

局部特征自适应的 DM 二维码结构提取方法

黄 翀 郑河荣 潘 翔

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310001)

摘要 针对非规则变形导致 DM 码图像解码率低的问题,提出了通过边缘梯度特征来进行自适应定位的方法,该方法显著提高了结构提取准确率。算法主要由以下 3 步组成:首先,算法根据 DM 码的轮廓特征进行 L 形定位,得到 DM 码的包围盒位置;其次,通过外轮廓虚线部分估计出条码规格,形成标准编码结构点阵,并通过仿射变换得到点阵在当前位置的映射点;最后,针对非规则变形所导致的定位点不准确,使得仿射变换无法得到正确结果的问题,采用局部边缘特征进行自适应调整,使得点阵分布能够重建出原始编码结构。在实验部分,对大量二维码图片进行解码测试。结果表明,本算法能够适用于失真非常明显的图片,解码准确率从已有方法的 93.5% 提高到 98.5%。

关键词 二维码,非规则变形,结构提取,局部特征,边缘梯度

中图分类号 TP391.41 **文献标识码** A

Adaptive Module Localization Method of Local Feature for Data Matrix Code

HUANG Chong ZHENG He-rong PAN Xiang

(Department of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310001, China)

Abstract In order to solve the problem of low decoding rate of data matrix image by irregular deformation, this paper proposed an adaptive localization method by edge gradient feature. The algorithm can significantly improve the accuracy of localization. The algorithm consists of the following three steps. Firstly, according to the contour feature of DM code, it locates "L" shape to get the position of the code. Secondly, it estimates the number of code blocks by detecting the dashed line and locates mapping points by affine transformation. Finally, local adjusting is performed to correct irregular deformation by edge gradient feature. In consequence, the original code can be reconstructed. In experiments, we tested decoding by a variety of data matrix code images. The results show that this algorithm can be applied to images in high distortion and decoding accuracy. The decoding accuracy can be greatly improved from 93% to 98%.

Keywords 2D Barcode, Irregular deformation, Structure extraction, Local feature, Edge gradient

1 引言

二维码作为一种新的条码技术,只占用很小的空间就可以存储很多的字符或数字信息,相比直接打印文字或采用一维条码,具有更高的信息密度。其次,二维码的可编码范围更大,能够存储文本、图片、声音、指纹,并且可支持多种语言。再者,它具有更高的可靠度和持久性,就算条码的 50% 被污损或破坏,其依旧可以被识读。还有,二维码可以打印在纸质、金属的表面,用于物联网中的身份识别^[1]。另一方面,一些工业二维码具有很高的抗腐蚀性、抗干扰性、耐久性,因此工作环境比较恶劣的航空环境、工业生产环境和物流环境也逐渐尝试引入二维码^[2]。正是这些优点,使得二维码在出现后就受到广泛的关注,并成为图像处理领域和模式识别领域十分重要的研究点^[3]。

对于二维码,已经形成了编解码标准。因此研究重点主要是如何从二维码图像中提取二维码,并恢复出条码结构,从而能够采用现有标准进行解码。已有研究主要集中在条码定位方面,即在图像中找到条码位置。研究人员提出采用区域

和纹理特征进行定位^[4]。区域特征通过条码在边界上的边连接特性找到条码位置,例如通过 Hough 变换找到两条直线参考线^[5]。而根据二维码的纹理特征也可以通过分类器等技术找到具有显著特征的条码区域,例如文献^[6]提出提取多分辨率直方图特征和局部二值特征来分类条码和背景区域,以达到定位条码位置的目的。但是对于定位得到的条码区域,如何恢复出条码图像结构方面的研究并不多见。已有研究主要采用均匀网格划分法^[7-9]。这种方法,对于模块大小基本一致,分布均匀的条码能够得到比较好的划分效果。但是,条码图像由于拍摄角度、打印机质量、机器工业和误差等问题,会存在同行同列的模块不在同一直线上、各模块大小不一、长宽不一等情况。而且,这种畸变在各个位置上是不一致的,因此即使采用全局仿射变换进行校正,采用网格划分方法仍无法准确地找到条码的黑白分布结构特征,因而无法得到正确的解码结果。

