

文章编号 1004-924X(2008)08-1377-07

无铅焊点检测光源的分析与优化设计

卢盛林, 张宪民

(华南理工大学 机械工程学院, 广东 广州 510640)

摘要: 为了提高自动光学检查(AOI)系统的性能,对AOI光源进行了研究。介绍了AOI光源的结构设计方法,光源由红、绿、蓝3种不同颜色,不同照射角度的LED阵列组成。然后,建立了光源的照度模型以及焊点的反射模型。最后,根据简化的照度模型对光源的几何参数进行优化。仿真和实验结果表明,所设计的光源在检测无铅焊点时同样有效,并能使不同类焊点间的特征距离更大,最大为半球形光源照射下的11.88倍,从而提高了特征在无铅焊点缺陷检测的分辨能力,验证了光源设计的有效性。

关键词: 自动光学检测设备;发光二极管;光源;机器视觉;焊点检测

中图分类号: TN312.8 **文献标识码:** A

Analysis and optimal design of illuminator for leadless tin solder joint inspection

LU Sheng-lin, ZHANG Xian-min

(*School of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China*)

Abstract: In order to improve the performance of Automatic Optical Inspection (AOI) system, an illuminator for leadless tin solder joint inspection was studied. The structure of the illuminator was introduced, which is composed of the LED arrays with three colors and different radiation angles. Then, the radiance model of the illuminator and the irradiance model of the solder joint were developed. Finally, the dimensions of the illuminator were optimized based on the irradiance model. The simulation and experimental results verify the validity of proposed illuminator for leadless solder joint inspection, and show it can enlarge the feature distances from different classes. The maximum feature distance of different solder joints illuminated by the proposed illuminator is 11.88 times of that illuminated by the hemisphere illuminator. The simulation and experimental results verify the validity of the design.

Key words: Automatic Optical Inspection(AOI); LED; illuminator; machine vision; solder joint inspection

收稿日期:2008-01-24;修订日期:2008-03-28.

基金项目:粤港关键领域重点突破招标项目(No. 20061682);广东省、教育部产学研结合资助项目(No. 2006D930304001)

1 引言

随着电子元件的小型化, 印刷电路板 (Printed Circuit Board, PCB) 组装的高密度化, 以及无铅焊接在世界范围内的推广, 对于自动光学检查 (Automatic Optical Inspection, AOI) 系统的要求越来越高^[1-10]。焊点缺陷是 PCB 组装主要缺陷之一^[1], 也是检测的难点之一。LOH^[9] 等人提出了一种焊点检测方法, 该方法采用半球形的多颜色光源。由于该光源的照射角度是连续变化的, 容易造成颜色的混叠, 而颜色的混叠会影响检测结果的稳定性。文献[1]和[8]采用荧光灯作为光源, 并在此基础上进行了研究。但是由于荧光灯的稳定性比较差, 检测效果不理想, 因此, 在 AOI 行业逐渐被淘汰。Kim 等人^[11] 采用了多段环形分时照明系统, 系统采用 3 个不同颜色的环形光源, 3 个环形光源分时点亮, 以对同一焊点获取 3 种不同颜色光源照明的图片, 然后对 3 幅图片进行特征提取, 并采用神经网络分类器进行分类。该系统检测准确性并不十分理想。而且, 由于分时照明, 因此, 检测效率低。

文中首先提出一种环状光源。光源由 3 个不同颜色的 LED 阵列组成, 3 个 LED 分别具有 3 个不同的照射角度。该结构的特点是能够有效减少颜色间的混叠。然后, 建立光源的模型, 在此基础上, 对光源的几何参数进行优化。最后, 通过仿真和实验验证了设计的有效性。

