

位置信息约束的 SMT 料盘 X 射线图像检测方法

耿磊^{1,2}, 彭晓帅^{1,2}, 肖志涛^{1,2}, 李秀艳^{1,2}, 荣锋^{1,2}, 马潇^{1,2}

- (1. 天津市光电检测技术与系统重点实验室, 天津 300387;
2. 天津工业大学 电子与信息工程学院, 天津 300387)

摘要: SMT 封装物料盘的 X 射线透视图像发生局部粘连, 导致分割准确性降低影响物料的检测与计数统计。提出了基于位置信息约束的分割检测方法, 利用器件位置信息对分割区域进行约束提高分割与检测的准确率。首先依据元器件呈螺旋状排列规则, 拟合物料盘中心点并计算最内环排列中起点器件位置信息; 然后基于中心点与各元器件的位置约束模型, 进行法向位置信息与先验位置信息双重约束, 对目标器件所在区域进行限定; 最后划分分割界限, 完成对粘连目标的分割和对元器件的检测与统计。实验结果表明: 该方法能够提高物料盘 X 射线透视图像粘连区域分割与检测的准确率, 在有效像元素 9216 pixel, 细节解析度 110 lp/cm 成像环境之下, 对不同规格物料盘进行实测, 检测误差率控制在 0.15% 之内。

关键词: X 射线透视图像; 粘连; 计数统计; 分割检测; 位置信息约束

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0617004

Method for detecting the X-Ray images of SMT materials plates based on the constraints of position information

Geng Lei^{1,2}, Peng Xiaoshuai^{1,2}, Xiao Zhitao^{1,2}, Li Xiuyan^{1,2}, Rong Feng^{1,2}, Ma Xiao^{1,2}

- (1. Tianjin Key Laboratory of Optoelectronic Detection Technology and System, Tianjin 300387, China;
2. School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

Abstract: The local adhesion in the X-Ray images of SMT material plates has negative effects on the accuracy of counting and detection for components. A method based on the constraints of position information was proposed, which was used to improve the accuracy of segmentation and detection with the position information between components. Firstly, the center point and the starting components arranged in the inner ring were fit out on the basis of the components in a spiral arrangement rule. Then the dual constraints of normal position and priori position, which were based on the constraint model between the center point and different components, were finished to limit the region of target device. Finally, the segmentation for conglutination between components was completed by dividing the boundaries between components. Experimental results show that this method can improve the accuracy of

收稿日期: 2016-10-05; 修订日期: 2016-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(61405144); 天津市科技支撑计划重点项目(14ZCZDGX00033); 天津市科技特派员项目(15JCTPJC56300)

作者简介: 耿磊(1982-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事测试测量技术及仪器方面的研究。Email: genglei@tjpu.edu.cn

通讯作者: 肖志涛(1971-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事图像处理与模式识别方面的研究。Email: xiaozhitao@tjpu.edu.cn

the result of segmentation and detection. The detection error rate tested on different specifications material plates is controlled within 0.15% under the experimental conditions of 9 216 pixels effective image element and detail resolution of 110 lp/cm.

Key words: X-Ray images; adhesion; counting statistics; segmentation and detection; constraints of position information

0 引言

SMT(Surface Mount Technology)物料盘电子元器件快速精准的检测与统计可提高电子工业生产中领发料与库存盘点的效率,同时可以为大批量生产过程的用料量进行预判与评估。X射线透视成像系统由于其穿透力强,分辨率高,可对扫描物体整体成像等特点^[1],克服了传统光电传感型点料机检测耗时较长,可检测类别有限等问题,正逐渐地应用到SMT物料盘的检测与统计中。但是对于元器件数目较多且排列紧密的物料盘,由于器件间距较小,在X射线辐射下器件投影会发生局部粘连与重叠现象,对后期的检测与统计造成严重干扰。因此粘连区域器件分割的准确程度对检测结果的正确性起决定作用。

