

基于亚像素边缘检测的 LED 芯片定位算法研究

李德龙¹, 龚时华¹, 王子悦²

(1、2: 华中科技大学 机械科学与工程学院, 湖北武汉 430073)

摘要: LED 芯片的定位直接决定了 LED 芯片检测设备的精度, 为了提高芯片定位的精度, 减少模板的影响, 提出了基于边缘提取的亚像素定位算法。该算法首先采用 gamma 变换增强芯片与蓝膜之间的对比度, 再通过 Blob 算法获取芯片感兴趣区域, 接着采用 Canny 算法进行亚像素边缘轮廓提取, 拟合芯片边缘轮廓进行芯片定位。该算法不需要人工训练模板进行匹配, 提高了边缘提取的定位精度, 通过实际实验和测量, 重复性定位精度达到 0.1pixel, 实现了 LED 芯片高精和高速的定位需求。

关键词: LED 芯片; 图像分割; Canny 算法; 亚像素; 边缘提取

Research on Positioning Algorithm of LED Chips Based on Sub-pixel Edge Detection

LI Delong¹, GONG Shihua¹, Wang ZiYue²

(1、2: School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: The position of LED chips directly determines the accuracy of detection machines. To improve the accuracy of the chip positioning, and to minimize the effect of template matching, the sub-pixel positioning algorithm which is based on edge fitting was put forward. Firstly, the algorithm uses the gamma transform to enhance the contrast between the chip and the background area. Then, it uses Blob algorithm to get the chip area of interest. Next, Canny edge detection is used to abstract chip's framework. Finally, it fits edge to locate chip position. This algorithm does not need artificial training to match template, so it improves the location precision of image edge detection. Through actual measurement and test, results show that the image repeatability positioning precision error is less than 0.1pixel. This algorithm meets the need of the high-precision positioning.

Keywords: LED chips; image segmentation; Canny algorithm; sub-pixel; edge detection

EEACC:

PACC:

0 引言

LED 芯片作为第四代电光源, 具有功耗低、发光强度大、使用时间长等特点, 随着 LED 产业发展, 需要 LED 检测设备有更高的效率, 其核心部件长久以来一直从欧美进口, 国内的自主产品还无法满足现阶段的生产需要。其中, LED 视觉系统就是通过视觉检测, 对 wafer 上的 LED 芯片进行识别, 得到芯片的电极坐标, 并将坐标信息提供给后续的检测。LED 芯片典型尺寸在 0.1mm~1mm 之间, 间距介于 0.05mm~0.6mm 之间^[1], 因此图像识别定位算法必须满足速度快、精度高的需求。

针对这一问题, 文献^[2]提出了一种形状匹配的定位方法, 首先通过获取物体图像的边界特征点, 拟合得到 LED 边界曲线, 其不受像素灰度变化的影响, 并以此作为图案模板, 然后在待检测图像中搜索相近的几何外形, 达到定位 LED 芯片的目的。文献^[3]第一步是用鼠标拖选区域框作为标准芯片的模板, 第二步在低倍率的大视野下, 用模板对 LED 芯片进行匹配粗定位; 第三步是在高倍率的小视野下, 对坐标的八邻域进行模板匹配的精定位, 这样实现了定位的准确性和快速性。然而, 上述方法均需要通过芯片模板来定位其他芯片, 模板的误差将导致图像定位精度产生偏差。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51375192)、湖北省科技支撑计划项目 (2014BAA009)

作者简介: 李德龙 E-mail: 292042943@qq.com

通讯作者: 龚时华 E-mail: gongshihua1@hust.edu.cn

为了克服传统算法的不足,本文对以往常规的LED模板匹配提出了改进方案,通过结合图像分割算法,完成芯片的高精匹配,通过实验验证,有效提高了芯片的定位精度与效率。

1LED 芯片区域特征提取

常用的LED芯片尺寸一般为 $7\text{ mil} \times 9\text{ mil} = 177.8\text{ }\mu\text{m} \times 228.6\text{ }\mu\text{m}$,如图1所示,LED芯片图像主要表现为蓝膜背景、LED芯片两层景物,芯片区域是感兴趣的区域。为了从背景中将LED芯片区域提取出来,需要进行图像分割^[4]。

