



中国图形学报

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



第27卷第8期（总第316期）
2022年8月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊
中文核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院
主办单位 中国科学院空天信息创新研究院
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 吴一戎
编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会
通信地址 北京市海淀区北四环西路19号
邮 编 100190
电子信箱 jig@aircas.ac.cn
电 话 010-58887035
网 址 www.cjig.cn

广告发布登记号 京朝工商广登字20170218号
总 发 行 北京报刊发行局
订 购 全国各地邮局
海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(邮政信箱: 北京399信箱 邮编: 100048)
印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian | Monthly, Started in 1996

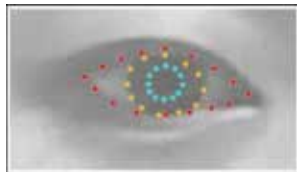
Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Aerospace Information Research Institute, CAS
China Society of Image and Graphics
Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief Wu Yirong
Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of Image and Graphics
Address No. 19, North 4th Ring Road West, Haidian District, Beijing, P. R. China
Zip code 100190
E-mail jig@aircas.ac.cn
Telephone 010-58887035
Website www.cjig.cn

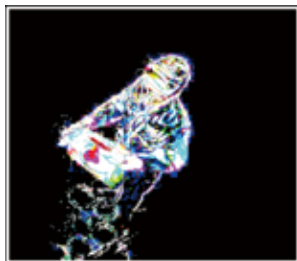
Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals
Domestic All Local Post Offices in China
Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China)
Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB
ISSN 1006-8961
CODEN ZTTXFZ

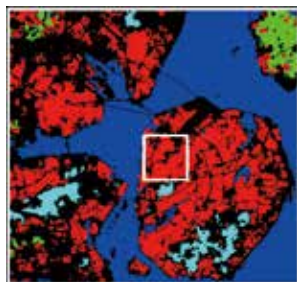
国外发行代号 M1406
国内邮发代号 82-831
国内定价 60.00元



自然光普通摄像头的眼部分割及特征点定位数据集ESLD (第2329页)



双视图三维卷积网络的工业装箱行为识别(第2368页)



多源特征自适应融合网络的高分遥感影像语义分割(第2516页)

综述

虚拟现实图像客观质量评价研究进展

周玉, 汪一, 李雷达, 高陈强, 卢兆林 2313

数据集论文

自然光普通摄像头的眼部分割及特征点定位数据集ESLD

张俊杰, 孙光民, 郑鲲, 李煜, 付晓辉, 慈康怡, 申俊杰, 孟凡超, 孔江萍, 张玥 2329

图像处理和编码

双尺度顺序填充的深度图像修复

陈东岳, 朱晓明, 马腾, 宋园园, 贾同 2344

二维码位流长度最小化算法

袁泰凌, 徐昆 2356

图像分析和识别

双视图三维卷积网络的工业装箱行为识别

胡海洋, 潘健, 李忠金 2368

面向航拍图像中工程车辆检测与识别的改进胶囊网络

钟映春, 郑海阳, 张文祥, 王波, 罗志勇 2380

用于骨架行为识别的多维特征融合注意力机制

姜权晏, 吴小俊, 徐天阳 2391

高性能整数倍稀疏网络行为识别研究

臧影, 刘天娇, 赵曙光, 杨东升 2404

面向工业零件分拣系统的低纹理目标检测

闫明, 陶大鹏, 普园媛 2418

融合策略优选和双注意力的单阶段目标检测

戴坤, 许立波, 黄世旸, 李鉴铃 2430

融合视觉词与自注意力机制的视频目标分割

季传俊, 陈亚当, 车洵 2444

基于Gaussian-Hermite矩的旋转运动模糊不变量

郭锐, 贾丽, 郝宏翔, 墨瀚林, 李华 2458

图像理解和计算机视觉

RGB-D语义分割: 深度信息的选择使用

赵经阳, 余昌黔, 桑农 2473

自纠正噪声标签的人脸美丽预测

甘俊英, 吴必诚, 翟懿奎, 何国辉, 麦超云, 白振峰 2487

面向非对称特征注意力和特征融合的太赫兹图像检测

曾文健, 朱艳, 沈韬, 曾凯, 刘英莉 2496

面向纹理平滑的方向性滤波尺度预测模型

林俊彦, 刘春晓, 章金凯, 李泓易 2506

遥感图像处理

多源特征自适应融合网络的高分遥感影像语义分割

张文凯, 刘文杰, 孙显, 许光奎, 付琨 2516

结合上下文编码与特征融合的SAR图像分割

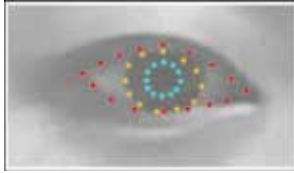
范艺华, 董张玉, 杨学志 2527

一阶全卷积遥感影像倾斜目标检测

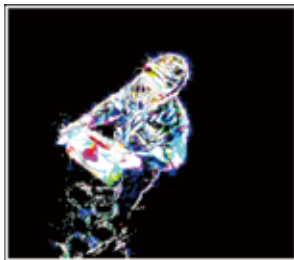
周院, 杨庆庆, 马强, 薛博维, 孔祥楠 2537

CONTENTS

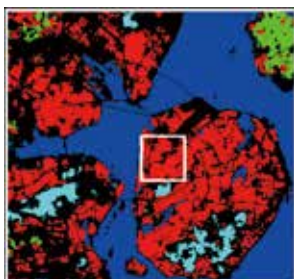
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



ESLD: eyes segment and landmark detection in the wild (P2329)



Dual-view 3D ConvNets based industrial packing action recognition(P2368)



Multi-source features adaptation fusion network for semantic segmentation in high-resolution remote sensing images(P2516)

Review

Research progress in objective quality evaluation of virtual reality images

Zhou Yu, Wang Yi, Li Leida, Gao Chenqiang, Lu Zhaolin 2313

Dataset

ESLD: eyes segment and landmark detection in the wild

Zhang Junjie, Sun Guangmin, Zheng Kun, Li Yu, Fu Xiaohui, Ci Kangyi, Shen Junjie, Meng Fan-
chao, Kong Jiangping, Zhang Yue 2329

Image Processing and Coding

Depth image recovery based on dual-scale sequential optimized filling

Chen Dongyue, Zhu Xiaoming, Ma Teng, Song Yuanyuan, Jia Tong 2344

Minimization of bit stream length of QR codes

Yuan Tailing, Xu Kun 2356

Image Analysis and Recognition

Dual-view 3D ConvNets based industrial packing action recognition

Hu Haiyang, Pan Jian, Li Zhongjin 2368

Improved capsule network method for engineering vehicles detection and recognition in aerial im-
ages

Zhong Yingchun, Zheng Haiyang, Zhang Wenxiang, Wang Bo, Luo Zhiyong 2380

M2FA: multi-dimensional feature fusion attention mechanism for skeleton-based action recognition

Jiang Quanyan, Wu Xiaojun, Xu Tianyang 2391

Action recognition analysis derived of integer sparse network

Zang Ying, Liu Tianjiao, Zhao Shuguang, Yang Dongsheng 2404

Texture-less object detection method for industrial components picking system

Yan Ming, Tao Dapeng, Pu Yuanyuan 2418

Single stage object detection algorithm based on fusing strategy optimization selection and dual
attention mechanism

Dai Kun, Xu Libo, Huang Shiyang, Li Yunling 2430

Visual words and self-attention mechanism fusion based video object segmentation method

Ji Chuanjun, Chen Yadang, Che Xun 2444

Rotational motion blur invariants based on Gaussian-Hermite moments

Guo Rui, Jia Li, Hao Hongxiang, Mo Hanlin, Li Hua 2458

Image Understanding and Computer Vision

RGB-D semantic segmentation: depth information selection

Zhao Jingyang, Yu Changqian, Sang Nong 2473

Self-correcting noise labels for facial beauty prediction

Gan Junying, Wu Bicheng, Zhai Yikui, He Guohui, Mai Chaoyun, Bai Zhenfeng 2487

Terahertz image detection combining asymmetric feature attention and feature fusion

