

CHEN, R., ZHENG, Z., ZHAO, H., REN, J. and TAN, H. 2021. 一种基于模糊成像机理的QR 码图像快速盲复原方法. = [Fast blind restoration of QR code images based on blurred imaging mechanism]. *Guangzi xuebao/Acta photonica sinica* [online], 50(7), article 0710003. Available from: <https://doi.org/10.3788/gzxb20215007.0710003>

一种基于模糊成像机理的QR 码图像快速盲复原方法. = [Fast blind restoration of QR code images based on blurred imaging mechanism].

CHEN, R., ZHENG, Z., ZHAO, H., REN, J. and TAN, H.

2021

Publisher copyright statement.

引用格式: CHEN Rongjun, ZHENG Zhijun, ZHAO Huimin, et al. Fast Blind Restoration of QR Code Images Based on Blurred Imaging Mechanism[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(7):0710003

陈荣军, 郑志君, 赵慧民, 等. 一种基于模糊成像机理的 QR 码图像快速盲复原方法[J]. 光子学报, 2021, 50(7):0710003

一种基于模糊成像机理的 QR 码图像快速 盲复原方法

陈荣军^{1,2}, 郑志君¹, 赵慧民¹, 任金昌^{1,3}, 谭洪舟²

(1 广东技术师范大学 计算机科学学院, 广州 510665)

(2 中山大学 电子与信息工程学院, 广州 510006)

(3 罗伯特戈登大学 国家深海中心, 英国 阿伯丁 AB10 7RQ)

摘要:提出了一种基于模糊成像机理的 QR 码图像快速盲复原方法。在对模糊成像弥散光斑质心不变性研究的基础上,设计圆形寻像图形,在成像模糊时能通过连通域等方法快速检测到图形质心以及 QR 码符号位置,再结合阶跃边缘特性、梯度强度特性、边缘检测技术以及光学成像机理快速准确估计出模糊 QR 码图像离焦半径大小,应用维纳滤波算法快速且有效复原 QR 码图像。与对比算法相比,本文算法在结构相似性和峰值信噪比上都有提升,特别是在复原速度上有显著提高,其平均复原时间为 0.329 2 s。该方法能够以较高的精度估算出离焦半径大小,并能快速实现 QR 码图像的盲复原,具有快速性及稳健性优势,便于嵌入式硬件实现,能较好适用于条码标识相关的工业物联网应用场景。

关键词:光学成像; QR 码图像; 离焦模糊; 图像盲复原; 弥散光斑; 物联网系统

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20215007.0710003

Fast Blind Restoration of QR Code Images Based on Blurred Imaging Mechanism

CHEN Rongjun^{1,2}, ZHENG Zhijun¹, ZHAO Huimin¹, REN Jinchang^{1,3}, TAN Hongzhou²

(1 School of Computer Science, Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510665, China)

(2 School of Electronics and Information Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)

(3 National Subsea Centre, Robert Gordon University, Aberdeen, AB10 7RQ, U.K.)

Abstract: A fast blind restoration method of QR code images was proposed based on a blurred imaging mechanism. On the basis of the research on the centroid invariance of the blurred imaging diffuse light spots, the circular finder pattern is designed. When the image is blurred, the centroid of the pattern and the position of the QR code symbol can be quickly detected by methods such as connected components. Moreover, combined with step edge characteristics, gradient and intensity characteristics, edge detection technology, and optical imaging mechanism, the defocus radius of the blurred QR code image can be quickly and accurately estimated. Furthermore, the Wiener filter is applied to restore the QR code image quickly and effectively. Compared with the other algorithms, the proposed method has improved deblurring

基金项目:国家自然科学基金(No. 62072122),广东省普通高校重点实验室项目(No. 2019KSYS009),广东省普通高校特色创新类项目(No. 2018KTSCX120),广东省自然科学基金—博士启动项目(No. 2016A030310335),广东省科技计划项目(Nos. 2017B090908006, 2021A0505630074),广东省普通高校青年创新人才类项目(No. 2018KQNCX138)

第一作者:陈荣军(1978—),男,副教授,硕士生导师,主要研究方向为图像感知与智能处理、物联网技术等。Email: chenrongjun@gpnu.edu.cn

通讯作者:任金昌(1970—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为高光谱成像、计算机视觉和多媒体信号处理、机器学习和大数据分析等。Email: jinchang.ren@ieee.org

收稿日期:2021-05-16; **录用日期:**2021-07-08

<http://www.photon.ac.cn>

results in both structural similarity and peak signal-to-noise ratio, especially in the recovery speed. The average recovery time is 0.329 2 s. Experimental results show that this method can estimate the defocus radius with high accuracy and can quickly realize the blind restoration of QR code images. It has the advantages of rapidity and robustness, which are convenient for embedded hardware implementation and suitable for barcode identification-related industrial Internet of Things application scenarios.

