

# 硕士学位论文

## 拱架式贴片机视觉系统的研究

### **RESEARCH ON THE VISION SYSTEM OF GANTRY-TYPE PLACEMENT MACHINE**

丁长兴

哈尔滨工业大学

2011 年 6 月

国内图书分类号：TP391.41

学校代码：10213

国际图书分类号：621.3

密级：公开

## 工学硕士学位论文

# 拱架式贴片机视觉系统的研究

硕 士 研 究 生：丁长兴

导 师：刘国良副教授

申 请 学 位：工学硕士

学 科 、 专 业：控制科学与工程

所 在 单 位：航天学院

答 辩 日 期：2011 年 6 月 24 日

授 予 学 位 单 位：哈尔滨工业大学

Classified Index: TP391.41

U.D.C: 621.3

Thesis for the Master Degree in Engineering

**RESEARCH ON THE VISION SYSTEM  
OF GANTRY-TYPE PLACEMENT MACHINE**

<b>Candidate:</b>	Ding Changxing
<b>Supervisor:</b>	Prof. Liu Guoliang
<b>Academic Degree Applied for:</b>	Master of Engineering
<b>Speciality:</b>	Control Science and Engineering
<b>Affiliation:</b>	School of Astronautics
<b>Date of Defence:</b>	June 24, 2011
<b>Degree-Conferring-Institution:</b>	Harbin Institute of Technology

## 摘 要

贴片机是表面贴装技术(SMT)中最为关键的设备,它的主要功能是实现贴片电子元件的高速高精度组装。拥有贴片机的数量和先进程度,是衡量一个国家或地区电子制造能力的标志。贴片机结构复杂,技术难度大,它涉及精密机械、机器视觉、自动控制以及软件工程等多学科。其中机器视觉系统是贴片机的核心系统,直接影响到贴片机最重要的几个指标。本文就实现一个完整的拱架式贴片机视觉系统展开了研究,主要研究工作如下:

(1) 确定了采用“飞行视觉”技术的拱架式贴片机视觉系统的总体方案,阐述了构成视觉系统的几个重要模块及其作用。在分析国外同类产品性能的基础上,提出了本文设计的视觉系统所应具有指标。

(2) 设计和搭建了用于捕捉运动状态下贴片元件的图像采集系统,包括光学成像系统和 LED 照明系统的设计和硬件选型方法。其中,LED 照明系统能够为绝大部分贴片元件提供最佳角度和强度的频闪照明;光学成像系统能够在 LED 照明系统的配合下,在非常短的曝光时间内捕捉到运动状态下元件的清晰图像。

(3) 对适用于贴片机视觉系统的图像处理与特征处理基础算法做了比较研究,包含像素级与亚像素级精度的边缘提取算法、几何基元提取以及区域特征提取算法。为实现贴片元件和 PCB 基准标志的定位与检测算法奠定了基础。

(4) 对当前存在的众多封装类型的贴片元件进行了整理分类,从图像处理算法的角度将常用封装形式的贴片元件分为三大类,从而提高了算法的通用性和灵活性。在前人工作的基础上,提出了一种通过对元件引脚特征的定位来间接实现对整个贴片元件精确定位的策略。本文为每类贴片元件均设计了比较新颖和实用的检测算法,实验证明这些算法具有较高的执行速度、定位精度和强鲁棒性,能够满足高档贴片机对于检测算法各项指标的要求。

(5) 对应用较为广泛的圆形 PCB 基准标志的使用方法和定位算法进行了研究,并充分的考虑了来自生产现场的复杂干扰对于定位误差的影响。通过丰富的实验证明,本文所提出的圆形基准标志定位算法除了具有高精度和高速度的优点,还对多种干扰具有很强的鲁棒性。

**关键词:** 贴片机; 贴片元件; 机器视觉; 图像处理; 精确定位; 特征检测

## Abstract

Placement machine is the most important equipment in the Surface Mount Technology. It has been widely used to mount electronic components fast and accurately onto the Printed Circuit Board. Placement machine's design is a multidisciplinary integrated technology, in which the machine vision system plays a key part. This dissertation focuses on the study and implementation of the vision system. The main research contents are illustrated as below.

Firstly, the general scheme of the on-the-fly vision system is proposed and the function of key modules is analysed. Also, the system performance indices are put forward on the basis of much analysis.

Secondly, an image acquisition system is designed and developed to capture the moving electronic components. The acquisition system is composed of an optical imaging system and an LED strobe lighting system. The lighting system can supply strobe lighting of various angles and intensities. So each kind of components can be illuminated with the best lighting condition. And the imaging system can capture high quality images in extremely short exposure time.

Thirdly, some fundamental algorithms of image processing and feature extraction are studied. For example, edge extraction with pixel or subpixel precision, geometric primitives extraction and region feature extraction.

Fourthly, the numerous surface mount components are classified into three classes from the standpoint of image processing technique. Consequently, the generality and flexibility of the algorithm are much improved. Based on the previous studies, components locating and detection algorithms based on component lead are researched and implemented for each class of the components. The algorithms exhibit high execution speed, high locating precision and strong robustness in a number of experiments.

At last, the algorithm for detecting and locating the widely used PCB circular marks is studied. The research has taken various possible interferences from the production field into consideration and lots of experiments have been done. Experiments show that the algorithm not only runs fast and locates precisely, but also possesses strong robustness towards those interferences.

**Keywords:** placement machine, surface mount components, machine vision, image processing, accurate positioning, feature detection

# 目 录

摘 要 .....	I
Abstract.....	II
目 录 .....	III
第 1 章 绪 论 .....	1
1.1 课题背景及研究目的和意义 .....	1
1.1.1 课题背景.....	1
1.1.2 研究的目的和意义.....	2
1.2 贴片机视觉系统的工作原理 .....	4
1.2.1 视觉系统的典型结构.....	4
1.2.2 视觉系统的工作流程.....	5
1.3 贴片机视觉系统的国内外研究现状 .....	6
1.3.1 日系贴片机视觉系统.....	6
1.3.2 欧系贴片机视觉系统.....	8
1.3.3 国内研究现状.....	9
1.4 本文主要研究内容及各章节安排 .....	9
第 2 章 贴片机飞行视觉系统方案 .....	11
2.1 引言 .....	11
2.2 飞行视觉系统构成 .....	11
2.3 视觉系统性能指标 .....	12
2.4 光学成像系统的设计 .....	12
2.4.1 工业摄像机的选型.....	12
2.4.2 工业镜头的选型.....	15
2.5 LED 照明系统的设计 .....	15
2.5.1 机器视觉光源种类.....	15
2.5.2 LED 光源的照明方式 .....	16
2.5.3 贴片机专用照明系统的设计.....	17
2.6 本章小结 .....	18
第 3 章 图像处理与特征提取基础算法研究 .....	19

3.1 引言 .....	19
3.2 边缘检测算法 .....	19
3.2.1 像素级边缘检测算法 .....	20
3.2.2 像素级边缘检测算法的比较 .....	22
3.2.3 亚像素边缘检测算法 .....	23
3.2.4 亚像素边缘检测算法的比较 .....	26
3.3 几何基元提取算法 .....	27
3.3.1 HOUGH 变换法 .....	28
3.3.2 最小二乘法 .....	30
3.3.3 几何基元提取算法的比较 .....	30
3.4 区域特征提取算法 .....	31
3.5 本章小节 .....	32
<b>第 4 章 贴片元件检测算法研究 .....</b>	<b>33</b>
4.1 引言 .....	33
4.2 贴片元件封装形式的分类 .....	33
4.3 贴片元件的检测算法 .....	34
4.3.1 无引脚元件的检测算法 .....	34
4.3.2 矩形引脚元件的检测算法 .....	37
4.3.3 球形引脚元件的检测算法 .....	44
4.4 本章小节 .....	47
<b>第五章 PCB 基准标志检测算法研究 .....</b>	<b>49</b>
5.1 引言 .....	49
5.2 圆形基准标志的使用方法 .....	49
5.3 圆形基准标志检测算法研究 .....	50
5.3.1 圆形基准标志检测算法的原理 .....	50
5.3.2 圆形基准标志检测算法实验 .....	52
5.4 本章小节 .....	54
<b>结 论 .....</b>	<b>55</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>57</b>
<b>哈尔滨工业大学硕士学位论文原创性声明 .....</b>	<b>62</b>
<b>哈尔滨工业大学硕士学位论文使用授权书 .....</b>	<b>62</b>

致谢 .....	63
----------	----



# 第 1 章 绪 论

## 1.1 课题背景及研究目的和意义

### 1.1.1 课题背景

随着电子工业的发展，电子产品向着小型化、轻型化和高可靠性的方向发展，电子产品的电路越来越复杂，集成度越来越高。目前，大规模生产的电子产品广泛的使用了表面贴片封装形式的电子元件进行 PCB(印刷电路板)的组装。相比于采用 DIP(双列直插封装)等传统封装形式的电子元件，贴片元件的尺寸更小，外形扁平且更加规则，因而更适合于在现代化工厂中进行大规模组装。目前，片式元件的尺寸最小可达  $0.4\text{mm} \times 0.2\text{mm}$ (公制 0402 元件)，封装形式从简单的长方形片式电阻电容元件发展到精密 IC、表面贴装连接器及异形元件等上百种元件。在电子组装行业中，对片式贴片元件进行组装的技术称之为表面贴装技术(SMT, Surface Mounted Technology)。

SMT 是一门内容很丰富的技术，它包括表面贴装工艺材料和印刷技术、贴片技术、焊接技术、检测返修技术，以及清洗技术等系列组装制造技术。相对应的，SMT 生产线包含锡膏印刷机、贴片机、回流焊、自动光学检测机等一系列的装置，一条典型的 SMT 生产线如图 1-1 所示。其中，贴片机的基本功能是将贴片元件正确、准确和快速地贴装到 PCB 上。贴片机的贴装速度、贴装精度以及对新型贴片元件的适应能力在很大程度上制约着整条 SMT 生产线的组织生产能力和效率。因此，它在整个 SMT 生产线中所占的价值比重最大、技术含量最高，历来也是 SMT 技术研究的重点。在电子信息行业中，拥有贴片机的数量和先进程度，已经成为一个企业、地区或国家电子制造能力的标志。

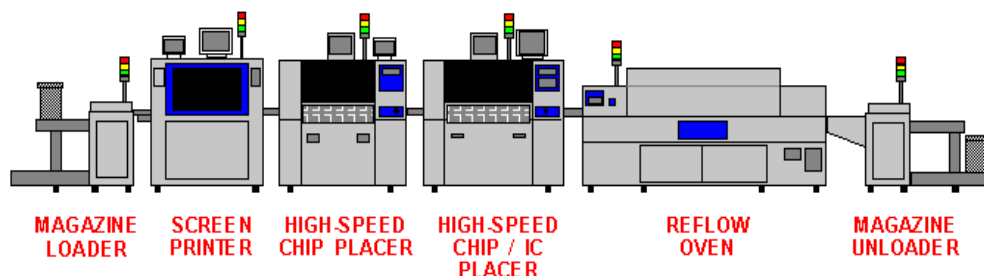


图 1-1 一条典型的 SMT 生产线

贴片机最重要的三个技术指标为：贴装速度、贴装精度和可贴装元件的范围。

自从 20 世纪 70 年代贴片机诞生以来,各大贴片机生产厂商就一直在围绕着这三个指标不断地对贴片机进行改进。比如,环球公司生产的 Genesis GC-120Q 高速贴片机对片式电阻电容元件的贴装速度可达 120 000 片/小时;松下公司生产的 BM231 贴片机对精密 IC 的贴装精度可达 30 $\mu$ m,其贴装范围涵盖了几乎所有常用封装形式的元件,并可以贴装外形不规则的表面贴装连接器以及异形元件。

