

應用機器視覺進行精密鋼珠表面瑕疵檢測

薛家涿
天工精密

alwaysbepositive@gmail.com

陳義吉
天工精密

yeigei.chen@tankong.com

徐亞琛
天工精密

rex@tankong.com

摘要

精密鋼珠是傳動系統的主要元件之一，例如工具機業中高速主軸所使用的精密軸承，鋼珠即扮演著重要的腳色，因此一顆品質良好的鋼珠決定了機械設備的精度。鋼珠表面瑕疵會讓運轉中的機構產生振動，進而影響機械性能和壽命，而鋼珠瑕疵主要有表面凹陷、刮痕、生鏽及金屬疲勞所產生的破裂，這些瑕疵都是需要被精密檢測，才能確保鋼珠的品質和精度。

本研究目的主要是應用機器視覺對精密鋼珠表面瑕疵做分析和檢測。鋼珠本身為球體因此有多個二維平面，檢測時利用工業用相機取多張二維影像，利用影像處理技術進行影像強化分辨瑕疵特性，並設計出一套客製化表面瑕疵檢測系統，包含自動化檢測機構和軟體及其人機介面，以達成自動化設備之整合。

關鍵字：電腦視覺檢測、精密鋼珠、影像處理、影像強化

壹、前言

影像處理早期應用於報紙業。1960年初期，電腦首次執行影像處理並開始應用於太空計畫，於1964年將太空船航行者號傳回的月球圖檔進行影像處理，用以校正裝在太空船上攝影機產生的影像失真。在1970年代開始於醫學影像在電腦斷層攝影術(CAT)之診斷判定。目前機器視覺應用於生產線上，主要是將產品利用輸送帶送進檢測站中，進行取像、特徵辨識後，在分類器中判定有瑕疵的項目，檢測流程如圖1所示。

鋼珠製造流程主要是依規格選擇適當的鋼種線材，事前檢查材質後，依照不同尺寸參數予以鍛造，經鍛造機鍛造成球形粗胚，再經過初步研磨去除毛邊後，送至熱處理爐反覆的淬火及回火，增加鋼珠的機械性能，達到客戶需要的標準。在此階段的鋼珠表面非常粗糙，金屬反射性不佳，一般稱為黑珠，之後依客戶規格所需的精密等級，進行細研磨、精研磨，最後將鋼珠表面拋光及清洗後，完成成品。鋼珠精度通常以級數來表示，級數越小表示精度越佳。由於鋼珠本身非常細小，因此在加工時每道程序皆須嚴格控管，鋼珠品質才能達到一致性。鋼珠的製造流程如圖2所示。

鋼珠由於製做繁複每個工序環環相扣，在製程中鋼珠表面容易產生粗糙、坑洞等情形，若經過研磨處理後，坑洞尺寸較大者仍無法完全研磨消除時，將會在鋼珠表面上出現洞傷等瑕疵。且在研磨時也會因為研磨角度差異或鋼珠韌性與硬度不同，造成許多鋼珠表面上有各種不同種類刮傷，鋼珠刮傷種類如圖3所示。本研究主要是以機器視覺針對瑕疵做判定及分類後，再將結果回饋至製程加工中，做為製程的管控和改善。

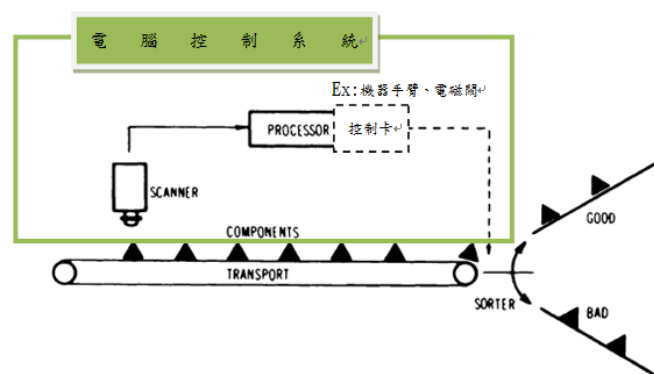


圖1：自動化影像檢測流程



圖2：鋼珠製造流程

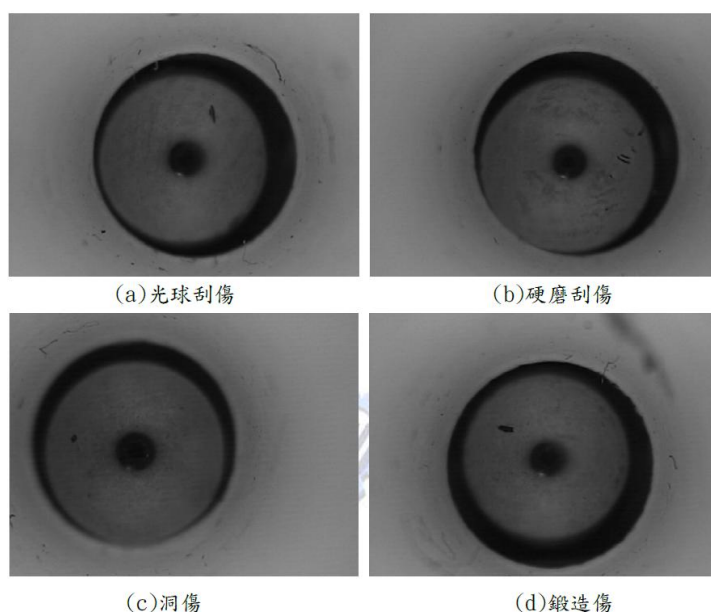


圖3：鋼珠瑕疵種類

貳、研究方法

一、文獻探討

由於鋼珠的幾何形狀為球體，若採取平面角度觀察，可擷取出許多不同角度之畫面來表示一整顆鋼珠，而鋼珠金屬材質對外在環境的反射影像也是需克服之課題，因此本研究針對此兩項特點進行文獻之探討。

