

使用線對應之透視畸變修正法於條碼解讀-- 實現工業級二維條碼 PDF417(ISO/IEC15438)解碼器

陳桓榆

亞洲大學

mr.lester@hotmail.com

郭宜忠

亞洲大學

allen11b075@hotmail.com

李正宇

亞洲大學

leecheng@asia.edu.tw

摘要

本研究依照國際標準 ISO/IEC 15438 以工業電腦視覺開發平台，設計與實現可自動快速修正透視畸變(perspective distortion)之工業級 PDF417 解碼系統。利用解讀條碼時的二種特性簡化畸變修正過程，達到無需系統校正的快速修正：一、條碼多為矩形或正方形，具有四條明顯的外框線；二、外觀比例並不影響解碼；因此可預設轉換後的長寬比及四條外框線的相對位置；此二特性可提供轉換前後四組完整的直線對應關係(Line correspondence)，此四組線提供了足夠的資訊供程式即時計算出透視畸變轉換矩陣，進而完成反轉換。此法相較基於點對應的透視畸變修正法更為準確及合理。測試結果顯示：本系統無須事先校正即可快速且精確地修正實用時常發生的透視畸變問題，增加條碼解碼器的強固性。

關鍵詞：透視畸變、解讀二維條碼、線對應、ISO/IEC 15438、PDF417。

Abstract

A PDF417 2D barcode image decoder with perspective correction using line correspondence is designed and implemented under an industrial vision development platform. The decoder is implemented as a ready-to-use and international

standard ISO/IEC 15438 compliant system.

In this study, we proposed a method for perspective correction, in which line correspondence is used to achieve higher performance than that of point correspondence. Two features in barcode decoding are used for reducing computational complexity during correction: 1. Barcodes are rectangular; 2. Aspect ratio of a barcode usually does not affect decoding and results. These features provide a set of line correspondence of four straight lines at boundaries before and after perspective correction. By this correspondence, an optimal perspective distortion transformation matrix can be calculated. Hence, the reverse transformation can be conducted for perspective correction.

In our method, a more accurate method of using line correspondence is used. This 2D PDF417 decoder provides a calibrationless, accurate, and automatic method for perspective correction.

Keywords: Perspective distortion, 2D barcode decoding, line correspondence, ISO/IEC 15438, PDF417.

1 前言

近年來，一些研究工作有關的透視畸變校正圖像用在文字透視、物體拍攝透視畸變。[1]提出了一種方法來解決這一問題的校正透視變形文字的圖像。[2]加入自然特徵為基礎的圖型比對過程，提出了使用之前方向正確圖型比對架構嘗試透視校正。[3]提出了透視變形中文檔圖像糾正失真的透視圖像。[4]提出角度變形量基於Hough變換和距離的消失點從圖像的邊界，之間的距離平行線在透視圖像減少接近消失點和糾正的形象保持不變。[5]提出一個方法來恢復平面外觀輸入文件圖像通過審查的垂直變化率。[6]提出獨特的解決方案結構和運動幾乎總是保證在各種組合對應的點和線在幾個快照對象是眾所周知的。[7]提出了一種分析方法，多運動分割線對應的轉換物體從三個角度的看法。

先前影像透視畸變修正的研究大多採用邊角的點座標對應來進行圖像反轉換，然而，使用四個點座標或者更多的點座標作為透視轉換的基礎資訊，存在準確性欠佳和合理性的問題，本研究提出利用條碼具有四條明顯的外框線，抓取邊線上的樣本點座標，然後以線對應為基礎，直接計算出透視畸變轉換矩陣，再進行反轉換，所以可快速又準確地對條碼進行透視修正。

PDF417條碼是目前應用最廣泛的二維條碼之一，被常用於醫療保健、工業、交通運輸、國防、公共安全、商業、金融、海關及政府管理等多個領域，已被許多國家及國際標準化機構採納，美國國家標準協會（American National Standards Institute, ANSI）已訂定了國際標準的規範 [12]。PDF（Portable Data File）意思是「便攜資料檔案」，每一個條碼又可分成4線條（或黑線）及4空白（或白線），每個線條至多不能超過6個模組，總模組數(modules)為17，。故稱為PDF417條碼，如圖 1-1。