可以发现,在二维解码研究方面,条码定位研究已经较为成熟。但是在如何恢复出编码结构方面的研究并不多见。现有的网格划分法只能适用于一些图像质量比较好的条码,不

黄 翀(1990—),男,硕士生,主要研究方向为图像识别,E-mail: hzvincenth@163.com;郑河荣(1971—),男,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为图形图像、智能识别技术;潘 翔(1977—),男,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为图像识别。

能从失真比较严重的图像恢复出条码结构。针对该问题,论文提出在全局仿射变换基础上,通过边缘特征对模块划分进行自适应调整,从而使得划分结果能够有效地反映出条码黑白分布特征,重建出原有条码结构。通过实验分析表明,本文算法即使对于那种质量非常差的图片,包括行列分布不一致的机器点阵码、高度不一致的打印码等,都能够得到非常好的解码效果。

2 算法流程

本文算法主要包括条码定位、全局仿射变换和局部自适应调整 3 部分组成,整个算法流程如图 1 所示。其中条码定位结果主要根据 DM 码所具有的 L 型特征得到。然后通过条码区域的 4 个顶点得到全局仿射变换,得到模块粗划分结果。最后在模块粗划分结果基础上,通过边缘特征对局部划分进行自适应调整,使点阵分布能够有效地重建出条码原有结构,保证译码质量。

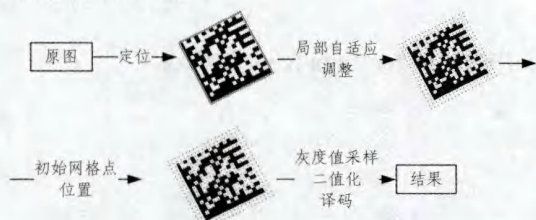


图 1 算法流程图示

2.1 条码定位

对于 Data Matrix 码,其一个主要特征是具有 L 型区域:定位图形左边和下边的两条邻边为深色实线,形成“L”形的定位图形。识别二维条码,首先要定位条码的边界位置。对于 Data Matrix 码,标准外形呈矩形,由于拍摄角度以及本身表面情况,可能图像外形会呈非规则四边形,因此,定位 DM 码的边界位置,就是确定条码四边形的 4 个顶点。根据 Data Matrix 码的特点,最容易也最先定位的是左边和下边的深色实线,接着通过上边和右边的边界确定条码的位置和规格。

定位步骤:首先寻找灰度跳跃明显的点;然后,根据外轮廓虚线部分特点,获得上边和右边所在直线,以两直线交点定为第四点;最后得到 4 个顶点的坐标位置,如图 2 所示,左下角 (x_0, y_0) ,右下角 (x_1, y_1) ,左上角 (x_2, y_2) ,右上角 (x_3, y_3) 。

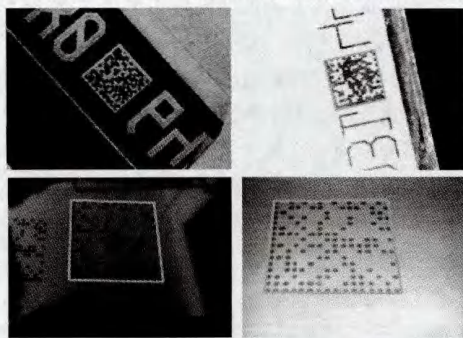


图 2 条码定位

2.2 确定条码规格

在 Data Matrix 条码中,定位线中虚线的作用就是用来快速确定条码规格。通过虚线中黑白跳跃的次数,可得到条码

规格。在条码上边取一条采样线,在其附近连续地采样灰度值,进行竖直方向投影:

$$p(x) = \sum_j I(x, j) \quad (1)$$

可知 $p(x)$ 的峰点对应于条码的边界,定位 $p(x)$ 峰点的算法^[10]:

首先,构造一维高斯模板:

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

接着,卷积平滑:

$$\varphi(x) = p(x) * g(x) \quad (3)$$

再求导,得到 φ', φ'' , 然后,得到 $p(x)$ 波峰的候选集合,波峰即为深色部分的中点,波谷即为浅色部分的中点:

$$X = \{x_i | p(x) > k \times \bar{W}, \varphi'(x) = 0, \varphi''(x) < 0\} \quad (4)$$

其中, \bar{W} 为条码的宽度, k 为经验值。

为了防止由于边缘模糊导致的多峰点的问题,确定经验阈值 T , 对所求的峰点进行过滤^[11]。定义比阈值 T 高的部分为波峰。 T 值的确定方法:

$$T = \frac{2P_{MAX} + P_{MIN}}{2} \quad (5)$$

然后,得到波峰的集合:

$$X' = \{x_i | x_i > T, x_i \in X\} \quad (6)$$

最后,条码规格 n 为集合 X' 元素个数减 1:

$$n = \text{crad}(X') - 1 \quad (7)$$

2.3 全局仿射变换

在拍摄图像过程中,摄像头轴心无法保证和条码平面垂直,这样得到的图像往往是具有透视效果的,所以,识别前需要对图像进行反透视校正处理^[12]。

为了得到点阵映射,需要对条码图形进行方位归一化^[13,14]。为了重建出标准 DM 矩阵,需要按照采样点位置,通过全局仿射变换得到条码图像应对位置的坐标。全局仿射变换包括平移变换、旋转变换、错切变换、缩放变换、上边和右边的校正。先通过条码外轮廓 4 个定位点,求出仿射变换矩阵,然后标准矩阵可以通过变换矩阵计算出条码图像上的坐标,最后采样灰度值。

第一步,进行平移变换,将条码左下角点 (x_0, y_0) 移到原点位置 $(0, 0)$:

$$\begin{cases} t_x = -x_0 \\ t_y = -y_0 \end{cases} \quad (8)$$

得到变换矩阵 M_{trans} :

$$M_{trans} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ t_x & t_y & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

第二步,进行旋转变换,使条码下边与 x 轴共线, α 为条码下边与 x 轴的夹角:

得到变换矩阵 M_{rotate} :

$$M_{rotate} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

第三步,进行错切变换,使条码左边与 y 轴共线:

$$sh = -x_2 / y_2 \quad (11)$$

得到变换矩阵 M_{shear} :

$$M_{shear} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ sh & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

第四步,进行缩放变换,使条码左边和下边的边长都为 L :

得到变换后下边的边长 r_x 和左边的边长 r_y :

$$\begin{cases} (r_x, 0, 1) = (x_1, y_1, 1) * M_{trans} * M_{rotate} * M_{shear} \\ (0, r_y, 1) = (x_2, y_2, 1) * M_{trans} * M_{rotate} * M_{shear} \end{cases} \quad (13)$$

得到变化系数 s_x, s_y :

$$\begin{cases} s_x = r_x / L \\ s_y = r_y / L \end{cases} \quad (14)$$

得到变换矩阵 M_{scale} :

$$M_{scale} = \begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

第五步,做条码上边和右边的校正,使条码右上点落在 (L, L) :

得到变换矩阵 M_{bp} :

$$M_{bp} = \begin{bmatrix} y_3/L & 0 & (y_3-L)/L^2 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

得到变换矩阵 M_{side} :

$$M_{side} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & x_3/L & (x_3-L)/L^2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

经过上述变换,条码中的点 $p = (x, y, 1)$, 可得到 $p_{ref} = (x_{ref}, y_{ref}, 1)$

$$p_{ref} = p * M \quad (18)$$

$$M = M_{trans} * M_{rotate} * M_{shear} * M_{scale} * M_{bp} * M_{side} \quad (19)$$

