

基于图像预处理分类分割的盲道分割算法

刘 灵, 孙晨晨, 徐寅林, 唐万春, 赵 华

(南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏 南京 210023)

[摘要] 高准确分割率的盲道分割算法是实现高性能导盲系统的重要保障. 提出一种基于颜色直方图支持向量机方法, 将盲道预分类为颜色盲道或纹理盲道, 采用对 HSV 颜色空间的多参数融合的改善 OTSU 分割方法处理颜色盲道分割, 采用基于纹理增强的 K 均值聚类方法处理纹理盲道分割. 通过有效的预处理分类, 可以针对性地根据盲道的颜色或纹理特征进行识别, 同时由于采用了改善的颜色和纹理分割算法, 极大地改善了对不同种类和环境下的盲道的适应能力. 测试证明, 该方法对于测试库图片平均分割准确率可达到 90% 以上.

[关键词] 预处理分类, 颜色直方图, 支持向量机, 阈值分割

[中图分类号] TP391.4 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2020)01-0042-07

Blind Sidewalk Segmentation Algorithm Based on Image Preprocessing Classification and Segmentation

Liu Ling, Sun Chenchen, Xu Yinlin, Tang Wanchun, Zhao Hua

(School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The blind sidewalks object segmentation algorithm with high accurate segmentation rate is an important key to a high performance blind guided system. In this paper, a color histogram support vector machine(SVM) method is proposed to classify blind sidewalks into color blind sidewalks or texture blind sidewalks. For the color blind sidewalks, an improved OTSU segmentation method is proposed for multi-parameter fusion of HSV color space. For the texture blind sidewalks, based on texture enhancement, K -means clustering method is proposed. Because of the effective preprocessing classification method, they can be recognized according to the color or texture features of blind sidewalks. Besides the improved color and texture segmentation algorithm has excellent adaptability for different kinds of blind sidewalks under the different environments, and the average segmentation accuracy of the blind sidewalks can reach more than 90% for the test library pictures.

Key words: preprocessing classification, color histogram, support vector machine(SVM), threshold segmentation

盲道是城市中帮助视障者出行的一种无障碍道路设施^[1]. 当前我国城市中的大多数盲道都有年久失修或遭到破坏的现象, 视障者使用时会遇到许多困难^[2]. 基于图像识别的导盲系统, 利用盲道的特性, 可以很好地帮助视障者出行, 近年来成为了研究的热点^[3]. 具有良好适应性的盲道分割算法是导盲系统研究中的重点.

根据盲道和人行道有明显颜色差异的特点, 闫志杰等^[4]提出了基于颜色的盲道分割算法, 并讨论了在不同天气下的光照情况对盲道分割的影响; 周毅等^[5]利用混合型高斯模型降低颜色、日照阴影的影响, 增强了盲道检测的准确性. 但是使用时间较长的盲道和人行道的颜色差异低, 低光照情况下更难区分.

根据盲道和周围人行道区域有明显的纹理差异的特点, 王民等^[3]提出了一种改进核函数模糊 C 均值(KFCM)算法, 不仅降低了误分割率, 还改善了分割效果. 为了充分利用盲道的颜色和纹理特征, 柯剑光等^[6]提出了一种结合颜色和纹理的盲道处理算法, 针对颜色特征, 提出了单通道颜色空间阈值分割的算法; 针对纹理特征, 提出 K 均值(K -means)聚类进行分割. 但该算法在颜色特征上只使用了单通道颜色空

收稿日期: 2018-10-26.

基金项目: 江苏省高等学校自然科学基金项目(18KJB510020)、江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX18-0362).

通讯作者: 赵华, 博士, 副教授, 研究方向: 智能仪器、信号处理. E-mail: zhaohua@njnu.edu.cn

间,在纹理特征上仅使用了简单的梯度,因此容易出现误分割.彭玉青等^[7]首次提出了一种利用颜色和纹理特征的两步分割方法,首先基于颜色直方图进行第一轮颜色盲道分割,若顺利找出盲道边界,则输出响应到下一轮图像识别;若未找到盲道边界,则进入第二步基于灰度共生矩阵(GLCM)纹理盲道分割方法.这种两步分割方法取得了优于以往的分割效果.但由于颜色检测算法仅选取了 HIS 空间的 H 通道提取颜色直方图,颜色区分度不高,而纹理检测算法将彩色图像转换成灰度图像的图像预处理部分有可能会丢失纹理信息,因而该算法还有着极大的改善空间.

