

BGA 芯片视觉定位方法^{*}

罗明亮 曾祥进

(武汉工程大学 计算机科学与工程学院 武汉 430205)

摘要:为了解决 BGA 芯片视觉检测任务中,对存在焊点缺失的 BGA 图像进行位姿信息获取和焊点理论中心计算的问题,分析了现有点模式匹配算法的不足,提出了改进的点模式匹配算法。该算法基于 BGA 焊点的排列规律,建立了焊点分布矩阵模型,并应用度量空间展开网格,通过仿射变换映射到图像空间中,以网格为线索确定匹配关系,最后使用点集配准完成精确计算,得到位姿信息和焊点理论中心。通过模拟仿真实验,证明了该方法可以适应焊点缺失的情况,定位误差在 1.6%,精确度比传统方法提升了 26.4%。

关键词:球栅阵列;度量空间;点集匹配;点集配准;仿射变换

中图分类号: TN407;TP391.41 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.4050

Visual positioning method for BGA chip

Luo Mingliang Zeng Xiangjin

(School of Computer Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China)

Abstract: Aimed at solving the problem about obtaining pose information and calculating the theoretical center of solder joints for BGA images with missing solder joints in the task of BGA chip visual inspection, an improved point pattern matching algorithm was proposed after analyzing the deficiency of the existing point pattern matching algorithm. The algorithm establishes a solder joint distribution matrix model base on the arrangement of BGA solder joints, and uses the metric space to expand the grid, maps it to the image space through affine transformation, uses the grid as a clue to determine the matching relationship, and finally uses the point set registration to complete accurate calculation, get the pose information and the theoretical center of the solder joint. Through simulation experiments, it is proved that the method can adapt to the situation of missing solder joints. The position error is 1.6% and the accuracy is improved by 26.4% compared with the traditional method.

Keywords: BGA; grid template; point set matching; point set registration; affine transformation

0 引言

BGA 封装技术^[1-2]常用于便携式计算机中 CPU 芯片的封装,是连接芯片与外部电路的可靠方式^[3]。在芯片自动化生产线上对 BGA 芯片快速识别定位是一项重要技术,为芯片质量检测提供了基础,是厂商保证产品良率的重要步骤。

依托于发达的半导体行业,国外学者展开对芯片的视觉算法研究的时间较长,而随着我国半导体行业的崛起,对芯片元件的识别定位相关研究也随之展开,并因为计算机视觉技术的进步而快速发展。其中,文献[4]利用改进的矩形拟合算法实现了 IC 芯片定位,属于利用形状特征定位;类似的文献[5]则使用边缘特征来完成 LED 芯片的定位,

这两种方法中的芯片都具有明显的边缘特征,而 BGA 图像则很少有明显的边界;文献[6]中为 BGA 引脚排列建立可变数学模型,以遗传算法求解完成视觉定位,该方法精度较高,具有泛用性,但是算法效率无法满足要求;基于图像分割的方法^[7]也可以完成芯片定位任务,只是精度停留在像素级;在神经网络模型的帮助下,也有学者将芯片定位任务视为回归模型^[8],以芯片矩形框数据为驱动训练模型,对输入图像做出推断预测出焊点的位置,在速度和准确性上取得了优势,但没有做到像素级分割,并且目前缺少有效的 BGA 芯片数据集。当生产线上出现存在少数引脚缺失或偏移的带有缺陷的芯片时,算法能否保持鲁棒也是当前方法的探讨中所缺少的内容。

基于目前的研究现状,为完成高效率,高精度,且易于

收稿日期:2021-03-04

^{*} 基金项目:国家自然科学基金项目(61502355)、湖北省教育厅重点研究项目(D20171503)资助

应用的 BGA 芯片识别定位算法, 本文提出了基于度量空间的快速点模式匹配方法, 提高了点匹配的效率, 实现了对缺陷芯片的鲁棒性, 并加入了点一致性约束条件提高了定位精度。

