

基于人眼视觉的无参考彩色图像质量评价方法

苗敏婧, 易尧华

(武汉大学, 武汉 430079)

摘要: **目的** 研究如何自动评价相机拍摄图像的质量问题, 针对其可能存在的失真类型特点, 提出基于人眼视觉的无参考彩色自然图像质量评价方法。 **方法** 利用颜色恒常性和人眼视觉掩盖效应, 分别计算色偏和模糊程度, 并对相机拍摄图像进行测试; 利用佳能EOS700D相机拍摄图像, 对可能出现的失真进行组合测试, 并与主流评价模糊图像的算法如G-SSIM, GSIM及色偏评价方法进行比较。 **结果** 实验发现, 综合评价指标计算值与图像质量人眼评价值成反比; 图像质量越差, 综合评价指标计算值越高。 **结论** 无参考彩色自然图像质量评价方法, 适合相机拍摄图像的无参考图像质量评价, 可以开发集成到相机的辅助功能中。

关键词: 彩色自然图像; 无参考评价方法; HVS; 色偏计算

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)03-0113-06

No-reference Color Image Quality Assessment Method Based on HVS

MIAO Min-jing, YI Yao-hua

(Wuhan University, Wuhan 430079, China)

ABSTRACT: To study the method for automatic evaluation of image quality taken by cameras, and to propose no-reference color image quality assessment method based on HVS targeting at the features of the possible distortion types. Color constancy and human visual masking effect were used to calculate the degree of color shift and blur, respectively, and to test the images taken by cameras. With the images taken by the cannon EOS700D camera, the possible distortions were tested in combinations, and comparison was made with the mainstream algorithms for assessing blurred images such as G-SSIM, GSIM and color cast evaluation method. The results showed that the calculated value of the comprehensive assessment index was inversely proportional to the assessment value of the image quality given by the observers. As the index of the image quality assessment grew, the quality of the image was declining. The no-reference color natural image quality assessment method was suitable for no-reference color image quality assessment of photos taken by cameras, and can be developed and integrated to the auxiliary function of camera.

KEY WORDS: color natural image; NR-IQA; HVS; color cast calculation

随着高速网络的应用和电子成像设备的普及, 人们对自主获取的图像质量要求越来越高, 而作为图像获取最主要的来源之一, 照相机获取的图像质量也因此受到更多的关注。图像质量评价主要分为主观和客观评价。主观评价依靠人眼观察评价图像质量, 准确度最高, 但是却费时费力, 易受评价环境、观察者背景条件等因素影响, 无法应用到实际的图像评价系统

中^[1-2]; 客观评价方法按照对原始参考图像的依赖程度, 可分为全参考型(Full Reference, FR)、部分参考型(Reduced Reference, RR)和无参考型(No Reference, NR)等3类。全参考型是目前进行客观评价最有效的方法^[3], 但通常利用照相机拍摄的图像, 其参考图像很难获得。由此, 对照相机拍摄图像的质量评价需利用无参考型质量评价方法。

收稿日期: 2014-09-03

基金项目: 国家科技支撑计划(2013BAH03B01); 广东省教育部产学研结合重大专项(2012A090300017)

作者简介: 苗敏婧(1990—), 女, 江苏泰州人, 武汉大学硕士生, 主攻图像质量评价。

通讯作者: 易尧华(1976—), 男, 江西吉安人, 博士, 武汉大学教授、博士生导师, 主要研究方向为数字成像和色彩管理。

近年来,对无参考图像质量评价的研究非常活跃,主要可以分为3个方向:针对失真类型的方法^[4]、基于训练的评价方法和自然场景统计方法(Natural Scene Statistics, NSS)。第2种和第3种方法虽然对图像失真具有普适性,但是算法复杂,计算过程不简便。而且照相机在采集图像时受光照条件和相机参数等因素影响,会产生模糊和色偏等2种失真。针对相机拍摄图像的质量评价最具优势的方法即是对这两方面失真进行综合考量。