文献[7]的研究表明,根据盲道的颜色和纹理特性,采取分类的分割算法可以取得更为有效的效果,但是预分类的有效性对于最终的分割效果影响较大.为改善预分类效果,本文提出了一种基于颜色直方图的支持向量机(SVM)的盲道预分类算法.为进一步改善分割效果,本文在颜色盲道处理中,采用 HSV 多参数融合的方法取代传统的单参数方法,更好地保留了颜色信息,使得后续最大类间方差(OTSU)阈值分割算法的性能得到提高.在纹理盲道处理中,在传统算法基础上增加了预处理,有效增强了纹理特征,使得纹理识别中运用的 GLCM 结合 K-means 聚类算法取得了更好的性能.

1 算法介绍

1.1 算法总流程

由于颜色盲道和纹理盲道存在基础颜色差异,本文首先根据 HSV 空间颜色直方图提取特征向量,输入到 SVM 分类器快速预分类为颜色盲道和纹理盲道.针对颜色盲道,利用 HSV 多参数融合公式,提取有用的颜色信息,进行 OTSU 阈值分割.针对纹理盲道,先进行增强对比度和边缘信息的预处理,再利用灰度共生矩阵提取盲道特征,结合 K-means 方法进行聚类.算法流程如图 1 所示.

1.2 基于颜色直方图的 SVM 分类

1.2.1 算法流程

本文将基于 HSV 空间颜色直方图提取的特征向量输入到 SVM 分类器,分类为颜色盲道和纹理盲道.

1.2.2 颜色直方图

图像的颜色空间主要有 RGB 空间、YUV 空间和 HSV 空间 3 种. RGB 颜色空间分割计算简便,但 3 个分量的相关性会降低图像分割效果;YUV 颜色空间多用于彩色电视信号,较少应用于图像处理^[8];HSV 空间的 H、S、V 3 分量对应于色调、色饱和度和亮度,亮度不受色彩信息影响^[9],不易受周围环境的影响,更适合图像分割.由于彩色图像的颜色特征维数高,本文算法先对 HSV 颜色空间进行降维量化处理.根据人眼视觉对颜色的感知特性,本文将 H、S、V 分量分别做 16 级、4 级和 4 级的非均匀量化^[8],获得图像的一维特征向量.

1.2.3 SVM 分类机分类

基于范例学习的算法在与特征相关的样本的重建中可以获取更多有用信息^[8],在图像数据库和样本空间较大的条件下,可以获得较好的重建效果.由于本文中的图样数据库和样本空间并不能满足这样的条件,故选用对小样本有较强学习能力的 SVM 作为分类器^[8].SVM 算法是在统计学理论上发展起来的一种模式识别方法,其基本思想可概括为:将输入空间通过非线性变换转换到高维空间,其中通过定义合适的内积函数实现非线性变换,最后对新空间求取最优分类面^[10].假设有限可分样本集为 (x_i, y_i) ,其中 $i=1, \dots, n, x \in \mathbf{R}^d, y \in \{+1, -1\}$ 为类别符号. d 维空间中的分类线方程为 $\bar{\omega} \cdot x + b = 0$. SVM 算法需要寻找使正负样本之间间隔最小的线性分类面,能够使样本正确分类,并使 $\|\bar{\omega}\|^2$ 最小的分类面就是最优分类面. SVM 通过解一个不等式约束下的二次函数极值问题,最终得到最优分类函数:

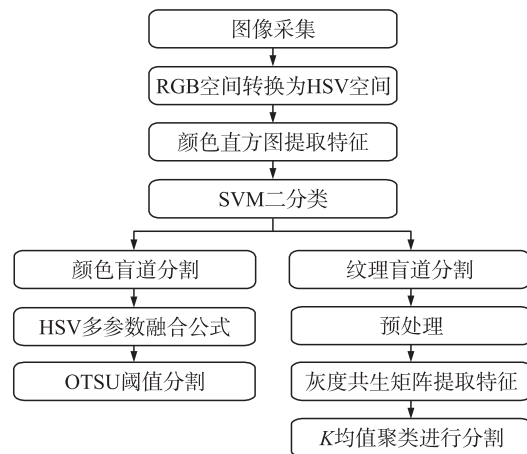


图 1 算法总流程

Fig. 1 Overall algorithm flow

$$f(x)=\operatorname{sgn}\left\{\bar{\omega}^* \cdot x+b^*\right\}=\operatorname{sgn}\left\{\sum_{i=1}^n \alpha_i^* y_i\left(x_i \cdot x\right)+b^*\right\} . \quad (1)$$

