文章编号　1004-924X(2017)04-1070-07

结合假边缘提取和直方图分析的图像灰度变换

许鸿奎*，韩　晓，曲怀敬
（山东建筑大学 信息与电气工程学院，山东 济南 250100）

摘要：光学刻划字符图像的前景通常由高灰度像素区域和低灰度像素区域组成，导致使用传统的基于梯度的边缘提取方法如 Canny 算子不能准确地获得字符的轮廓，为此本文提出了一种利用假边缘信息结合直方图分析的图像灰度变换方法，变换后的图像前景仅由低灰度像素构成。首先对 Canny 边缘点进行特征分析，提取其假边缘点；然后进行图像直方图分析，确定灰度变换范围以及灰度对应关系，并对假边缘两侧的边界区域施加光滑度约束来确定灰度变换参数；最后以此变换参数对非背景区域的高灰度像素进行灰度变换。实验证明，灰度变换后字符笔画仅由低灰度像素构成，原边界处的灰度变化足够光滑，可以使用基于梯度的方法来提取完整而准确的字符轮廓。

关　键　词：刻划字符；直方图分析；特征提取；灰度变换
中图分类号：TP391.41　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.3788/OPE.20172504.1070

Gray scale transformation combining false edges detection with histogram analysis

XU Hong-kui*，HAN Xiao，QU Huai-jing

(*College of Information and Electrical Engineering*，
Shan Dong Jianzhu University，*Jinan* 250100，*China*)
* *Corresponding author*，E-*mail*：*xhkui*2009@163.*com*

Abstract：As optical carving character image foreground often consists of high gray-scale pixel region and low gray-scale pixel region，it is impossible to gain character profile correctly with traditional edge extraction method on the basis of gradient，such as Canny operator，and therefore，a kind of image gray-scale transformation method combining false edge information and histogram analysis was introduced. The image foreground after transformation consists of low gray-scale pixel merely. Firstly，feature of Canny edge point was analyzed to extract false edge points. Then histogram analysis of image was performed to determine gray-scale transformation scope and corresponding relationship. Then，smoothness constraints was imposed on boundary region at both sides of false edge to determine gray scale transformation parameters. Finally，on the basis of transformation parameters，gray-scale transformation was carried out on high gray-scale pixel not belonging to background region. Experiment result shows that character strokes after gray-scale transformation consist of low gray-scale pixel merely. Gray-scale transformation at the original boundary is smooth enough and method on the

收稿日期：2016-10-25；**修订日期：**2017-01-05.
基金项目：山东科技发展计划(No. 2014GGX101050)；山东省自然科学基金(No. ZR2014FM016).

basis of gradient can be used to extract complete and correct character profile.

Key words：Carving character；histogram analysis；feature extraction；gray-scale transformation

1　引　言

工业生产中经常使用刻划标记机把字符信息标记在金属工件表面，对于错识字符通常使用机器视觉方法进行检测。实际情况中，与光照平行的笔画将产生高灰度值的像素，而与光照垂直的笔画将产生低灰度值的像素，背景区域为漫反射，表现为灰度值介于以上两种像素灰度值之间，因而字符笔画包含低灰度值和高灰度值两类像素。由于同一笔画中的高灰度像素区域和低灰度像素区域边界上的边缘点不是字符轮廓的有效组成部分，故基于梯度提取的边缘[1-2]不能准确地表示刻划字符的轮廓。而如果采用灰度变换策略将笔画中的高灰度值像素变换为低灰度值像素或者相反，那么就可以采用上述方法提取边缘来构成字符的轮廓。然而，由于背景像素的灰度范围和笔画中高、低灰度像素区域的像素灰度范围有重叠，采用分段灰度变换[3]会使高、低灰度像素区域的边界具有明显的灰度缝隙，图像总体灰度变换[4]不能改变图像性质。其它的灰度变换方法如梯度直方图变换[5]则主要是通过改善灰度对比度进行灰度增强，导向滤波[6]则是一种宽动态范围的图像增强技术，而各种非线性变换如对数变换[7]主要是将图像的低灰度值部分进行扩展，将其高灰度值部分进行压缩，以达到强调图像低灰度部分的目的。这些都不能从根本上解决上述问题。

