

基于频域互相关的 LED 晶粒阵列快速视觉检测

李鹤喜 韩新乐 杨铁牛

(五邑大学 计算机学院, 广东 江门 529020)

摘要: 为了满足LED分选或固晶系统中晶粒定位的实时性要求, 提出了基于归一化频域互相关的LED晶粒模板快速匹配方法。该方法首先通过一种区域递推求和技术将视区的LED晶粒阵列图像在空间域进行归一化处理, 然后利用快速傅立叶变换在频率域进行标准模板与被测LED晶粒阵列图像的互相关运算, 可以同时快速定位视区中所有LED晶粒的像素坐标, 对于清晰的二值晶粒图像, 可以省去归一化处理, 检测效率更高。实验结果表明, 对于复杂结构的LED晶粒图像, 检测效率远高于传统的NCC模板匹配, 比常用的序贯相似检测(SSDA)快速算法效率提高1倍以上, 该方法能够用于各种LED分选系统、固晶系统中的晶粒阵列的快速定位。

关键词: LED 晶粒, 模板匹配, 互相关, 频域, 定位

中图分类号: TP391 文献标志码: A

Rapid Vision Measurement of LED Die Array Based on Cross Correlation in Frequency Domain

LI Hexi, HAN Xinle, YANG Tieniu

(School of Computer Science, Wuyi University, Jiangmen 529020, China)

Abstract: A rapid template matching algorithm based on cross correlation in frequency domain(CCFD) is presented for real-time positioning of light-emitting diode (LED) die array in vision-based LED sorting or die-bonding system, in which a region recurrence accumulation technique is used to normalize the gray value of image and all pixel coordinates of LED dies can be rapidly determined by implementing the CCFD between LED die array image and die template based on fast Fourier transform. The higher detecting efficiency can be obtained using the CCFD technique without image normlization operation for distinct binary images of LED die array. Experimental results to LED die image with complex structure show that detection efficiency is far higher than conventional normalized cross-correlation(NCC) algorithm, and is only half of consumed time to compare with the sequential similarity detection algorithm(SSDA), the proposed CCFD algorithm can be used for rapid LED die array positioning in vision-baesd LED sorting or die-bonding machines.

Key words: LED die, template matching, cross correlation, frequency domain, positioning

1 引言

LED生产的重要工序之一是测试分选, 即对扩晶后的LED晶粒参数进行检测, 并根据测量结果对其分档处理。目前LED的分选测试有两种方法: 一是以芯片为基础的测试分选, 二是对封装好的LED进行测试分选, 前者由于成本低、效率高被广泛采用^[1-4]。基于芯片的LED测试的难点之一是晶圆内每个LED晶粒(die)的准确定位, 主要原因是LED芯片的晶粒尺寸

一般都很小(9mil~100mil), 要通过高倍显微放大的图像进行识别和定位, 另外一个问题是晶粒的识别效率, 因为每个LED晶圆含有密集的成千上万个晶粒, 效率低的识别算法是没有实用价值的。目前大多机器视觉系统采用的是传统的NCC(Normlized Cross Correlation)模板匹配方法^[5-6], 采用这种方法检测LED晶粒图像, 是将整幅图像与LED晶粒图像模板进行逐点的匹配计算, 尽管识别的可靠性高, 但效率很低; 另一种SSDA(Sequential Similarity

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2011ZX02403-004), 广东省自然科学基金资助项目(2016A030313003)

作者简介: 李鹤喜(1961-), 男, 博士, 副教授, 主要从事机器视觉与智能控制方向的研究。

Detection Algorithm)序贯相似检测算法是一种快速模板匹配算法^[7-9], 可以用于LED晶粒检测, 但要通过随机取点计算灰度差, 靠累积误差的快慢来决定相似度, 当误差阈值较低时, 可靠性差。利用相关定理可以在频域进行模板匹配, 但相关程度依赖灰度绝对值, 文中采用一种快速递推方法, 将被测晶圆图像在空间域进行归一化处理, 消除灰度绝对值影响, 然后再到频域将晶圆图像与LED晶粒模板图像的相关运算转换成频率域的乘法运算, 可以利用快速傅里叶变换加快运算速度, 即采用CCFD (Cross Correlation in Frequency Domain) 归一化频域互相关来提高LED模板匹配效率。