2 光源结构及照度模型

2.1 结构设计

如图 1 所示, Wassink^[12] 研究表明, 焊点有 3 个过渡角: θ_i 为焊盘到焊锡的过渡角; θ_v 为焊锡过渡角; θ_e 为焊锡到引脚的过渡角。 θ_e 与引脚高度呈线性关系, 其值在 $33 \sim 39^\circ$ 。 θ_i 反映了 PCB 焊盘的融锡性能, 其值在 $9 \sim 13^\circ$ 。 θ_v 体现了焊锡的多少, 其值在 $16 \sim 22^\circ$ 。基于上述研究, 提出一种如图 2 所示的环状光源。光源由 3 个不同颜色的 LED 阵列组成, 3 个 LED 分别具有 3 个不同的照射角度。

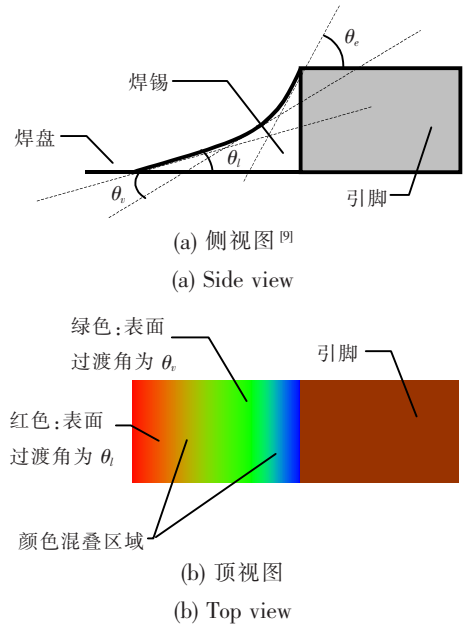


图 1 焊点过渡角

Fig. 1 Slant angle of solder joint

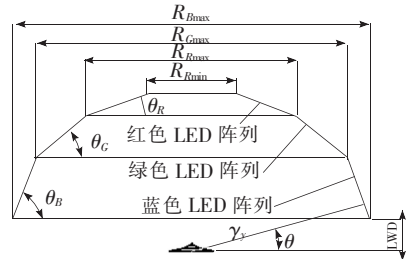


图 2 光源几何结构

Fig. 2 Geometry model of illuminator

2.2 发光源选择

光源作为 AOI 的关键器件之一, 需要满足以下基本要求:

- (1) 在整个视场 (Field-of-View, FOV) 内必须保持光照强度均匀, AOI 的视场一般在 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 到 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 。
- (2) 非常好的颜色表现力。
- (3) 响应快速, 易于控制。
- (4) 稳定, 寿命长。

固体光源 LED 很好地满足了上述要求。除此以外, LED 光源还具有非常好的可塑性, 能够进行复杂的造型设计, 因此, 采用 LED 作为发光体。在 LED 波段选择时, 既要考虑和摄像机相匹配, 还要考虑对应于无铅焊点的分辨能力。如图 3 所示, LED 的颜色最好处于色环 3 个等分角上,

这样会具有比较好的分辨能力,且波长匹配于摄像机 3 种谱线的峰值。

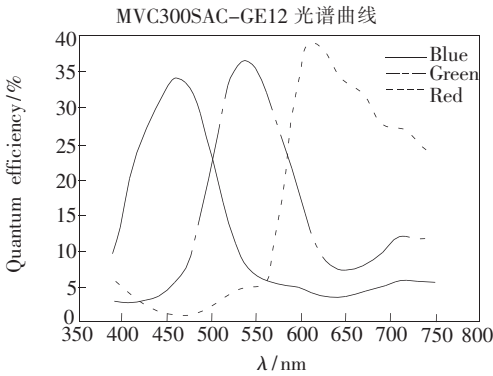


图 3 摄像机光谱曲线

Fig. 3 Spectra of a camera

表 1 LEDs 主要参数

Tab. 1 Parameters of LEDs

颜色	峰值波长 (nm)	启动电压 (V)	典型光通量 (lm)
红	625	3.2	125
绿	490	2.8	130
蓝	460	2.8	40

2.3 结构设计

相关研究表明^[9],大多数表面贴装元件(Surface Mount Device, SMD)对红色光线具有较好的反射能力,因此,如图 2 所示,红色 LED 阵列安装在顶部,依次为绿色和蓝色。3 个 LED 阵列同轴叠。为了避免 PCB 基板和有些金属连接件的光滑表面引起眩光,在 LED 前面安装了漫射板。