因此本文首先对刻划字符图像进行了灰度分析，论证了基于假边缘提取和直方图分析的灰度变换策略的可行性，其中直方图分析部分给出了灰度变换范围及其灰度对应关系；第 3 节则提出了一种真、假边缘点的特征表示方法，以便提取假边缘点，该方法以 Canny 边缘点为中心进行一定宽度的水平和垂直扫描，再对扫描灰度曲线进行抽样、量化作为边缘点基本特征；第 4 节则以假边缘作为边界，对边界区域施加光滑度约束确定灰度变换函数；最后通过实验验证了本方法中特征提取的有效性，并与分段灰度变换进行比较展示了本方法的优势。

2　图像灰度分析

采用机器视觉方法进行错误字符检测如图 1 所示。

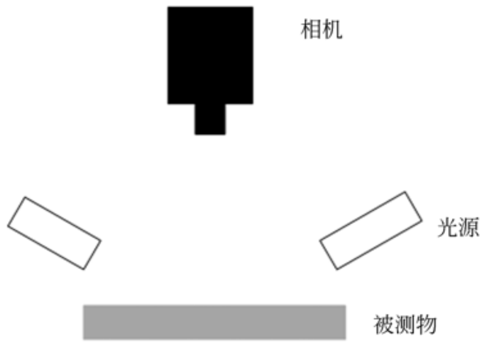

图 1　字符错误检测

Fig. 1　Character error detection

光学刻划字符图像如图 2 所示，用 X 表示，其像素(i,j)的灰度为 $x(i,j)$，$i\in[0,m]$，$j\in[0,n]$，m、n 是图像尺寸。定义灰度分布在 $G_b=[c,d]$的区域为背景像素区域 B，字符像素构成的区域为 C，其由低灰度像素区域 C_l 和高灰度像素区域 C_h 组成，其中低灰度区域 C_l 的灰度分布范围是 $G_l=[a,b]$，高灰度区 C_h 的灰度分布范围是 $G_h=[e,f]$。如果灰度分布同时满足如下关系：

$$G_b\cap G_l=0 \quad G_b\cap G_h=0$$

那么可以根据 G_l 和 G_h 的对应关系进行灰度变换，将字符图像转换为笔画全部由低灰度像素或全部由高灰度像素构成的图像。通过分析像素灰度取值发现 $G_b\cap G_h\neq 0$，故不能简单地根据$[a,b]$和$[e,f]$之间的对应关系来进行灰度变换。

图 2　刻划字符图像

Fig. 2　Carving character image

设 $G_{b\cap h}=G_b\cap G_h$，那么如果能找出位于笔画高低灰度区域的边界上且灰度与背景像素重叠的像素集合 $C_{h1}=\{(i,j)\in C_h,x(i,j)\in G_{b\cap h}\}$，就可

以采用如下策略进行灰度变换：

$$\begin{aligned}&\text{if } x(i,j)>d \ \& \ (i,j)\in C_{hl}\\&\text{then } y(i,j)=F(x(i,j))\\&\text{else } y(i,j)=x(i,j),\end{aligned}\tag{1}$$

式中 $F(x)$是灰度变换函数，变换时的灰度对应关系为$[e,f]\Leftrightarrow[b,a]$。因此，需要进行直方图分析，得到$[a,b]$，$[c,d]$以及$[e,f]$。本文以图 3 所示字符“R”的直方图为例说明各个参数的确定方法。

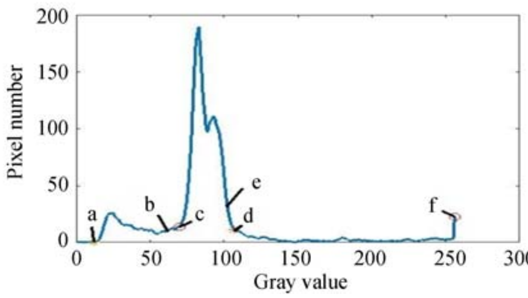

图 3　字符“R”的直方图

Fig. 3　Histogram of character “R”