Key words: Optical imaging; QR code image; Out-of-focus blurred; Image restoration; Diffuse light spots; Internet of things systems

OCIS Codes: 100.3008; 110.1220

0 引言

随着物联网技术及信息技术等通用技术的发展,互联网提供了人们共享信息可以不受时间和空间限制的环境^[1]。而二维条码作为互联网的主要入口,具有识别速度快、占用空间小、数据密度大、应用范围广的特点,广泛应用于生活中的各个领域^[2]。快速响应(Quick Response, QR)码作为常见的二维条码,在实际条码应用系统中,由于成像的物距、像距或焦距未达到理想条件,经常会采集到离焦模糊的QR码图像,从而降低整个系统的性能。

针对此现象,国内外许多学者提出了若干解决方法,且已取得了不错的效果。TU Dan等^[3]利用QR码的灰度分布特征和模糊图像的边缘来计算点扩散函数,并进行图像恢复。LI Renzhe等^[4]利用NAS-RIF算法的收敛速度,将条码图像的双峰特征作为限制条件,从而提高QR码图像的抗噪能力和恢复效果。杜菲等^[5]采用基于强度和梯度先验的L0正则化方法对QR码图像进行去模糊,针对不同类型的模糊图像,都具有良好的效果。YANG Lingxiao等^[6]提出了一种基于Bernsen二值化算法的低质量QR码识别算法,适合处理模糊程度较低的图像,但对非线性畸变图像处理效果较差。另一方面,针对QR码图像的二值特征和符号特征,LIU Ningzhong等^[7]提出了一种基于二值特征和L0范数最小化的交替最小化恢复模型,RIOUS G等^[8]提出一种完全基于Kullback-Leibler散度的盲去模糊和去噪方法,以及VAN G等^[9]和CHOKSI R等^[10]提出的基于正则化方法,有效解决二维码图像恢复的不适定问题,并防止图像过拟合。

上述算法中,依据模型的算法需要大量迭代运算才能达到收敛,且在考虑图像特征时忽略了条码图像本身的抗模糊能力,导致去卷积运算效率低,从而降低了系统性能,无法满足系统的实时性要求,因此不适用于计算能力有限的设备。此外,LIN Fanqiang等^[11]采用深度学习模型生成对抗网络实现数据集内多种不同模糊程度的QR码图像去模糊,PU Haitao等^[12]提出了双卷积神经网络,利用深度学习技术弥补传统基于模型的方法与模糊二维条码图像反转要求之间的差距。然而,使用深度学习方法处理QR码图像模糊的算法相对较少,其性能还有待提高,特别是训练数据和测试数据一致性方面。

为克服上述去模糊效果的不足,本文提出了一种基于模糊成像机理的QR码图像快速盲复原方法。与一般QR码图像不同,该图像增加了三个圆形图像图形,在弥散光斑质心不变性理论的基础上复原图像。经实验验证,该方法具有较高的速度和估算精度。

1 方法原理

介绍了QR码退化模型和模糊类型,根据离焦模糊类型从光学角度出发研究模糊成像原理,进而设计具有抗模糊特性的QR码图像。

1.1 QR码退化模型和模糊类型

镜头的抖动、震动及对焦不准,容易产生图像的模糊,这是一种常见的图像退化类型^[13]。一般情况,图像退化的模型为

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) + n(x, y) \quad (1)$$

式中, $f(x, y)$ 表示原始清晰图像,*表示卷积运算符, $n(x, y)$ 表示噪声, $g(x, y)$ 表示模糊图像, $h(x, y)$ 表示点扩散函数,即模糊核^[14]。常见的模糊类型有运动模糊、离焦模糊和高斯模糊,而离焦模糊是最常见的模糊问题。根据模糊核是否已知,图像复原可以分为盲复原和非盲复原。一般情况下,模糊核是未知的^[15],本文研究离焦模糊盲复原问题,其退化模型的点扩散函数表示为

$$h(x,y)=\begin{cases} \frac{1}{\pi R^2}, & x^2+y^2=R^2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

式中, R 表示离焦模糊半径,同一图像中, R 的值越大,图像越模糊。

1.2 QR码光学成像理论

当成像面与传感器面之间的距离足够大时,光学成像系统会发生离焦现象,根据弥散光斑质心不变性^[16]及模糊不变矩原理^[17],本小节从光学及信息论角度分析离焦成像原理,其透镜成像过程如图1所示。

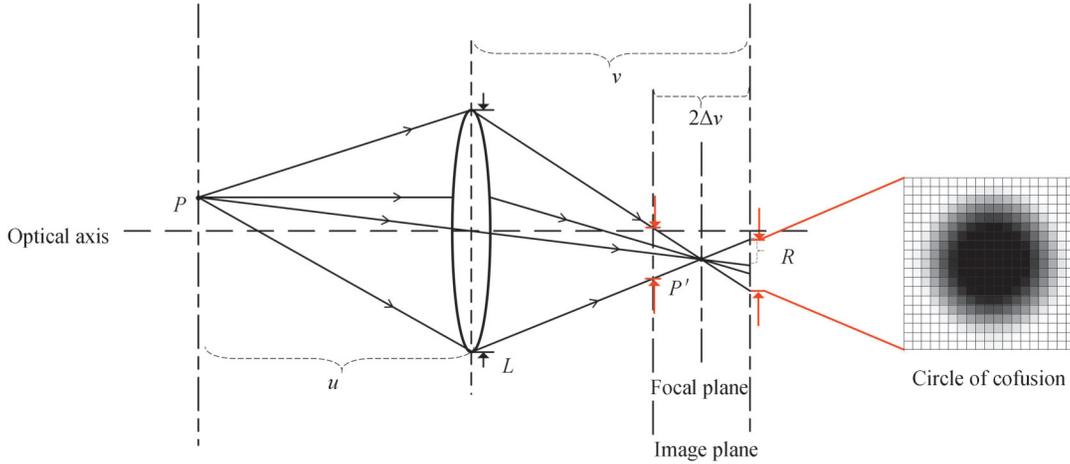


图1 透镜成像示意图

Fig.1 Schematic diagram of the lens imaging

在图1中,点 P 通过透镜直径为 L 在成像面上成像, P' 是焦平面位置的成像。依据基本几何光学定律可知,当经过理想的光学成像系统时,光源点 P 处在像面上呈相同的点光源像。当光源经透镜系统成像,且在像平面的位置不处于焦平面时,能量将被重新分配于成像面上,形成一个半径为 R 的弥散圆^[18],图像越模糊,弥散圆越大^[19]。

