

基于透视变换的 3D 柱面失真快速响应码修复算法

苏育挺, 严昌飞, 刘婧*

天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072

摘要 现有的解码算法在识别具有复杂 3D 失真(比如柱面失真)的快速响应(QR)码时会遇到困难,导致数据无法被提取。为此,提出了一种低成本而高效的 3D 柱面失真 QR 码的修复算法。所提算法包括三个阶段:首先,通过逆向透视变换还原出 3D 真实世界的柱面失真 QR 码;然后,失真的 QR 码被展开成平面;最后,使用与第一阶段超参数相同的透视变换获得修复 QR 码。实验结果表明,所提算法可以处理不同柱面失真的 QR 码,并且仅使用少量的相机内部参数即可工作。

关键词 图像处理; QR 码; 柱面失真; 透视变换; 逆向透视变换

中图分类号 TP391.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0810015

Restoring 3D Cylindrically Distorted QR Code Based on Perspective Transformation

SuYuting, Yan Changfei, Liu Jing*

School of Electronics and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract Existing decoding algorithms encounter difficulties in recognizing quick response (QR) codes with complex three-dimensional (3D) distortions (e.g., cylindrical distortion), resulting in the inability to extract data. In this paper, we propose a low-cost and efficient restoration algorithm for 3D cylindrically distorted QR codes. The proposed algorithm is composed of three stages. First, it restores a cylindrically distorted QR code in 3D real-world coordinates by inverse perspective transformation; then the distorted QR code is flattened in 3D real-world coordinates. Finally, the restored QR code is obtained by perspective transformation with the same hyperparameters as those in the first stage. The experimental results demonstrate that the proposed algorithm can handle different cylindrically distorted QR codes and work with only a small number of hyperparameters based on the camera's internal parameters.

Key words image processing; QR code; cylindrical distortion; perspective transformation; inverse perspective transformation

OCIS codes 100.2960; 100.4994; 150.1135

1 引言

数据矩阵码(DMC)是一种二维条形码,其形状通过堆叠点或方阵而生成。作为最流行的 DMC 之一,快速响应(QR)码已广泛应用于日常生活和工业生产中,满足了用户的爆炸性需求。由于 QR 码的广泛使用和重要性,目前有关 QR 码的研究有很多,

包括视频嵌入 QR 码^[1]、防伪校验^[2]、车辆自动导引^[3]、QR 码标刻^[4]。

目前识别和修复 QR 码仍然充满挑战。当前的解码方法(例如 Zxing^[5]、Zbar^[6])和某些开源库(例如 Libdmtx^[7]、OpenCV^[8])中的解码算法无法直接解码失真的 QR 码,必须通过一些预处理方法来消除失真。目前可以通过简单的校正方法(例如

收稿日期: 2020-08-20; 修回日期: 2020-08-28; 录用日期: 2020-09-14

基金项目: 国家自然科学基金(61701341)

*E-mail: jliu_tju@tju.edu.cn

Gamma 校正、旋转)或者特征算子(例如分数阶积分^[9]、灰狼优化算法^[10])解决一些常见的失真,也有部分深度学习方法(例如堆叠式自编码器^[11]、卷积神经网络^[12-13])被尝试用来修复运动模糊和斑块失真,但是修复的图像还存在主观可见的失真。目前依然有部分失真(例如 3D 几何失真)是现有的解码算法依旧无法很好处理的。在 3D 柱面失真中,每个位置与成像平面之间的角度和距离是不同的,因此失真的程度也是不一致的,当前的算法很难修复圆柱面上的 QR 码。

在处理失真前通常需要 QR 码定位。在平面上, Li 等^[14]使用形态学操作和 Hough 变换来检测 QR 码的边界,王素敏等^[15]使用轮廓检测,通过查找具有多个内轮廓的轮廓来判断 QR 码边角区域。在圆柱表面上, Chen 等^[16]利用轮廓树聚类轮廓,并使用斜率和坐标值获得 QR 码外边缘,而 Wakahara 等^[17-18]根据 QR 码的定位符的黑白间隔比率是固定的(1 : 1 : 3 : 1 : 1)这个特征来定位 QR 码区域。

