

应用于彩色线扫描机器视觉系统的图像校正方法

陈镇龙 叶玉堂 宋昀岑 罗颖 刘霖 刘娟秀

(电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)

摘要 随着机器视觉技术的发展,彩色线扫描系统在工业在线检测中的应用日趋广泛。在彩色线扫描视觉系统中,由于照明光源的照度非均匀性、光学镜头的渐晕和电荷耦合器件(CCD)相机的非均匀性响应等因素,导致系统采集图像出现灰度不均匀且颜色失真的情况,为后端图像处理带来困难,以致对系统稳定性造成影响。基于上述问题,提出了具有针对性的彩色线扫描系统图像校正方法,使该方法与多项式拟合方法对均匀目标进行对比实验,获取的校正后灰度均值与方差等统计结果更优,更接近目标真实灰度,并已将其应用于印刷电路板(PCB)外观缺陷自动光学检测系统,取得了较好的实际应用效果。

关键词 机器视觉;自动光学检测;彩色线扫描系统;白平衡;平场校正

中图分类号 O439; TN911.73 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0715002

Method of Image Correction for Color Line-Scan Machine Vision System

Chen Zhenlong Ye Yutang Song Yuncen Luo Ying Liu Lin Liu Juanxiu

(School of Opto-Electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract As the development of machine vision technology, the color line-scan system is widely applied in the on-line inspection. Due to the non-uniform distribution of optical intensity, the vignetting of optical lens and the different responsivities of charge coupled device (CCD) camera, non-uniform and color distorted image, which induces the problem of image processing and the stability system, could be output from the color line-scan system. A method used in image correction for color line-scan machine vision system is presented. Compared with the polynomial fittings, the mean and variance result of uniform object obtained by this method is better and closer to the real gray of object. The method has been used in the automatic optical inspection of printed circuit board (PCB).

Key words machine vision; automatic optical inspection; color line-scan system; white balance; flat-field correction

OCIS codes 150.3040; 110.2970; 100.3010

1 引言

随着机器视觉与自动光学检测技术的发展,基于彩色线扫描技术的系统应用日趋广泛,如印刷电路板(PCB)外观缺陷检查和彩色印刷品缺陷在线检测等。在彩色线扫描视觉系统中,由于照明光源的照度非均匀性、光学镜头的渐晕、电荷耦合器件

(CCD)响应的非均匀性等因素,导致系统所采集图像出现灰度不均匀且颜色失真的情况,为后端图像处理带来困难,以致对系统稳定性造成影响。

对于常见的黑白面阵成像及线扫描视觉系统,平场校正是十分常用的成像校正方法,国内外很多学者都从事过此方面的研究。Wild^[1]对非均匀照明

收稿日期: 2013-02-01; **收到修改稿日期**: 2013-02-11

基金项目: 国家自然科学基金(61205004)、粤港招标关键领域重点突破项目(w0510116)、粤港招标关键领域重点突破项目(0511206)、总装预研基金(9140A01020507DZ0215)、兵器集团项目(w0511142)

作者简介: 陈镇龙(1982—),男,博士研究生,主要从事机器视觉、光电测控及仪器等方面的研究。

E-mail: czlong008@163.com

导师简介: 叶玉堂(1946—),男,博士生导师,教授,主要从事光电测控及仪器和单片光电集成等方面的研究。

E-mail: ytye@uestc.edu.cn

源,采用和 CCD 相机偏置近似的二维椭圆偏微分方程,对采集的图像进行了重构,以实现平场校正;Kwan 等^[2-3]也提出了平场校正的新技术;在国内,江孝国等^[4-5]提出的光纤耦合 CCD 相机的平场校正方法,不仅考虑了 CCD 光敏单元的响应,同时考虑了光纤的透过率等因素的影响,而且在阵列探测器图像校正方面也做了研究;徐树兴等^[6]实现了线阵 CCD 的平场校正及现场可编程门阵列(FPGA);还有很多此方面的研究,如红外焦平面、高光谱图像的平场校正等^[7-15]。

理想的彩色线阵 CCD 采集系统中相机各光敏单元响应相同,输出的彩色图像强度均匀,但在实际应用中却并非如此。对彩色线扫描视觉系统而言,图像包括 R、G、B 三个颜色通道的信息,各个通道均需要进行平场校正,同时还需要进行色偏校正,避免出现色偏现象。本文针对彩色线扫描系统的图像采集特点,对图像质量影响因素进行分析,并提出相应的图像校正方法。