Zeng Wenjian, Zhu Yan, Shen Tao, Zeng Kai, Liu Yingli 2496

Texture-smoothing-oriented directional filtering scales-predicting model

Lin Junyan, Liu Chunxiao, Zhang Jinkai, Li Hongyi 2506

Remote Sensing Image Processing

Multi-source features adaptation fusion network for semantic segmentation in high-resolution re-
mote sensing images

Zhang Wenkai, Liu Wenjie, Sun Xian, Xu Guangluan, Fu Kun 2516

The integrated contextual encoding and feature fusion SAR images segmentation method

Fan Yihua, Dong Zhangyu, Yang Xuezhi 2527

Improved one-stage fully convolutional network for oblique object detection in remote sensing im-
agery

Zhou Yuan, Yang Qingqing, Ma Qiang, Xue Bowei, Kong Xiangnan 2537

中图法分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2022)08-2356-12

论文引用格式: Yuan T L and Xu K. 2022. Minimization of bit stream length of QR codes. Journal of Image and Graphics, 27(08): 2356-2367(袁泰凌, 徐昆. 2022. 二维码位流长度最小化算法. 中国图象图形学报, 27(08): 2356-2367) [DOI: 10.11834/jig.210092]

二维码位流长度最小化算法

袁泰凌, 徐昆*

1. 清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084; 2. 普适计算教育部重点实验室, 北京 100084

摘要: **目的** 快速响应矩阵码(quick response code, QR code)简称二维码, 是一种由深色和浅色模块组成的正方形符号。给定输入数据, 不同编码算法可能输出不同的位流。位流长度决定了二维码的版本, 进而决定了二维码每条边上的模块数量。减小二维码的版本能够在不减小模块大小的前提下节省面积, 或者在不改变面积的前提下增大模块大小。为了减小二维码面积、提高二维码识读率, 本文提出了位流长度最小化算法。**方法** 首先, 根据二维码位流可以分段切换编码模式的特点, 归纳了 6 种编码状态; 然后, 根据二维码位流编码标准推导了状态转移关系, 从而将位流长度最小化问题转换成动态规划问题; 最后, 通过求解动态规划问题, 计算出最短位流。针对统一资源定位符(uniform resource locator, URL)类型数据, 利用其部分字段对大小写不敏感、部分字段可以转义的性质, 提出了统一资源定位符的最短位流计算算法, 进一步缩短位流。**结果** 本文构建了一个测试集, 包含 603 个编码了非 URL 数据的二维码, 以及 1 679 个编码了 URL 数据的二维码。实验结果表明, 本文算法与二维码标准相比, 对于非 URL 测试集, 位流长度减小的二维码占比 9.1%, 版本减小的二维码占比 1.2%; 对于 URL 测试集, 位流长度减小的二维码占比 98.4%, 版本减小的二维码占比 31.7%。**结论** 二维码位流长度最小化算法输出的位流长度最短, 输出的二维码版本最小, 能在兼容标准二维码解码器且不影响纠错能力的前提下提升二维码的数据容量。同时, 本文算法运行速度快, 易于使用, 没有需要调节的参数。

关键词: 二维码; 快速响应矩阵码; 二维码编码; 动态规划; 统一资源定位符(URL)

Minimization of bit stream length of QR codes

Yuan Tailing, Xu Kun*

1. Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Key Laboratory of Pervasive Computing, Ministry of Education, Beijing 100084, China

Abstract: **Objective** Quick response code (QR code) is a kind of widely used 2D barcode nowadays. A QR code is a square symbol consisting of dark and light modules. There is a great need to accommodate more data in the target area or encode the same input data in a smaller area. The input data is first encoded into a bit stream. Different encoding algorithms may output different bit streams via assigned input data. The length of bit stream determines the version of a QR code, and the version determines the amount of modules per side. A QR code with a smaller version takes a smaller area without the size of modules changing, or has a larger module size without changing the area. The bit stream consists of one or multiple segments, and the encoding mode of each segment is chosen from three modes separately, i.e., numeric mode, alphanumeric mode and byte mode. The numeric mode can only encode digits, and every 3 digits are encoded into 10 bits.

收稿日期: 2021-03-03; 修回日期: 2021-06-25; 预印本日期: 2021-07-02

* 通信作者: 徐昆 xukun@tsinghua.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(61822204, 61521002)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (61822204, 61521002)

The alphanumeric mode can encode digits, upper case letters, and 9 kinds of punctuations, and every 2 characters are encoded into 11 bits. The byte mode can encode any kind of binary data, but each byte is encoded into 8 bits. Compared to using a single mode to encode the overall input data, different modes interchange may result in a shorter bit stream. But different modes switching leads to redundancy on bit stream length. **Method** The key to minimizing the version of QR code is to minimize the length of bit stream. The minimization should balance the redundancy of data encoding and the mode switching efficiency. The QR code specification gives “optimization of bit stream length” in annex. However, the illustration has proposed that the optimization method may not output the minimum bit stream. The demonstration has mentioned algorithms as below. The first algorithm is called “minimization algorithm”, which converts the minimization of bit stream length to a dynamic programming problem. The algorithm can output the bit stream with minimum length by resolving the dynamic programming problem. Time cost is bounded in a linear function to the length of input data. The second algorithm is called “URL minimization algorithm”, which is optimized for cases that the input data is a uniform resource locator (URL) further. The customized optimization for URL makes use of two properties: 1) the scheme field and the host field of a URL are case-insensitive, and 2) the scheme-specific part of a URL can be escaped. The properties have been guaranteed via request for comments (RFC) 1 738 and RFC 1 035. A lower case letter can only be encoded in byte mode. By converting a lower case letter in a case-insensitive field to an upper case letter, the letter can be encoded in either byte mode or alphanumeric mode. The property provides more options in dynamic programming. In addition, each character in the scheme-specific part of a URL may be converted to an escape sequence. The escape sequence contains 3 alphanumeric mode characters. Hence, it can be encoded in alphanumeric mode or a combination of alphanumeric mode and numeric mode. This kind of conversion also provides more choices in dynamic programming. The URL minimization algorithm takes advantage of such two kinds of conversions to calculate the bit stream of a URL with minimum length. **Result** A QR code data set (also called a test set) is constructed to verify the efficiency of the proposed algorithms. The test set is collected from 6 web image search engines, i. e., Baidu, Sogou, 360, Google, Bing, and Yahoo. QR codes with different bit streams or different error correction levels are regarded as different QR codes. The test set contains 2 282 distinct QR codes, where 603 QR codes encode non-URL data and the other 1 679 QR codes encode URL data. Four algorithms are compared on the test set, i. e., 1) the optimization method given in the QR code specification, 2) encoding input data in a single segment, 3) the minimization algorithm, and 4) the URL minimization algorithm. The bit stream lengths of initial QR codes are offered for comparison as well. The demonstrations show that for the non-URL test set, average bit stream length reduces 0.4% (compared to the optimization in the QR code specification), QR codes with reduced bit stream lengths account for 9.1%, and QR codes with reduced versions account for 1.2%; for the URL test set, average bit stream length reduces 13.9%, QR codes with reduced bit stream lengths account for 98.4%, and QR codes with reduced versions account for 31.7%. An ablation study on the two components of URL minimization has been implemented, i. e., 1) utilizing case-insensitive fields and 2) converting characters to escaping sequences. The calculating results have shown that each component has an effect and combining both components achieves the best performance, i. e., the minimum bit stream length and the minimum version. In the context of URL test set, average bit stream length reduces only 0.5% using the minimization algorithm, while the value reduces 9.1% using the URL minimization algorithm; QR codes with reduced bit stream lengths account for 10.4% using the minimization algorithm, but the value is 98.4% for the URL minimization algorithm; QR codes with reduced versions account for 1.3% using the minimization algorithm, while the value is 31.7% for the URL minimization algorithm. The average time cost to encode a message is 2.45 microsecond. **Conclusion** The proposed algorithms minimize the length of bit stream. Data capacity of QR codes has been increased without changing QR code format or revising the error correction capability. The URL minimization algorithm is qualified under the huge amounts of QR codes based on URL encoded data. The proposed algorithms are friendly-used, i. e., there are no hyper-parameters to be tuned, and users input data and error correction level only. The illustrated algorithms have been verified in a realistic running speed, and it is proved that the time costs of both algorithms are bounded in a linear function to the length of input data.