为了修复几何变形, Lay 等^[19]建议利用透视变换来修复圆柱面 QR 码,但是此方法需要先获得相机到圆柱的距离。He 等^[20]提出了一种无需超参数的圆柱表面 QR 码修复方法,但是需要利用摄像机拍摄旋转圆柱体,然后使用多帧拼接旋转的 QR 码实现复原。李红卫等^[21]在固定场景下使用相机进行标定,获得 QR 码的空间表达式。刘烽杰等^[22]提出了一种通过 2D 仿射变换修复 QR 码的方法,该方法首先将 QR 码分成若干个宽度相同的块,并计算每个块对应的弧长,然后将每个块的宽度拉伸到对应的弧长并重新拼接,获得修复的 QR 码。该方法虽然简单,但是使用的分段仿射对形变严重的区域存在拟合不足的问题,导致失真依旧存在。

因此本文提出了一个新颖的框架,该框架由定位算法和修复算法组成,能够定位和识别 3D 圆柱失真的 QR 码,算法仅需要很少的超参数量。定位算法根据具有固定间隔比率的定位图形来锁定 QR 码位置。修复算法首先将 2D 失真的 QR 图像反向投影到 3D 真实世界场景,然后将柱面 QR 码展平,最后投影到成像平面以消除柱面失真。

2 基本原理

2.1 定位算法

整个框架流程首先实现对 QR 码的定位,然后根据定位结果计算必要的超参数,最后实现 QR 码修复算法,如图 1 所示。首先对输入图像进行灰度

化,并进行中值滤波以消除较小的噪声区域。由于小尺寸的核可能无法有效消除噪声,而大尺寸的核又可能导致 QR 码中每个单元边界变得模糊,因此设置中值滤波的核大小为 7。然后对图像进行二值化^[23]处理,并采用腐蚀和膨胀处理进一步消除面积较小的连通区域,腐蚀和膨胀核大小也都设置为 7,该尺寸的核足以消除噪声的同时又不至于严重破坏 QR 码中每个单元的边界区域。本文采取形态学开运算(先腐蚀后膨胀),保证连通区域不会有过度的合并。

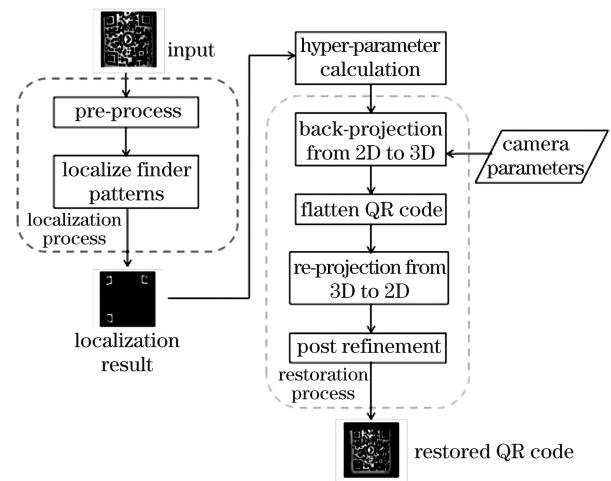


图 1 网络整体框架

Fig. 1 Overall network framework

对于输入的 QR 码,如图 2 所示,定位符的结构是固定的,黑白区域之间的间隔比率为 1 : 1 : 3 : 1 : 1。基于此先验,如果在水平、垂直和对角线方向上扫描连通域时,白色和中心黑色区域的间隔比能够接近 1 : 3 : 1,则该连通域即为定位符所在区域。为了简化搜索过程,计算每个连通域的质心的行和列,并在质心所在的行上计算水平间隔比和在列上计算垂直间隔比。对于检测出的定位符,计算连通

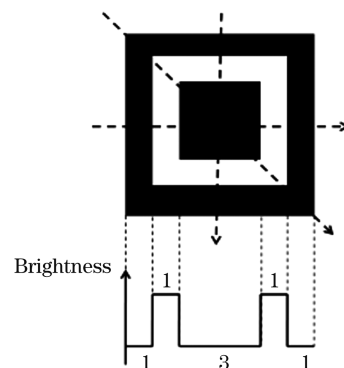


图 2 QR 码定位符结构

Fig. 2 Structure of finder pattern of QR code

域中各点到图像四个角坐标的最短欧氏距离,记录达到该距离的坐标,该坐标即 QR 码的顶点。如果存在多个具有相同最短距离的点,则将这些点的平均坐标作为顶点。

2.2 修复算法

柱面失真修复就是将柱面 QR 码转为平面 QR 码,即将每个位置的码元拉伸至对应的弧长,但是 3D 柱面中垂直于成像平面的维度在 2D 图像中被压缩了,因此在图像中是无法求得每个码元对应的弧长的。同时不同位置与成像平面夹角的不同导致柱面失真的程度也是不同的,所以也无法使用同一变换将每个码元的投影宽度映射为对应的弧长。所以要想修复柱面失真,需要将 QR 码还原到世界坐标系去计算每个码元被压缩的垂直于成像平面的分量和弧长,然后逐位置将柱面展开成平面,并生成修复结果。