1 点模式匹配算法

点模式匹配^[9-10]用于建立点集与点集之间尽可能多的一一对应关系, 用匹配关系作为条件求解目标点集到模板点集的映射, 以估计目标点集的姿态, 得到芯片在图像中的位姿信息, 从而完成识别任务。点模式匹配模型描述如下:

对于点集 $P\{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ 和点集 $Q\{q_1, q_2, \dots, q_n\}$, 有函数 F 可以将点集 P 中的点尽可能多的映射到点集 Q 中, 即满足式(1)的形式。

$$q = F(p) = Ap + b \quad (1)$$

其中, q 和 p 分别为 P 和 Q 中的点, 而 A 和 b 为函数 F 的参数, A 表示线性变换矩阵, b 表示位移向量, 满足式(2)形式。

$$A = \begin{bmatrix} k \cos \theta & -k \sin \theta \\ k \sin \theta & k \cos \theta \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, k 为线性变换 A 的缩放系数, θ 为旋转角度, b_x 为 x 方向上的位移, b_y 为 y 方向上的位移。

在模型中, 点集 P 被称为模板点集, 点集 Q 被称为目标点集, 而点模式匹配就是通过确定点与点之间的匹配关系计算函数 F 的过程。

在 BGA 视觉定位任务中使用点模式匹配可以有效地估计芯片的位姿, 但难点在于如何建立完整的模板点集, 以及建立稳定有效的点匹配规则。

模板点集的建立可以通过 BGA 芯片上焊点分布的物理信息来建立, 根据焊点阵列的行列数量, 相邻焊点间的距离, 确定每个焊点的理论坐标。实际应用中, 由于芯片的多样性, 规模排列各有不同, 这种方法难以建立统一的模板来识别不同型号的芯片。

计算图像特征是建立点匹配规则的一类常见的策略, 以标准图像特征点为模板点集, 图像分别在标准图像和目标图像上计算特征向量来描述特征点, 并在特征空间当中定义距离来度量向量与向量的相似程度以判断对应的点与点之间是否存在匹配关系, 如文献[11]中使用的方位环境特征、文献[12]使用的 SIFT 特征、文献[13]使用的角点特征进行点匹配、文献[14]使用的轮廓中线特征进行点匹配。这种匹配规则需要用到标准图像, 难以得到不同芯片统一的标准图像, 并且图像特征的计算量较大, 难以满足实际应用需求。

使用点的极坐标进行匹配^[15]也是一种常见的方法, 点的极坐标反映了点相对位置特征, 相对位置相近的点视为匹配。但在 BGA 焊点存在偏移或者缺失的情况下, 极坐标容易产生误匹配, 降低结果精确度, 同时, 极坐标匹配难以判断发生偏移和缺失的具体位置。

2 改进的点模式匹配算法

2.1 建立目标点集

目标点集是算法需要识别的目标, 在本任务中, BGA 芯片的主要结构为引脚焊点, 以图像坐标系下的实际焊点中心坐标作为目标点集 Q 中的元素, 具体步骤如下。

1) 取阈值 T 将原始图像 $f(x, y)$ 分割为二值图像 $g(x, y)$ 原理如式(3)所示。

$$g(x, y) = \begin{cases} 255, & f(x, y) > T \\ 0, & f(x, y) \leq T \end{cases} \quad (3)$$

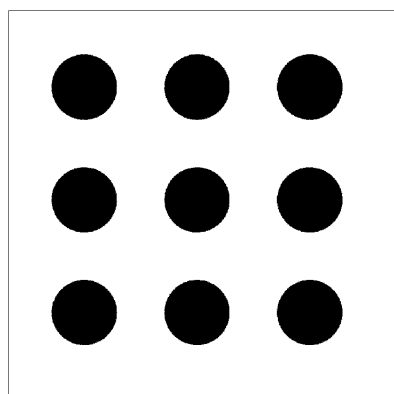
2) 对二值图像进行连通域分析, 将相邻的具有相同灰度的像素点集视为一个连通域, 代表一个焊点区域, 根据式(4)计算焊点中心 (\bar{x}, \bar{y}) 。