对粘连图像进行分割与检测,分割界限的准确划分是重要环节。SMT物料盘透视图像具有局部粘连严重、部分器件边界不清晰、粘连区域灰度值不一致等特点,为精准分割带来了难度。目前针对物料盘粘连图像的分割检测研究尚处于发展阶段,相关已有研究仅限于理论储备与前景分析,成熟的理论方法较少^[2-3]。但对于检测粘连细胞菌落、谷物颗粒等领域,所研究对象粘连体态、边界结构等特征与文中相似,因此有诸多理论研究可以借鉴。对于上述领域典型的分割与检测理论有阈值分割、区域生长、形态学变换和基于模糊理论等方法^[4-5]。S.R.Vantaram^[6]等提出了在对粘连细胞图像进行增强处理的基础上,根据阈值对背景与目标进行分割的方法。该方法可以在一定程度上解决粘连问题,但是由于其需要人工输入经验值以指导分割的完成,不利于自动化检测的实现。JBTM. Roerdink^[7]提出了一种基于形态学重建和分水岭分割相结合的区域生长分割检测方法,该方法对于形状规则并且粘连边界明显的情况分割与检测效果较好,但对于文中部分复杂场景存

在过分分割情况。M. Farhan^[8]等提出了基于形状因子对粘连图像进行边缘检测与分割的方法,该理论利用粘连区域连接处内凹点类型作为分割依据,但该方法没有考虑粘连目标与单一目标存在在外围轮廓相似内凹点信息不足的情况,对于此类粘连,该方法漏检率偏高。纪则轩^[9]等人提出了无监督模糊C均值聚类图像分割方法,其主要思想是利用粘连目标连接处的差异化像素特征进行分割与提取,隶属度函数与模糊测度的选取对该方法的检测结果起关键性作用,如何精准快速地选取上述参数一直是该领域迫切解决的问题之一。

针对SMT物料盘X射线透视图像存在局部粘连影响元器件检测与统计的问题,文中提出了一种基于位置信息约束的对粘连目标进行分割与提取的方法。在对物料盘X射线透视图像进行增强预处理的基础上,首先进行法向位置信息约束,对目标器件所在连通域进行初步筛选。然后根据先验位置信息约束模型为所得连通域中不同区域赋予对应显著性值,并依据显著性值对粘连器件所在目标区域进行准确提取^[10]。最后通过选定ROI(Region of Interest)与划分分割界限,完成对粘连器件的分割提取与检测统计。文中最后通过分析实验结果验证了该方法的有效性。

1 检测系统模型

检测系统主要包括前期预处理、关键点选取、基于位置信息约束的分割与检测等过程。其中预处理过程对采集到的初始图像进行图像增强操作,得到去除背景噪声干扰的局部粘连X射线透视图像;关键点选取得到料盘中心参考点 O 与螺旋排列最内环上的起点器件 Obj_1 与 Obj_2 ,如图1所示;位置信息约束的分割与检测完成对图像的去粘连化与检测统计。

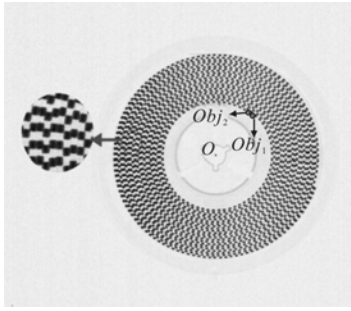


图 1 局部粘连 X 射线透视图像

Fig.1 Local adhesion in X-ray fluoroscopic image

系统流程图如图 2 所示，首先对采集到的 SMT 物料盘的 X 射线透视图像进行 Gamma 校正与归一化 Gauss 平滑滤波处理^[11]以提高背景与目标的对比度并消除噪声干扰。通过大量实验验证当 Gamma 校正指数取 2.25, Gauss 滤波函数方差取 1.0, 卷积核尺寸为 5×5, 比例系数为 $\frac{1}{273}$ 时达到此成像环境下最优显示效果。然后利用边缘提取和圆形拟合算法得到物料盘圆心点坐标, 并按照公式(1)筛选出最内环排列上八连通域内像素最少的器件与其相邻器件, 即起点器件 Obj_1 与 Obj_2 。

$$Object(x, y) = \min \{N_8(P)\} \quad (1)$$

式中: $N_8(P)$ 为八连通域中像素个数。最后根据目标器件与料盘中心点和起点器件的位置关系对处理区域进行双重约束, 并划分分割界限完成去粘连化与检测统计工作。