首先将图像中 QR 码的每个像素映射到世界坐标系下对应的坐标。图 3 展示了从像素坐标系到世界坐标系的整个转换过程。其中 $U-V$ 表示像素坐标系,假设图像的像素长度和宽度分别为 l_{row} 和 w_{col} ,将图像坐标系的中心设置为 (u_0, v_0) 并且 $u_0 = \frac{1}{2}l_{row}$ 和 $v_0 = \frac{1}{2}w_{col}$ 。则像素坐标系中某一点 (u, v) 与其对应的图像坐标系的点 (x, y) 的转换公式为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_x & 0 & -u_0 d_x \\ 0 & d_y & -v_0 d_y \\ 0 & 0 & f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: f, d_x 和 d_y 分别为相机的焦距、像素物理长度和宽度。这三个内参都可以通过设备的说明书获得。

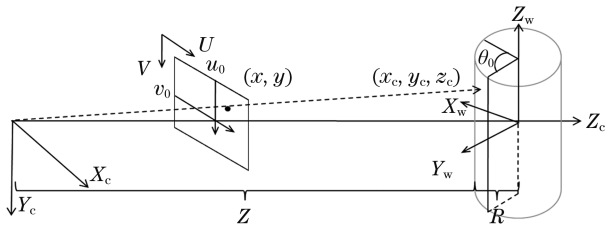


图 3 像素坐标系转换到世界坐标系示意图

Fig. 3 Illustration of transformation from pixel coordinate system to world coordinate system

之后将图像坐标系转换到相机坐标系 $X_c-Y_c-Z_c$ 。根据 QR 码的每个位置与相机之间的距离,成比例地将相机坐标系下的成像 QR 码投影到相机坐标系的成像平面上。但是,圆柱表面上不同位置与

相机的距离是不一致的,因此需要通过几何关系计算。图 4 说明了两个坐标系间的几何关系。点 (x, y) 与相机坐标系下对应的坐标 (x_c, y_c, z_c) 的关系为

$$\begin{cases} \frac{x}{x_c} = \frac{f}{z_c} \\ \frac{y}{y_c} = \frac{f}{z_c} \\ (Z + R - z_c)^2 + x_c^2 = R^2 \end{cases}, \quad (2)$$

式中: Z 和 R 分别为相机到圆柱表面的实际距离和圆柱的实际半径。通过(2)式,得到 z_c 的表达式为

$$z_c = \frac{2(Z + R) - \sqrt{\Delta}}{2(1 + \frac{x_c^2}{f^2})}. \quad (3)$$

其中 Δ 为

$$\Delta = 4(Z + R)^2 - 4(1 + \frac{x_c^2}{f^2})[(Z + R)^2 - R^2]. \quad (4)$$

根据求根公式,可以得到 z_c 的两个根,其中一个根对应的 QR 码张角大于 π ,但是实际上为了完整地捕获到 QR 码图像,QR 码在柱面上的张角都是小于 π ,因此无需处理数值较大的根。此外还需注意的是,(2)式只对柱面区域像素成立,而无法求解背景部分的像素。

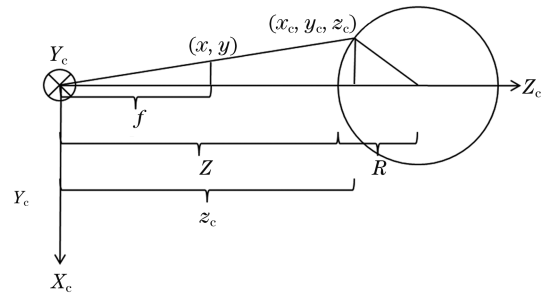


图 4 图像坐标系转换到相机坐标系示意图

Fig. 4 Illustration of transformation from image coordinate system to camera coordinate system