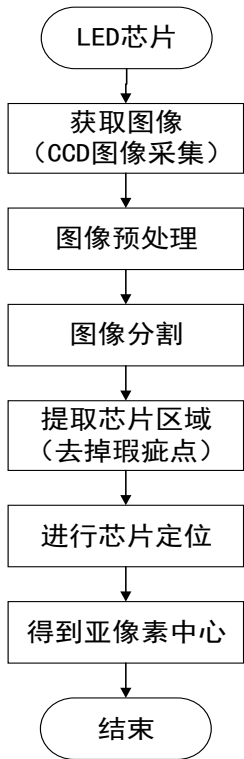


图1 整个过程流程图

Fig.1 Flow diagram of whole process

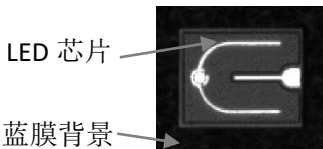


图2 LED 芯片示意图

Fig.2 Schematic diagram of LED chips

1.1 对光照不均图像的预处理

在芯片检测系统中,由于图像的视场较小($4\text{mm} \times 3\text{mm}$),机械的安装偏差与光源的同

轴度偏差导致图像的光照不均匀,使得图像中整体灰度分布不一致,给图像识别造成很大干扰,本文提出了一种针对图像亮度不均匀的图像预处理算法,图像预处理后,图像的整体灰度分布均匀,阈值分割效果良好,预处理流程图如下所示:

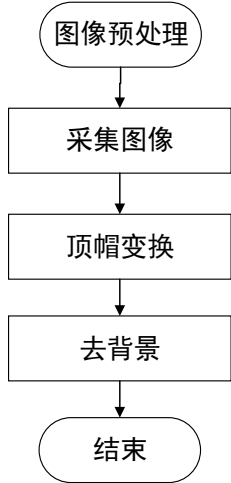


图3 图像预处理的算法流程图

Fig.3 Flow diagram of image preprocessing algorithm

- 1) 实时采集LED芯片图像 I_{ori}
- 2) 采用算法提取不均匀光照图像背景,公式如下:

$$I_{bg} = I_{ori} \circ B \quad (1)$$

式中: \circ 为形态学开运算符; B 为结构元素,

I_{bg} 为背景图片。

- 3) 去除光照不均背景

$$I = I_{ori} - I_{bg} \quad (2)$$

得到图像预处理实验结果:

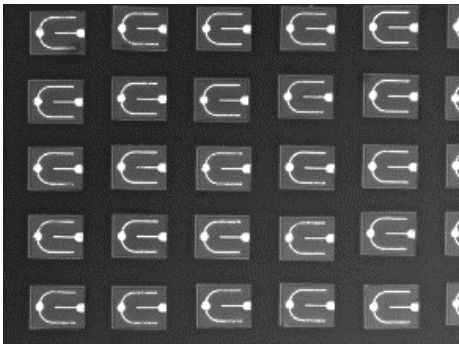


图4 实时采集图片

Fig.4 acquire image in real-time



图 5 不均匀光照背景

Fig.5uneven illumination images

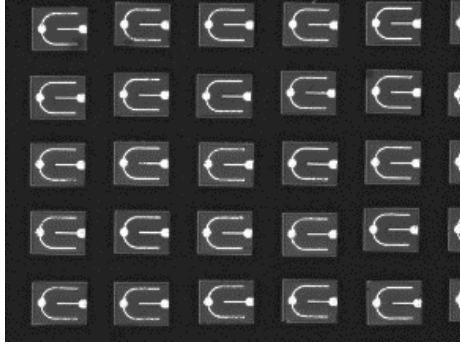


图 6 去掉不均匀背景后

Fig.6After removing theuneven illumination images

1.2 对芯片区域进行图像分割

为了将LED芯片区域从蓝膜背景中完整地提取出来,需要进行图像分割,常用的方法有:阈值化、基于边界的分割、基于模型的分割、基于区域的分割、基于形态学的分割方法等^[5]。

分析灰度直方图可知,LED芯片区域与背景在灰度上有较大差异,因此本文采用阈值分割法,它适用于目标和背景处于不同灰度级范围的图像。

然而最优阈值比较难确定,常用的确定阈值方法有P参数法、最大类间方差法(Otsu算法)、迭代法等。其中,P参数法适用于目标占据图像比例已知的情况;Otsu算法适用于目标与背景灰度差较大的情况;迭代法适用于具有非理想双峰直方图的图像,但是处理速度较慢,不适合在线处理。本文需要在线对芯片图像进行阈值分割,对处理速度和精确性的要求较高,综上可知,Otsu算法是一种比较适合本文的方法^[6]。