根据高斯成像方程,结合透镜成像示意图,可得

$$f^{-1} = u^{-1} + v^{-1} \quad (3)$$

式中, u 是物距, v 是像距, f 是光学系统焦距,从几何关系可得出

$$L\Delta v = 2Rv \quad (4)$$

式中, Δv 为焦平面到成像面的距离。结合式(3)、(4),可得,弥散圆的半径与光学成像中其他参数的关系为

$$R = [\Delta v L (u - f)]^{-1} 2uf \quad (5)$$

从信息论角度出发,透镜成像系统的方程式为

$$I(y) = \int O(x)h(y,x)dx \quad (6)$$

式中, $h(y,x)$ 具有空间移不变性^[20-21], $O(x)$ 为物面的光照强度分布, $I(y)$ 为像面的光照强度分布。

1.3 具有抗模糊特性的QR码图像

设计一种具有抗模糊特性的QR码图像,如图2所示,其中,图2(a)由三个圆形寻像图形及QR码符号组成,其三个圆形的质心决定获取QR码符号位置信息的准确性,图2(b)是清晰圆形图像及其灰度分布三维图,图2(c)是模糊半径为20的均匀离焦圆形图像及其灰度分布三维图。假设图2(b)与2(c)背景噪声一致,根据灰度质心法^[22],有

$$\begin{cases} \hat{x} = \sum_X^{M \times N} iX(x,y) / \sum_X^{M \times N} X(x,y) \\ \hat{y} = \sum_X^{M \times N} jX(x,y) / \sum_X^{M \times N} X(x,y) \end{cases} \quad (7)$$

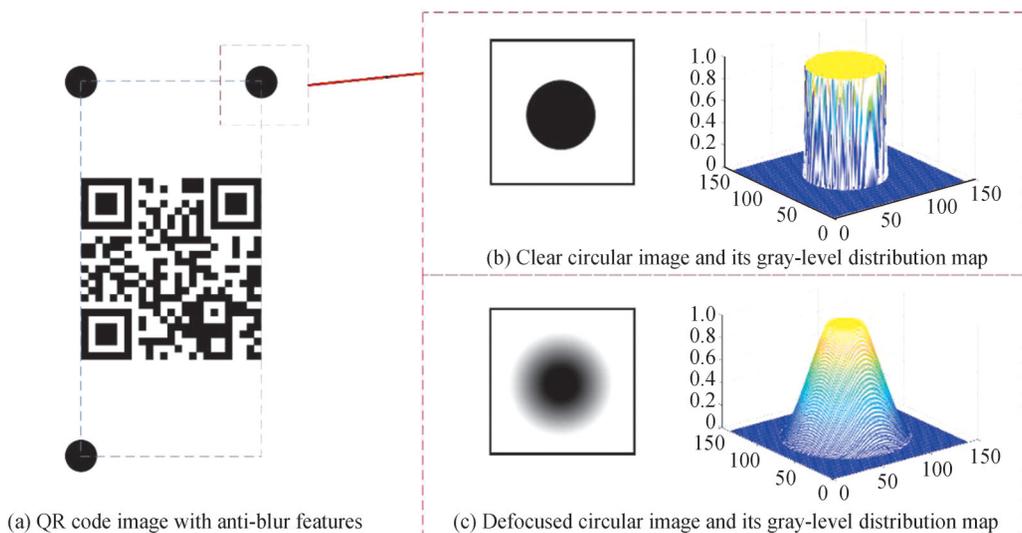


图2 QR码图像设计图

Fig.2 QR code image design diagram

式中, (\hat{x}, \hat{y}) 为质心坐标值, $X(i, j)$ 为点 (i, j) 的像素值, M, N 分别为图像的宽度和长度。利用式(7), 可求得图2(b)及图2(c)的质心坐标 $(\hat{x}_b, \hat{y}_b) = (210.8268, 69.8684)$, $(\hat{x}_c, \hat{y}_c) = (210.8266, 69.8683)$ 。在背景噪声一致时, 光斑质心与清晰时的位置信息近似相等, 这是本文方法的理论指导。

2 利用圆形寻像图形复原图像

依据第1节方法原理, 设计了一种具有抗模糊特性的QR码图像。该图像主要用三个圆形寻像图形及QR码符号组成, 具有抗模糊功能。本节主要利用圆形寻像图形复原模糊图像, 进而从准确度出发, 分析符号的大小和位置对抗模糊性的影响。

2.1 复原方法

为克服传统算法迭代次数多导致的时间过长及未考虑QR码图像阶跃边缘特性^[13, 15, 23], 提出一种基于模糊成像机理的QR码图像快速盲复原方法。方法的架构图如图3所示。首先, 对输入图像进行预处理, 包括

