

时空域 Retinex 颜色校正算法的 ZedBoard 实现

周家豪^{1,2} 李佩玥¹ 杨怀江¹

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室 长春 130033)¹

(中国科学院大学 北京 100039)²

摘要 提出了基于白平衡理论的时空域 Retinex 颜色校正算法,并且针对该算法的计算复杂度较高、在实时性要求较高的领域存在较大的局限性等缺点,设计了基于白平衡理论的时空域 Retinex 颜色校正算法的硬件平台。利用 ZedBoard 开发板上的 PS 和 PL 资源对输入的多帧低光照下采集的图像进行白平衡处理,提取场景光照信息图像,然后高效地实现 Retinex 颜色校正算法,向投影仪输出反映物体固有颜色的反射系数信息图像。用柯尼卡美能达 CL200A 色温照度计采集投影光的颜色数据,数据显示,校正算法扩展了图像的色域范围,使其更加接近标准色坐标的色域范围,校正后的白点更加靠近标准白点,提高了色彩分辨率,解决了色偏问题。比较了在 PC 上用 MATLAB 实现的耗时和在 ZedBoard 上实现的耗时,结果表明在 ZedBoard 上的耗时降低了接近两个数量级。

关键词 Retinex, 白平衡理论, 颜色校正, 嵌入式, OpenCV

中图分类号 TP751.1 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.07.052

Implementation of Time-Spatial Domain Retinex Color Correction Algorithm on ZedBoard

ZHOU Jia-hao^{1,2} LI Pei-yue¹ YANG Huai-jiang¹

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)¹

(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)²

Abstract The time-spatial domain retinex color correction algorithm based on white balance was proposed. Hardware platform was designed owing to its high computational complexity and bad real-time quality to realize the algorithm. ZedBoard uses resources of PL and PS to execute white balance processing, extracts light information, and then achieves retinex color correction algorithm efficiently. Eventually projector exports reflection coefficient information images representing objects inherent color. Color data of projection light are collected by color light meter named CL200A from Konica Minolta. Data show that the algorithm spreads color gamut of images to make it approach the standard. And white pixels after being corrected are closer to the standard white pixels. Color resolution is improved and color cast is solved. Compared with time cost of the algorithm's implementation on PCs, time cost on ZedBoard is reduced about two orders of magnitude.

Keywords Retinex, White balance, Color correction, Embedded, OpenCV

1 引言

人类视觉系统具有颜色恒常性,为人类提供了对真实世界的色觉感知,将丰富多彩的真实世界呈现在人类的眼前。由于数字图像采集设备并不具有颜色恒常性,因此当场景中的光照条件发生变化时,数字图像采集设备采集到的图像会或多或少受到光照条件的影响,从而导致图像发生颜色偏移^[1]。基于 Retinex 颜色恒常性理论的颜色校正算法^[2-3]自提出以来,经过国内外研究学者的研究、改进和完善,到目前为止已经形成了一个完整的理论体系。

经典的 Retinex 颜色校正算法^[4-5]大多是针对单帧图像的颜色校正,通过从输入图像中估计出场景的光照信息,然后将场景光照信息从输入图像中剔除,得到物体固有的反射系数图像^[6]。但是,低光照图像由于受到光照因素的影响,色偏非常严重,信噪比低,从单帧图像中能够获取的有关场景的光照信息很有限。相比单帧图像,低光照环境下短时间内采集的连续多帧图像可以提供更丰富的场景光照信息。多帧图像之间存在较强的相关性,因此利用在低光照环境下采集的同一场景的连续多帧图像能够更精确地估计出场景的光照信息,有助于提升图像颜色校正的效果。在分析低光照图像特

到稿日期:2016-05-29 返修日期:2016-08-19 本文受国家“863”计划资助项目(2014AA032900)资助。

周家豪(1992—),男,硕士生,主要研究方向为图像视频处理、嵌入式开发,E-mail:aaron2015box@outlook.com;李佩玥(1985—),男,博士,副研究员,主要研究方向为嵌入式系统、精密驱动与控制技术,E-mail:lipy@sklao.ac.cn;杨怀江(1966—),男,研究员,博士生导师,主要研究方向为光学信息融合、深紫外光刻技术,E-mail:yanghj@sklao.ac.cn。