图 4 给出了视觉系统的硬件关系简图。从图

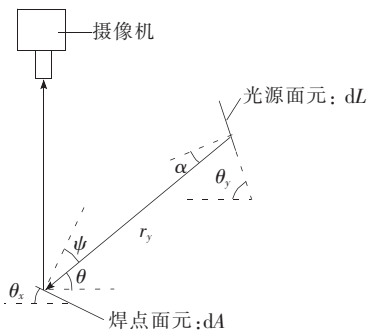


图 4 视觉系统结构简图, $x=e, v, l; y=R, G, B$

Fig. 4 Structural diagram of vision system

中可以看出,LED 发射的光线与光源表面法线夹角 α 以及与工件表面法线夹角 ψ 存在以下关系:

$$\alpha = \theta + \theta_y - \frac{\pi}{2}; y = R, G, B, \quad (1)$$

$$\psi = \frac{\pi}{2} - \theta_x - \theta; x = e, v, l, \quad (2)$$

式中, θ 为光线和水平面之间的夹角。

蓝色 LED 阵列下端面半径可以表示为:

$$R_{Bmax} = r_B \cos \theta + \frac{(r_B \sin \theta - H)}{\tan \theta_B}, \quad (3)$$

式中, r_B 是工件表面面元与蓝色 LED 阵列面元之间的距离, H 是照明工作距离 (Light Work Distance, LWD), 即光源下端到工件表面的距离。从方程(3),可得

$$r_B = \frac{H + R_{Bmax} \tan \theta_B}{\cos \theta \tan \theta_B + \sin \theta}, \quad (4)$$

同理,可得工件表面某一面元到绿色和红色 LED 阵列上某一面元之间的距离为:

$$r_G = \frac{H + H_B + R_{Gmax} \tan \theta_G}{\cos \theta \tan \theta_G + \sin \theta}, \quad (5)$$

$$r_R = \frac{H + H_B + H_G + R_{Gmax} \tan \theta_R}{\cos \theta \tan \theta_R + \sin \theta}, \quad (6)$$

式中,

$$H_B = (R_{Bmax} - R_{Gmax}) \tan \theta_B,$$

$$H_G = (R_{Gmax} - R_{Rmax}) \tan \theta_G,$$

$$H_R = (R_{Rmax} - R_{Rmin}) \tan \theta_R,$$

如图 2 所示,其中 R_{Gmax} 是绿色 LED 阵列下端面的半径, R_{Rmax} 是红色 LED 阵列下端面的半径, R_{Rmin} 是红色 LED 上端面半径。

2.4 照度模型

在单位时间内,光源从 dL 辐射至 dA 能量表示为^[13]:

$$L(\theta, \phi) \cos \alpha dL d\omega, \quad (7)$$

式中, $L(\theta, \phi)$ 是光源的辐射强度, $dL = d\theta d\phi$, ϕ 是圆周角; $d\omega$ 是立体角,其定义为 $d\omega = \frac{\cos \psi dA}{r_y^2}$; r_y 是 dA 到 dL 之间的距离。

工件表面的辐射强度可以表示为^[14]:

$$E = \frac{1}{dA} \iint \rho_{bd}(\theta_o, \phi_o, \theta_i, \phi_i) L(\theta_i, \phi_i) dL d\omega, \quad (8)$$

式中, θ_i 和 θ_o 分别表示极角方向的入射角和出射角; ϕ_i 和 ϕ_o 分别表示方位角方向的入射角和出射角。 $\rho_{bd}(\theta_o, \phi_o, \theta_i, \phi_i)$ 是双向反射分布函数 (Bidirectional Reflectance Distribution Function BRDF), 可以用 Phong 模型^[13] 来表示:

$$\rho_{\text{bd}}(\theta_o, \phi_o, \theta_i, \phi_i) = k_0 \cos^n \left(2\theta_x + \theta - \frac{\pi}{2} \right), \quad (9)$$

