵種類裡算是一項比較不好處理的部份。本研究利用形態學中的閉合頂帽轉換(closing top-hat)來增強側裂瑕疵的影像強度及像素連續性。閉合頂帽轉換的主要目的是增加缺陷區域內的灰階強度和降低缺陷區域外的灰階強度。換句話說，閉合頂帽轉換運算就是讓缺陷區域內的灰階值在整張影像中突顯出來，要達到此一目的方式就是將原始影像經過形態學的閉合運算後，新影像再與原始影像作相減運算。所謂一幅影像的閉合頂帽(top-hat)轉換，記為 h ，相關公式定義如下：

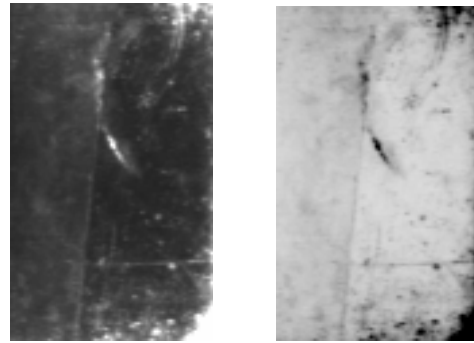
$$h = f - (f \bullet b) \quad (21)$$

$$f \bullet b = (f \oplus b) \ominus b \quad (22)$$

其中 h 為經過閉合頂帽轉換後的新影像， f 為原始影像， b 代表結構元素。 $f \bullet b$ 的意思為原始影像 f 被結構元素 b 的閉合運算，而閉合運算就是將 f 用 b 膨脹，再用 b 侵蝕。起始膨脹消除了黑暗細節並使影像加亮，後面的侵蝕則使影像變暗，並且不會重新引入被膨脹消除的細節。閉合頂帽轉換之效果如下圖 17。

2.3.1.4 乘冪律轉換

影像增強技術的主要目的是處理一幅影像，使其結果對特定的應用而言比原始影像更合用。影像增強技術分為兩大類：空間域法



(a)ROI 之原始影像 (b)使用閉合頂帽轉換後

圖 17 閉合頂帽轉換之效果

(spatial domain)和頻域法(frequency domain)，空間域指的是影像平面本身，這一類的方法皆為直接處理影像中的像素。而本研究使用的是空間域處理中的乘冪律轉換，乘冪律轉換是灰階影像之強度轉換的基本工具。

乘冪律通常用在影像擷取、列印和顯示的多種裝置器上，例如陰極射線管(CRT)裝置上有一個灰階強度對電壓的響應，它是乘冪(gamma)大約從 1.8 到 2.5 變動的乘冪函數，而用來修正此乘冪律響應現象的程序叫做 gamma 校正(gamma correction)。除了 gamma 校正外，乘冪律非線性轉換對一般影像的對比度增強很有用，可以增強背景中偏亮或偏暗的細節。乘冪律轉換之基本形式如下：

$$S = C \cdot r^\gamma \quad (23)$$

其中 r 為輸入灰階， s 為輸出灰階， c 跟 γ (gamma)為大於零的常數。參數 gamma 表示轉換曲線的形狀，此曲線用於將原始影像中的強度值映射到新的影像。如果 gamma 值小於 1，則映射被加權至較高(較亮)的輸出值。如果 gamma 值大於 1，則映射被加權至較低(較暗)的輸出值。如果 gamma 值等於 1，則為線性映射，只是用來保存影像的完整性。下圖 18 顯示各種 gamma 映射曲線：

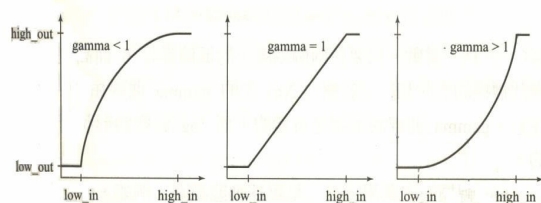
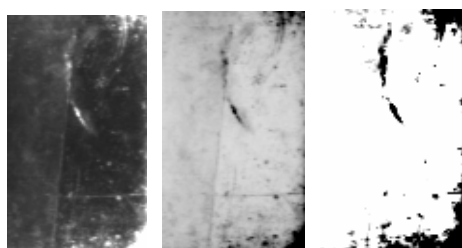