全局仿射变换并没有对条码进行旋转,而是通过仿射变换得到条码图像上的坐标位置,取该点灰度值作为模块灰度值,如图 3 所示。其目的是减小旋转过程中对图像的损坏。

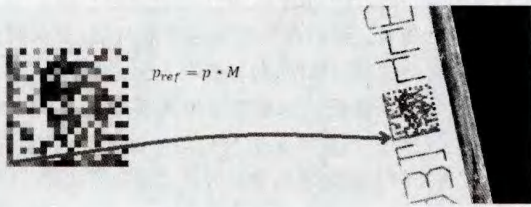


图 3 全局仿射变换

2.4 局部自适应调整

为了解决同行同列的模块不在同一直线上、各模块大小不一、长宽不一等情况下出现的采样不准的问题,需要进行局部自适应调整采样点的位置。如图 4 所示,图(a)和图(b)中的条码各模块大小不一,长宽不一,若用图(a)中的方法进行采样,当采样位置偏移超过半个模块宽度,容易导致解码失败,若用图(b)中方法,很好地适应了模块的变形,使得采样准确;图(c)和图(d)为一个同行同列的模块不在同一直线上点阵码的局部放大图,若用图(c)中的方法,采样点无法准确落在点阵模块的中心,若用图(d)中的方法,很好地适应了点阵位置的偏移,使得采样更准确。

对于模块大小不一的条码,首先,取上边定位虚线采样线的平均灰度 \bar{x} :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum I(x, y) \quad (20)$$

接着,获得顶部虚线上的跳跃点集合:

$$\{x_i | (x_i - \bar{x}) * (x_{i+1}) - \bar{x} < 0\} \quad (21)$$

其中, x_i 表示顶部虚线扫描线距离起始点 i 个像素点距离的点的灰度值。

然后,计算相邻两跳跃点的中点,记在 X_i 中,代表校正后的采样横坐标集:

$$X = \{X_i | X_i = (x_i + x_{i+1}) / 2\} \quad (22)$$

同理,获得 Y_i :

$$Y = \{Y_i | Y_i = (y_i + y_{i+1}) / 2\} \quad (23)$$

得到一个全局校正的采样点矩阵集:

$$\{(x, y) | x \in X, y \in Y\} \quad (24)$$

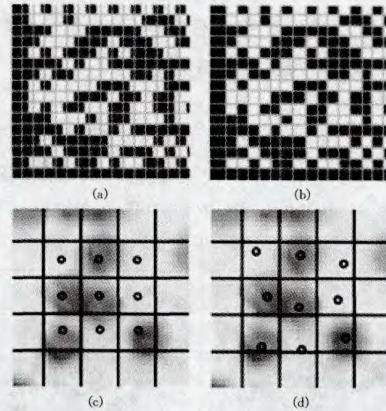


图 4 校正前后对比图

对于同行同列的模块不在同一直线上的条码:黑白属性不同的相邻模块之间的一定范围内,模块与模块之间的分界线所在位置的梯度值应是最大的;而黑白属性相同的相邻模块间的分界线所处位置不影响模块包围盒的确定。所以在确定校正后的 4 个边界后,可取中点作为该模块的采样点。

对于每一个采样点,如图 5 所示,在网格往外扩一定范围内,设置为局部窗口。

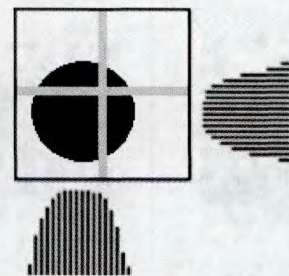


图 5 局部窗口采样点位置校正示意图

先在水平和竖直两个方向上分别将局部窗口划分为两块,如图 5 所示。

在水平方向,对左、右侧两个子窗口,先统计左侧子窗口同一竖直线的灰度和 $p(x)$:

$$p(x) = \sum_j I(x, j) \quad (25)$$

接着,卷积平滑处理:

$$\varphi(x) = p(x) * g(x) \quad (26)$$

其中,

$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} \exp(-\frac{x^2}{\delta^2}) \quad (27)$$