最后将相机坐标系中的 (x_c, y_c, z_c) 转换为世界坐标系 $X_w-Y_w-Z_w$ 下对应的 (x_w, y_w, z_w) 。经一系列平移和旋转,通过朝相机方向平移 $Z+R$,改变坐标系原点位置,然后将 Z_c 轴和 X_c 轴沿 Y_c 轴顺时针旋转 $\frac{\pi + \theta_0}{2}$,其中 θ_0 为 QR 码在柱面的张角,最后让 Y_c 轴和 Z_c 轴沿 X_c 轴逆时针旋转 $\frac{\pi}{2}$,完成最后的坐标系转换,用矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \frac{\pi}{2} & \sin \frac{\pi}{2} & 0 \\ 0 & -\sin \frac{\pi}{2} & \cos \frac{\pi}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin \frac{\theta_0}{2} & 0 & -\cos \frac{\theta_0}{2} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \cos \frac{\theta_0}{2} & 0 & -\sin \frac{\theta_0}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -(Z+R) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

将 QR 码还原到世界坐标系后,就可以实现柱面到平面的修复。首先设置 QR 码的左边界作为基准线,则 QR 码上任意一点 (x_w, y_w, z_w) 与左边界形成的张角为 θ ,根据坐标变换的结果可知,左边界的 x_w 等于 0,因此张角 θ 的计算公式为

$$\theta = \arccos \frac{x_w}{R} \quad (6)$$

因此 θ 所对应的弧长也能得到,并且该弧长长度即为平面上点 (x_w, y_w, z_w) 的水平坐标。用 (x', y') 表示世界坐标系下 QR 码在修复平面上的坐标,则 (x', y') 与 (x_w, y_w, z_w) 之间的关系为

$$\begin{cases} x' = R\theta = \frac{L}{\theta_0} \arccos \frac{x_w \theta_0}{L} \\ y' = \frac{L}{2} - z_w \end{cases} \quad (7)$$

式中: L 为 QR 码的实际长度。

最后需要将世界坐标系中的平面修复图重新投影到图像坐标系中,这个过程可以分解为 3 个子过程。第一步是将世界坐标系转换为相机坐标系,该步骤不调整坐标轴的指向,因此有

$$\begin{bmatrix} x'_c \\ y'_c \\ z'_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ Z \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: (x'_c, y'_c, z'_c) 为 (x', y') 在相机坐标系下的坐标。第二步是将相机坐标系转换为图像坐标系,由于 QR 码已经被展平,因此可以认为每个位置的缩放比例一样,即

$$\begin{cases} x^* = \frac{fx'_c}{z'_c} \\ y^* = \frac{fy'_c}{z'_c} \end{cases} \quad (9)$$

式中: (x^*, y^*) 是 (x'_c, y'_c, z'_c) 在图像坐标系下的坐标。最后一步是将图像坐标系转换为像素坐标系,即将原点调整回左上角,公式为

$$\begin{cases} u^* = \frac{x^*}{d_x} + u_0 \\ v^* = \frac{y^*}{d_y} + v_0 \end{cases} \quad (10)$$

得到的 (u^*, v^*) 即为像素最终修复的位置。

尽管世界坐标系下修复的 QR 码的每个位置能够准确映射到图像中相应位置,但是图像中并非所有位置都将被分配到像素,尤其是在图像中 QR 码的左右边界附近,像素分布将会比较稀疏。因此,额外采用了最近邻插值方法将最近的像素值填充到这些位置。而且,在修复的图像中,由于 QR 码被展平,修复的图像尺寸可能会大于输入的图像,因此使用归一化来确保尺寸的一致性。

2.3 超参数计算

将圆柱表面上的 QR 码映射到平面的转换过程需要一些必要的超参数,其中外部参数包括实际的圆柱半径 R 、QR 码的实际长度 L 、QR 码在圆柱表面的张角 θ_0 、相机与圆柱表面的距离 Z ,内部参数包括焦距 f 、像素的物理长度 d_x 和宽度 d_y 。通过定位算法可以获得 QR 码的水平像素宽度 d 和垂直像素长度 l ,图 5 展示了 d, l 与 θ_0 的几何关系。从弧长和中心角之间的关系、三角余弦定理可以得出

$$\begin{cases} r\theta_0 = l \\ d^2 = r^2 + r^2 - 2r^2 \cos \theta_0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: r 为柱面的像素半径。将(11)式中的 r 消除,即可求出 θ_0 。而 d, l 和 r 与实际长度的对应关系可以表示为

$$V_{\text{val}} = \frac{Z \times v_{\text{val}} \times d_x}{f} \quad (12)$$

式中: $v_{\text{val}} \in \{l, d, r\}$; V_{val} 是 v_{val} 对应的实际长度。

因此只需要知道 Z 的大小就能够获得所有坐标变换的超参数,然而在整个修复过程中, Z 的大小不会影响到最终修复的图像。从像素坐标系到世界坐标系的转换过程中,所有的参数和转换结果实际上都与 Z 成正比,因此最后得到的 (x_w, y_w, z_w) 与 Z 也成正比。虽然 QR 码的实际坐标依赖于 Z ,然而通过(8)式和(9)式得到从世界坐标系转换回像素坐标系的过程中,相机坐标系到图像坐标系的比例缩放也为 Z ,因此可以消除 Z 对修复图像的影响,即 Z 只影响 QR 码实际坐标的结果,而不影响修复