式中, n 是从 1 到 1 200 的整数, 表面越光滑, n 值就越大。文献[15]表明, 由于共晶焊锡的焊点表面比较光滑, 而且其表面粗糙度也没有太大的差异, 所以容易形成强烈的镜面反射, 即 n 值大。相对而言, 无铅焊锡由于冷却条件不同, 可能造成无光泽感的漫反射状态。如果漫反射倾向太强, 外观会变得无光泽, 即 n 值小。

将 $d\omega$ 和 dL 代入方程(8)得:

$$E = \iint \rho_{\text{bd}}(\theta_o, \phi_o, \theta_i, \phi_i) L(\theta_i, \phi_i) \frac{\cos \alpha \cos \psi}{r^2} d\theta d\phi, \quad (10)$$

高密度的 LED 排布和漫射板的使用使得同一 LED 阵列上各点辐射强度近似相等。因此, $L(\theta_i)$ 能够看作为一常数。将式(9)代入式(10), 可以得到颜色 y 的 LED 阵列所发的光线被过渡角 θ_x 的表面反射强度为:

$$E_{xy} = k_1 \int_{\theta_{iy}}^{\theta_{oy}} \cos^n \left(2\theta_x + \theta - \frac{\pi}{2} \right) \times \frac{\cos \left(\theta + \theta_y - \frac{\pi}{2} \right) \cos \left(\frac{\pi}{2} - \theta_x - \theta \right)}{r_y^2} d\theta, \quad (11)$$

$x = e, y, l, y = R, G, B;$

式中, $k_1 = k_0 L(\theta_i)$, 各积分限分别为:

$$\theta_{lB} = \text{atan} \left(\frac{H}{R_{B\text{max}}} \right), \quad (12)$$

$$\theta_{uB} = \text{atan} \left(\frac{H + H_B}{R_{G\text{max}}} \right), \quad (13)$$

$$\theta_{lG} = \theta_{uB}, \quad (14)$$

$$\theta_{uG} = \text{atan} \left(\frac{H + H_B + H_G}{R_{R\text{max}}} \right), \quad (15)$$

$$\theta_{lR} = \theta_{uG}, \quad (16)$$

$$\theta_{uR} = \text{atan} \left(\frac{H + H_B + H_G + H_R}{R_{R\text{min}}} \right). \quad (17)$$

3 几何参数优化

如图 1(b)所示, 颜色混叠现象主要发生在颜色过渡区域。为了抑制这种现象, 应该增加蓝色光源在过渡角 θ_e 处的反射强度、绿色光源在过渡角 θ_v 处的反射强度、红色光源在过渡角 θ_l 处的反射强度; 同时, 应该降低蓝色光源在过渡角 θ_v 处

的反射强度、绿色光源在过渡角 θ_e 和 θ_l 处的反射强度、红色光源在过渡角 θ_v 处的反射强度, 即可得目标函数:

$$f(z) = E_{eB} + E_{vG} + E_{lR} - E_{vB} - E_{eG} - E_{lG} - E_{vR}, \quad (18)$$

设计变量可以表示为:

$$z = [\theta_R, \theta_G, \theta_B, R_{B\text{max}}, R_{G\text{max}}, R_{R\text{max}}, R_{R\text{min}}], \quad (19)$$

从实际应用角度出发, 如光源的质量, 视场的大小等, 可以确定设计变量的上下界分别为:

$$lb = [66, 32, 18, 70, 60, 40, 20], \quad (20)$$

$$ub = [78, 44, 26, 90, 80, 70, 60], \quad (21)$$

约束矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad (22)$$

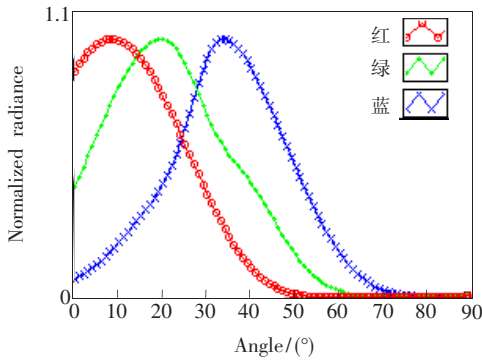
因此, 优化问题用以下模型表示:

$$\begin{cases} \max. f(z) \\ z \text{ subject to:} \\ \mathbf{Az} < 0 \\ lb < z < ub \end{cases}. \quad (23)$$