目前,对无参考模糊图像评价算法较多,主要利用边缘强度计算作为图像模糊度指标^[5-6],方法简单易行,可以取得较好的评价效果。近年来,模糊评价的研究重心主要在结合HVS和结构相似度算法上^[7-9],其考虑了人眼的视觉特性,通过构建参考图像方法计算其结构相似度来评价图像质量,评价结果与人眼主观评价匹配度较高,但是该方法对照相机拍摄图像的质量评价并不完全适用,因为该类型算法并未考虑由于场景限制导致的色偏问题。对于无参考图像而言,图像色偏最常用且有效的方式为等效圆检测法。为此,在基于人眼视觉的模糊度评价基础上加入色偏程度评价。实验结果表明,提出方法的评测结果与人眼视觉评价相关性强,能够很好地反映相机采集图像的视觉感知效果,且易集成到业务化运行的系统软件中,在照相机增值服务开发上有很好的应用价值。

1 光学图像的视觉特性

1.1 对比度掩膜对光学图像视觉特性影响

对比度掩膜^[10]是指由于图像具有相近空间位置和频率内容的参考图像的影响,原始图像某些部分的可视度会有所降低。也就是当激励A存在时,造成人眼对激励B的感知被加强或减弱的现象。由于该特性的存在,图像中某些失真会被忽略,而某些失真则会被人眼强化。

1.2 模糊对光学图像视觉特性影响

由照相机采集的光学图像模糊主要有2种^[11],一种是由于CCD或CMOS对光线的衍射效应,使目标物体所成的影像变得模糊,即散焦模糊;另一种则是由于聚焦失误或是拍摄时的相对运动造成的运动模糊^[11-12]。在实际仿真过程中,采用Guass滤波器对原始图像进行模糊滤波来模拟这2类模糊,且滤波器的

带宽决定失真图像的模糊程度。

模糊对光学图像视觉特性影响的对比见图1。图1b为图1a经过大小为 11×11 ,方差为1.5的高斯模糊处理后的图像;图1c为图1b同样经过大小为 11×11 ,方差为1.5的高斯模糊处理后的图像,从对比来看,图1a到图1b的感觉失真程度要比图1b到图1c的感觉失真程度大。



图1 模糊对光学图像视觉特性影响对比

Fig.1 Comparison of the effect of blur on the visual characteristics of optical images

从图1中各大、小椭圆框选图像的对比可以发现,图像越模糊,滤波器产生的影响越小,而且滤波器主要影响图像中的边界丰富区域。这里对于模糊的测量,主要关注低通滤波器对于图像中以边界点为中心的强边界像素块的影响。

1.3 颜色恒常性对图像彩色失真影响

人的视觉系统具有颜色恒常性^[13],能够在一定程度上消除光照条件等对颜色的影响,正确地感知物体的颜色。由于成像设备不具有这种“调节”功能,因此成像设备采集图像的颜色与物体表面的真实颜色之间存在一定程度的误差,即光学图像的彩色失真。彩色失真程度与外界光照的色温有很大关系,一般光源色温较高时,采集图像的颜色偏蓝,而光源较低时则偏红。虽然绝大多数相机都使用白平衡处理,但是在获取光学图像时仍不可避免地出现彩色失真。

2 彩色自然图像的质量评价

在分析光学图像的视觉特性基础上,提出了基于结构相似度和等效圆色偏程度检测的无参考彩色自然图像质量评价方法,算法流程见图2。下面介绍其算法的具体实现步骤。

2.1 色偏因子计算

数码相机在采集图像时受环境光源等诸多因素

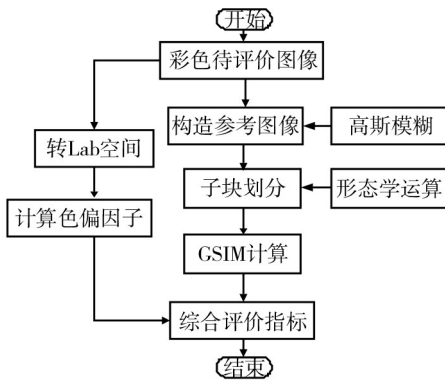


图2 算法流程

Fig.2 The workflow of the algorithm

影响,拍摄图像的色彩与被拍摄物体表面的真实色彩之间存在一定程度的误差,即色偏。图像色偏的存在影响人眼对图像质量的视觉判断。因而如何计算色偏对人眼视觉的影响是研究的重点。

色偏大小与外界光线的色温有很大关系,一般色温高时所拍摄图像的色彩偏蓝,色温低时则偏红。目前,在图像质量评价中未从引起图像色偏的源头出发研究色偏,而多采用色差计算公式来判断图像的色偏程度,但数码相机获取的图像原始色度值难以获取,因而对这类图像的质量评价仍没有很好的解决办法。