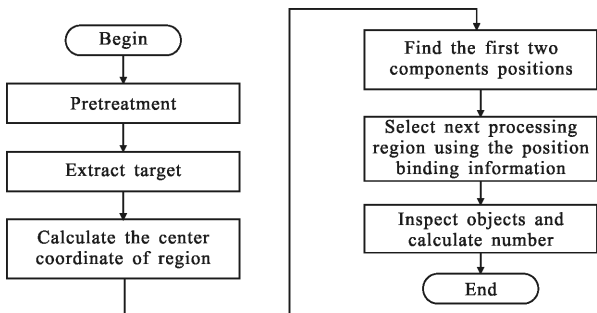


图 2 方法流程图

Fig.2 Method flow diagram

2 位置信息约束的区域提取与物料检测

2.1 法向位置信息约束

法向位置信息约束是以物料盘的拟合圆心点 O 与每个元器件中心 P_i 的位置关系为限定条件进行

约束, 筛选出下一个元器件可能存在的连通域, 为后续基于先验位置信息约束提供操作目标。首先根据点 O 与 P_i 两者之间的位置距离计算出距离基准值 R_i , 并依据每个元器件自身的几何特性计算出自适应距离量变阈值 th , 然后分别以两者的和差之值为半径划分同心圆环区域, 得到在圆心点 O 与元器件中心 P_i 连线 $\overrightarrow{OP_i}$ 法向方向上的约束区域 ϕ , 最后调整约束区域大小至筛选出下一个目标元器件所在连通域 Ω_{i+1} , 具体约束模型如图 3 所示。

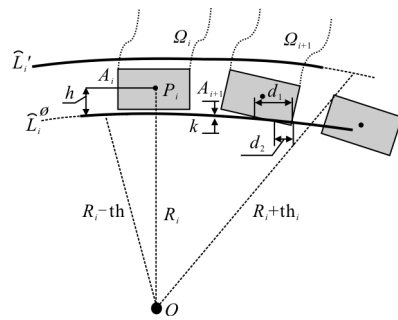


图 3 法向信息约束模型

Fig.3 Model of normal direction information constraints

图中, A_i 为物料盘上呈螺旋排列的第 i 个元器件; P_i 为其几何中心点; h 为中心点与元器件边缘间距; R_i 为中心点到圆心的距离基准值; th 为每个元器件的距离量变阈值; \widehat{L}_i' 、 \widehat{L}_i 分别为以 $R=R_i+th$ 、 $R=R_i-th$ 为半径所构成的同心圆的部分区域; 线宽均为 k , 虚线部分是其对应中心线; d_1 、 d_2 分别为器件 A_{i+1} 与 \widehat{L}_i 上下边界相交的长度值; ϕ 为由 \widehat{L}_i' 、 \widehat{L}_i 构成的 $\overrightarrow{OP_i}$ 法向方向上的约束区域; 区域 Ω_i 为器件发生粘连时其所在的连通域。

法向位置信息约束以起点器件 Obj_2 为初始处理对象采用迭代方式依次选取下一个约束区域 ϕ 与元器件所在的连通域 Ω 。当操作到第 i 个元器件时有:

$$\begin{cases} \overline{x}_i = \frac{\sum_{j=2}^{n-1} (x_1 + x_j + x_{j+1})^N}{T} \\ \overline{y}_i = \frac{\sum_{j=2}^{n-1} (y_1 + y_j + y_{j+1})^N}{T} \end{cases} \quad (2)$$