2 图像质量影响因素分析

彩色线扫描系统结构如图 1 所示,由彩色线阵 CCD 相机、光学系统、照明光源、精密移动平台、编码器组成,实现对物体的稳定扫描成像。

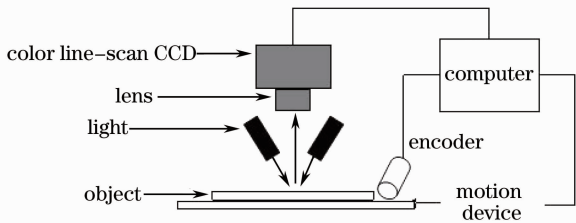


图 1 彩色线扫描系统结构

Fig. 1 Structure of color line-scan system

对于整个系统而言,其图像采集质量的影响因素主要有照明光源、光学系统和 CCD 相机等方面。

2.1 照明光源

在彩色线阵图像采集系统中,由于光源照度的非均匀性(如固形线 LED^[16]光源因内部各个 LED 芯片发光效率的个体差异而造成被测物体表面的照度差异;条形荧光灯因电源参数变化、灯管老化等原因造成时间上的照度差异)、光源安装的机械误差、工业应用现场环境光干扰等因素影响,均可造成图像质量的偏差,使得图像出现空间和时间上的非均匀性,给后端的图像处理算法带来不稳定因素。

2.2 光学系统

由于任何一个实际的光学系统都不可能理想成

像,即物空间的一个物点发出的光线经实际光学系统后,不再会聚于像空间的一点,而是形成一个弥散斑,而弥散斑的大小与系统的像差有关。根据成像照度分析^[17]可知,目标物体经过成像系统之后在像面上所成像的强度值会随其主光线与轴的夹角的增大而减小。如图 2 所示, A 为主光轴与透镜交点, P_1 、 Q_1 分别为主光轴、物体成像主光线与像平面的交点, ϕ_1 是主光线 AQ_1 与轴 AP_1 的夹角, Ω_1 、 Ω'_1 分别为 P_1 、 Q_1 对应的出瞳。假设物体是一个亮度为定值 B_0 的遵守朗伯定律的反射体,则物体在像平面上的成像点 Q_1 的光强度 E_1 满足:

$$E_1 = \left(\frac{n_1}{n_0}\right)^2 B_0 \Omega_1 \cos^4 \phi_1, \quad (1)$$

式中 n_1 、 n_0 分别为镜头与外部介质折射率, E_1 与 $\cos^4 \phi_1$ 成正比。

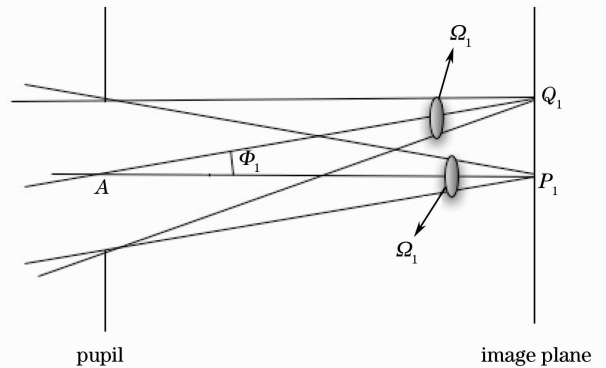


图 2 镜头成像照度分析

Fig. 2 Illuminance analysis of lens imaging

在实际系统中,由于线阵相机的横向分辨率较高(常见线阵相机分辨率为 2000 pixel、4000 pixel、6000 pixel,高的可到 8000 pixel 甚至 10000 pixel),因此其用到的镜头物理尺寸比常规面阵相机所用镜头尺寸要大得多,同时 ϕ_1 值更大,导致其视场边缘的照度衰减幅度很大,造成严重的渐晕效应。

2.3 CCD 相机

造成彩色线阵 CCD 相机成像非均匀性的因素很多,主要分为两类:1)固定模式噪声,主要指在无光照条件下,CCD 阵列像素输出最大值与最小值之差,又称暗信号非均匀度,这主要是因为每个光敏单元的材料、面积的差异导致的;2)光电响应非均匀性,主要指在等光量均匀照明前提下,像素输出信号的幅度差异,其主要由量子效率决定,而量子效率影响各光敏单元的透明度、表面状态、反射系数等,从而导致 CCD 的光电响应非均匀性。同时,在电路结构上,彩色线阵 CCD 的 R、G、B 通道为三个 CCD 芯片前添加红绿蓝滤色片进行图像采集,不同芯片的