(一)、金屬表面檢測

鋼珠其金屬特性為具有反光性質，因此如何擷取一張好的影像對於後續影像處理將有幫助，則本節針對金屬物體檢測進行文獻探討歸納整理如下：

1994 年	Garcia et al	利用雷射光線打入鋼材以達到照明效果，並於反射角度位置處放置鏡頭取像，以進行鋼材瑕疵檢測，如此可解決光照鋼片所產生的反射影像。
2002 年	Sakurai	應用影像比對之技術於 IC 之 Hot-Al-Cu 導線層瑕疵品檢測，透過調整燈光照明強度，以分離雜訊與不良品影像比對後之灰階分佈，從不同實驗中找出最佳之門檻值，但假如雜訊與影像比對之灰階不容易分離，則辨識率會降低。
2008 年	R.Medina	金屬特性之產品需考慮五種不同情形：油脂存在、檢測速度、數據之準確及足夠性、瑕疵種類特性、金屬表面反射狀況，Medina 表示利用二維 Gabor 可達到良好結果。

(二)、機器視覺於鋼珠瑕疵分析

應用機器視覺檢測鋼珠瑕疵有別於傳統檢測方式，具有效率高、快速、非接觸及可達鋼珠全檢的目的，本節針對機器視覺於鋼珠瑕疵分析進行文獻探討歸納整理如下：

2008 年	J.M Zhou and Y.Yang	建議在鋼珠影像檢測系統需有特定步驟：第一步為根據缺陷所產生之不同之灰階度利用二值化將影像分割，第二步利用連接組件標籤(Component labeling)演算法將周邊四連通及八連通方式連接周邊標籤，第三步為特徵之擷取以達到辨識，第四步為計算幾何特徵及不變矩特徵，最後利用倒傳遞類神經演算法來分類鋼珠瑕疵，利用 1000 張鋼珠瑕疵影像進行檢測，實驗結果表示，表面缺陷有 95%已經正確分類。
2008 年	Yanling Zhao	提出一利用鋼珠特徵擷取方法，利用鋼珠面積特徵及直線邊緣結合去擷取需要區域並利用雙二值化演算法，將瑕疵點做連通法則擷取特徵區域後，抓取瑕疵重心以計算面積大小、外形輪廓進行瑕疵判斷，並建立一送珠機構，其系統可於 1 分鐘內檢測 60~70 顆鋼珠數量。
2010 年	謝承諭	利用鋼珠特性結合創新構思問題解決法(TRIZ)建立一套自動化光學鋼珠檢測系統，以八台工業相機提高鋼珠的拍攝次數，將檢測次數提高並提高辨識準確率以解決鋼珠無法完全辨識之問題。並利用電腦控制馬達及電磁閥系統，設計供珠及排珠系統，測試 400 顆良品及 400 顆不良品鋼珠進行檢測，結果準確率高達 92.5%。

二、研究架構

本研究的主要架構分為鋼珠檢測機台及瑕疵檢測軟體兩部分，鋼珠檢測機台架構如圖 4 所示，首先將研究用鋼珠分群為瑕疵珠及良品珠，並將鋼珠排序後進入分珠系統引流至取像區域，再利用 CCD 拍攝鋼珠影像，每顆鋼珠將經過側轉機構確保鋼珠取像完整，影像處理後之結果以排珠分珠系統分類至分類盒中。影像處理程式主要利用 C++ Builder 6 撰寫，配合影像處理程式 eVision 內所提供之函式庫，並根據文獻中對金屬材質影像處理理論，測試鋼珠影像處理結果後，尋找最適合之影像處理演算法進行分析與檢測，並根據所得結果設定瑕疵臨界值作為判斷依據，進一步建立資料庫紀錄每一批鋼珠之瑕疵分類數量，將結果回饋至製程上，以改善鋼珠製造流程。

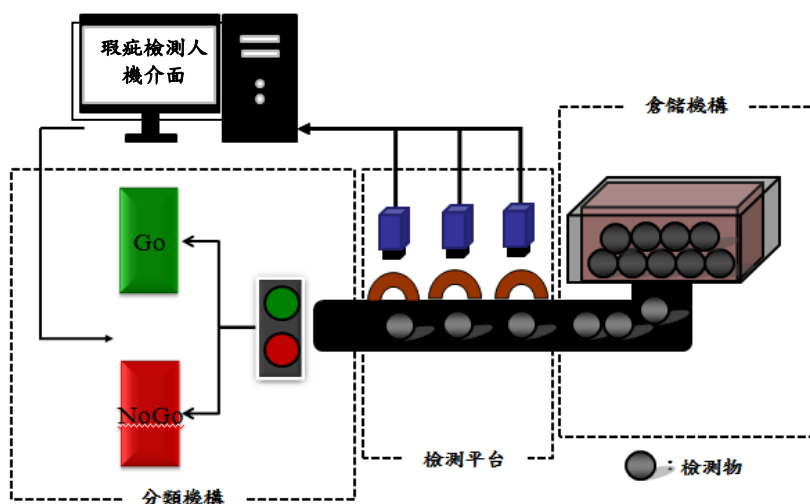


圖 4：鋼珠檢測機台架構

三、鋼珠取像原理

鋼珠本身為一球體，表面上有曲率變化，其光線行進於球體的表面和一般平面的光學檢測不同，反射情形如圖 5 所示，圖中利用光的人射角等於反射角原理，以各用不同角度光線射入鋼珠表面，綠線為可擷取到鋼珠之影像區域，紅色則為無法擷取之區域，通常取一次鋼珠影像趨近於整顆鋼珠的 37%。

