

视觉乐谱图像动态多阈值二值化方法

杨 芳^{1,2} 滕桂法¹ 田学东²

(河北农业大学机电工程学院 保定 071001)¹ (河北大学计算机科学与技术学院 保定 071000)²

摘 要 针对视觉乐谱图像在不规则区域内光照不均匀的二值化问题,提出了一种对前景内容动态分块二值化的方法,以降低背景噪声对二值化效果的影响,提高分块多阈值方法的有效性。该方法以像素灰度差分为基础,以滑动窗口为处理对象,根据窗口内差分变化率确定前景区域位置;再根据前景区域背景像素灰度分布情况将窗口分类,从而划分出不规则光照区域;最后在每个区域内分别采用 Otsu 阈值算法进行二值化。在实验中详细讨论了窗口大小和差分变化率阈值设置对前景区域提取正确率的影响,结果表明所提出的方法对乐谱图像前景内容的查全率高,能划分出不规则形状的范围,可以有效处理光照不均匀情况,并且可以用于一般文档的二值化。

关键词 二值化,乐谱图像,差分,前景区域检测,动态阈值

中图法分类号 TP391 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.1.067

Dynamic Multi-threshold Binarization Method for Visual Music Images

YANG Fang^{1,2} TENG Gui-fa¹ TIAN Xue-dong²

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China)¹

(School of Computer Science and Technology, Hebei University, Baoding 071000, China)²

Abstract A dynamic binarization method was proposed for solving the uneven illumination problems in irregular regions of visual music images, to reduce the background influence and improve the effectiveness of multi-threshold method. This method is based on pixel grayscale difference, and slide window is the segment unit. The foreground is detected by the difference variance ratio in each window, and the irregular illumination regions are decided by window background gray estimation. The Otsu's binarization threshold is employed in each region in this algorithm. Foreground detection accuracy is decided by window size and variance ratio threshold. Those two parameters were discussed in detail in experiment. The experimental results show that this method can divide foreground into irregular illumination regions with a high foreground recall ratio. And it is effective to solve the uneven illumination binarization problem of music images. This method can also be applied to the binarization of general document images.

Keywords Binarization, Music image, Difference, Foreground detection, Dynamic threshold

1 引言

二值化在文档处理及识别中占有重要的地位,是识别预处理的重要组成部分。针对不同文档图像的各种退化现象,二值化一直是研究的热点问题^[1]。光照不均匀是在自然环境下数码相机拍摄的图像中普遍存在的问题,近几年来,光照不均匀文档图像的二值化方法可以分为 3 类:第一类是局部阈值及其改进算法^[2-4];第二类是基于局部图像信息的动态多阈值的全局阈值法^[5-8];第三类是将增强文档图像与背景灰度对比后再使用全局阈值的方法^[9-11]。乐谱图像作为一种文档图像,光照不均匀同样是对其二值化时所面临的一个重要问题^[12]。

虽然局部阈值法能够处理局部灰度变化问题,但是不当的参数选择易在乐谱图像中造成符头中空等现象,采用 Sauvola 局部阈值法时的二值化效果如图 1 所示。因此全局阈值

法是乐谱图像二值化时常用的方法^[14]。针对光照不均匀现象, Pinto 等^[15]提出了一种基于乐谱内容的窗口二值化方法,根据书籍中乐谱图像光照平行于书脊渐变的特点,以整幅图像的高度为窗口高度,在用户自定义宽度的窗口范围内计算一个全局阈值,并将该阈值用于窗口中心的一列像素的二值化。该方法是在光照分布在一定方向上具有规律的前提下完成。在自然光照情况下,这个前提并不完全成立。对于不规则区域的光照不均匀情况,将背景光照强度均衡化后再进行二值化是一种普遍适用的解决方法,但是能适应各种不规则情况的光照强度均衡化算法复杂。郭佳等^[16]认为在一个较窄条带内图像可近似看作是按一定规律分布的,提出了在一个包含目标的条带区域内逐线进行二值化的方法,省去了光照均匀化步骤。乐谱图像具有谱行较宽、分布稀疏的特点,并且在自然拍摄环境中图像中的谱行存在弯曲、倾斜等失真,不易确定一个较窄的仅包含有乐谱内容的条带。当条带区域仅