Key words: 2D code; quick response code (QR code); QR code encoding; dynamic programming; uniform resource locators (URL)

0 引言

快速响应矩阵码 (quick response code, QR code) 简称二维码, 是一种正方形符号, 广泛应用于商品识别、广告、在线支付和疫情防控等场景。二维码符号的最小单元是模块, 即深色或浅色的小正方形。二维码的版本决定了每条边上的模块数量, 如图 1 所示, 二维码版本越大, 每条边上的模块数量越多。



图 1 不同版本的二维码示意图

Fig. 1 QR code examples with different versions
((a) version 1; (b) version 6; (c) version 11)

二维码使用了纠错码, 因此其对模块错误有一定纠错能力。减小二维码的版本能够在不减小模块大小的前提下节省面积, 或者在不改变面积的前提下增大模块大小以提高模块正确识别的概率。

为了提高二维码的数据容量, 现有研究工作主要采用了不兼容标准二维码的编码格式。例如使用彩色模块、修改模块排布、修改位流编码步骤等。这些方案都需要使用专门的扫码器才能读取。考虑到扫码用户一般有通用的标准二维码扫码器, 而不一定有专门的扫码器, 因此这些二维码的普适性较差。如何在兼容二维码标准的前提下最大化数据容量是一个待解决的问题。

与上述研究工作不同的是, 本文在符合二维码标准的前提下最小化位流长度, 从而最大化数据容量。本文算法输出的位流与标准算法 (国家质量技术监督局, 2000)、开源编码器 ZXing (<https://code.google.com/p/zxing>)、商业编码器“草料二维码生成器” (<http://cli.im/>) 相比, 长度相同或更短。一方面, 信源编码问题转换为动态规划问题, 提出了计算最短位流的算法; 另一方面, 针对常见的统一资源定位符 (uniform resource locators, URL) 类型数据, 进一

步减小位流长度, 提出了统一资源定位符的最短位流计算算法。

1 相关工作

关于二维码数据容量的研究主要分为以下几类:

1) 通过增加模块的颜色种类提高数据容量。包括使用 RGB 3 个色彩通道表示 3 倍数据 (Blasinski 等, 2013; Meruga 等, 2015)、使用 3 种荧光材料表示 3 倍数据 (Abdolahi 等, 2019)、使用 4 种特定颜色表示 $\log_2 4 = 2$ 倍数据 (Melgar 等, 2012)、使用至多 2^{14} 种颜色表示至多 14 倍信息 (Galiyawala 和 Pandya, 2014)。Yang 等人 (2018) 指出颜色混叠效应会导致彩色二维码较难解码, 并基于支持向量机 (support vector machine, SVM) 提出一种针对彩色二维码的解码算法。贾丹等人 (2017) 基于 k-means 算法识别彩色二维码。由于彩色二维码是自定义的编码格式, 因此标准二维码解码器无法解码彩色二维码, 而需要使用定制的解码器。

2) 在二维码中隐藏私有信息。Tkachenko 等人 (2015, 2016) 提出的双级别二维码 (two-level QR codes) 在标准二维码的黑色模块上添加纹理, 其中标准二维码编码主要信息, 纹理编码私有信息; 标准二维码解码器可以读取主要信息, 定制的解码器可以读取私有信息。Barron 等人 (2020) 提出的双重调制二维码 (dual modulated QR codes) 将标准二维码的黑色模块由正方形替换成椭圆形, 用椭圆的方向编码隐私信息。标准二维码解码器可以读取公开信息; 当相机与二维码距离较近时, 定制的解码器可以从模块方向中读取隐私信息。这两种修改模块纹理或模块形状的方法损害了每个模块的识别率, 使得二维码的主要信息更难识别。

3) 压缩输入数据。邹敏等人 (2015) 使用 Huffman 算法压缩输入数据; Abas 等人 (2017) 使用 Gzip、Zip 等多种压缩算法压缩输入数据, 并将压缩后的二进制数据用 base64 格式编码成字符串作为二维码编码器的输入。对于这类编码算法, 标准二维码解码器会读取到压缩后的数据, 而不知道如何翻译这些数据。Victor (2012) 提出的二维码和陈元枝等人 (2015) 提出的二维码均同时使用了彩色模块和压缩数据两项技术共同提高数据容量。杨康等

人(2017)基于汉字字频提出了一种针对汉字的变长编码方案,这也属于在信源处对位流编码方案进行了压缩。郑志学(2020)提出同时使用压缩和加密两种技术生成防伪二维码。

4)通过自定义模块排布方式增大编码区域的面积占比。Villán 等人(2006)提出了一种多级别二维条码。这种条码格式没有位置探测图形等功能图形,因此编码区域比标准二维码更大。具有较大编码面积并且同时具有较美观外表的二维条码格式有 PiCode (picture-embedding 2D barcode) (Chen 等, 2016)和 RA Code (robust and aesthetic code) (Chen 等, 2018)等。

除上述几类工作外,还有一些旨在提高二维码容量的研究工作。Yuan 等人(2019)提出了双层二维码,利用视角差在左右两个方向显示不同的二维码,并且可以用标准二维码解码器解码。但是双层二维码要求相机处于特定的角度范围才能解码,而且解码成功率比标准二维码低。Chou 和 Wang (2020)提出了嵌套二维码,在外层二维码图案的内部嵌入了一个尺寸更小的内层二维码,标准扫码器可以分别从外层二维码和内层二维码中获取不同消息。但是内外两个二维码的尺寸差异较大,导致较小的二维码较难解码,而且用户不易选择扫描哪个二维码。

综上所述,目前没有一种方法能在兼容标准二维码解码器且不影响纠错能力的前提下提升数据容量。

2 位流编码格式

本节介绍二维码标准 GB/T18284-2000(国家质量技术监督局,2000)所采用的位流编码格式。二维码有40个版本,从版本1到版本40。版本越

大,模块数量越多,码字总数越多。同时,二维码有4个纠错等级,即L、M、Q和H,分别代表纠错能力大约7%、15%、25%和30%。纠错等级越高,数据码字占码字总数的比例越小。对于给定的版本和纠错等级,数据码字数量可查表得到。每个数据码字表示8个二进制位,因此,位流长度不能超过数据码字数量的8倍。

位流包含若干段(segment),每一段分别编码了一部分数据或编码了附加特性(additional features)。每个编码数据的段分为3部分,从前往后分别是模式指示符(mode indicator)、字符计数指示符(character count indicator)和数据。模式指示符表示这一段采用的编码模式(mode)。编码模式共有4种,即数字模式、字母数字模式、8位字节模式和中国汉字模式,占用4位。其中,数字模式只能编码数字;字母数字模式可以编码大写字母、数字和9种符号;8位字节模式可以编码任意二进制数据;中国汉字模式只能编码中国汉字。特别地,中国汉字模式的模式指示符之后有中国汉字子集指示符,长度是4位,只有一种取值0001,表示GB2312字符集。字符计数指示符表示这一段编码数据的长度。字符计数指示符占用的位数随模式和二维码版本变化,可查表得到。在数字模式下,每3个数字字符编码成10位;如果数据长度不是3的整数倍,则剩余的1个字符编码成4位,或者剩余的2个字符编码成7位。字母数字模式、8位字节模式和中国汉字模式编码数据所需位数如表1所示。附加特性有专门的格式,可编码结构链接(structured append)信息、扩充解释(extended channel interpretation, ECI)信息,不用于编码字符。本文所称的位流不包含终止符、填充位和填充码字。

