本文引用格式: 罗文,邹湘军,陈建明,等.基于机器视觉的 Mini LED 背光板 PCB 焊盘检测系统[J].自动化与信息工程,2022, 43(6):20-26;40.

LUO Wen, ZOU Xiangjun, CHEN Jianming, et al. Inspection system for PCB pad of Mini LED backlight board based on machine vision[J]. Automation & Information Engineering, 2022,43(6):20-26;40.

基于机器视觉的 Mini LED 背光板 PCB 焊盘检测系统*

罗文 邹湘军 陈建明 梁添贵 丁惠英 倪沁心

(1.华南农业大学工程学院,广东广州 5106422.广东华恒智能科技有限公司,广东东莞 523575)

摘要: 针对 Mini LED 背光板 PCB 焊盘检测精度和效率低的问题,提出一种基于机器视觉的 Mini LED 背 光板 PCB 焊盘检测系统。首先,对采集的 Mini LED 背光板 PCB 焊盘图像进行预处理; 然后,通过阈值分割法 进行 PCB 焊盘粗分割,采用模糊 C 均值聚类算法进行 PCB 焊盘细分割; 接着,利用 Canny 算子进行像素精度边 缘提取; 最后,采用基于 Zernike 矩的亚像素边缘检测方法提高边缘检测精度。实验结果表明,该系统具有较高 的检测精度和效率, PCB 焊盘尺寸测量误差在±8 µm 以内,位置测量误差在 12 µm 以内。

关键词:机器视觉; Mini LED 背光板; PCB 焊盘; 图像处理; 边缘提取; 亚像素边缘检测

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1674-2605(2022)06-0004-08

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2022.06.004

Inspection System for PCB Pad of Mini LED Backlight Board Based on Machine Vision

LUO Wen ZOU Xiangjun CHEN Jianming LIANG Tiangui DING Huiying NI Qinxin

(1.School of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China2.Guangdong Huaheng Intelligent Technology Co., Ltd., Dongguan 523575, China)

Abstract: Aiming at the problem of low detection accuracy and efficiency of Mini LED backlight PCB pad, a machine vision based Mini LED backlight PCB pad detection system was proposed. First, preprocess the acquired PCB pad image of Mini LED backlight board; Then, the threshold segmentation method is used to roughly segment PCB pads, and the fuzzy C-means clustering algorithm is used to finely segment PCB pads; Secondly, Canny operator is used to extract pixel precision edge; Finally, the sub-pixel edge detection method based on Zernike moment is adopted to improve the edge detection accuracy. The experimental results show that the system has high detection accuracy and efficiency, and the PCB pad size measurement error is within $\pm 8 \mu m$, the position measurement error is within $12 \mu m$.

Keywords: machine vision; Mini LED backlight board; PCB pad; image processing; edge extraction; sub pixel edge detection

) 引言

近年来,随着显示产业的蓬勃发展,以 Mini LED 为代表的微米级背光板芯片更是发展迅速^[1],其需求 也随之增加。目前, Mini LED 显示技术已实现商业 化^[2],但仍然面临诸多挑战,其背光板的印刷电路板 (printed circuit board, PCB)焊盘检测就是难点之一。

PCB 虽然具有高韧性,但存在尺寸稳定性、基板平整 性差等缺点。随着 Mini LED 产业技术的发展,LED 芯片的面积越来越小,其 PCB 设计制作的要求也越 来越高,检测精度一般要求在 50 µm 以内。高精度的

^{20 *} 基金项目:广东省东莞大专项(20211800400092);广东省 科技厅佛山大专项(广东省科技计划项目)(2120001008424)。

线路检测成了 Mini LED 产业发展的技术瓶颈^[3]。目前, Mini LED 背光板 PCB 焊盘检测主要有人工目检、扫描探针和视觉检测^[4]3 种方法,其中应用最为广泛的是视觉检测。

国内外学者对基于机器视觉的检测技术进行了 大量的研究^[5-10]。万杰等^[11]利用光线追迹算法,在高 温环境下对物体进行视觉三维测量。邹湘军等^[12]针对 非结构化环境下零件识别与定位精度低的问题,提出 改进迭代最近点的亚像素级配准算法。许斌等^[13]针对 基片表面特征尺寸测量复杂以及精度低的问题,提出 基于区域灰度梯度差异的基片特征尺寸测量方法。这 些研究虽然在机器视觉检测领域取得了一定的成果, 但仍然停留在理论和试验阶段,较少应用到实际工业 生产领域。