性^[7-8]的基础上,结合 Retinex 颜色恒常性理论,将传统的 Retinex 颜色校正算法推广到在低光照场景中采集的多帧图像,提出与之对应的基于白平衡理论的时空域 Retinex 颜色校正算法。基于白平衡理论的时空域 Retinex 颜色校正算法利用白平衡理论从多帧低光照图像中提取场景光照信息,然后从多帧图像加权平均后得到的图像信息中剔除光照信息,最后得到物体固有的反射系数信息。

基于白平衡理论的时空域 Retinex 颜色校正算法的计算复杂度较高,实时性较差。基于 Xilinx Zynq-7000 SoC 的全可编程器件 ZedBoard 嵌入式开发板能够在有效改善算法的基础上实现此算法,提高了算法的性能。利用 vivadohls 高级综合工具编写可综合的 C 语言程序,实现时空域 Retinex 颜色校正算法的硬件 IP 设计,在 vivado 中集成 IP,进而实现算法的硬件设计。搭建好硬件系统之后,借助 Xilinx 的 SDK 集成环境进行软件设计,控制硬件系统实现算法,对预定义的低光照非正常光场景下采集的图像进行颜色校正,并把结果输出到投影机,用柯尼卡美能达 CL-200A 色温照度计获取投影光的颜色信息,将其与正常光照场景中的图像进行比较,对比算法的颜色校正效果。同时,在 PC 上用 MATLAB 实现时空域 Retinex 颜色校正算法,用于处理相同的多帧图像,对比两种实现方式的效率。

2 时空域 Retinex 颜色校正算法

2.1 基于 Retinex 的颜色恒常性理论

Retinex 理论认为数字图像采集设备采集的原图像是由场景中的光照信息图像和物体固有反射系数图像组成。因此 Retinex 理论的核心思想就是从原始图像中估计出场景中的光照信息图像,然后从原图像中剔除光照信息图像,从而排除光照条件的影响,恢复出物体本身的颜色,达到对图像进行颜色校正的目的。Retinex 理论的基本原理可以由式(1)表示:

$$S(x, y) = R(x, y) \cdot L(x, y) \quad (1)$$

其中, $S(x, y)$ 表示数字图像采集设备采集到的原图像, $L(x, y)$ 表示场景中的光照信息图像, $R(x, y)$ 表示物体固有的反射系数图像,即物体本身的真实颜色。为了降低运算量,一般将式(1)转换到对数域上操作,如下式所示:

$$\log S(x, y) = \log R(x, y) + \log L(x, y) \quad (2)$$

式(2)可以简化为式(3):

$$s(x, y) = r(x, y) + l(x, y) \quad (3)$$

基于 Retinex 理论的颜色校正算法的一般流程如图 1 所示。

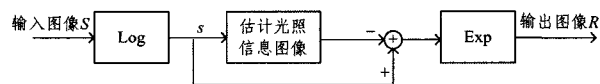


图 1 Retinex 颜色校正算法的一般流程

为了得到场景中物体的真实颜色信息 $R(x, y)$, 必须从原图像 $S(x, y)$ 中估计出场景中的光照信息图像 $L(x, y)$, 所以基于 Retinex 理论的颜色校正算法的核心思想就是如何准确地估计出场景中的光照信息图像 $L(x, y)$ 。

2.2 基于时空域的白平衡理论

在不同光照条件下,图像传感器输出的图像会受到光照

条件影响,造成图像颜色失真。白平衡^[9]就是对场景中的白色物体颜色进行还原。白平衡算法是在对图像做出各种各样假设的基础上实现图像颜色校正。经典的白平衡算法包括灰度世界假设算法和镜面反射算法^[10]。时空域 Retinex 颜色校正算法基于的白平衡理论是镜面反射算法。镜面反射算法假设图像中存在能够完全反射光源色彩的白色反射面,而白色反射面本身并不带有任何色彩,在整个场景中亮度应该是最大的。因此,镜面反射的白平衡算法中最关键的环节在于图像中白色区域的检测。

算法采用的白色区域检测方法是基于 Nakano 提出的经典白色区域检测算法改进而来的。首先,将图像从 RGB 颜色空间转换到 YCbCr 颜色空间,转换公式如式(4)所示:

$$\begin{bmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.257 & 0.564 & 0.098 \\ -0.148 & -0.291 & 0.439 \\ 0.439 & -0.368 & -0.071 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 16 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix} \quad (4)$$