到稿日期:2015-04-07 返修日期:2015-08-04 本文受国家自然科学基金(61375075),河北省自然科学基金(F2011201106, F2013201134)资助。

杨 芳(1977-),女,博士生,主要研究方向为模式识别、图像处理, E-mail: yangfang@hbu.edu.cn;滕桂法(1963-),男,博士,教授,主要研究方向为人工智能;田学东(1963-),男,博士,教授,主要研究方向为模式识别、图像处理。

包含背景时易造成强制阈值现象,因此确定前景内容的条带位置是该方法的瓶颈。

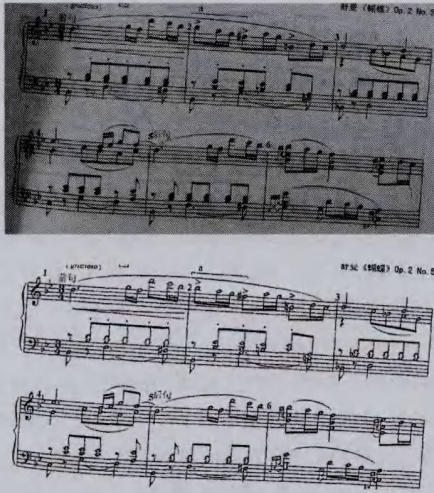


图1 光照不均匀乐谱示例及 Sauvola 局部阈值方法的二值化图像

对于光照不均匀的图像,即使在阴影部分或者强光照部分,前景目标的灰度值仍然与背景有一定的差别。在此情况下,局部图像的梯度信息^[17]、边缘信息^[18]和背景灰度信息^[19]等均可用于前景内容的判断,以辅助确定二值阈值。在这些思想的引导下,本文提出了一种层次动态划分区域的二值化方法。首先将整幅图像划分为背景和前景区域。以像素灰度差分为基础,设置滑动窗口,判断乐谱前景内容所在的位置,过滤掉背景易出现强制阈值的影响。然后根据前景窗口内像素的背景灰度分布变化划分不同的光照强度区域,再对不同区域设定全局阈值进行二值化。这种划分方法不受图像倾斜、弯曲等失真的限制,划分的区域形状不规则,更好地适应了不同形式的光照不均匀情况。

2 前景区域的确定方法

在图像的阴影或强光照区域,如果图像仍然可以辨识,说明图像的前景与背景间存在一定的光照强度差异。在灰度图像中,光强以灰度值表示,光强差异以像素灰度差分来表示。

像素灰度差分是一个像素与其8邻域内像素灰度值的最大差距。当图像灰度值平稳变化时,像素灰度差分接近于0;当图像灰度突变时,即在背景与前景的边界处,像素灰度差分则出现明显波动。据此可以认为在一定区域范围内如果灰度差分变动强烈,则说明这个区域内包含有图像前景内容。

以宽度为 w 的窗口作为在整幅图像中判断是否含有前景内容的基本单位。灰度差分的方差体现了差分的波动情况,因此,根据差分的方差引入灰度差分变化率来确定图像前景区域。

定义1 像素灰度差分 $dif(x,y)$ 为当前像素 p 与8邻域内像素的最大灰度值之差。

$$dif(x,y) = p_{x,y} - p_k \quad (1)$$

其中, $k = \max_i \{ p_{x,y} - p_i \}$, $i = 0, 1, \dots, 7$ 。

定义2 灰度差分变化率 R_{dif} 为宽为 w 的窗口范围内灰度差分标准差与全图最大差分的比值。

$$R_{dif} = \frac{S}{MaxDif} \quad (2)$$

其中 $MaxDif$ 是整幅图像最大灰度差分值:

$$MaxDif = \max(|dif(x,y)|) \quad (3)$$

S 是窗口内灰度差分标准差:

$$S = \sqrt{\frac{1}{w^2} \sum_{x=1}^w \sum_{y=1}^w dif^2(x,y) - M^2} \quad (4)$$