2 归一化频域快速图像互相关运算

设 LED 晶粒模板图像(放大后)为 $t(x,y)$, 像素尺寸为 $m \times n$, 显微放大的待测 Wafer 晶圆视区图像为 $f(x,y)$, 像素尺寸为 $M \times N$, 则 LED 晶粒模板 $t(x,y)$ 在视区图像 $f(x,y)$ 中第 (I,J) 点两者的相似性可以用两函数互相关来表示, 离散形式的互相关定义如下:

$$R(I, J) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f(I+i, J+j)t(i, j) \quad (1)$$

为消除待测晶圆图像本身的灰度值的影响, 采用下列归一化形式计算互相关:

$$R(I, J) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f(I+i, J+j)t(i, j)}{[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f^2(I+i, J+j)]^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

应用公式(2)在图像空间域内计算匹配的相关系数 $R(I, J)$, 非常消耗时间的, 一种变通方法是将其变换到频率域利用快速傅里叶变换提高计算效率, 公式(2)的分子部分正是两函数相关的定义, 按相关运算与傅里叶变换的关系有:

$$f(x,y) \circ t(x,y) = F^{-1}\{F(u,v)\overline{T(u,v)}\} \quad (3)$$

就是先把 $f(x,y)$ 和 $t(x,y)$ 分别进行快速傅立叶变换, 得到 $F(u, v)$ 和 $T(u, v)$, 在频率域 $F(u, v)$ 与模板 $T(u, v)$ 的共轭 $\overline{T(u, v)}$ 相乘, 然后再进行 F^{-1} 逆傅立叶变换得到空间域的相关系数。(2)式归一化的分母部分无法转到频率域处理, 可以采用先在空间域里归一化处理, 为此令(2)的分母为:

$$S(I, J) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f^2(I+i, J+j) \quad (4)$$

则由(2)得到:

$$R(I, J) = \frac{F^{-1}\{F(u,v)\overline{T(u,v)}\}}{S(I, J)} \quad (5)$$

这样(5)式的分子可以利用 FFT 实现快速计算相乘, 然而(5)式的分母部分无法转到频率域处理, 由于分母求和是随 LED 模板的移动动态变化的, 在模板到达的每个位置 (I, J) , 都需要计算这个能量和, 因此也是非常耗时的, 为了解决这一问题, 这里给出一种递推求和方法实现(5)式分母的快速计算。

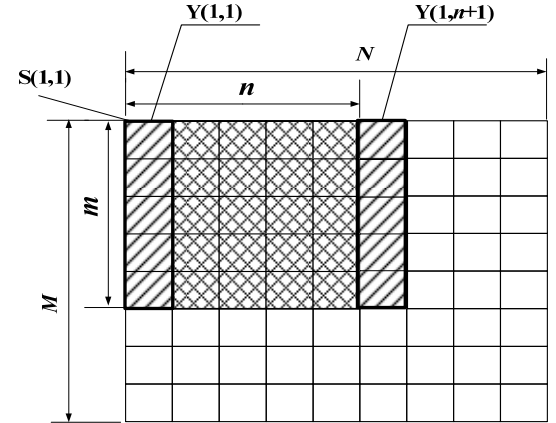


图1 能量求和 $S(I, J)$ 递推关系图

设对应任一位置 (I, J) , (2)式分母的能量和为 $S(I, J)$, 如图1所示, 当 $m \times n$ 的 LED 晶粒模板沿水平方向移动一个像素单位, $S(I, J)$ 沿行只有新一列移入旧一列移出, 其余保持不变, 如图1所示。因此对于第一行各列我们有:

$$\begin{cases} S(1,2) = S(1,1) - Y(1,1) + Y(1,n+1) \\ S(1,3) = S(1,2) - Y(1,2) + Y(1,n+2) \\ \vdots \\ S(1,J) = S(1,J-1) - Y(1,J-1) + Y(1,n+J-1) \end{cases} \quad (6)$$