在 YCbCr 颜色空间中, Y 表示图像亮度, Cb 和 Cr 分别表示蓝色和红色的色度分量。在亮度分量 Y 足够大、色度分量 Cb 和 Cr 的值足够小的区域中,可以认为该区域中的所有像素点都是白色的像素点。由于 Cb 和 Cr 之间存在一定的相关性,且 Y 与 Cb 和 Cr 之间也存在一定的相关性;当亮度 Y 值较小时,色度分量 Cb 和 Cr 的值都较小才能接近白色;当亮度 Y 值较大时,色度分量 Cb 和 Cr 的值较大时也可以被认为是白色。因此白色区域的约束条件总结为式(5):

$$Y - |Cb| - |Cr| > \varphi \quad (5)$$

同一场景下多帧图像中的白色区域之间具有很强的信息相关性。因此算法联合多帧低光照图像的时空域信息,利用镜面反射算法估计场景中的光照信息。图 2 给出了利用镜面反射算法对多帧低光照图像进行光照信息估计的流程图。

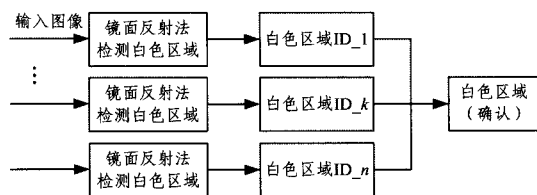


图 2 多帧图像白色区域检测

利用镜面反射法检测每幅输入图像的白色区域,对于每幅图像,可以得到该图中每个像素点是否属于白色像素的 ID 标记。只有该像素点及其他帧中相同位置上的像素点同时被判定为白色像素时,才能最终判定该像素点属于白色像素。其具体公式如式(6)所示:

$$White_{ID}(x, y) = \begin{cases} 1, & White_{ID_1, ID_2, \dots, ID_n}(x, y) = 1 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $White_{ID_1, ID_2, \dots, ID_n}(x, y)$ 表示连续多帧低光照图像各个帧中每个像素是否为白色像素点, 0 表示不是白色像素点, 1 表示是白色像素点。 $White_{ID}(x, y)$ 表示像素点 (x, y) 最终是否被判定为白色像素点。

2.3 像素时空域信息获取

针对同一场景,在短时间内连续采集多帧图像,展开获取的像素矩阵信息,得到帧序列,如图 3 所示。

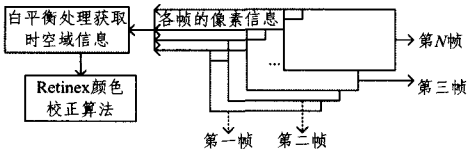


图 3 图像像素时空域信息获取

采集到的图像的每一帧都有包含颜色信息的 RGB 矩阵。不同帧图像在同一像素位置拥有不同时间采集的像素值。因为采集时间短,虽然在噪声等因素的影响下不同帧的同一像素点位置的像素值不一定相同,但其具有很强的信息相关性。这种时空域信息能够增加白色像素区域检测的正确性。综合不同帧图像同一像素位置的白色像素检测结果,能够得到该场景图像中精确的白色像素区域。

2.4 基于白平衡理论的时空域 Retinex 颜色校正算法

对于连续多帧 $N \times M$ 大小的低光照图像,通过镜面反射判定图像的白色区域,然后分别计算白色区域像素点 RGB 3 个分量的平均值,将该 RGB 3 个分量的平均值作为场景中光照信息的总体估计,如下所示:

$$\begin{cases} \hat{L}_R = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^n \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M R_i(x,y) \cdot White_D(x,y) \\ \hat{L}_G = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^n \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M G_i(x,y) \cdot White_D(x,y) \\ \hat{L}_B = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^n \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M B_i(x,y) \cdot White_D(x,y) \end{cases} \quad (7)$$

其中,图像大小为 $N \times M$, n 表示输入的连续图像的帧数, $\hat{L}_R$, $\hat{L}_G$ 和 $\hat{L}_B$ 分别表示估计出来的 RGB 3 个通道的光照信息, $R_i(x,y)$, $G_i(x,y)$ 和 $B_i(x,y)$ 分别表示第 i 帧中位于点 (x,y) 的 RGB 像素值, c 表示归一化因子,具体表达式如式(8)所示:

$$c = n \cdot \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M White_D(x,y) \quad (8)$$