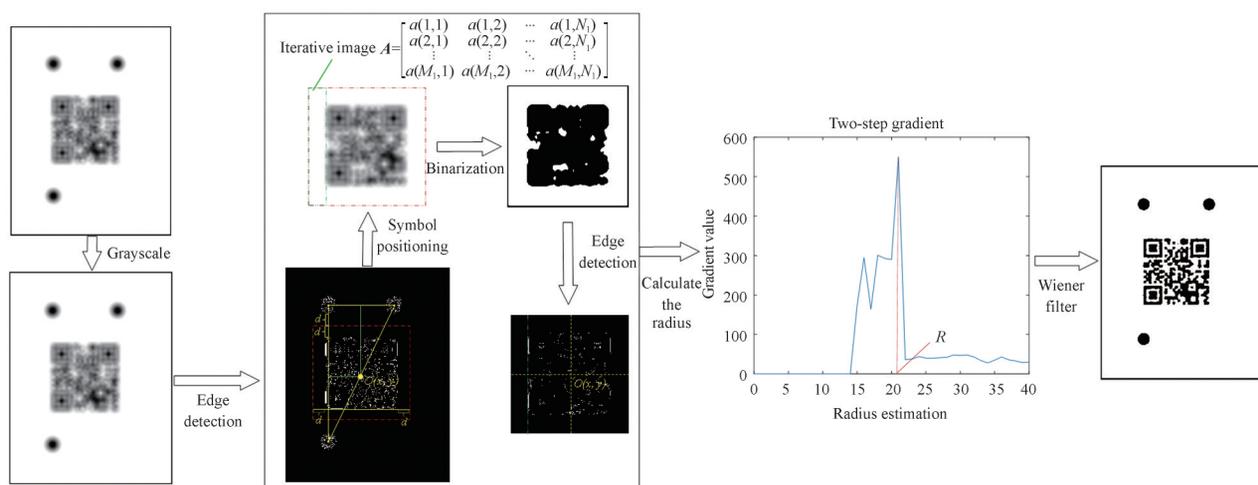


图3 本文方法架构图

Fig.3 Method architecture diagram of the paper

转换为灰度图像。然后根据图像灰度值判断图像是否为清晰图像, 通过利用积分图像^[24]计算像素的灰度值之和^[2], 当积分图像达到一定值, 则为清晰图像, 输出图像即为二值化图像; 否则, 使用Sobel算子^[25]做边缘检

测,进而在检测图像中通过定位质心的方法确定QR码符号位置,符号中心设为 $O(x, y)$,图像起点到左上质心及左下质心连线的距离为 S ,QR码符号的外边距为 d 。其中,圆的位置采用搜索连通域的方法^[16]。接着找到符号的边缘,获取迭代图像 A ,以 A 为主要部分计算符号二阶导数最大列所在的横坐标 D ,相关公式如式(8)~(15)。

清晰的QR码图像有明显的阶跃边缘,其相应的数学公式可以表示为

$$f(x, y) = a + b\delta(x) \quad (8)$$

式中, $\delta(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$,表示标准Heaviside函数, a 和 b 是整数,且 $0 \leq a \leq 255, 0 \leq b \leq 255, 0 \leq a + b \leq 255$ 。

结合式(1)、(2)和(8),假设不考虑噪声的影响,由

$$\frac{\partial g(x, y)}{\partial x} = h(x, y) * \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} = h(x, y) * b\delta(x) \quad (9)$$

从积分角度考虑,可得

$$\frac{\partial g(x, y)}{\partial x} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(\alpha, \beta) b\delta(x - a) d\alpha d\beta = b \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} h(\alpha, \beta) b\delta(x - a) d\alpha \right] d\beta = b \int_{-\infty}^{\infty} h(x, \beta) d\beta \quad (10)$$

根据导数值变化率最大的点即为模糊图像二阶梯度最大值点,进一步求出二阶导数

$$\frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial x^2} = \frac{b\partial \left[\int_{-\infty}^{\infty} h(x, \beta) d\beta \right]}{\partial x} = \frac{b\partial \left[\int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) dy \right]}{\partial x} \quad (11)$$

结合式(2),沿梯度方向可得

$$\frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial x^2} = \left| \frac{-2bx}{\pi R^2 \sqrt{R^2 - x^2}} \right| = \frac{2bx}{\pi R^2 \sqrt{R^2 - x^2}} \quad (x \neq \pm R) \quad (12)$$

式(12)为离焦半径与二阶导数的关系,求得二阶导数即可获取离焦半径。从导数定义出发,将增量设为1,函数在梯度方向上变化率最大,则一阶导数为图像一阶梯度,如式(13),二阶导数为图像二阶梯度,如式(14)。

$$\frac{\partial g(x, y)}{\partial x} = |g(x + 1, y) - g(x, y)| \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 g(x, y)}{\partial x^2} = \left| \frac{\partial g(x + 1, y)}{\partial x} - \frac{\partial g(x, y)}{\partial x} \right| \quad (14)$$

在迭代图像中,统计二阶梯度最大边缘为

$$D = \arg \max_x \left[\sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 g(x, j)}{\partial x^2} \right] \quad (15)$$

根据以上推导可知,通过坐标转换,结合光学成像定理及光学信息论可得出,模糊半径 $R = S - D$ 。最后,已知离焦模糊函数中的参数模糊半径,将图像盲复原问题转化为非盲复原问题,采用典型的Winner滤波算法^[26],即可快速复原图像。