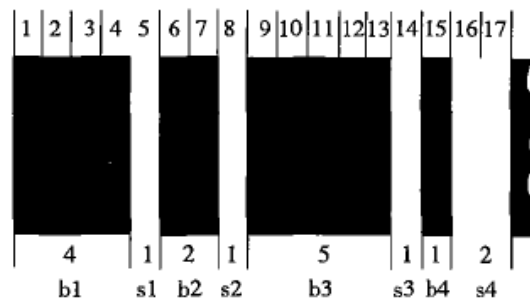


圖 1-1 PDF417字碼的組成

PDF417條碼是一種堆疊而成、可長可短、保密、防偽性能好、解碼可靠性、具有儲存高資料量和錯誤糾正能力強的二維條碼，每個PDF417條碼由3~90行組成，每行由起始碼、左標區、1~30個資料字元、右標區、終止碼組成，如圖 1-2。

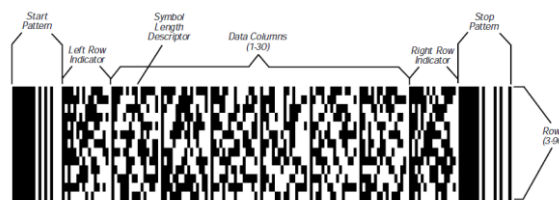


圖 1-2 PDF417條碼的解構

每個條碼中起始碼與終止碼，線條（或黑線）及空白（或白線）分別為81111113、711311121，如圖 1-3。



圖 1-3 始碼與終止碼字碼

PDF417條碼資料擺放的方法，如圖 1-4，起始碼、左標區（ $L_1 \sim L_{10}$ ）、資料字元（ d_{15} 是字碼數量、 $d_{14} \sim d_1$ 是編碼表示的資料、 d_0 是墊碼字、 $E_3 \sim E_0$ 是錯誤糾正的資料）、右標區（ $R_1 \sim R_{10}$ ）、終止碼。

S T A R T	L ₁	d ₁₅	d ₁₄	R ₁	S T O P
	L ₂	d ₁₃	d ₁₂	R ₂	
	L ₃	d ₁₁	d ₁₀	R ₃	
	L ₄	d ₉	d ₈	R ₄	
	L ₅	d ₇	d ₆	R ₅	
	L ₆	d ₅	d ₄	R ₆	
	L ₇	d ₃	d ₂	R ₇	
	L ₈	d ₁	d ₀	R ₈	
	L ₉	E ₃	E ₂	R ₉	
	L ₁₀	E ₁	E ₀	R ₁₀	

圖 1-4 PDF417 字碼佈局示意圖

每一個 PDF417 條碼損害承受的程度取決於每個 PDF417 錯誤糾正的能力，如圖 1-5。

Error Correction Level	Total Number of Error Correction Codewords
0	2
1	4
2	8
3	16
4	32
5	64
6	128
7	256
8	512

圖 1-5 PDF417 錯誤糾正的能力對照表

2 方法

相機左、右斜拍攝或者上、下傾斜拍攝一個物體，如圖 2-1，會使取得的圖像產生透視畸變的變形，再使用線對應之準確快速的透視畸變修正法於條碼上把圖像產生的透視畸變轉正回來平面，此方法快速又有效率的修正回來，流程圖如圖 2-2。