表1 各模式编码 n 个字符所需位数

Table 1 The number of bits to encode n character in each mode

模式	模式指示符	中国汉字子集指示符	字符计数指示符	数据	/bit
数字	4	—	10/12/14	$10 \cdot \left\lfloor \frac{n}{3} \right\rfloor + \begin{cases} 0 & n \bmod 3 = 0 \\ 4 & n \bmod 3 = 1 \\ 7 & n \bmod 3 = 2 \end{cases}$	
字母数字	4	—	9/11/13	$11 \cdot \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor + \begin{cases} 0 & n \bmod 2 = 0 \\ 4 & n \bmod 2 = 1 \end{cases}$	
8位字节	4	—	8/16/16	$8n$	
中国汉字	4	4	8/10/12	$13n$	

注:字符计数指示符的3个数字分别对应版本1~9、10~26、27~40,“—”表示该模式不包含中国汉字子集指示符。

算法和实验不考虑中国汉字模式,原因如下:

1) 中国汉字模式与国际二维码标准不兼容。2) 解码器即使支持中国汉字模式(例如微信和支付宝的扫一扫、开源解码器 ZXing 等),也对含中国汉字模式的二维码解码有误。3) 在实验获取的 2 000 多个二维码中,只有一个二维码使用中国汉字模式,其他二维码的汉字是通过代码页(例如 UTF-8、GB2312 等)转换成多个字节后用 8 位字节模式编码的。

一种简单的位流编码算法是使用单一模式编码所有数据,并且尽量使用数据位数少的模式,即数字模式优先,字母数字模式次之,不能用以上两种模式编码时使用 8 位字节模式编码,开源编码器 ZXing 使用这种算法。对各种模式和纠错等级,二维码标准以表格形式给出了各版本二维码能容纳的字符数量,编码器可根据该表格决定二维码的版本。刘悦和刘明业(2005)指出了上述表格中的错误。

与使用单一模式相比,在不同模式之间切换可能得到更短的位流。例如,数字字符可以用 3 种模式编码,使用数字模式编码的数据位数最少,字母数字模式编码的数据位数次之,8 位字节模式编码的数据位数最多。然而,如果前一个字符使用 8 位字节模式编码,那么切换到数字模式需要添加模式指示符和字符计数指示符,反而可能使总体位流变长。最优位流编码需要权衡总体数据位数和切换模式的开销。二维码标准的附录给出了“位流长度的最优化”方法。这是一种基于规则的方法,根据连续同类型字符长度(例如连续数字字符数量)切换模式,但该算法并不是最优算法。

3 提出的算法

3.1 位流长度最小化

给定长度为 l ($l \geq 1$) 的输入数据,输入数据的第 i 个字符记做 s_i ($1 \leq i \leq l$), s_i 是 8 位字节。目标是用最短的位流编码输入数据。

定义符号 D_i ($1 \leq i \leq l$), D_i 表示编码前 i 个字符所需的最小位流长度。对于每个 D_i , 根据第 i 个字符的编码模式,可以归纳出 6 种编码状态。形式上,定义 $D_i^{n,1}$, $D_i^{n,2}$, $D_i^{n,3}$, $D_i^{a,1}$, $D_i^{a,2}$ 和 D_i^b 等 6 个符号。

$D_i^{n,k}$ ($k \in \{1,2,3\}$) 表示在第 i 个字符用数字模式(numeric mode)编码且是所在段的第 k' ($k' \equiv$

$k \bmod 3$) 个字符的条件下,编码前 i 个字符所需的最小位流长度。若没有符合条件的位流,则定义 $D_i^{n,k} = +\infty$ 。

$D_i^{a,k}$ ($k \in \{1,2\}$) 表示在第 i 个字符用字母数字模式(alphanumeric mode)编码且是所在段的第 k' ($k' \equiv k \bmod 2$) 个字符的条件下,编码前 i 个字符所需的最小位流长度。若没有符合条件的位流,则定义 $D_i^{a,k} = +\infty$ 。

D_i^b 表示在第 i 个字符用 8 位字节模式(byte mode)编码的条件下,编码前 i 个字符所需的最小位流长度。若没有符合条件的位流,则定义 $D_i^b = +\infty$ 。

因此, D_i 是这 6 个符号的最小值,即

$$D_i = \min\{D_i^{n,1}, D_i^{n,2}, D_i^{n,3}, D_i^{a,1}, D_i^{a,2}, D_i^b\} \quad (1)$$

用 Σ^m ($m \in \{n, a, b\}$) 表示对应模式的字符集,有包含关系 $\Sigma^n \subseteq \Sigma^a \subseteq \Sigma^b$ 。用 h^m ($m \in \{n, a, b\}$) 表示对应模式的模式指示符与字符计数指示符的位数之和。

先考虑第 i ($2 \leq i \leq l$) 个字符用数字模式编码且是所在段的第 k' ($k' \equiv 1 \bmod 3$) 个字符的情况。如果第 $i-1$ 个字符用数字模式编码且是所在段的第 k'' ($k'' \equiv 3 \bmod 3$) 个字符,则第 i 个字符可以沿用该数字模式段,最短位流长度是 $D_{i-1}^{n,3} + 4$;也可以从第 i 个字符开始编码一个新的数据模式段,最短位流长度是 $D_{i-1} + h^n + 4$ 。综上, $D_i^{n,1}$ 可表示为

$$D_i^{n,1} = \min\{D_{i-1}^{n,3}, D_{i-1} + h^n\} + 4, s_i \in \Sigma^n \quad (2)$$

再考虑第 i ($2 \leq i \leq l$) 个字符用数字模式编码且是所在段的第 k' ($k' \equiv 2 \bmod 3$) 个字符的情况。只有当第 $i-1$ 个字符用数字模式编码且是所在段的第 k'' ($k'' \equiv 1 \bmod 3$) 个字符,且第 i 个字符沿用该数字模式段时才可以得到符合条件的编码,因此

$$D_i^{n,2} = D_{i-1}^{n,1} + 3, s_i \in \Sigma^n \quad (3)$$

同理可得

$$D_i^{n,3} = D_{i-1}^{n,2} + 3, s_i \in \Sigma^n \quad (4)$$

$$D_i^{a,1} = \min\{D_{i-1}^{a,2}, D_{i-1} + h^a\} + 6, s_i \in \Sigma^a \quad (5)$$

$$D_i^{a,2} = D_{i-1}^{a,1} + 5, s_i \in \Sigma^a \quad (6)$$

$$D_i^b = \min\{D_{i-1}^b, D_{i-1} + h^b\} + 8, s_i \in \Sigma^b \quad (7)$$

特别地,对于第 1 个字符,可得

$$\begin{cases} D_1^{n,1} = h^n + 4 & s_1 \in \Sigma^n \\ D_1^{a,1} = h^a + 6 & s_1 \in \Sigma^a \\ D_1^b = h^b + 8 & s_1 \in \Sigma^b \end{cases} \quad (8)$$

至此,位流长度最小化问题已转换为动态规划问题。

引理1 给定版本和输入数据,可以在 $O(l)$ 时间内计算最短位流。

按照 i 从 $1 \sim l$ 的顺序依次计算 $D_i^{n,1}$, $D_i^{n,2}$, $D_i^{n,3}$, $D_i^{a,1}$, $D_i^{a,2}$, D_i^b , D_i , 并记录每个符号取最小值的条件。计算出最短位流长度后,根据每个符号取最小值的条件即可计算出最短位流。

定理1 给定输入数据和纠错等级,可以在 $O(l)$ 时间内计算最短位流及对应的版本。

给定输入数据和纠错等级,选择初始版本为版本1,调用上述算法计算初始最短位流。若位流长度超过当前版本和纠错等级的位流长度限制,则增加版本。在不同版本下,各种模式的字符计数指示符位数不尽相同。字符计数指示符一共有3种位数设置,对应版本1~9、10~26、27~40。如果版本增加到10或27,则重新计算最短位流。重复上述步骤,直到最短位流不超过长度限制。因此,计算至多3次最短位流后即可确定不超过长度限制的最短位流及对应的版本。位流长度最小化算法的伪代码为:

输入:数据 s 、纠错等级 ECL ,

输出:位流 BS 、版本 V ,

- 1) function minimum_BS(s , ECL),
- 2) for $V = 1$ to 40 do,
- 3) if $V \in \{1, 10, 27\}$ then,
- 4) 计算 $D_1^{n,1}$, $D_1^{a,1}$, D_1^b , D_1 ,
- 5) for $i = 2$ to l do,
- 6) 计算 $D_i^{n,1}$, $D_i^{n,2}$, $\dots$, D_i ,
- 7) $BS \leftarrow$ 长度等于 D_l 的位流,
- 8) if $D_l \leq$ 最大位流长度(V , ECL) then,
- 9) return BS , V ,
- 10) return 编码失败。

3.2 统一资源定位符的最优编码

统一资源定位符通常由协议(scheme)、主机(host)和路径等字段组成。常见的统一资源定位符协议包括超文本传输协议(hypertext transfer protocol, HTTP)和文件传输协议(file transfer protocol, FTP)等。

根据 RFC(request for comments)1738 统一资源定位符规范,协议字段对大小写不敏感。根据 RFC 1035 域名规范,主机字段对大小写不敏感。因为小

写字母只能用8位字节模式编码,而大写字母既可以用8位字节模式编码,又可以用字母数字模式编码,所以将对大小写不敏感的字符转换成大写字母可以缩短位流长度。例如“http://example.com/”和“HTTP://EXAMPLE.COM/”是等效的统一资源定位符,前者最短位流长度是164,后者最短位流长度是118。

先用 $O(l)$ 时间解析统一资源定位符,提取对大小写不敏感的字段,包括但不限于协议字段和主机字段。若第 i 个字符属于对大小写不敏感的字段,则重新定义 $D_i^{a,1}$ 和 $D_i^{a,2}$, 即

$$\begin{cases} D_i^{a,1} = \min\{D_{i-1}^{a,2}, D_{i-1} + h^a\} + 6 & uc(s_i) \in \Sigma^a \\ D_i^{a,2} = D_{i-1}^{a,1} + 5 & uc(s_i) \in \Sigma^a \end{cases} \quad (9)$$

式中, $uc(s_i)$ 表示 s_i 的大写形式(upper case),若 s_i 不是字母,则定义 $uc(s_i) = s_i$ 。

此外,根据 RFC 1738 统一资源定位符规范,协议特定部分(scheme-specific part)可以转义(escape)。一个转义字符的转义序列包含3个字符,以百分号开头,接着是两位十六进制数。对于不属于字母数字模式字符集的字符,将其改为转义序列,虽然总是会增加数据位数,但是可能节省模式指示符、字符计数指示符,从而缩短位流长度。例如协议特定部分的“HELLO _ WORLD”和“HELLO% 5 FWORLD”等效。前者最短位流长度是100,最短位流由11个8位字节组成;后者最短位流长度是85,最短位流由13个字母数字组成。根据第 i 个字符的转义序列的第 j 个字符的编码模式,定义 $E_{i,1}^{a,1}$, $E_{i,1}^{a,2}$, $E_{i,2}^{n,1}$, $E_{i,2}^{a,1}$, $E_{i,2}^{a,2}$, $E_{i,3}^{n,1}$, $E_{i,3}^{n,2}$, $E_{i,3}^{a,1}$ 和 $E_{i,3}^{a,2}$ 等9个符号。

$E_{i,j}^{n,k}$ ($j \in \{2,3\}$, $k \in \{1,2\}$, $(j,k) \neq (2,2)$) 表示在第 i 个字符的转义序列的第 j 个字符用数字模式编码且是所在段的第 k' ($k' = k \bmod 3$) 个字符的条件下,编码前 $i-1$ 个字符及第 i 个字符的转义序列的前 j 个字符所需的最小位流长度。若没有符合条件的位流,则定义 $E_{i,j}^{n,k} = +\infty$ 。

$E_{i,j}^{a,k}$ ($j \in \{1,2,3\}$, $k \in \{1,2\}$) 表示在第 i 个字符的转义序列的第 j 个字符用字母数字模式编码且是所在段的第 k' ($k' = k \bmod 2$) 个字符的条件下,编码前 $i-1$ 个字符及第 i 个字符的转义序列的前 j 个字符所需的最小位流长度。若没有符合条件的位流,则定义 $E_{i,j}^{a,k} = +\infty$ 。

因为用 8 位字节模式编码转义序列的任一字符一定会使总体位流长度比直接编码转义字符更长,所以无需考虑转义序列的任一字符由 8 位字节模式编码的情况。因为最短位流的任意相邻两段的模式一定不同(否则,将它们合并为一段将更短),所以无需考虑任意连续两段模式相同的情况。用 $c(s_i)$ 表示字符 s_i 的转义序列末尾属于数字字符集的字符数量,值域是 $\{0, 1, 2\}$ 。对于第 i ($2 \leq i \leq l$) 个字符,如果该字符可以转义,则有

$$E_{i,1}^{a,1} = \min\{D_{i-1}^{a,2}, D_{i-1} + h^a\} + 6 \quad (10)$$

$$E_{i,1}^{a,2} = D_{i-1}^{a,1} + 5 \quad (11)$$

若 $c(s_i) = 2$, 则

$$E_{i,2}^{n,1} = \min\{E_{i,1}^{a,1}, E_{i,1}^{a,2}\} + h^n + 4 \quad (12)$$

$$E_{i,2}^{a,1} = E_{i,1}^{a,2} + 6 \quad (13)$$

$$E_{i,2}^{a,2} = E_{i,1}^{a,1} + 5 \quad (14)$$

若 $c(s_i) \geq 1$, 则

$$E_{i,3}^{n,1} = \min\{E_{i,2}^{a,1}, E_{i,2}^{a,2}\} + h^n + 4 \quad (15)$$

$$E_{i,3}^{n,2} = E_{i,2}^{n,1} + 3 \quad (16)$$

$$E_{i,3}^{a,1} = \min\{E_{i,2}^{a,2}, E_{i,2}^{n,1} + h^a\} + 6 \quad (17)$$

$$E_{i,3}^{a,2} = E_{i,2}^{a,1} + 5 \quad (18)$$

特别地,第 1 个字符一定属于协议字段,不能转义,因此 $E_{1,*}^{*,*}$ 值均为 $+\infty$ 。

若第 i 个字符属于字母数字模式字符集,或者是对大小写不敏感的字段的小写字母,则直接用字母数字模式编码必然比转义后编码更短,无需转义优化。此外,如果输入数据已经经过了转义,且第 i 个字符是转义序列中的字符,则按照规范不能对 s_i 再次转义,不能应用转义优化;此时 s_i 对大小写不敏感,可以应用大小写不敏感字段优化。综合上述条件,若第 i 个字符属于协议特定部分,且不属于字母数字模式字符集,不是转义序列中的字符,不是对大小写不敏感的字段的小写字母,则重新定义为

$$\begin{cases} D_i^{n,1} = E_{i,3}^{n,1} \\ D_i^{n,2} = E_{i,3}^{n,2} \\ D_i^{a,1} = E_{i,3}^{a,1} \\ D_i^{a,2} = E_{i,3}^{a,2} \end{cases} \quad (19)$$

定理 2 给定统一资源定位符和纠错等级,可以在 $O(l)$ 时间内计算大小写和转义意义下等效的位流中最短的位流及对应的版本。

按照 i 从 1 到 l 的顺序依次计算 $E_{i,1}^{a,1}$, $E_{i,1}^{a,2}$,

$E_{i,2}^{n,1}$, $E_{i,2}^{a,1}$, $E_{i,2}^{a,2}$, $E_{i,3}^{n,1}$, $E_{i,3}^{n,2}$, $E_{i,3}^{a,1}$, $E_{i,3}^{a,2}$, $D_i^{n,1}$, $D_i^{n,2}$, $D_i^{n,3}$, $D_i^{a,1}$, $D_i^{a,2}$, D_i^b , D_i , 即可求出大小写和转义意义下等效的位流中最短位流的长度。计算对应的位流及决定版本的算法与第 3.1 节中的方法相同。URL 最优编码算法的伪代码为:

输入:数据 s 、纠错等级 ECL ,

输出:位流 BS 、版本 V ,

```

1  function minimum_BS_improved( $s$ ,  $ECL$ ),
2  if is_not_URL( $s$ ) then,
3    return minimum_BS( $s$ ,  $ECL$ ),
4  for  $V = 1$  to 40 do,
5    if  $V \in \{1, 10, 27\}$  then,
6      计算  $D_1^{n,1}$ 、 $D_1^{a,1}$ 、 $D_1^b$ 、 $D_1$ ,
7      for  $i = 2$  to  $l$  do,
8        计算  $E_{i,1}^{a,1}$ ,  $E_{i,1}^{a,2}$ ,  $\dots$ ,  $E_{i,3}^{a,2}$ ,
9        计算  $D_{i,1}^n$ ,  $D_{i,2}^n$ ,  $\dots$ ,  $D_i$ ,
10      $BS \leftarrow$  长度等于  $D_l$  的位流,
11     if  $D_l \leq$  最大位流长度( $V$ ,  $ECL$ ) then,
12       return  $BS$ ,  $V$ ,
13 return 编码失败。
```

4 实验

4.1 参与比较的算法

二维码标准中的位流长度最优化算法(以下简称标准算法)定义了字母数字模式专有子集 $\Sigma^b \setminus \Sigma^a$ 以及字符模式专有子集 $\Sigma^a \setminus \Sigma^n$ 。编码时,根据当前字符所属的字符集(或专有子集)及连续的来自相同字符集(或来自相同专有子集)的字符数量切换编码模式。例如输入数据“abc123456def”,编码第 4 个字符时,因为连续 6 个字符属于数字字符集,因此切换到数字模式,位流长度比全部用 8 位字节模式编码短 2 位。标准算法有可能陷入局部最优。例如输入数据“1234567Ab”,用数字模式编码“1234567”,用 8 位字节模式编码“Ab”是最优的;但是标准算法使用字母数字模式编码“A”,用 8 位字节模式编码“b”。标准算法与最优编码相比,增加了字母数字模式的模式指示符 4 位、字符计数指示符 9 位,只减少了数据位数 2 位,总体位流长度增加了 $4 + 9 - 2 = 11$ 。除中国汉字模式外,二维码标准 GB/T18284:2000 中的位流长度最优化算法与国际

二维码标准 ISO/IEC18004:2000 相同。因为国际二维码标准已更新为 ISO/IEC18004:2015, 位流长度最优化算法有所改进, 所以实验对比的标准算法是国际标准 ISO/IEC18004:2015。

开源编解码器 ZXing 的位流编码算法比较简单。该算法使用单一编码模式, 如果所有字符都属于 Σ^n , 则使用数字模式编码; 否则, 如果所有字符都属于 Σ^a , 则使用字母数字模式编码; 否则, 使用 8 位字节模式编码。以下将这种使用单一编码模式编码所有数据的算法称为单模算法。

据黑盒测试, 商业编码器“草料二维码生成器”的位流编码算法是对于所有输入数据都使用 8 位字节模式编码。因为这种算法输出的位流一定不比单模算法短, 所以实验不比较这种算法。

单模算法、标准算法和最小化算法对几种特定的输入数据编码的位流长度如表 2 所示。

4.2 二维码测试集

为了获取实际场景的二维码图像, 实验使用百度、搜狗、360、谷歌、必应(国内版和国际版)和雅虎等图像搜索引擎分别搜索“二维码”和“QR Code”, 搜索日期是 2021 年 2 月 3 日。对下载的每幅图像使用开源解码器 ZXing 解码。部分图像无法解码, 原因主要包括: 图像主体内容不是二维码、图片含多

表 2 3 种算法输出位流长度举例

Table 2 Examples of output bit stream length of three algorithms

输入数据	/bit		
	标准算法	单模算法	最小化算法
1234567Ab	77	84	66
a12345	60	60	51
abc123456 def	106	108	106
aBCDEFGHIJK12345	140	140	116

个二维码导致解码器无法定位、二维码污损或遮挡和二维码模块规格不标准等。位流互异或纠错等级互异的二维码均视为互异的二维码。去除 ZXing 无法解码的图像后, 得到 2 289 个互异的二维码。再去除 1 个含中国汉字模式的二维码、6 个含 Kanji 模式(一种只在国际标准里定义的模式)的二维码后, 测试集包含 2 282 个互异的二维码。根据二维码数据是否为统一资源定位符, 将测试集划分为非 URL 测试集和 URL 测试集。非 URL 测试集包含 603 个二维码, URL 测试集包含 1 679 个二维码。实验只考虑了协议为 http、https、ftp、ftps、mailto 的统一资源定位符。测试集中位流长度属于各区间的二维码样本数量如图 2 所示。

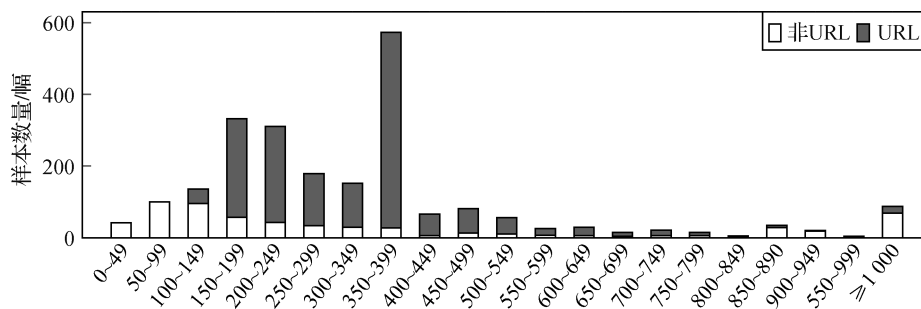


图 2 测试集位流长度分布

Fig. 2 Distribution of bit stream length in the test set

4.3 位流长度与版本的优化效果

对测试集中的每个二维码分别重新编码。部分二维码包含附加特性。在重新编码过程中, 所有附加特性段保留原样, 且附加特性段在字符数据中的位置保持不变。表 3 和表 4 比较了标准算法、单模算法、位流长度最小化算法和统一资源定位符的最优编码算法输出的位流的平均长度, 以及各算法输出的位流长度相较标准算法有所减小的二维码数量占

测试集的比例。由于位流长度的减小需要通过二维码版本的减小才能反映到最终印刷品的面积或印刷质量上, 因此表中还给出了各编码算法输出的二维码版本相较标准算法有所减小的二维码占比, 其中标准算法输出的版本等于 1 的二维码不计入分母。实验数据表明, 对于非 URL 测试集(包含 603 个二维码, 其中 419 个二维码标准算法输出的版本大于 1), 本文算法将平均位流长度减小了 0.4%, 减小了

表3 在非 URL 测试集上位流长度或
版本减小的二维码占比
Table 3 The ratio of QR codes of which bit stream
length or version can be reduced on the
test set with non-URL data

算法	平均位流长度	二维码占比	
		位流长度减小	版本减小
原位流	549.45	—	—
标准	545.02	—	—
单模	557.27	6/603	0/419
最小化	543.00	55/603	5/419

注：“—”表示初始数值和比较基准，“/”前后的数字分别表示位流长度(版本)减小的二维码数量以及全部的二维码数量。

其中 55 个(9.1%)二维码的位流长度,减小了其中 5 个(1.2%)二维码的版本;对于 URL 测试集(包含 1 679 个二维码,其中 1 657 个二维码标准算法输出的版本大于1),本文算法将平均位流长度减小了

表4 在 URL 测试集上位流长度或版本减小的二维码占比
Table 4 The ratio of QR codes of which bit stream
length or version can be reduced on the
test set with URL data

算法	平均位流长度	二维码占比	
		位流长度减小	版本减小
原位流	332.34	—	—
标准	330.49	—	—
单模	334.04	41/1 679	2/1 657
最小化	328.89	175/1 679	21/1 657
URL 最优编码	284.41	1 652/1 679	525/1 657

注：“—”表示初始数值和比较基准，“/”前后的数字分别表示位流长度(版本)减小的二维码数量以及全部的二维码数量。

13.9%,减小了 1 652 个(98.4%)二维码的位流长度,减小了 525 个(31.7%)二维码的版本。图 3 给出了本文提出算法输出的二维码版本比标准算法小的示例。