图像的 QR 码像素坐标。在实际处理过程中,将 Z 设置为 10 mm。

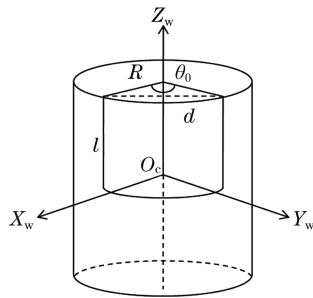


图 5 超参数几何关系示意图

Fig. 5 Illustration of geometric relationship between hyper-parameters

3 实验分析与讨论

3.1 实验设置

为了评估所提算法,选择了三个版本为 29×29 的 QR 码和另外三个版本为 41×41 的 QR 码用于数据对比和主观比较。为了方便,在以下实验中,每个 QR 码都用“版本/id”来表示。所有输入图像的大小设置为 2448×2448 。拍摄距离设置为距相机

光心大致 500~600 mm 处,同时保持实验中的光照不变。从手机说明中得到智能手机的焦距为 5.3 mm,像素物理长度和宽度均为 0.0015 mm。算法均在 Matlab2017a 软件中进行仿真。

3.2 预处理分析

所提修复算法需要建立在 QR 码能够准确定位的基础上。但是,在执行定位算法时,必须分析每个连通域是否是真正的定位符所在的区域,这会增加算法的时间开销。因此,使用预处理技术减少干扰的连通域数量,并以此来验证所提预处理操作的效率。表 1 为通过各种预处理操作后的剩余连通域数量。“REAL”行注明连通域的实际数量,“MF”行记录了使用中值滤波器后连通域的数量,“ER+DI”行记录使用腐蚀和膨胀操作后的连通域数量,“MF+ER+DI”行记录了使用中值过滤波器、腐蚀和膨胀操作后的连通域数量。可以看出:中值滤波、腐蚀与膨胀操作都可以显著地减少无关紧要的噪声区域并降低判断连通区域的次数;与仅采用一种预处理技术相比,两种预处理操作结合后,可以进一步减少多余的连通域。

表 1 不同预处理操作后剩余连通域的数量比较

Table 1 Comparison of the remaining number of connected domains after different preprocessing operations

Operation	$29 \times 29/1$	$29 \times 29/2$	$29 \times 29/3$	$41 \times 41/1$	$41 \times 41/2$	$41 \times 41/2$
REAL	612	1453	716	967	771	712
MF	30	98	56	82	75	19
ER+DI	15	39	23	76	79	24
MF+ER+DI	14	29	14	74	71	15

3.3 Z 的有效性分析

本文论述了 Z 对整个 QR 码的修复过程是没有影响的。为了支撑这一论述,以“ $29 \times 29/2$ ”中位于 QR 码区域的某一点(212,266)为例。图 6 显示其相应坐标 (x_w, y_w) 、 (x', y') 和 (u^*, v^*) 在 Z 采取不同值时的具体数值。其中 (x_w, y_w) 表示其在世界坐标系下在圆柱面上的对应坐标, (x', y') 表示其在世界坐标系下在平面上的对应坐标, (u^*, v^*) 表示其在像素坐标系下还原图像中的对应坐标。为了更直观地显示,将 (u^*, v^*) 两个坐标都除以 100。连接相同类型的点绘制成折线图,可以发现 (x_w, y_w) 与 (x', y') 都与 Z 成正比,无论 Z 如何变换, (u^*, v^*) 始终保持一个常数。因此,可以得出 Z 只对 QR 码在真实世界中的成像有影响,而对最终修复的图像没有影响。