线性度、背景噪声均存在差异,从而也会造成色彩空间的偏移。

综上所述,彩色线阵 CCD 系统的成像质量被多种因素综合影响,并且对于实际工程应用而言,不同个体系统之间、不同工作时限之间的成像质量影响因素各不相同,非单一模型可处理,需要对系统进行实验基础上的整体校正。

3 图像质量校正方法分析

3.1 处理流程

与普通的单色相机相比,彩色线阵相机所得数字图像包括 RGB 三个通道的信息,可将其看作一个三维数组,不仅存在各个通道内的二维数组行、列及元素之间的关系,而且各个通道之间对应的元素值也存在着相互关系。前者属于平场校正需要解决的问题,后者属于白平衡(偏色校正)的内容。由于二者相互独立,不存在先后顺序。彩色线阵图像的整体校正处理流程如图 3 所示。

偏色校正的方法主要采用类似文献[18]的方法,将 RGB 空间图像转换至 YCbCr 空间,基于 Cb、Cr 分别反映 B、R 通道与信号亮度值差异的特点,调节偏色方向的增益系数,使 Cb、Cr 达到最佳。采用该方式进行偏色校正实验,在此不做具体介绍,着重介绍平场校正方法。由于彩色图像的 RGB 三个通道相对独立,平场校正可以对各个通道分别做校正处理,继而将校正结果应用于实际采集图像的 RGB 通道。鉴于 RGB 三个通道校正操作相同,因此,以 R 通道的处理为例进行彩色图像的平场校正方法说明。

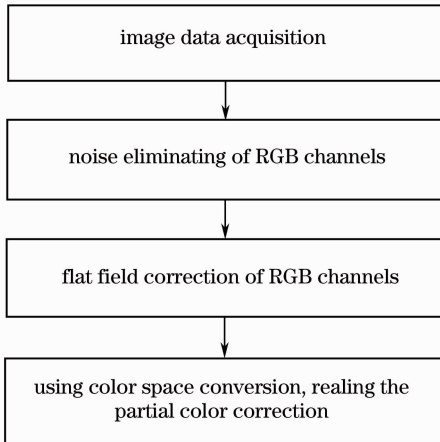


图 3 彩色线阵系统图像的校正处理流程

Fig. 3 Flow diagram of image correction for color line-scan system

3.2 噪声去除

利用如图 1 所示的彩色线阵 CCD 图像采集系统对标准白板进行图像采集。其中 CCD 相机选用 NED 7300Li 彩色线阵相机,光源采用高频荧光灯管,镜头为 Pentax 135 变焦镜头,系统分辨率为 $35 \mu\text{m}/\text{pixel}$ 。在对标准白板进行图像采集实验,采集 1000 行(行扫描时间为 $137 \mu\text{s}$),得到 $7300 \text{ pixel} \times 1000 \text{ pixel}$ 的图像数据 G_w ,作为均匀场图像,如图 4 所示。同时,采集完全不通光状态下的图像 G_b ,作为暗本底图像,如图 5 所示。



图 4 彩色线阵 CCD 采集的标准白板图像
Fig. 4 White panel's image grabbed by CCD of color line-scan system



图 5 彩色线阵 CCD 采集的暗本底图像
Fig. 5 Black image grabbed by CCD of color line-scan system

为了消除随机噪声,从图 4,图 5 中提取彩色图像 R 通道的灰度信息,并对图像垂直方向(即彩色线阵 CCD 相机与扫描目标的相对运动方向)的像素值进行平均处理,得到的灰度分布如图 6 所示。由图 6(a)可知,由于镜头的渐晕效应,水平方向(即彩色线阵 CCD 相机的像元排布方向)上灰度呈中间高两端低的弧状分布;而且,由图 6(b)可知,暗场图像中,像素的灰度值也并非接近 0。同时由于暗电流等因素影响,造成图 6 中垂直方向上存在许多尖刺噪声。

由于噪声比较严重,为进一步分析,需对图像进行去噪处理。在去噪过程中,考虑到既要保留扫描线上灰度分布的局部细节,同时又不生成人为的结构,故采用频域去噪的方法较为理想。

采用小波变换的方法^[19],由于其计算复杂度与快速傅里叶变换相当,且能够灵活设置每个尺度的阈值进行去噪。该特点有利于通过实验方法,区别成像系统造成的像素差异的小波尺度与噪声造成的像素差异的小波尺度,之后调节小波层次的参数,达到有效提取信息的目的。对于所设计的彩色线扫描系统,经系统分析与实验验证,图像灰度值的尖刺噪声主要成因包括:1) CCD 采集电路的暗电流噪声,主要与系统工作的温度以及 CCD 像元晶体质量等