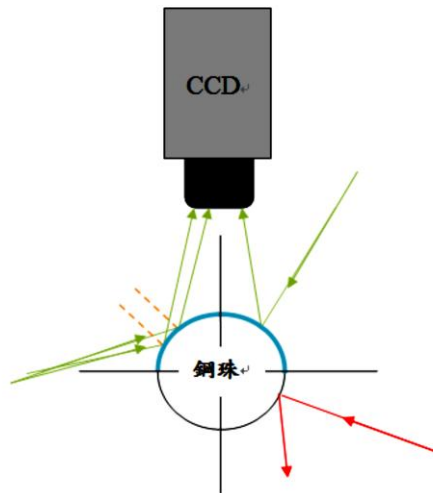


圖 5：鋼珠光線反射路線

再者，由於鋼珠的金屬表面性質會反射外在之環境，造成取像失真、因此需利用一柱狀遮罩達到照明之效果，並在外面架設光源讓所拍攝的鋼珠影像均勻，遮罩之外觀示意圖如圖 6 所示。

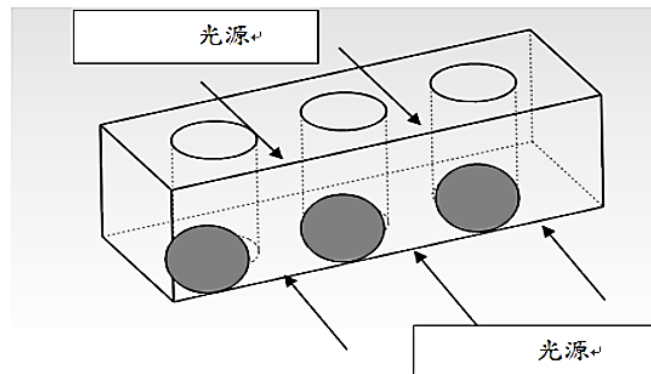


圖 6：遮罩外觀

四、鋼珠檢測機構設計

為了確保鋼珠能夠準確且有序的通過光學檢測系統進行瑕疵檢測，本研究設計一款可確保鋼珠能穩定且確實的落入旋轉盤面的進珠系統，透過精密減速模組的帶動將槽內的鋼珠穩定且有序的輸送至光學檢測模組的檢測區，並在槽內持續且穩定的單一方向滾動，方便 CCD 進行影像的擷取。為了弭補單一方向滾動 CCD 無法全面擷取鋼珠表面影像之不足，另設計一側轉機構產生所需側向力讓鋼珠轉動一角度後，再進行另一方向的滾動，完成 CCD 所需的鋼珠全面影像擷取，檢測機構設計如圖 7 所示。

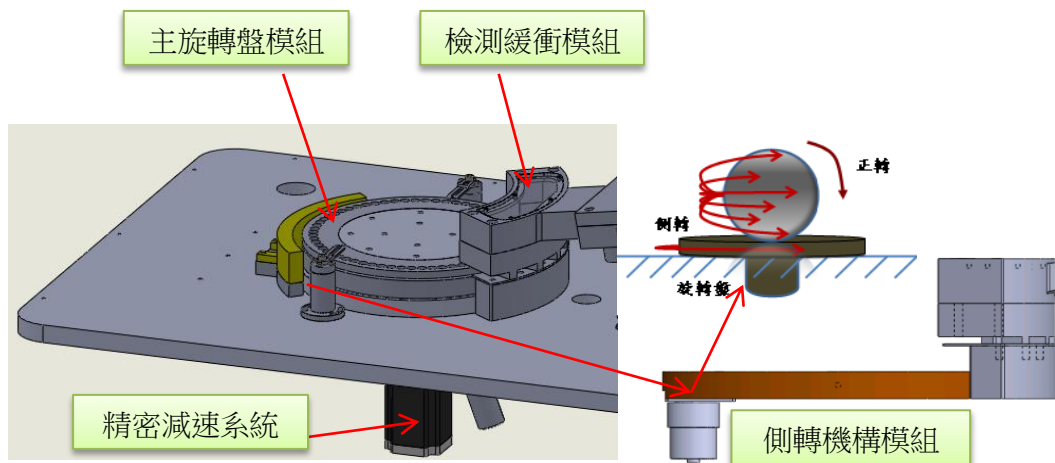


圖 7：鋼珠檢測機構

五、鋼珠檢測方法

(一)、形態學演算法

本研究透過不同之型態學演算法，包含膨脹(dilation)、侵蝕(erosion)、斷開(opening)、閉合(closing)、頂帽轉換(white top hat)及底帽轉換(black top hat)執行鋼珠影像瑕疵之判斷，以下將針對運用演算法做介紹：

1、侵蝕(erosion)：

侵蝕為一種細線化或縮減之運算法，在一個中的集合A和B，以B之遮罩侵蝕A集合，記為 $A \ominus B$ 其定義為：

$$A \ominus B = \{z | (B)_z \subseteq A\} \quad (1)$$

研究中選擇一鋼珠影像，此鋼珠左上角有一瑕疵點，經過4x4之遮罩進行侵蝕處理後，黑點會被處理消失，使瑕疵消除，如圖8中顯示結果。

2、膨脹(dilation)