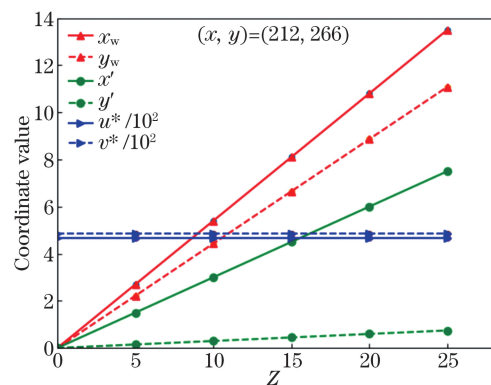


图 6 当输入点为(212,266)时,在不同坐标系下 Z 对坐标值变化的影响

Fig. 6 Effects of Z on coordinate value changing under different coordinate systems when the input point is (212, 266)

3.4 算法对混合失真的鲁棒性

在现实生活中,在圆柱表面上扫描 QR 码时,很容易引入其他失真,从而构成混合失真。当存在其他类型的失真时,评估算法对柱面 QR 码修复的能力,结果如图 7 所示。考虑了三种常见的失真:运动模糊、局部损坏、光照恶劣。1)运动模糊是最常见的失真之一,如图 7(a)所示,由于良好的预处理步骤(中值滤波、腐蚀膨胀)和高分辨率图像,所提修复算法依旧能够正常地处理二值化后的图像,即所提算

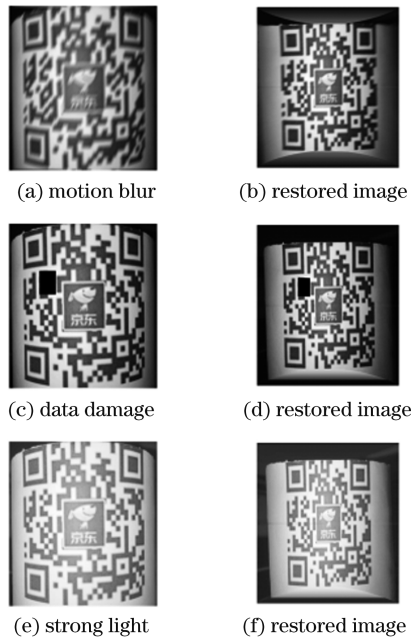


图 7 混合失真的复原图像

Fig. 7 Restored images with the mixed distortions

法对运动模糊鲁棒。2)生活中存在大量 QR 码图像上数据被损坏的场景。图 7(c)为柱面失真和数据损坏的 QR 码图像。由于所提修复算法是基于透视变换的,其参数主要由定位符计算得出,只要可以确定 QR 码的位置信息,就不会影响修复算法的执行。3)在恶劣光照条件下扫描 QR 码也是很常见的。图 7(e)显示了在强光条件下捕获的柱面 QR 码图像。由于采用了具有自适应阈值的自适应二值化算法,QR 码定位过程几乎可以不受光照条件的影响。因此所提算法可以在其他失真的干扰下很好地修复 QR 码。

3.5 与其他算法比较

对文献[22]的基于仿射变换的修复算法(简称为“SWS”)和所提修复算法(简称为“Ours”)进行性能评估。在文献[22]中,SWS 将图像分别分为 4、6、8 个等宽部分进行处理,本文分别将其表示为 SWS/4、SWS/6、SWS/8。此外,受 SWS 启发,本文还提出了“DWS”作为基准比较算法。DWS 将 QR 码图像上的投影像素宽度直接拉伸到其相应的像素长度。使用 200 个位于圆柱表面的 QR 码作为测试集来验证所提算法性能,QR 码包含了从 29×29 到 41×41 不同的版本。每个 QR 码的中心大致位于相机中心附近且部分 QR 码与水平方向存在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 的倾角。识别率结果如图 8 所示。所提算法实现了最高的识别精度,达到了 83%,与第二好的 SWS/8 方法相比,识别率增加 31 个百分点。

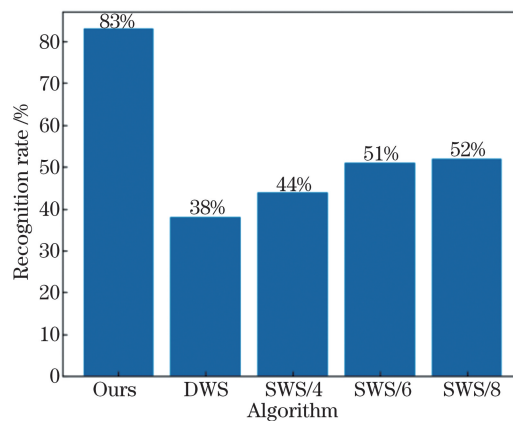


图 8 不同柱面失真修复算法的识别率比较

Fig. 8 Comparison of recognition rate of different cylindrical restoration algorithms