目前,市场上已经有上百种各式各样的贴片机,尽管形式各异,但是从基本结构上可以归纳为以下四类:拱架式、转塔式、复合式以及平行式。其中,转塔式贴片机又称为“射片机”,适用于贴装小型元件,是以往高速贴片机的主力机型。但其功能单一,不能贴装尺寸较大的 IC 元件,且贴装精度较差。随着精密 IC 元件的大规模使用,该类贴片机逐渐退出主流机型;拱架式贴片机的结构如图 1-2 所示,该类贴片机通用性最强,贴装精度较高,因而目前几乎所有的多功能贴片机和中速贴片机都采用了这种结构;复合式及平行式贴片机从拱架式贴片机发展而来,本质上未脱离拱架式贴片机的范畴。这两类贴片机着重解决了拱架式贴片机贴装速度较低的缺点,适用于对贴装精度和贴装速度要求都较高的原始设备生产商。

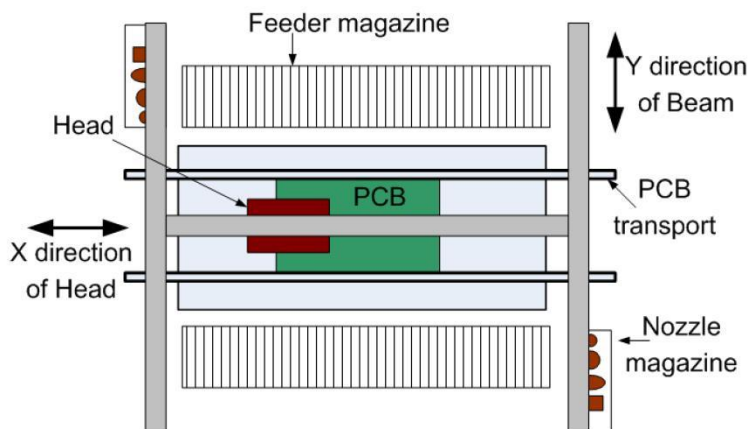


图 1-2 拱架式贴片机的结构

### 1.1.2 研究的目的是和意义

从 2006 年起,中国自动贴片机市场已占全球市场份额的 40%左右,然而在我国 SMT 生产线上运行的几万台贴片机中,几乎没有真正的国产设备,我国自主知识产权的贴片机还处在研究阶段。相比之下,自从上世纪 70 年代表面贴装技术诞生以来,发达国家就将贴片机作为电子产业中的关键设备进行研究<sup>[1]</sup>。目前,西门子、环球、富士、索尼、雅马哈、松下和三星等国外著名厂商生产的贴片机在技术上已经相当先进,占据着中国贴片机市场的绝大部分份额。图 1-3 所

示为 2008 年我国进口贴片机的国别和地区<sup>[2]</sup>。

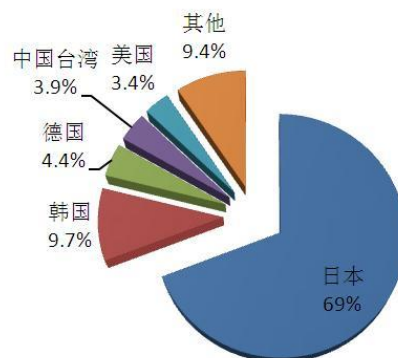


图 1-3 2008 年我国进口自动贴片机的国别和地区<sup>[2]</sup>

在国家刚制定的“十二五”规划中，提出要重点发展以航空航天、海洋工程装备和高端智能装备为代表的“高端装备制造业”。这为国内相关部门进行贴片机的研究提供了良好的政策环境。另一方面，进口贴片机价格高昂，主要是针对大型原始设备制造商而设计的高端贴片机。图 1-4 所示为 2001 年到 2008 年我国进口贴片机的均价。而国内大量的中小型企业以及从事开发研究工作的研究院所往往无力购买这类高档的进口贴片机。事实上，这类中小型的企事业单位真正需要的是中低速高精度的多功能贴片机，这类贴片机价格相对低廉，研制难度较小，日常维护费用较低。因此，中低档贴片机在国内会有较好的市场前景。开展中低档贴片机的研究工作对促进我国整个 SMT 产业的自动化水平，提高我国高端智能装备的研发能力具有重大意义。

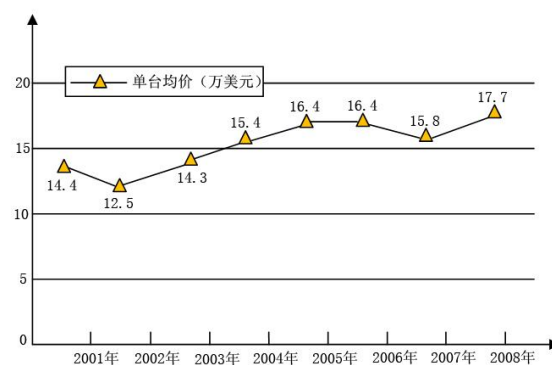


图 1-4 2001 年-2008 年我国进口贴片机均价<sup>[2]</sup>

贴片机是一种涉及到机械、电子、光学、材料、计算机和自动控制等多个学科的技术高度综合的组装设备。它使用到的关键技术有材料成型加工、机械传动、电动机与伺服驱动、机器视觉、传感器、自动控制和计算机软硬件等。因此，贴

片机的研究是一项极其复杂的系统工程,应由一支在上述各个领域经验都比较丰富团队来完成。由于时间和精力有限,本文将仅对贴片机的机器视觉系统进行研究,具体包括光学成像技术、LED(发光二极管)光源照明技术、计算机软硬件技术以及数字图象处理技术。

目前,高性能的贴片机普遍采用了机器视觉系统。机器视觉系统是贴片机对贴片元件及 PCB 基准标志进行特征检测和位姿反馈的关键部件,它直接决定了贴片机的贴装精度和可贴装元器件的范围,并是提高贴片机贴装速度的瓶颈之一。它的主要功能是对贴片元件和 PCB 的基准标志进行高精度定位,并将其位姿反馈给计算机控制系统;同时为了达到高品质、低缺陷的生产输出,对贴片元件关键特征的测量和检测也是十分必要的。机器视觉系统的使用贯穿于每一个贴片元件的贴装过程,是高性能贴片机最为关键的系统之一。因此,对贴片机的视觉系统进行研究,是贴片机在国产化进程中迈出的重要一步。

另外,机器视觉技术在中国属于一门新兴的、极具前景的高新技术。使用机器视觉技术的自动化装备可以长时间地对工业产品进行精密快速的测量、定位与检测等操作,具有人工检测方式不可比拟的可靠性。这也为中国当前廉价劳动力日益紧缺的问题提供了良好的解决思路。另外, SMT 生产线上的其它设备广泛的使用了机器视觉技术,如自动光学检测机以及锡膏印刷机。特别是自动光学检测机,它实现了对 PCB 上的电子元件、锡膏和焊点的各类缺陷的全自动检测<sup>[3,4]</sup>,如元件的缺件、立碑、歪斜、偏移、翻件、反向、引脚或焊球的丢失或变形;锡膏的有无、偏移、断路、连锡、污染以及厚度不均;焊盘的虚焊、连锡、铜箔污染等缺陷。贴片机和这些设备的视觉系统有许多相通之处。因此,贴片机视觉系统的研究成果对于 SMT 生产线上的其它设备乃至更广泛的自动化装备的研究有着重要的借鉴意义。

## 1.2 贴片机视觉系统的工作原理

尽管各大公司生产的贴片机所采用的视觉系统在光学系统结构和安装位置上有很大不同,但就其基本工作原理上来讲是相通的。下面以最为典型的拱架式贴片机的视觉系统为例来说明视觉系统的工作原理。

### 1.2.1 视觉系统的典型结构

一个典型的贴片机视觉系统的结构如图 1-5 所示。该视觉系统使用了两台摄像机:视野向下的基准摄像机与视野朝上的元件识别摄像机,对应的两个视觉子系统分别用于 PCB 基准标志和贴片元件的特征检测与位姿反馈。基准摄像机被安装在贴片头上,随贴片头作 x-y 方向的移动,从而完成对不同位置、不同尺寸

PCB 的基准标志的精确定位。在拱架式贴片机中，元件识别摄像机被固定在贴片机的机座上。安装在贴片头上的吸嘴吸附着贴片元件运动到元件识别摄像机的上方，视觉系统对元件进行图像采集并通过图像处理手段完成元件的特征检测和位姿反馈。

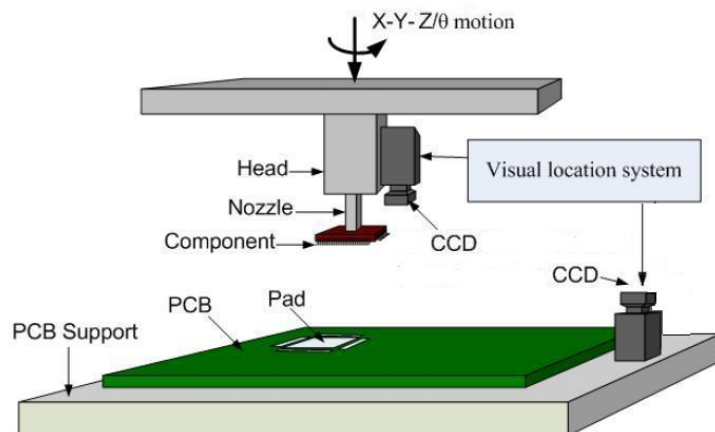


图 1-5 贴片机视觉系统的典型结构

### 1.2.2 视觉系统的工作流程

贴片机视觉系统的工作流程大致可以分为两个基本步骤，一是通过对 PCB 基准标志定位的手段来计算每个贴片元件在机器坐标系中的贴装坐标；二是对吸嘴上的贴片元件进行特征检测和位姿反馈，以补偿吸嘴吸取贴片元件时的误差。

首先，一块待组装的 PCB 通过传板机构传送至贴片机内部，并通过夹板机构将 PCB 夹紧。贴片头带动基准摄像机运动到 PCB 上方，分别对 PCB 对角位置的两个基准标志进行精确定位，并计算出这两个基准标志在贴片机机器坐标系中的坐标。从这两个基准标志在机器坐标系和 PCB 坐标系中的坐标可以推导出 PCB 坐标系和机器坐标系间的转换关系，进而可以计算出每个贴片元件在机器坐标系中的贴装坐标。

然后，贴片头从送料机构中吸取贴片元件，并运动至元件识别摄像机上方，视觉系统对贴片元件进行图像采集，通过图像处理算法计算出元件的位姿(包括元件在图像坐标系下的坐标和旋转角度)，并通过摄像机标定算法计算出元件在机器坐标系中的当前坐标。为了保证元件类型正确且该元件不存在缺陷，视觉系统还需要对元件的引脚、焊球、本体等特征进行检测与测量。若元件类型正确且不存在缺陷，视觉系统将元件当前的位姿反馈给计算机控制系统。计算机

控制系统通过元件当前的位姿计算出元件的吸取误差，并补偿到该元件的贴装坐标中去。因此，从总体来看，视觉系统其实是计算机控制系统的一个反馈环节<sup>[5]</sup>。最终，计算机控制系统指挥伺服定位系统完成该元件的贴装。