不同於侵蝕，膨脹將二值化影像中的物件「成長」或「厚化」。假定A與B為 Z^2 中兩個集合，則將A經由B膨脹之代號為 $A \oplus B$ ，定義為：

$$A \oplus B = \{z | (\hat{B})_z \cap A \neq \emptyset\} \quad (2)$$

研究中選擇一鋼珠影像，利用遮罩2x2以膨脹形態學處理，將鋼珠細微瑕疵或中心黑圓厚化，如圖9所示。

3、斷開(opening)

斷開演算法通常使物體輪廓平滑，將細部的狹部消除和截斷載的細頸。其定義為：

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (3)$$

因此，集合A被B斷開就是A被侵蝕，在將結果對B膨脹。斷開運算為假定將結構元素B看成一個「滾球」。則A。B的邊界當B圍繞著邊界的內部滾動時，距最遠達到A的邊界的B內的點所建立，圖10為鋼珠以8x8斷開之影像。

4、閉合(closing)

閉合演算法通常也有平滑之效果，但主要應用將窄的中段部分和長細缺口連接起來，消除小洞、填補輪廓上的缺口。其定義為：

$$A \cdot B = (A \oplus B) \ominus B \quad (4)$$

以上定義A被B閉合，即是A被B膨脹之後再被B侵蝕，圖11為鋼珠以8x8斷開之影像。

5、頂帽或白色頂帽轉換(white top hat)

將原影像和斷開後影像相減產生所謂的頂帽(top-hat)轉換。一張灰階影像f的頂帽轉換(top-hat transformation)定義成f減去其斷開：

$$T_{\text{hat}}(f) = f - (f \circ b) \quad (5)$$

頂帽轉換用於在一暗背景的亮物件。圖12顯示頂帽轉換後結果，經由頂帽可將鋼珠上小黑點區域全部擷取出來。

6、底帽或黑色頂帽轉換(black top hat)

將原影像和閉合後影像相減產生所謂的底帽(bottom-hat)轉換。一張灰階影像f的底帽轉換(bottom-hat transformation)定義成f的閉合減去f：

底帽轉換法則通常用於亮背景暗物件。圖13顯示底帽轉換結果，影像相減後可得到閉合後與原圖增加之區域。

$$B_{\text{hat}}(f) = (f \cdot b) - f \quad (6)$$

(二)、影像門檻值演算法

本次研究所使用的影像二值化法為最大熵值分割法(Max-entropy)，最大熵值分割法目標為算出累加機率 $F(t)$ ，使目標式 $H(F(t))$ 的值最大化，需使用影像灰階分布圖和空間域之資訊。下列式子中 P_i 代表影像灰階值 i 出現機率，參數 t 代表某一特定灰階強度， $F(t)$ 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。其目標中的 t 表示當值最大化時分割門檻值之數值，經由最大熵值數學式子說明如下：

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

$$\text{Max } H(F(t)) = -F(t) \cdot \log F(t) - (1 - F(t)) \cdot \log(1 - F(t)) \quad (7)$$

經由上述式子，即可得到分割該張影像的最佳門檻值。

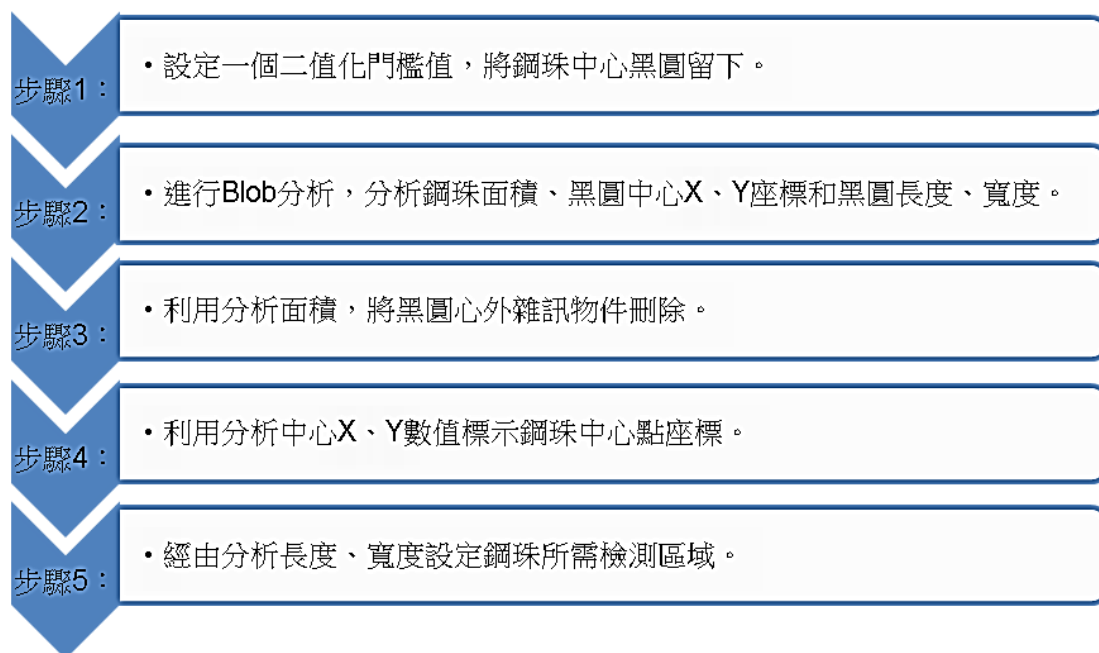
(三)、鋼珠瑕疵影像處理流程

1、設定鋼珠ROI區域

在CCD擷取影像後，每一影像均有三顆鋼珠，在影像處理前，首先測量標準鋼珠之大小，依照鋼珠大小及鋼珠相關位置，設定每一顆鋼珠ROI框架，可調整大小且可將鋼珠影像做位置調整後，擷取單顆鋼珠影像，如圖14所示。