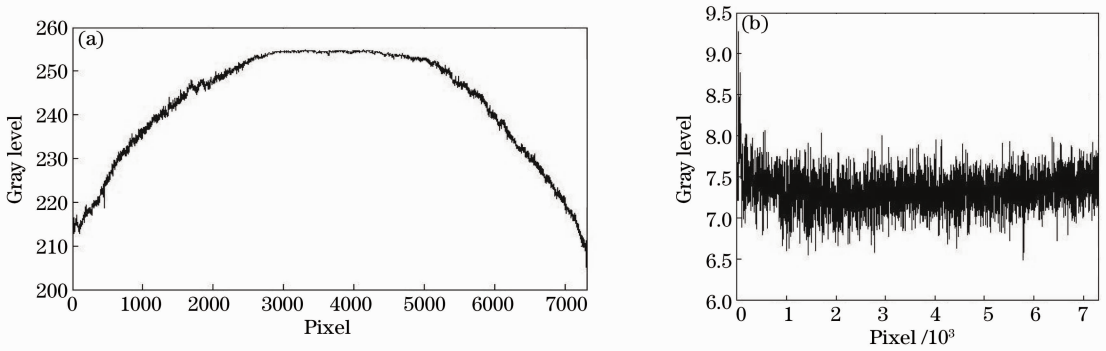


图 6 彩色图像的 R 通道灰度分布。均匀场图像和(b)暗场图像 R 通道灰度分布

Fig. 6 Gray distribution of R channel for color image. Gray distribution of R channel of (a) white panel's image and (b) dark image

有关;2)光路缺陷,由光源及镜头污损等情况引起;3)图像信号的电磁干扰,由于信号电缆屏蔽质量、强电元件串扰等引起。对于每套检测设备,去噪时每层小波参数的阈值可以经过调试现场实验确定,在不更换成像组件的前提下(主要是光源组件寿命的原因),机器在较长一段时间内均可保持噪声分布一致性,调节一次之后即可重复使用。

由于实验的主要目的是找到灰度分布的总体趋势,而非微细结构,因而使用硬阈值去噪的方法,避免软阈值对细节的过分保留,而影响灰度大尺度趋势的获得。实验使用 Daubechies-4 小波^[19],进行五级分解,经过调试现场多次尝试,最终每层阈值大小设为 4 左右,图 6 中的微细结构基本都被滤除掉,获得如图 7 所示的最终灰度分布。

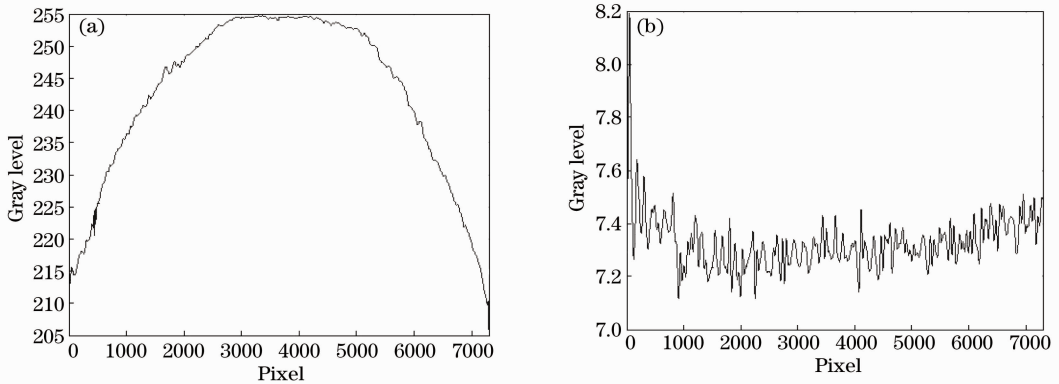


图 7 小波硬阈值去噪后的灰度分布。(a)均匀场图像和(b)暗场图像 R 通道灰度分布

Fig. 7 Gray distribution after wavelet hard threshold process. Gray distribution of R channel of (a) white panel's image and (b) black image

3.3 灰度校正

对一个被扫描目标而言,彩色线阵 CCD 相机输出的图像 $f_{\text{image}}(x)$ 一般由三部分组成,即:

$$f_{\text{image}}(x) = f_{\text{object}}(x) + f_{\text{dark}}(x) + f_{\text{offset}}(x), \quad (2)$$