再求导,得到 φ' , 取最大的 $\varphi'(x)$, 即 $p(x)$ 变化最大的点 x_{left} :

$$x_{left} = \max\{\varphi'(x) | \varphi' > k\} \quad (28)$$

同理得到右侧子窗口灰度变化最大的点的横坐标 x_{right} , 以及竖直方向上的上、下两个子窗口的灰度变化最大的点 y_{up} 和 y_{down} 。

然后, 计算校正的采样点坐标 (x, y) :

$$x = (x_{left} + x_{right}) / 2 \quad (29)$$

$$y = (y_{up} + y_{down}) / 2 \quad (30)$$

3 实验

为了验证本文所提算法的有效性, 本文用扫描仪、手机、相机等设备, 采集了各种形态的条码: 一些条码模块大小不一、一些条码模块排列整齐或不整齐、一些条码存在非规则变形、一些条码拍摄的角度歪斜等等。

3.1 稳定性分析

本小节对旋转、噪声、严重变形下的图形进行算法验证, 如图 6 所示。其中点阵标识代表重建出来的条码结构分布, 左侧图是网格法得到的结果, 右侧图是论文算法得到的结果。

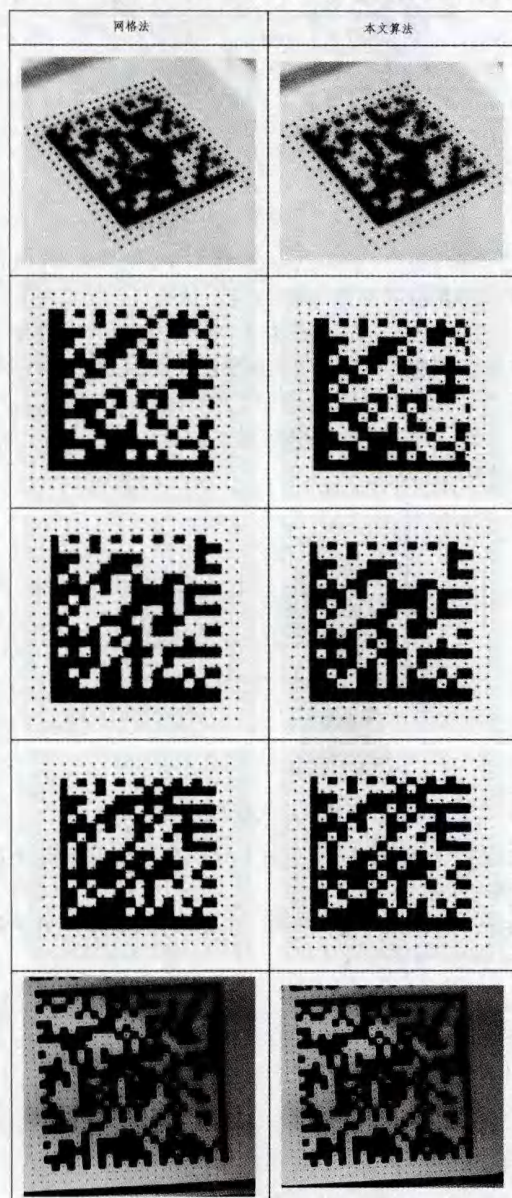


图 6 实验结果

第一幅图像存在明显的旋转和光照不均, 说明论文算法采用的边缘特征在旋转和光照不均匀前提下具有稳定性, 因此重建结果不受这些因素影响。也说明这种条码图像只是全局旋转, 因此网格法也能够很好地恢复出其结构。但是对于第二幅图像, 由于拍摄所带来的投影效应, 条码右侧模块明显比左侧要窄, 从而导致网格法得到的重建效果明显产生偏离。这种偏离会导致黑白分布发生错误, 使解码失败。而后几幅图像都存在不同程度上的变形, 因此不同位置上的码块大小不完全一致, 从而导致网格法无法正确地恢复出条码结构。但是论文算法在粗定位基础上, 考虑到条码图像黑白分布所产生的边缘特征, 因此通过边缘自适应能够有效地提高重建准确率。

3.2 统计分析

为了进一步验证算法的有效性, 论文对本文算法和已有算法得到的解码性能进行比较分析。尽管解码标准有一定的容错率, 但如果结构重建精度不高, 很难得到高质量的解码效果。表 1 给出了论文算法和已有算法模块定位效果^[7]得到的解码结果比较。