2.2 符号大小及位置对算法准确度影响

拍摄过程中难免会由于高低、位置偏移导致图像不在理想区域内,本节主要分析符号大小及位置对算法准确度的影响。如图4所示,图像大小统一为300 pixels×300 pixels,且模糊半径大小统一设为10,(1)层为清晰图像,(2)层为模糊图像,(3)层为复原图像。其中,图4(a)~(d)为符号大小不同的对比图,以图4(a)为准,从图4(b)到(d),符号大小依次为图4(a)的9/10、8/10、7/10倍。接着,以图4(c)为准,将符号做左上、右上、左下、右下等移动操作,考量不同位置对算法精度的影响。参数值如表1所示,EdgeB是QR码符号的边缘横坐标。

从表1可看出,对不同大小及不同位置的模糊QR码图像,计算的模糊半径与输入图像的模糊程度一致,说明符号的大小与位置并不影响本文算法的准确度,算法具有较高的稳健性。

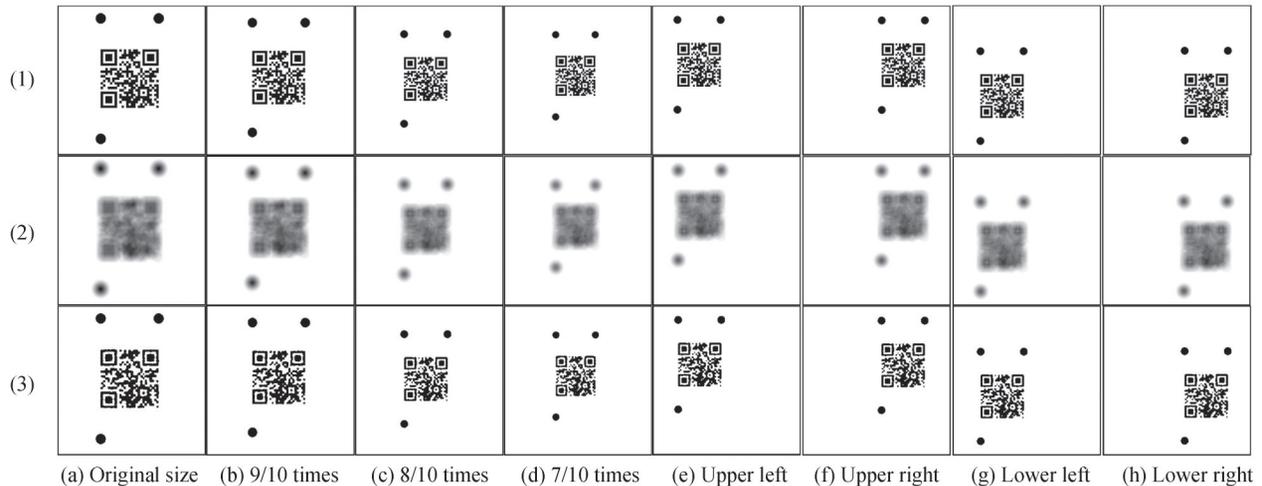


图4 大小及位置不同的QR码符号对比图

Fig.4 Comparison diagram of QR code symbols in different sizes and positions

表1 不同大小及不同位置的QR码符号复原参数对比

Table 1 Comparison of restoration parameters of QR code symbols of different sizes and positions

QR code symbols	EdgeB	d	O_x	O_y	S	D	R
Original size	81	31	146	147	87	77	10
9/10 times	86	28	146	145	92	82	10
8/10 times	92	23	142	148	98	88	10
7/10 times	98	21	145	141	105	95	10
Upper left	44	23	94	119	50	40	10
Upper right	154	23	204	120	160	150	10
Lower left	49	23	99	183	55	45	10
Lower right	159	23	209	182	165	155	10

3 实验分析与讨论

为证实本文提出的QR码图像盲复原方法的有效性,以真实应用场景为例,搭建实验环境,从复原效果、计算时间和识别率三个角度进行对比分析。其实验条件为:输入图像大小统一为300 pixels×300 pixels,拍摄设备采用型号为Nikon N90的单反相机,操作系统为Windows 10专业版,中央处理器为Intel(R) Core(TM) i7-8700,运行软件为Matlab2018a。实验测试的模糊QR码图像版本以版本1-5为主,且纠错等级统一为H。本文将采用的Wiener滤波复原算法的参数即噪信比设为NSPR=0.001。此外,对比算法参数为:kernel_size=13, lambda_dark= 4×10^{-3} , lambda_grad= 4×10^{-3} , lambda_tv=0.003, lambda_l0= 5×10^{-4} , weight_ring=1, border=30, lambda_grad= 4×10^{-3} 。

首先,选取3张不同大小不同模糊程度的QR码图像,并采用不同的算法进行去模糊处理,如图5所示。接着采用全参考图像评价方法PSNR^[27]和SSIM^[28]对比复原效果,如表2所示。通过对比可看出,本文算法对不同清晰度不同大小的QR码符号具有较好的复原效果,且相较于WEN F算法^[15],YAN Y算法^[23]及BAI Y C算法^[13]的复原效果更佳。

