

基于傅立叶变换的二维条码识别

刘宁钟 杨静宇

(南京理工大学计算机科学与技术系, 南京 210094)

摘 要 研究了基于傅立叶变换的二维条码识别技术. 首先探讨了二维条码的定位分割技术, 即在条码中分割出单行码字符的图象, 分析条码信号经过点扩展函数卷积后的降质模型, 并讨论条码信号的一阶导数和中点的性质, 通过分析条码信号, 提出了一种计算点扩展函数标准方差的算法; 然后利用傅立叶变换对条码信号进行反模糊滤波; 最后对复原的条码信号做差分处理, 并采用边界强度直方图策略自适应地选取阈值滤去噪声导致的无效边界. 在边界强度直方图中, 采用基于矩阈值选取的方法寻找最佳阈值. 实验结果表明, 该识别算法具有优秀的性能, 显著地提高了条码的识别率, 满足了实际使用的要求.

关键词 计算机图象处理(520·6040) 条码识别 二维条码 点扩展函数 傅立叶变换
中图法分类号: TP391.41 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2003)08-0877-06

Recognition of Two-dimensional Bar Code Based on Fourier Transform

LIU Ning-zhong, YANG Jing-yu

(Computer Science Dept., Nanjing Univ. of Science & Technology, Nanjing 210094)

Abstract A novel two-dimensional bar code recognition algorithm based on Fourier transform is proposed in this paper. First, the location and segment technology of two-dimensional bar code is discussed and a single row codeword image is obtained. Then the model of blurred bar code signal caused by the point spread function is given. The first derivative and midpoint of bar code signal is discussed. After analyzing the bar code signal, the standard deviation of the point spread function is obtained. The bar code signal is deblurred based on Fourier transform. At last, after getting the first derivative of signal, the edge strength histogram is used to drop invalid edge caused by noise adaptively. In the edge strength histogram, based-moment threshold selection is used to decide the threshold. The experimental results show that the performance of the algorithm proposed in this paper is excellent. It can achieve higher recognition rate of high density bar code, which suffices to the requirement of the practical use.

Keywords Computer image processing, Bar code recognition, Two-dimensional bar code, Point spread function, Fourier transform

0 引言

和传统的一维条码比, 二维条码具有信息密度高、信息容量大、性能稳定等优点. 二维条码不仅可以存储数字、字符等文本信息, 还可以存储人脸、指纹、虹膜等图象信息^[1,2]. 此外二维条码具有很强的纠错功能, 即使条码符号在识别过程中出现误码, 经过纠错后也能得到正确的编码信息^[1,2]. 由于二维条码具有诸多优点, 因此随着自动化技术的应用推广, 二维条码的需求日益增大. 目前二维条码已

广泛应用于身份验证、物流管理、安全防伪、电子商务等诸多领域^[2,3]. 对于识读装置来说, 条码的字符密度越高, 识读难度越大. 由于二维条码结构复杂、信息密度高, 因此如何快速准确地识别条码就成为一个值得研究的问题.

传统的条码识别方法是先对条码信号进行一阶差分, 然后找出条码图象的边界位置^[4,5]. 当条码密度较低时, 这种方法能取得很好的效果, 然而当条码的密度较高时, 经过光学系统点扩展函数^[6] (Point Spread Function) 的作用后, 条码信号将出现两个影响识读的变化, 其一, 由于卷积具有平滑作用, 边界

将变得模糊而难以检测;其二,经过卷积后相邻近的边界相互叠加,将出现边界和峰点偏移的现象,再考虑到噪声和污染的影响,在这种情况下,单纯基于边界检测的识别方法就不再可靠.为此本文研究了基于傅立叶变换的二维条码识别技术.

研究条码识别,总要以一种编码体系为例.PDF417 条码应用广泛,且具代表性,目前 PDF417 已经被诸如美国国防部、北美和欧洲汽车工业组织、美国机动车管理局、美国电讯工业论坛等政府部门、工业团体所采纳^[2].我国的诸多行业也开始采用 PDF417 条码,故本文也以 PDF417 条码为例研究二维条码的识别技术.PDF417 条码被称作便携式数据文件(Portable Data File)^[2].条码的每一个符号字符由 4 个条和 4 个空组成(终止符除外),每个条(或空)的宽度为 1~6 个模块(X dimension)^[2],其模块总数为 17,故称为 417 条码,图 1 符号字符为 511111125.