$$M = \frac{1}{w^2} \sum_{x=1}^w \sum_{y=1}^w dif(x,y) \quad (5)$$

由此,前景区域判定算法如算法1所示。

算法1 Foreground-window detection

Input: Grayscale music image; I , window size; w , threshold; T

Output: foreground-window Array; $Fore_Array$

1. Calculate difference for each pixel in I to get difference map image DIF_Map ;
2. Get $MaxDif$ from DIF_Map ;
3. $i=0$;
4. while $i < Img_height$ do
5. $j=0$;
6. while $j < Img_width$ do
7. Get window with size $w * w$ from (i,j) , calculate R_{dif}
8. if $R_{dif} < T$ do
9. Set current window as background
10. end do
11. else do
12. Add current window to $Fore_Array$;
13. end do
14. $j=j+w$
15. end do
16. $i=i+w$
17. end do

3 动态光照强度区域划分方法及二值化

灰度差分变化仅能体现图像背景与前景的灰度对比的变化,不同光照强度区域的划分则以窗口内的背景灰度为依据。根据背景灰度值的分布范围,将灰度值均分为几个不同的段,每一段表示一种光照强度。光强区域的划分以窗口为基本单位,根据每个窗口内背景灰度值所属段确定其所归属的光强区域。窗口内背景灰度的估算是该划分方法的基础。背景灰度值依据文献^[10]的方法进行计算,以每个窗口内5个最亮点的平均值为该窗口背景的估计值。

设所有前景区域窗口的背景估计值最小为 Min_gray , 最大为 Max_gray , 则灰度分布区间长度为

$$L_{gray} = (Max_gray - Min_gray) \quad (6)$$

根据设定的灰度段跨度上限 LT , 将灰度分布区间划分为 LN 段, LN 的计算方法如式(7)所示。

$$LN = \begin{cases} 1, & L_{gray} < 1.1LT \\ \frac{L_{gray}}{LT}, & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

LN 为1时表明前景区域的光照比较均匀,直接进行全局阈值二值化即可取得良好效果。否则将灰度区间 (Min_gray, Max_gray) 均分为 LN 段,每段表示一种光强区域。然后在前景区域窗口集合内逐窗口确定其所属光强区域类别。设窗口背景灰度估值为 W_{gray} , 则类别标签 C 为:

$$C = \frac{(W_{gray} - Min_gray) \times LN}{L_{gray}} \quad (8)$$

所有同一光强类别的窗口集合为一个光照强度区域。具

有同一光强类别标签的窗口内像素灰度值按照 Otsu 的方法计算阈值,并进行二值化。

区域划分及二值化处理算法流程如图 2 所示。

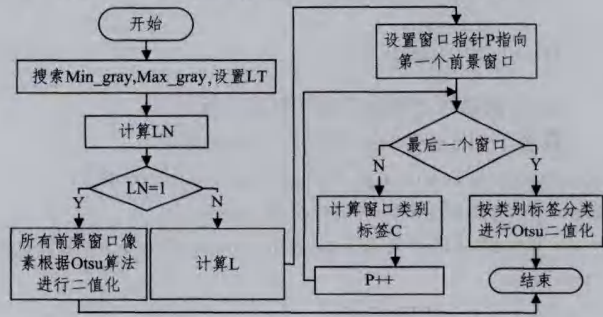


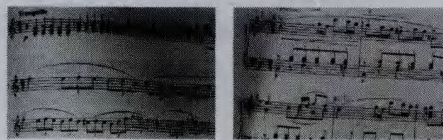
图 2 区域划分及二值化处理流程

光强区域的分段数量与灰度跨度阈值 LT 相关。实验数据分析表明,当背景灰度变化在 40 个灰度级内时,Otsu 全局阈值算法能达到很好的二值化效果,因此 $LT=40$ 。

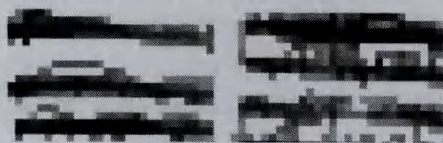
与常用的规则划块方法不同,该方法所确定的不同光照区域形状并不规则,而是以窗口为区域的基本单位,根据窗口的背景灰度值确定其所属的区域,区域以窗口的集合表示,同一集合的窗口均采用该区域的阈值进行二值化。这种划分方法与图像背景的光照强度有关,所确定的光照区域是随图像的不同而动态变化的,能更好地适应不同形式的不均匀光照情况。