选取10张不同大小以及不同模糊程度的QR码图像,其复原效果如图6。其中图6(a)是PSNR对比图,6(b)是SSIM对比图。可以看出,相较于WEN F算法^[15],本文算法、YAN Y算法^[23]和BAI Y C算法^[13]具有较好的复原效果,但BAI Y C算法^[13]和本文算法具有较好的稳定性。

在小批量样本基础上,选取130张符号大小及模糊程度不同的QR码图像,从平均计算时间及识别率上分析,对应的统计数据如表3所示。其中Zxing计算的识别率由Matlab软件调用扫描,而Wochacha和Wechat(微信)软件采用的扫描设备为iPhone 8Plus 256G,软件版本为14.4.2。可以看出,本文算法在Zxing及

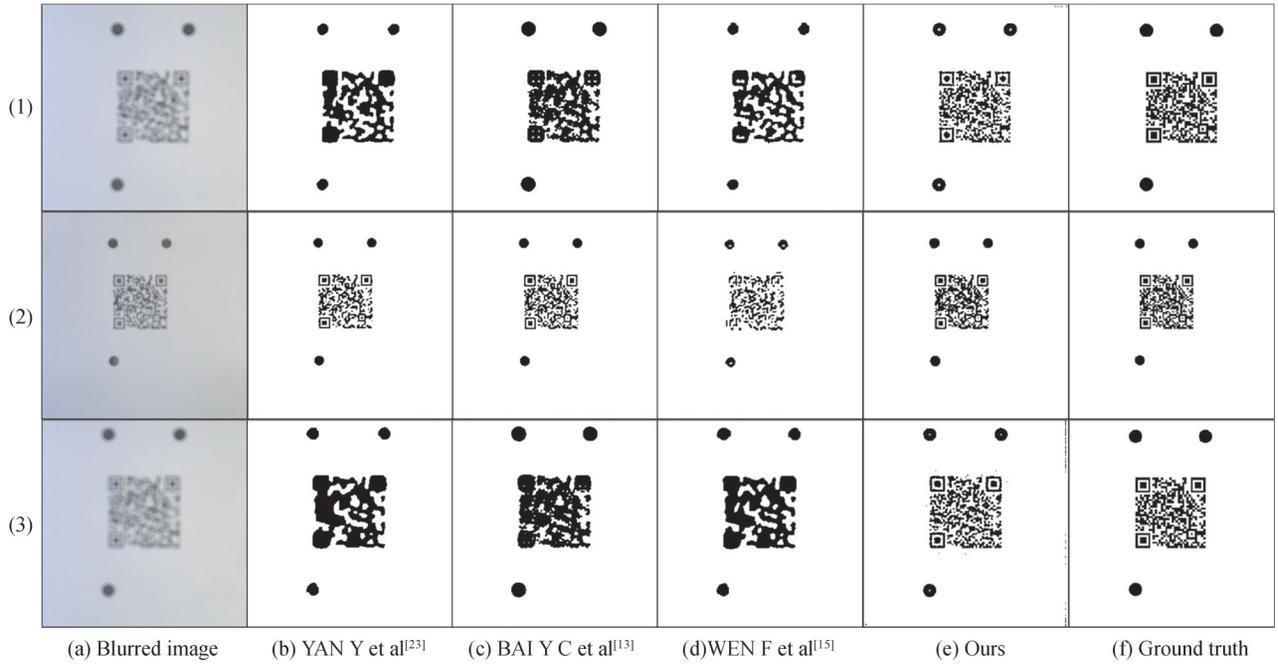


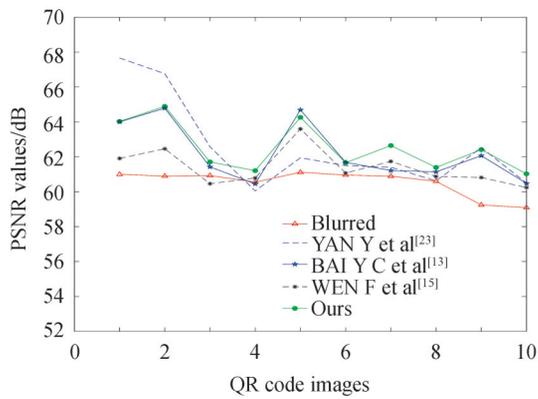
图5 不同复原算法对比图

Fig.5 Comparison of four restoration algorithms

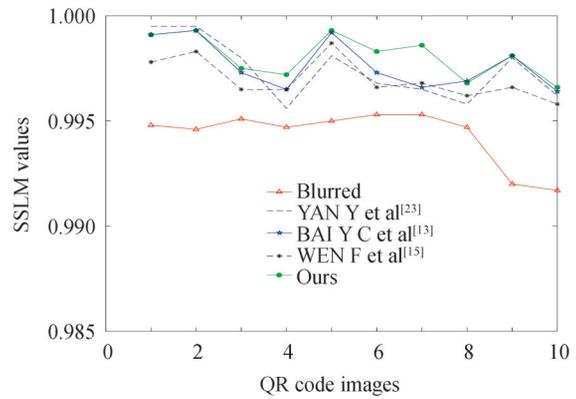
表2 复原效果分析

Table 2 Analysis of restoration effect

Figures	Image quality	Blurred	YAN Y et al ^[23]	BAI Y C et al ^[13]	WEN F et al ^[15]	Ours
Fig. 5(1)	PSNR	60.956 7	61.493 8	61.684 8	61.073 8	61.663 9
	SSIM	0.995 3	0.996 8	0.997 3	0.996 6	0.998 3
Fig. 5(2)	PSNR	60.895 1	66.765 0	64.787 6	62.461 1	64.892 0
	SSIM	0.994 6	0.999 5	0.999 3	0.998 3	0.999 3
Fig. 5(3)	PSNR	60.892 9	61.404 2	61.215 3	61.740 6	62.647 7
	SSIM	0.995 3	0.996 5	0.996 6	0.996 8	0.998 6



(a) PSNR comparison



(b) SSIM comparison

图6 不同复原算法对比图

Fig. 6 Comparison of four restoration algorithms.