显然容易确定 $a=20$ 以及 $f=255$。背景像素灰度值近似服从正态分布，其均值 m_b 也容易确定，取正态分布曲线左边连续单调上升的最小值近似为背景像素的最低灰度值 $c=79$，如果采取高灰度值向低灰度值变换策略，则可以近似取 $b\approx c-10$，减去 10 是为了使得变换生成的像素与背景之间具有更好的区分度。取曲线右边单调下降的最大值作为背景像素的最大灰度值 $d=102$，d 是影响变换结果的重要参数。

3　假边缘提取

如前所述，准确提取笔画高灰度区域 C_h、低灰度区域 C_l 的边界线段是灰度变换的前提条件。用 b_k 表示这些边界线段，k 是正整数。图 4 给出了字符“R”的 Canny 算子边缘，黑色圆圈指示了高灰度区域 C_h 和低灰度区域 C_l 的边界线段 b_k，由于 b_k 并不是刻划字符真实轮廓的组成部分，故称边界线段 b_k 上的像素点为假边缘点。为了使用各种分类器诸如 k 最近邻算法对真、假边缘点进行分类，需要对真假边缘点进行特征描述。另外，特征要尽量简单显著[8]，考虑到同一模式下像素的灰度差别大，而且相同灰度性质的像素在图像不同位置的灰度值差别也较大，故采用如下方法进行特征描述。

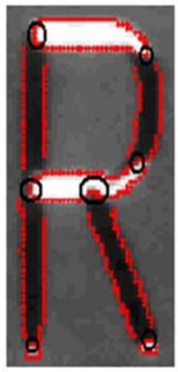

图 4　字符“R”的 Canny 边缘

Fig. 4　Canny edge of character “R”

如图 5 所示，以 Canny 边缘点为中心，在水平和垂直方向上的一定区间（两个笔画宽度）内扫描像素的灰度值，得到两个方向上的灰度扫描曲线；然后对 Canny 边缘点进行局部直方图分析，根据局部灰度变化范围对水平和垂直灰度扫描曲线的纵坐标进行归一化处理，再对曲线进行量化，量化结果构成的矢量分别作为 Canny 边缘点的水平特征和垂直特征，二者组合即为 Canny 边缘点的特征。

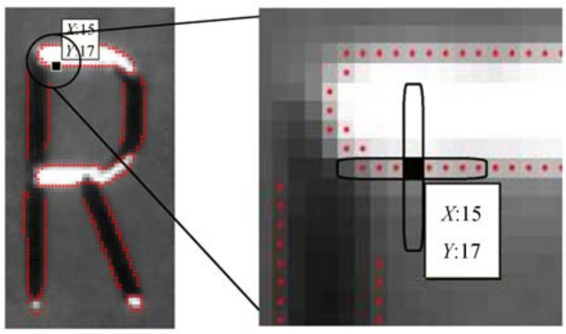

图 5　特征描述

Fig. 5　Feature description

典型真、假边缘点特征分别如图 6、7 所示，其中：x 方向表示在水平方向上选取点左右各 4 个像素点量化后的结果，y 方向表示在垂直方向上选取点上下各 4 个像素点量化后的结果。

分析特征矢量曲线发现，笔画左右轮廓上真边缘点的水平扫描曲线差别很大，水平特征矢量距离较大；笔画上下轮廓上真边缘点的水平扫描曲线差别也很大，垂直特征矢量距离也就较大。类似地，不同位置的假边缘点也存在类似现象，因

此简单的二分类不能准确地区分真假边缘点。通过观察真假边缘点在轮廓上的位置并对其特征矢量进行聚类分析，将像素点进行 17 种模式分类。模式 1-6 的边缘点是真边缘点，模式 7-17 的边缘点是假边缘点。