这里采用基于图像分析的色偏判断方法。首先对彩色待评价图像进行颜色空间转换,在Lab颜色空间内利用二维直方图色度分布情况来判断图像色偏情况。引入图像平均色度比色度中心距的方法来衡量图像的色偏程度,其比值为 K 因子,计算方法为:

$$d_a = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N a}{M \times N}, d_b = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N b}{M \times N} \quad (1)$$

$$D = \sqrt{d_a^2 + d_b^2} \quad (2)$$

$$T_a = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (a - d_a)^2}{M \times N}, T_b = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (b - d_b)^2}{M \times N} \quad (3)$$

$$T = \sqrt{T_a^2 + T_b^2} \quad (4)$$

$$K = D/T \quad (5)$$

$$K = \begin{cases} 1, & \text{if } K \leq 1.0 \\ K, & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

其中, M, N 分别为图像的宽和高,以像素为单位;在 $a-b$ 色度平面上,等效圆的中心坐标为 (d_a, d_b) ,半径为 T ; D 为等效圆的中心到 $a-b$ 色度平面中性轴的原点($a=0, b=0$)的距离。由等效圆在 $a-b$ 色

度平面上的具体位置来判断图像整体的偏色程度, $d_a > 0$ 则图像整体偏红, 否则则偏绿; $d_b > 0$ 则图像整体偏黄, 否则偏蓝。色偏因子 K 越大, 偏色越严重。经过多次试验分析整理, 发现色偏因子 $K \leq 1.0$ 时, 其整体图像色偏可能性不大, 即可认为不存在影响人视觉判断图像质量的色偏。

2.2 构造参考图像

使用 11×11 且 $\sigma^2=1$ 的高斯低通滤波器, 对彩色待评价图像进行模糊滤波处理, 得到对应的模糊图像, 并将其作为参考图像。

2.3 边缘膨胀图像构造及子块划分

采用形态学运算方式对边缘图像进行处理。其子块划分步骤如下。

1) 边缘提取。利用sobel算子提取待评价图像的边缘图。

2) 形态学运算。利用 4×4 的菱形(diamond)结构元素, 对步骤1中边缘图像进行膨胀处理, 得边缘膨胀图像。

3) 提取边缘块。将边缘膨胀图像均分为 8×8 的子块, 每个子块只有当其均在边缘膨胀区域内时为边缘膨胀块, 否则划分为平滑块。

4) 子块划分。将待评价图像和构造的参考图像, 按照步骤3中位置划分边缘膨胀块和平滑块。

2.4 基于梯度的结构相似度计算

研究发现, 人眼对图像边缘和结构信息^[14]最为敏感。对图像清晰度好坏的判断多取决于对图像边缘轮廓的判断。常用的结构相似度算法充分考虑了图像结构信息, 但对模糊图像的评价效果不明显, 主要是缺少对边缘结构信息的度量。加入梯度运算刚好可以很好地弥补结构相似度的不足, 可以更好地用来评价图像的清晰程度。这里利用基于梯度的结构相似度算法, 计算图像的GSIM。其梯度计算见图3。

$$G_x = \max_{k=1,2,3,4} \{ \text{mean2}(|x \cdot M_k|) \} \quad (7)$$

$$\text{GSIM}(x, y) =$$

$$\frac{2 \sum_j \sum_i G_x(i, j) \times G_y(i, j) + C_1}{\sum_j \sum_i (G_x(i, j))^2 + \sum_j \sum_i (G_y(i, j))^2 + C_1} \quad (8)$$

其中, x, y 分别为待评价图像和参考图像。

0	0	0	0	0
1	3	8	3	1
0	0	0	0	0
-1	-3	-8	-3	-1
0	0	0	0	0

a M₁

0	0	1	0	0
0	8	3	0	0
1	3	0	-3	-1
0	0	-3	-8	0
0	0	-1	0	0

b M₂

0	0	1	0	0
0	0	3	8	0
-1	-3	0	3	1
0	-8	-3	0	0
0	0	-1	0	0

c M₃

0	1	0	-1	0
0	3	0	-3	0
0	8	0	-8	0
0	3	0	-3	0
0	1	0	-1	0

d M₄

图3 梯度计算掩膜

Fig.3 Gradient calculation masks

2.5 综合评价指标计算

在待评价图像和模糊图像中,找到与边缘膨胀图边缘膨胀子块相对应的子块,并计算它们之间对应的GSIM值。所得的全部GSIM指数的均值作为最终原始输入图像的模糊估计值,其计算公式为:

$$GSIM=\frac{1}{M}\sum_{i=1}^M GSIM_i$$
 (9)