依据多边形中心点测量方法得到元器件 A_i 的中心点坐标 $P_i(\overline{x}_i, \overline{y}_i)$, $n-1$ 为多边形剖分为同顶点

三角形的个数,这里 n 取 5 即可满足实验要求。其中

$$N = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_j & y_j & 1 \\ x_{j+1} & y_{j+1} & 1 \end{vmatrix} \quad T = 3 \sum_{j=2}^{n-1} \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_j & y_j & 1 \\ x_{j+1} & y_{j+1} & 1 \end{vmatrix} \quad (3)$$

在计算出 P_i 点坐标以后由欧式距离公式(4)计算出其到点 O 的距离基准值 R_i :

$$R_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \quad (4)$$

式中: (x_0, y_0) 为中心点 O 的坐标。

th 取特征表征点集中任意两点间距离值的最大值,其具体求解步骤如下:

(1) 通过 Sobel 锐化算子构造非线性锐化滤波器对 A_i 进行多方向灰度梯度计算,并将计算值融合得到初步边缘提取结果^[12]。抑制无关点得到保留原始边界连接性和拓扑结构特性的轮廓图像;

(2) 选用 Harris 角点检测算法对轮廓图像进行角点提取,并将检测结果点作为图像 A_i 的特征表征点;

(3) 为表征点创建凸包函数,使其能够包含所有表征点并且面积值最小,以便接近器件 A_i 的外围轮廓。

在所有表征点中选取坐标值满足公式(5)的点作为初始点 (X, Y) ,以保证其位于所有点排列中的左下方位置:

$$d = \min[(Pt.x)^2 + (Pt.y)^2] \quad (5)$$

式中: Pt 为所有表征点的坐标值; d 为表征点到原点的距离值。然后以筛选出的初始点为起点应用 Graham 扫描算法^[13],计算出所有表征点的凸包函数。

(4) 根据公式(6)计算出任意两个表征点间距离的最大值,并赋值给 th :

$$th = \max\{Dis(Pt_i, Pt_j)\} \quad (6)$$

式中: Pt_i, Pt_j 为任意两表征点。

由 A_i 自身几何特性计算出其相对应的变量阈值 th 以后,分别以 $R = R_i + th, R = R_i - th$ 为半径做出同心圆构成目标区域 ϕ 。在区域 ϕ 中按照 \vec{OP}_i 的法向方向探寻下一相邻元器件 A_{i+1} 所在连通域 Ω_{i+1} 。

定义判别条件:

$$\begin{cases} \lim \left(\frac{\theta_1}{\theta_2} \right) = \lim \left(\frac{\left(R_i - th_i - \frac{k}{2} \right) d_1}{\left(R_i - th_i + \frac{k}{2} \right) d_2} \right) = 2 \\ d_2 \geq \sqrt{2} k \end{cases} \quad (7)$$

式中: θ_1 与 θ_2 分别为 d_1 与 d_2 所对应的圆心角。当 \hat{L}_i

与 Ω_{i+1} 存在公共集时调整值 $R = R_i - th_i$ 直至法向信息约束模型满足公式(7)完成连通域的选取。

2.2 先验位置信息约束

由于粘连影响,物料盘 X 射线透视图像中元器件并非严格呈等间距螺旋状排列,在约束区域 ϕ 中选取目标所在连通域 Ω 时,可能会有临近器件干扰,如图 4 所示。此时对器件进行先验位置信息约束,以便对目标区域进行精准提取。

图中, Ω_{i+1} 为下一目标器件所在连通域,由于器件的不规则排列导致在约束区域 ϕ 中存在干扰连通域 Ω_{i+1}' 的部分区域。为准确提取目标区域,利用当前器件 A_i 与其前一器件 A_{i-1} 的位置信息作为先验已知条件做出权重窗口 ψ ,并为窗口内各个区域赋值权重系数,使位于窗口中间区域的权重值高于其他区域以便筛选出目标器件所在的准确连通域。