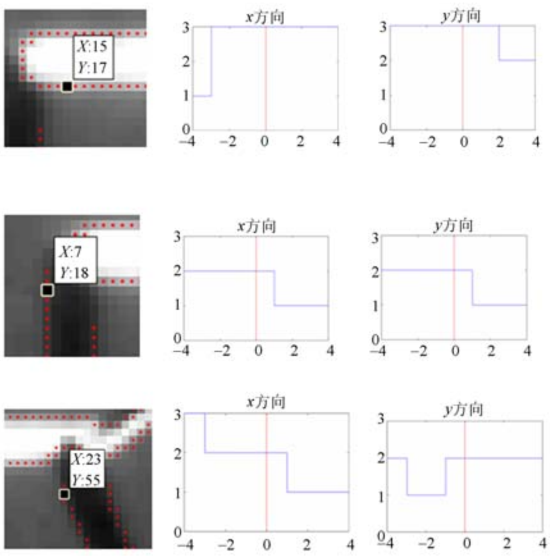

图 6　典型真边缘点特征

Fig. 6　Feature of typical true edge points

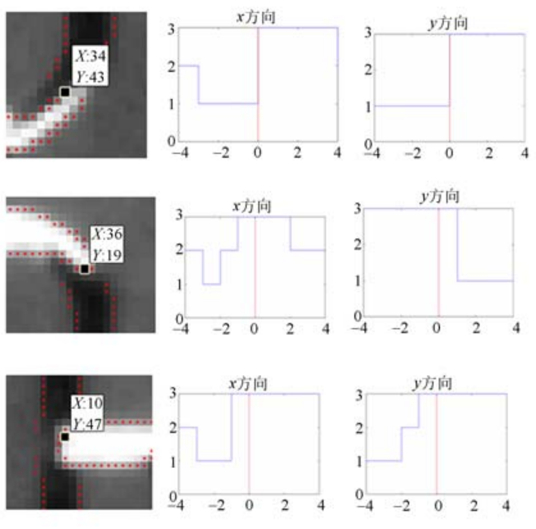

图 7　典型假边缘点特征

Fig. 7　Feature of typical false edge points

4　灰度变换方法

考虑到刻划字符高灰度像素出现的概率小于低灰度像素出现的概率，采用高灰度值向低灰度值变换的策略，观察笔画中高灰度像素及低灰度像素在其各自区域的位置分布情况，灰度变换应满足如下对应关系：

$$a = F(f), \tag{2}$$

$$b = F(e). \tag{3}$$

同时，希望灰度变换后笔画中原来的高灰度区域 C_h 和低灰度区域 C_l 边界处像素灰度的变化要尽量平缓。用 Q_k 表示以 b_k 为中心线段划定的边界区域，Q_k 由 b_k 膨胀所得，用 S_k 表示灰度变换后 Q_k 中像素灰度的光滑度，S_k 用梯度定义如下，

$$S_k = \sum_{(i,j)\in Q_k} \nabla^2 y(i,j) = \sum_{(i,j)\in Q_k} \nabla^2 F(x(i,j)), \tag{4}$$

显然，$S = \sum_k S_k$ 越小越好，将其作为灰度变换函数 $F(x)$ 的约束条件。

基于以上考虑，采用 2 次多项式函数进行灰度变换：

$$y(i,j) = \alpha x^2(i,j) + \beta x(i,j) + \gamma, \tag{5}$$

式中 α、β 及 γ 是待定的变换参数。

将式(2)式(3)代入式(5)，得

$$a = \alpha * f^2 + \beta f + \gamma, \tag{6}$$

$$e = \alpha * b^2 + \beta b + \gamma, \tag{7}$$

将式(5)代入式(4)，得到

$$S_k = \sum_{(i,j)\in Q_k} \nabla^2 y(i,j) = \sum_{(i,j)\in Q_k} (2\alpha * \nabla x(i,j) + \beta)^2 = 4\alpha^2 \sum_{(i,j)\in Q_k} \nabla^2 x(i,j) + 4\alpha\beta \sum_{(i,j)\in Q_k} \nabla x(i,j) + \sum_{(i,j)\in Q_k} \beta^2, \tag{8}$$

那么

$$S = \sum_k S_k = 4\alpha^2 \sum_k \sum_{(i,j)\in Q_k} \nabla^2 x(i,j) + 4\alpha\beta \sum_k \sum_{(i,j)\in Q_k} \nabla x(i,j) + \sum_k \sum_{(i,j)\in Q_k} \beta^2, \tag{9}$$