式中,M为边缘膨胀块的个数;GSIM_i为待评价图像和模糊图像对应边缘膨胀块之间的GSIM。GSIM越大,表示待评价图像的质量越差,反之,则质量较好。

将色偏程度和模糊估计值归一化后相乘,并以此作为数码相机拍摄图像质量评价的综合指标值CIQA,其计算公式为:

$$CIQA=GSIM\times K$$
 (10)

CIQA 越小,则待评价图像的质量越好。

3 实验与结果分析

实验采用MATLAB 2009进行算法实现和数据分析。实验数据来源为LIVE数据库^[15]及Canon EOS700D拍摄图像,并与主流评价模糊图像的算法如G-SSIM^[14]、GSIM及色偏评价方法进行比较。

3.1 同一图像不同程度模糊准确性验证

测试图见图4。图4a为LIVE数据库中的参考图像,图4b—d为该数据库中不同程度模糊的womanhat测试图。其无参考评价指标计算结果见表1。

由人眼可以判断出图4a—d的图像质量为递减关系,且由此可以看出,G-SSIM与人眼评测的结果并不能完全吻合,计算值不是递增关系,而GSIM值、K及CIQA值都表现出了很好的递进关系。由于测试图像数量限制,色偏因子在模糊度测度上的不足不能很好地证明,但可以证明综合评价指标,可以准确判断模糊失真对人眼造成的视觉影响差异。



a 参考图像 b 模糊图像1 c 模糊图像2 d 模糊图像3

图4 不同程度模糊的womanhat测试图

Fig.4 Womanhat test images with different blur level

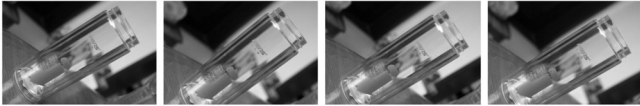
表1 测试结果比较

Tab.1 Comparison of test results

图号	G-SSIM	GSIM	K	CIQA
图4a	0.8582	0.9401	0.6604	0.3208
图4b	0.9967	0.9968	0.8373	0.8346
图4c	1	0.9994	0.8810	0.8805
图4d	0.9998	1	1	1

3.2 同一图像不同程度色偏准确性验证

使用的测试图见图5,测试结果见表2。测试图利用Canon EOS700D在不同白平衡下对杯子的拍摄效果图。



a 偏蓝测试图 b 正常白平衡下测试图 c 偏红测试图 d 严重偏红测试图

图5 不同程度色偏测试图

Fig.5 Test images with different color cast

表2 测试结果比较

Tab.2 Comparison of test results

图号	G-SSIM	GSIM	K	CIQA
图5a	0.9906	0.9769	0.1791	0.1750
图5b	0.9920	0.9796	0.1791	0.1755
图5c	1	1	0.3412	0.3412
图5d	0.9943	0.9923	0.6556	0.6505

由人眼可以判断出,图5a—d的图像质量成递减关系,而由表2可以看出,G-SSIM和GSIM并不能评价此类失真,计算指标与人眼观察不符,其计算值不是递增关系;而色偏因子计算以及综合指标可以很好地评价出图像质量。

3.3 同一图像2种失真共存时准确性验证

测试图见图6,经过人眼观察比较,综合得出的结

论是图像质量呈下降趋势,其测试结果见表3。

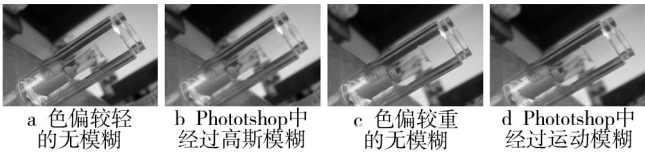


图6 2种失真共存的测试图

Fig.6 Test images with two types of image distortion

表3 测试结果比较
Tab.3 Comparison of test results

图号	G-SSIM	GSIM	K	CIQA
图6a	0.9684	0.9517	0.3489	0.3320
图6b	1	1	0.3901	0.3901
图6c	0.9628	0.9442	0.9612	0.9076
图6d	0.9945	0.9965	1	0.9965

由表3可以看出,CIQA对色偏和模糊同时存在的图像也具有较好的判别能力。

4 结语

针对目前数码相机采集图像质量评价方法无法兼顾图像失真的所有类型,提出了基于人眼视觉的无参考彩色自然图像模糊度评价方法。该方法充分考虑了造成数码相机图像失真色偏和模糊两大原因,并针对这两大失真提出质量测度方法。实验结果分析表明,该方法评价效果符合人眼视觉判断,可以有效地用于相机拍摄图像质量自甄别。

参考文献:

[1] WANG Z, SHEIKH H R, BOVIK A C. Objective Video Quality Assessment, in: FURHT B, MARQUIRE O (Eds.), The Handbook of Video Database: Design and Applications [M]. Boca Raton: CRC Press, 2003: 1041—1078.