图 1 符号字符

每个 PDF417 条码由 3 到 90 行组成,每行由起始符、左行指示符、1 到 30 个符号字符、右行指示符、终止符组成.其构成如图 2 所示,线框中即为一个符号字符.



图 2 PDF417 条码的结构

1 定位和分割条码图象

1.1 定位条码

打印或扫描条码时会出现条码的倾斜和偏移,因此条码识别的第 1 步就是在图象上定位条码所在的位置,并将其旋至水平.记得到的条码图象记为 $I(x, y)$,图象的宽度、高度分别记为 M, N .先找出条码的左边界点 $X = (x_0, x_1, \dots, x_{N-1})$, x_i 的值为从左到右扫描图象的第 i 行时,第 1 次遇到 $I(x, y) <$

T 时的水平坐标值, T 为图象二值分割的阈值:

$$x_i = \min\{x | I(x, i) < T\} \quad i = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

得到边界点后利用 Hough 变换^[7]求出条码左边界的直线方程:

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (2)$$

根据直线倾角将条码旋至水平,如果旋转中的灰度插值采用最邻插值,则会产生锯齿形的边界而干扰条码识别.这里采用双线性插值^[7]对相邻的 4 个像素进行插值,如图 3 所示, $f(x, y)$ 为两个变量的渐变平滑函数,已知其在单位正方形 4 个顶点的值为: $f(0, 0), f(1, 0), f(0, 1), f(1, 1)$, 则正方形内任意点 (x, y) 的值 $f(x, y)$ 为^[7]

$$f(x, y) = [f(1, 0) - f(0, 0)]x + [f(0, 1) - f(0, 0)]y + [f(1, 1) + f(0, 0) - f(0, 1) - f(1, 0)]xy + f(0, 0) \quad (3)$$

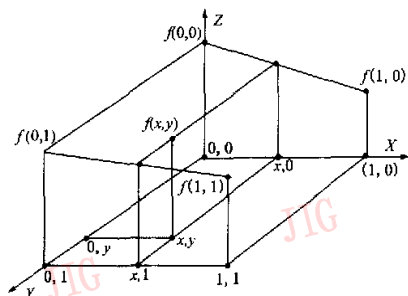


图 3 双线性插值

如 (x, y) 在单位正方形外,则 4 个邻点取为 $([x], [y]), ([x]+1, [y]), ([x], [y]+1), ([x]+1, [y]+1)$.

1.2 分割条码图象

图 4 为采用双线性插值技术旋平后的条码图象.在识别单行码字符前,必须在整个条码图象中分割出单行码字符的图象,因此要得到条码的行数、行高.先对图象采用 Sobel 水平边缘检测算子,再进行水平方向投影

$$p(y) = \sum_x \nabla I(x, y) \quad (4)$$



图 4 旋平的条码图象

图 5 为采用 Sobel 水平边缘算子后的图象(为了便于显示,图象经过反相处理).

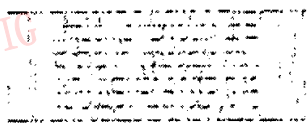


图5 边缘检测图

$p(y)$ 的峰点对应于条码的行边界,用高斯函数 $g(y)$ 对 $p(y)$ 进行卷积平滑

$$\varphi(y) = p(y) * g(y) \quad (5)$$

其中

$$g(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_0^2}\right) \quad (6)$$

对平滑后的结果进行差分运算得到一阶和二阶差分 $\varphi'(y)$, $\varphi''(y)$, 则峰的集合为

$$\{y | p(y) > k \cdot W, \varphi'(y) = 0, \varphi''(y) < 0\} \quad (7)$$

其中, W 为条码的宽度, k 为经验值。易知,条码的行数为边界数减一。利用条码的上下边界位置可以得到条码的高度,再用条码的高度除以行数即可得行高。根据边界方程、行高,便可分割出单行码字图象,如图6所示。