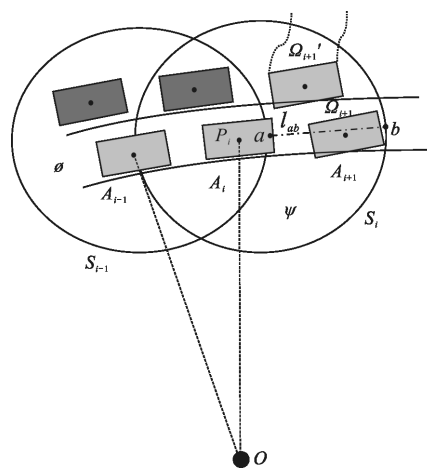


图 4 权重窗口构成模型

Fig.4 Model of weight window

结合图 4 约束模型进行如下计算:元器件 A_{i-1}, A_i 的中心点坐标 $(x_{i-1}, y_{i-1}), P_i(x_i, y_i)$ 经由计算已经得出,取相邻器件中心点距离与相邻边界间距之和作为标定参数,分别以 P_{i-1}, P_i 为中心点,和值为半径做出圆周区域 S_{i-1} 与 S_i ,由公式(7)得到权重窗口 ψ :

$$\psi = S_i - S_i \cap S_{i-1} \quad (8)$$

然后进行如下操作,筛选出权重窗口中间位置区域即目标器件所在连通域:

(1) 根据两圆交点位置计算出权重窗口 ψ 内凹点 $a(x_1, y_1)$ 与外凸点 $b(x_2, y_2)$ 坐标;

(2) 连接 a, b 得到线段 l_{ab} ,然后在 ψ 中平移并记录各位置线段长度 $dis(l)$;

(3) 定义 ψ 中不同位置的权重系数 γ , 使中间区域权重系数最大且向两侧递减:

$$\gamma = \lfloor \text{dis}(l) \rfloor \quad (9)$$

(4) 由公式(9)得到权重窗口中不同区域的权重值 $Q(\Omega)$:

$$Q(\Omega) = \sum_{i=1}^n [\gamma \times S(\Omega_i)] \quad (10)$$

式中: n 表示连通域 Ω 所包含不同权重等级的个数; $S(\Omega_i)$ 为各区域对应面积。

将公式(9)代入公式(10)中得到权重值函数:

$$Q(\Omega) = \sum_{i=1}^n [\lfloor \text{dis}(l) \rfloor \times S(\Omega_i)] \quad (11)$$

最后在权重窗口 ψ 中选取权重值最大的连通域, 即为下一目标元器件所在区域 Ω_{i+1} 。

2.3 分割检测

筛选出目标连通域后, 依据单个器件在 X 射线透视系统结构中成像面积 $S(obj)$ 标定值进行粘连预判。如果连通域 Ω_{i+1} 的面积值 $S(\Omega_{i+1})$ 满足:

$$S(\Omega_{i+1}) \leq n \times S(obj) \quad (12)$$

则判定连通域中只存在单个器件, 否则为多个器件粘连情况, n 取 1.2 时即可满足评判要求。当器件发生粘连时首先依据相邻已知器件位置对粘连器件中心点进行估算, 然后根据中心点提取包含粘连器件的 ROI, 最后参照 ROI 与器件的位置关系确定切割分界线进行分割, 粘连分割模型如图 5 所示。

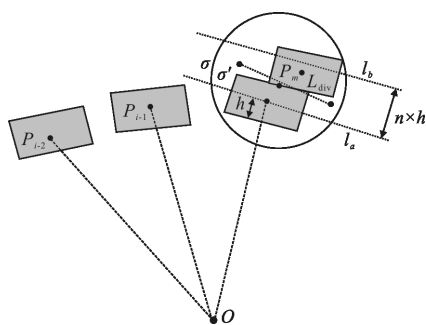


图 5 粘连分割模型

Fig.5 Model of segmentation for adhesion

图中, σ 为提取的 ROI, σ' 为粘连器件所在连通域与 σ 的补集区域, L_{div} 为分割界限。

当操作至第 i 个连通域时有:

(1) 根据前两相邻已知器件中心点与边缘间距, 估算出当前器件中心点 P_i 与上边缘中点 P_m 位置;

(2) 过 P_i 做 $\overrightarrow{OP_i}$ 的切线 l_a , 并平移 $d = n \times h$ 得到直

线 l_b , 当 γ 取 2.5 时即可满足理论要求;

(3) 以 P_m 为圆心, 由公式(6)计算出 th 值为半径做圆形区域并与 l_a 、 l_b 构成区域 σ ;

(4) 由公式(13)得到目标元器件所在连通在 ROI 中的补集部分 σ' ;

$$\sigma' = \sigma - \Omega_i \quad (13)$$

(5) 以 σ' 重心连线 L_{div} 为界限进行分割, 然后由公式(2)对分割后区域进行计算得出准确中心点 P_i 。最后经由公式(11)~(13)对所有区域切割完毕, 完成整幅物料盘的检测与统计。实际分割处理操作结果如图 6 所示。

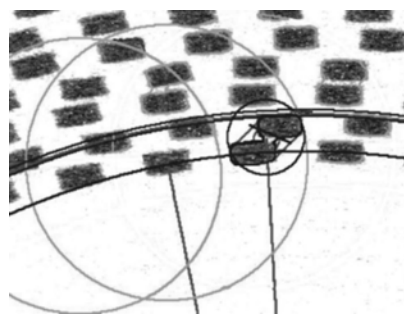


图 6 实际分割检测效果

Fig.6 Actual result of detection and segmentation

3 实验验证与结果分析

选用光管电压 100 kV, 电流 0.12 mA, 聚焦尺寸 $5 \mu\text{m}$, 辐射剂量 $50.025 \mu\text{Gy/h}$ 封闭型光管的 X 射线放射源; 选用有效像元素 9 216 pixel, 细节解析度 110 lp/cm, XW8804G1-160-024 型线阵 X 射线探测器。对工业生产中常见型号 SMT 物料盘进行图像采集与分割检测实验, 选取元器件间隔距离、外围尺寸与总体数目均不相同且具有代表性的 RS-05K102JT、RS-03K102JT、RS-03K1002FT、RS-02K1002FT 型号料盘检测数据对实验结果进行论述。各类型物料盘参数如表 1 所示(1 in=2.54 cm)。

表 1 实验所用物料盘种类

Tab.1 Kinds of materials plates of experiments

No.	Model	Spacing/mm	Size /in	Number /pics
1	RS-05K102JT	3.55	0.08×0.05	1 000
2	RS-03K102JT	2.55	0.06×0.03	2 000
3	RS-03K1002FT	1.50	0.06×0.03	3 000
4	RS-02K1002FT	0.75	0.04×0.02	5 000

采用分割错误率 SEER (Segmentation Error Efficiency Rate)、检测有效性 DER(Detect Efficiency Rate)和耗时 T (Time)三个指标对文中方法与参考方法进行评判对比^[14]。

$$SEER = \frac{N_{\text{Under}} \times N_{\text{Error}}}{N_{\text{Actual}}} \times 100\% \quad (14)$$

$$DER = \frac{N_{\text{Correct}}}{N_{\text{Actual}}} \times 100\% \quad (15)$$

式中： N_{Under} 为欠分割的数目； N_{Error} 为错分割的数目； N_{Actual} 为物料盘上器件实际数目； N_{Correct} 为正确分割的数目。将文中所提出的位置信息约束 LC (Location Constraints) 与阈值分割 TS (Threshold Segmentation)^[15]、形态变换 ST(Shape Trance)^[16]、区域生长 RG(Regional Growth)^[17]等方法实验数据对比如表 2~5 所示。

表 2 RS-05K102JT(1 000 pics)检测结果

Tab.2 Detection result of RS-05K102JT(1 000 pics)