将获得的一维特征向量输入到 SVM 向量机中,图 2 所示为利用 SVM 进行二分类的图像分类结果,成功地区分了颜色盲道和纹理盲道. 多幅盲道图片的测试结果表明,这种预分类方法取得了远超文献[7]的预分类效果,且运算时间仅占总计算时间的 1%.

1.3 颜色盲道分割算法

1.3.1 算法介绍

根据颜色信息进行图像分割的算法包括阈值分割、区域生长、颜色聚类等^[7]. 考虑到颜色盲道的颜色特征和区域分割准确度,本文提出基于 HSV 多参数融合的 OTSU 阈值分割算法,通过多参数的有效融合代替传统算法的单参数^[6],提高了颜色盲道分割的准确率,且能够实现光照阴影和噪声的有效消除.

1.3.2 OTSU 算法

1979 年由日本学者大津(OTSU)提出的最大类间方差法,由于计算简便,图像的亮度和对比度不影响分割效果,是图像分割算法中选取阈值的最佳算法^[11]. OTSU 算法根据图像的灰度方差值特性把图像分为背景和目标两个部分^[12],通过迭代的方式,得到方差值最大的灰度值,也就是最佳分割阈值.

设灰度图像灰度级为 L ,则灰度范围为 $[0, L-1]$,利用 OTSU 算法得到的图像最佳阈值公式为:

$$t=\max \left[\bar{\omega}_0(t) \cdot\left(u_0(t)-u\right)^2+\bar{\omega}_1(t) \cdot\left(u_1(t)-u\right)^2\right], \quad (2)$$

式中, t 为最佳分割阈值; $\bar{\omega}_0$ 为背景比例; u_0 为背景均值; $\bar{\omega}_1$ 为前景比例; u_1 为前景均值; u 为整幅图像的均值.

1.3.3 算法步骤

步骤 1 HSV 多参数融合公式为:

$$I=S-t_1 \cdot H+t_2 \cdot V, \quad (3)$$

式中, I 为加权后的图像; H 、 S 、 V 为原图像转换成 HSV 颜色空间后的通道分量; t_1 、 t_2 为对 H 、 V 分量进行 OTSU 图像遍历的阈值.

步骤 2 利用 OTSU 分割算法对得到的图像进行阈值分割.

步骤 3 求最大的连通区域.

步骤 4 利用形态学的膨胀操作得到最终图像.

基于 HSV 多参数融合的 OTSU 阈值分割方法对图像进行了颜色的加权融合,融合后的颜色盲道可大大减少阴影、光照和噪声带来的负面干扰. 分别选取含有日照阴影的图 3、含有绿化的图 4、含有植被的图 5 进行比较,其中(a)为输入图像,(b)为输入图像分割的金标准,(c)为文献[7]基于 H 分量颜色直方图与区域生长的颜色盲道分割算法结果图,(d)为本文算法盲道分割结果图.