本文提出基于机器视觉的 Mini LED 背光板 PCB 焊盘检测系统,通过对 PCB 焊盘的尺寸、焊盘中心与 Mark 点位置关系进行测量,提高 Mini LED 背光板 PCB 焊盘的检测精度和效率。

1 系统架构

基于机器视觉的 Mini LED 背光板 PCB 焊盘检测 系统由图像采集系统、运动控制系统和图像处理系统 组成,如图1所示。



图像采集系统包括工业相机、镜头、光源等。根据视野范围、工作距离和测量精测要求进行系统硬件选型。其中,工业相机选用 DALSA 黑白线阵相机,

分辨率为2048×1 像素,行频为52kHz,像元尺寸为 7.04 μm;镜头选用 1.5 倍远心镜头;根据 PCB 焊盘 和开窗特征,选用红色环形 LED 光源。

运动控制系统包括运动控制卡、板卡、伺服电机、 伺服驱动器、滚轴丝杆、光栅尺、机械平台、抽真空 机组等。其中,运动控制卡和板卡用于控制系统动作; 伺服驱动器和伺服电机负责完成各轴的精确位置矫 正;滚轴丝杆作为传动机构,带动放置工件的机械平 台到达指定位置;光栅尺对各轴位移进行检测,补偿 运动误差;抽真空机组用于吸附工件,防止工件在运 动过程中发生偏移。

图像处理系统包括图像预处理、图像分割、边缘 提取、特征尺寸和位置测量等。

2 PCB 焊盘检测

Mini LED 背光板 PCB 焊盘尺寸和间隔一致,呈 线性排列分布,实物图如图 2 所示。



图 2 Mini LED 背光板 PCB 实物图

基于机器视觉的 Mini LED 背光板 PCB 焊盘检测 过程:

1) 通过工业相机采集 PCB 焊盘图像,并进行滤 波处理;

2)利用阈值分割法和图像形态学膨胀法粗分割 PCB 焊盘区域;

3)采用模糊 C 均值聚类(fuzzy C-means, FCM)
算法进行 PCB 焊盘区域细分割;

利用 Canny 算子进行 PCB 焊盘像素精度边缘提取;

5) 采用基于 Zernike 矩的亚像素边缘检测法进行 PCB 焊盘边缘检测;

6) 通过标定板标定,将像素坐标转换为实际物 理坐标系下的像素当量,进行图像像素坐标拼接,进 而检测 PCB 焊盘。

2.1 图像采集

PCB 焊盘图像采集过程如下: PC 端通过运动控制卡发出运动控制指令给伺服驱动器; 伺服驱动器将PC 端的电信号转换成脉冲信号,并发送给伺服电机; 滚轴丝杆驱动机械平台和工业相机运动到拍照位置, 完成 PCB 焊盘图像的采集^[14]。

2.2 图像预处理

图像在采集和传输过程中,由于受到工作环境、 电路结构以及传输介质等因素的影响,通常会引入噪 声。需先对采集的 PCB 焊盘图像进行预处理,否则会 对图像的特征提取造成干扰。本文采集的 PCB 焊盘 图像主要包括椒盐噪声。目前,常用的滤波方法主要 有均值滤波、中值滤波和高斯滤波。其中,高斯滤波 适用于消除高斯噪声,对椒盐噪声作用并不明显;均 值滤波虽能够消除椒盐噪声,但会使图像边缘变得模 糊;中值滤波不但能够消除椒盐噪声,而且较好地保 留了边缘信息。故本文采用中值滤波对 PCB 焊盘图 像进行平滑滤波,效果如图 3 所示。



(a) 加入椒盐噪声的原图像



(b) 中值滤波后的图像 图 3 PCB 焊盘图像中值滤波效果

2.3 图像粗分割

中值滤波后的 PCB 焊盘图像先进行阈值分割,

得到 PCB 焊盘和开窗区域。阈值分割法步骤为:

1) 计算 PCB 焊盘图像的灰度直方图,如图 4 所示;



图 4 PCB 焊盘图像灰度直方图

2) 根据灰度直方图设置灰度阈值范围为[5,65], 对 PCB 焊盘灰度图像进行二值化处理,其上任意一 点(*x*,*y*)的灰度值为*f*(*x*,*y*),设阈值处理后的图像 为*g*(*x*,*y*),则

$$g(x,y) = \begin{cases} 1, & f(x,y) > T \\ 0, & f(x,y) \le T \end{cases}$$
(1)