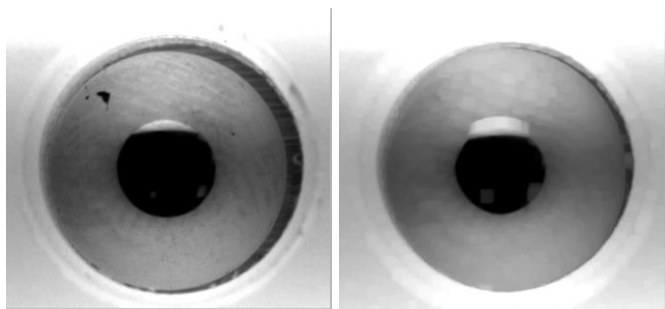
2、鋼珠定位

研究中擷取單顆影像後，於每顆鋼珠進行定位，並依照以下步驟定位：



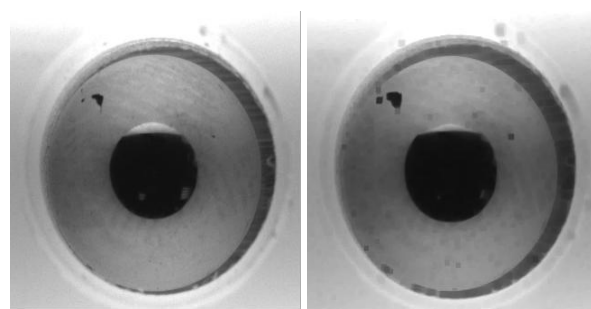
3、瑕疵檢測

經由設定檢測區域後，將區域內利用頂帽轉換以擷取瑕疵之面積，如圖15中較有差異性之區塊為瑕疵面積。擷取鋼珠瑕疵後，利用最大熵值分割法(Max-entropy)設定二值化參數如圖15(b)，根據廠商規定調整瑕疵檢驗寬鬆值，依照Blob分析物件值，計算物件大小、數量及幾何形狀作為判斷鋼珠是否成不良品的依據，如圖15(c)所示。