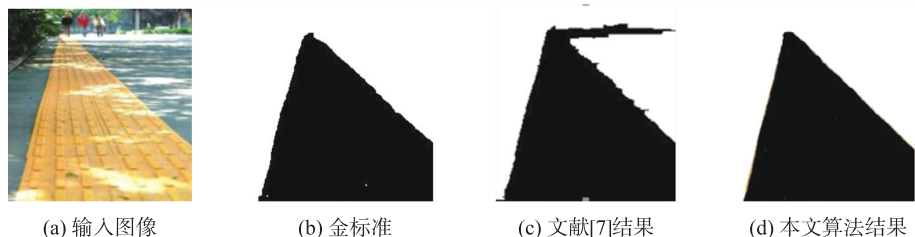


图 3 含有阴影的颜色盲道处理结果

Fig. 3 Comparison of color blind sidewalk with shadow

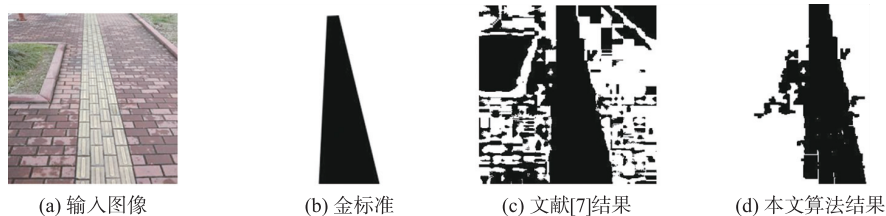


图 4 含有绿化的颜色盲道处理结果

Fig. 4 Comparison of color blind sidewalks with greenings

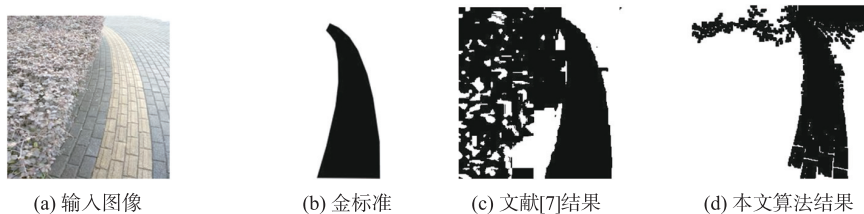


图 5 含有植被的颜色盲道处理结果

Fig. 5 Comparison of color blind sidewalks with plants

和文献[7]的算法对比表明,本文算法对图3中盲道区域的分割效果准确.文献[7]方法受到光照干扰,分割效果有缺陷.对于图4、图5,文献[7]方法只利用色度 H 分量的直方图对盲道图像进行分割,造成颜色阈值的选择存在局限性,导致了误分割.本文算法减少了环境干扰,能分割出盲道区域.以上测试结果表明,由于采用了多参量融合等有效方法,本文提出的改善的颜色盲道分割算法有着对于不同光照、阴影和噪声条件的适应性.

1.4 纹理盲道分割算法

1.4.1 算法介绍

基于纹理分割算法分为提取纹理特征和聚类两个步骤.提取纹理特征的方法有4种,分别为基于统计、模型、结构和数学变换的纹理特征分析^[7].本文提出基于预处理的GLCM结合 K -means聚类的纹理图像分割算法,先对图像进行增强纹理信息的预处理,选用灰度共生矩阵进行特征矩阵的提取. K -means聚类算法的优势是对大数据量进行处理,适合处理GLCM特征^[13].

1.4.2 增强图像纹理信息的预处理

纹理盲道预处理步骤如图6所示.伽马校正是一种非线性灰度变换:

$$i \leftarrow i^\gamma, \quad (4)$$

式中, i 为灰度级别,参数 $\gamma \in [0, 1]$.伽马校正能够增强图像的对比度,但由于转换往往太强,易过度放大图像黑暗区域的噪声,一般指数 γ 在 $[0, 0.5]$ 范围内是一个很好的折衷方法^[14].但伽马校正不能排除整体强度梯度的影响.

高斯差分滤波器(DOG)可以实现带通,既去除阴影,又保留细节:

$$\text{DOG}(x, y, \sigma_1, \sigma_2) = G_{\sigma_1}(x, y) - G_{\sigma_2}(x, y), \quad (5)$$

式中, $G_\sigma(x, y)$ 为圆对称函数,其平滑程度可通过 σ 控制.当 $\sigma_1 < \sigma_2$ 时,对图像进行带通滤波,能够很好地抑制高频噪声和低频背景^[15].

预处理最后阶段重新标定了图像强度,规范全面对比度或强度变化的稳健度.因信号通常包含由高光、小黑区产生的极值,故使用基于两阶段的近似^[14]:

$$I(x, y) \leftarrow \frac{I(x, y)}{(\text{mean}(|I(x', y')|^a))^{\frac{1}{a}}}, \quad (6)$$

$$I(x, y) \leftarrow \frac{I(x, y)}{(\text{mean}(\min(\tau, |I(x', y')|)^a))^{\frac{1}{a}}}. \quad (7)$$

式中, a 是一个强压缩指数,减少了极大值的影响; τ 是用于在第一阶段归一化后截断大值的阈值.预处理实例如图7所示,其中,(a)为输入图像,(b)为经预处理后的盲道灰度图像.可以看出,图像经预处理后获



图 6 预处理的步骤

Fig. 6 Preprocessing steps

得了清晰的纹理信息,有效地抑制了光照、阴影的影响,进一步方便了特征向量的提取.