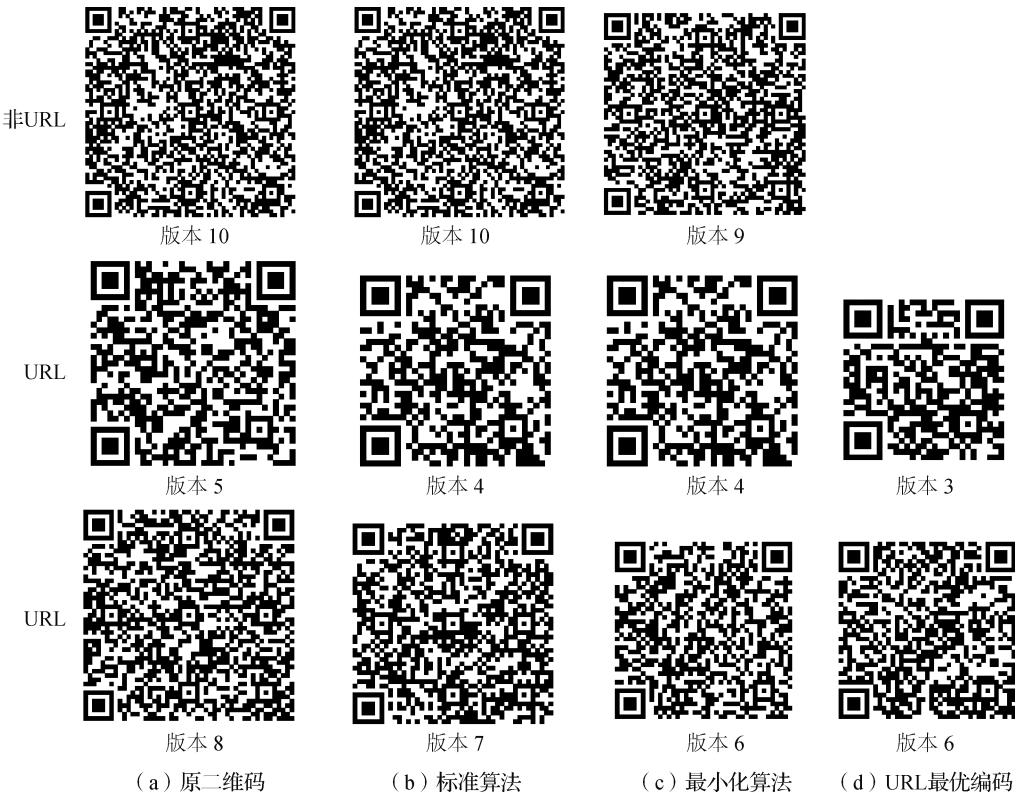


图3 本文提出算法减小二维码版本的示例

Fig. 3 QR code examples of which version is reduced by the proposed algorithm
((a) initial QR code; (b) standard algorithm; (c) minimization algorithm; (d) URL minimization algorithm)

4.4 扫码成功率的优化效果

实验对比了参考二维码(指标准算法生成的二维码)与最小二维码在不同模糊程度下的扫码成功率。用标准差为 σ 的二维高斯核对二维码图像进行模糊;其中,图像的分辨率为 300×300 像素,二维码占据图像正中间的 200×200 像素。分别统计 2 282 幅参考二维码图像和 2 282 幅最小二维码图像的扫码成功数量,统计结果如图 4 所示。实验数据表明,当 σ 在 $[1.7, 5.5]$ 范围时,本文算法将扫码成功图像数量提高了 10 幅以上;当 σ 在 $[3.6, 4.8]$ 范围时,本文算法将扫码成功图像数量提高了 100 幅以上。

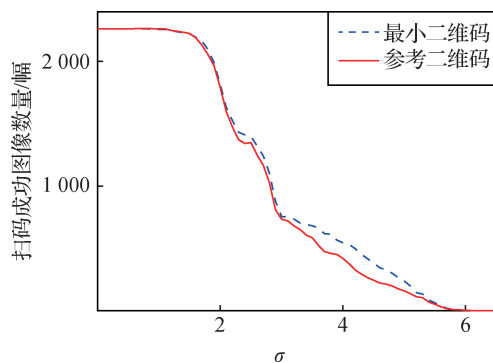


图 4 扫码成功图像数量与高斯核的标准差的关系

Fig. 4 The number of successfully scanned images against kernel standard deviation of Gaussian blur

4.5 统一资源定位符的最优编码的消融实验

统一资源定位符的最优编码算法包含两个优化:1)大小写不敏感字段优化(式(6));2)转义优化(式(8))。实验在 URL 测试集上测试了 4 种优化组合输出的位流长度和二维码版本相较标准算法减小的二维码占比,实验结果如表 5 所示。实验数据表明,单独进行大小写不敏感字段优化或转义优化都有优化效果。同时启用两项优化时,得到的平均位流长度最小,位流长度减小和版本减小的二维码占比最大。对于 URL 测试集,最小化算法只将平均位流长度减小了 0.5%,而 URL 最优编码算法将平均位流长度减小了 13.9%;最小化算法只减小了 175 个(10.4%)二维码的位流长度,而 URL 最优编码算法减小了 1 652 个(98.4%)二维码的位流长度;最小化算法只减小了 21 个(1.3%)二维码的版本,而 URL 最优编码算法减小了 525 个(31.7%)二维码的版本。

表 5 统一资源定位符的最优编码的消融实验

Table 5 Ablation study on URL optimization

大小写 优化	转义 优化	平均位流 长度	位流长度减小的 二维码占比	版本减小的 二维码占比
-	-	328.89	175/1 679	21/1 657
-	✓	328.84	182/1 679	21/1 657
✓	-	285.37	1 651/1 679	515/1 657
✓	✓	284.41	1 652/1 679	525/1 657

注:“/”前后的数字分别表示位流长度(版本)减小的二维码数量以及全部的二维码数量。“✓”表示采用,“×”表示未采用。

4.6 运行时间

实验平台的 CPU 是 Intel Core i7-10700,内存大小为 32 GB;算法用 C++ 实现。对于非 URL 测试集中的每个输入数据,重复调用位流长度最小化算法 10 000 次,并记录这 10 000 次运行时间的平均值。运行时间与输入数据的长度的关系如图 5 所示。实验使用相同的方法测试了 URL 最优编码算法对 URL 测试集中的数据进行编码的时间,如图 6 所示。

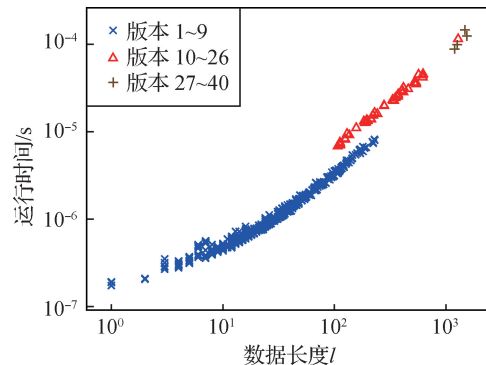


图 5 非 URL 数据的编码时间与数据长度的关系

Fig. 5 Encoding time against data length for non-URL data

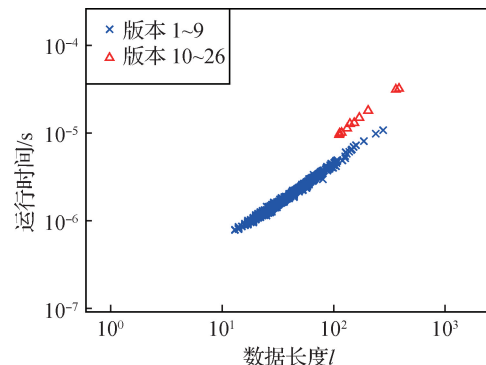


图 6 URL 数据的编码时间与数据长度的关系

Fig. 6 Encoding time against data length for URL data

将类型(分为非 URL 类型和 URL 类型)和版本区间均相同的测试数据分为一组,分别将每组编码时间与数据长度的关系进行线性回归。实验数据表明,除了样本较少的版本 27~40 以外,其他 4 组关系的相关系数 r^2 均大于 0.99;这表明编码时间与数据长度 l 之间存在显著的线性关系。本文算法运行速度较快,平均用时 2.45 μs (输入数据的平均长度为 48.1),最多用时 146 μs 。