将得到的光照信息 L 和多帧图像的加权融合 S 作为 Retinex 颜色校正算法的输入,最终输出表示物体固有反射系数的图像,其流程如图 4 所示。

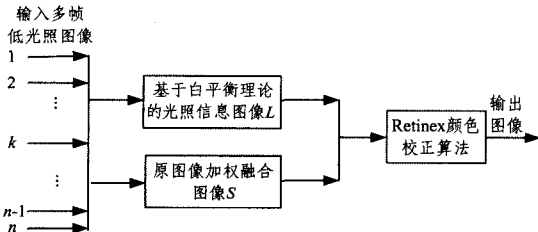


图 4 基于白平衡理论的时空域 Retinex 颜色校正算法

具体步骤如下:

- 第 1 步 利用镜面反射算法对输入的每一帧图像进行白点检测,判定白色区域;
- 第 2 步 联合多帧图像的白色区域检测结果,得到相应位置的白色像素点判定结果,即 $White_D(x,y)$;
- 第 3 步 利用白平衡理论估计出场景光照信息 L ;
- 第 4 步 对输入的多帧低光照图像进行加权平均,得到融合后的图像 S ;
- 第 5 步 将光照信息图像 L 和融合后的图像 S 转换到对数域,得到 l 和 s ;

第 6 步 根据 Retinex 颜色校正理论,剔除融合后的图像 s 中的光照信息图像 l ,得到颜色校正结果 r ;

第 7 步 将颜色校正结果 r 转换到指数域。

3 硬件平台的搭建

3.1 时空域 Retinex 颜色校正算法的 IP 设计

总线标准 AXI4 用于全可编程器件内部 ARM 和 FPGA^[11-13] 之间的高速通信,包含地址、数据和反馈通道,能够实现 ARM 和 FPGA 内部的高速并行数据通信,并且支持 DMA 通信。基于 Vivado HLS 软件,直接用 C 语言编写基于白平衡理论的时空域 Retinex 颜色校正算法(WTSR),然后综合出符合 AXI 标准的 IP。图 5 示出了基于白平衡理论的时空域 Retinex 颜色校正算法的 IP 实现流程。

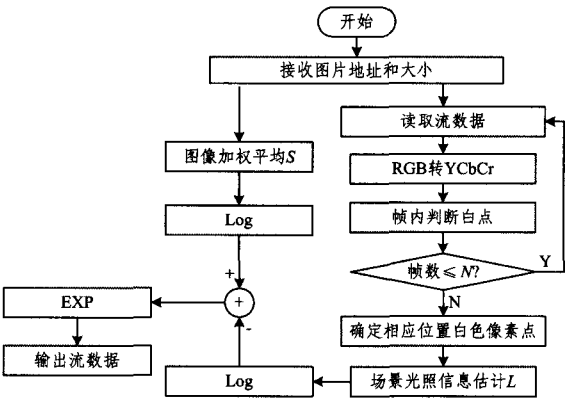


图 5 时空域 Retinex 颜色校正算法的流程

3.2 IP 集成

HLS 综合出算法的硬件 IP 后,利用 Xilinx 公司的 Vivado 软件集成硬件系统所需的 IP,搭建整个硬件系统。图 6 是 IP 集成后的硬件系统结构示意图,该系统包括 ZYNQ 的 PS 子系统、内存间以 HP 通道(DDR 内存和 FPGA 间的高带宽、高速数据通道)直接进行数据通信的 VDMA、GPIO 等 IP,以及自主设计的时空域 Retinex 颜色校正算法 IP 和 VGA 显示 IP。图 6 中 WTSR 为基于白平衡理论的时空域 Retinex 颜色校正算法的 IP 核。

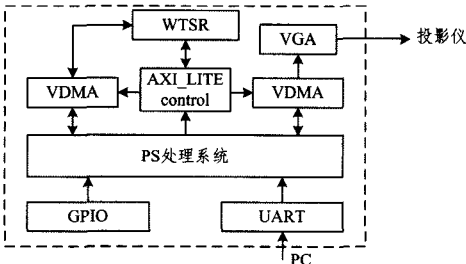


图 6 硬件系统结构

3.3 硬件系统

基于白平衡理论的时空域 Retinex 颜色校正算法的 ZedBoard 实现的硬件平台如图 7 所示。PC 通过 UART 口与 ZedBoard 通信,完成 OpenCV 的移植并实现程序的下载以及各种处理信息和状态值的打印。下位机 ZedBoard 实现基于白平衡理论的时空域 Retinex 颜色校正算法,以及内部模块间的图像数据传输等功能。