图像g(x,y)=1时,记为PCB 焊盘和开窗区域, g(x,y)=0时,记为背景;

3)利用形状特征,根据矩形度和面积大小去除 干扰,经过图像闭运算和形态学膨胀 PCB 焊盘和开 窗区域,获得 PCB 焊盘图像粗分割效果如图 5 所示。



图 5 PCB 焊盘图像粗分割效果

2.4 图像细分割

由于光照等环境因素影响,采用阈值分割法较难

确定合适的阈值,PCB 焊盘分割效果不是很理想。为 更准确地提取 PCB 焊盘的边缘信息,根据图像的像 素灰度级特征,利用 FCM 算法,将 PCB 焊盘图像的 粗分割区域细分割为焊盘区域和背景区域^[15],如图 6 所示。



图 6 PCB 焊盘图像区域划分

初始化 PCB 焊盘图像粗分割区域的像素 x_i ,任 取一点作为聚类中心,记为 $c_j(j=1,2)$ 。每个 x_i 的聚 类中心 c_i 的隶属度 u_{ii} 为

$$u_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^{c} \left(\frac{\|x_i - c_j\|}{\|x_i - c_k\|}\right)^{\frac{2}{m-1}}}$$

式中:

k——迭代次数;

m——聚类的簇数(类数)。 聚类中心 $c_i 与 u_{ii}$ 的关联公式为

$$c_{j} = \frac{\sum_{i=1}^{N} u_{ij}^{m} x_{i}}{\sum_{i=1}^{N} u_{ij}^{m}}$$
(3)

式中:

N——样本数。

数据聚类利用目标函数 J_m 度量分区质量,如公式(4)所示。

$$J_{m} = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{C} u_{ij}^{m} \left\| x_{i} - c_{j} \right\|^{2} , \quad 1 \le m < \infty$$
 (4)

式中:

经过反复迭代运算,得到J_m的极小值。迭代运算的终止条件如公式(5)所示。

$$U^{(k+1)} - U^{(k)} \le \varepsilon$$

式中:

$$U^{(k)}$$
——误差阈值, $U^{(k)} = \max_{ii} (i)$

 ε ——当迭代到前后两次的 $U^{(k)}$ 差值小于 ε 时,

终止迭代, $\varepsilon \in (0, 1)$ 。

PCB 焊盘图像经过聚类分割后划分为焊盘区域和背景区域,如图7所示。



图 7 PCB 焊盘图像聚类分割效果

2.5 像素精度边缘提取

边缘定义了图像中对象的边界,通常是灰度变化 较大的部分。本文利用 Canny 算子提取 PCB 焊盘图 像边缘。

通过计算 PCB 焊盘图像的梯度来提取边缘,图 像梯度 $\nabla I(x,y)$ 表示为

$$\nabla I(x,y) = \left[\frac{\partial I(x,y)}{\partial x}, \frac{\partial I(x,y)}{\partial y}\right] = \left[I_x, I_y\right] \quad (6)$$

梯度的大小(长度)表示为

$$\left\|\nabla I\left(x,y\right)\right\| = \sqrt{I_x^2 + I_y^2} \tag{7}$$

梯度的方向表示为

$$\alpha(x, y) = \arctan \frac{I_x}{I_y} \tag{8}$$

式中:

2022 年 第 43 卷 第 6 期 自动化与信息工程 23

I(*x*,*y*)——原图像灰度值;

 $\nabla I(x,y)$ ——像素梯度,最大梯度方向的幅值为 $\|\nabla I(x,y)\|$ 。

根据公式(6),利用 Canny 算子提取 PCB 焊盘边缘。先利用高斯滤波器进行图像平滑和噪声抑制;再基于滞后阈值法滤除低梯度边缘像素(由噪声引起)。 PCB 焊盘图像 Canny 算子提取效果如图 8 所示。



Canny

图 8 PCB 焊盘图像 Canny 算子提取效果

2.6 亚像素边缘检测

利用 Canny 算子提取的 PCB 焊盘边缘仍存在较 大的误差,无法满足高精度检测的要求。采用亚像素 边缘检测法可提高检测精度:首先,利用整数像素边 缘检测法将图像边缘粗略定位到像素级;然后,以像 素为基本单元,对整数像素周围的灰度值进行细分, 使边缘定位到子像素级,如图9所示。