图6 分割出的单行码字图象

2 条码信号的降质模型

扫描过程中,一道光束扫过条码,被白色的空反射,黑色的条吸收,经过光电转换后,空和条的灰度分别为 v_1 和 v_2 。设条码有 n 个边界,其位置记为 e_i 。对于扫描某一行得到的条码信号可以用一个方波表示,如图7所示。

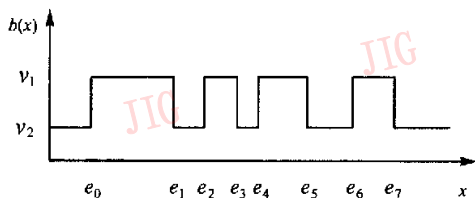


图7 理想的条码信号

用边界 e_i 为参数来描述图7的波形:

$$b(x) = \sum_{i=0}^{n-1} [(-1)^i (v_1 - v_2) U(x - e_i)] + v_2 \quad (8)$$

其中

$$U(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (9)$$

为了消除随机噪声,可充分利用图象的二维特性,计算条码竖直投影的波形,抵消随机噪声,将随机噪声的影响降到最低,式(8)写成如下形式:

$$b(x) = \sum_{y=0}^{y<H} \left\{ \sum_{i=0}^{i<n} [(-1)^i (v_1 - v_2) U(x - e_i)] + v_2 \right\} \\ = H \sum_{i=0}^{i<n} [(-1)^i (v_1 - v_2) U(x - e_i)] + H v_2 \quad (10)$$

其中, H 为单行条码图象的高度。由于光学系统点扩展函数的作用,实际得到的信号 $w(x)$ 是 $b(x)$ 和点扩展函数 $g(x)$ 的卷积^[4,6]

$$w(x) = g(x) * b(x) \\ = g(x) * \left\{ H \sum_{i=0}^{i<n} [(-1)^i (v_1 - v_2) U(x - e_i)] + H v_2 \right\} \\ = k \sum_{i=0}^{i<n} [(-1)^i g(x) * U(x - e_i)] + C \quad (11)$$

其中, $k = H(v_1 - v_2)$, $C = g(x) * H v_2$, $g(x)$ 为一高斯降晰函数^[4,6]

$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (12)$$

式中的 σ 为点扩展函数的标准方差,由光柱的尺寸和光头行进的速度决定^[5,6]。图8为经过 $g(x)$ 卷积后的得到的信号。由于点扩展函数的作用,条码的边界部分不再明显。在这种情况下用差分方法检测边界的方法不再适用。如果再考虑到各个边界经过卷积后波形的相互重叠,边界将更难确定。

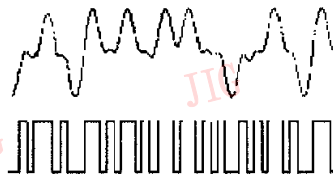


图8 经点扩展函数卷积后的信号

3 傅立叶反模糊滤波

进行信号分析和反模糊滤波用到的重要依据是 $w(x)$ 的导数。

定理1 $w(x)$ 的一阶差分为

$$w'(x) = k \sum_{i=0}^{i<n} [(-1)^i g(x - e_i)] \quad (13)$$

证明 由卷积微分性质^[7]有

$$[g(x) * U(x - e_i)]' = g(x) * U'(x - e_i) \quad (14)$$

把

$$U'(x - e_i) = \delta(x - e_i) \quad (15)$$

带入式(14),其中 $\delta(x)$ 为一维狄拉克(Dirac)冲激函数,并结合冲激函数的筛选性^[7]可得

$$\begin{aligned} [g(x) * U(x - e_i)]' &= g(x) * U'(x - e_i) \\ &= g(x) * \delta(x - e_i) \\ &= g(x - e_i) \end{aligned} \quad (16)$$

则

$$\begin{aligned} w'(x) &= \left[k \sum_{i=0}^{i \leq n} (-1)^i g(x) * U(x - e_i) + C \right]' \\ &= k \sum_{i=0}^{i \leq n} (-1)^i g(x - e_i) \end{aligned} \quad (17)$$

证毕.