这里 $Y(1,J)$ 为第一行上按模板覆盖下面 J 列的灰度平方和, 由下式决定:

$$Y(1,J) = \sum_{i=1}^m [f(i,J)]^2 \quad (7)$$

对于第 I 行, 可以得到:

$$\begin{cases} S(I,J) = S(I,J-1) - Y(I,J-1) + Y(I,n+J-1) \\ Y(I,J) = \sum_{k=1}^m [f(I+k-1,J)]^2 \end{cases} \quad (8)$$

与行处理类似, 在列方向上, 第一列的灰度平方和为:

$$\begin{cases} S(2,1) = S(1,1) - X(1,1) + X(m+1,1) \\ S(3,1) = S(2,1) - X(2,1) + X(m+2,1) \\ \vdots \\ S(I,1) = S(I-1,1) - X(I-1,1) + X(m+I-1,1) \end{cases} \quad (9)$$

这里 $X(I,1)$ 为第一列上按模板覆盖下面 I 行的灰度平方和, 由下式决定:

$$X(I,1) = \sum_{k=1}^n [f(I,k)]^2 \quad (10)$$

对于 J 列, 可以得到:

$$\begin{cases} S(I,J) = S(I-1,J) - X(I-1,J) + X(m+I-1,J) \\ X(I,J) = \sum_{k=1}^n [f(I,J+k-1)]^2 \end{cases} \quad (11)$$

在公式(11)的第一式中由 $I-1$ 代替 I 得:

$$S(I-1,J) = S(I-1,J-1) - Y(I-1,J-1) + Y(I-1,n+J-1) \quad (12)$$

将(12)带入(11)的第一式, 得到到 $(I,J) \geq 2$ 任意一点灰度平方和的递推公式为:

$$S(I,J) = S(I-1,J-1) + [X(m+I-1,J) - X(I-1,J)] + [Y(I-1,n+J-1) - Y(I-1,J-1)] \quad (13)$$