图 9 显示了 6 个 QR 码的柱面修复结果。与 DWS 和 SWS 的修复结果比较,所提算法修复的

QR 码在边界附近没有严重的变形失真,使得 QR 码能够被设备扫描识别。

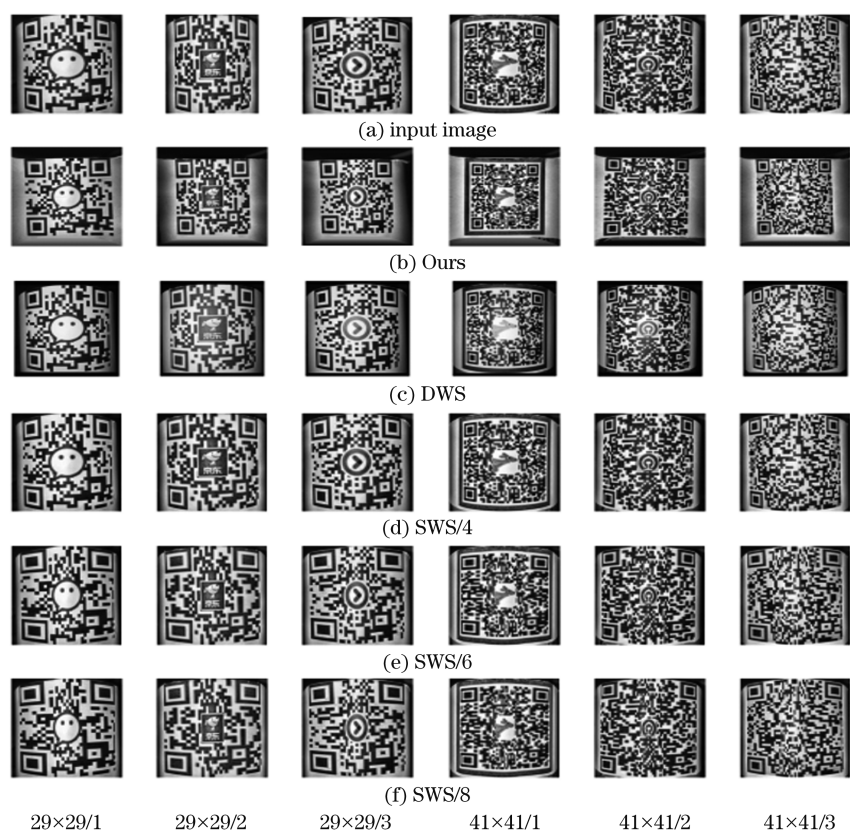


图 9 不同柱面失真修复算法的主观比较

Fig. 9 Qualitative comparisons of different cylindrical restoration algorithms

4 结 论

提出了一种低成本但有效的 QR 码修复方法,该方法通过 QR 码定位符定位和坐标变换来解决位于圆柱形面上的 QR 码。首先利用定位符的特定结构来定位 QR 码;然后在搜索到定位符位置的情况下获得坐标变换的必要超参数;再通过逆透视变换,将柱面失真的 QR 码反向投影到真实世界场景,在 3D 世界坐标系中将 QR 码展平;最后,在投影到图像的过程中使用同一组超参数进行透视变换,获得了没有柱面失真的 QR 码图像。为了优化修复的图像,采用最近邻插值和归一化以消除未分配到像素值的坐标和调整输出分辨率。大量实验表明,所提算法在修复柱面失真的 QR 码上具有优异的表现,有助于当前设备识别这类失真的 QR 码。

参 考 文 献

- [1] Chu J H, Tian Y, Su Y T. Screen-camera communication steganography based on frequency constraint[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 051003.
褚晶辉, 田叶, 苏育挺. 基于频率约束的相机与屏幕通信隐写算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(5): 051003.
- [2] Wu X, Zhang J J, Zhang Y H. Design method of optical phase anti-counterfeiting mask based on two-dimensional barcodes[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(21): 210604.
乌旭, 张瑾瑾, 张燕恒. 基于二维条码的光学相位防伪掩膜设计方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(21): 210604.
- [3] Gao X S, Li Y H, Zhang L Q, et al. Precise positioning technology for automatic guided vehicles based on SURF algorithm [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(10): 101203.
高雪松, 李宇昊, 张立强, 等. 基于 SURF 算法的自动导引车精确定位技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(10): 101203.
- [4] Li J H, Zhang Y T, Yi X, et al. Mathematical model of processing parameters and barcode image gray value marked by lasers on aluminium ingot surface [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(7): 071203.
李建华, 张郁天, 伊焯, 等. 激光标刻铝锭二维码图像灰度与加工参数计算模型[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(7): 071203.
- [5] Zxing. Open source[EB/OL]. [2020-06-17]. <https://>