从定理1不难得到推论1

推论1

$$w''(x) = k \sum_{i=0}^{i \leq n} [(-1)^i g'(x - e_i)] \quad (18)$$

有的研究人员提出了一种基于峰点检测的方法,找出波形中的波峰和波谷,即将条码的条和空的中点,作为条码识别特征.这种方法的性能比直接进行边界检测要稳定,然而当条码密度较高时,由于各个边界经过卷积后信号的相互重叠, $w(x)$ 中的波峰和波谷的位置不再是条和空中点的位置.

如图9所示的4个相邻的边界,由定理1

$$\begin{aligned} w'(x) &= k \sum_{i=0}^{i \leq 4} [(-1)^i g(x - e_i)] = \frac{k}{\sqrt{2\pi}\sigma} \left(e^{-\frac{(x-e_0)^2}{2\sigma^2}} - \right. \\ &\quad \left. e^{-\frac{(x-e_1)^2}{2\sigma^2}} + e^{-\frac{(x-e_2)^2}{2\sigma^2}} - e^{-\frac{(x-e_3)^2}{2\sigma^2}} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

对于边界 e_1, e_2 的中点 $x_m = \frac{e_1 + e_2}{2}$,其导数为

$$w'(x_m) = \frac{k}{\sqrt{2\pi}\sigma} \left(e^{-\frac{(\frac{e_1+e_2}{2}-e_0)^2}{2\sigma^2}} - e^{-\frac{(\frac{e_1+e_2}{2}-e_3)^2}{2\sigma^2}} \right) \quad (20)$$

仅当 $e_1 - e_0 = e_3 - e_2$ 时, $w'(x_m) = 0$.在一般情况下 $w'(x_m) \neq 0$.

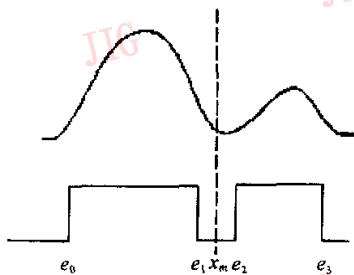


图9 相邻的4个边界

由以上分析可知,当条码经过点扩展函数卷积后,条和空中点的位置不是 $w(x)$ 中波峰和波谷的位置.这时即使根据一阶导数过零点的准则找出了峰点,也无法正确解码,因此直接在 $w(x)$ 上找波形的峰点是不稳定的.在这里首先分析 $w(x)$,进行去模糊滤波复原 $b(x)$.对式 $w(x) = g(x) * b(x)$ 两边取傅立叶变换

$$W(s) = G(s) \cdot B(s) \quad (21)$$

其中, $W(s), G(s), B(s)$ 代表 $w(x), g(x), b(x)$ 的傅立叶变换,把 $G(s) = e^{-\frac{\sigma^2 s^2}{2}}$ 代入式(21)得

$$W(s) = e^{-\frac{\sigma^2 s^2}{2}} \cdot B(s) \quad (22)$$

即

$$B(s) = W(s) \cdot e^{\frac{\sigma^2 s^2}{2}} \quad (23)$$

将 $e^{\frac{\sigma^2 s^2}{2}}$ 用Taylor级数展开,代入式(23)得

$$B(s) = W(s) \cdot \left(1 + \frac{\sigma^2 s^2}{2} + \frac{\sigma^4 s^4}{8} + \dots \right) \quad (24)$$

对式(24)两边取傅立叶逆变换,并结合傅立叶变换的微分性质^[7],得

$$b(x) = w(x) - \frac{\sigma^2}{2} w^{(2)}(x) + \frac{\sigma^4}{8} w^{(4)}(x) + \dots \quad (25)$$

其中, $w^{(i)}$ 代表 $w(x)$ 的 i 阶微分.由于式(25)中高阶的算子会使信号噪声的影响变得明显^[7],因此对于高斯降晰函数,滤去式(25)中的高阶算子,保留到2阶可以取得比较好的效果^[7,8]

$$b(x) = w(x) - \frac{\sigma^2}{2} w^{(2)}(x) \quad (26)$$

由上式可以知道,要复原 $b(x)$,需要确定点扩展函数 $g(x)$ 的参数 σ ,故问题转化为如何根据 $w(x)$ 分析计算得到 σ .