表 1 算法比较结果

采样算法	样本个数	成功个数	失败个数	识别率
网格法	200	187	13	93.5%
本文算法	200	197	3	98.5%

从表 1 中的结果可以看出, 本文算法的识别率得到了很大的提高。尽管网格法能够适用于大部分条码, 但是由于非规则变形导致的采样点位置错误, 使得部分条码图像解码失败。本文算法不能正确识别条码图像的主要原因是模块内部存在跳跃点, 使得条码规格判断错误; 或者机器二维码所形成的点阵图像其“L”形特征不明显, 导致定位失败或不准确, 这也是后续进一步研究的问题。

结束语 随着二维码在物联网中不断发展, 要求解码程序可以适应复杂的解码情况, 包括复杂光照、条码变形等。论文针对模块定位所出现的非规则变形问题, 提出在全局仿射变换基础上, 对局部定位结果进行自适应调整。实验结果表明, 本文算法能够有效地提高定位效果和解码准确率。

实验分析表明, 对于部分点阵条码图像, 由于点阵图像会导致 L 型定位失败, 需要在已有研究基础上考虑更为稳定的定位算法。另外一方面, 部分污损比较严重的图像, 黑白点阵分布也不够明显, 需要通过编码规则进行校正, 进一步提高识别准确率。

参考文献

- [1] Meng Jian, Yang Yang. Application of Mobile 2D Barcode in China[C]//Fourth International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2008; 1-4
- [2] Moss C, Chakrabarti S, Scott D W. Parts Quality Management: Direct Part Marking of Data Matrix Symbol for Mission Assurance[C]//Aerospace Conference, 2013; 1-12
- [3] Zhang Chang-nian, Ma Ling, Mao Dong. A 2D Barcode Recognition System Based on Image Processing[C]//The 2011 International Conference on Electric and Electronics, 2011; 20-22
- [4] Lu Xiao-nan, Kataria S, Brouwer W J, et al. Automated analysis of images in documents for intelligent document search[J]. In-

ternational Journal on Document Analysis and Recognition(IJ-DAR), 2009, 12(2): 65-81

- [5] 刘宁钟, 杨静宇. 基于迭代计算的二值波形反卷积[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(10): 1160-1161
- [6] 郝云峰, 戚飞虎, 蒋人杰. 一种新的基于机器学习的 2 维条形码检测算法[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(10): 1873-1876
- [7] 刘慧娟. 快速响应码图像的全方位识别[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(4): 376-381
- [8] Cheng Yuan-fei. A Scanning Method for Dotted Data Matrix [C]// Eighth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, 2008: 179-183
- [9] 姚林昌, 白瑞林, 钱勇, 等. 一种 Data Matrix 条码的快速识别方

法[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(11): 4368-4370

- [10] 刘宁钟, 杨静宇. 基于中点检测的二维条码识别[J]. 小型微型计算机系统, 2004, 25(2): 283-287
- [11] 刘慧娟. 一种快速响应码图像的分割和校正方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2006, 20(1): 32-36
- [12] 刘宁钟, 尤海英, 孙涵. 基于手机平台的 DataMatrix2 维条码识别[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(2): 287-294
- [13] 刘宁钟, 杨静宇, 杨健. 综合利用投影算法和相似距离算法的二维条码识别[J]. 模式识别与人工智能, 2003, 16(1): 86-91
- [14] 黄海海, 殷建平, 祝恩, 等. 基于局部透视变换的圆柱体侧面 PDF417 条码矫正方法[J]. 计算机工程与科学, 2012, 34(9): 94-99

(上接第 90 页)