Otsu 算法的基本思想是以某一灰度作

为阈值,将图像分为两类,当类间方差最大时,说明不同类间的分离性最好,就以这个灰度值作为阈值来分割图像。

采用 Otsu 算法进行图像分割的过程如下:

设一幅图像有 L 个不同的灰度级,灰度值为 i 对应的像素数为 n_i ,那么得到总像素数为:

$$N = \sum_{i=1}^L n_i \quad (3)$$

每个灰度级的概率为:

$$p_i = \frac{n_i}{N} \quad (4)$$

用阈值 T 把图像中的像素按照灰度值分为两组, C_0 由灰度值在 $[1, T]$ 内的像素组成, C_1 由灰度值在 $[T+1, L]$ 之间的像素组成。

则 C_0 , C_1 组产生的概率分别为:

$$w_0 = \frac{\sum_{i=1}^T n_i}{N} = \sum_{i=1}^T p_i \quad (5)$$

$$w_1 = \frac{\sum_{i=T+1}^L n_i}{N} = \sum_{i=T+1}^L p_i$$

$$= 1 - w_0 \quad (6)$$

C_0 , C_1 组的平均灰度为:

$$u_0 = \frac{\sum_{i=1}^T n_i * i}{\sum_{i=1}^T n_i} = \frac{\sum_{i=1}^T p_i * i}{w_0} \quad (7)$$

$$u_1 = \frac{\sum_{i=T+1}^L n_i * i}{\sum_{i=T+1}^L n_i} = \frac{\sum_{i=T+1}^L p_i * i}{w_1} \quad (8)$$

整个图像的平均灰度为:

$$u = \sum_{i=1}^L p_i * i \quad (9)$$

其中,阈值为 T 时灰度的平均值为:

$$u(T) = \sum_{i=1}^T p_i * i \quad (10)$$

综上可知,采样的灰度平均值为:

$$u = u_0 * w_0 + u_1 * w_1 \quad (11)$$

类间方差公式:

$$\delta^2 = w_0(u_0 - u)^2 + w_1(u_1 - u)^2$$

$$= w_0 w_1 (u_0 - u_1)^2 \quad (12)$$

那么取合适的 T ($1 < T < L$) 值,让 δ^2 最大,此时的 T 值即为最大类间方差法的最佳阈值,得到最佳的分割效果。

图 7, 8 所示是进行阈值分割前后的结果:

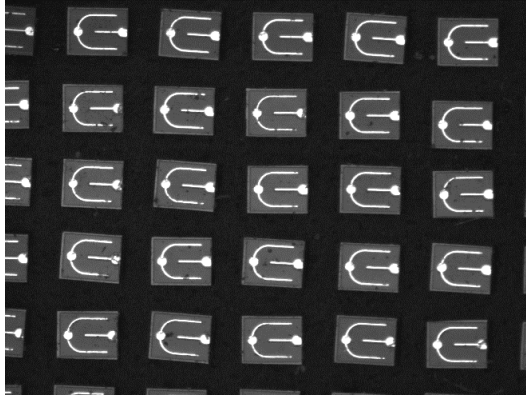


图 7 Otsu 分割图像前

Fig.7 Before using Otsu image segmentation algorithm

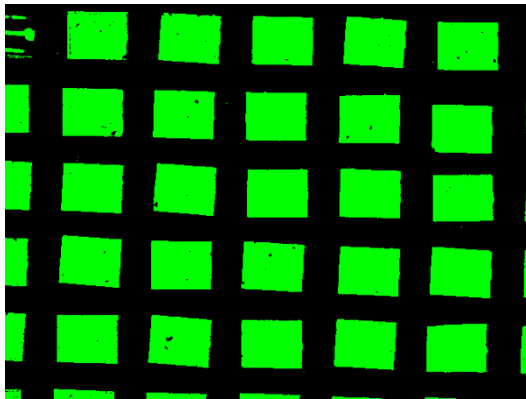


图 8 Otsu 分割图像后

Fig.8 After using Otsu image segmentation algorithm

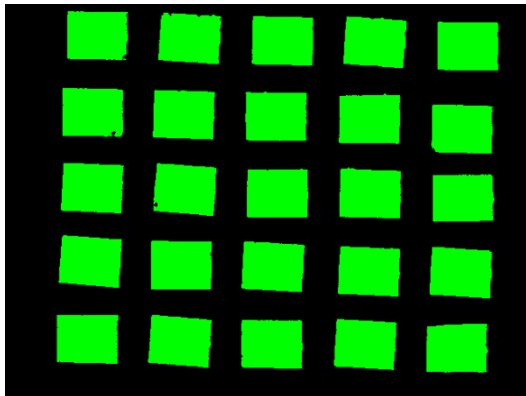


图 9 运用 Blob 算法后

Fig.9 After using Blob algorithm

Otsu 阈值分割后, 由图 8 可知, 图片中存在细小瑕疵点, 以及没有完全进入视野的部分芯片。再使用 Blob 算法, 通过提取区域的矩形度特征以及面积特征, 统计各区域的灰度像素个数, 将数值为[200, 9999]的区域设置为芯片区域, 从而将瑕疵点等过滤掉, 结果如图 9 所示。

2 芯片亚像素精度定位

通过对图像进行分割和区域特征提取后, 得到芯片的大致区域。再通过最小外接矩形获取芯片的外轮廓区域, 并采用 Canny 算子提取芯片亚像素边缘轮廓, 并拟合亚像素的边缘轮廓, 最终得到芯片的中心。芯片定位流程图如图 10 所示:

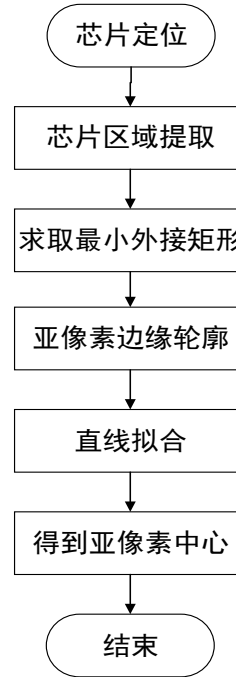


图 10 亚像素精度定位流程图

Fig.10 Flow diagram of sub-pixel precision positioning

2.1 芯片边缘区域提取

为了能够准确的进行芯片边缘定位, 需要先对芯片边缘区域进行粗定位, 根据芯片区域计算其最小外接矩形, 并通过形态学运算获取边缘轮廓区域。算法流程如下:

- 1) 根据重心原理, 计算芯片区域的中心。

$$X_c = \frac{\sum G_i * X_i}{G} \quad (13)$$

$$Y_c = \frac{\sum G_i * Y_i}{G} \quad (14)$$

- 2) 将水平主轴按照 $\Delta \theta = 0.1^\circ$ 的旋转间隔, 每次旋转后, 求出芯片区域的外接矩形, 同时计算出每一个外接矩形的面积, 面积最小的水平主轴方向所对应的矩形作为该芯片的最小外接矩形^[7]。
- 3) 运用腐蚀和膨胀运算, 获取芯片的边缘区域。如图 11 所示:

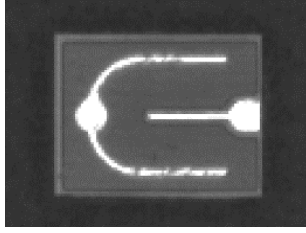


图 11(a) 单个 LED 原始放大图像

Fig.11(a)Single LED magnified image

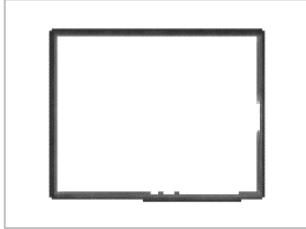


图 11(b) 芯片的边缘区域

Fig.11(b) Edge region of the chip

图 11 提取芯片边缘区域

Fig.11Extract edge region of the chip

2.2 亚像素边缘轮廓提取

常用的边缘检测算法有一阶微分算子 (Sober 算子、Prewitt 算子等), 二阶微分算子如 Laplacian 算子, Canny 算子等。Sober 和 Prewitt 算子先对图像做加权平滑处理, 再做微分运算, 能够一定程度上抑制噪声, 但是可能会出现伪边缘, 会降低边缘检测精度; Canny 检测算子是通过寻找图像的梯度局部最大值, 采用边缘连接和双阈值检测, 运用多尺度检测和方向性搜索, 实际效果要优于其他算子。综上, 本文使用 Canny 边缘检测, 运用 Canny 检测算子后发现, 由于噪声等因素的干扰, 图 12 (b) 中, 提取得到的右半部分边缘线段是断开的, 于是将相邻的亚像素边缘线段进行部分连接, 效果如图 12 (a), (b), (c) 下所示:

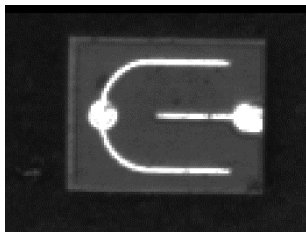


图 12(a) 单个 LED 原始放大图像

Fig.12(a)Magnified image of original single chip

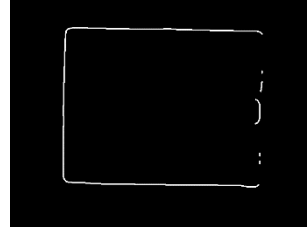


图 12(b) 运用 Canny 算子后

Fig.12(b) After using Canny algorithm

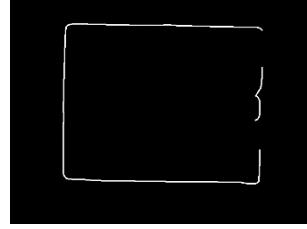


图 12(c) 连接相邻的边缘线段后

Fig.12(c) After connecting adjacent edge segments

图 12 亚像素边缘轮廓提取

Fig.12 Sub-pixel edge extraction

同时发现, 部分芯片的内部存在细小的干扰边缘, 通过设置保留长度大于 100 的线段, 来去除干扰, 效果如图 13 所示:

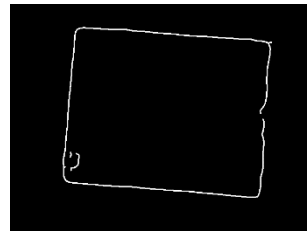


图 13(a) 运用 Canny 算子后, 左下角出现干扰边缘

Fig.13(a)Edge interference appears in lower left

corner after using Canny algorithm

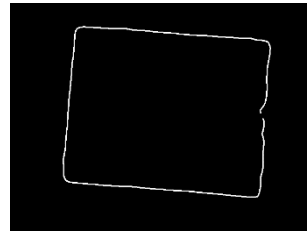


图 13(b) 去除干扰边缘后

Fig.13(b) After removing the edge interference

图 13 干扰边缘

Fig.13Edge interference

2.3 直线拟合

采用标准直线Hough变换对亚像素边缘进行拟合, 参数化直线方程如下:

$$\alpha x + \beta y + \gamma = 0 \quad (15)$$

(x, y) 为亚像素边缘点, 由点到直线的距离,

把边缘上的一系列点 $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n$ 的坐标带入式 (15)，然后使系列点到该直线的距离的平方和为最小，如下式：

$$\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^n (\alpha x_i + \beta y_i + \gamma)^2 \quad (16)$$