4 实验及分析

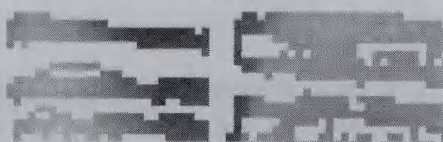
将所提出的方法在以高速文档拍摄仪和手机内置数码相机拍摄的乐谱图片上进行仿真实验。共有乐谱图片 80 张,包括高拍仪图片 45 张,内置数码相机图片 35 张,所有的乐谱图片均是在自然环境下对书籍中印刷的乐谱采集得到,设备参数设置为:闪光灯自动模式、分辨率 500 万像素。部分含有倾斜、弯曲等不均匀光照的样张(局部)如图 3(a)所示。



(a) 原始灰度乐谱图像(局部)



(b) 灰度差分窗口分布效果图($w=33$)



(c) 窗口内背景灰度估计值分布图($w=33$)

图 3 前景窗口及背景估计效果

实验根据算法 1 确定乐谱图像前景区域。以 w 为标准,将原图像划分成网格,在每个窗口内计算灰度差分。当窗口大小 $w=33$ 时,将灰度差分归一化后的乐谱图像如图 3(b)

所示。根据差分变化率阈值 T 确定前景区域后,前景区域部分窗口内背景灰度分布如图 3(c)所示。最后以 LT 为分类参数,将前景区域窗口划分到不同的光强段进行二值化,当 $w=33, T=2$ 时图像的二值化效果如图 7(d)所示。从图 3 可以看出,谱线的弯曲、倾斜等对前景区域的确定、光照区域的划分等没有影响。但是从细节上也可以看出,本方法二值化图像中存在部分谱线的缺失,这是由于该块图像直接被判断为背景区域,从而出现了谱线的断裂及部分符号的不完整。这也说明,影响该算法的主要因素是前景区域判断是否正确。

实验中影响前景窗口判断的参数有两个:窗口尺寸 w 及灰度差分变化率阈值 T 。引入前景窗口查全率(简称查全率)及前景窗口查准率(简称查准率)来定量描述两个参数对前景内容判断的影响。查全率由已检测到的前景窗口数量与应检测到的前景窗口数量的比值表示;查准率由已检测到正确的前景窗口数量与检测到的全部前景窗口数量的比值表示。

由全部实验样张生成的标准前景窗口数量分别为 477445、157505、80835 和 51003,与 $w=9, 17, 25, 33$ 对应。当限定像素灰度差分变化率阈值 T 为 0.2 时,不同窗口尺寸情况下得到的平均查全率、查准率数据如图 4 所示。当限定窗口宽度 w 为 33 像素时,所有实验图像在不同差分变化率阈值下的平均查全率与查准率数据如图 5 所示。从图中可以看出,随着窗口大小 w 的增大,前景窗口的查全率逐步下降,而查准率却变动不大。窗口尺寸不变时,差分变化率阈值越高则前景查全率越低,而前景查准率越高。当阈值超过 0.2 时,前景查准率达到 100%。

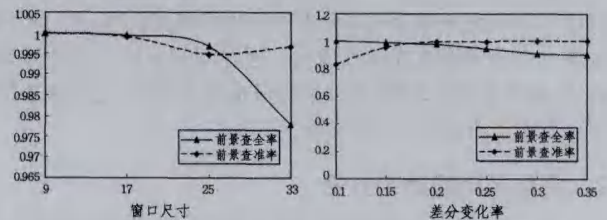


图 4 窗口大小对前景判断的影响 图 5 差分变化率阈值对前景判断的影响

前景查全率随窗口大小 w 的增加而减小的原因是:乐谱图像的稀疏性使得窗口尺寸增大后窗口内背景占有比例更大,差分变化率降低,因此在相同差分变化率阈值情况下,更多的窗口被划分为背景。同理,当差分变化率阈值 T 增大时,对前景窗口的差分变化率要求越高,即要求窗口内的灰度变动更频繁,因此包含前景内容少或者是包含内容过于单一的窗口将被划分为背景,导致前景查全率大幅降低。当窗口大小 $w=33$ 时,不同差分变化率阈值导致前景误判为背景的部分窗口示例如图 6 所示。