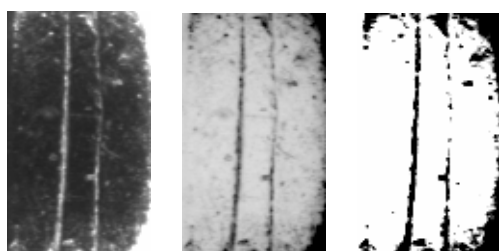
圖 18 不同 gamma 值的映射曲線

上圖中之 X 軸參數為 low_in 與 high_in，這是表示 low_in 以下、high_in 以上的灰階數值會被剪平，變成一固定的常數值，而此常數值就是由 Y 軸參數 low_out、high_out 來決定。至於落在 low_in 與 high_in 區間灰階值則是被延展至整個 low_out 與 high_out 之間的灰階範圍，換句話說，這種處理對於強調一感興趣的灰階強度帶是很有幫助的。本研究之乘幂律參數設定：low_in 為 140.25，high_in 為 165.75，low_out 為 0，high_out 為 255。下圖為側裂瑕疵和橫紋瑕疵經過閉合頂帽轉換處理和乘幂律轉換處理的一系列影像：



(a)側裂瑕疵 (b)閉合頂帽轉換 (c)乘冪律轉換

圖 18 側裂處理的一系列影像



(a)橫紋瑕疵 (b)閉合頂帽轉換 (c)乘冪律轉換

圖 19 橫紋處理的一系列影像

3. 實驗結果

本研究根據第二節所介紹之研究方法及流

程、理論分析，以 C++ 語言進行程式編寫並透過 Borland C++ Builder 6.0 作為程式編輯的工具，建構出一圖形使用者介面(GUI)應用程式執行於 Pentium IV 3.2GHz、512 M RAM 的個人電腦上，建立一套鉚釘電氣接點之檢測系統，透過程式執行可將瑕疵找出並判斷其瑕疵項目。在影像擷取上，使用 Eurysis Picclo proII 擷取卡和環形紅光 LED，在完全無其他室內光源的情況下拍攝，取得 640×480 之灰階影像。使用者視窗程式介面如圖 20 所示：

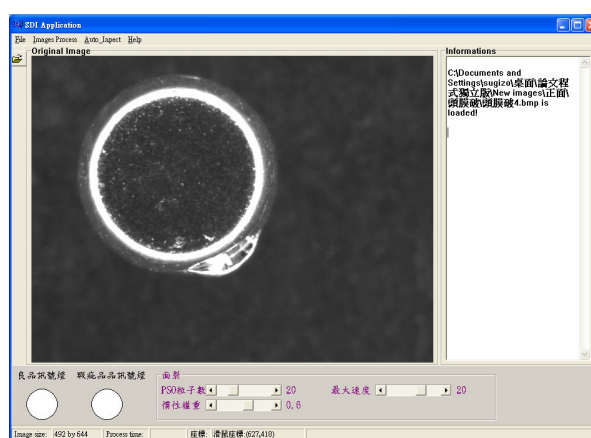


圖 20 程式介面

3.1 參數之設定

關於各瑕疵之特徵數據及瑕疵判定準則分別敘述如下

1. 毛邊與頭膜破之 Feret bounding box 長度 (height):
考慮兩瑕疵之形狀特徵不同(毛邊多為狹長型，頭膜破多為短橢圓型)的情況下，目前選定長度 145 為兩瑕疵的分類臨界值。
2. 良品與面裂之 MIC、MCC 之半徑差距:
(a) 良品:平均4.213 (單位:pixels)
(b) 面裂:平均10.727

良品與面裂之最大內切圓和最小外接圓之半徑差距會出現明顯的落差。由統計平均數據中可知，良好的鉚釘接點頭部之 MIC 與 MCC 的半徑差距平均為 4.2125 ± 1

pixels，而不良的鉚釘接點頭部之 MIC 與 MCC 的半徑差距平均為 $10.7271 - 3$ 和 $10.7271 + 5$ pixels，目前判定水準定在 7 pixels 以上為瑕疵。