整个灰度平方和 $S(I,J)$ 快速算法的流程如图2所示。

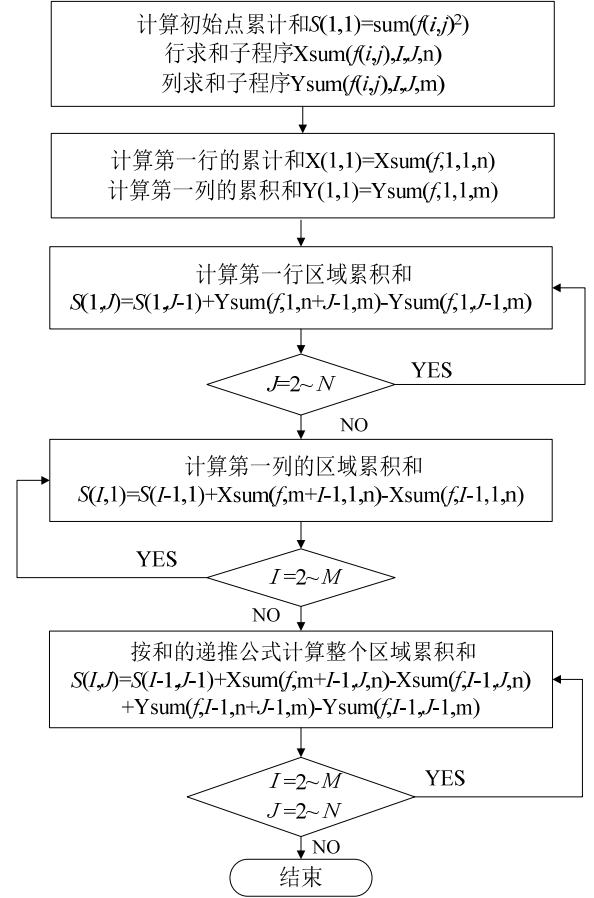


图2 互相关分母求和递推算法流程图

完成空间域的灰度快速求和, 应用 $S(I,J)$ 除图像灰度 $f(i,j)$ 进行归一化处理得到归一化图像灰度 $fn(i,j)$, 然后分别对 $fn(i,j)$ 和模板 $t(i,j)$ 进行FFT快速傅立叶变换, 利用(5)式进行相关的频域计算。事实上相关可以看成将模板旋转 180° 的卷积运算, 根据卷积运算, 相邻周期之间的干扰会产生折叠误差, 模板越大折叠误差越大, 在边缘上误差最大, 可以通过零填充的方法来避免折叠误差, 为此在卷积前要进行采样图像和模板图像的填充扩展。设捕捉的目标图像的像素尺寸为 $M \times N$, 模板的尺寸 $m \times n$, 则选择新的卷积运算的图像尺寸为: $p \geq M+m-1$, $Q \geq N+n-1$ 。为了提高快速傅立叶变换的运算速度, 取 P 和 Q 为满足上面不等式条件的最小2的整数次幂。通过快速相关运算得到每一 (I,J) 点的相关系数 $R(I,J)$, 对于每个晶元图像检测区, 含有大量的晶粒, 故进行相关计算的结

果是一个个波峰，每个波峰对应一个晶粒位置，设 $R(I, J)$ 的最大值为 R_{\max} ，并取阈值 $R_t = c * R_{\max}$ ， c 为阈值因子，一般可取 0.5~0.9，只考虑阈值以上的波峰图像作为晶粒，LED 晶粒检测相关计算的目标图像检测流程如图 3 所示。

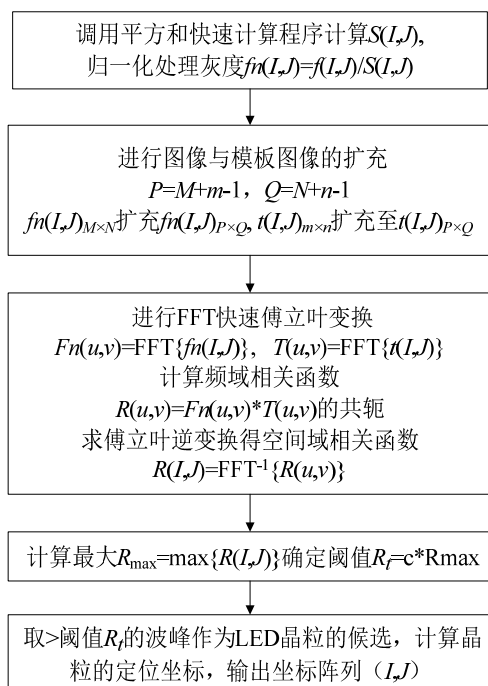


图 3 采用归一化快速相关算法的 LED 晶粒检测流程

3 LED 晶粒快速定位检测试验

试验采用的是直径尺寸为 5cm 的 LED wafer 晶圆，每片含有 1000 个左右的双极 LED 晶粒，晶粒结构是较复杂的双电极结构，采用 LED 光源背光照明，显微摄像头安装在由步进电机驱动的支架上，通过 USB 口与计算机相连，视觉检测装置和 LED 晶圆如图 4 所示。

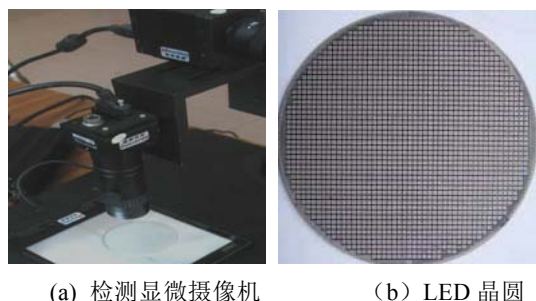
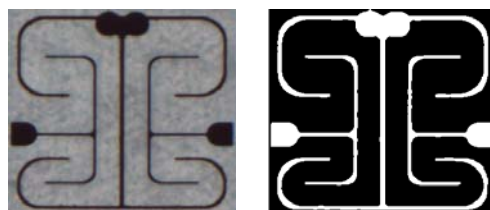