表3 计算时间及可识别性分析
Table 3 Analysis of operation time and recognizability

Algorithms	Recognition rate			Average operation time T/s
	Zxing (v3.4.0)	Wochacha (v10.0.1)	Wechat (v8.0.5)	
YAN Y et. al ^[23]	24.62%	72.31%	79%	14.879 6
BAI Y C et. al ^[13]	20.00%	89.23%	90.77%	9.035 5
WEN F et. al ^[15]	6.92%	44.62%	51.51%	9.633 1
Ours	70.77%	86.92%	93.08%	0.329 2

微信软件上的效果最好,可达到70.77%及93.08%,而使用Wochacha软件扫描时,BAI Y C算法^[13]的识别率为89.23%。在速度方面,本文算法的平均操作时间是0.329 2 s,与对比算法相比,提高了1~2个数量级,表明本文算法具有较高的实际应用价值。而对比算法可更有效的处理图像复原过程中产生的振铃效应,擅于处理图像不均匀模糊、模糊程度较小、噪声较多的情况。YAN Y算法^[23]和WEN F算法^[15]可较好地处理电子图像上的模糊,本文算法及BAI Y C算法^[13]则更适合于处理真实图像的模糊。对比算法的平均时间较长的主要原因在于其需要多次迭代,增加了过多的冗余计算,且未充分考虑QR码的阶跃边缘特性及梯度强度特性,导致图像识别率较低。此外,本文算法在复杂场景下具有一定的局限性,后续将结合频谱域特征分割^[29]、局部特征和多尺度空间特征的深度融合^[30]及无监督学习^[31]等方法,快速有效提取复杂环境下的QR码图像,从而提高算法的适用性。

4 结论

针对成像系统产生的离焦模糊现象,提出一种基于模糊成像机理的QR码图像快速盲复原方法。基于透镜成像原理、弥散光斑质心不变性和光学信息论等,结合阶跃边缘特性和梯度强度特性,利用圆形寻像图形,快速有效复原模糊的QR码图像。实验结果表明,本文方法可快速有效的估算PSF的参数,避免了大量的冗余计算量。同时,实验也验证了本文方法的稳健性和鲁棒性,适用于嵌入设备的硬件实现。

参考文献

- [1] AI Y T, WANG L, HAN Z, et al. Social networking and caching aided collaborative computing for the internet of things [J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(12): 149-155.
- [2] DING Weili, WANG Mingkui, GU Zhao, et al. A fast image correction method for multi-target QR codes[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1010001
丁伟利, 王明魁, 谷朝, 等. 一种多目标QR码图像快速校正方法[J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1010001.
- [3] TU Dan, GAN Yali, XU Zhongqi. A real-time deblurring algorithm for the QR barcode images[J]. Computer Engineering and Science, 2007, 29(3): 43-45.
涂丹, 甘亚莉, 徐宗琦. 一种快速的QR码图像去模糊方法[J]. 计算机工程与科学, 2007, 29(3): 43-45.
- [4] LI Renzhe, XU Gang. Recovery of image with blurred QR code[J]. Computer Applications and Software, 2013, 30(6): 258-261.
李人哲, 许刚. 模糊QR码图像的恢复[J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(6): 258-261.
- [5] DU Fei, ZENG Taiying. Recognition of fuzzy L0-regularized QR code based on intensity and gradient priori[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(3): 150-154.
杜菲, 曾台英. 基于强度和梯度先验的L₀正则化模糊QR码识别[J]. 包装工程, 2017, 38(3): 150-154.
- [6] YANG Lingxiao, FENG Qingxiu. The improvement binarization algorithm for QR code recognition[J]. Software Guide, 2020, 19(3): 163-167.
杨凌霄, 冯庆修. 改进二值化算法在QR码识别中的应用[J]. 软件导刊, 2020, 19(3): 163-167.
- [7] LIU N Z, DU Y N, XU Y. QR codes blind deconvolution algorithm based on binary characteristic and L0 norm minimization[J]. Pattern Recognition Letters, 2018, 111: 117-123.
- [8] RIOUS G, SCARVELIS C, CHOKSI R, et al. Blind deblurring of barcodes via Kullback-Leibler divergence[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2021, 43(1): 77-88.
- [9] GENNIP YVAN, ATHAVALE P, GILLES J, et al. A regularization approach to blind deblurring and denoising of QR barcodes[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(9): 2864-2873.
- [10] CHOKSI R, GENNIP YVAN, OBERMAN A. Anisotropic total variation regularized L1-approximation and denoising/deblurring of 2d bar codes[J]. Inverse Problems & Imaging, 2011, 5(3): 591-617.