式中 $f_{\text{offset}}(x)$ 为偏置图像,即使曝光时间为 0,仍有一个本底图像输出; $f_{\text{dark}}(x)$ 为暗场图像,是完全不通光情况下,产生的随时间增强的图像; $f_{\text{object}}(x)$ 为目标图像,即被扫描目标产生的图像。

而对于灰度均匀目标,其真实灰度值是一个常数,记为 C ,但由于偏置、暗场等影响,彩色 CCD 相机的实际输出图像可能强度不均匀,记为 $f_{\text{Uniform}}(x)$;在完全相同实验条件下,相机采集的某一目标的图像输

出为 $f_{\text{ObjectG}}(x)$,目标的实际灰度分布记为 $f_{\text{ObjectR}}(x)$;则可推算出:

$$f_{\text{ObjectR}}(x) = \frac{f_{\text{ObjectG}}(x) - f_{\text{dark}}(x) - f_{\text{offset}}(x)}{f_{\text{Uniform}}(x) - f_{\text{dark}}(x) - f_{\text{offset}}(x)} \cdot C. \quad (3)$$

采用真实灰度值可以记作 255 的标准白板作为灰度均匀目标,通过彩色线阵 CCD 相机采集图像,输出记为 $G_w(x)$ 。而相机采集的暗本底图像,记为 $G_b(x)$ 。由于相机采集每幅幅图像时,偏置图像都存在,因而可知, $f_{\text{ObjectG}}(x)$ 、 $f_{\text{Uniform}}(x)$ 都包含偏置成分,而暗本底图像则是由暗场图像和偏置图像组成的,则(3)式可以简化为

$$f_{\text{ObjectR}}(x) = \frac{255}{G_w(x) - G_b(x)} \times [f_{\text{ObjectG}}(x) - G_b(x)], \quad (4)$$

式中的 $G_w(x)$ 、 $G_b(x)$ 分别对应 (3) 式中的 $f_{\text{ObjectG}}(x)$ 、 $f_{\text{dark}}(x) + f_{\text{offset}}(x)$ ， C 在此时取值 255。

分析(4)式可知， $\frac{255}{G_w(x) - G_b(x)}$ 可以看做线阵相机位置 x 处的成像校正参数。而 $G_b(x)$ 可以通过多行平均的方式，获得一个均值，作为实验系统位置 x 处的固定偏差。由于彩色线阵 CCD 的 RGB 三个通道是相对独立的，则对各通道分别进行如上处理，可获取各通道每个像素位置的实际灰度校正参数及偏差值。之后，将各通道的校正参数应用于实际采集图像的相应通道，则可实现彩色图像的平场校正处理。

为了避免噪声对灰度校正的影响，先对均匀场及暗场图像进行了去噪处理，之后，应用(4)式计算获得的 R 通道的灰度校正参数曲线如图 8 所示。

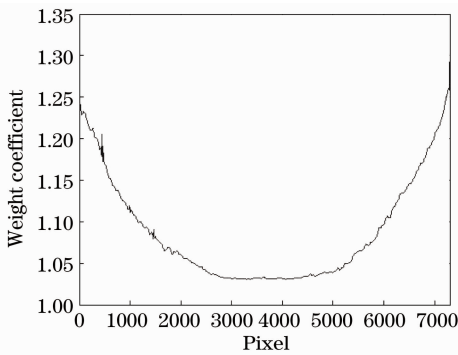


图 8 R 通道灰度校正参数分布

Fig. 8 Gray level correction coefficient distribution of R channel

4 实验结果

4.1 校正数值分析

将校正结果应用于图 4 的标准白板图像，随机抽样一行 R 通道数据经校正前后的灰度分布图如图 9 所示，图中灰色、黑色灰度分布曲线分别是灰度校正前后的分布。对图 4 的 R 通道图像数据，校正后每个像素在 1000 行上的灰度均值与方差分布如图 10 所示，灰色与黑色曲线为校正前后的分布。对于图 4 图像数据，在灰度校正上采用常用的多项式拟合获取校正参数的方法与 3.3 节中的方法进行对比试验，校正后 1000 行数据的灰度与均值分布如图 11 所示，灰色曲线为 3.3 节中的方法，黑色曲线为多项式拟合方法。多项式拟合采取五阶多项式拟合，原因在于计算速度上与 3.3 节的方法接近。由图 11 可以看出，3.3 节的方法的校正参数获取方法的结果统计分布优于多项式拟合，更接近真实灰度。