圖 2-1 相機拍攝產生透視畸變

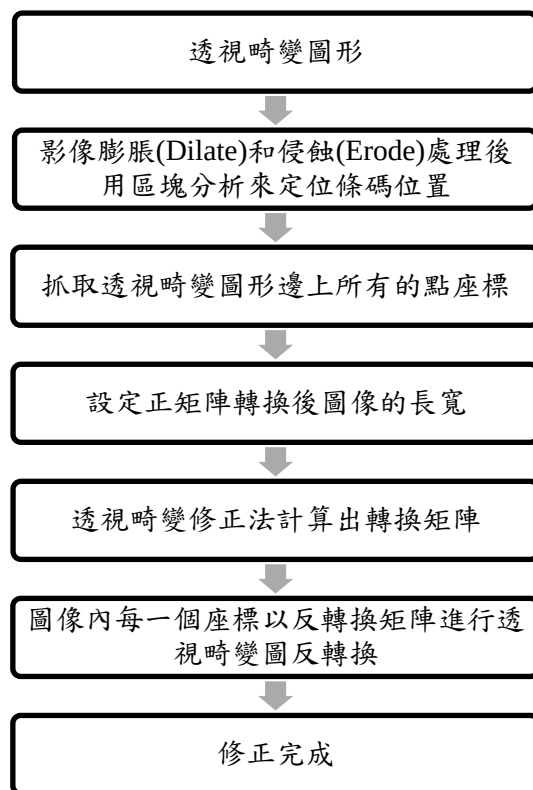


圖 2-2 透視畸變修正法流程圖

2.1 影像定位

拍攝取得條碼影像後，第一步先對影像做膨脹 (Dilate) 和侵蝕 (Erode)，把條碼內部都被填滿成實心的黑色。

將處理過後的影像進行區塊分析，然後把該點像素附近灰階值一樣的點視為同一個區塊，以便取得條碼的區塊在影像中的位置。

2.2 透視畸變修正法

利用剛剛膨脹和侵蝕條碼的影像加上區塊分析辨認出條碼在影像的位置後，可以方便在透視畸變修正法的處理，透視畸變修正法的方法示意圖，如圖 2-4。

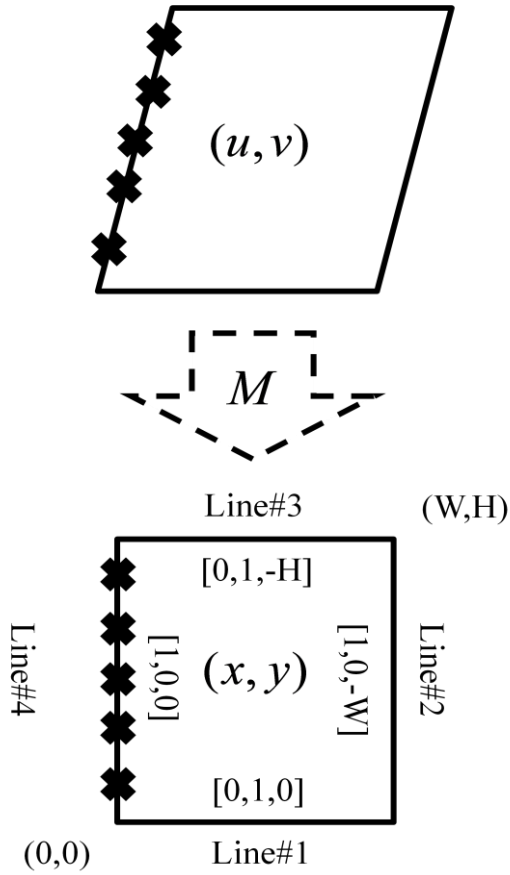


圖 2-4 透視畸變修正示意圖，影像上的點座標 (u, v) 是矩形線上的任何一組點，經過轉換矩陣 M ，修正到影像上的點座標 (x, y) 的一組點

影像上的產生透視畸變的轉換平面 $u-v$ 和 $x-y$ 的關係可表示為

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

影像上的點座標 (u_i, v_i) 和 (x_i, y_i) 是兩個平面

上的任意點座標，在影像 $x-y$ 平面上的直線方程式在可以表示為

$$\begin{bmatrix} a_k & b_k & c_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (2)$$

其中， $\begin{bmatrix} a_k & b_k & c_k \end{bmatrix}$ 為方程式係數。影像的透視畸變轉換平面 $x-y$ 和 $u-v$ 的 M 矩陣有九個未知數，若固定 $m_{33}=1$ ，則需要求解八個未知數，在公式 (1) 等號兩邊同乘上 $\begin{bmatrix} a_k & b_k & c_k \end{bmatrix}$ ，會得到

$$\begin{bmatrix} a_k & b_k & c_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_k & b_k & c_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \varepsilon_i \quad (3)$$

誤差值 ε_i 是透視畸變轉換過後的影像產生的偏差，影像上每條線邊界上的樣本數編號 $i=1 \cdots N$ ，線對應的編號 $k=1 \cdots 4$ ，公式 (3) 乘開後並加入所有四條邊線，此矩陣可寫為

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} -c_1 \\ -c_2 \\ -c_3 \\ -c_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1[u_{1i} & v_{1i} & 1] & b_1[u_{1i} & v_{1i} & 1] & c_1[u_{1i} & v_{1i} & 1] \\ a_2[u_{2i} & v_{2i} & 1] & b_2[u_{2i} & v_{2i} & 1] & c_2[u_{2i} & v_{2i} & 1] \\ a_3[u_{3i} & v_{3i} & 1] & b_3[u_{3i} & v_{3i} & 1] & c_3[u_{3i} & v_{3i} & 1] \\ a_4[u_{4i} & v_{4i} & 1] & b_4[u_{4i} & v_{4i} & 1] & c_4[u_{4i} & v_{4i} & 1] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ m_{13} \\ m_{21} \\ m_{22} \\ m_{23} \\ m_{31} \\ m_{32} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\varepsilon_{1i} \\ -\varepsilon_{2i} \\ -\varepsilon_{3i} \\ -\varepsilon_{4i} \end{bmatrix} \quad (4)$$