3. 兩圓心之偏心誤差：

判定水準由目前的數據暫定為 7 pixels 以上為瑕疵。

4. 座裂之區塊面積：

判定水準由目前的數據暫定為 200 pixels 以上為瑕疵。

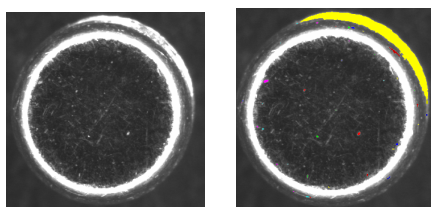
5. 側裂與橫紋瑕疵：

結構元素設定：正方形(square)、半徑 70

乘幂律參數設定：low_in 為 140.25，high_in 為 165.75，low_out 為 0，high_out 為 255。

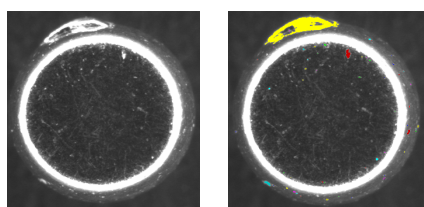
3.2 實驗影像

本節整理出七種瑕疵的實驗影像，每項瑕疵各列舉一個影像樣本。左邊圖為瑕疵之原始影像，右邊圖為影像分析後之檢測完成影像。



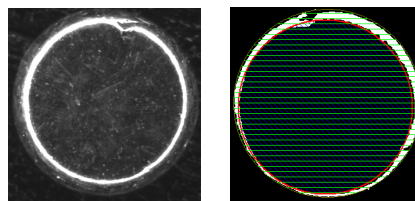
(a)毛邊 (b)分割出毛邊 blob

圖 21 毛邊瑕疵



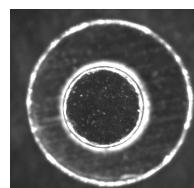
(a)頭膜破 (b)分割出頭膜破 blob

圖 22 頭膜破瑕疵

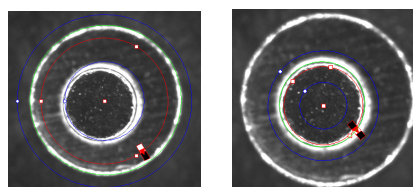


(a)面裂 (b)計算 MIC 與 MCC

圖 23 面裂瑕疵



(a)偏心

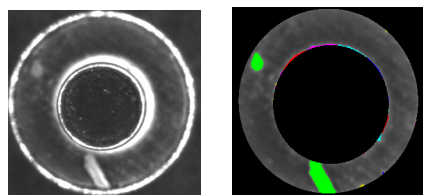


(b)頭部反面之圓 (c)圓柱型腳座之圓

match

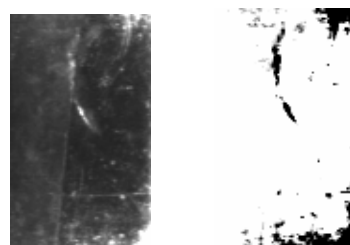
match

圖 24 偏心瑕疵



(a)座裂 (b)分割出座裂 blob

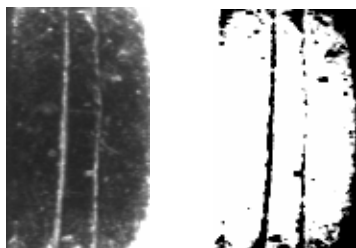
圖 25 座裂瑕疵



(a)側裂

(b)影像增強

圖 26 側裂瑕疵



(a)橫紋 (b) 影像增強

圖 27 橫紋瑕疵

3.3 各瑕疵之檢測正確率

本視覺檢測系統總共測試了196張有瑕疵的電器接點影像，並整理出各瑕疵的檢測正確率於表2 之中。然而，因為電器接點上的微塵不易去除乾淨以及一些不屬於瑕疵的金屬表面現象也會折射大量的光線而造成假的瑕疵，使得瑕疵判定上不容易找到一個適用所有可能情況的準則，進而影響了系統檢測瑕疵的正確率。

表2.