贴片头不断地重复取料—位移—视觉检测—贴装这四个步骤，完成整个 PCB 上所有贴片元件的贴装工作。

### 1.3 贴片机视觉系统的国内外研究现状

当机器视觉技术最初被引入到贴片机中时，采用了上节所述的系统结构。采用这种结构最大缺点在于元件在贴装过程中必须停留在元件识别摄像机上方一段时间，进行图像的采集工作。这极大地延长了元件的贴装周期，降低了 PCB 的组装效率。在 SMT 行业日益追求组装效率的今天，这一点几乎是不可容忍的。

各大公司采用了各种各样的手段来解决这一问题。新推出的贴片机大都允许元件在运动过程中完成精确定位，这称之为“on-the-fly”（飞行视觉）技术。采用该技术的视觉系统被称之为飞行视觉系统。由于该技术的使用，贴片头可以在吸取元件后直接向 PCB 方向运动，而无需在元件识别摄像机上方做任何停留。因此，贴片机的组装效率得以大幅提升，新推出的贴片机对片式电阻电容元件的贴装速度最大可达每小时十几万片。

有趣的是，世界上两大主要贴片机生产地区日本和西欧采用了风格迥异的飞行视觉技术。本节的剩余部分将分别介绍日系和欧系贴片机所采用的飞行视觉系统以及他们各自的优缺点，并介绍一下国内贴片机视觉系统的研究现状。

#### 1.3.1 日系贴片机视觉系统

日本主要的贴片机生产厂商有富士、雅马哈、JUKI、松下和索尼等，这些公司推出的贴片机大都采用了拱架式的结构。虽然他们设计的飞行视觉视觉系统各有特色，但与欧系贴片机相比，大部分日系贴片机的视觉系统在进行图像采集时，元件识别摄像机与贴片元件之间是相对运动的。

以雅马哈公司推出的 YB100X 贴片机为例。该贴片机采用了典型的拱架式贴片机结构，它将元件识别摄像机固定在贴片机基座上，而贴片头安装于可沿 Y 方向平移的横梁上(如图 1-2 所示)。该贴片头安装了多个平行的吸嘴以增加每个贴装周期可贴装元件的数量，这称之为平动式贴片头。图 1-6 左下方为固定在元件识别摄像机正上方的 LED 光源，右上方为并排的三个吸嘴。



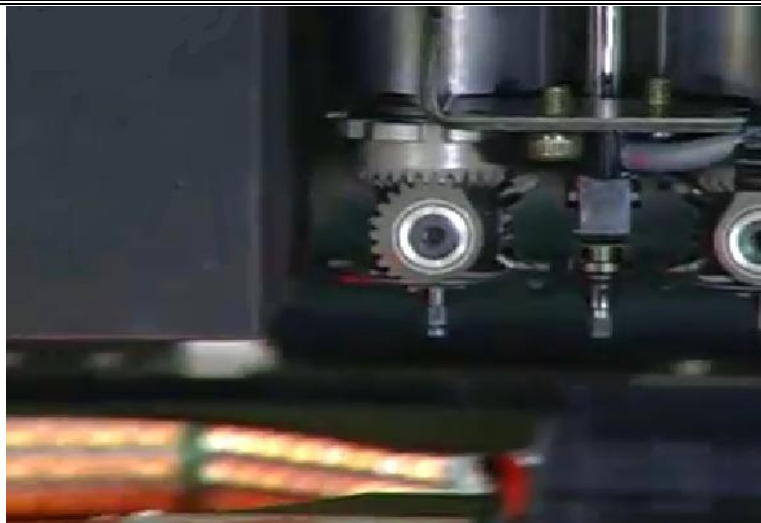


图 1-6 YB100X 贴片机采用的飞行视觉系统

与传统的拱架式贴片机视觉系统不同，YB100X 贴片机在对贴片元件进行图像采集时，并不在元件识别摄像机上方停留，而是让并排的几个吸嘴以一定的速度依次通过摄像机的视野。当吸嘴运动到摄像机视野的中心位置时，计算机控制系统触发元件识别摄像机和 LED 程控光源进行图像的采集工作。由于吸嘴与元件识别摄像机存在两个方向上的相对运动，因而计算机控制系统与视觉系统在配合上比较复杂，计算机控制系统需要具有较高的实时性才能保证元件识别摄像机在有效地时间内拍摄到运动中的贴片元件。

富士公司推出的 XPF-L 高速贴片机则在很大程度上减小了计算机控制系统与视觉系统之间配合的难度。该贴片机将元件识别摄像机固定在了横梁上，随着横梁一起做 Y 方向的运动。因此，贴片头和元件识别摄像机只存在 X 方向上的单向运动。该贴片机将元件识别摄像机与吸嘴的相对运动从二维降低到了一维，从而降低了控制系统与视觉系统之间配合的难度。

上面介绍的两款贴片机所采用的飞行视觉技术都极大地提高了贴片机的贴装效率，如 YB100X 贴片机标称的片式电阻电容元件的贴装速度达到 0.2 秒/片。但是，这些贴片机的元件识别摄像机与贴片元件之间是存在相对运动的。当摄像机拍摄运动目标时，图像会出现一定程度的模糊，这对元件的精确定位是不利的。尽管随着光学器件性能的提高，可以通过一定的手段将图像的模糊降低到识别绝大部分元件可以接受的程度，但是对于图像质量要求非常高的精密 IC 元件，图像模糊带来的定位误差仍然是有较大影响的。贴片机在贴装这些精密的 IC 前，一般还是需要首先静止在元件识别摄像机上方进行图像的采集工作。这也是不同精密程度贴片元件的实际贴装速度相差悬殊的重要原因之一。

### 1.3.2 欧系贴片机视觉系统

欧洲主要的贴片机生产厂商有德国的西门子，荷兰的飞利浦以及英国的 Europlacer。与日系贴片机不同，大多数欧系贴片机的视觉系统在“飞行”过程中进行图像采集时，元件识别摄像机与吸嘴是相对静止的。以 Europlacer 公司生产的 XPii 贴片机为例，该贴片机属于复合式贴片机的范畴，它采用了与拱架式贴片机完全不同的吸嘴排列与视觉系统安装方式，如图 1-7 所示。

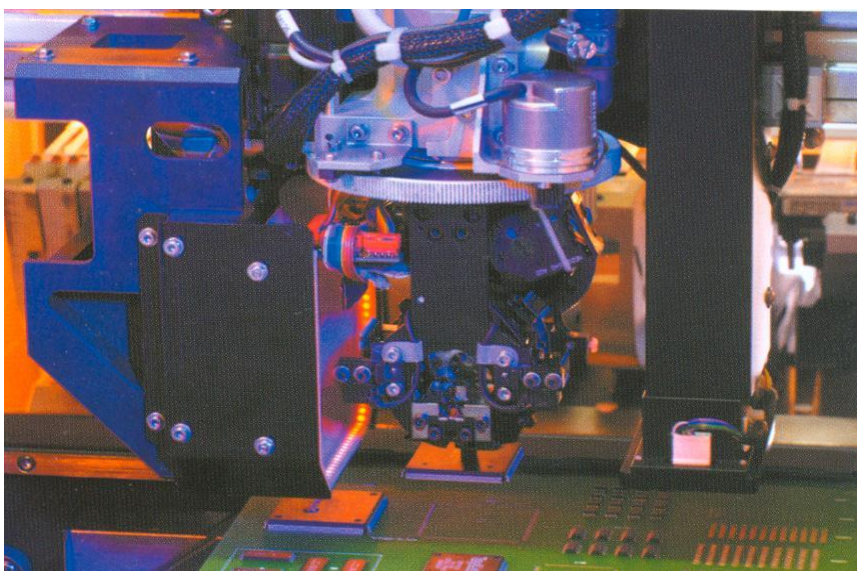


图 1-7 XPii 贴片机采用的飞行视觉系统

与图 1-6 相比较可以看出，YB100X 等拱架式贴片机的吸嘴是平行排列的，元件识别摄像机被安装在机座上；而 XPii 贴片机采用的是垂直安装的旋转式贴片头，吸嘴均匀的排布在圆形贴片头的圆周上，且元件识别摄像机(图 1-7 的左侧方形区域)与贴片头固定在一起，两者相对静止。贴片头绕轴线自转以带动吸嘴的旋转，旋转至贴片头的六点钟方向的吸嘴进行元件的吸取或贴装操作。与此同时，旋转至九点钟方向的吸嘴可以进行图像的采集工作。因此，采用这种贴片头和视觉系统结构的贴片机具有极高的工作效率。

由于元件识别摄像机进行图像采集的方式属于静态采集，因此计算机控制系统与视觉系统相配合的难度得以大幅降低。更重要的是，静态采集到的图像具有较高的质量。因此在贴装精密贴片元件方面，该类型的贴片机具有一定的优势。

但是，受贴片头结构及视觉系统安装位置的限制，只采用旋转式贴片头的



贴片机不能够贴装较大尺寸的贴片元件(如大型表面贴装连接器等)。而采用固定元件识别摄像机的贴片机,则可以对大型元件多次拍照并通过图像拼接算法来解决这个问题。为实现大型贴片元件的贴装,XPii 和西门子公司的 Siplace 等欧系贴片机需要在贴片机机座上安装固定的元件识别摄像机并为其配备专用的平动式吸嘴。

### 1.3.3 国内研究现状

国家在“七五”到“十五”计划中都将贴片机作为电子组装行业的重点发展项目。上世纪八九十年代,国内几家单位先后研制出了几台贴片机样机。但是,这些样机并没有使用机器视觉技术,而是使用了精度和可靠性较差的机械对中的方式。而且这些单位在研制出贴片机样机之后,并没有跟上贴片机发展的潮流,贴片机的研制工作一度处于停滞状态<sup>[6]3</sup>。

进入二十一世纪以来,国内几家公司和大学先后展开了新型贴片机的研制工作,贴片机视觉系统的研究也从此展开。他们大都把研制目标定位在中低档的高精度、多功能贴片机上,并成功的研制出了几台样机,如广州羊城科技公司研制的 SMT2505 贴片机<sup>[7]</sup>,广东风华高科与华南理工大学合作研制的 BHTP3310 贴片机<sup>[8]</sup>,上海微电子装备有限公司与上海交通大学合作研制的 WJT-2000V 贴片机<sup>[6]3</sup>。这些公司和大学取得了不错的成绩,但是还未能将产品成功的推向市场。

因此,国内对贴片机的研究事实上还处于初级阶段,对于贴片机视觉系统的研究还处于总体方案和图像处理算法的研究与论证阶段,未能设计出一整套成熟的贴片机视觉系统。因此,目前十分有必要对贴片机视觉系统做系统的研究,以加快贴片机国产化的进程。

## 1.4 本文主要研究内容及各章节安排

本文选择对采用飞行视觉技术的拱架式贴片机视觉系统进行研究。这是因为,与复合式和平行式贴片机相比,拱架式贴片机的视觉系统与机械系统相对独立,更容易将视觉系统作为一个单独的模块进行系统的研究。另外,复合式和平行式贴片机由拱架式贴片机发展而来,三者的视觉系统除了安装位置和采集图像的方式有所不同外,并无本质上的区别。

本文的研究内容可以分为三大部分:拱架式贴片机视觉系统的总体方案设计、图像采集系统的设计与硬件选型,以及贴片元件和 PCB 基准标志精确定位与特征检测的算法研究。各章节的具体安排如下所述:

第一章：绪论。该部分介绍了贴片机的背景知识和研究意义，对贴片机视觉系统的工作原理及国内外的研究现状进行了概括。通过分析，选定采用飞行视觉技术的拱架式贴片机视觉系统作为本文的研究内容。