亚像素边缘提取方法主要包括插值法、拟合法、 矩量法^[16]。其中,插值法简单、快速、高效,但易受 噪声影响;拟合法提取边缘效果较好,但需要大量的 计算和复杂的模型;矩量法速度快、对噪声不敏感、 精度高,尤其是 Zernike 矩因耗时短、抗干扰能力强, 得到广泛应用。

Zernike 矩的理想边缘模型如图 10 所示[17]。





图 10 中, h为图像背景部分的灰度值; t为目标和 背景部分的灰度差,即目标部分的灰度值为h + t; L为对象的理想边缘; d 为从原点到边缘的垂直距离; α 为 d 与 x 轴间的夹角。基于该边缘模型,图像 f(x,y)的n阶m次Zernike 矩定义为

$$Z_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \iint_{x^2 + y^2} f(x, y) V_{nm}^*(\rho, \theta) \, dx \, dy$$
 (9)

式中:

$$V_{nm}^{*}(\rho,\theta)$$
——Zernike 正交多项式 $V_{nm}(\rho,\theta)$ 的

共轭复数。

在单位圆中, Z_{nm} 可以表示为

$$Z_{nm} = \sum_{x} \sum_{y} f(x, y) V_{nm}^{*}(\rho, \theta)$$
(10)

Zernike 矩具有旋转不变性, 即旋转后模不变, 仅

相位角变化。在顺时针旋转 α 后,图像的初始 Zernike 矩 Z_{nn} 与旋转后的 Zernike 矩 Z'_{nn} 的关系为

$$Z'_{nm} = Z_{nm} e^{-jm\alpha} \tag{11}$$

Zernike 矩亚像素边缘检测法通过计算 3 个不同 阶的 Zernike 矩来实现边缘定位。3 个不同阶的 Zernike 矩分别表示为 Z_{00} 、 Z_{11} 、 Z_{20} , 与这 3 个 Zernike 矩 对应的积分核函数分别为 $V_{00} = 1$ 、 $V_{11} = x + iy$ 、 $V_{20} = 2x^2 + 2y^2 - 1$ 。根据 Zernike 矩的定义和公式(11)可计 算 Z_{00} 、 Z_{11} 、 Z_{20} , 再联立求得理想边缘模型的 4 个 参数为

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\operatorname{Im}[Z_{11}]}{\operatorname{Re}[Z_{11}]} \right)$$
(12)

$$d = \frac{Z_{20}}{Z'_{11}} \tag{13}$$

$$t = \frac{3Z'_{11}}{2\left(1 - d^2\right)^{\frac{3}{2}}} \tag{14}$$

$$h = \frac{Z_{00} - \frac{t\pi}{2} + t\sin^{-1}d + td\sqrt{1 - d^2}}{\pi}$$
(15)

Zemike 矩通过模板和图像卷积计算。当尺寸为 N×N的模板在图像上移动并与像素卷积时,模板中心 周围覆盖 N²个像素,单位圆的半径变为 N / 2。当单 位圆上的距离 d 放大 N / 2 倍时,亚像素边缘坐标公 式修改为

$$[x_s y_s] = [xy] + \frac{Nd}{2} [\cos \alpha \sin \alpha] \qquad (16)$$

基于 Zernike 矩的阈值条件为

$$t \ge t_z \cap d \le d_z \tag{17}$$

式中:

t_z——阶跃灰度的阈值,根据聚类结果,当目标 区域和背景区域中像素的阶跃灰度值的方差最大时, 将t_z作为阈值;

d_z——从中心到边缘的垂直距离阈值, 2d_z应小

于像素长度,考虑到模板效应, $d \leq 2d_z / N$ 。

基于 Zernike 矩的亚像素边缘检测效果如图 11 所示。



图 11 基于 Zernike 矩的亚像素边缘检测效果

由图 11 可以看出,利用 Zernike 矩进行亚像素边 缘检测可获得清晰的 PCB 焊盘轮廓,在减少计算以 及噪声干扰的同时,还可以保证检测精度。

3 实验分析

3.1 焊盘尺寸检测精度试验

为验证本文方法的边缘提取精度,分别用二次元 和本文方法测量 5 组 PCB 焊盘的宽、高尺寸,并利 用两者测量结果的差值评估检测精度,测量结果如表 1 所示。

表1 PCB 焊盘宽、高测量结果 单位: mm

测量方法 -		PCB 焊盘序号				
		1	2	3	4	5
宽	二次元方法	0.098	0.096	0.099	0.095	0.097
	本文方法	0.104	0.099	0.107	0.102	0.101
	误差	0.006	0.003	0.008	0.007	0.004
一回	二次元方法	0.195	0.194	0.195	0.199	0.193
	本文方法	0.198	0.196	0.198	0.201	0.196
	误差	0.003	0.002	0.003	0.002	0.003