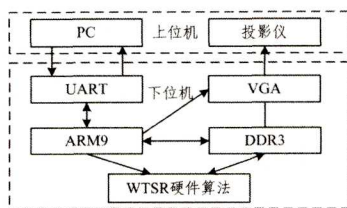


图7 硬件系统平台

4 软硬件协同验证

在硬件系统搭建完成之后,利用 Xilinx 的 SDK 集成开发环境进行软件设计,主要工作包括:初始化、原始图片的接收存储、GPIO 初始化,以及相应算法处理和投影显示输出。

通过 SDK 将编译好的 bootloader 程序、FPGA 配置 bit 文件、裸机程序和原始图像封装成 boot. bin 文件,以 SD 卡启动的方式实现基于 ZedBoard 的投影显示系统。图 8 示出实验系统平台^[14]。

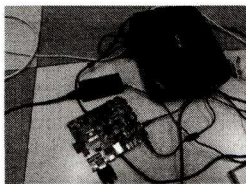


图8 测试平台

实验设计:分别在低光照红色光源、低光照绿色光源、低光照蓝色光源和低光照白色光源下针对 24 标准色卡采集连续的 5 帧图像。分别经 PC 端 Matlab 程序处理和集成了 IP 核的嵌入式设计的 ZedBoard 开发板处理,比较两种方式的耗时。

对通过柯尼卡美能达 CL200A 色温照度计测量采集到的每幅 24 标准色卡图像的投影光线的红绿蓝白位置的色坐标数据,以及经由基于白平衡理论的时空域 Retinex 颜色校正算法处理后的 24 标准色卡图像的投影光线红绿蓝白位置的色坐标数据进行比较,评价基于白平衡理论的时空域 Retinex 颜色校正算法的效果。

图 9 示出了算法处理前后的图像对比。

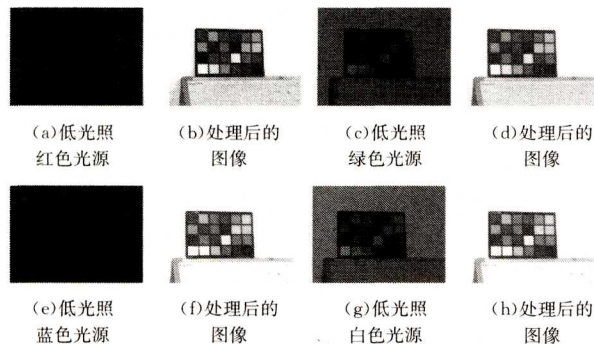


图9 原始图像和处理结果对比

图 9(a)、图 9(c)、图 9(e)、图 9(g)是采集到的低光照红绿蓝白 4 色光源下的原始图片,图 9(b)、图 9(d)、图 9(f)、图 9(h)是基于白平衡理论的时空域 Retinex 颜色校正算法处理后得到的校正后的图片。对比分析可知,算法处理后的图像中色偏和噪声都得到了很好的处理。