第二章：拱架式贴片机视觉系统的总体方案。该部分将阐述构成拱架式贴片机视觉系统的几大功能模块，提出视觉系统的性能指标，并对光学成像系统和 LED 照明系统的设计及硬件选型方法进行研究。

第三章：图像处理和特征提取基础算法研究。该部分将对适用于贴片机视觉系统的图像处理和特征检测基础算法进行比较研究，包括像素级与亚像素级精度的边缘检测算法、几何基元提取算法以及区域特征检测算法。

第四章：贴片元件检测算法研究。该部分将首先从图像处理算法的角度对元件进行分类，以增强元件检测算法的通用性和灵活性。然后在每大类贴片元件中各选取一种典型元件，为其研究专用的定位与检测算法。该部分还将为每类元件的检测算法进行实验，对算法的速度、精度和鲁棒性指标进行测试，确保算法的实用性。

第五章：PCB 基准标志检测算法研究。该部分将首先介绍 PCB 基准标志在 SMT 行业中的使用方法，然后重点对使用最为广泛的圆形基准标志的定位和检测算法进行研究。该部分还将充分地考虑来自于生产现场的复杂干扰对定位精度的影响，并设计实验来验证算法的抗干扰能力。最后将对各个实验的数据进行分析，对算法的各项指标做出评价。

## 第 2 章 贴片机飞行视觉系统方案

### 2.1 引言

机器视觉系统是高性能贴片机的核心系统之一，视觉系统的性能直接影响到贴片机最重要的三个指标：贴装速度、贴装精度以及可贴装元件的种类范围。为提高贴片机的工作效率，本文设计的拱架式贴片机视觉系统将采用飞行视觉技术。本章将首先研究飞行视觉系统的构成，提出视觉系统所应达到的性能指标，然后重点研究图像采集系统的设计及硬件选型方法。本章设计的图像采集系统主要由光学成像系统和 LED 照明系统构成，要求光学成像系统能够在 LED 照明系统的配合下捕捉到高速运动状态下贴片元件的高质量图像。

### 2.2 飞行视觉系统构成

贴片机飞行视觉系统由光学成像系统、LED 照明系统、外触发控制单元、目标定位与特征检测模块以及贴片元件特征数据库组成。

光学成像系统的功能主要包含两部分内容，一是在 LED 照明系统的配合下使用基准摄像机对 PCB 基准标志进行图像采集，其采集方式属于静态图像采集；二是在外触发控制单元和 LED 照明系统的配合下，使用元件识别摄像机抓拍处于高速运动状态下的贴片元件。为减小目标运动造成的成像模糊，要求元件识别摄像机的曝光时间适当短。

LED 照明系统的主要作用是配合光学成像系统获取贴片元件及 PCB 基准标志的高质量图像，确保元件和基准标志的特征在图像中具有较高的对比度。考虑到各种类型的贴片元件有着不同的机械、材质特性，并具有不同特征检测内容，因此照明系统需要具有较强的通用性。另外，由于摄像机的曝光时间要求非常短，为在曝光时间内获取具有足够亮度和对比度的图像，要求照明系统有足够的亮度。

目标定位与特征检测模块的主要作用是对各种封装形式的贴片元件和各种形状的 PCB 基准标志进行精确定位，以获取元件或基准标志的旋转角度以及在机器坐标系中的坐标；该模块还需要对元件的特征进行全面的检测，以识别出元件可能存在的缺陷。该模块的算法需要具有高实时性、高精度以及强鲁棒性。

贴片元件特征数据库存储了各个待贴装元件的封装类型、特征类型、特征的数量及尺寸等数据。目标定位与特征检测模块按照数据库中存储的元件封装类型

选择相应的算法对元件进行处理,并将实测的元件特征数据与数据库中存储的标准数据相比较。若实测数据超过标准数据的一定范围,则认为是不合格元件。

在构成飞行视觉系统的各个模块中,光学成像系统、LED 照明系统以及外触发控制单元共同构成了贴片机的图像采集系统,图像采集系统的性能直接影响到摄像机传感器上采集到的原始图像信息,决定了采集到的图像的亮度、对比度、均匀度以及图像与实际目标间的相似度<sup>[9]55</sup>,进而影响到图像处理技术中所使用到的亚像素边缘检测、图像分割、灰度值矩以及轮廓提取等算法的精度与可靠性,并最终反映到贴片元件和 PCB 基准标志的定位精度和速度上。因此,对于贴片机这类高速高精度设备,需要尽可能地提高图像采集系统采集到的图像的质量,即图像应尽可能清晰、亮度与对比度应足够强。

## 2.3 视觉系统性能指标

通过分析中低速、高精度、多功能拱架式贴片机的性能要求<sup>[10]</sup>,并参考发达国家同类产品的技术指标,本文为所设计的视觉系统提出如下设计指标:

PCB 基准标志定位精度:  $\leq 6\mu\text{m}$ ;

可检测 PCB 基准标志的形状: 圆形、矩形、十字形等;

贴片元件的定位精度:  $\leq 20\mu\text{m}$ ;

可检测元件的封装类型范围: 常用封装形式的贴片元件以及部分异形元件;

可检测元件的尺寸范围:  $0.6\text{mm} \times 0.3\text{mm}$ (公制 0603)~ $48\text{mm} \times 36\text{mm}$ ;

图像处理算法的运算时间: 片式电阻电容元件  $\leq 8\text{ms}$ , 小型芯片  $\leq 20\text{ms}$ , 大型芯片与 PCB 基准标志  $\leq 100\text{ms}$ 。

## 2.4 光学成像系统的设计

光学成像系统由基准摄像机、元件识别摄像机、工业镜头、计算机-摄像机接口等组成。其中元件识别摄像机要在计算机控制系统和 LED 照明系统的配合下,捕捉到高速运动状态下贴片元件清晰的图像,具有较高的难度。因此,本节将主要对元件识别摄像机及配套的工业镜头的选型方法等进行研究。

### 2.4.1 工业摄像机的选型

#### 2.4.1.1 工业摄像机的分类

摄像机的作用是将通过镜头聚焦于像平面的光线生成图像。在工业领域中使用的摄像机有多种分类方式:按照摄像机生成图像的维数,可以将摄像机分为线

阵摄像机和面阵摄像机；按照生成图像的色彩可以将摄像机分为彩色摄像机和黑白摄像机；按照摄像机从传感器中读出数据方式的不同，可以将摄像机分为 CCD(Charge-Coupled Device) 摄像机和 CMOS(Complementary Metal- Oxide Semiconductor)摄像机。

由于视觉系统的图像处理算法仅需要贴片元件的二维亮度信息，因此选择面阵黑白工业摄像机。同时，由于 CCD 传感器的灵敏度和信噪比优于 CMOS 传感器，而元件摄像机需要在极短的时间内拍摄到元件清晰的图片，因此优先选择 CCD 摄像机。

#### 2.4.1.2 CCD 工业摄像机的性能指标

(1) **分辨率** 根据不同的使用习惯，摄像机分辨率存在两种表述方式：图像分辨率和空间分辨率。图像分辨率指的是一帧图像的行数和列数，比如 EIA 制式摄像机的图像分辨率为  $640 \times 480$  像素。而摄像机的空间分辨率指的是每个像素对应成像物体的物理长度，因此空间分辨率更能够合理的反映摄像机对于成像物体的放大倍数。

(2) **帧率** 摄像机每秒钟采集图像的帧数，是衡量摄像机采集图像速度的指标。标准制式工业摄像机的帧率分别为 30 帧/秒(EIA-170 制式)和 25 帧/秒(CCIR 制式)，而当前广泛使用的大部分非标摄像机可以达到更高的帧率。

(3) **快门速度** 也称为 CCD 的最小曝光时间，指的是 CCD 传感器上每个像素吸收光子的时间。当工业摄像机拍摄动态目标时，采集到的图像往往有一定程度的模糊，解决这一问题最常用的方法就是减小摄像机的曝光时间。

(4) **灵敏度** 指的是 CCD 传感器对入射光线的敏感程度。摄像机的灵敏度越高，在输出相同幅度视频信号的情况下，所需要入射光的功率(即照度)就越小。

(5) **动态范围** 对于光学成像系统，存在几种不同的动态范围概念，包括 CCD 传感器的动态范围、输出动态范围和整个成像系统的动态范围。对于工业摄像机的使用者，关注更多的是整个成像系统的动态范围。成像系统动态范围指的是最大可分辨光强与最小可分辨光强之比<sup>[11, 12]</sup>。

#### 2.4.1.3 工业摄像机的选型方法

工业摄像机的选型主要是确定摄像机的几个重要参数：视野、图像分辨率、空间分辨率、快门速度等。

摄像机的视野主要由所检测元件的最大尺寸决定，根据本文提出的设计指标，所检测元件的最大尺寸为  $48\text{mm} \times 36\text{mm}$ 。并考虑到元件的吸取误差，故将摄像机的视野确定为  $56\text{mm} \times 42\text{mm}$ 。

图像分辨率和空间分辨率的关系如公式(2-1)所示：

$$R_s = \frac{FOV}{R_c} \quad (2-1)$$

式中  $FOV$  ——摄像机的视野(m)；

$R_s$  ——摄像机的空间分辨率(m/pixel)；

$R_c$  ——摄像机的图像分辨率(pixel)。

摄像机的空间分辨率由最小特征的尺寸以及图像处理算法识别该特征所需要的像素的数量决定，空间分辨率的计算方法如公式(2-2)：

$$R_s = \frac{S_f}{N_f} \quad (2-2)$$

式中  $S_f$  ——视觉系统所需识别最小特征的尺寸(m)；

$N_f$  ——算法识别该特征所需像素的数量。

由公式(2-1)和公式(2-2)可以推导出摄像机的图像分辨率，计算方法如公式(2-3)所示：

$$R_c = \frac{FOV}{R_s} = FOV \frac{N_f}{S_f} \quad (2-3)$$

其中  $N_f$  与所采用的图像处理算法的精度有很大关系，假如算法可靠定位 0.3mm 宽的贴片电阻至少需要六个像素，且已知摄像机的视野为 56mm × 42mm。则根据式(2-3)可计算出摄像机的图像分辨率为 1120 × 840 像素。

如前所述，采用飞行视觉技术的拱架式贴片机视觉系统必须要解决拍摄动态目标所带来的成像模糊问题。工程上认为，当运动目标在摄像机曝光时间内移动的距离不超过摄像机的空间分辨率时，CCD 是分辨不出来的，图像中的模糊可以忽略不计<sup>[6][11-14]</sup>。因而，元件摄像机的最小曝光时间的计算方法可由公式(2-4)求得：

$$E \times \frac{R_s}{v} \quad (2-4)$$

式中  $v$  ——贴片元件在元件识别摄像机上方最大运动速度(m/s)。

假设贴片元件在元件识别摄像机上方的最大运动速度为 0.5m/s，则摄像机的最短曝光时间应为：100 us。即元件识别摄像机的最小曝光时间需要小于 100 us，才能保证 CCD 采到的图像是清晰的。

综上所述，工业摄像机的选择主要是计算摄像机视野、图像分辨率、空间分辨率、快门速度等指标。在对工业摄像机进行选型之前，需要确定所检测元件的最大尺寸、图像处理算法的精度以及贴片元件的最大运动速度等因素。

## 2.4.2 工业镜头的选型

镜头是一种将外界光线聚焦在摄像机内部的光学设备,合理选择的镜头能够辅助摄像机产生锐利的图像,以便能得到图像中丰富的细节信息。由于工业镜头对图像的分辨率、对比度、景深以及畸变率等主要指标有重要影响,因而镜头的选型在机器视觉系统的设计中起到了关键的作用。