图 4 视觉显微检测装置与 LED 晶圆

不同晶圆 Wafer 上的 LED 晶粒结构不尽

相同，对于批量检测首先建立 LED 合适的标准模板，模板的核心要涵盖 P-电极和 N-电极两部分，对一些大功率 LED 有双 P-电极和 N-电极，这时模板选择要包括所有电极，根据试验 LED 晶圆的晶粒结构选取的模板如图 5 所示（放大 100 倍）。其中灰度模板(a)是原始模板，根据匹配算法需要进行相应的变换处理，这里转换为二值图像，并经过形态学修正，变成二值图像模板(b)。



(a) 灰度模板 (b) 二值图像模板

图 5 LED 晶粒模板

试验采集的 LED 晶粒图像有效视区像素尺寸为 2592×1944 ，在白色 LED 光源背光照下，一幅典型的 LED 晶粒图像阵列如图 6 所示。

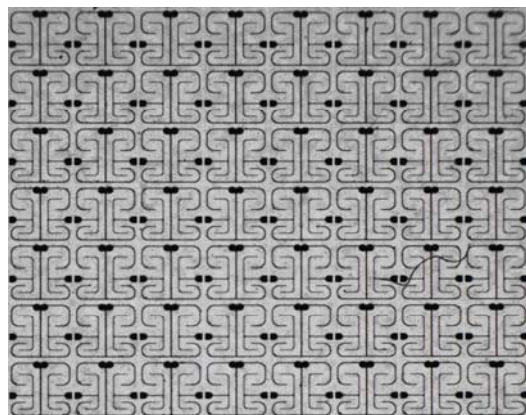


图 6 LED 晶粒阵列二值化图像

为消除灰度影响，将 LED 模板和检测视区图像灰度转化为二值图像，再利用公式 (2) 进行相关计算，公式 (4)~(10) 归一化分母的求和也转换成了像素点的计数累加，速度比灰度求和快。

图 7 是归一化频域相关系数 $R(I, J)$ 的检测结果， $R(I, J)$ 的每个峰值对应一个晶粒，其分布与 LED 晶粒阵列排列一致。

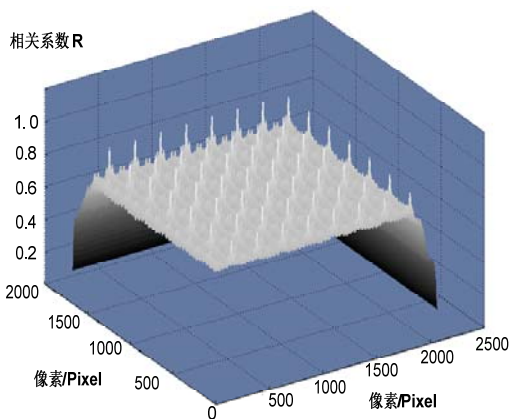


图 7 归一化互相关计算结果

对于清晰的 LED 图像,可以直接省去(2)式分母的归一化处理,利用(3)式直接计算,速度更快。考虑到 FFT 计算误差结果为复数,取其实部,并除以最大值将其数值归一到(0~1)范围,(3)式变为:

$$R(I, J) = \text{Rea}[F^{-1}\{F(u, v)\overline{T(u, v)}\}] / R_{\max} \quad (12)$$

这里 $R_{\max} = \max\{R(I, J), I=1 \sim M, J=1 \sim N\}$, 对同一幅 LED 阵列图像的实验结果如图 8 所示。