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (4)$$

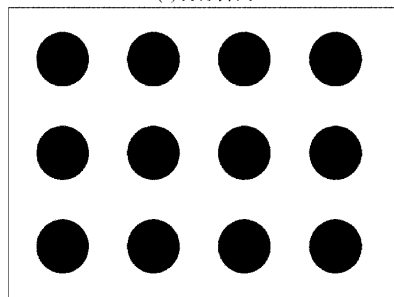
其中, n 为焊点区域的像素数量, (x_i, y_i) 为区域中各个像素的坐标。

2.2 创建矩阵模板

首先考虑常见 BGA 芯片的排列, BGA 可呈矩形或方形, 方形阵列具有相等的行数和列数, 如图 1(a) 所示的 3×3 的方形阵列, 矩形阵列行列数不等, 如图 1(b) 所示的 3×4 的矩形阵列。阵列中某些位置上也可以不放置焊球, 如图 1(c) 所示的有空缺的方形阵列, 图 1(d) 所示的有一列空缺的矩形阵列。还存在一种特殊的阵列, 焊球呈散状分布, 如图 1(e) 所示的对角线形散布阵列。



(a) 方形阵列



(b) 矩形阵列

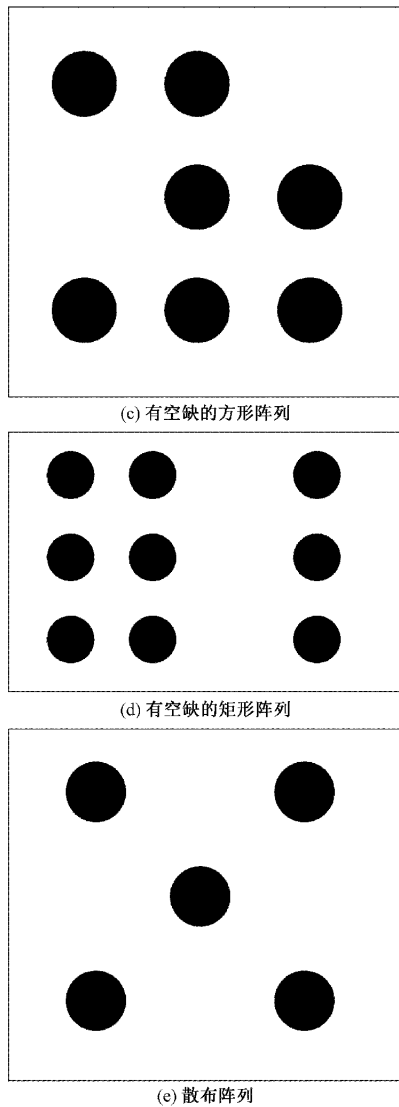


图 1 BGA 焊点排列

可见不同的芯片中,焊点排布有所不同,相邻焊点的间距也不一致,固定模板难以适应,考虑以矩阵来表示不同的焊点,以仿射变换调整矩阵来适应不同焊点排列。

令矩阵行数为 m ,列数为 n ,以矩阵 A_{mn} 来表示 $m \times n$ 的矩形阵列,用矩阵中的元素值 a_{ij} 来表示焊点是否放置,当 $a_{ij} = 1$ 时表示此位置有焊球,而 $a_{ij} = 0$ 时表示此处没有焊球。以图 1(c) 为例,对其建立矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

对于特殊的散布阵列,可以处理为有规则空缺的排列,可以对其建模:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

根据矩阵模型,以矩阵行列作为二维坐标表示焊点位置,可以得到 BGA 芯片的模板点集 P ,定义如式(7)所示。

$$P = \left\{ (i, j) \left| \begin{array}{l} a_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, m, \\ j = 1, \dots, n \end{array} \right. \right\} \quad (7)$$