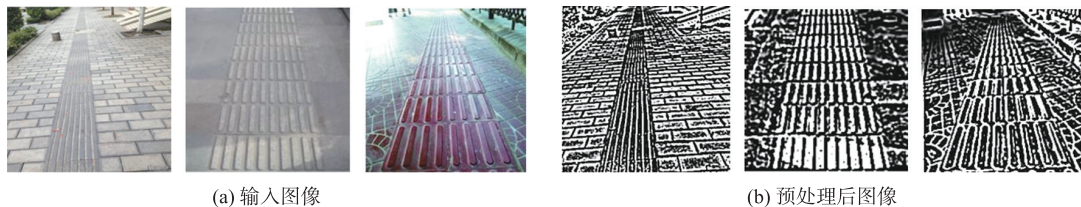


图 7 预处理结果

Fig. 7 Preprocessing results

1.4.3 灰度共生矩阵

作为提取图像纹理特征的一种重要方法,灰度共生矩阵根据建立在估计图像上的二阶组合条件概率密度函数,计算图像中两个像素之间的灰度相关性,并对图像的所有像素进行调查统计,来反映图像在方向、相邻间隔、变化幅度及快慢上的综合信息^[16].

Haralick 规定了 14 个灰度共生矩阵的特征参数^[17]. 为简化计算复杂度,本文采用角二阶矩、对比度、相关^[18]这 3 个常见的特征参数作为灰度共生矩阵的输出矩阵,同时去掉方向 90° 和 135° ,降低了计算量,且不影响最终分割结果^[7].

1.4.4 算法步骤

步骤 1 利用本文预处理的方法,使用 $\gamma=0.2, \sigma_1=1.0, \sigma_2=2.0, a=0.1$ 和 $\tau=10$ 作为默认设置,获得增强纹理信息的图片.

步骤 2 采用灰度共生矩阵提取特征,为减少计算量,将灰度级压缩到 16 级,使用 15×15 的窗体滑动分割原图得到 n 个子图,分别计算出 0° 和 45° 这 2 个方向的距离步进为 1 的 3 个特征值,组成特征矩阵.

步骤 3 将特征向量作为 K-means 聚类的输入矩阵,默认分为 2 类,输出标记了聚类标号的图片.

采用基于预处理的 GLCM 结合 K-means 聚类的纹理图像分割算法对图像进行预处理,预处理后的纹理盲道纹理特征更清晰,使得特征提取更精确,可以较好地排除阴影、光照带来的负面干扰. 选取绿化干扰的图 8、含有阴影的图 9 和栏杆干扰的图 10,分别进行原始图像、金标准、文献算法和本文算法的比较.

对比表明,对于图 8,本文算法分割准确,而文献[3]和[7]方法受绿化环境的影响,均存在误分割现象;对于图 9,本文算法分割准确,文献[7]对阴影干扰敏感,存在的噪声多,文献[3]分割更为彻底,盲道区域噪声小,但存在误分割现象;对于图 10,本文算法对盲道区域分割正确,将栏杆和盲道区分开来,而文献[3]和[7]方法由于栏杆和光线的影响,准确率降低,存在缺陷.

以上结果表明,本文提出的改善纹理分割算法对光照、阴影等不同条件具有更好的适应性.