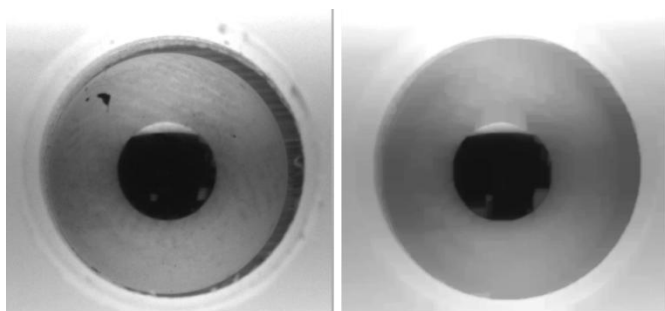
(a)原鋼珠影像 (b)遮罩4x4侵蝕

圖8：鋼珠侵蝕影像



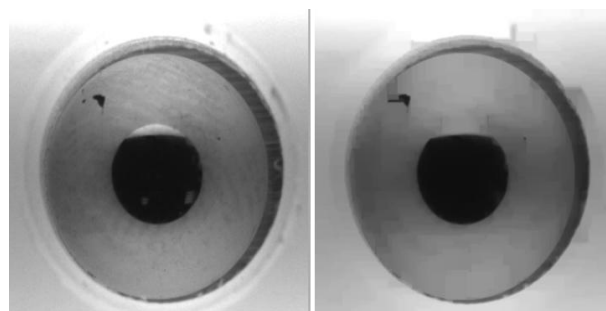
(a)原鋼珠影像 (b)遮罩 2x2 膨脹

圖9：鋼珠膨脹影像



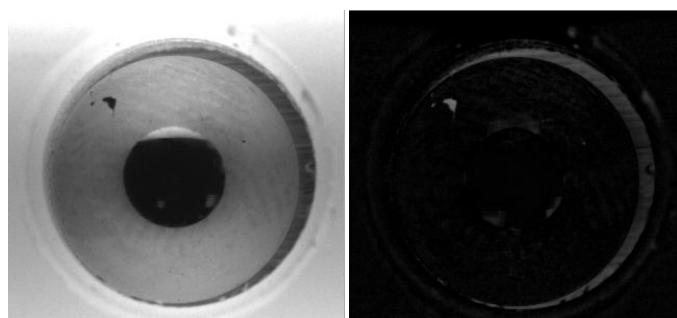
(a)原鋼珠影像 (b)遮罩 8x8 斷開

圖10：鋼珠斷開影像



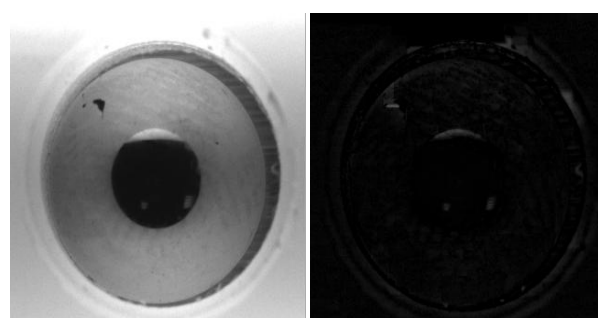
(a)原鋼珠影像 (b)遮罩 8x8 閉合

圖 11：鋼珠閉合影像



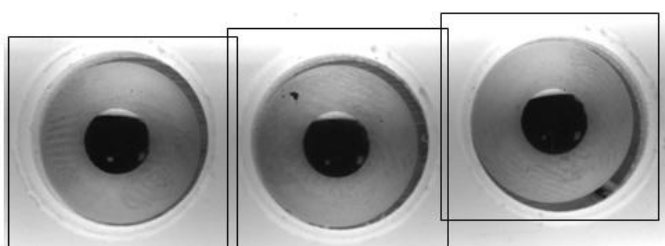
(a) 原鋼珠影像 (b) 遮罩 8x8 頂帽轉換

圖 12：鋼珠頂帽轉換影像

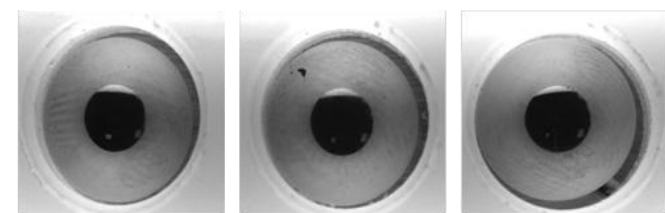


(a)原鋼珠影像 (b)遮罩 8x8 底帽轉換

圖 13：鋼珠底帽轉換影像

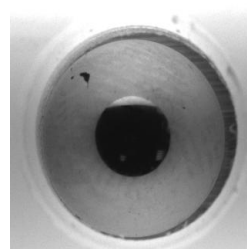


(a) 設定 ROI 區域框架

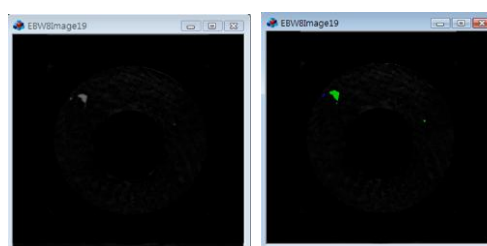


(b)左邊鋼珠影像(c)中間鋼珠影像(d)右邊鋼珠影像擷

取圖 14：鋼珠 ROI 區域



(a)鋼珠影像



(b)頂帽轉換影像 (c)Blob 最大熵值分割法

圖 15：鋼珠瑕疵檢測

(四)、瑕疵檢測人機介面程式撰寫

本研究針對鋼珠瑕疵以機器視覺技術進行影像處理程式撰寫，所使用的程式語言為C++ Builder 6搭配影像處理程式eVision內所提供之函式庫進行量測系統人機介面程式撰寫，根據瑕疵判定標準，進行瑕疵特性分析比對，進而判定良品與不良品。

1、使用者登入介面

為了管理操作者和保護檢測系統安全性，使用者登入管理保護介面為進入操作系統第一步驟，其目的在確保檢測過程的正確性和單一性避免人為的隨意操作修改，於介面的第一行為輸入使用者之帳號與批次序號，第二行則為使用者之通行密碼，操作介面如圖 16 所示。

2、使用者操作介面

使用者操作管理介面的規畫，其目的在協助使用者確認系統是否正常拍攝與檢測鋼珠。由上、下兩部份組成，如圖 17 所示，上半部畫面由兩台 CCD 相機所組成，藉由鋼珠旋轉機構和側轉機構的帶動，使鋼珠順利前進翻轉，再分別對鋼珠進行不同位置之取像，找出球體表面可能出現的瑕疵，每台相機可同時對三顆鋼珠進行影像擷取；下半部則呈現一台相機所能拍攝的鋼珠數量，每台相機能對單顆鋼珠進行五次的取像與檢測，系統上的兩台相機，可針對單顆鋼珠進行十次的檢測，達到最佳化的檢測。

3、鋼珠檢測監控介面

鋼珠檢測監控介面主要功能為即時監控鋼珠檢測情境，並將資訊及時回饋至檢測系統上形成一檢測迴圈，其功能如圖 18 所示，程式介面包括：檢測模式設定、檢測功能、鋼珠計數功能與檢測相關資訊。檢測模式設定可分為一般檢驗、嚴格檢驗與特殊檢驗三種，其功能主要是根據鋼珠級數做為衡量標準，假設鋼珠級數越高，所需要檢測的品質嚴謹度也越高，其功能如圖 18 中 3 所示；而基本檢測功能則是方便使用者進行一般功能之操作，包括自動檢測、管理者登入進行鋼珠檢測統計數據的查核，其功能如圖 18 中 4 所示；而鋼珠計數功能則負責於螢幕呈現目前檢測的批次訂單客戶、批次、總檢驗數、好球數與壞球數，讓使用者直接了解此批次鋼珠的品質狀況與製程的優劣，其功能如圖 18 中 5 所示；最後在檢測相關資訊中，則提供檢測機台相關資訊，包括感測器、I/O 卡、馬達以及送珠系統的即時狀況，其功能如圖 18 中 6 所示。