項目	測試樣本數	檢測正確率(%)
(1) 毛邊	10	100
(2) 頭膜破	51	100
(3) 面裂	10	70
(4) 偏心	38	100
(5) 座裂	33	91
(6) 側裂	54	93

4. 結論

本研究發展出一套鉚釘電氣接點之視覺檢測系統，提供完善且高穩定之使用者介面，協助使用者能快速地偵測瑕疵種類。其中三個子系統分別運用不同的影像處理技巧，如：中值濾波器(median filter)、侵蝕(erosion)、區塊分析(blob analysis)、邊緣檢測(boundary detection)、頂帽轉換(closing top-hat)、乘冪率轉換 (gamma transformation) 等等，皆成功辨識出寬 3mm、高 2.6mm 之鉚釘電氣接點上的表面瑕疵。本研

究所建立的鉚釘電氣接點之視覺檢測系統，可以提供企業一個客觀並且標準化之檢測品質，排除人工目視分類瑕疵的主觀性以及人工目視檢測容易感到疲累、檢查能力隨時間遞減的種種非自動化之缺陷。

5. 參考文獻

- [1] 繆紹綱譯，**數位影像處理**，台北市：高立圖書有限公司，2003。
- [2] 吳成柯；程湘君；戴善榮；雲立實，**數位影像處理**，台北市：儒林圖書有限公司，2001。
- [3] Sergios, T., and Konstantinos, K., **Pattern Recognition**, Academic Press, 2003.
- [4] R. J. Martin, "Automated Inspection of Hot Steel Slabs", U.S. Patent 4,561,104, Dec 24, 1985.
- [5] Elias N. Malamas, Euripides G.M. Petrakis, Michalis Zervakis, Laurent Petit, Jean-Didier Legat, "A survey on industrial vision systems, applications and tools," *Image and Vision Computing*, Vol. 21, 2003, pp.171 – 188.
- [6] R. T. Chin, "Automated Visual Inspection :1981 to 1987*," *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Vol. 41, 1988, pp.346 – 381.
- [7] K. C. WONG, MEMBER, IEEE and P. K. SAHOO, "A gray-level threshold selection method based on maximum entropy principle," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 19, No.4, 1989.
- [8] A. K. Jain, R. P. W. Duin, J. Mao, and M. Senior, "Statistical Pattern Recognition: A Review," *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol:22, no:1, 2000, pp.4-37.

- [9] W. Y. Wu, M. J. Wang, and C. M. Liu, "Automated Inspection of printed circuit boards through machine vision," *Computers in Industry*, Vol. 28, 1996, pp.103-111.
- [10] B. R. Suresh, R. A. Fundakowski, T. S. Levitt, and J. E. Overland, "A real-time automated visual inspection system for hot steel slabs," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **PAMI-5**, No.6, 1983, pp.563-572.
- [11] H. S. Don, K. S. Fu, C. R. Liu, W. C. Lin, "Metal surface inspection using image processing techniques," *IEEE Trans, SMC-14*, 1984, pp.139-146.
- [12] Okawa, Y., "Automated Inspection of surface defections of cast metals," *Comput. Vision, Graphics and Image Process*, Vol. 25, 1984, pp.89-112.
- [13] A. L. Amet, and A. Ercil, "Texture Defect Detection using domain co-occurrence matrices," *IEEE Southwest Symposium, Image Analysis and Interpretation*, 1998, pp.205-210
- [14] B. G. Batchelor, S. M. Cotter, "Detection of cracks using image processing algorithms implemented in hardware," *Image and Vision Comput*, 1983, pp.21-29.
- [15] Wong B. K., M. P. Elliott, C. W. Rapley, "Automatic casting surface defect recognition and classification," *IEE Colloquium on Application of Machine Vision*, 1995, pp.10/1-10/5.
- [16] Wang, M. J. J., Wang S.C., Liu C. M. and Wu W. Y., "A new edge detection method through template matching," *Pattern Recognition Artificial Intell*, Vol.8, No.4, 1994, pp.898-917.
- [17] A. M. Wallace, "Industrial application of computer vision since 1982," *IEE PROCEEDINGS*, Vol. 135, No.3, 1988.
- [18] T. Matsubara, T. Toyota, and A. Fujiyama, "Hot slab surface inspection by laser scanning method," *Proc. SPIE, Optical Technique for Industrial Inspection*, 665, 1986.
- [19] Ahang, J. and O. Shunichiro, "Texture image segmentation method based on wavelet transform and neural", *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Part 5(of 5), 1998, pp.4595-4600.
- [20] W. Xian, Y. Zhang, Z. Tu, and E. L. Hall, "Automatic visual inspection of the surface appearance defects of bearing roller," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1990, pp.1490-1494.
- [21] T. Piironen, O. Silven, M. Pietikainen, T. Laitinen, and E. Strommer, "Automated visual inspection of rolled Metal surfaces", *Machine Vision Applications*, 1990, pp.247-254.