2.3 点匹配规则

矩阵模板中只有焊点的位置信息,没有焊点间距,所以考虑应用仿射变换将模板点集 P 映射到 Q 所在的图像空间中。相应的,制定的点匹配规则应当充分利用位置信息。不难发现,在焊点阵列中,每个焊点都具有相应的邻域,于是引入度量空间来确定每个焊点的邻域,并在其中搜索匹配点。

为了完成模板点集 P 和目标点集 Q 之间的点模式匹配,可以先确定一个映射 T ,将点集 P 映射到点集 Q 所在的空间当中,在点集 Q 的空间中寻找匹配点对。模板空间经过一次线性变换加上一个平移矢量转换到目标空间,符合仿射变换的定义,据此构建模型:

$$p_{t_{ij}} = T(p_{ij}) = Ap_{ij} + b \quad (8)$$

其中, A 为线性变换矩阵, b 为位移向量, p_{ij} 表示点集 P 中的点,在矩阵中的下标为 i, j ,而 $p_{t_{ij}}$ 表示 p_{ij} 经过 T 变换映射到点集 Q 所在空间中的点。根据仿射变换模型的性质,可知至少要确定 3 对点来解出线性变换矩阵 A 和位移 b 。目标点集 Q 存在随机噪声且可能存在缺失或冗余,难以直接对点进行匹配。然而,通过求包含点集 Q 所有点的最小外接矩形可以快速获得 4 对匹配点。对于平面点集 Q ,容易找到 x, y 轴上的最大和最小坐标 $x_{\min}, x_{\max}, y_{\min}$ 和 y_{\max} 从而建立边与坐标轴平行的简单外接矩形,在点集凸包上旋转迭代得到最小外接矩形 H ,过程如图 2 所示。

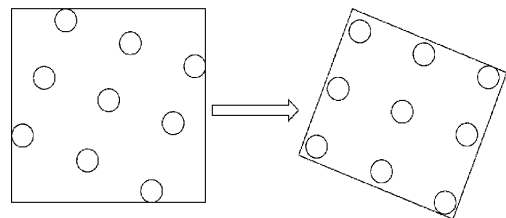


图 2 最小外接矩形

点集 Q 的最小外接矩形 H 给出了点集在空间中的大致位置,并包含了点集中的所有点,因此 H 的 4 个顶点 h_1, h_2, h_3 和 h_4 可与模板点集 P 当中的 4 个顶点 $p_{m1}, p_{mn}, p_{1n}, p_{11}$ 匹配,映射关系有如图 3 所示。

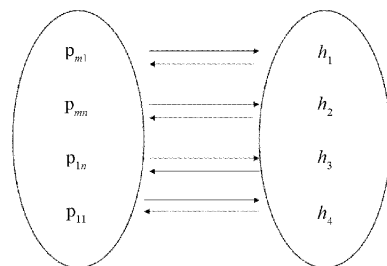


图 3 映射关系

以这 4 对匹配作为条件解得变换 T , 由式(5)得出映射后的点, 该点在位置上接近与之匹配的点 q , 对该点展开邻域并在邻域内搜索该点。期望所有 p_{i_j} 的邻域的交集为空集, 而并集可以覆盖点集 Q , 以求每个点能在各自的邻域内完成匹配, 而不会产生不同点匹配同一点的情况。为了满足这样的性质, 可以先在模板 P 上定义度量 L 为切比雪夫距离:

$$L(X, Y) = \max(|x_1 - y_1|, |x_2 - y_2|) \quad (9)$$

其中, X, Y 为任意两点, (x_1, x_2) 和 (y_1, y_2) 分别为其坐标。在切比雪夫度量下, 与定点距离为定值 r 的点形成方形, 边垂直于坐标轴, 边长为 $2r$, 因而在模板点集上给定切比雪夫距离可以将点集区域等分如图 4 所示, 经过映射 T , 将式(8)代入式(9), 更新度量 L :

$$L(X, Y) = \max \left(\begin{matrix} a_{11}|x_1 - y_1| + a_{12}|x_2 - y_2|, \\ a_{21}|x_1 - y_1| + a_{22}|x_2 - y_2| \end{matrix} \right) \quad (10)$$