由表1可知,本文采用的亚像素边缘提取方法提 取 PCB 焊盘边缘,平均测量精度在±8 μm 以内,提高 了测量精度。

3.2 PCB 焊盘位置检测精度试验

由于视野范围有限,无法将整张 PCB 放在一幅 图像中,需要连续采集多幅图像才能完整采集整张 PCB。为测量 PCB 的每个焊盘中心相对于第一幅图

2022 年 第 43 卷 第 6 期 自动化与信息工程 25

像中 Mark 点的位置,需将采集的多幅图像的坐标转 换到同一坐标系下。传统的图像拼接算法需要经过特 征提取和特征匹配,不仅计算量大,而且准确率低, 无法满足实时性以及高精度的要求。本文根据线阵相 机的特殊性,将所有采集的 PCB 焊盘图像都转换到 同一个像素坐标系下,以提高效率和精度。具体过程 如下:在纵向拼接(即相机扫描方向)过程中,横坐 标不变,纵坐标加上图像高度,即(*x*,*y* + (*n* – 1)*H*), 其中,*n*为纵向第*n*张图像,*H*为图像的像素高度; 在横向拼接过程中,横坐标加上X轴相对于初始位置 的运动偏移量,纵坐标加上图像高度,即(*x* + *s*,*y* + (*n* – 1)*H*),其中,*s*为X轴相对于初始位置的偏移量。

选取 20 组 PCB 焊盘图像,计算 PCB 焊盘中心 与 Mark 点在 X 轴方向和 Y 轴方向的距离,测量原理 如图 12 所示。将本文方法与二次元方法的测量结果 进行对比,测量精度如图 13 所示。





由图 13 可知, PCB 焊盘在 X 轴方向距离的测量 误差在 12 μm 以内, 在 Y 轴方向的测量误差在 6 μm 以内。

4 结论

本文提出一种基于机器视觉的 Mini LED 背光板 PCB 焊盘检测系统。首先,采用阈值分割法进行 PCB 焊盘粗定位,去除大部分背景区域;然后,利用模糊 C 均值聚类算法进一步细分 PCB 焊盘和背景区域; 接着,利用 Canny 算子有效提取 PCB 焊盘边缘;最 后,采用基于 Zernike 矩的亚像素边缘检测法,将检 测精度提升至亚像素级。该系统测量的 PCB 焊盘尺 寸误差在±8 µm 以内,焊盘位置在 X 轴方向测量误差 在 12 µm 以内,在 Y 轴方向的测量误差在 6 µm 以内, 满足 Mini LED 背光板 PCB 焊盘检测精度要求。在未 来的研究中,将通过减少测量误差和提高实时计算速 度来改进机器视觉的检测方法。

参考文献

- [1] XUAN T, GUO S, BAI W, et al. Ultrastable and highly efficient green-emitting perovskite quantum dot composites for Mini-LED displays or backlights[J]. Nano Energy, 2022, 95:107003.
- [2] 季洪雷,陈乃军,王代青,等. Mini-LED 背光技术在电视产品 应用中的进展和挑战[J].液晶与显示,2021,36(7):983-992.
- [3] 向华,余小丰,杨俊,等.小型 LED 灯印制板要求介绍[J].印制 电路信息,2020,28(5):26-29.
- [4] 林宗沛.基于改进 Faster-RCNN 的高密度柔性电路基板缺陷 检测研究[D].广州:华南理工大学,2020.
- [5] 宋帅帅,黄锋,江燕斌.基于机器视觉几何量测量技术研究进 展分析[J].电子测量技术,2021,44(3):22-26.
- [6] 谭文,方淼,段峰,等.基于机器视觉的 3D 激光平面度测量系 统的研究与应用[J].仪器仪表学报,2020,41(1):241-249.
- [7] MCGUINNESS B, DUKE M, AU C K, et al. Measuring radiata pine seedling morphological features using a machine vision system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021,189: 106355.
- [8] JIANG Z, ZHOU C, ZHANG H. Automatic Measurement of Nanoimage Based on Machine Vision and Powder Metallurgy Materials[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2022,2022:1-11.

(下转第40页)