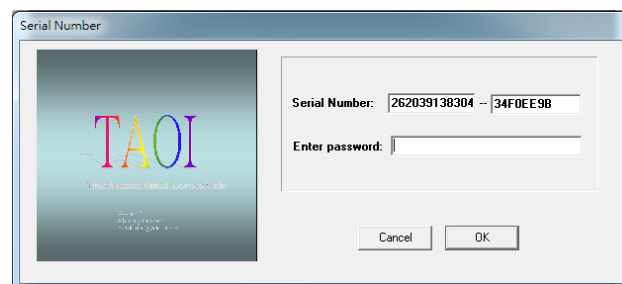


圖 16：使用者登入介面



圖17：使用者操作介面

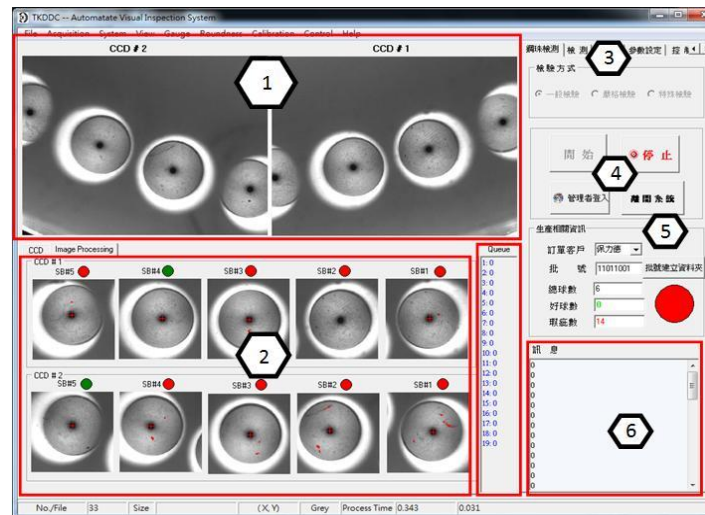


圖 18：鋼珠檢測自動化監控介面

參、研究結果

一、鋼珠展開率驗證

本研究檢測的鋼珠為球體，而擷取的影像為二維影像，為了完整的擷取整顆鋼珠影像，需進行測轉機構的展開率驗證，實驗測試將 1 顆鋼珠上畫一個十字記號，並將鋼珠置放於檢測圓盤中，側轉模組設計在 CCD1 和 CCD2 中間，因此判斷 CCD1 和 CCD2 的影像是否有側轉 22.5 度即可確定影像是否拍攝到整顆鋼珠，測試以 500 顆鋼珠進行檢測，皆有側轉動作，程式擷取十字影像的側轉位置如圖 19 所示。

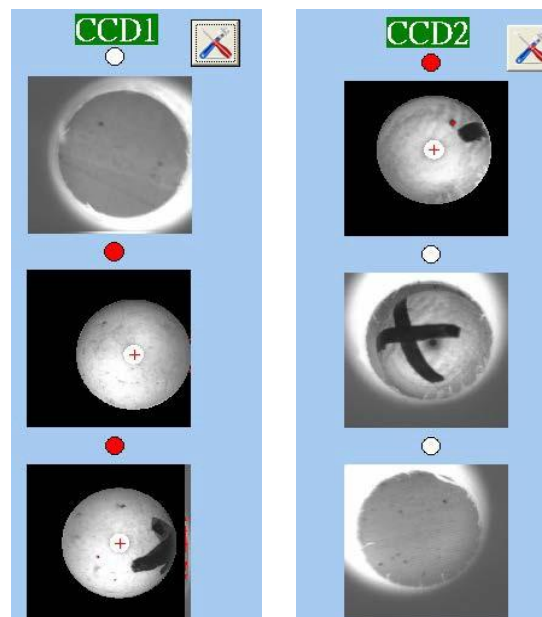


圖 19：鋼珠側轉展開圖

二、鋼珠瑕疵檢測準確率驗證

本研究選擇 10 顆瑕疵鋼珠和 10 顆良品鋼珠進行系統瑕疵檢測準確率驗證，10 顆瑕疵鋼珠分別為 2 顆平台刮傷及 2 顆刻痕傷 4 顆鋼球刮傷內黑和 2 顆鍛造刮傷，每顆鋼珠測試 500 次，總共測試 5000 次。其中瑕疵珠面積計算須先求出每一像素所對應的瑕疵大小，以鋼珠大小為 4.762mm 為例，其直徑為 1066 個像素數值，計算方式如下：

$$\text{像素大小}(\text{mm}/\text{pixel}) * \text{鋼珠大小}(\text{mm}) / \text{占的像素數目}(\text{pixel})$$

$$0.004(\text{mm}/\text{pixel}) * 4.762(\text{mm}) / 1066(\text{pixel})$$

由上述公式計算以直徑 4.762mm 鋼珠為例，其一個像素大小為 0.004mm，利用影像處理技術的快速連通法則，即可計算瑕疵區域的面積，計算顯示介面如圖 20 所示，鋼珠瑕疵計算顯示介面如圖 21 所示。