Method	Detecting number	SEER	DER	T/s
TS	998	0.3%	99.81%	1.9
ST	1 000	0	100%	3.7
RG	998	0.2%	99.81%	1.6
LC	1 000	0	100%	2.3

表 3 RS-03K102JT(2 000 pics)检测结果

Tab.3 Detection result of RS-03K102JT (2 000 pics)

Method	Detecting number	SEER	DER	T/s
TS	1 997	0.35%	99.85%	3
ST	2 003	0.1%	99.85%	4.7
RG	1 999	0.15%	99.95%	3.2
LC	2 000	0	100%	3.6

表 4 RS-03K1002FT(3 000 pics)检测结果

Tab.4 Detection result of RS-03K1002FT (3 000 pics)

Method	Detecting number	SEER	DER	T/s
TS	2 993	0.37%	99.77%	3.3
ST	3 007	0.27%	99.77%	4.9
RG	3 003	0.23%	99.90%	4.2
LC	2 999	0.06%	99.97%	5.1

表 5 RS-02K1002FT(5 000 pics)检测结果

Tab.5 Detection result of RS-02K1002FT(5000 pics)

Method	Detecting number	SEER	DER	T/s
TS	4 987	0.5%	99.74%	4.4
ST	5 011	0.44%	99.78%	6
RG	5 010	0.52%	99.80%	5.5
LC	4 997	0.12%	99.94%	7.3

通过实验数据和工业实测对比验证，文中提出的算法检测有效率均高于其他方法并且误检率控制在 0.15% 以内；算法运行时间小于实际作业后续工作耗时(如标签打印、料盘更换等流程)，基本可以满足工业生产中常见 SMT 物料盘实时检测的需求。对于阈值分割方法，其主要理论是依据分解层数与小波变换系数所确定的多个谷点灰度值来计算动态阈值并进行分割^[15]，对于物料间距较大，器件与背景差异明显的情况处理效果较好，且运行效率优于文中方法，如 RS-05K102JT(1 000 pics)型号实验结果。但对器件数目较多，粘连比重较大的物料盘，阈值分割方法分割准确率明显降低误检率较高，无法满足工业需求。形态变换方法利用距离变换思想提取元器件的中心进行检测与统计^[16]，对于器件间距较大，边缘明显的情况有较好的检测效果，如 RS-05K102JT(1 000 pics)、RS-03K102JT(2 000 pics)型号实验结果。但是对于器件间距较小并且粘连重叠情况较严重的物料盘，中心点提取准确度降低，导致该方法错误率与准确性均不如文中方法，且在运行效率方面与文中方法差异并不明显。区域生长理论，利用聚类思想按照某一阈值进行评判，将具有相同特征的区域归为同一类别，不同类别之间的界限即为分割依据。每次种子区域进行生长以后，依据当前区域的像素均值与改进差值确定生长阈值，如果下一次生长后所求结果超出阈值范围则停止生长^[17]。该方法由于阈值选取问题，容易出现过分割现象，如 RS-02K1002FT(5 000 pics)实验结果，运行效率方面总体优于文中方法，但考虑实际工程环境两者差异处于允许范围之内。

通过上述分析可见在加入位置信息约束以后，文中检测方法能够有效提升检测精度，使得物料盘粘连情况对检测结果的影响明显降低，且运行时间

效率可以满足工业生产对常见规格 SMT 料盘实时检测的需求。

4 结论

文中提出了基于位置信息约束的对 SMT 物料盘 X 射线透视图像的分割检测方法。首先提取出物料盘的拟合中心点与起点器件等关键信息,其次按照各元器件与中心点和已知器件的位置关系模型进行法向位置信息约束,然后依据已知点的先验位置信息做出权重窗口对连通域进行进一步筛选得到目标器件所在区域,最后通过划分分割界限对粘连器件进行分割,完成对整幅透视图像的检测工作。与传统阈值分割方法比较,文中方法避免阈值选取具有更高的鲁棒性;与形态变换和区域生长理论相比,文中方法有效避免欠分割与过分割情况,检测准确率更高。在有效像元素 $9\ 216\ \text{pixel}$,细节解析度 $110\ \text{lp/cm}$ 成像环境之下,对不同规格物料盘进行实测,检测误差控制在 0.15% 之内,且运行时间效率基本满足工业生产实时检测需求。