4 仿真和实验验证

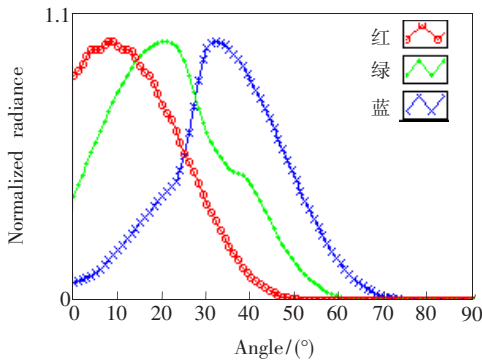
4.1 仿真结果及分析

为了验证照度的准确性, 首先对于光源的照度模型进行了仿真。由于式(11)的运算量很大, 因此, 先对式(11)进行一定的简化, 并对其离散化, 然后利用相关软件进行计算, 结果如图 5 所示。仿真结果表明, 工件对于 3 种颜色的光源反射强度的峰值分别为 12° 、 20° 、 38° , 刚好位于 θ_l 、 θ_v 、 θ_e 的范围之内。通过对图 5(a)和图 5(b)的比较可以发现, n 值越小(即对应无铅的表面反射), 颜色间的重合区域越大, 即混叠越大, 但是其峰值位置不变, 从而证明了光源对应无铅焊点的有效性。



(a) 当 n 取 50 时

(a) $n=50$



(b) 当 n 取 200 时

(b) $n=200$

图 5 照度模型仿真结果

Fig. 5 Simulation results of radiation model

4.2 实验结果及分析

4.2.1 图像对比

图 6 给出了采用文中设计的三色光源照射下的 SMD 元件图像,图 7 给出了采用半球状的三

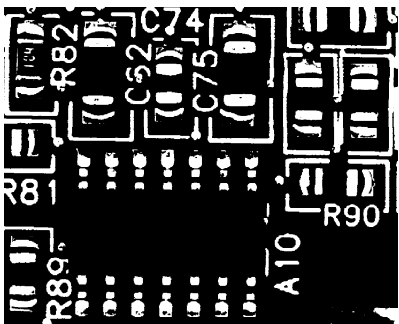


图 6 三种照射角度光源的效果

Fig. 6 Image of SMD illuminated by proposed illuminator

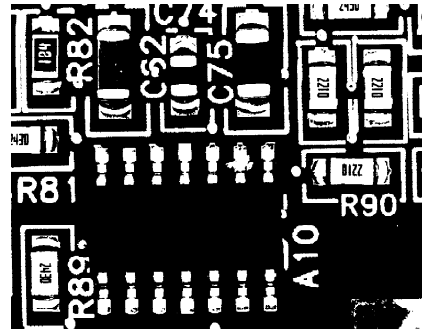


图 7 半球形光源照射效果

Fig. 7 Image of SMD illuminated by hemisphere shape illuminator

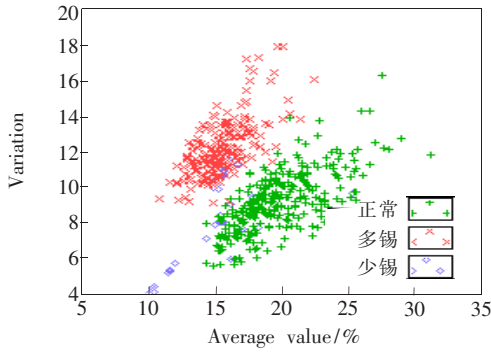
色光源照射下的 SMD 元件图像。通过对比 2 组图片,可以看出,图 6 中的元件颜色对比度高,而图 7 颜色过渡区长,颜色饱和度低。