當在透視畸變影像中的第 i 條邊界線上有 N_i

個 (u_i, v_i) 座標時，以上方程式可詳細改寫為

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} -c_1 \\ -c_1 \\ \vdots \\ -c_1 \\ -c_2 \\ -c_2 \\ \vdots \\ -c_2 \\ \vdots \\ -c_4 \\ -c_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1[u_{11} & v_{11} & 1] & b_1[u_{11} & v_{11} & 1] & c_1[u_{11} & v_{11} & 1] \\ a_1[u_{12} & v_{12} & 1] & b_1[u_{12} & v_{12} & 1] & c_1[u_{12} & v_{12} & 1] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_1[u_{1N_1} & v_{1N_1} & 1] & b_1[u_{1N_1} & v_{1N_1} & 1] & c_1[u_{1N_1} & v_{1N_1} & 1] \\ a_2[u_{21} & v_{21} & 1] & b_2[u_{21} & v_{21} & 1] & c_2[u_{21} & v_{21} & 1] \\ a_2[u_{22} & v_{22} & 1] & b_2[u_{22} & v_{22} & 1] & c_2[u_{22} & v_{22} & 1] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_2[u_{2N_2} & v_{2N_2} & 1] & b_2[u_{2N_2} & v_{2N_2} & 1] & c_2[u_{2N_2} & v_{2N_2} & 1] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_4[u_{4N_4} & v_{4N_4} & 1] & b_4[u_{4N_4} & v_{4N_4} & 1] & c_4[u_{4N_4} & v_{4N_4} & 1] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ m_{13} \\ m_{21} \\ m_{22} \\ m_{23} \\ m_{31} \\ m_{32} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\varepsilon_{11} \\ -\varepsilon_{12} \\ \vdots \\ -\varepsilon_{1N_1} \\ -\varepsilon_{21} \\ -\varepsilon_{22} \\ \vdots \\ -\varepsilon_{2N_2} \\ \vdots \\ -\varepsilon_{4N_4} \end{bmatrix} \quad (5)$$

對於修正 PDF417 條碼的透視畸變，我們可指定反轉換後的四條邊緣方程組為

$$\begin{cases} [a_1 & b_1 & c_1] = [0 & 1 & 0] \\ [a_2 & b_2 & c_2] = [1 & 0 & -W] \\ [a_3 & b_3 & c_3] = [0 & 1 & -H] \\ [a_4 & b_4 & c_4] = [1 & 0 & 0] \end{cases}$$

也就是設定好了條碼的寬高， W 是修正後條碼的寬度， H 是修正後條碼的高度，把線方程組帶入公式 (5) 為

$$\begin{bmatrix} 0_{N_1 \times 1} \\ W \cdot 1_{N_2 \times 1} \\ H \cdot 1_{N_3 \times 1} \\ 0_{N_4 \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0_{N_1 \times 3} & \begin{bmatrix} u_{11} & v_{11} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{1N_1} & v_{1N_1} & 1 \end{bmatrix} & 0_{N_1 \times 2} \\ \begin{bmatrix} u_{21} & v_{21} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{2N_2} & v_{2N_2} & 1 \end{bmatrix} & 0_{N_2 \times 3} & -W \begin{bmatrix} u_{21} & v_{21} \\ \vdots & \vdots \\ u_{2N_2} & v_{2N_2} \end{bmatrix} \\ 0_{N_3 \times 3} & \begin{bmatrix} u_{31} & v_{31} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{3N_3} & v_{3N_3} & 1 \end{bmatrix} & -H \begin{bmatrix} u_{31} & v_{31} \\ \vdots & \vdots \\ u_{3N_3} & v_{3N_3} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} u_{41} & v_{41} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{4N_4} & v_{4N_4} & 1 \end{bmatrix} & 0_{N_4 \times 3} & 0_{N_4 \times 2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ m_{13} \\ m_{21} \\ m_{22} \\ m_{23} \\ m_{31} \\ m_{32} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\varepsilon_{11} \\ -\varepsilon_{12} \\ \vdots \\ -\varepsilon_{1N_1} \\ -\varepsilon_{21} \\ -\varepsilon_{22} \\ \vdots \\ -\varepsilon_{2N_2} \\ \vdots \\ -\varepsilon_{4N_4} \end{bmatrix} \quad (6)$$