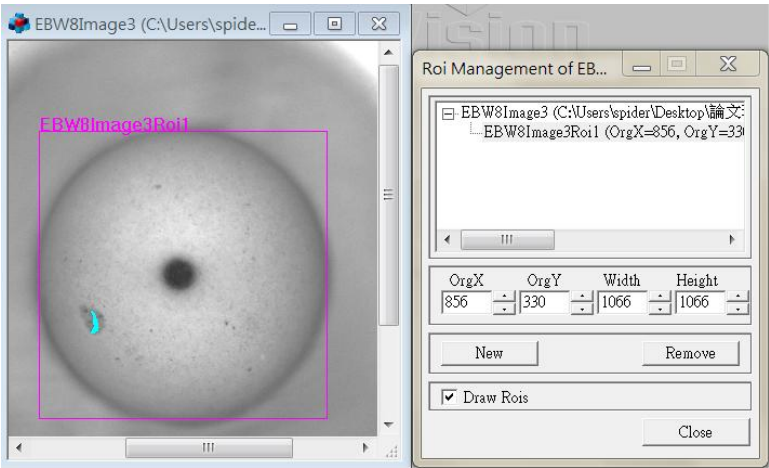
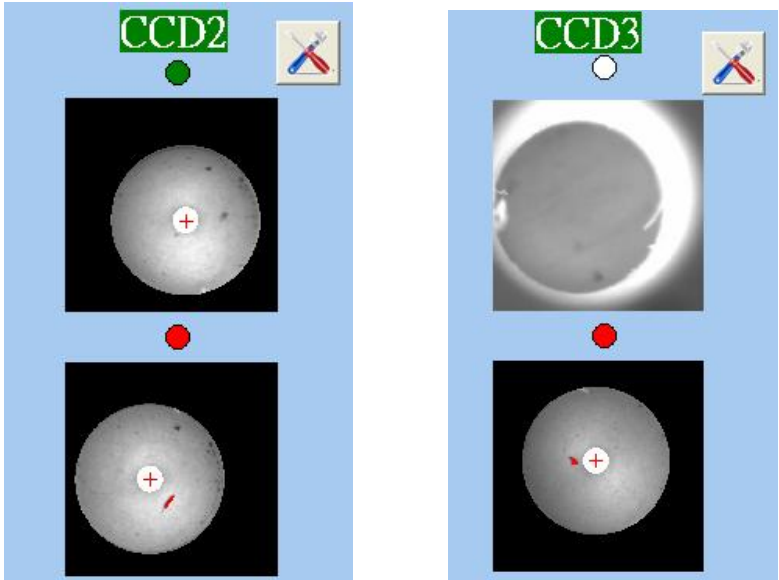


圖 20：瑕疵大小像素計算介面



(a)鍛造刮傷瑕疵偵測 (b)刮傷瑕疵偵測

圖 21：鋼珠瑕疵計算顯示介面

放置 10 顆良品珠於圓盤中，轉動馬達 500 圈後，觀察檢測後瑕疵數量之比例，實驗數據如表 1，可得知良品誤判為瑕疵率為 0.2%

表 1：良品鋼珠檢測數據			
	樣品數	良品	不良品
良品珠	5000	4990	10

接著將 10 顆測試用瑕疵鋼珠依序放入檢測圓盤內，進行 500 次檢測，分析其誤判率，實驗數據如表 2 所示，檢測準確率為 99.84%。

表 2：瑕疵鋼珠檢測數據

瑕疵種類(不良品)	樣品數	良品	不良品
平台刮傷 1	500	1	499
平台刮傷 2	500	0	500
刻痕傷 1	500	1	499
刻痕傷 2	500	2	498
刮傷光球內黑 1	500	0	500
刮傷光球內黑 2	500	0	500
刮傷光球內黑 3	500	1	499
刮傷光球內黑 4	500	1	500
鍛造刮傷 1	500	1	499
鍛造刮傷 2	500	1	500
準確率計算=總樣品-總誤判數/總樣品數=(5000-8)/5000=99.84%			

肆、 結論與建議

本研究以自行開發的自動化瑕疵檢測系統，達到精密鋼珠的瑕疵檢測功能，使用自動化檢測機構和軟體及其人機介面，經實際驗證所設計鋼珠側轉機構，側轉角度可達 22.5°以上，符合光學檢測之鋼珠檢測覆蓋率達 100%；以 10 顆瑕疵鋼珠，進行 5000 次檢測，其漏檢率為 0.2%；進一步以 10 顆瑕疵鋼珠和 10 顆良品鋼珠進行系統瑕疵檢測準確率驗證，其準確率達 99.84%。顯示所開發的精密鋼珠瑕疵檢測系統可應用於瑕疵大小 $\pm 2.5\mu\text{m}$ 的鋼珠檢測，未來將進一步探討量測系統可靠度之問題，提高系統之規格，以達到業界之需求。

伍、 參考文獻

- [1] 繆紹綱譯，數位影像處理，臺北市：高立圖書有限公司，2003。
- [2] 江正宇，應用電腦視覺於精密鋼珠之表面瑕疵檢測，碩士論文，國立臺北科技大學工業工程與管理，臺北市，2008。
- [3] 謝承諭，自動光學檢測系統與創新構思問題解決法(TRIZ)之整合應用-以精密鋼珠表面瑕疵檢測為例，碩士論文，國立臺北科技大學工業工程與管理，臺北市，2010。
- [4] B. G. Batchelor and S. M. Cotter, "Detection of cracks using image processing algorithms implemented in hardware," Image and Vision Computing, vol. 1, No. 1, 1983, pp. 21-29.
- [5] J. M. Zhou and Y. Yang, "Detection of surface defects on steel balls using image processing technology," Proceedings of SPIE, vol.7130, 2008, pp.713028 1-6.
- [6] L. Deli, L. Xianli, H. Huanrui, L. Yizhi, J. Xinmiao and W. Peng, "Study for Steel ball surface quality detecting based on vision technique," Proceedings of SPIE, vol. 6836, 2008, pp. 683611 1-5.