4.2.2 特征分布实验

成功设计的光源能够使焊点特征更加具有代表性;同一类型的焊点特征分布集中,不同类型的特征分布保持一定的距离。因此,在进行模式识别时就能够轻易将不同类型的焊点分开。

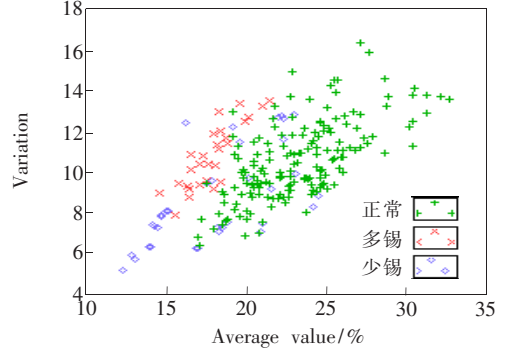
图 8 给出了样本在各特征空间的分布,样本分为焊锡正常,焊锡不足和焊锡过量 3 种类型。图 8(a)和(b)是由均值和方差(二阶中心矩)组成的特征空间。图 8(c)和(d)是重心 y 坐标和面积组成的特征空间。可以看出,图 8(a)和图 8(c)是文中所述光源的效果,图 8(b)和(d)是半球形光源的效果。通过比较可以发现,在图 8(b)中,3 种类型的焊点分布相互交错,很难区分开来,而图 8(a)比较容易将正常和多锡的焊点分开。在图 8(d)中,少锡和正常焊点分布相互交错,无明显的分界线,而图 8(c)中正常和多锡焊点分布各自聚集紧密,且保持一定的类间距离。由此可见,所述光源能够使焊点的特征更加具有代表性。

表 2 给出了在 2 种光源照射下,不同焊点类型间的特征距离,光源 1 代表文中所设计的光源,光源 2 代表半球形光源。可以看出,本文所设计的光源能够使大部分不同类型焊点的特征距离更大,最大达 11.88 倍(特征:方差,焊锡正常到焊锡过量类间距离),即提高了特征在无铅焊点缺陷检测的分辨能力。



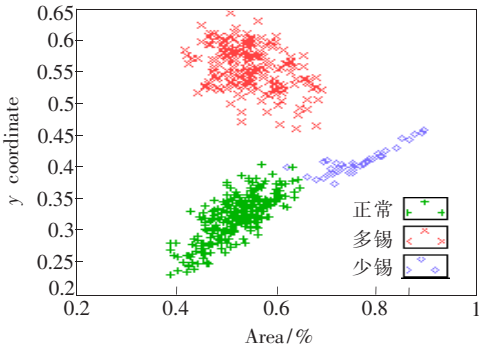
(a) 光源 1 照射下, 样本在方差-均值空间的分布

(a) Sample distribution in variance-mean space illuminated by illuminator 1



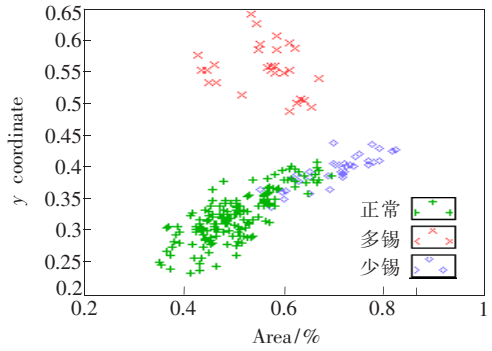
(b) 光源 2 照射下, 样本在方差-均值空间的分布

(a) Sample distribution in variance-mean space illuminated by illuminator 2



(c) 光源 1 照射下, 样本在 y 坐标-面积空间的分布

(c) Sample distribution in y coordinate-area space illuminated by illuminator 1



(d) 光源 2 照射下, 样本在 y 坐标-面积空间的分布

(d) Sample distribution in y coordinate-area space illuminated by illuminator 2

图 8 特征分布

Fig. 8 Feature distributions

表 2 不同类别间的特征距离

Tab. 2 Feature distances of different classes

距离	均值		方差		面积		Y 坐标	
	光源 1	光源 2	光源 1	光源 2	光源 1	光源 2	光源 1	光源 2
正常-过量	5.24	4.23	3.06	0.26	0.027	0.06	0.26	0.23
过量-少锡	0.65	0.178	4.12	2.16	0.22	0.14	0.15	0.16
少锡-正常	5.32	4.88	1.06	1.9	0.24	0.19	0.087	0.071