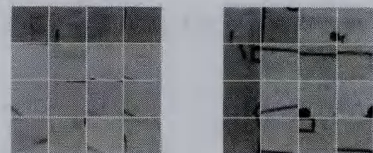
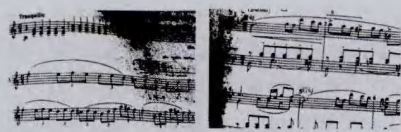
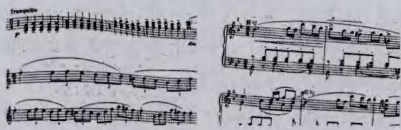


图 6 差分变化率阈值分别为 0.2 和 0.3 时判为背景的窗口示例

所提出的动态多阈值(DMT)二值化方法与经典的 Otsu 全局阈值化方法、Sauvola 局部阈值化方法和 Pinto 的多阈值方法的部分二值化效果如图 7 所示。



(a) Otsu 全局阈值方法二值化效果图



(b) Sauvola 局部阈值方法二值化效果图(w=33)



(c) Pinto 阈值方法二值化效果图



(d) 本文动态区域划分后多阈值二值化效果图

图7 二值化效果对比

另外引入像素级别上的二值化准确率(Accuracy Rate, AR)、前景误判为背景比率(Foreground to Background Rate, F2BR)和背景误判为前景比率(Background to Foreground Rate, B2FR)为参考依据。其中:

$$AR = \frac{\# \text{Accurate_Pixels}}{\# \text{All_Pixels}} \times 100\% \quad (9)$$

$$F2BR = \frac{\# \text{ForegroundDesidedAsBackground_Pixels}}{\# \text{All_Pixels}} \times 100\% \quad (10)$$

$$B2FR = \frac{\# \text{BackgroundDesidedAsForeground_Pixels}}{\# \text{All_Pixels}} \times 100\% \quad (11)$$

4种方法的比较结果如表1所列。从表中数据可以看出,当光照不均匀时,局部阈值法处理效果优于简单的全局阈值,但是在完全背景区域易出现强制噪声;Pinto的多阈值方法克服了全阈值对光照处理的不足,处理效果大大提升,但是由于以整幅图像高度为窗口高度,使得处理不规则区域光照不均图像的效果较差;本文提出的动态多阈值方法以局部窗口为单位区分了光照区域,在相同光照区域内统一计算阈值,提高了二值化准确率,同时比Sauvola方法更好地解决了背景噪声干扰问题,对于前景光照变化的适应能力优于Pinto的方法,算法所需时间介于两者之间。

表1 像素级二值化准确率比较

	Otsu's	Sauvola's	Pinto's	DMT
参数	—	w=33, k=0.1	w=7	w=33 T=0.2
AR(%)	86.295	97.996	97.96	98.897
B2FR(%)	13.681	1.56	2.000	0.592
F2BR(%)	0.024	0.444	0.040	0.511

结束语 针对乐谱图像中不规则区域光照不均匀问题提出了一种层次二值化方法。第一层是根据窗口中像素灰度差

变化率的大小过滤背景窗口,减少由强制阈值造成的背景噪声。第二层是对前景窗口中的背景灰度估计值进行分析,将前景内容划分为不同灰度等级的区域,对每个区域采用Otsu阈值方法进行二值化。对乐谱样张的实验表明,在所划分的前景区域内采用全局阈值能达到较好的二值化效果,而第一层次对前景区域的查全率是影响整幅图像效果的关键。通过对窗口大小及灰度差分变化率阈值的实验分析,窗口和差分变化率阈值越大,查全率越低,为了平衡计算量与二值化性能,窗口大小选择为17~25像素,差分变化率阈值为0.2时,可以达到最优的效果。所提出的二值化方法简单,易于实现,并且不受图像内容倾斜、弯曲等失真的影响,可以适用于一般文档图像。但是不同的图像其窗口大小及差分率阈值需根据所处理的内容进行适当调整。