随机选取芯片 1 和 2，检测最终显示结果，如图 14、15 所示：

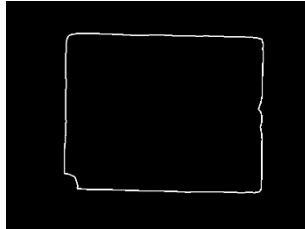


图 14(a) 直线拟合前

Fig.14(a)Before fitting straight lines

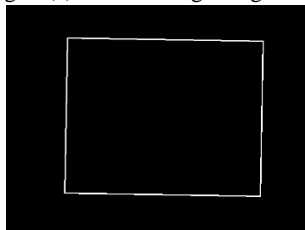


图 14(b) 直线拟合后

Fig.14(b)Afterfitting straight lines

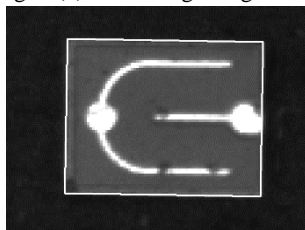


图 14(c) 检测结果

Fig.14(c) Test results

图 14 对芯片 1 的边缘进行直线拟合

Fig.14 Fitting straight lines for the edge of chip 1

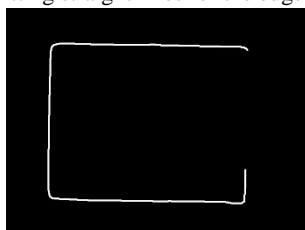


图 15(a) 直线拟合前

Fig.15(a)Before fitting straight lines

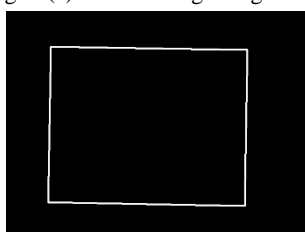


图 15(b) 直线拟合后

Fig.15(b)Afterfitting straight lines

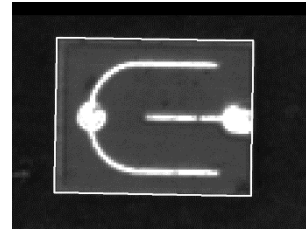


图 15(c) 检测结果

Fig.15(c) Test results

图 15 对芯片 2 的边缘进行直线拟合

Fig.15 Fitting straight lines for the edge of chip 2

计算拟合的亚像素边缘轮廓的中心，即为芯片的中心，如图 16 所示。

$$\bar{x} = \frac{\int_A x dA}{A} \quad (17)$$

$$\bar{y} = \frac{\int_A y dA}{A} \quad (18)$$



图 16 采用本文提出的方法得到的芯片中心

Fig.16Using the proposed algorithm to obtain the center of the chip



图 17 采用几何模板匹配的方法得到的芯片中心

Fig.17Using the template matching methods to obtain the center of the chip

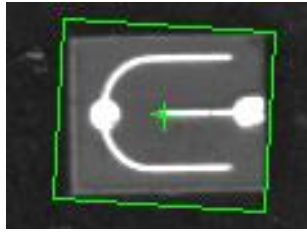


图 18 (a) 芯片 1

Fig.18(a) Chip 1

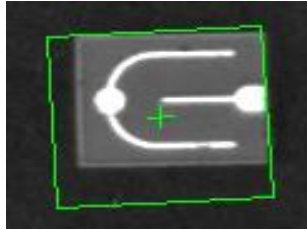


图 18 (b) 芯片 2

Fig.18(b) Chip 2

图 18 采用几何模板匹配的方法的放大图

Fig.18 Enlarged image after using the template matching methods

如图 17，图 18 可知，采用文献中几何模板匹配的方法，用鼠标拖选区域框存在人工视觉误差，造成匹配新芯片得到的边框把一部分背景包含进去，不能准确的代表芯片区域。而本文提出的方法解决了这一问题，提高了边缘提取的定位精度。

3 实验验证

实验用计算机配置为双核且频率为 2.6 GHz，内存为 4G，显存为 1G。算法处理软件为机器视觉软件 Halcon 12. 0，PMAC 运动控制卡。

3.1 算法的重复性精度测试

为了检验算法的精度，进行重复性测试，是指在同一位置下对芯片进行多次拍照，得到芯片(x,y)的标准差，由于系统中存在噪声和光照的波动，每次得到的图像会有一些变化，本文在不同时刻采集 10 幅图像进行检测，由图 17 可知，一幅图像中识别出 25 颗芯片，表 1, 2 选取其中 10 颗芯片的坐标信息，测量结果如下表（单位为 pixel）：

表 1 测试重复性数据结果（x 坐标）

Tab.1 The results of testing repeatability(x coordinate)

重复次数	1 号芯片	2 号芯片	3 号芯片	4 号芯片	5 号芯片	6 号芯片	7 号芯片	8 号芯片	9 号芯片	10 号芯片
1	46.612	50.601	140.587	144.514	233.514	237.833	329.033	421.613	425.103	429.883
2	46.697	50.726	140.684	144.623	233.640	237.942	329.157	421.700	425.208	429.996
3	46.687	50.717	140.676	144.621	233.619	237.934	329.144	421.689	425.214	429.986
4	46.755	50.786	140.759	144.712	233.698	238.013	329.235	421.768	425.285	430.078
5	46.692	50.729	140.700	144.640	233.643	237.950	329.159	421.712	425.234	430.018
6	46.725	50.739	140.724	144.677	233.673	237.975	329.201	421.742	425.260	430.048
7	46.725	50.758	140.715	144.683	233.675	237.975	329.207	421.739	425.261	430.035
8	46.748	50.789	140.765	144.703	233.699	238.003	329.233	421.768	425.280	430.075
9	46.811	50.854	140.827	144.764	233.768	238.058	329.290	421.822	425.331	430.137
10	46.898	50.928	140.907	144.843	233.847	238.161	329.387	421.932	425.445	430.229
σ	0.077	0.087	0.088	0.089	0.089	0.086	0.094	0.085	0.088	0.093