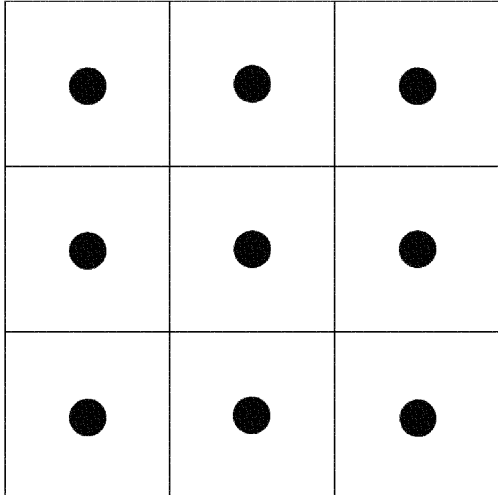


图 4 切比雪夫距离划分点集

其中 $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$ 为系数, 取自式(5)中线性变换矩阵 A 的项, 在度量 L 下, 与定点距离为定值 r 的点形成一个以该点为质心的平行四边形。因为仿射变换具有保持二维图形平直和平行的特性, 不会改变区域性质。基于 L , 用式(11)定义 p_{i_j} 的 δ 邻域 U :

$$U(p_{i_j}, \delta) = \{x \mid 0 \leq L(x, p_{i_j}) < \delta\} \quad (11)$$

其中, δ 为邻域半径, 若在该邻域内有唯一的点 q , 则将其视为一组匹配。将获得的匹配点对代入式(8)解出 A 和 b 两个参数。

2.4 点集配准

在点匹配的过程中用到了点集 Q 的外接矩形这一概念, 但由于焊点可能存在缺失或者偏移, 这样得到的参数可能存在偏差。于是, 引入点集配准^[16-18], 加入点集间的几何约束来配准点集。

在图像空间上, 存在点集 P_T 和 Q 以及匹配关系集合

M , 因为从 P 到 P_T 的变换 T 建立在外接矩形上用来寻找配对, 在计算芯片整体的准确位置时, 这一假设并不成立。然而, BGA 芯片的排布满足先验条件: 存在少数引脚发生了微量偏移, 多数引脚满足理论条件。芯片中的偏移可以通过累加每个配对中两个点的距离来量化, 对于 P_T 和 Q 之间关于匹配 M 的偏移, 可以定义为:

$$\text{dist} = \sum_{k=1}^{\text{card}(M)} \|p_{t_k} - q_k\|^2 \quad (12)$$

其中, dist 为芯片中各个焊点偏移总和, $\text{card}(M)$ 为集合 M 中配对数量, p_{t_k} 表示第 k 个配对中点集 P_T 的点坐标, q_k 表示第 k 个配对中点集 Q 的点坐标。定义配准后的点集为 S :

$$s = R p_t + l \quad (13)$$

其中, R, l 为校准系数, s 为 p_t 经过校准后的点集 S 中的点, 点集 S 与点集 Q 之间的距离表示为:

$$D(S, Q) = \sum_{k=1}^{\text{card}(M)} \|s_k - q_k\|^2 \quad (14)$$

点集 S 满足与点集 Q 的距离最小的条件, 将式(13)代入式(14)中, 可以列出优化目标函数:

$$R^*, l^* = \sum_{k=1}^{\text{card}(M)} \|(R p_{t_k} + l) - q_k\|^2 \quad (15)$$

使用 SVD 方法^[19]对函数求解, 对点集 P_T 和点集 Q 求质心:

$$\bar{p}_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_{t_i}, \quad \bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i \quad (16)$$