把公式 (6) 簡寫為 $Y = X\beta + \varepsilon$ ，其中

$$X = \begin{bmatrix} 0_{N_1 \times 3} & \begin{bmatrix} u_{11} & v_{11} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{1N_1} & v_{1N_1} & 1 \end{bmatrix} & 0_{N_1 \times 2} \\ \begin{bmatrix} u_{21} & v_{21} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{2N_2} & v_{2N_2} & 1 \end{bmatrix} & 0_{N_2 \times 3} & -W \begin{bmatrix} u_{21} & v_{21} \\ \vdots & \vdots \\ u_{2N_2} & v_{2N_2} \end{bmatrix} \\ 0_{N_3 \times 3} & \begin{bmatrix} u_{31} & v_{31} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{3N_3} & v_{3N_3} & 1 \end{bmatrix} & -H \begin{bmatrix} u_{31} & v_{31} \\ \vdots & \vdots \\ u_{3N_3} & v_{3N_3} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} u_{41} & v_{41} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{4N_4} & v_{4N_4} & 1 \end{bmatrix} & 0_{N_4 \times 3} & 0_{N_4 \times 2} \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} 0_{N_1 \times 1} \\ W \cdot 1_{N_2 \times 1} \\ H \cdot 1_{N_3 \times 1} \\ 0_{N_4 \times 1} \end{bmatrix}$$

而最佳的透視畸變轉換矩陣的八個參數 β ，可以最小平方差迴歸估計，如下：

$$\beta = \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ m_{13} \\ m_{21} \\ m_{22} \\ m_{23} \\ m_{31} \\ m_{32} \end{bmatrix} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (7)$$

最後把設計好長寬的矩形裡所有的點座標

(x_i, y_i) 以矩陣 M^{-1} 進行座標反轉換，就完成線

對應的透視畸變修正。

3 結果

3.1 實驗環境設定

相機: AISYS ALTAIR U36F (USB 工業相機)

表3-1 AISYS ALTAIR U36F相機相關規格

感光晶片規格	CMOS
影像解析度	752 (H) x 480 (V)
像素尺寸	6.0 x 6.0 μm 正方形像素
影像輸出格式	8 位元，灰階
最大像速率	60 fps；預設值=30 fps
動態範圍	大於 60.0 dB
電子快門	電子全域快門
掃描模式	循序式掃描、全域式曝光
像速率控制	軟體控制：30 到 60 FPS
資料傳輸介面	USB 2.0、每秒 480 百萬位元

本實驗環境使用如下：

1. Borland C++Builder 6.
2. AISYS OVK Framework R1.5.2.
3. 工業級相機 AISYS ALTAIR U36F.
4. General Reed-Solomon Encoder/Decoder v1.04 (GRS v1.04).
5. Intel(R)Core(TM)2 Duo CPU 2.20GHz、RAM 2.0 GB、windows 7 的作業系統