按照镜头的焦距是否可变,可以将常规工业镜头划分为变焦镜头和定焦镜头。除常规工业镜头外,机器视觉系统中还经常用到一些专用的镜头,如:宏镜头、远心镜头和红外镜头等。

由于元件识别摄像机的工作距离和放大倍数固定,因而可以选择定焦常规镜头。定焦常规镜头的几个常用指标有:焦距、畸变率、光圈系数与景深。其中焦距由公式(2-5)求得:

$$f = a \cdot \frac{\beta}{1 + \beta} \quad (2-5)$$

式中  $a$ ——镜头的工作距离(m);

$\beta$ ——图像传感器的放大倍数,即传感器尺寸与视场尺寸的商。

因此,在镜头的选型之前,需要事先估算出镜头的工作距离以及摄像机的放大倍数。

## 2.5 LED 照明系统的设计

贴片机视觉系统的照明系统主要由光源和光源驱动器构成。照明系统起到的作用是增强被测物体的感兴趣特征在图像中的对比度<sup>[13-15]</sup>。由于贴片机视觉系统需要能够对上百种封装类型的贴片元件进行识别和检测,而这些元件的形状、材质以及反光特性各不相同,因此照明系统需要具有较强的适应能力。另一方面,由于要拍摄动态目标造成元件识别摄像机的曝光时间必须非常短,因而该照明系统使用的光源必须具有较高的光照强度。针对以上要求,本节将为拱架式贴片机设计专用的照明系统。

### 2.5.1 机器视觉光源种类

机器视觉中使用的光源有多种,从发光器件本身可以划分为卤素灯、氙灯、荧光灯、LED 灯等。其中,LED 光源功耗小,寿命长,光谱窄,响应速度快并且亮度容易控制,因此 LED 光源是机器视觉中应用最多的一种光源。

LED 颗粒易于组成不同几何形状的光源,如环形、方形、穹形、长条形等

等；根据 LED 光源的发光特性可以分为点光源、线光源和面光源等；根据 LED 颗粒的发光颜色又可以分为红色、蓝色、绿色和白色等颜色的光源<sup>[16]</sup>。

### 2.5.2 LED 光源的照明方式

LED 光源照明的方向性通常是用来增强被测物体的特征在图像中对比度的重要特性。根据照明的方向性，可以将 LED 光源的照明方式划分为明场正面照明、暗场正面照明、明场背光照明等方式。各种照明方式的结构如图 2-1 所示。其中，明场正面照明方式是最常用的照明方式，适用于检测物体表面的大部分特征；暗场正面照明一般用于检测物体表面缺口或突起的场合；明场背光照明的最大优势在于能够获取拍摄目标非常清晰的外轮廓，但是不能获取物体表面信息。由于大部分贴片元件可以只依赖于其外轮廓进行定位，因此部分贴片视觉系统使用了明场背光照明<sup>[17-19]</sup>。

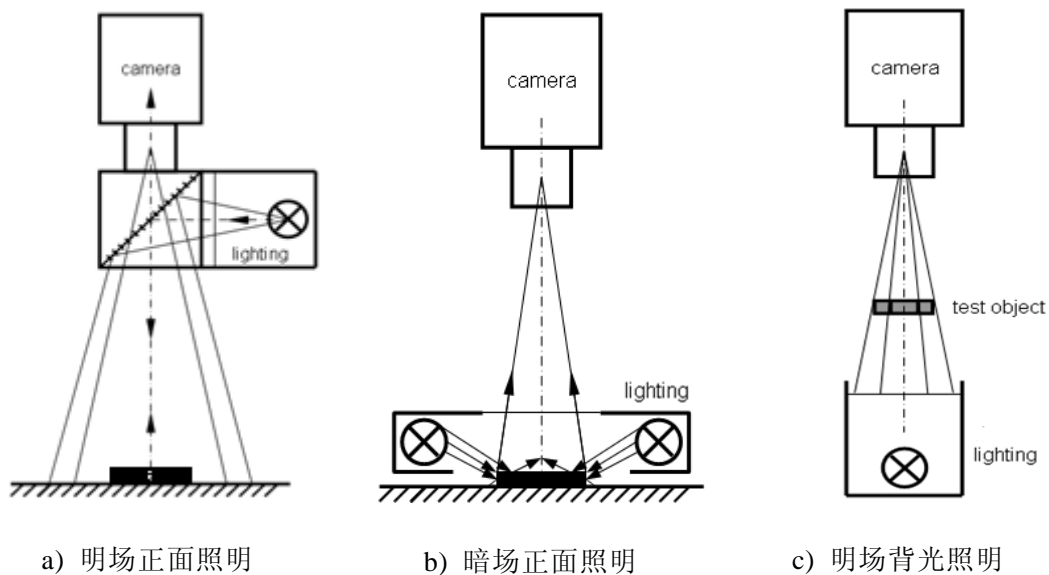


图 2-1 常用的几种 LED 光源照明方式

根据光源提供照明的时机，又可以将光源的照明方式划分为常亮方式、开关方式和频闪方式，各种照明方式的定义如下所述：

(1) **常亮方式**      这是 LED 光源默认的工作方式，光源一直成发光状态。这种工作方式不需要进行任何的控制操作，因而使用起来非常方便。但如果 LED 光源长期工作于这种方式，会对其寿命造成一定的影响。

(2) **开关方式**      用于协同工业摄像机的同步工作，多是用来检测生产线上的静态目标，因而对光源的亮度和响应速度没有特殊要求。工作于这种方式



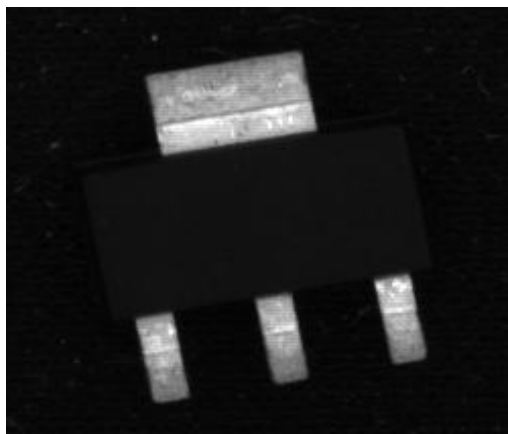
下的光源的使用寿命会得到提高。

(3) 频闪方式 该方式会大幅提高光源的瞬间亮度，因而常用于动态目标的检测。该方式要求光源具有较高的响应速度，并通常需要控制系统的配合来完成光源和摄像机的同步工作。

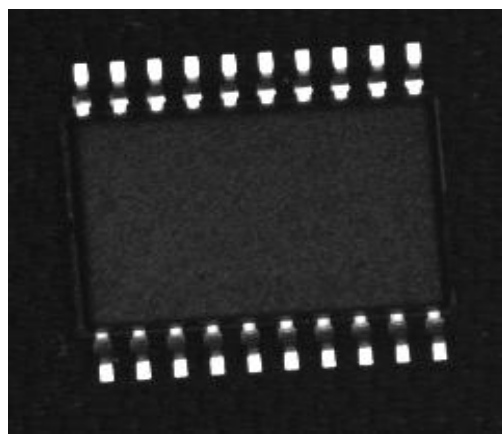
### 2.5.3 贴片机专用照明系统的设计

由于当前贴片元件的常用封装形式有上百种之多，不同封装形式的贴片元件具有不同的形状、材质及反光特性。为了能够对绝大多数封装类型的贴片元件进行全面检测，视觉系统需要能够获取关于贴片元件更为丰富的表面特征信息，因此本文设计了可以工作于明场正向照明方式和暗场正向照明方式的多角度 LED 组合光源。计算机控制系统可以根据每个元件的具体特性，对光源的照射角度及发光强度进行在线修改，以便使每种元件都能得到最佳的照明。由于采集动态目标要求元件识别摄像机的曝光时间必须非常短，因而本文设计的 LED 光源工作于频闪方式，以提高 LED 光源在工作状态下的亮度。

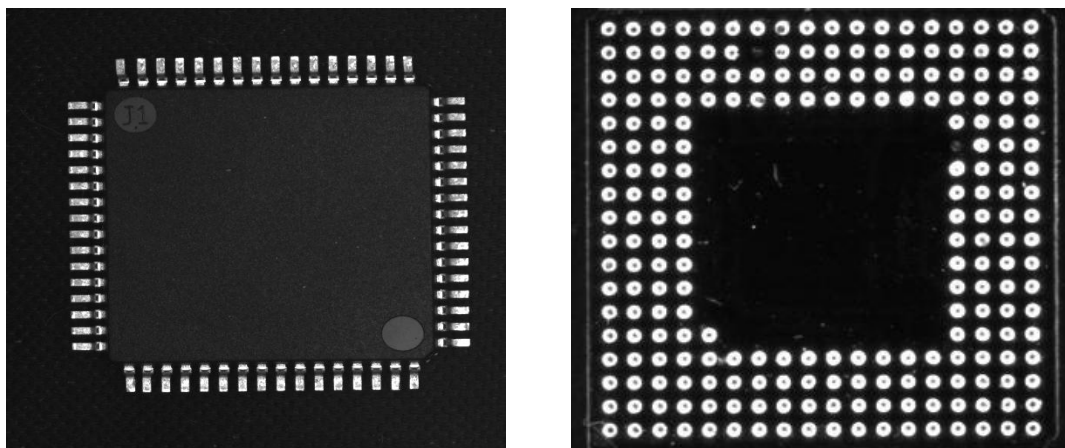
当贴片机处于生产状态时，由生产管理软件对光学成像系统和 LED 照明系统的参数进行合理配置，在计算机控制系统的配合下完成光学成像系统与 LED 照明系统的同步工作，并最终获取到各种元件的高质量图像。由本文所设计的图像采集系统采集到的四个典型的贴片元件的图像如图 2-2 所示。



a) SOT89 封装元件



b) SOP 封装元件



c) QFP 封装元件

d) BGA 封装元件

图 2-2 本课题所设计的图像采集系统所采集到的图像

## 2.6 本章小结

本章首先分析了拱架式贴片机飞行视觉系统的结构，并对构成视觉系统的每个模块的功能进行了较为详细的阐述。本章研究的重点在于为拱架式贴片机设计专用的图像采集系统，采集系统主要由光学成像系统和 LED 照明系统构成。本章设计的 LED 照明系统对各种封装形式的贴片元件均具有很强的适应性，能够为绝大多数封装形式的贴片元件提供最佳照射角度及强度的照明。本章设计的光学成像系统可以在 LED 照明系统和计算机控制系统的配合下，在很短的曝光时间内拍摄到各类贴片元件的高质量图像，使得视觉系统具备了拍摄高速运动状态下贴片元件清晰图像的能力。

## 第3章 图像处理与特征提取基础算法研究

### 3.1 引言

贴片机图像采集系统以及目标定位与特征检测模块是贴片机视觉系统的两大主要组成部分。其中，目标定位与特征检测模块对图像采集系统所采集到的图像进行分析，计算出 PCB 基准标志和贴片元件的精确位姿并对其特征进行检测。本文的三至五章对该模块进行了研究，并实现了该模块所需要的算法。这些算法可以分为两大类，一是进行定位与检测工作所需要的基础算法，如图像预处理、几何变换、图像分割、轮廓提取、亚像素边缘检测、几何基元提取、区域特征分析等算法；二是在第一类算法基础上实现的体现基准标志与贴片元件精确定位和特征检测功能的算法。

本章将对实现贴片机视觉系统功能所需的图像处理与特征提取基础算法进行比较研究。由于贴片机是一种需要长时间可靠工作的高速、高精度的自动化装备，因而对视觉系统使用的图像处理算法提出了很高的要求。本章在对各种基础算法及其改进算法分析的同时，充分的考虑了这些算法在速度、精度以及鲁棒性方面的性能，并通过实验确定出最适合用于贴片机视觉系统的算法。