将点集去中心化:

$$x_i = p_{t_i} - \bar{p}_t, \quad y_i = q_i - \bar{q} \quad (17)$$

计算两个点集的协方差矩阵:

$$H = \sum_{i=1}^n x_i y_i^T \quad (18)$$

对 H 进行 SVD 分解:

$$H = U \Sigma V^T \quad (19)$$

得到的最优参数为:

$$R^* = V U^T, \quad l^* = \bar{q} - R^* \bar{p}_t \quad (20)$$

由式(8)、(20)代入式(13)可以得到最终的焊点理论中心点集 S :

$$s = R^* (A p + b) + l^* \quad (21)$$

芯片的位姿信息则由点集 S 的位姿确定。

3 实验仿真与结果分析

本文算法利用 C++ 编写实现进行仿真实验, 相关矩阵运算使用 Eigen 函数库实现, 图像读写以及预处理算法使用 OpenCV 函数库实现并运行在 3.0 GHz CPU 和 16 GB 内存的机器上。采用图 5 所示 BGA 芯片作为实验对象, 设置不同的偏移量和偏转角度对算法的定位识别效果进行实验验证并量化评估。

3.1 评估方法

以算法定位得到的理论位姿与实际测量的位姿的差作

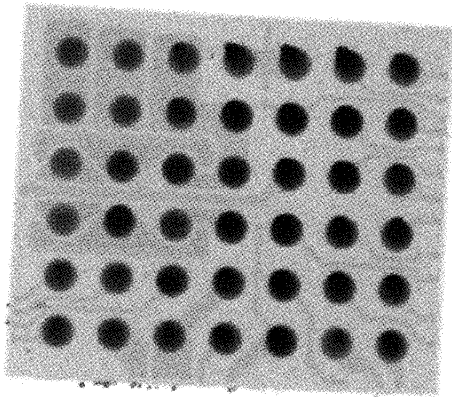


图 5 BGA 芯片图像

为误差来评估算法的定位效果。其中位姿包括偏转角度和中心位置,其中理论偏转角度用 θ 表示,定义为:

$$\theta = \arctan\left(\frac{y_{ij+1} - y_{ij}}{x_{ij+1} - x_{ij}}\right) \quad (22)$$

其中, x, y 为点集 S 中一点的 X, Y 轴坐标。定义实际测量偏转角度为 θ_0 ,将误差 $\Delta\theta$ 定义为:

$$\Delta\theta = |\theta_0 - \theta| \quad (23)$$

理论中心位置由 (x_c, y_c) 表示,定义为:

$$(x_c, y_c) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i, y_i) \quad (24)$$

其中, n 为点集中的点个数。令实际测量位置表示为 (x_0, y_0) ,将误差 $\Delta x, \Delta y$ 定义为:

$$\Delta x = |x_c - x_0|, \Delta y = |y_c - y_0| \quad (25)$$

通过 $\Delta x, \Delta y$ 和 $\Delta\theta$ 表示理论值与测量值在位置与偏转角度上的差距,可以客观体现算法部分效果,而考虑到芯片焊点实际会存在少量偏移,理想的算法应使得理论焊点与实际焊点之间的偏差尽可能小,于是引入 Δd 为焊点偏移指标,定义为:

$$\Delta d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (26)$$

其中, n 为匹配对数, d_i 为第 i 对匹配点之间的偏移。

3.2 实验设置

图像预处理阶段,设置滤波模板大小为 3×3 ,根据图像直方图设置分割阈值为 110。对原图以及其水平翻转图像分别逆时针旋转 $90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$,共设置 8 组具有不同位置和不同偏转角度的芯片图像进行检测实验对算法的准确性做量化评估,给出测量得到的芯片位置和角度以及算法得到的芯片位置以及角度并计算误差。获得数据如表 1 所示,其中角度取与正方向的最小夹角。