3.2 系統建置

完整的 PDF417 條碼解碼器系統的架構流程圖，如下：

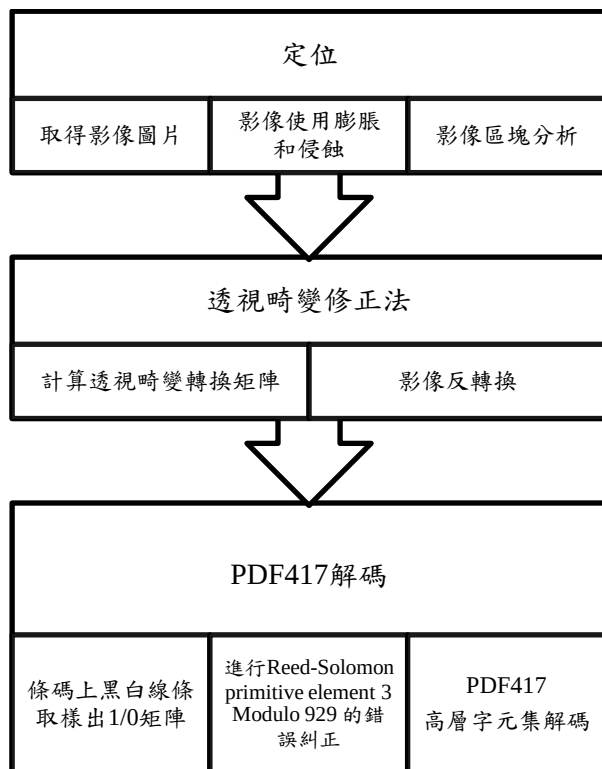


圖 3-1 PDF417 解碼器系統架構流程圖



圖 3-2 工業相機取得影像圖片

從工業相機取得影像圖片，如圖 3-2 為了定位條碼的位置，使用了膨脹 (Dilate) 和侵蝕 (Erode) 讓條碼的黑色線條膨脹把白色的部分全部都變成黑色，但因為把黑色部分向外膨脹使得條碼把外圍也被膨脹了變成黑色，所以再使用侵蝕把超出條碼外圍的部分侵蝕還原回來，這樣一來就把條碼內部都被填滿成實心的黑色，如圖 3-3。

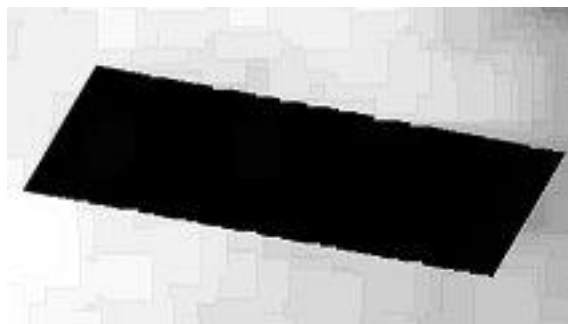


圖 3-3 PDF417 條碼使用膨脹和侵蝕後所得到的區塊

再進行影像區塊分析，把該點像素附近灰階值一樣的点視為同一個區塊，把整個影像都全部掃過，便可取得條碼的區塊在影像中的位置。

影像中準確知道條碼位置後，抓取條碼四條邊線上所有的點座標，送入透視畸變修正法會算出轉換矩陣，再把影像反轉換，就能把條碼修正完成，如圖 3-4。



圖 3-4 透視畸變反轉換後的圖

把轉換修正完成的條碼，利用條碼上條 (或黑線) 及空白 (或白線) 使用邊緣點偵測，並計算出黑白間距 [8]，如圖 3-5。

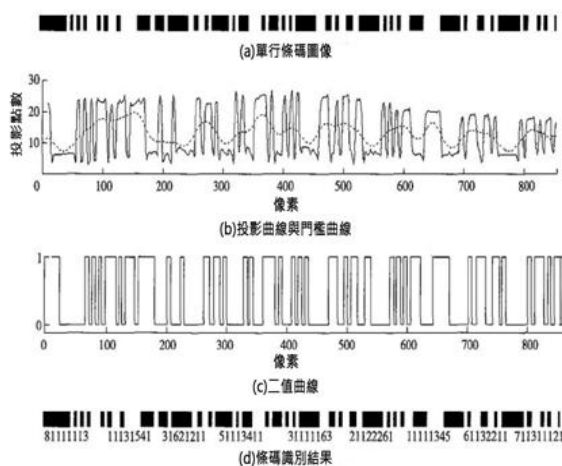


圖 3-5 單行條碼辨別

PDF417條碼的每一行都使用點偵測掃過一次後得到一個黑線與白線的距離的大矩陣，把矩陣裡的每一值對應到 PDF417 的編碼/解碼表；PDF417 本身有錯誤糾正能力[9]，為了確保條碼的正確性，對應過後的解碼代號矩陣以 GRS v1.04 進行錯誤糾正後[10,13]，就能開始 PDF417 的高階解碼[11]。下面圖是整個 PDF417 條碼解碼器系統介面：



圖 3-6 PDF417 條碼解碼器系統介面

3.3 PDF417 錯誤糾正

PDF417 條碼採用錯誤更正碼 Reed-Solomon codes 中較特別的一種碼集：本原元三(primitive element 3)及 Modulo 929；本研究使用 General Reed-Solomon Encoder/Decoder Programming Kit v1.04 進行錯誤更正計算。PDF417 條碼承受損害程度的能力取決於個別條碼所選擇的 Error correction level(如圖 1-5)。本實驗把測試的 PDF417 條碼作適度破壞，如圖 3-7，本系統仍可以準確無誤的把資訊解讀出，如圖 3-8。