### 3.2 边缘检测算法

在数字图像中，边缘指的是有灰度值阶跃变化或顶尖状变化的像素集合<sup>[20]37-38</sup>，灰度图像中三类基本的边缘如图 3-1 所示。由于边缘能够有效地表达物体的特征，并且对于图像的几何变换及灰度变化具有很强的鲁棒性。因此，边缘检测算法成为数字图像处理技术中非常重要也是研究十分活跃的算法之一<sup>[21,22]</sup>。在贴片机视觉系统中，边缘提取是用于定位 PCB 基准标志与贴片元件的一个重要步骤。本节将对适用于贴片机视觉系统的边缘检测算法进行比较研究。

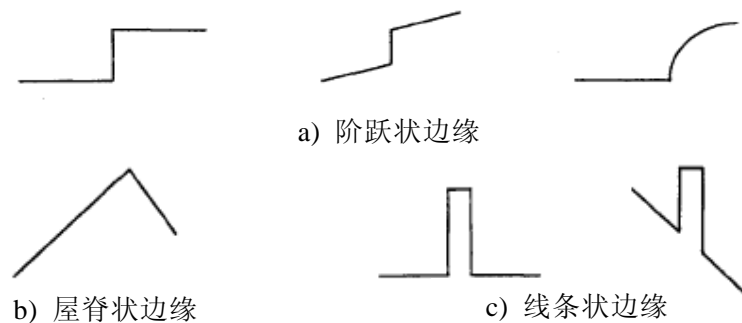


图 3-1 灰度图像中边缘的类型

### 3.2.1 像素级边缘检测算法

#### 3.2.1.1 使用微分滤波器进行边缘检测

在连续二维图像中，边缘点像素对应于一阶微分的极值点，也对应于二阶微分的零交叉点。基于二阶微分零交叉点的微分算子定位精度较高，并具有各向同性的优点，但是对噪声比较敏感<sup>[23]</sup>，并丢失了边缘的方向信息，实现起来也较为复杂，不适用于对贴片这种实时性要求较高的场合。因此，本文将只对一阶微分滤波器进行研究。

边缘的锐利程度可以根据该点梯度的大小决定，梯度是一个向量，其方向指向在该像素处灰度值变化最快的方向<sup>[24]</sup>。梯度的定义由公式(3-1)表示：

$$\nabla f = \nabla f(r, c) = \left( \frac{\partial f(r, c)}{\partial r}, \frac{\partial f(r, c)}{\partial c} \right) = (f_r, f_c) \quad (3-1)$$

梯度有方向和幅度两个属性，其计算公式分别由公式(3-2)和(3-3)得到。

$$\|\nabla f\|_2 = \sqrt{f_r^2 + f_c^2} \quad (3-2)$$

$$\phi = -\arctan(f_r / f_c) \quad (3-3)$$

在数字图像处理技术中，可以通过有限差分来计算公式(3-1)中的两个偏导数值，计算方法如公式(3-4)与公式(3-5)所示：

$$f_{r;i,j} = \frac{1}{2}(f_{i+1,j} - f_{i-1,j}) \quad (3-4)$$

$$f_{c;i,j} = \frac{1}{2}(f_{i,j+1} - f_{i,j-1}) \quad (3-5)$$

由公式(3-4)与公式(3-5)计算出的偏导数值对噪声比较敏感。因此，图像必须经过平滑处理才能获得较好的提取结果。对于算法执行时间苛刻但精度要求不高的场合，可以使用如公式(3-6)所示的  $3 \times 3$  滤波器模板来分别计算上面的两个偏导数值。

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ a & 0 & -a \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 & a & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -a & -1 \end{pmatrix} \quad (3-6)$$

当  $a=1$  时，得到的是 Prewitt 滤波器，它相当于在垂直于导数的方向做了一次均值滤波处理；当  $a=\sqrt{2}$  时，得到的是 Frei 滤波器；当  $a=2$  时，得到的是 Sobel 滤波器，该滤波器在垂直于导数的方向做了一次近似于高斯平滑的处理。

以上三种滤波器运行速度较快并对噪声具有一定的抑制能力。但它们均存

在以下几方面的缺陷：检测出的边缘一般是多像素宽度的；不能完全排除检测出虚假边缘的可能性；提取的边界存在断开的情况；模板本身是各向异性的，即对不同方向的边缘有不同强度的响应。因此，在大多数定位精度要求较高的场合，需要寻求性能更好的边缘检测算子<sup>[24]</sup>。

### 3.2.1.2 Canny 边缘检测算子

在大多数边缘检测算子中，噪声抑制能力和边缘定位的精确性往往是相互冲突的。为了在抗噪声干扰能力和定位精度之间的寻求最佳的折中方案，Canny 提出了最优边缘检测器应该具有的三个准则<sup>[25]</sup>。

(1) **准确性准则** 漏检掉真正边缘的概率和检测出虚假边缘的概率都要尽可能低。由于这两个概率都是边缘检测算子信噪比函数的递减函数，因此该准则对应于检测算子输出信噪比的最大化。

(2) **精确性准则** 检测出的边缘点应与真实边缘尽可能接近。

(3) **单一性准则** 边缘检测算子对于每个真实的边缘都只有唯一的响应，即应尽可能避免检测出多重边缘。

Canny 边缘检测算子遵循了这三个准则，其基本思想是首先使用 Gauss 边缘滤波器对图像进行滤波，然后采用非极大值抑制算法获取单像素宽度的边缘。实现 Canny 边缘检测算子的 4 个基本步骤如下：

- (1) 使用 Gauss 滤波器对图像进行平滑，抑制掉图像中存在的噪声；
- (2) 使用一阶差分算子获取每个像素的梯度幅值与方向信息；
- (3) 对各像素的梯度幅值进行非极大值抑制处理，只保留局部梯度最大的点作为可能的边缘点；
- (4) 使用滞后阈值分割算法进行边缘点分割和边缘连接，获取单像素宽度的边缘。

Canny 算子在边缘定位的精确性和抗噪声干扰性方面取得了很好的折中，并具有各向同性的优点。但该算法的运算复杂度较大，因而在一些实时性要求较高的场合其使用受到了限制。Deriche 在 Canny 提出的三个准则的基础上设计了可以以递归方式实现的最优边缘检测滤波器，有效地提高了边缘检测算子的执行效率<sup>[26]</sup>。

### 3.2.1.3 基于形态学的边缘检测算法

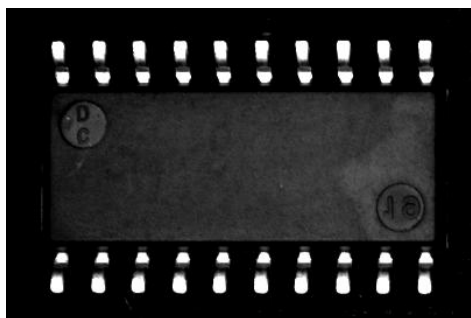
在二值图像中可以使用形态学的方法提取物体的边界，最容易想到的方法是将物体内部的所有点置为背景色。具体来讲，就是如果一个像素和其邻域内八个像素均位于前景区域，则认为该点为物体内部的点，在输出图像中将该点置为背景色。在形态学图像处理技术中，这就等价于首先使用  $3 \times 3$  的结构元素对二值

图像做一次腐蚀操作，然后用原图像减去腐蚀后的图像，恰好删除掉物体内部的点，只留下了边界上的像素。

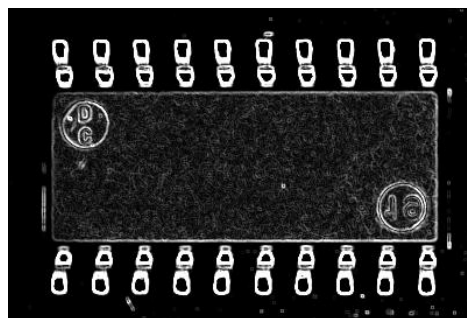
该法可以以较快的速度在二值图像中获取单像素宽度的边缘，但与灰度图像中物体的真实边缘会有所差距。尤其是当图像的亮度发生变化时，提取到的边缘极可能发生位移。另外，由于该算法只能在二值图像中使用，因而通用性较差。

### 3.2.2 像素级边缘检测算法的比较

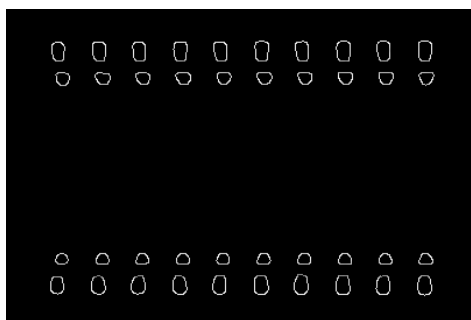
本文对上面介绍各种像素级边缘检测算法进行了比较研究。图 3-2 a)为使用本文设计的图像采集系统采集到的一幅 SOP 元件的图像。图 3-2 b)、图 3-2 c)和图 3-2 d)分别为使用 Sobel 算子、Canny 算子和形态学操作提取到的 SOP 元件像素级精度的边缘。



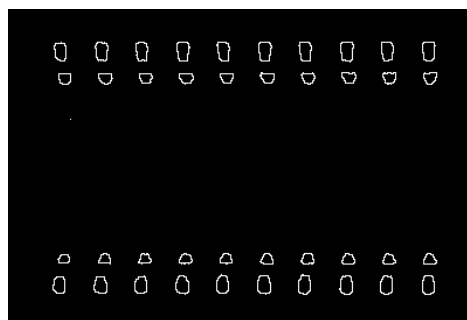
a) SOP 元件的图像



b) 使用 Sobel 算子提取到的边缘



c) 使用 Canny 算子提取到的边缘



d) 使用形态学操作提取到的边缘

图 3-2 对 SOP 元件图像进行边缘提取操作

比较图 3-2 所示的几种边缘检测算法的效果，可以看出 Canny 边缘检测算子很好的满足了最优边缘滤波器应该具有的三个准则，即边缘响应的准确性、精确性以及单一性。而 Sobel 算子的抗干扰能力相对 Canny 算子明显较差，并且检测出了多像素宽度的边缘，不满足最优边缘滤波器的单一性准则。使用形态学操作

获取的边缘虽然为单像素宽度,但相对于图 3-2 a)中元件真实的边缘发生了位移,因而定位精度不佳。

根据以上对比研究,本文选用 Canny 算子提取贴片元件和 PCB 基准标志像素级精度的边缘。但对于贴片机这种高精度设备,希望能将边缘检测的精度进一步提高。许多学者提出的亚像素边缘检测算法可以在不改变成像系统硬件配置的前提下提高边缘检测的精度。因此,本节还将对各种亚像素边缘检测算法进行对比研究。

### 3.2.3 亚像素边缘检测算法

随着工业上对产品质量要求的不断提高,如何提高机器视觉系统的检测精度成为国内外研究的热点之一。机器视觉系统的检测精度主要受到以下三个因素的影响:

- (1) 图像传感器的分辨率;
- (2) 摄像机标定以及对图像畸变校正的精度;
- (3) 图像处理算法的检测精度。

由于提高图像传感器的分辨率会使得视觉系统的硬件成本大幅增加,并带来图像数据量剧增的问题。因此,一般通过提高图像处理算法精度的途径来提高视觉系统的检测精度。国内外很多学者对进一步提高边缘检测精度的算法展开了研究<sup>[27-32]</sup>。本文在前人研究的基础上,选择对基于插值法、拟合法以及空间矩法的亚像素边缘检测算法进行比较研究。