表 1 定位检测结果

$x/(px)$	$y/(px)$	$\theta/(^\circ)$	$x_0/(px)$	$y_0/(px)$	$\theta_0/(^\circ)$	$\Delta x/(px)$	$\Delta y/(px)$	$\Delta\theta/(^\circ)$
501.711	489.176	2.698	499.970	488.862	2.68	1.741	0.314	0.018
489.176	521.289	2.685	488.862	523.030	2.68	0.314	1.741	0.005
521.289	533.824	2.698	523.030	534.138	2.68	1.741	0.314	0.018
533.824	501.711	2.685	534.138	499.970	2.68	0.314	1.741	0.005
521.289	489.176	2.698	523.030	488.862	2.68	1.741	0.314	0.018
489.176	501.711	2.685	499.970	534.138	2.68	0.314	1.741	0.005
501.711	533.824	2.698	499.970	534.138	2.68	1.741	0.314	0.018
533.824	521.289	2.685	534.138	523.030	2.68	0.314	1.741	0.005

对算法的鲁棒性进行验证,随机屏蔽图像上的焊点,令算法对焊点缺失的芯片图像进行检测,给出焊点的排列位置、测量坐标以及理论坐标。获得数据如表 2 所示,屏蔽点测量坐标以“—”表示。

表 2 鲁棒性验证结果

位置	测量坐标	理论坐标
(1,1)	(157.79,172.536)	(156.569,171.48)
(1,2)	(279.105,180.009)	(276.33,177.11)
(1,3)	(397.594,183.86)	(396.091,182.741)
(2,1)	(145.56,410.822)	(145.255,412.124)
(2,2)	(266.124,418.625)	(265.016,417.754)
(2,3)	(386.596,424.684)	(384.778,423.385)
(3,1)	(139.181,533.852)	(139.598,532.446)
(3,2)	—	(259.36,538.077)
(3,3)	(380.164,544.521)	(379.121,543.707)

设置对比实验对算法的效率和精准度进行讨论,给出算法耗时、角度偏转误差和偏移指标。实验算法分别为基于特征匹配的视觉定位算法、基于模板匹配的定位算法、基于极坐标的点模式定位算法以及本文算法。获得数据如表 3 所示。

表 3 对比实验结果

算法	$\Delta\theta/(^\circ)$	t/ms	$\Delta d/(px)$	标准图像模板
基于特征	0	1 982	0	需要
模板匹配	0	2 302	0	需要
点模式	0.020 3	34	108.397 0	需要
本文算法	0.011 5	39	79.737 5	不需要

3.3 数据分析

对表 1 结果进行统计分析,得到表 4 所示结果,其中

MIN 表示误差最小值, MAX 表示误差最大值, MEAN 表示误差均值, STD 表示误差的标准差。通过表 4 可以得到, 算法的定位效果平均误差为 1 pixel, 不超过 2 pixel, 考虑到图像中焊点所占平均面积为 3 000 pixel 左右, 而焊点形状近似为圆形, 可以计算出定位误差在 1.6% 左右, 在芯片偏转角度的定位上精度较高, 平均误差在 0.01° 左右, 不超过 0.02°。

表 4 统计分析结果

	MIN	MAX	MEAN	STD
$\Delta x / (\text{px})$	0.314	1.741	1.027 5	0.713 5
$\Delta y / (\text{px})$	0.314	1.741	1.027 5	0.713 5
$\Delta \theta / (^{\circ})$	0.005	0.018	0.011 5	0.006 5

在算法稳定性方面, 对焊点阵列的少数焊点进行屏蔽模拟缺失情况, 个体的缺失并不影响整体位置的推导, 对外接矩形的利用使得算法具有整体一致性和鲁棒性。

通过对比实验, 与本文算法相比, 基于特征的方法由于需要计算全局特征, 耗时较长, 难以满足实时生产需求, 在偏转角度和偏移量上, 由于本实验中使用的图像模板为原图的旋转图像, 故可以准确定位到芯片, 但实际场景下不可能实现; 模板匹配方法类似, 需要对图像进行全局匹配相关的运算, 耗时较长, 无法满足要求, 本实验中截取原图部分为模板, 可以准确匹配到芯片, 而实际场景下难以得到通用模板; 与基于极坐标的点模式方法相比, 本文算法因配准步骤偏移量上提升了 26.4%, 而耗时相当, 满足实时需求。实验中的偏移量远小于平均焊点面积, 结果满足理论中对于芯片上少量焊点发生了微量偏移的假设。