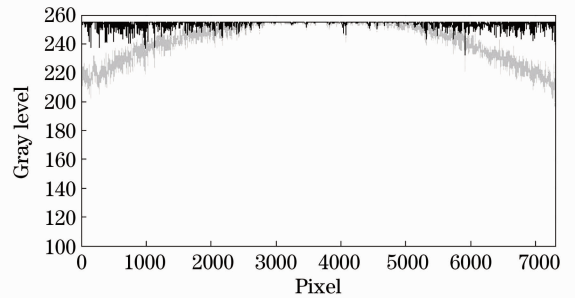


图 9 随机抽样一行的标准白板图像 R 通道灰度校正前后对比

Fig. 9 Gray distribution comparison of a random line before and after correction of the white panel's R channel

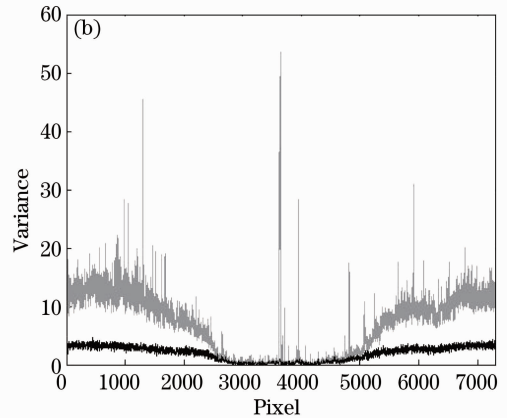
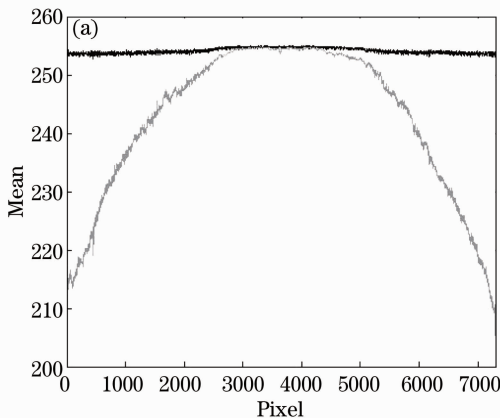


图 10 校正前后的标准白板 R 通道图像灰度的 (a) 均值和 (b) 方差

Fig. 10 (a) Mean and (b) variance of gray distribution of the white panel's R channel before and after correction

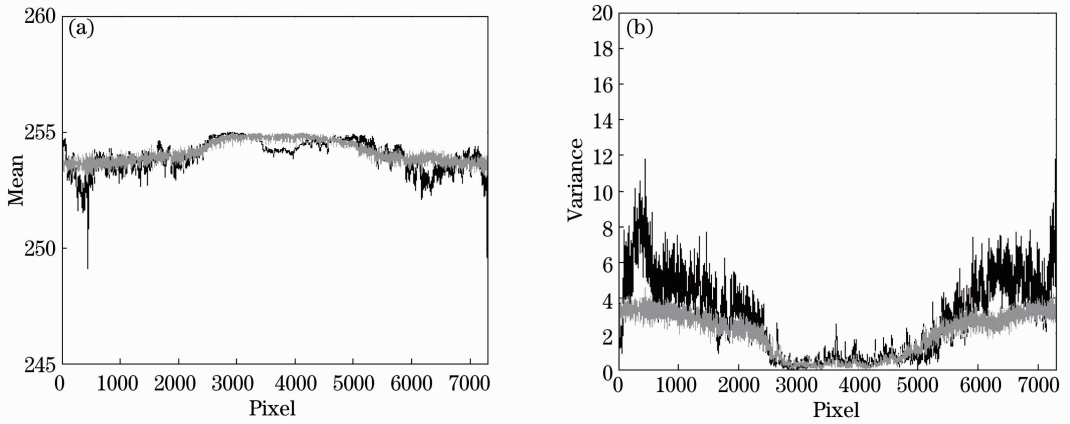


图 11 两种方法的校正后灰度值分布比较。(a)均值;(b)方差

Fig. 11 Gray distribution after correction by two methods. (a) Mean; (b) variance

4.2 校正效果

将校正过程中获得的参数,应用于实际采集的 PCB 彩色图像,校正前后 PCB 的效果如图 12 所示(扫描线方向为图像高度方向),图 12 中校正前后 PCB 图像 R 通道的灰度直方图如图 13 所示。从图 13(a)可知,校正前图像中灰度分布峰值多且区别不明显,进行阈值分割等图像处理非常困难。结合图 12(a)可知,这是因为图像整体偏暗,且视场角越大,像素值越低,经校正后,灰度分布趋向高、低两端且集中峰值区别明显,与校正后图 12(b)整幅图像亮度及均匀性提升相吻合。使用本文提出的校正方法,图像的质量得到改善,对于系统后续处理中的图像分割、聚类分析等操作提供了可信用度更高的图像源,有利于提高系统稳定性。