#### 3.2.3.1 插值法

插值是数值计算学科中的概念,其基本原理是在已知的数据点之间利用某种算法获取新的数据点。利用插值法进行亚像素边缘检测的基本思路是对边缘像素及其梯度方向上相邻两个像素的梯度进行插值,获取的插值函数在邻域内的极值点就是该边缘点的亚像素精确位置。

图像处理技术中用到的典型插值函数有线性插值、双线性插值、多项式插值以及三次样条函数插值等。由于多项式插值具有精度高,运算量较少的优点,适合于高速高精度应用的场合,因此本文将对基于多项式插值的亚像素边缘检测算法进行研究。

传统的基于多项式插值的亚像素边缘检测算法未考虑到边缘梯度的方向信息<sup>[20]</sup>,会带来较大的定位误差。李庆利<sup>[33]</sup>给出了一种改进的基于多项式插值的亚像素边缘检测算法,其大致思路如下:

根据多项式插值理论,多项式插值函数  $f(x)$  的计算方法如公式(3-7)所示:

$$f(x) = \sum_{k=0}^n \frac{(x-x_0) \cdots (x-x_{k-1})(x-x_{k+1}) \cdots (x-x_n)}{(x_k-x_0) \cdots (x_k-x_{k-1})(x_k-x_{k+1}) \cdots (x_k-x_n)} y_k = \sum_{k=0}^n \prod_{\substack{i=0 \\ i \neq k}}^n \frac{x-x_i}{x_k-x_i} y_k \quad (3-7)$$

式中  $x_k$  ——插值点；

$y_k$  ——函数值。

对于已确定的边缘点  $P_0(m, n)$ ，取该点及其梯度方向上相邻两点的灰度梯度的幅值： $R_{-1}$ ， $R_0$ ， $R_1$ ，带入公式(3-7)得到一个二次多项式插值函数。该插值函数在区间  $(R_{-1}, R_1)$  内的极值点即为边缘点  $P_0(m, n)$  的亚像素精度坐标，记为  $(X_e, Y_e)$ ，极值点坐标的计算方法如公式(3-8)与(3-9)所示：

$$X_e = m + \frac{R_{-1} - R_1}{R_{-1} - 2R_0 + R_1} \cdot \frac{W}{2} \cos(\theta) \quad (3-8)$$

$$Y_e = n + \frac{R_{-1} - R_1}{R_{-1} - 2R_0 + R_1} \cdot \frac{W}{2} \sin(\theta) \quad (3-9)$$

式中  $W$  ——相邻像素到边缘点的距离(像素)；

$\theta$  ——边缘点的梯度方向与 X 轴正向的夹角(度)。

### 3.2.3.2 最小二乘拟合法

基于最小二乘准则的函数拟合法是进行亚像素边缘检测的有效数学工具。通过对边缘点梯度方向上多个像素的梯度值进行二次函数拟合，就可以得到边缘点法线方向的连续梯度函数，该梯度函数的极大值即为边缘点的亚像素坐标。

为了便于计算，一般在边缘点梯度方向上建立坐标系，并采用一元二次函数来拟合曲线，见公式(3-10)。

$$y = ax^2 + bx + c \quad (3-10)$$

为了提高该算法抗噪声的能力，一般选取多于三个的特征点来求解公式(3-10)中的参数。对于选取的  $n$  个特征点，公式(3-10)可改写为公式(3-11)。

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_o^2 & x_o & 1 \\ x_o^2 & x_o & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_n^2 & x_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

记为：

$$Y = AU \quad (3-12)$$

通过伪逆算法，可以求得公式(3-12)的解，方法如公式(3-13)所示：

$$U = (A^T A)^{-1} A^T Y \quad (3-13)$$

由公式(3-13)解出公式(3-10)中三个参数的值，就可以求得该二次函数的极值



点坐标为： $x = -\frac{b}{2a}$ 。边缘点的像素级精度坐标值加上该极值点的坐标即为该边

缘点对应的亚像素精度的坐标。

### 3.2.3.3 空间矩法

Tabatabai<sup>[34]</sup>提出了基于图像灰度矩的亚像素边缘检测算法，其基本原理是假设图像中实际边缘的灰度矩与理想阶跃边缘模型的灰度矩相等，即“矩不变原理”。通过分别计算实际边缘与理想阶跃边缘的前三阶矩，即可求得实际边缘的亚像素精确位置。

E.P LYVERS<sup>[35]</sup>在灰度矩法的基础上提出了基于图像空间矩的亚像素边缘检测算法。该法的基本原理与灰度矩法相似，是建立在理想阶跃边缘模型在量化前后空间矩保持不变的假设基础之上。研究表明，空间矩法较灰度矩法可以达到更高的精度<sup>[35,36]</sup>。

空间矩法采用了如图 3-3 所示的归一化二维阶跃边缘模型。图中  $l$  表示边缘到原点的归一化距离， $\theta$  表示边缘相对于 Y 轴的角度， $h$  表示背景灰度值， $k$  表示边缘对比度。

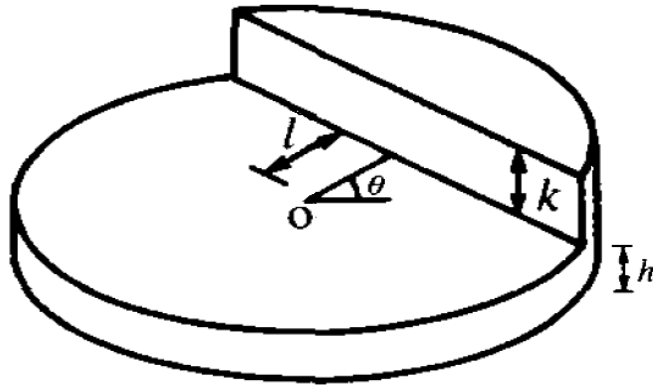


图 3-3 归一化二维阶跃边缘模型<sup>[35]</sup>

为方便计算，将图 3-3 所示的窗口顺时针旋转  $\theta$  度，使边缘垂直于 X 轴。旋转后，各阶矩的计算方法如公式(3-14)所示：

$$M'_{pq} = 2 \int_{-1}^l \int_0^{\sqrt{1-x^2}} h x^p y^q dy dx + 2 \int_l^1 \int_0^{\sqrt{1-x^2}} k x^p y^q dy dx \quad (3-14)$$

由公式(3-14)可以求得参数  $l$  与  $M'_{pq}$  的关系，如公式(3-15)所示：

$$l = \frac{4M'_{20} - M'_{00}}{3M'_{10}} \quad (3-15)$$

又因为单位圆旋转前后的空间矩具有如式(3-16)所示的关系：

$$M'_{pq} = \sum_{r=0}^p \sum_{s=0}^q \left( \frac{p}{r} \right) \left( \frac{q}{s} \right) (-1)^{q-s} (\cos \theta)^{p-r+s} \times (\sin \theta)^{q+r-s} M_{p+q-r-s, r+s} \quad (3-16)$$

可以得到边缘与 Y 轴的夹角  $\theta$  以及以及  $M'_{00}$ 、 $M'_{10}$  与  $M'_{20}$  的计算方法如公式(3-17)、(3-18)、(3-19)与(3-20)所示：

$$\theta = \arctan \frac{M_{01}}{M_{10}} \quad (3-17)$$

$$M'_{00} = M_{00} \quad (3-18)$$

$$M'_{10} = \sqrt{M_{01}^2 + M_{10}^2} \quad (3-19)$$

$$M'_{20} = \frac{M_{10}^2 M_{20} + 2M_{01} M_{10} M_{11} + M_{01}^2 M_{02}}{M_{01}^2 + M_{10}^2} \quad (3-20)$$

由于空间矩法建立在理想阶跃边缘模型在量化前后空间矩保持不变的假设之上，因此，可以用实际图像的空间矩来替代  $M_{pq}$ 。实际图像的各阶空间矩可以通过空间矩模板的方法来计算<sup>[35]</sup>。将实际图像的各阶空间矩  $M_{pq}$  带入公式(3-15)与(3-17)可以计算出二维阶跃边缘模型的参数  $l$  与  $\theta$ 。 $l$  在 X 轴与 Y 轴上的分量即为边缘点坐标的亚像素精度修正值。

### 3.2.4 亚像素边缘检测算法的比较

国内外许多学者对亚像素边缘检测算法的性能进行了测试<sup>[20,35,36]</sup>。文献[36]测得空间矩法的定位精度为 0.14 像素，单个边缘点亚像素坐标提取的时间约为 130 us。本文将对实时性较高的多项式插值法和最小二乘拟合法的性能进行测试。

对于亚像素边缘检测算法，通常要考察两个方面的内容：一是在没有噪声的情况下算法本身的定位精度，二是在有噪声的条件下算法的抗噪声能力。本文首先根据 CCD 的方形孔径采样原理生成理想的直线边缘图像，然后使用方差为 0.8 的高斯滤波器对生成的理想边缘图像进行平滑，以模拟光学成像器件的低通滤波效应<sup>[36]</sup>。通过以上步骤生成的原始测试图像如图 3-4 a)所示；在图 3-4 a)中加入强度为 10 的加性噪声，得到的图像如 3-4 b)所示；在图 3-4 a)中加入强度分别为 5 和 10 的椒盐噪声，得到图像 3-4 c)与 3-4 d)。

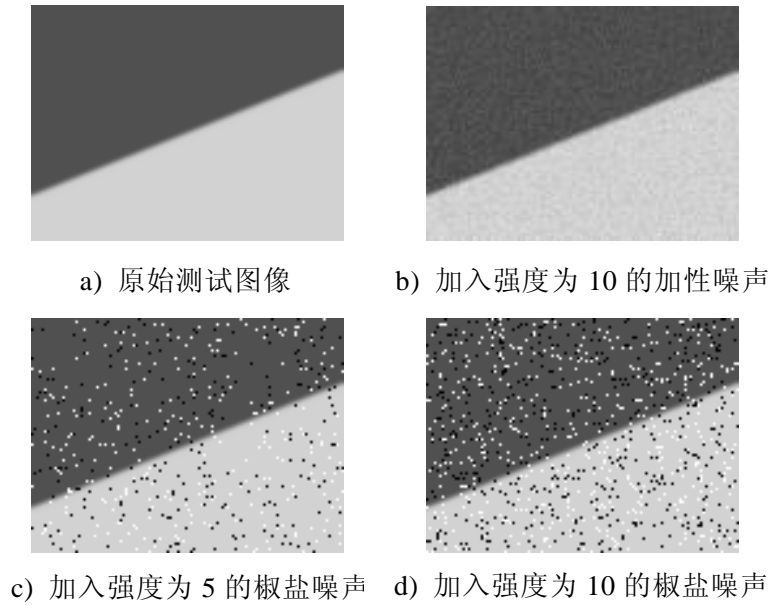


图 3-4 亚像素边缘提取算法测试图像

分别使用多项式插值法和最小二乘拟合法对图 3-4 中的四幅图像进行亚像素边缘提取，并计算提取到的亚像素精度坐标与理想边缘的平均距离作为该算法的定位误差，测得的误差数据如表 3-1 所示。

表 3-1 亚像素边缘检测算法的实验数据

	对图 3-4 a)中边缘点的定位误差 (pixel)	对图 3-4 b)中边缘点的定位误差 (pixel)	对图 3-4 c)中边缘点的定位误差 (pixel)	对图 3-4 d)中边缘点的定位误差 (pixel)
多项式插值法	0.0314	0.0429	0.2188	0.2984
最小二乘拟合法	0.0524	0.0650	0.2178	0.2651