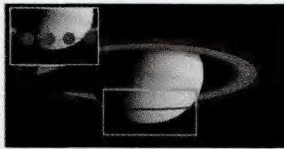


图 13 土星识别

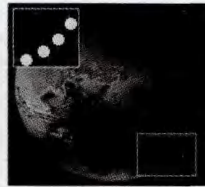


图 14 火星识别

由图 9—图 14 可知,该算法对星体周围的火焰具有一定的鲁棒性。如图 9 所示,算法的识别效果并未受到星体喷发的火焰的影响。对于噪声较小的情况,本算法可以清楚识别出星体,如图 10 所示。当星体周围有光芒的时候,算法的拟合效果不是很好,但是仍然可以滤除一些光和噪声,识别出星体的存在,如图 11 和图 12 所示。当星体周围有光环时(见图 13),算法可以自适应地选择样本点,对边界精确拟合并准确识别。当星体只出现一部分(见图 14),即边界不完整的时候,本算法仍可以准确将星体拟合并识别出来,具有高度的稳定性。

但是本算法仍具有一些不足的地方:太阳外圈的日冕会造成比较大的影响,尤其是在图像分割的时候;土星外圈的光环加大了检测目标,增加了算法复杂度。

综上所述,本文提出的基于代数距离的最小平方中值椭圆优化算法对于图片的扭曲、光、噪声、图片的缺失具有一定的鲁棒性,具有较小的时间复杂度。但是本算法只适用一些基本形状已定的图片。

结束语 二次曲线是计算机图形学和计算机辅助设计中的基本体素模型之一,本文提出了一种基于代数距离的最小平方中值椭圆优化算法。该方法适用于图像中目标形状已知的情况,在求取最优椭圆的过程中通过 RANSAC 的方法和五边形内角的方法剔除了不符合要求的点,以椭圆的参数方程为特征,分别使用代数最小二乘和几何最小二乘方法,找到拟合椭圆平方中值最小的边界并进行更新,加大拟合椭圆的筛选条件和椭圆拟合的精确度,加强了椭圆拟合效果的稳定性。仿真和实验结果表明,该方法可对星体进行快速拟合和识别,具有良好的准确性和抗噪性。对椭圆的运算速度和椭

圆的误差评定将是本文下一步研究的重点。

参 考 文 献

- [1] Liebe C C. Pattern recognition of star constellations for spacecraft applications [C]// IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine, 1992: 34-41
- [2] 方奎, 欧阳宁, 莫建文. 基于椭圆模型的手势识别与仿真[J]. 计算机仿真, 2011, 3(28): 267-270
- [3] 田玉龙, 王广君, 房建成, 等. 基于局部熵的星敏感器星图提取方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(8): 1068-1070
- [4] 黄凌云, 胡占义. 一种基于 PCA 和 Hough 变换的类星体自动识别方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2003, 23(1): 187-191
- [5] 刘书桂, 李蓬, 那永林. 基于最小二乘原理的平面任意位置的椭圆的评价[J]. 计量学报, 2002, 23(4): 245-247
- [6] 陈俊平, 王解先. 工程测量中的曲线拟合[J]. 工程勘察, 2003(5): 59-61
- [7] Zheng Z L, Yang J, Yang L M. A robust method for eye features exaction on color image[J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26: 2251-2261
- [8] 李华志. 图像处理技术在系统运动分析和控制中的应用[J]. 计算机与现代化, 2007(9): 88-90
- [9] 王阳, 高鹰, 石宇, 等. 均匀圆阵 MIMO 雷达中的 DOA 估计新算法[J]. 计算机仿真, 2013, 30(1): 50-53
- [10] 南敬昌, 刘建辉, 刘立军. 微波传输线圆图计算及仿真[J]. 计算机仿真, 2003, 20(5): 38-39
- [11] Zhang Zheng-you. Parameter Estimation Techniques: A Tutorial with Application to Conic Fitting[J]. Image and Vision Computing, 1997, 15(1): 59-76
- [12] 王万国, 王仕荣, 徐正飞, 等. 基于边界的最小二乘椭圆拟合改进算法[J]. 计算机技术与发展, 2013, 23(4): 67-70
- [13] 安新源, 周宗潭, 胡德文. 椭圆拟合的非线性最小二乘方法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(18): 188-190
- [14] Kirsch A. An introduction to the mathematical theory of inverse problems[M]. New York: Springer-Verlag, 1996
- [15] Daugman J G. How iris recognition works[J]. IEEE Transactions on Circuits System Video Technology, 2004, 14(1): 21-30