表 2 测试重复性数据结果 (y 坐标)

Tab.2 The results of testing repeatability(y coordinate)

重复次数	1 号芯片	2 号芯片	3 号芯片	4 号芯片	5 号芯片	6 号芯片	7 号芯片	8 号芯片	9 号芯片	10 号芯片
1	231.049	466.457	119.604	352.452	117.498	350.937	229.029	110.871	343.681	575.588
2	231.140	466.553	119.682	352.547	117.521	351.015	229.112	110.973	343.729	575.681
3	231.167	466.591	119.719	352.537	117.573	351.064	229.157	111.010	343.787	575.718
4	231.140	466.567	119.677	352.539	117.539	351.034	229.123	110.976	343.743	575.671
5	231.155	466.584	119.697	352.539	117.556	351.057	229.139	111.000	343.803	575.717
6	231.148	466.571	119.734	352.548	117.542	351.029	229.126	110.982	343.771	575.692
7	231.187	466.596	119.724	352.562	117.572	351.070	229.148	111.009	343.840	575.726
8	231.133	466.575	119.682	352.536	117.542	351.052	229.117	110.981	343.751	575.693
9	231.163	466.601	119.699	352.558	117.562	351.070	229.136	110.993	343.784	575.708
10	231.099	466.536	119.615	352.472	117.455	350.973	229.037	110.895	343.699	575.594
σ	0.039	0.042	0.043	0.037	0.037	0.044	0.044	0.047	0.048	0.049

如表 1, 2 所示, x 坐标的重复性精度最大为 0.094 pixel, y 坐标的重复性精度最大为 0.049 pixel, 综上重复性精度在 0.1 pixel 以内, 满足亚像素精度(重复性精度)的要求。

3.2 算法的稳定性测试

由于分选设备是在电机移动过程中持续的工作, 视野在不断的变化, 因此需要检验该算法能否在实际条件下准确的识别出每个芯片。

通过 PMAC 运动控制卡, 让电机移动一段距离并随机拍下 5 副图片, 并用本文提出的算法进行处理, 通过人工的判断, 发现能够识别出视野内的所有完整芯片, 并且矩形框均能够代表相应芯片的区域, 没有出现类似图 18 的情况。选取其中的 2 副图如图 19 所示, 每幅图选取其中一个芯片检测如表 3 所示 (单位为 pixel):



图 19(a) 沿 x 轴正向移动 50mm 并拍照
Fig.19(a) Move forward 50mm along the x-axis and acquire image

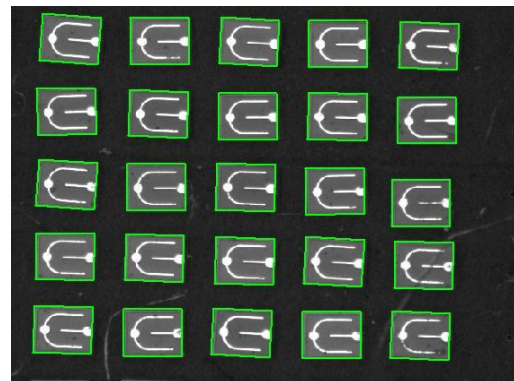


图 19(b) 沿 y 轴负向移动 50mm 并拍照
Fig.19(b) Move negative 50mm along the y-axis and acquire image

图 19 移动电机选取不同视野下的芯片
Fig.19 Move motor and select different chips of view

表 3 对随机选取的 5 副图片进行检测

Tab.3 Detect five randomly selected image

1 号芯片		2 号芯片		3 号芯片		4 号芯片		5 号芯片	
X 坐标	Y 坐标	X 坐标	Y 坐标	X 坐标	Y 坐标	X 坐标	Y 坐标	X 坐标	Y 坐标
42.774	76.708	236.254	187.948	326.361	69.741	36.012	213.019	130.386	207.322