考虑一个单独的边界 e_0 ,由定理1有

$$|w'(x)| = k g(x - e_0) = k \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-e_0)^2}{2\sigma^2}} \quad (27)$$

$$\text{则 } |w'(e_0)| = \frac{k}{\sqrt{2\pi}\sigma}$$

即

$$\sigma = \frac{k}{\sqrt{2\pi} |w'(e_0)|} \quad (28)$$

实际中,由于邻边的影响,完全意义上的独立边界是不存在的.可以选取一个邻边对其影响最小的边界作为独立边界.对于边界 e_i ,由定理1可知,其邻边 e_{i-1} 和 e_{i+1} 的存在将减小 $w'(x)$ 在边界 e_i 的绝对值,因此如果在某个边界处, $w(x)$ 的一阶导数绝

对值最大,那么邻边对这个边界的影响最小,可以认为这个边界为独立边界.故在这里,按 $w(x)$ 一阶导数绝对值最大的原则来寻找独立边界,并按式(28)计算得到 σ ,再按式(26)进行反模糊滤波复原 $b(x)$.

经过傅氏反模糊滤波消除点扩展函数对条码信号的影响后(如图 10(a)所示),对复原后的 $b(x)$ 做

一阶差分,在图 10(b)的一阶差分图中,由于噪音的存在,出现了一些小的边界.考虑到噪音的出现是随机的,而在式(10)中计算的是条码竖直投影的波形信号,因此噪音引起的边界相对于条码条、空的边界强度较小.

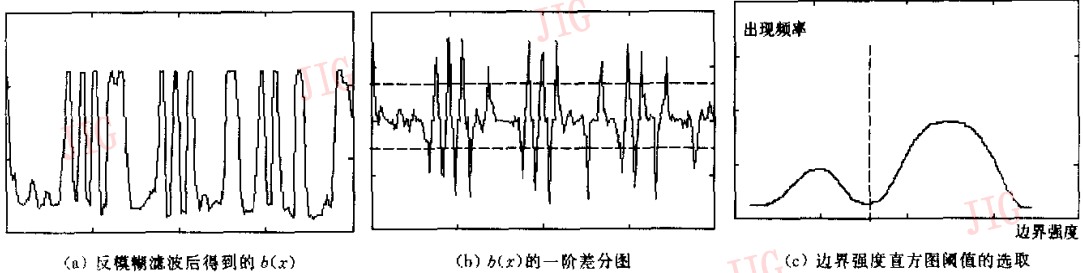


图 10 运用边界强度直方图定位边界

可以统计整个条码的边界强度,得到一个边界强度直方图(如图 10(c)所示).直方图中边界强度较小的部分对应着噪声边界,边界强度较大的部分对应着条码的条、空边界.由于边界强度直方图具有明显的双峰结构,可以采用基于矩阈值选取(based-moment threshold selection)的方法^[7]寻找最佳阈值,如图 10(c)中虚线所示.根据这个阈值在图 10(b)中分离出噪声边界和条、空边界.根据边界位置进一步得到条、空序列后,查表可得其对应的码字,经过纠错、解码便可得到数据流^[1-2].

4 实验结果

将 PDF417 条码应用于银行汇票综合防伪系统.在使用过程中,针对不同密度的条码,分别用基于边界检测、基于峰点检测、基于傅立叶变换这 3 种方法进行图象级的识别.实验结果如表 1 所示,其中各种模块宽度的条码各 200 幅,图象采集设备为扫描仪.从实验结果可以看出,随着条码密度的增加,由于点扩展函数的影响,基于边界检测和峰点检测的识别算法性能急剧下降,尤其是基于边界检测的

算法,而基于傅立叶变换的识别算法随条码密度增加,性能比较稳定,能够很好去除点扩展函数的影响,复原出原始信号,从而可以看出基于傅立叶变换的识别算法具有优秀的性能,有效地解决了点扩展函数造成的图象模糊对条码识别的影响.