参考文献

- [1] Jagroop K D, Mahanan R. A review of degraded document image binarization techniques[J]. International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering, 2014, 3(5): 6582-6586
- [2] Wang J F, Huang Z C, Ahmed T A M. New binarization method called BM aim to optimize detail of image[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(8): 127-132(in Chinese)
王骏飞, 黄樟灿, Ahmed T A M. 一种针对图像细节优化的BM二值化方法[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(8): 127-132
- [3] Howe N R. Document binarization with automatic parameter tuning[J]. International Journal on Document Analysis and Recognition, 2013, 16(3): 247-258
- [4] Singh T R, Roy S, Singh O I, et al. A new local adaptive thresholding technique in binarization[J]. International Journal of Computer Science Issues, 2011, 8(6): 271-277
- [5] Nafchi H Z, Moghaddam R F, Cheriet M. Historical document binarization based on phase information of images[C]// Computer Vision-ACCV 2012 Workshops, Springer Berlin Heidelberg, 2013: 1-12
- [6] Hu L N. Study on low quality document image binarization [D]. Nanjing: Nanjing University of Technology and Engineering, 2012(in Chinese)
胡丽娜. 低质量文档图像的二值化研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012
- [7] Zhang W, Liu Z G. Binarization method to scanning image of thicker book [J]. Application Research of Computers, 2011, 28(5): 1998-2000(in Chinese)
张伟, 刘志刚. 一种针对较厚书籍扫描图像的二值化方法[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(5): 1998-2000
- [8] Lan H. Interactive medical image segmentation algorithm optimized by multi-thresholds [J]. Computer Science, 2013, 40(9): 296-299(in Chinese)
兰红. 多阈值优化的交互式医学图像分割方法[J]. 计算机科学, 2013, 40(9): 296-299
- [9] Valizadeh M, Armanfard N, Komeili M, et al. A novel hybrid algorithm for binarization of badly illuminated document images [C]// 14th International Computer Conference on CSI (CSICC 2009). IEEE, 2009: 121-126
- [10] He Z M. Binarization of document image captured under uneven illumination [J]. Journal of Shanghai University of Engineering

Science, 2011, 25(2): 163-166 (in Chinese)