- github.com/zxing/zxing.
- [6] Zbar. Open source[EB/OL]. [2020-6-17]. <https://github.com/ZBar/ZBar>.
- [7] Libdmtx. Open source[EB/OL]. [2020-6-17]. <http://libdmtx.sourceforge.net/>.
- [8] OpenCV. Open source[EB/OL]. [2020-6-17]. <http://opencv.org/>.
- [9] Zhang C X, Chen M H, Wang F, et al. Optical coherence tomography image denoising algorithm based on wavelet transform and fractional integral [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(18): 181008.
张晨曦, 陈明惠, 王帆, 等. 小波变换和分数阶积分结合的 OCT 图像去噪算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(18): 181008.
- [10] Yan C M, Chen J H, Ma Y T, et al. Improvement of grey wolf optimization algorithm and its application in QR-code recognition[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(2): 021015.
严春满, 陈佳辉, 马芸婷, 等. 改进灰狼优化算法及其在 QR 码识别上的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(2): 021015.
- [11] Wu X Y, Zeng Y, Lian H, et al. SAE-based hologram restoration algorithm[J]. *Electronic Design Engineering*, 2020, 28(5): 7-11, 16.
吴芯洋, 曾月, 廉昊, 等. 基于 SAE 的全息图恢复算法[J]. *电子设计工程*, 2020, 28(5): 7-11, 16.
- [12] Du Y N. Research on two-dimensional code restoration algorithm based on sparse regularization and deep learning[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019: 36-48.
杜亚男. 基于稀疏正则化和深度学习的二维码复原算法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019: 36-48.
- [13] Song H Z, Wu X J. Deblurring model of image multi-scale dense network [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(21): 211001.
宋昊泽, 吴小俊. 图像多尺度密集网络去模糊模型[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(21): 211001.
- [14] Li M M, Cao P, Feng L P, et al. The research of QR code image correction based on image gray feature [C] // 2017 First International Conference on Electronics Instrumentation & Information Systems (EIIS), June 3-5, 2017, Harbin, China. New York: IEEE Press, 2017.
- [15] Wang S M, Hou A P, Yuan L, et al. Mobile robot localization based on graphic features of QR code[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2019, 47(23): 28-31, 37.
王素敏, 侯爱萍, 袁亮, 等. 基于 QR 码图形特征的移动机器人定位[J]. *机床与液压*, 2019, 47(23): 28-31, 37.
- [16] Chen J, Huang B, Mao J, et al. A novel correction algorithm for distorted QR-code image[C] // 2019 3rd International Conference on Electronic Information Technology and Computer Engineering (EITCE), October 18-20, 2019, Xiamen, China. New York: IEEE Press, 2019: 380-384.
- [17] Wakahara T, Yamamoto N. Image processing of 2-dimensional barcode [C] // 2011 14th International Conference on Network-Based Information Systems, September 7-9, 2011, Tirana, Albania. New York: IEEE Press, 2011: 484-490.
- [18] Chang Y H, Chu C H, Chen M S. A general scheme for extracting QR code from a non-uniform background in camera phones and applications[C] // Ninth IEEE International Symposium on Multimedia (ISM 2007), December 10-12, 2007, Taichung, Taiwan, China. New York: IEEE Press, 2007: 123-130.
- [19] Lay K T, Wang L J, Wang C H. Rectification of QR-code images using the parametric cylindrical surface model[C] // 2015 International Symposium on Next-Generation Electronics (ISNE), May 4-6, 2015, Taipei, Taiwan, China. New York: IEEE Press, 2015.
- [20] He W P, Lin Q S, Wang W, et al. Research on cylinder data matrix barcode recognition [J]. *American Applied Sciences Research Institute Procedia*, 2012, 3: 319-327.
- [21] Li H W, Xiong T. Research on P4P algorithm based on quick response code recognition [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(12): 121501.
李红卫, 熊韬. 基于二维码识别的 P4P 算法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(12): 121501.
- [22] Liu F J, Cai M. Recognition and implementation of cylinder QR code[J]. *Computer and Modernization*, 2015(2): 110-112, 116.
刘烽杰, 蔡明. 柱面 QR 码的识别及实现[J]. *计算机与现代化*, 2015(2): 110-112, 116.
- [23] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66.