5 结 论

本文解决了二维码位流长度最小化问题,提出的二维码位流长度最小化算法可以计算最短位流。对于 URL 类型数据,URL 最优编码算法进一步减小了位流长度,可以计算出大小写和转义意义下等效的统一资源定位符的最短位流。实验结果表明,本文算法输出的位流长度最短,输出的二维码版本最小,在一些实际场景中可以减小二维码的版本,并且具有运算速度快的特点,其时间复杂度的上界与输入数据长度呈线性关系。此外,本文算法易于使用,用户只需输入数据和纠错等级即可,无需调节任何参数。

需要说明的是,本文只针对二维码提出了位流长度最小化算法。Data Matrix 和 PDF417 等其他条码类型也使用与二维码类似的编码结构,但是编码细节存在差异,本文算法不能直接用于其他条码类型的位流编码。

在未来的工作中,可将本文算法的思路经适配后用于最小化 Data Matrix 和 PDF417 等其他条码类型的位流长度。同时,本文算法思路对于其他条码类型是否有效也有待验证。

参考文献 (References)

- Abas A, Yusof Y and Ahmad F K. 2017. Expanding the data capacity of QR codes using multiple compression algorithms and base64 encode/decode. *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*, 9(2-2): 41-47
- Abdollahi M, Jiang H and Kaminska B. 2019. Structural colour QR codes for multichannel information storage with enhanced optical security and life expectancy. *Nanotechnology*, 30(40): #405301 [DOI: 10.1088/1361-6528/ab2d3b]
- Barron I, Yeh H J, Dinesh K and Sharma G. 2020. Dual modulated QR codes for proximal privacy and security. *IEEE Transactions on Image Processing*, 30: 657-669 [DOI: 10.1109/TIP.2020.3037524]
- Blasinski H, Bulan O and Sharma G. 2013. Per-colorant-channel color barcodes for mobile applications: an interference cancellation framework. *IEEE Transactions on Image Processing*, 22(4): 1498-1511 [DOI: 10.1109/TIP.2012.2233483]
- Chen C S, Huang W J, Zhou B J, Liu C C and Mow W H. 2016. PiCode: a new picture-embedding 2D barcode. *IEEE Transactions on Image Processing*, 25(8): 3444-3458 [DOI: 10.1109/TIP.2016.2573592]
- Chen C S, Zhou B J and Mow W H. 2018. RA code: a robust and aesthetic code for resolution-constrained applications. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 28(11): 3300-3312 [DOI: 10.1109/TCSVT.2017.2741472]
- Chen Y Z, Deng Y, Shi S L and Jiang W Y. 2015. Generation and recognition method of colorized QR codes based on Gzip compression algorithm. *Application of Electronic Technique*, 41(12): 116-119, 128 (陈元枝, 邓艳, 史绍亮, 姜文英. 2015. 基于 Gzip 压缩算法的彩色 QR 码生成与识别方法. *电子技术应用*, 41(12): 116-119, 128) [DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.2015.12.031]
- Chou G J and Wang R Z. 2020. The nested QR code. *IEEE Signal Processing Letters*, 27: 1230-1234 [DOI: 10.1109/LSP.2020.3006375]
- Galiyawala H J and Pandya K H. 2014. To increase data capacity of QR code using multiplexing with color coding: an example of embedding speech signal in QR code//*Proceedings of 2014 Annual IEEE India Conference*. Pune, India; IEEE: 1-6 [DOI: 10.1109/INDICON.2014.7030441]
- Jia D, You F, Zhang Q L and Zeng Z G. 2017. Color QR code recognition based on k -means algorithm. *Packaging Journal*, 9(5): 62-68 (贾丹, 尤飞, 张庆立, 曾志高. 2017. 基于 k -means 算法的彩色 QR 码识别. *包装学报*, 9(5): 62-68) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-7100.2017.05.010]
- Liu Y and Liu M Y. 2005. Research on data encoding of two-dimensional QR code barcode. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 25(4): 352-355 (刘悦, 刘明业. 2005. QR 码二维条码数据编码的研究. *北京理工大学学报*, 25(4): 352-355) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-0645.2005.04.017]
- Melgar M E V, Zaghetto A, Macchiavello B and Nascimento A C A. 2012. CQR codes: colored quick-response codes//*Proceedings of 2012 IEEE Second International Conference on Consumer Electronics*. Berlin, Germany; IEEE: 321-325 [DOI: 10.1109/ICCE-Berlin.2012.6336526]
- Meruga J M, Fountain C, Kellar J, Crawford G, Baride A, May P S, Cross W and Hoover R. 2015. Multi-layered covert QR codes for increased capacity and security. *International Journal of Computers and Applications*, 37(1): 17-27 [DOI: 10.1080/1206212X.2015.1061254]

- The State Bureau of Quality and Technical Supervision. 2000. GB/T 18284-2000 QR code. Beijing: Standards Press of China: 1-67 (国家质量技术监督局. 2000. GB/T 18284-2000 快速响应矩阵码. 北京: 中国标准出版社: 1-67)
- Tkachenko I, Puech W, Destruel C, Strauss O, Gaudin J M and Guichard C. 2016. Two-level QR code for private message sharing and document authentication. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 11(3): 571-583 [DOI: 10.1109/TIFS.2015.2506546]
- Tkachenko I, Puech W, Strauss O, Destruel C, Gaudin J M and Guichard C. 2015. Rich QR code for multimedia management applications//*Proceedings of the 18th International Conference on Image Analysis and Processing*. Genoa, Italy: Springer: 383-393 [DOI: 10.1007/978-3-319-23234-8_36]
- Victor N. 2012. Enhancing the data capacity of QR codes by compressing the data before generation. *International Journal of Computer Applications*, 60(2): 17-21 [DOI: 10.5120/9663-1104]
- Villán R, Voloshynovskiy S, Koval O and Pun T. 2006. Multilevel 2-D bar codes: toward high-capacity storage modules for multimedia security and management. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 1(4): 405-420 [DOI: 10.1109/TIFS.2006.885022]
- Yang K, Yuan H D and Guo Y B. 2017. Research on lower redundancy of two-dimension barcode encoding in Chinese characters. *Computer Science*, 44(11A): 565-569 (杨康, 袁海东, 郭渊博. 2017. 低冗余二维码汉字编码研究. *计算机科学*, 44(11A): 565-569) [DOI: 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.11A.120]
- Yang Z B, Xu H L, Deng J Y, Loy C C and Lau W C. 2018. Robust and fast decoding of high-capacity color QR codes for mobile applications. *IEEE Transactions on Image Processing*, 27(12): 6093-6108 [DOI: 10.1109/TIP.2018.2855419]
- Yuan T L, Wang Y L, Xu K, Martin R R and Hu S M. 2019. Two-layer QR codes. *IEEE Transactions on Image Processing*, 28(9): 4413-4428 [DOI: 10.1109/TIP.2019.2908490]
- Zheng Z X. 2020. A generation method of anti-counterfeit QR code based on ciphertext compression. *Information and Communications*, (6): 156-157 (郑志学. 2020. 一种基于密文压缩的防伪二维码生成方法. *信息通信*, (6): 156-157) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-1131.2020.06.064]
- Zou M, Zhang R L, Wu T S and Wang X. 2015. An improved Huffman coding to increase information capacity in QR code. *Industrial Control Computer*, 28(9): 111-112, 114 (邹敏, 张瑞林, 吴桐树, 王啸. 2015. 一种改进的 Huffman 编码技术增加 QR 码的信息容量. *工业控制计算机*, 28(9): 111-112, 114) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-182X.2015.09.049]

作者简介



袁泰凌, 1995 年生, 男, 博士研究生, 主要研究方向为计算机图形学和计算机视觉。

E-mail: yuantailing@gmail.com



徐昆, 通信作者, 男, 副教授, 主要研究方向为真实感渲染、图像与视频编辑。

E-mail: xukun@tsinghua.edu.cn