图 8 含有绿化的纹理盲道处理结果

Fig. 8 Comparison of texture blind sidewalk with greenings

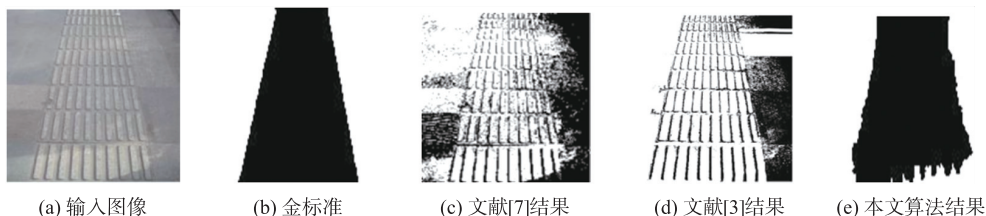


图 9 含有阴影的纹理盲道处理结果

Fig. 9 Comparison of texture blind sidewalks with shadow



图 10 含有栏杆的纹理盲道处理结果

Fig. 10 Comparison of texture blind sidewalks with balusters

2 实验结果和分析

2.1 实验背景

为了验证本文算法的有效性,选取了通过百度搜索引擎得到的 145 张盲道真彩色图像构成测试库,图像大小均处理为 80×80 像素. 本文仿真的软件平台为 Win10 操作系统和 MATLAB 17a,硬件平台采用常见的主频为 3.5 GHz、内存为 4 GB 的 PC 机.

2.2 评价指标

为了定量评价分割的效果,采用常用于图像分割的评价指标^[19](Dice 系数、精确度 (precision)、召回率 (recall) 和区域交集 (IOU)) 来进行试验结果的评价^[20-21],定义如下:

$$\text{Dice} = 2TP / (FP + 2TP + FN), \quad (8)$$

$$\text{precision} = TP / (TP + FP), \quad (9)$$

$$\text{recall} = TP / (TP + FN), \quad (10)$$

$$\text{IOU} = TP / (FN + TP + FP), \quad (11)$$

式中,TP (true positive) 为真阳性,表示被正确分割的盲道像素点个数;FP (false positive) 为假阳性,即盲道被错误地分割成非盲道的像素点个数;FN (false negative) 为假阴性,即非盲道被错误地划分为盲道的像素点个数. Dice 系数越高,代表整体分割平衡性越好;精确率越高,代表分割结果中正确的盲道像素点所占比重就越多^[20];召回率越高,代表分割出正确的盲道像素点越多;区域交集计算了正确分割的盲道像素点与错误分割的盲道像素点的比值^[21].

2.3 实验结果与分析

随机抽取测试库 145 张盲道图片中的 107 张作为训练样本,38 张作为测试样本. 由 SVM 分类机得到 38 张对应着颜色及纹理分类的图片. 表 1 分别比较了文献[7]算法、SVM 预分类结合文献[7]的颜色盲道、纹理盲道分割算法及本文研究算法对图片进行处理的结果.

表 1 算法结果对比

Table 1 Comparison of algorithm results

方法	SVM 预测一张图片耗时/s	正确分割张数/张	总运行时间/s	平均分割一张图片耗时/s
文献[7]算法	—	25	238.8	6.28
SVM 预分类结合文献[7]算法	—	27	178.2	4.92
本文算法	0.05	31	79.8	2.21

从表 1 可知,SVM 预分类结合文献[7]算法比文献[7]通过识别盲道的边界作为判断条件的分步算法的正确分割张数多,且平均分割一张图片的时间提高到了 4.92 s. 而通过 SVM 预分类结合文献[7]算法与本文算法对比可知,本文的预分类算法对测试样本的预测非常迅速,单张耗时仅为 0.05 s,能更快速准确地进行盲道分割. 同时通过对颜色盲道、纹理盲道算法的改善,在 38 张总测试样本中,正确分割张数提高了到 30 张以上,且算法执行时间减少到 2.21 s.

由此可知,本文通过预分类及对颜色盲道和纹理盲道分割算法进行优化,正确率和运行时间得到了明显提升.

表 2 比较了文献[6]算法、文献[7]算法及本文算法对图片进行处理并分割的质量.

表 2 图片分割质量比较

Table 2 Comparison of image segmentation quality

文献 Dice 系数	Dice 系数	精确度	召回率	区域交集
文献[6]算法	0.745 5	0.812 0	0.689 1	0.594 2
文献[7]算法	0.822 0	0.872 3	0.720 7	0.712 6
本文算法	0.928 0	0.960 5	0.901 2	0.889 0

从表 2 分析可知,本文提出的基于图像预处理分类分割的盲道分割算法与文献[6]和[7]的方法相比,4 种参数均有增长,Dice 值达到 0.928 左右,表明图片整体分割平衡性更好;精确度达到 0.960 5 左右,表明正确的盲道像素点所占比重高;召回率达到 0.90 左右,表明分割出的正确盲道像素点多;区域交集达到 0.90 左右,表明正确分割的盲道像素点与错误分割的盲道像素点比值高. 从表 2 可知,本文算法对于测试库图片,盲道的平均分割准确率可达到 90%以上,分割质量高于其他盲道分割算法.