根据 CL200A 采集到的色坐标数据绘出颜色校正前后的色坐标分布,如图 10 所示。

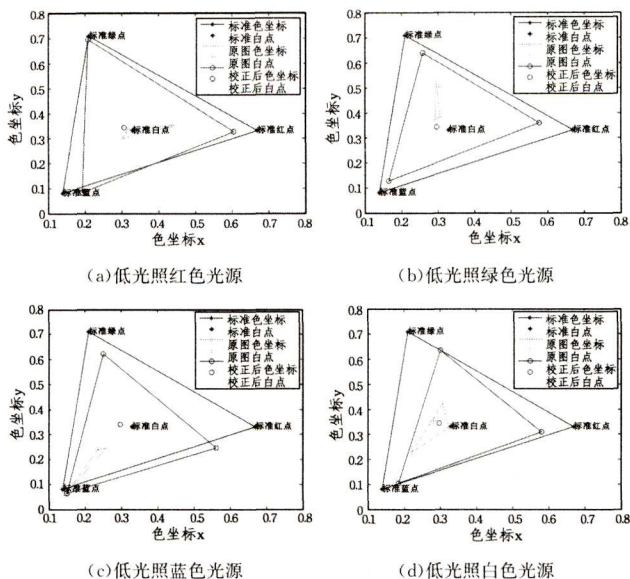


图10 校正前后色域范围比较

图 10(a)是低光照红色光源下采集的图像色坐标范围校正前后变化的对比情况。从图中可以看出低光照红色光源下采集的图像色坐标范围明显变窄,即原始图像的色彩分辨率降低。整个色域整体向红色坐标偏移,白点几乎与原始图像色域范围的红坐标重合。校正后色域范围接近标准色域范围,白点也向标准白点靠近。图 10(b)是低光照绿色光源下采集的图像色坐标范围校正前后变化的对比情况。校正前色域范围窄,整体向绿色坐标偏移,白点靠近绿色坐标点;校正后色域范围更接近标准色域范围,白点靠近标准白点。图 10(c)是低光照蓝色光源下采集的图像色坐标范围校正前后变化的对比情况。校正前色域范围窄,整体向蓝色坐标偏移,白点靠近蓝色坐标点;校正后色域范围变宽,白点靠近标准白点。图 10(d)是低光照白色光源下采集的图像色坐标范围校正前后变化的对比情况。校正前色域范围窄,但整体并没有发生严重偏移,即色彩分辨率低,但色偏不严重;校正后色域范围变宽,白点靠近标准白点。

表 1 列出了基于白平衡理论的 Retinex 颜色校正算法分别在 PC 端和 ZedBoard 上实现的耗时记录。

表1 不同平台实现的耗时统计

实现平台	WTSR 算法实现的耗时/s			
	red	green	blue	white
PC	797	815	797	789
ZedBoard	8, 15	9, 06	12, 70	9, 13

结束语 本文提出了一种基于白平衡理论的时空域 Retinex 颜色校正算法,并且针对其计算复杂度较高的问题,设计了该算法的 IP,在 vivado 中集成 IP,最后在 ZedBoard 开发板上实现。从耗时上分析,ZedBoard 实现的耗时比 PC 端 Matlab 实现降低了两个数量级,大幅度提升了实时性。从效果上分析,基于白平衡理论的时空域 Retinex 颜色校正算法针对低光照下的各种色偏图像有很好的校正效果。因此基于白平衡理论的时空域 Retinex 颜色校正算法的嵌入式实现满

(下转第 314 页)

- Non-negative Matrix Factorization and Its Application to Face Recognition[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(9): 1503-1512. (in Chinese)
- 方蔚涛, 马鹏, 成正斌, 等. 二维投影非负矩阵分解算法及其在人脸识别中的应用[J]. *自动化学报*, 2012, 38(9): 1503-1512.
- [12] CAI D, HE X F, HAN J W, et al. Graph regularization non-negative matrix factorization for data representation [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(8): 1548-1560.
- [13] WANG J Y, BENSMAIL H, GAO X. Multiple graph regularized nonnegative matrix factorization[J]. *Pattern Recognition*, 2013, 46(10): 2840-2847.
- [14] GUAN N Y, TAO D C, LUO Z G, et al. Manifold regularized discriminative nonnegative matrix factorization with fast gradient descent[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2011, 20(7): 2030-2048.
- [15] CAI D, HE X F, HAN J W. Locally consistent concept factorization for document clustering[J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2011, 23(6): 902-913.
- [16] YE J, JIN Z. Dual-graph regularized concept factorization for clustering[J]. *Neurocomputing*, 2014, 138(3): 120-130.
- [17] ZHOU D Y, HUANG J Y, SCHOLKOPF B. Learning with hypergraphs; clustering, classification and embedding [C] // *Advances in Neural Information Processing Systems*, Vancouver, BC, Canada, 2006: 1601-1608.
- [18] HUANG Y C, LIU Q S, ZHANG S T, et al. Image retrieval via probabilistic hypergraph ranking[C] // *Proceedings of the International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. San Francisco, USA, 2010: 3376-3383.
- [19] WEI B, CHENG M, WANG C, et al. Combinative hypergraph learning for semi-supervised image classification [J]. *Neurocomputing*, 2015, 153: 217-277
- [20] JIN T, YU J, YOU J, et al. Low-rank matrix factorization with multiple hypergraph regularizer [J]. *Pattern Recognition*, 2015, 48(3): 1011-1022.
- [21] ZENG K, YU J, LI C, et al. Image clustering by hyper-graph regularized non-negative matrix factorization [J]. *Neurocomputing*, 2014, 138(11): 209-217.