由于文中算法基于待检器件与已知器件的位置关系约束模型,存在一定累积误检率。对于元器件数目超过 $5\ 000\ \text{pics}$ 的物料盘,器件间距过小粘连情况严重,算法检测准确率有所下降。在后续研究中计划融入器件中心点位置校正模型提升算法稳定性,并进一步优化执行效率。

参考文献:

- [1] Lewiecki E M, Laster A J. Clinical review: clinical applications of vertebral fracture assessment by dual energy X-Ray absorptiometry [J]. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 2006, 91(11): 4215-4222.
- [2] Mao Haifeng. The applications of AOI in SMT detection [J]. *Science and Technology Information*, 2010, 27(5): 57-58. (in Chinese)
- [3] Min Sizong. The applications of digital image processing in SMT detection [J]. *Computer and Network*, 2010, 24: 247-248. (in Chinese)
- [4] Erik M. Cell segmentation; 50 years down the road [J]. *Signal Processing Magazine*, 2012, 29(5): 140-145.
- [5] Lei Yan, Cheol-Woo Park, Sang-Ryong Lee, et al. Separation algorithm for touching grain kernels based on contour segments and ellipse fitting [J]. *Zhejiang Univ-SciC (Comput & Electron)*, 2011, 12(1): 54-61.
- [6] Vantaram S R, Saber E. Survey of contemporary trends in color image segmentation [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2012, 21(4): 040901.
- [7] Roerdink Jbtm, Meijster A. The watershed transform: Definitions, algorithms and parallelization strategies [J]. *Fundamenta Informaticae*, 2000, 41(1): 187-228.
- [8] Farhan M, Yli-Harja O, Niemistö A. A novel method for splitting clumps of convex objects incorporating image intensity and using rectangular window-based concavity point-pair search [J]. *Pattern Recognition*, 2013, 46(3): 741-751.
- [9] Ji Zexuan, Pan Yu, Chen Qiang, et al. Natural image segmentation algorithm with unsupervised FCM [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2011, 16(5): 773-783. (in Chinese)
- [10] Sun Zhaolei, Hui Bin, Qin Mofan, et al. Object detection method based on saliency measure for infrared radiation image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (9): 2633-2637. (in Chinese)
- [11] Wang Dongdong, Zhang Wei, Jin Guofeng, et al. Application of cusp catastrophic theory in image segmentation of infrared thermal waving inspection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 1009-1015. (in Chinese)
- [12] Zhang Zhongyu, Jiao Shuhong. Infrared hip target detection methods based on multiple feature fusion [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(S): 29-34. (in Chinese)
- [13] Zhao Qing. K-means efficient algorithm and research on hadoop platform [D]. Xi'an: Xidian University, 2014. (in Chinese)
- [14] Faustion G M, Gattass M, Rehen S. Automatic embryonic stem cell detection and counting method in fluorescence microscopy images [J]. *Transactions on Information Theory*, 2012, 58(2): 1094-1121.
- [15] Song Hong, Wang Yong, Huang Xiaochuan, et al. A dynamic adaptive region growing segmentation algorithm for tumor of liver CT images [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2014, 43(1): 72-76. (in Chinese)
- [16] Allaoui A E, Nasri M. Medical image segmentation by marker-controlled watershed and mathematical morphology [J]. *International Journal of Multimedia & its Applications*, 2012, 4(3): 151-158.
- [17] Zhang Qian, He Jianfeng, Ma Lei. The study of image segmentation based on the combination of the wavelet multi-scale edge detection and the entropy iterative threshold selection [J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2013, 22(4): 154-160. (in Chinese)