3 结论

针对现有的盲道分割算法存在分割率差、易受光照阴影等外界环境影响的不足,提出如下算法:采用一种颜色直方图多参量加权方法对盲道进行预判,利用 SVM 分类器将盲道分为颜色盲道和纹理盲道两类. 对于颜色盲道,提出一种基于 OTSU 阈值分割算法的改进 HSV 空间多参数算法. 对于纹理盲道,提出一种改善增强图片纹理信息的 GLCM 结合 K-means 聚类算法. 实验表明,本文算法对多样性的随机盲道有很强的适应性,分割效果较为理想.

[参考文献](References)

[1] 耿魁,张春阳,凌海燕. 城市盲道的缺陷及现状分析—以烟台市为例[J]. 科技传播,2014(14):76-77.

[2] 葛忠明,张忠海.“健全人的盲道”:关于盲道占用的社会排斥研究[J]. 中国海洋大学学报(社会科学版),2016(1):81-88.

[3] 王民,李媛,张立材. 基于纹理特征的盲道区域分割算法[J]. 信息通信,2017(7):23-26.

[4] 闫志杰,汪剑鸣,窦汝振,等. 基于颜色聚类和直线检测的自适应盲道区域分割算法[J]. 天津工业大学学报,2010,29(1):80-84.

[5] 周毅,赵群飞. 基于颜色信息的盲道区域检测与跟随算法[J]. 微型电脑应用,2010,26(8):47-50.

[6] 柯剑光,赵群飞,施鹏飞. 基于图像处理的盲道识别算法[J]. 计算机工程,2009,35(1):189-191,197.

[7] 彭玉青,薛杰,郭永芳. 基于颜色纹理信息的盲道识别算法[J]. 计算机应用,2014,34(12):3585-3588,3604.

[8] 仲会娟. 基于颜色特征和 SVM 的自然图像分类标注算法[J]. 绵阳师范学院学报,2018,37(5):12-16.

[9] 陈亦欣,叶锋,肖锋,等. 基于 HSV 空间和形状特征的交通标志检测识别研究[J]. 江汉大学学报(自然科学版),2016,44(2):119-125.

[10] 张国宣,孔锐,施泽生,等. 基于核聚类方法的多层次支持向量机分类树[J]. 计算机工程,2005,31(5):172-174.

[11] 程石磊,郝佳宁,陈钰. 基于 MATLAB 带钢表面缺陷检测算法设计[J]. 数字化用户,2018,24(35):233.

[12] 程洪,尹辉娟,马丽,等. HSI 模型结合 OTSU 法的玉米种胚检测算法[J]. 农机化研究,2014(10):183-185,191.

[13] ARISTIDIS L,NIKOS V,JAKOB J V. The global k-means clustering algorithm[J]. Pattern Recognition,2003,36(2):451-461.

[14] TAN X,TRIGGS B. Enhanced local texture feature sets for face recognition under difficult lighting conditions[J]. IEEE Transactions on Image Processing,2010,19(6):1635-1650.

[15] 彭志涛,陈风东,唐军,等. 高斯差分滤波多尺度损伤提取方法[J]. 强激光与粒子束,2017,29(9):16-18.

[16] 张存. 基于 Quick Bird 影像的面向对象信息提取方法比较实验研究[D]. 沈阳:东北大学,2009.

[17] 何德鲁,李宏坤. 基于改进的灰度共生矩阵参数特征提取的齿轮箱故障诊断[J]. 机械管理开发,2016(9):62-64.

[18] 薄华,马缚龙,焦李成. 图像纹理的灰度共生矩阵计算问题的分析[J]. 电子学报,2006,34(1):155-158,134.

[19] 郭颖. 基于区域生长的肝脏 CT 图像肿瘤分割方法研究[D]. 大连:大连海事大学,2017.

[20] 秦志光,陈浩,丁熠,等. 基于多模态卷积神经网络的脑血管提取方法研究[J]. 电子科技大学学报,2016,45(4):573-581.

[21] 鲁浩达,徐军,刘利卉,等. 基于深度卷积神经网络的肾透明细胞癌细胞核分割[J]. 生物医学工程研究,2017,36(4):340-345.

[责任编辑:严海琳]