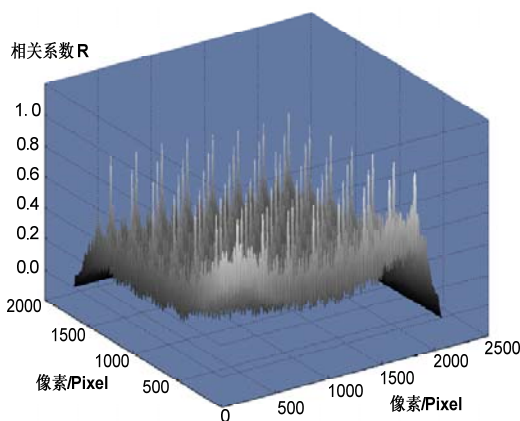


图 8 频域直接互相关检测结果

比较图 7 和图 8 可以看出图 8 相关系数 $R(I, J)$ 变化起伏较大,给定一个阈值,存在漏检的概率大,而采用归一化处理的图 7 的 $R(I, J)$ 值均匀变化,漏检概率很小,但耗时比直接法多。给定阈值 $R_t = 0.7R_{\max}$, 晶粒检测结果为近似圆的区域,经过图像形态学处理后的效果如图 9

所示。

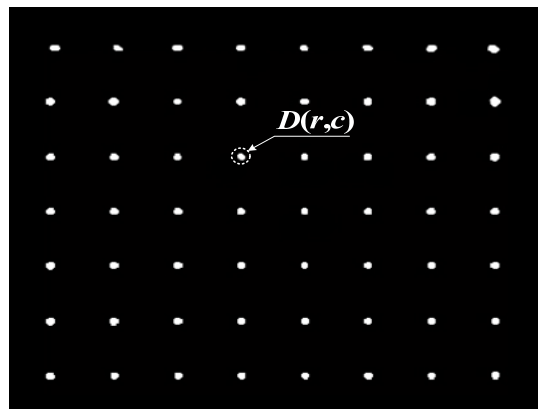


图 9 晶粒中心的图像形态学处理结果

设视场的晶粒的行列号为 (r, c) , 对应这个点用阈值 R_t 产生区域为 $D(r, c)$, 则 (r, c) 的晶粒中心定位坐标 (I, J) 取为使 $D(r, c)$ 内的局部相关 R 达到最大值的点, 即

$$(I, J)_{(r, c)} = \arg \max_{(I, J) \in D(r, c)} \{R(I, J)\} \quad (13)$$

通过标定, 将晶粒图像坐标 (I, J) 转换为晶元的物理坐标 (x, y) 。表 1 是对多个视区 841 个 LED 晶粒的检测结果, 其中耗时和漏检率是多个视区统计之和, x, y 坐标为相对晶圆定位点的距离, 单位为 mil, $1\text{mil} = 0.0254\text{mm}$ 。从表 1 可以看出: 归一化 CCFD 法耗时是未归一的 3 倍多, 而漏检率只是它的 1/4。

表 1 采用 CCFD 模板匹配的 LED 晶粒检测结果

	归一化 CCFD		未归一的 CCFD	
	x/mil	y/mil	x/mil	y/mil
晶粒行列编号				
(1,1)	101.20	124.70	101.28	124.6
(1,2)	101.18	166.80	101.25	167.01
(1,3)	101.14	209.00	101.21	208.89
...
(29,28)	1257.60	1261.40	1258.02	1262.05
(29,29)	1257.07	1303.60	1258.13	1304.10
耗 时	9700 毫秒		2650 毫秒	
漏检率	0.23%		0.94%	

为了和其它方法进行匹配效率的比较, 采用了 $40 \times 40, 60 \times 60, 100 \times 100, 120 \times 120$

四种 LED 晶粒模板尺寸, 分别按传统的 NCC 算法、SSDA 序贯相似检测算法和文中采用的 CCFD 快速频域互相关法进行 LED 晶粒的定位检测, 三种模板匹配法对一个视区检测消耗的时间如图 10 所示。