- [11] LIN Fanqiang, CHEN Kecheng, CHEN Danlei, et al. QR code deblur algorithm based on generative adversarial network [J]. *Packaging Engineering*, 2018, 39(21): 222-228.
林凡强, 陈柯成, 陈丹蕾, 杨斯涵, 陈凡曾. 基于生成对抗网络的QR码去模糊算法[J]. *包装工程*, 2018, 39(21): 222-228.
- [12] PU H T, FAN M Q, YANG J L, et al. Quick response barcode deblurring via doubly convolutional neural network[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2019, 78(1): 897-912.
- [13] BAI Y C, CHEUNG G, LIU X M, et al. Graph-based blind image deblurring from a single photograph [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2018, 28(3): 1404-1418.
- [14] YANG Aiping, WANG Jinbin, YANG Bingwang, et al. Joint deep denoising prior for image blind deblurring[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(10): 1010003.
杨爱萍, 王金斌, 杨炳旺, 等. 联合深度去噪先验图像盲去模糊[J]. *光学学报*, 2018, 38(10): 1010003.
- [15] WEN F, YING R D, LIU Y P, et al. A simple local minimal intensity prior and an improved algorithm for blind image deblurring[J/OL]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology* [2020-10-27]. <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2020.3034137>.
- [16] CHEN Rongjun, TAN Hongzhou, TAN Weiqing, et al. A fast lens focus measurement method based on blurred image processing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0210002.
陈荣军, 谭洪舟, 谭伟清, 等. 一种基于模糊图像处理的透镜快速测焦方法[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0210002.
- [17] FLUSSER J, SUK T. Degraded image analysis: an invariant approach[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(6): 590-603.
- [18] CHEN R, ZHENG Z, YU Y, et al. Fast Restoration for out-of-focus blurred images of QR code with edge prior information via image sensing[J/OL]. *IEEE Sensors Journal* [2021-6-16]. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3085568>.
- [19] LIU Y Q, DU X, SHEN H L, et al. Estimating generalized Gaussian blur kernels for out-of-focus image deblurring[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems For Video Technology*, 2021, 31(3): 829-843.
- [20] SUN Shsoajie, WU Qiong, LI Guohui. Blind image deconvolution for defocus blurred image [J]. *Journal of Frontiers of Computer Science & Technology*, 2011, 5(4): 324-335.
孙韶杰, 吴琼, 李国辉. 离焦模糊图像的盲复原算法[J]. *计算机科学与探索*, 2011, 5(4): 324-335.
- [21] 周达敏, 陈荣军, 嵇志辉, 等. 一种圆形寻像图形二维码及其生成和解译方法: CN108256609A[P]. 2018-07-06.
- [22] WANG X, MA Q W, MA S P, et al. A marker locating method based on gray centroid algorithm and its application to displacement and strain measurement[C]. 2011 Fourth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, Mar. 28-29, 2011, Shenzhen, China: IEEE, 2011, 2: 932-935.
- [23] YAN Y, REN W, GUO Y, et al. Image deblurring via extreme channels prior[C]. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Jul. 21-26, 2017, Honolulu, Hawaii: IEEE, 2017, 4003-4011.
- [24] CHEN R, ZHENG Z, PAN J, et al. Fast blind deblurring of QR code images based on adaptive scale control[J/OL]. *Mobile Network & Application* [2021-7-2]. <https://doi.org/10.1007/s11036-021-01780-y>.
- [25] SOBEL M E. Asymptotic confidence intervals for indirect effects in structural equation models [J]. *Sociological Methodology*, 1982, 13: 290-312.
- [26] WIENER N. *Extrapolation, interpolation, and smoothing of stationary time series with engineering applications*[M]. John Wiley & Sons, 1950.
- [27] GAO Weizhe, ZOU Jianhua, ZHANG Rongzhi, et al. Fast blind image restoration algorithm based on power law [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(12): 1210001.
高伟哲, 邹建华, 张荣之, 等. 基于指数律分布的图像快速盲复原算法[J]. *光子学报*, 2016, 45(12): 1210001.
- [28] LI Zhengzhou, QING Lin, LI Bo, et al. Sparse prior-based space objects image blind inversion algorithm [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(2): 0210001.
李正周, 卿琳, 李博, 等. 基于稀疏先验的空间目标图像盲反演方法[J]. *光子学报*, 2020, 49(2): 0210001.
- [29] ZABALZA J, REN J, ZHENG J, et al. Novel two-dimensional singular spectrum analysis for effective feature extraction and data classification in hyperspectral imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(8): 4418-4433.
- [30] SUN G, ZHANG X, JIA X, et al. Deep fusion of localized spectral features and multi-scale spatial features for effective classification of hyperspectral images[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, 91, 102157.
- [31] SUN H, REN J, ZHAO H, et al. Adaptive distance-based band hierarchy (ADBH) for effective hyperspectral band selection[J/OL]. *IEEE Transactions on Cybernetics* [2020-3-24]. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2020.2977750>.

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 62072122), the Key Lab Project of the Education Department of Guangdong Province (No. 2019KSYS009), the Project for Distinctive Innovation of Ordinary Universities of Guangdong Province (No. 2018KTSXCX120), the Ph.D. Start-up Fund of Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 2016A030310335), the Science and Technology Planning Project of Guangdong Province (Nos. 2017B090908006, 2021A0505630074), Guangdong Colleges and Universities Young Innovative Talents Projects (No. 2018KQNCX138)