[2] 张烨. 基于视觉感知的图像质量评价方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.

ZHANG Ye. Research on Image Quality Assessment Based on HVS[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.

[3] SHEIKH H R, SABIR M F, BOVIK A C. A Statistical Evaluation of Recent Full Reference Image Quality Assessment Algorithms[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15 (11): 3440—3451.

[4] 谢小甫,周进,吴钦章. 一种针对图像模糊的无参考质量评价指标[J]. 计算机应用, 2010, 30(4): 921—924.

XIE Xiao-pu, ZHOU Jin, WU Qin-zhang. No-reference

Quality Index for Image Blur[J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(4): 921—924.

[5] CAVIEDES J, GURBUZ S. No-reference Sharpness Metric Based on Local Edge Kurtosis[C]// Processing Washington D C: IEEE Computer Society, 2002: 53—56.

[6] MARZILIANO P, DUFAUX F, WINKLER S, et al. Perceptual Blur and Ringing Metrics: Applications to JPEG2000[J]. Signal Processing: Image Communication, 2004, 19(2): 163—172.

[7] CRET F, DOLMIERE T, LADRET P, et al. The Blur Effect; Perceptual Blur Metric[C]// Proceedings of the SPIE Conference on Human Vision and Electronic Image XII Bellingham WA: SPIE Press, 2007.

[8] FERZLI R, KARAM L J. A No-reference Objective Image Sharpness Metric Based on the Notion of Just Noticeable Blur (JNB)[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2009, 18 (4): 717—728.

[9] HASSEN R, WANG Z, SALAMA M. No-reference Image Sharpness Assessment Based on Local Phase Coherence Measurement[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech & Signal Processing Washington D C: IEEE Computer Society, 2010: 2434—2437.

[10] 邵宇,孙富春,李洪波. 基于视觉特性的无参考型遥感图像质量评价方法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2013, 53 (4): 550—555.

SHAO Yu, SUN Fu-chun, LI Hong-bo. No-reference Remote Sensing Image Quality Assessment Method Using Visual Properties[J]. J Tsinghua Univ: Sci & Tech, 2013, 53 (4): 550—555.

[11] 袁万立,李朝锋. 结合HVS及SSIM的无参考模糊图像评价方法[J]. 计算机工程与应用. 2013, 49(1): 210—212.

YUAN Wang-li, LI Chao-feng. No-reference Blur Image Quality Metric Combining HVS with SSIM[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(1): 210—212.

[12] 桑庆兵,苏媛媛,李朝锋,等. 基于梯度结构相似度的无参考模糊图像质量评价[J]. 光电子·激光, 2013, 24(3): 573—577.

SANG Qing-bing, SU Yuan-yuan, LI Chao-feng, et al. No-reference Blur Image Quality Assessment Based on Gradient Similarity[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2013, 24 (3): 573—577.

[13] 李峰,金红. 基于图像分析的数字图像色偏检测方法[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2004, 25(5): 430—433.

LI Feng, JIN Hong. Approach to Detect Digital Image Color Cast Based on Image Analysis[J]. Journal of Jiangsu University; Natural Science Edition, 2004, 25(5): 430—433.

[14] 杨春玲,旷开智,陈冠豪,等. 基于梯度的结构相似度的图

像质量评价方法[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2006, 34(9): 22—25.

YANG Chun-ling, KUANG Kai-zhi, CHEN Guan-hao, et al. Gradient-based Structural Similarity for Image Quality Assessment[J]. Journal of South China University of Technology:

Natural Science Edition, 2006, 34(9): 22—25.

[15] SHEIKH H R, WANG Z, CORMACK L, et al. LIVE Image Quality Assessment Database Release2 2004[EB/OL]. <http://live.ece.utexas.edu/research/quality>.