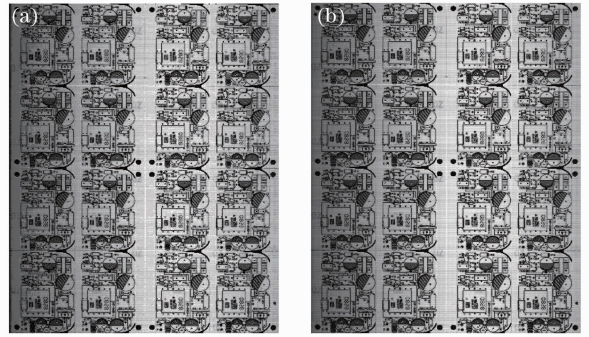


图 12 校正(a)前(b)后 PCB 的线扫描图像比较

Fig. 12 Comparison of linear-scan image of PCB (a) before and (b) after correction

本方法已经应用于粤港招标关键领域重点突破项目“智能型印制线路板外观缺陷检查机”,该项目研制的 PCB 外观检查机已经开始转产使用,如图 14 所示。

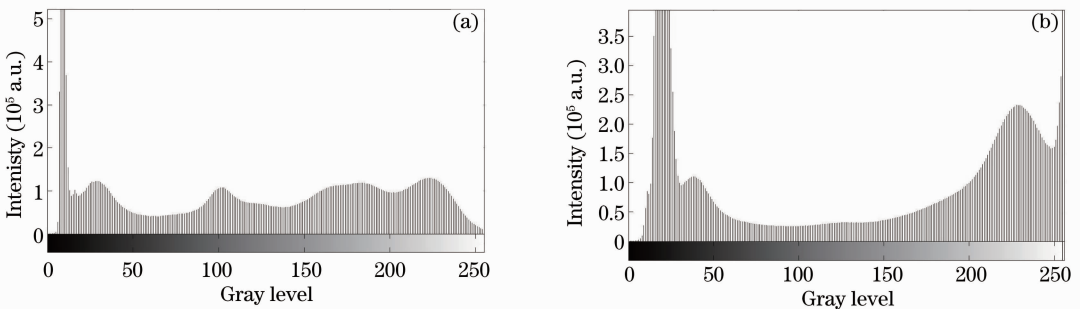


图 13 校正(a)前(b)后 PCB 图像 R 通道灰度直方图

Fig. 13 R channel density histogram of PCB image (a) before and (b) after correction

5 结 论

根据实际搭建的彩色线阵 CCD 图像采集系统的特点,提出彩色线阵图像的平场校正方法,虽然校

正过程处理步骤较多,但一旦获得系统校正系数,在不调整硬件系统的情况下,即可通过查找表等方式应用于所有采集的 PCB 图像中,而且不占用检测系统



图 14 PCB 外观检查机原型

Fig. 14 Prototype of visual inspection of PCB

的处理资源。在研制的 PCB 外观检查机的应用表明,本文所提出的图像校正方法,对于 PCB 彩色线扫描机器视觉系统的图像质量和系统稳定性提升具有很好的实际应用效果。

参 考 文 献

- 1 W J Wild. Reconstructing CCD flat fields using non-uniform background illumination sources [C]. SPIE, 1998, 3355: 713-720.
- 2 A L C Kwan, J A Seibert. An improved method for flat-field correction of flat panel X-ray detector [J]. Medical Physics, 2006, 33(2): 391-393.
- 3 J A Seibert, J M Boone, K K Lindfors. Flat-field correction technique for digital detectors [C]. SPIE, 1998, 3336: 348-354.
- 4 Jiang Xiaoguo, Qi Shuangxi, Wang Wanli, *et al.*. Flat-correction method for fiber optic taper coupled CCD camera [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(10): 1239-1242.
江孝国, 祁双喜, 王婉丽, 等. 光纤耦合 CCD 相机的平场校正方法研究[J]. 光子学报, 2004, 33(10): 1239-1242.
- 5 Jiang Xiaoguo, Zhang Kaizhi, Li Chenggang, *et al.*. Extended applications of image flat-field correction method [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(9): 1587-1590.
江孝国, 张开志, 李成刚, 等. 图像平场校正方法的扩展应用研究[J]. 光子学报, 2007, 36(9): 1587-1590.
- 6 Xu Shuxing, Wang Baoguang, Zhang Yizhong. Study on linear CCD flat field correction and its implementation on FPGA [J]. J Astronautic Metrology and Measurement, 2007, 27(6): 34-37.
徐树兴, 王宝光, 郑义忠. 线阵 CCD 平场校正及 FPGA 实现的研究[J]. 宇航计测技术, 2007, 27(6): 34-37.
- 7 Xia Zhang, Bing Zhang, Xiurui Geng, *et al.*. Automatic flat field algorithm for hyperspectral image calibration [C]. SPIE, 2003, 5286: 636-639.
- 8 Xu Tianhua, Zhao Yigong. Analysis of scene-based techniques for non-uniformity correction of infrared focal plane arrays [J]. J Infrared Millim. Waves, 2004, 23(4): 257-261.
徐田华, 赵亦工. 基于场景的红外焦平面非均匀校正技术分析[J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23(4): 257-261.
- 9 Meng Ran, Yu Demin, Wang Yongqiang, *et al.*. Influence factors analysis of flat field and research of correction method for monochrome CCD camera [J]. J Tianjin University of Science & Technology, 2006, 21(4): 68-70.