贺志明. 不均匀光照文本图像的二值化[J]. 上海工程技术大学学报, 2011, 25(2): 163-166

- [11] Ma C Y, Sun J X, Cheng S, et al. Binarization algorithm of license plate image based on multistage light processing[J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33(S2): 200-202 (in Chinese)
马超玉, 孙俊喜, 程帅, 等. 融合多级光照处理的车牌图像二值化算法[J]. 计算机应用, 2013, 33(S2): 200-202
- [12] Burgoyne J A, Pugin L, Eustace G, et al. A comparative survey of image binarisation algorithms for optical recognition on degraded musical sources[C]//International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR). 2007: 509-512
- [13] Sauvola J, Seppanen T, Haapakoski S, et al. Adaptive document binarization[C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR). IEEE. 1997: 147-152
- [14] Vigiensoni G, Burlet G, Fujinga I. Optical measure recognition in common music notation[C]//Proceedings of International Symposium/Conference on Music Information Retrieval (ISMIR). 2013: 125-130
- [15] Pinto T, Rebelo A, Giraldi G, et al. Music score binarization based on domain knowledge[M]//Pattern Recognition and Image Analysis. Springer Berlin Heidelberg, 2011: 700-708
- [16] Guo J, Liu X Y, Wu B, et al. Binarisation method for images acquired under non-uniform illumination [J]. Computer Applications and Software, 2014, 31(3): 183-188 (in Chinese)
郭佳, 刘晓玉, 吴冰, 等. 一种光照不均匀图像的二值化方法[J]. 计算机应用与软件, 2014, 31(3): 183-188
- [17] Su B, Lu S, Tan C L. Robust document image binarization technique for degraded document images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(4): 1408-1417
- [18] Xu H Y, Ma L L, Wu J. Document image binarization based on background estimation and edge detection [J]. Computer Applications and Software, 2014, 31(8): 196-200 (in Chinese)
许海洋, 马龙龙, 吴健. 基于背景估计和边缘检测的文档图像二值化[J]. 计算机应用与软件, 2014, 31(8): 196-200
- [19] Zhang J R, Wang L J. Improved binarization algorithm of modified QR code image [J]. Modern Electronics Technique, 2014, 37(7): 56-58 (in Chinese)
张继荣, 王利军. 一种改进的 QR 码图像二值化算法[J]. 现代电子技术, 2014, 37(7): 56-58
-
- (上接第 309 页)
- [5] Liang D, Huang Q, Jiang S, et al. Mean-shift blob tracking with adaptive feature selection and scale adaptation[C]//IEEE International Conference on Image Processing, 2007 (ICIP 2007). IEEE, 2007: 369-372
- [6] Zhu Q P, Yan J, Zhang H, et al. Real-time tracking using multiple features based on compressive sensing[J]. Opt. Precision Eng, 2013(2): 437-444 (in Chinese)
朱秋平, 颜佳, 张虎, 等. 基于压缩感知的多特征实时跟踪[J]. 光学精密工程, 2013(2): 437-444
- [7] Mao Zheng, Yuan Jian-jian, Wu Zhen-rong, et al. Real-time compressive tracking based on online feature selection[J]. Opt. Precision Engineering, 2014, 22(3): 730-736 (in Chinese)
毛征, 袁建建, 吴珍荣, 等. 基于在线特征选择的实时压缩跟踪[J]. 光学精密工程, 2014, 22(3): 730-736
- [8] Zhong Quan, Zhou Jin, Wu Qin-zhang, et al. An Improved Real-time Compressive Tracking[J]. Opt. Opto-Electronic Engineering, 2014(4): 1-8 (in Chinese)
钟权, 周进, 吴钦章, 等. 一种改进的实时压缩跟踪算法[J]. 光电工程, 2014(4): 1-8
- [9] Shi W Z, Ning J F, Yan Y F. Feature selection and target model updating in compressive tracking [J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(6): 932-939 (in Chinese)
石武祯, 宁纪锋, 颜永丰. 压缩感知跟踪中的特征选择与目标模型更新[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(6): 932-939
- [10] Luo H L, Zhong B K, Kong F S. Object tracking algorithm by combining the predicted target position with compressive tracking[J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(6): 875-885 (in Chinese)
罗会兰, 钟宝康, 孔繁胜. 结合目标预测位置的压缩跟踪[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(6): 875-885
- [11] Jiao Li-cheng, Yang Shu-yuan, Liu Fang, et al. Development and prospect of compressive sensing [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(7): 1651-1662 (in Chinese)
焦李成, 杨淑媛, 刘芳, 等. 压缩感知回顾与展望[J]. 电子学报, 2011, 39(7): 1651-1662
- [12] Dai Q H, Fu C J, Ji X Y. Research on compressed sensing[J]. Chinese Journal of Computers, 2011, 34(3): 425-434 (in Chinese)
戴琼海, 付长军, 季向阳. 压缩感知研究[J]. 计算机学报, 2011, 34(3): 425-434
- [13] Achlioptas D. Database-friendly random projections: Johnson-Lindenstrauss with binary coins [J]. Journal of computer and System Sciences, 2003, 66(4): 671-687
- [14] Diaconis P, Freedman D. Asymptotics of graphical projection pursuit [J]. Annals of Statistics, 1984, 12(3): 228-235
- [15] Papageorgiou C P, Oren M, Poggio T. A general framework for object detection[C]//Sixth International Conference on Computer Vision, 1998. IEEE, 1998: 555-562
- [16] Viola P, Jones M J. Robust real-time face detection[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 57(2): 137-154
- [17] Cao Ying, Miao Qi-guang, Liu Jia-chen, et al. Advance and Prospects of AdaBoost Algorithm[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(6): 745-758 (in Chinese)
曹莹, 苗启广, 刘家辰, 等. AdaBoost 算法研究进展与展望[J]. 自动化学报, 2013, 39(6): 745-758
- [18] Zhou S R, Yin J P. LBP texture feature based on Haar characteristics [J]. Journal of Software, 2013, 24(8): 1909-1926 (in Chinese)
周书仁, 殷建平. 基于 Haar 特性的 LBP 纹理特征[J]. 软件学报, 2013, 24(8): 1909-1926