4 结 论

本文将数学方法与 BGA 芯片结构相结合, 提出了对 BGA 芯片图像进行视觉定位的方法, 帮助判断图像中 BGA 芯片的位置姿态以及各个焊点的偏移情况。该算法通过建立 BGA 模板的数学模型, 利用空间关系, 快速完成点到点之间配对, 弥补了基于特征的点模式方法匹配计算量大的不足, 并且结合了点集配准原理, 得到了最优化的结果, 填补了这方面的空缺。结合仿真实验和分析, 确定该算法切实有效, 在芯片检测的应用当中具有参考价值。下一步考虑将算法推广到相关场景的应用当中, 并将理论扩展到三维场景。

参考文献

- [1] 廖志伟. 微电子封装技术探讨[J]. 计算机产品与流通, 2020(2):150.
- [2] 李磊. 新型微电子封装技术的特点[J]. 电子世界, 2016(1):128-129.
- [3] 薛明阳. BGA 封装的可靠性模拟与实验验证[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [4] 孙浩楠, 王勇, 胡志平, 等. 基于矩形拟合的 IC 芯片块

定位算法[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(6):201-202, 209.

- [5] 李德龙, 龚时华, 王子悦. 基于亚像素边缘检测的 LED 芯片定位算法研究[J]. 半导体光电, 2017, 38(3):369-374.
- [6] 王祖进, 黄筱调, 顾萍萍. 基于参数化变形模板的圆形引脚元件视觉定位[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(9):3274-3278.
- [7] 周琪琪, 孙一兰, 王诗宇, 等. 基于图像分割的芯片定位在检测系统中的应用[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(8):114-117.
- [8] 黄知超, 梁国丽, 朱芳来. 微芯片焊点快速识别与定位方法[J]. 半导体技术, 2020, 45(3):236-243.
- [9] DENG W X, ZOU H X, FANG G, et al. Point-pattern matching based on point pair local topology and probabilistic relaxation labeling [J]. Visual Computer, 2018, 34(1):55-65.
- [10] 贾迪, 朱宁丹, 杨宁华, 等. 图像匹配方法研究综述[J]. 中国图象图形学报, 2019, 24(5):677-699.
- [11] 刘琛, 袁小芳, 田争鸣, 等. 基于点模式匹配的芯片缺陷检测算法研究[J]. 激光杂志, 2020, 41(1):39-44.
- [12] 刘璐, 刘缠牢. 基于 SIFT 算法的疵病图像配准[J]. 电子测量技术, 2019, 42(6):94-98.
- [13] 周伟, 巢渊, 李龔, 等. 基于改进 Harris 角点检测的芯片图像快速校正[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(10):74-81.
- [14] 姜萼, 刘亚东, 方健, 等. 基于轮廓特征的电力设备红外和可见光图像配准方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(11):252-260.
- [15] 高冠东, 王晶, 刘菲, 等. 一种基于极坐标变换的点模式匹配算法[J]. 计算机工程与科学, 2016, 38(2):331-337.
- [16] 王珊, 王春阳. 基于特征点匹配的三维点云配准算法[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(12):23-28.
- [17] PASHA H, RENAT Z, ALEXANDER U. An unsupervised 2D point-set registration algorithm for unlabeled feature points: Application to fingerprint matching [J]. Pattern Recognition Letters, 2017, 100:137-143.
- [18] 于明旭. 基于间接平差的 ICP 点云配准算法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(2):38-40.
- [19] 刘哲, 周天, 彭东东, 等. 一种改进的基于 PCA 的 ICP 点云配准算法研究[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2019, 36(4):99-104.

作者简介

罗明亮, 硕士研究生, 主要研究方向为图像视频处理、计算机视觉。

E-mail: 1562791097@qq.com

曾祥进, 副教授, 主要研究方向为智能机器人控制、机器视觉、嵌入式系统设计、运动控制等。

E-mail: xjzeng21@163.com