使 S 最小，令 S 关于 α 和 β 的偏导数等于 0，得：

$$\partial S/\partial \alpha = 8\alpha \sum_k \sum_{(i,j)\in Q_k} \nabla^2 x(i,j) + 4\beta \sum_k \sum_{(i,j)\in Q_k} \nabla x(i,j) = 0, \tag{10}$$

$$\partial S/\partial \beta = 4\alpha \sum_k \sum_{(i,j)\in Q_k} \nabla x(i,j) + 2\sum_k \sum_{(i,j)\in Q_k} \beta = 0, \tag{11}$$

令 $A=\sum_k \sum_{(i,j)\in Q_k} \nabla^2 x(i,j)$，$B=\sum_k \sum_{(i,j)\in Q_k} \nabla x(i,j)$，式(10)可改写为：

$$8A\alpha+4B\beta=0, \tag{12}$$

联立式(6)、式(7)和式(12)，求解变换参数如下：

$$\alpha=B^2/(f*B-A), \tag{13}$$

$$\beta=A*B/(A-f*B), \tag{14}$$

$$\gamma=(\alpha-1)*f^2+\beta f. \tag{15}$$

5 实验结果

5.1 特征准确性分析

类内距离和类间距离的分析可以保证本文对于Canny边缘点特征表示方法的合理性，图8给出了依此特征使用k最近邻算法提取的几种字符的假边缘点(用*号标示)，以进一步验证本文特征表示方法的准确性。统计结果中真假边缘点的正确率分别是95%和92%。

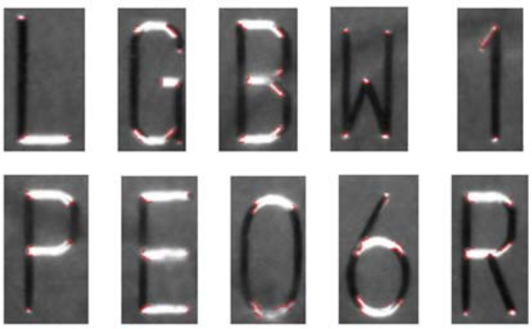

图8 几种字符的假边缘点

Fig. 8 False edge points of some characters

5.2 灰度变换结果分析

结合假边缘提取和直方图分析以及光滑度约束确定出变换参数 α、β 及 γ 后，按照式(5)进行灰度变换，结果如图9所示，为了便于比较，图10给出了分段灰度变换的结果。

通过比较图9、图10发现，分段灰度变换结果中，原图像高灰度像素区域和低灰度像素区域的边界处具有明显的缝隙，采用基于梯度的方法提取的边缘将不能构成正确的字符轮廓。而通过本文方法得到的灰度变换图像则在高灰度像素区域和低灰度像素区域的边界处具有较好的光滑度，且梯度变化足够小，使用Canny算子提取边缘并进行边缘点连接[9]以后可形成完整而准确的字符轮廓，如图11所示。

图9 几种字符的灰度变换结果

Fig. 9 Transformation results of some characters

图10 几种字符的分段灰度变换结果

Fig. 10 Piecewise transformation results of some characters

图11 变换后使用Canny算子提取的边缘

Fig. 11 Edges extracted by Canny operator after gray scale transformation

为了进一步说明灰度变换的有效性，分析了分段灰度变换后使用Snake[10]提取的轮廓，如图12所示。由图12可知，该方法只用一条曲线表示轮廓，为后续处理带来了很大的方便。如果不

进行灰度变换，则必须使用双相 Snake 模型[11]，在这种情况下，两种灰度区域要用两个轮廓曲线表示，二者间有明显的间隙，而且对于初始设置十分敏感，往往提取不到完整的轮廓。

图 12　变换后使用 Snake 提取的轮廓

Fig. 12　Contours extracted by Snake after gray scale transformation

6　结　论

针对传统的基于梯度的边缘提取方法，如 Canny 算子，不能准确获得光学刻划字符轮廓的问题，本文提出一种利用假边缘信息结合直方图分析的图像灰度更换方法。本文将以 Canny 边缘点为中心的水平和垂直扫描结果作为区分真假边缘点的特征，结合其识别结果与直方图分析确定灰度变换范围以及灰度对应关系，并对假边缘两侧的边界区域施加光滑度约束，由此确定出灰度变换参数。通过实验证明这种方法是合理的。这种灰度变换方法将两种像素灰度级别的刻划字符图像变换成具有一种像素灰度级别的图像，由此提取的字符轮廓完整且准确。

参考文献：

[1]　CANNY J F. A computational approach to edge detection[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*，1986，8(6)：679-698.