圖 3-7 PDF417 條碼破壞

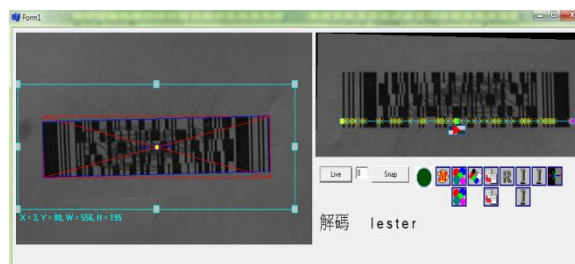


圖 3-8 PDF417 條碼解碼器系統錯誤糾正

4 討論

本研究提出的透視畸變修正法跟其它研究的方法不一樣，係利用點構成的線並以線對應為基礎來逕行估算出透視轉換矩陣，而非用邊角點或者其它點對應來估計轉換矩陣，此方法可更準確性地修正影像。

本系統依照國際標準 ISO/IEC 15438[12]，以工業電腦視覺系統開發平台，設計與實現一種可自動快速修正透視畸變之工業級 PDF417 解碼系統；平均一秒鐘可以解 13 張的條碼，而加入透視畸變一秒鐘可以解 8 張的條碼；當條碼受到損壞，在容可範圍(低於30%的錯誤)內也可以經過錯誤糾正演算法把正確的資訊即時更正回來。本系統解讀PDF417條碼影像，不管條碼影像是歪斜的、視角傾斜、任何外觀比例、或甚至污損，均不影響解碼，達到無需系統校正且可靠的快速解碼。

5 參考文獻

- [1] Lijing Tong and Yan Zhang, "Correction of Perspective Text Image Based on Gradient Method," *IEEE International Conference on Information*, pp. V2-312-V2-316, 2010.
- [2] A. J. Clark, R. D. Green and R. N. Grant, "Perspective Correction for improved visual registration using natural features." *IEEE Image and Vision Computing*, pp.1-6, 2008.

- [3] Wangbo Zhang, Xiaoyuan Li and Xingjie Ma, "Perspective Correction Method for Chinese Document Images," **IEEE International Symposium on Intelligent Information Technology Application Workshops**, pp.467-470,2008.
- [4] Mohan S., Avinash N. and Murali.S, "Rectification of Perspective distortion using camera parameters - A Perspective Geometry Based Approach," **ICGST-GVIP Journal**, Vol. 8, pp.1-7, 2008.
- [5] Camille Monnier, Vitaly Ablavsky, Steve Holden and Magnus Snorrason, "Sequential Correction of Perspective Warp in Camera-based Documents T," **IEEE Eight International Conference on Document Analysis and Recognition**, Vol. 1, pp.394-398, 2005.
- [6] ROBERT J. HOLT and ARUN N. NETRAVALI, "Uniqueness of Solutions to Structure and Motion from Combinations of Point and Line Correspondences," **JOURNAL OF VISUAL COMMUNICATION AND IMAGE REPRESENTATION**, Vol. 7, pp.126-136, 1996.
- [7] Fanhuai Shi, JianhuaWang, Jing Zhang and Yuncai Liu, "Motion segmentation ofmultiple translating objects from line correspondences," **THE JOURNAL OF THE PATTERN RECOGNTION SOCIETY**, pp.1775-1778, 2005.
- [8] Li He, Member, IAENG and Xiaoli Hao, "Method for Fast Locating the Transition between Elements of PDF417 Bar Code by CMOS camera," **Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists**, Vol. 1, pp.1-4, 2009.
- [9] 戴揚、于盛林、戴水貴, "PDF417 改錯碼原理及實現", **吉林大學學報**, pp. 286-290, 2004。
- [10] Hee I1 Hahn and Joung Koo Joung, "Implementation of Algorithm to Decode Two-Dimensional Barcode PDF-417, " **IEEE ICSP Proceedings**, pp.1791-1794, 2002.
- [11] 范哲意、江帆、劉志文, "基於拍攝圖像的 PDF417 條碼識別", **北京理工大學學報**, pp. 1088-1092, 2008。
- [12] ISO/IEC 15438, "Automatic identification and data capture - Bar code symbology specifications - PDF417," **International Standard**, 1998.
- [13] General Reed-Solomon Encoder/Decoder v1.04 (<http://www.masys.url.tw/>)