5 结 论

为了提高 AOI 系统的性能, 应对无铅化制程的推广, 文中对 AOI 光源进行了研究。介绍了 AOI 光源的结构设计, 建立了光源的照度模型以及焊点的反射模型。最后, 根据简化的照度模型

对光源的几何参数进行了优化。仿真和实验结果表明, 文中所设计的光源在检测无铅焊点时同样有效, 并能使类间的特征距离更加大, 最大为半球形光源照射下的 11.88 倍, 大大提高了特征在无铅焊点缺陷检测的分辨能力。从而验证了光源设计的有效性。

参考文献:

- [1] KIM J H, CHO H S, KIM S. Pattern classification of solder joint images using a correlation neural network [J]. *Engng. Applic. Intell*, 1996, 9(6): 655-669.
- [2] NORRIS M J. Vectoral imaging: the new direction in automatic optical inspection [OL]. http://www.vitechnology.com/img/data/Vectoral_Imaging.PDF
- [3] AYOUB G. Real-time SPC with AOI [J]. *SMT*, 2001,15(6):36-38.
- [4] BARTLETT S L, BESL P J, COLE C L, *et al.*. Automatic solder joint inspection [J]. *IEEE*, 1988,1386: 31-34.
- [5] NAYAR S K, SANDERSON A C, WEISS L E, *et al.*. Specular surface inspection using structured highlight and Gaussian image [J]. *IEEE*, 1990:208-218.
- [6] TAKAGI Y, HATA S, BEUTEL W. Visual inspection machine for solder joints using tiered illumination [J]. *SPIE*, 1990,1386:21-29.
- [7] YUN T S, SIM K J, KIM H J. Support vector machine-based inspection of solder joints using circular illumination [J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(11) : 949-951.
- [8] KIM T H, CHO T H, MOON Y S, *et al.*. Visual inspection system for the classification of solder joints [J]. *Pattern Recognition*, 1999, 32:565-575.
- [9] LOH H H, LU M S. Printed circuit board inspection using image analysis [J]. *IEEE*, 1999, 35(2):426-432.
- [10] 张舞杰, 杨义禄, 李迪, 等. 自动影像测量系统关键算法[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(2): 294-301.
ZHANG W J, YANG Y L, LI D, *et al.*. Key algorithms of automatic image measurement system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2): 294-301.
- [11] KIM T H, CHO T H, MOON Y S, *et al.*. Visual inspection system for the classification of solder joints[J]. *Pattern Recognition*, 1999, 32: 565-575.
- [12] WASSINK R J K. *Soldering in Electronics* [M]. U. K. : Electrochemical Publication Ltd, 1984.
- [13] 张广军. 机器视觉 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
ZHANG G J. *Machine Vision* [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [14] 王辉, 周纬杰. 基于辐射度与 phong 模型的高级光照模型及光线跟踪实现 [J]. *计算机工程与应用*, 2002, 17: 85-90.
WANG H, ZHOU W J. Implementation of the high level lighting model and ray-tracing based on rediosity and phong model [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2002, 17: 85-90. (in Chinese)
- [15] 欧姆龙株式会社. 自动光学检验设备(AOI)对无铅焊锡的检测 [J]. *电子工业专用设备*, 2003, 104:62-66.
OMRON. Inspection for leadless tin solder by AOI [J]. *Equipment for Electronic Products Manufacturing*, 2003, 104:62-66. (in Chinese)

作者简介:卢盛林(1980-),男,博士研究生,从事自动光学检测技术、光源设计方面的研究。E-mail:190819661@qq.com

导师简介:张宪民(1964-),男,教授,博士生导师,主要从事精密定位与精密操作、精密电子装备与现代控制技术等方面的研究。zhangxm@scut.edu.cn