(上接第97页)

出了运用码盘和光电开关实现烟箱的精确定位,采用分拣脉冲修正算法,提高了烟箱分拣的正确率,系统已投入运行。实际运行结果表明:该系统运行可靠,分拣正确率可提高到100%,减轻了分拣人员的工作量,提高了生产效率,达到了方案设计的预期目的。

参考文献:

[1] 付伟. PLC在材料自动分拣系统中的应用[J]. 制造业自动化, 2012, 34(6): 136—138.

FU Wei. Application of PLC in Automatic Sorting System[J]. Manufacturing Automation, 2012, 34(6): 136—138.

[2] 邢军. 解析GB 5606.3—2005《卷烟包装、卷制技术要求及贮运》[J]. 烟草科技, 2005(11): 45—48.

XING Jun. Analysis of GB 5606.3—2005《Cigarette Packaging, Rolling Technical Requirements and Transportation》[J]. Tobacco Science & Technology, 2005(11): 45—48.

[3] 王燕庆. 卷烟厂物流库夹抱合分机控制方式的改进[J]. 烟草科技, 2013(7): 20—23.

WANG Yan-qing. Improvement of Control Mode for Clamping Machine in Logistics Depot of Cigarette Factory[J]. Tobacco Science & Technology, 2013(7): 20—23.

[4] JANE Chin-chia, LAIH Yih-wenn. A Clustering Algorithm for Item Assignment in a Synchronized Zone Order Picking system[J]. European Journal of Operational Research, 2005, 166(2): 489—496.

[5] 杨启成, 袁国旺, 陈勇, 等. 红塔卷烟自动分拣系统的应用研究[J]. 烟草科技, 2007(5): 18—21.

YANG Qi-cheng, YUAN Guo-wang, CHEN Yong, et al. Application of Hongta Automatic Cigarette Sorting-picking System[J]. Tobacco Science & Technology, 2007(5): 18—21.

[6] 方泳, 袁召云. 基于网络图法的卷烟分拣排程的算法与应用[J]. 烟草科技, 2011(1): 18—22.

FANG Yong, YUAN Zhao-yun. Algorithm of Cigarette Sorting Scheduling Basing on Network Graph and Its Application[J]. Tobacco Science & Technology, 2011(1): 18—22.

[7] 姜克森. 烟箱分拣自动控制系统的设计[D]. 郑州: 郑州轻工业学院, 2013.

JIANG Ke-sen. The Design of Cigarette Packaging Box Sort-

ing System of Automatic Control[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2013.

[8] WU Yao-hua, ZHANG Yi-gong, WU Ying-ying. Compressible Virtual Window Algorithm in Picking Process Control of Automated Sorting System[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering: English Edition, 2008, 21(3): 41—45.

[9] 孙大伟, 王晖, 赵举峰. 基于PLC的烟箱自动分拣系统[J]. 河南科技, 2012(11): 78—79.

SUN Da-wei, WANG Hui, ZHAO Ju-feng. Automatic Control System for Smoke Box Sorting Based on PLC[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2012(11): 78—79.

[10] 胡向东, 刘京诚, 余成波. 传感器与检测技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

HU Xiang-dong, LIU Jin-cheng, YU Cheng-bo. Sensors & Testing Technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.

[11] 金美华. 基于PLC的滑块自动分拣系统[J]. 制造业自动化, 2011, 33(11): 138—140.

JIN Mei-hua. The Design of Based on PLC Logistics Sorting System[J]. Manufacturing Automation, 2011, 33(11): 138—140.

[12] 杨启成, 袁国旺, 陈勇, 等. 红塔卷烟自动分拣系统的应用研究[J]. 烟草科技, 2007(5): 18—21.

YANG Qi-cheng, YUAN Guo-wang, CHEN Yong, et al. Application of Hongta Automatic Cigarette Sorting-picking System[J]. Tobacco Science & Technology, 2007(5): 18—21.

[13] 陈立兵. 基于组件模块化的数控折弯机控制系统研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.

CHEN Li-bing. Investigation of CNC Bending Control System Based on Component Modular[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2012.

[14] 王永华. 现代电气控制及PLC应用技术(第2版)[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.

WANG Yong-hua. Modern Electrical Control and the Application of PLC Technology (The Second Edition) [M]. Beijing: Press of BUAA, 2008.

[15] 廖常初. 大中型PLC应用教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

LIAO Chang-chu. Large and Medium-sized PLC Application Tutorial[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.