(上接第 292 页)

足视频颜色校正系统平台的实时性要求,能够应用到视频实时处理平台上。

参考文献

- [1] LI J F, FANG J L, DAI W Z. No-reference image quality assessment based on color perception[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(2): 339-350. (in Chinese)
- 李俊峰, 方建良, 戴文战. 基于色彩感知的无参考图像质量评价[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(2): 339-350.
- [2] MOREL J M, PETRO A B, SBERT C. A PDE formalization of Retinex theory[J]. *IEEE Transactions on Image Process*, 2010, 22(12): 2825-2837.
- [3] WANG R G, ZHANG X, ZHANG X L, et al. A Novel Adaptive Retinex Algorithm for Image Enhancement[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(12): 2933-2936. (in Chinese)
- 王荣贵, 张璇, 张新龙, 等. 一种新型自适应 Retinex 图像增强方法研究[J]. *电子学报*, 2010, 38(12): 2933-2936.
- [4] FANG S, YANG J R, CAO Y, et al. Local multi-scale Retinex algorithm based on guided image filtering[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2012, 17(7): 748-755.
- [5] YANG W T, YANG R G, FANG S, et al. Variable Filter Retinex Algorithm for Foggy Image Enhancement[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2010, 22(6): 965-971. (in Chinese)
- 杨万挺, 王荣贵, 方帅, 等. 滤波器可变的 Retinex 雾天图像增强算法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2010, 22(6): 965-971.
- [6] PREMKUMAR S, PARTHASARATHI K A. An efficient approach for colour image enhancement using discrete shearlet transform[C] // *International Conference on Current Trends in Engineering and Technology*. 2014: 363-366.
- [7] CHENG F J, DU X J, MA L, et al. Low-light Image Enhancement Based on Retinex[J]. *Video Engineering*, 2013, 37(15): 4-10. (in Chinese)
- 程芳瑾, 杜晓骏, 马丽, 等. 基于 Retinex 的低照度图像增强[J]. *电视技术*, 2013, 37(15): 4-10.
- [8] YIN J C, LI H B, DU J P, et al. Low Illumination Image Retinex Enhancement Algorithm Based on Guided Filtering[C] // *Proceedings of Communications in Computer and Information Science*. 2014: 639-644.
- [9] GUO Y G, GE Q P, GUO N. Colour Correction Based on White Balance[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2005, 41(20): 56-59. (in Chinese)
- 郭永刚, 葛庆平, 郭楠. 利用白平衡进行偏色图像的颜色校正[J]. *计算机工程与应用*, 2005, 41(20): 56-59.
- [10] FU H, HUANG X Y. Location Method of Leaf Image Specular Reflection Regions Based on Retinex[J]. *Computer Engineering*, 2010, 36(24): 197-199. (in Chinese)
- 付慧, 黄心渊. 基于 Retinex 的树叶图像镜面反射区定位方法[J]. *计算机工程*, 2010, 36(24): 197-199.
- [11] YUAN Y, TAN Y H, SUN H X, et al. Design and implementation of SCA based ON ZedBoard[J]. *Application of Electronic Technique*, 2015, 41(11): 31-33. (in Chinese)
- 袁扬, 谭月辉, 孙慧贤, 等. 基于 ZedBoard 的 SCA 架构的设计与实现[J]. *电子技术应用*, 2015, 41(11): 31-33.
- [12] GONG Y H, WEI D B, QIAO L Y, et al. Developed of NAND Flash storage system based on Zynq[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2014, 37(12): 53-57. (in Chinese)
- 龚有华, 魏德宝, 乔立岩, 等. 基于 Zynq 的 NAND Flash 存储系统研制[J]. *电子测量技术*, 2014, 37(12): 53-57.
- [13] WANG Y Y, SU B H, QIU W S. Super-resolution video restoration system based on ZedBoard[J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(4): 537-542. (in Chinese)
- 王源圆, 苏秉华, 邱文胜. 基于 ZedBoard 的超分辨率视频复原系统[J]. *应用光学*, 2015, 36(4): 537-542.
- [14] LU Q Q, XI D D. Transplantation of embedded Linux system [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2014, 33(12): 78-81. (in Chinese)
- 路青起, 席丹丹. 嵌入式 Linux 系统移植[J]. *国外电子测量技术*, 2014, 33(12): 78-81.