- 孟 然, 于德敏, 王永强, 等. 黑白 CCD 相机平场影响因素分析及校正方法研究[J]. 天津科技大学学报, 2006, 21(4): 68-70.
- 10 Jiang Xiaoguo, Wang Yuan, Zhang Kaizhi, *et al.*. Calibration method for non-uniformity between multiple images from a high-speed multi-frame CCD camera [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(4): 531-535.
江孝国, 王 远, 张开志, 等. 高速分幅成像系统中多路图像性能不一致的校正方法研究[J]. 光学学报, 2006, 26(4): 531-535.
- 11 Kong Ningning, Li Chao, Xia Mingliang, *et al.*. Research on flat field correction method in adaptive optics retinal imaging system [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 1-8.
孔宁宁, 李 抄, 夏明亮, 等. 用于自适应光学视网膜成像的平场校正方法研究[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1-8.
- 12 Liu Haoxue, Huang Min, Wu Bing, *et al.*. Study of color difference evaluation in color digital images [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 933001.
刘浩学, 黄 敏, 武 兵, 等. 彩色数字图像色差计算方法的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 933001.
- 13 Huang Min, Liu Haoxue, Cui Guihua, *et al.*. Testing uniform color spaces using printed samples with different gloss and color difference magnitudes [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 0733002.
黄 敏, 刘浩学, 崔桂华, 等. 用不同光泽和色差等级的彩色印刷样品检验均匀颜色空间[J]. 光学学报, 2012, 32(7): 0733002.
- 14 Lü Weige, Xu Haisong, Wang Zhehong, *et al.*. Investigation of chromatic contrast sensitivity based on different color directions and spatial frequencies [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0133002.
吕玮阁, 徐海松, 汪哲弘, 等. 基于不同颜色方向和空间频率的彩色对比灵敏度特性研究[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0133002.
- 15 Jin Chongchao, Shen Huiliang, Shao Sijie, *et al.*. Color characterization method for colorful inkjet printers [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 1233001.
金崇超, 沈会良, 邵思杰, 等. 一种彩色喷墨打印机的颜色特性化方法[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1233001.
- 16 Yin Luqiao, Yang Weiqiao, Li Shuzhi, *et al.*. Dynamic color temperature white lighting source based on red green and blue light emitting diode [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 0523004.
殷录桥, 杨卫桥, 李抒智, 等. 基于三基色的动态色温白光发光二极管照明光源[J]. 光学学报, 2011, 31(5): 0523004.
- 17 M. Born, E. Wolf. Principles of Optics [M]. Yang Jiasun Transl. Beijing: Science Press, 1978. 248-251.
玻 恩, 沃尔夫. 光学原理[M]. 杨葭孙译. 北京: 科学出版社, 1978. 248-251.
- 18 Wang Yajun, Wu Yuguang, Lin Wanqing, *et al.*. Automatic white balance algorithm and hardware implementation for camera [J]. China Integrated Circuit, 2007, 16(1): 43-46.
王雅君, 吴玉广, 林万顷, 等. 一种摄像头自动白平衡的算法及硬件实现[J]. 中国集成电路, 2007, 16(1): 43-46.
- 19 Cao Qing. Research of Image Processing Algorithm Based on Wavelet Transform [D]. Xi'an: Xidian University, 2008. 5-34.
曹 青. 基于小波变换的图像处理算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008. 5-34.

栏目编辑: 李文洁