此外为了检测算法对噪音的抗干扰能力,对流通后被污染的条码图象进行测试,污染包括笔迹、划痕、墨点等,实验结果如表 2 所示.实验表明,本文的算法具有很强的抗干扰能力,这主要源于算法采用了两个有效的策略:其一,为了消除随机噪声,充分利用了图象的二维特性,在式(10)中计算条码竖直投影的波形信号抵消随机噪声,可将随机噪声的影响降到最低;其二,采用边界强度直方图技术自适应地选取阈值,能够有效地去除多种噪声边界对条码识别的影响.经过图象级的识别后,再结合 PDF417 数据级所用的 Reed-Solomon 纠错算法^[1-2],能够获得更高的识别率,识别污染程度更高的条码,如表 2 所示.

表 2 流通后的条码图象识别率 单位: %

算法	模块宽度 (1/600inch)			
	3	4	5	6
傅立叶变换算法	95.5	97.5	98.5	100
结合 RS 纠错算法	98.5	100	100	100

图 11 为一受多种污染的条码,其模块宽度为 4/600inch.综合利用本文提出的算法,能够达到无一误码^[2].

表 1 3 种识别方法的比较

模块宽度 (1/600inch)	图象级识别率 (%)		
	边界检测	峰点检测	傅立叶变换
3	65.5	75.5	98.5
4	78.0	86.5	99.5
5	98.5	99.5	100
6	100	100	100

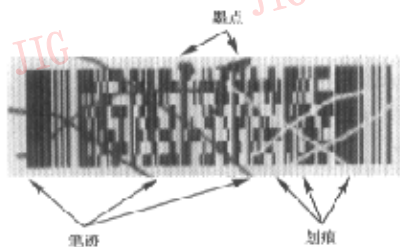


图11 受多种污染的条码

5 结 论

针对光学系统点扩展函数对条码识别的影响,提出了一种实用的傅立叶反模糊滤波算法,该算法能很好地复原出原始的条码信号,结合边界强度直方图选取阈值的策略,算法具有很好的稳定性.研究结果表明,综合利用本该算法能有效地去除点扩展函数和图象噪音对条码识别的影响,显著提高了条码的识别率,尤其是高密条码.这点正符合了二维条码大信息量的用户需求,具有很大的实际应用价值.

参 考 文 献

- 1 Pavlidis J, Swartz J, Wang Y P. Information encoding with two-dimensional bar codes[J]. IEEE Computer, 1992, 25(6): 18~28.
- 2 张铎,王耀球. 条码技术与电子数据交换[M]. 北京:中国铁道出版社,1998.
- 3 Sriram T, Rao V K. Applications of barcode technology in automated storage & retrieval systems [A]. In: Industrial Electronics Conference Proceedings[C], Taipei, Taiwan, 1996, 1: 5~10.

- 4 Joseph E, Pavlidis T. Waveform recognition with application to bar codes [A]. In: IEEE System, Man, and Cybernetics Proceedings[C], Charlottesville, Virginia, USA, 1991: 129~134.
- 5 Shellhammer S J, Goren D P. Novel signal processing techniques in barcode scanning [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 1999, 6(1): 57~65.
- 6 Snyder, Love J D. Optical waveguide theory [M]. London: Chapman and Hall, 1983.
- 7 Castleman Kenneth R 著. 数字图像处理[M]. 朱志刚等译. 北京:电子工业出版社, 1998.
- 8 Hummel R A, Kimia B, Zucker S W. Deblurring gaussian blur [J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1987, 38(1): 66~80.



刘宁钟 1975年生,现为南京理工大学计算机系模式识别和人工智能专业博士生. 主要研究方向为自动识别、图象检索、信息融合等.



杨静宇 1941年生,教授,博士生导师. 主要研究方向为人工智能、机器人、多传感器信息融合等.