3.3 算法的耗时测试

对 3.2 节得到的图像计算算法耗时，整个计算过程均在 90ms 以内，平均每颗芯片识别耗时在 3.6ms 内，可以满足实际生产的要求。

表 4 耗时测试

Tab.4 Time consuming test

第 1 副图		第 2 副图		第 3 副图		第 4 副图		第 5 副图	
耗时/ms	个数	耗时/ms	个数	耗时/ms	个数	耗时/ms	个数	耗时/ms	个数
81.74	25	85.40	24	83.62	25	82.86	25	85.31	24

4 结语

本文提出的算法不需要人工选取模板，减少了 LED 分选设备的操作流程，识别率高，凸点少，提取的芯片特征更加准确，重复性精度在 0.1pixel 以内，满足了高精的定位需求，能够为后续的运动控制系统提供准确的运动数据。为了进一步提高处理速度，今后的研究方向之一是优化对最小外接矩形的选取过程，以及基于矩的边缘检测算法^[9]，以满足实际生产过程中高速的需求和更多噪声的影响。

参考文献

- [1] 李钊宝. LED 晶片检测中的电极定位图像处理及算法研究[D]. 中国计量学院, 2013.
Li Zhaobao. Image Processing and Algorithm Research on LED Chip Electrode Positioning[D]. China Jiliang University, 2013.
- [2] 吴晓. 一种 LED 芯片椭圆定位方法[J]. 红外与激光工程. 2013, 42(z1): 98-102.
Wu Xiao. Positioning system of LED chips based on ellipse[J]. Infrared and Laser Engineering. 2013, 42(z1)98-102.
- [3] 吴晓. LED 芯片粗精定位系统[J]. 红外与激光工程. 2013(09): 2478-2484.

Wu Xiao. LED chips coarse and fine locating system. Infrared and Laser Engineering[J]. 2013(09)2478-2484.

- [4] 李蒙, 方家乐, 朱颖合. LED 芯片图像的势函数标记分水岭分割[J]. 机电工程. 2010(07): 81-84.

Li Meng, Fang Jiale, Zhu Yinghe. Marker-controlled watershed segmentation of potential function for LED die image[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering. 2010(07):81-84.

- [5] 许新征. 图像分割的新理论和新方法[J]. 电子学报. 2010 (02) :76-82.

Xu Xinzhen. New Theories and Methods of Image Segmentation[J]. Acta Electronica Sinica. 2010 (02) :76-82.

- [6] 王庆海, 赵凤霞, 李纪峰, 金少搏. 基于 Blob 分析的玻璃纤维织物缺陷检测方法研究[J]. 郑州大学学报(工学版). 2015(06): 90-93.

Wang Qinghai, Zhao Fengxi, Li Jifeng, Jin Shaobo. Research on Glass Fiber Fabric Defect Detection Method Based on Blob Analysis[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science). 2015(06)90-93.

- [7] 李钊宝, 汪新新, 贾茜媛. 基于机器视觉的工

- 件尺寸高精度测量方法[J]. 计算机测量与控制. 2015(06): 1866-1870.
- Li Zhaobao, Wang Xinxin, Jia Qian Yuan. A Method of High-precision Machine Vision Measurement of Size Of Workpiece[J]. Computer Measurement & Control. 2015(06):1866-1870.
- [8] 李蒙. LED芯片检测系统视觉图像分析技术研究[D]. 杭州电子科技大学, 2010.
- Li Meng. A Study on the Vision Image Analysis Technology of LED Chip Detection System[D]. Hangzhou Dianzi University, 2010.
- [9] 邱运春, 范勇, 肖德成, 等. 一种新的亚像素边缘检测误差校正算法[J]. 计算机工程. 2014(10): 175-180.
- Qiu Yunchun, Fan Yong, Xiao Decheng, et al. A New Error Correction Algorithm for Sub-pixel Edge Detection[J]. Computer Engineering. 2014(10):175-180.

作者简介：李德龙（1992—），男，华中科技大学硕士研究生，主要研究方向为图像处理和模式识别。

龚时华（1968—），男，华中科技大学博士生导师，主要研究方向为数字化装备控制与数控技术。