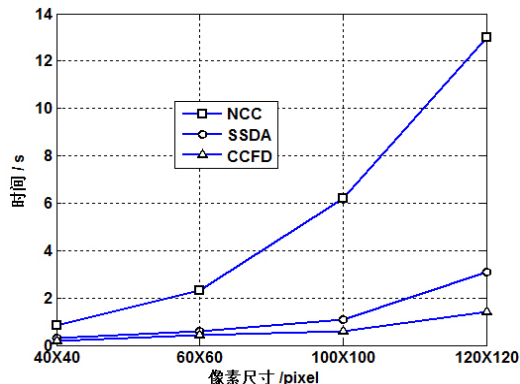


图 10 三种算法的耗时比较

从图 10 可以看出当模板尺寸较小时, SSDA 算法与 CCFD 快速相关算法效率相近, 而模板较大时, 尺寸超过 60×60 , CCFD 算法效率高, 对于像素尺寸为 120×120 的情况, CCFD 算法比 SSDA 算法效率提高近 1 倍, 表明当所取 LED 晶粒模板尺度较大时, 采用 CCFD 快速相关运算能更有效地提高 LED 晶粒的检测速度。

4 结束语

1) 文中采用的 CCFD 快速互相关法是在空间域采用一种快速递推求和技术, 加快 LED 晶粒图像的归一化处理, 然后在图像频域上利用 FFT 变换进行 LED 晶粒模板与晶圆图像的相关运算, 即采用了空间域归一化与频率域互相关运算相结合的方法提高了模板匹配效率, 可快速地检测出视区所有 LED 晶粒的位置;

2) 对于清晰的 LED 晶粒图像 CCFD 快速互相关法可省去归一化处理, 检测效率更高, 但和归一化处理比较, 漏检率也高, 实际应用时, 要在快速和准确性之间做综合考量。

3) 实验结果表明, 对于具有复杂结构的 LED 晶粒图像, 文中的 CCFD 快速相关算法检测效率远高于传统的 NCC 模板匹配, 比常用的 SSDA 快速算法效率提高 1 倍以上, 该方法可以用于 LED 分选、固晶系统中的晶粒目

标的快速定位。

参考文献:

- [1] Xue L Y, Fang J L, Huang W and Li M. Research on LED die geometric parameter measurement based on shape recognition and sub-pixel detection[C]. 2010 8th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), Jinan, China, 2010 : 6204-6210.
- [2] 战荫伟, 黄治登. 基于机器视觉的贴片 LED 极性检测系统的设计[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(3):680-683
- [3] Wu T, Li B, Wang L W and Huang Y. Study on real-time correction method of die declination angles in LED sorting system[C]. 2010 International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Xian, China, 2010: 1443-1448.
- [4] 张海宁, 张碧伟. 基于亚像素精度分割的晶粒图像识别方法[J]. 电子设计工程, 2011, 19(4): 113-116.
- [5] Mori M. and Kashino K. Fast template matching based on normalized cross correlation using adaptive block partitioning and initial threshold estimation[C]. 2010 IEEE International Symposium on Multimedia (ISM), Taichung, 2010:196-203.
- [6] Di Stefano L. Mattoccia S. and Mola M. An efficient algorithm for exhaustive template matching based on normalized cross correlation[C]. 2003 12th International Conference on Image Analysis and Processing, 2003: 322-327.
- [7] Zhenhua H. and Peiying Z. An Improved SSDA applied in target tracking[C]. 1988 9th International Conference on Pattern Recognition, Rome, 1988: 767-769.
- [8] Carsten Steger, Markus Ulrich and Charistian Wiedemann. Machine vision algorithms and applications, Tsinghua University Press, Beijing, 2008: 302-308.
- [9] 曹占伦, 吴小洪, 姜永军等.改进匹配算法在LED 粘片设备图像识别中的应用[J]. 半导体技术, 2008, 33(3):200-203.

联络方式:

1. 联系人: 李鹤喜
2. 通讯地址: 五邑大学 425 信箱, 529020
3. 电子信箱: jmlihexi@163.com
4. 电话: 15976448948