[2]　BERZINS V. Accuracy of laplacian edge detectors [J]. *Computer Vision Graphics and Image Processing*，1984，27(2)：195-210.

[3]　徐皓，范铁生. 一种采用分段线性函数的图像增强方法[J]. 辽宁大学学报(自然科学版)，2006，33(4)：362-364.

XU H，FAN T SH. A segment linear function-based on image enhancement method[J]. *Journal of Liaoning University*(*Natural Sciences Edition*)，2006，33(4)：362-364.(in Chinese)

[4]　唐庆菊，刘俊岩，王扬，等. 基于模糊 C 均值聚类和 Canny 算子的红外图像边缘识别与缺陷定量检测[J]. 红外与激光工程，2016，45(9)：0928001-1-5.

TANG Q J，LIU J Y，WANG Y，*et al.*. Infrared image edge recognition and defect quantitative determination based on the algorithm of fuzzy C-means clustering and Canny operator[J]. *Infrared and Laser Engineering*，2016，45(9)：0928001-1-5.(in Chinese)

[5]　赵文达，续志军，赵建，等. 基于梯度直方图变换增强红外图像的细节[J]. 光学 精密工程，2014，22(7)：1962-1968.

ZHAO W D，XU ZH J，ZHAO J，*et al.*. Enhancement of infrared image details based on gradient histogram transform，2014，22(7)：1962-1968.(in Chinese)

[6]　许轰烈，陈钱，顾国华，等. 利用导向滤波的宽动态范围图像增强技术[J]. 红外与激光工程，2015，44(12)：3843-3849.

XU H L，CHEN Q，GU G H，*et al.*. High dynamic range image enhancement technology based on guided image filter[J]. *Infrared and Laser Engineering*，2015，44(12)：3843-3849.(in Chinese)

[7]　武治国，王延杰. 一种基于直方图非线性变换的图像对比度增强方法[J]. 光子学报，2010，39(4)：755-758.

WU ZH G，WANG Y J. An image enhancement algorithm nased on histogram nonlinear transform [J]. *Acta Photonica Sinica*，2010，39(4)：755-758. (in Chinese)

[8]　边肇祺，张学工. 模式识别[M]. 清华大学出版社，2000.1.

BIAN ZH Q，ZHANG X G. *Pattern Recognition* [M]. Beijing：Tsinghua University Press，2000，1.

(in Chinese)

[9] 宋新，罗军，王鲁平，等. 基于边缘连接的线段检测方法[J]. 系统工程与电子技术，2007，29(4)：559-672.

SONG X，LUO J，WANG L P，*et al.*. Line segment detection method based on edge linking[J]. *XI Tong Gong Cheng Yu Dian Zi Ji Shu/Systems Engineering & Electronics*，2007，29(4)：559-672. (in Chinese)

[10] 周志宇，杨卫成，汪亚明，等. 应用梯度矢量流Snake和灰预测的人脸轮廓跟踪[J]. 光学 精密工程，2011，19(11)：2744-2752.

ZHOU ZH Y，YANG W CH，WANG Y M，*et al.*. Realization of face contour tracking by GVF Snake and grey prediction[J]. *Opt. Precision Eng*，2011，19(11)：2744-2752. (in Chinese)

[11] VESE L A，CHAN T F. A multiphase level set framework for image segmentation using the mumford and Shah model[J]. *International of Computer Vision*，2002，50(3)：271-293.

作者简介：

许鸿奎(1966－)，男，山东莱芜人，工学博士，副教授，硕士生导师，1987 年于电子科技大学获得学士学位，2011 年于山东大学获得博士学位，主要从事信号与信息处理的相关理论研究与应用。E-mail：xhkui2009@163.com

韩　晓(1993－)，男，江苏无锡人，硕士研究生，2015 年于成都信息工程大学获得学士学位，主要从事模式识别与智能信息处理相关理论研究与应用。E-mail：hanxiaojswx@163.com.