由表 3-1 可以看出，多项式插值法的定位精度较高，而最小二乘曲线拟合法的抗干扰能力相对较强。另外，两种算法的计算复杂度与空间矩法相比较低，适用于实时性要求较高的场合。

### 3.3 几何基元提取算法

使用边缘检测算法可以获取图像中像素级或亚像素级精度的边缘点坐标。但是我们感兴趣的往往不在于边缘点本身，而是由一系列边缘点所构成的几何基元的数学解析式，如 BGA 元件焊球的圆形轮廓、CHIP 元件本体和 SOP 元件

引脚的直线轮廓以及部分 PCB 基准标志的椭圆形轮廓。HOUGH 变换和最小二乘法是两种最常用的几何基元提取算法，本节将对这两种几何基元提取算法进行比较研究。

### 3.3.1 HOUGH 变换法

#### 3.3.1.1 HOUGH 变换的基本原理

HOUGH 变换的实质是为图像空间中具有一定几何关系的像素寻找出能用某一解析形式联系起来的参数空间累计对应点<sup>[37]</sup>。HOUGH 变换最初是用来在图像中检测直线的，后来发展到能够检测任意形状的几何图案<sup>[38]</sup>。下面首先以最简单的直线基元介绍一下 HOUGH 变换检测几何基元的原理。

在极坐标系中，经过点  $(x_i, y_i)$  的直线可以表示为：

$$r = x_i \cdot \cos \theta + y_i \cdot \sin \theta \quad (3-21)$$

式中  $r$ ——直线到原点的距离(像素)；

$\theta$ —— $x$ 轴与直线垂线的夹角(度)。

HOUGH 变换将  $\theta$  和  $r$  作为变量， $x_i$  与  $y_i$  作为解析式的系数。也就是说 HOUGH 变换将由  $(x, y)$  构成的图像坐标空间变换到由  $(\theta, r)$  构成的参数空间。那么参数空间中的一点对应于图像空间中的一条直线，而图像空间中的一点对应于参数空间中的一条正弦线。因此图像空间中共线的所有点在参数空间中对应的正弦线将有一个交点，该交点的坐标即图像空间中共线点所对应的直线的参数，如图 3-5 所示。

实际编程时，需要将参数空间离散化。建立一个二维累加数组  $A(\theta, r)$ ，第一维的参数表示所要检测的直线的参数  $\theta$  可能变化的范围，第二维的参数表示参数  $r$  可能变化的范围。对于图像空间中的每个前景点，将其坐标带入公式 (3-21)，遍历参数空间中  $\theta$  可能取到的所有离散值，计算出对应的  $r$  值，并将  $A(\theta, r)$  中对应的元素加一。将图像空间中所有的点计算完毕后，查看  $A(\theta, r)$  中各个元素的数值。若  $A(\theta, r)$  中某元素  $A_0(\theta_0, r_0)$  的数值比较大，则说明  $A_0$  对应的共线点多，则图像中很可能存在着以  $(\theta_0, r_0)$  为参数的直线。

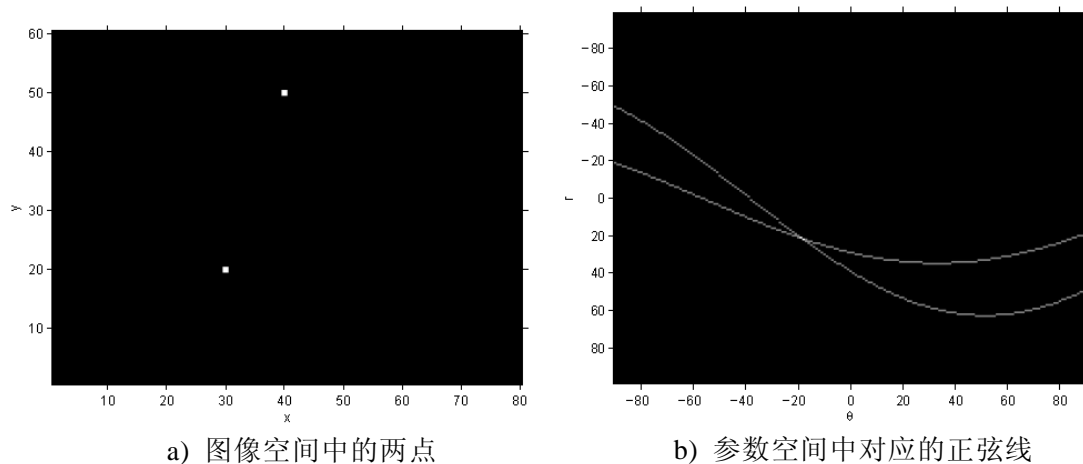


图 3-5 图像空间与参数空间下的点线映射关系

以上文字解释了基于 HOUGH 变换的直线基元提取算法的基本原理，但实际上只要能在图像空间中以数学解析式形式表达出来的几何基元都可以通过 HOUGH 变换的方法检测出来。例如，对于已知的圆方程，其数学解析式一般写为公式(3-22)所示的形式。

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2 \quad (3-22)$$

式中  $a$ ——圆心的 X 坐标；  
 $b$ ——圆心的 Y 坐标；  
 $r$ ——圆的半径。

在实际编程实现时，需要为圆的参数空间建立三维的累积器数组  $A(a,b,r)$ 。对于图像空间中的每个前景点，使用与检测直线基元类似的思路累加参数空间  $A(a,b,r)$  中每个可能的取值。最终查找出  $A(a,b,r)$  中数值超过一定阈值的元素，这些元素的坐标即为要在图像空间中检测的圆形几何基元的参数。

### 3.3.1.2 HOUGH 变换的改进算法

当几何基元参数空间的维数达到或超过三维时，基于 HOUGH 变换的算法的计算量猛增，算法的执行时间呈指数上升的趋势，而且计算机可能无法为参数空间开辟足够的内存。因此，在实际应用中，很少直接使用 HOUGH 变换去检测未知参数超过三个的曲线。

一般通过减小参数空间体积或减少二值图像中前景点数量的方法来提高 HOUGH 变换算法的执行效率<sup>[39]</sup>。如，利用直线边缘点的梯度方向估算出直线斜率参数的大致范围<sup>[40]</sup>；利用圆内接直角三角形必过圆心的原理来快速确定圆心和半径；或者采用随机霍夫变换的方法在图像空间中取不共线的三个点映射成参数空间中一个点，从而避免一到多的映射<sup>[41]</sup>。

### 3.3.2 最小二乘法

得到几何基元上所有边缘点的坐标之后，就可以使用最小二乘法对几何基元进行拟合，得到几何基元的数学解析式<sup>[42]</sup>。下面以满足公式(3-22)的圆形几何基元为例说明最小二乘法拟合几何基元的原理。

误差方程可定义为：

$$E = \sum_i^n [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2]^2 \quad (3-23)$$

式中  $a$ ——圆心的 X 坐标；

$b$ ——圆心的 Y 坐标；

$r$ ——圆的半径；

$x_i$ ——几何基元上边缘点的 X 坐标；

$y_i$ ——几何基元上边缘点的 Y 坐标。

最小二乘拟合的原理在于最小化误差的平方和来寻找数据的最佳函数匹配，则应有：

$$\frac{\partial E}{\partial a} = \frac{\partial E}{\partial b} = \frac{\partial E}{\partial r} = 0 \quad (3-24)$$

将公式(3-24) 带入公式(3-23)，并令  $Z = a^2 + b^2 - r^2$ ，可得公式(3-25)：

$$\begin{cases} \sum_i^n (x_i^2 + y_i^2 - 2x_i a - 2y_i b + Z) \times (x_i - a) = 0 \\ \sum_i^n (x_i^2 + y_i^2 - 2x_i a - 2y_i b + Z) \times (y_i - b) = 0 \\ \sum_i^n (x_i^2 + y_i^2 - 2x_i a - 2y_i b + Z) \times r = 0 \end{cases} \quad (3-25)$$

解公式(3-25)可得误差平方和最小情况下，圆心的参数  $(a, b)$  和圆的半径  $r$ 。

### 3.3.3 几何基元提取算法的比较

基于 HOUGH 变换的几何基元提取算法具有很强的鲁棒性，能够在存在较强噪声的图像中准确的提取出几何基元。但该方法的计算复杂度较高，当检测圆时，该算法的复杂度达到  $O(n^4)$ 。而且由于参数空间的离散性，该法的定位精度一般只能达到像素级别。而最小二乘法在执行速度和定位精度方面均表现出色，缺点在于受图像中干扰的影响较为严重。将 HOUGH 变换的强鲁棒性和最小二乘法的高定位精度的优点相结合，可以得到在精度和鲁棒性方面均较理

想的效果。

### 3.4 区域特征提取算法

当物体从图像中被分割出来以后，进而就可以对图像中连通区域的特征进行测量与分析，在此基础上对物体进行检测或分类。根据区域特征自身的特点，可以将其分为描述物体外形的形状特征和描述物体表面灰度变化的纹理特征。在数字图像处理技术中，区域的纹理特征主要是由灰度直方图来描述<sup>[43]379</sup>。由于贴片元件和 PCB 基准标志的纹理单一，很难通过纹理特征对其进行识别。因此本文仅涉及区域的形状特征。本文将贴片机视觉系统中常用到的形状特征归纳如下：

(1) **面积和周长** 区域的面积指的是该区域中像素的总数，区域的周长指的是区域边界的长度。为了计算区域的周长，需要首先对区域进行轮廓提取，然后对轮廓上相邻像素间的欧几里得距离相加。其中，水平和垂直相邻像素间的欧几里得距离为一，对角方向相邻像素间的欧几里得距离为  $\sqrt{2}$ 。

(2) **致密度** 根据区域的面积和周长，可以计算出区域的致密度。致密度描述的其实是一个区域接近圆形的程度。圆形区域的致密度为一，任何其他形状的区域的致密度均大于一。致密度的计算方法如公式(3-26)所示：

$$c = \frac{l^2}{4\pi a} \quad (3-26)$$

式中  $l$ ——区域的周长(像素)；

$a$ ——区域的面积(像素)。

区域的致密度特征可以用来区分 BGA 元件的圆形焊球和三角形的极性标志，如图 3-6 所示。其中图像的右上角为 BGA 元件的极性标志。



图 3-6 利用紧密度特征区别焊球与极性标志

(3) **凸度** 凸度被定义为一个区域的面积与该区域凸包的面积间的比值。凸度用来衡量一个区域的紧凑程度，一个凸区域的凸度为一，凹区域的凸度小于

一。

(4) **欧拉数** 区域中的对象数减去这些对象的孔洞数<sup>[43]381</sup>。

(5) **几何矩** 一个区域  $R$  的  $(p, q)$  阶矩的定义如公式(3-27)所示:

$$m_{p,q} = \sum_{(r,c) \in R} r^p c^q \quad (3-27)$$

式中  $r$ ——区域  $R$  中某一像素的行坐标;

$c$ ——区域  $R$  中某一像素的列坐标。

由公式(3-27)可知,  $m_{0,0}$  表示该区域的面积。将  $m_{p,q}$  进行归一化, 得到区域归一化的矩, 如公式(3-28)所示:

$$n_{p,q} = \frac{1}{a} \sum_{(r,c) \in R} r^p c^q \quad (3-28)$$

式中  $a$ ——区域  $R$  的面积。

由公式(3-28)可知,  $(n_{1,0}, n_{0,1})$  表示区域的重心。从公式(3-28)可进一步得到区域归一化的中心矩, 具有对区域平移和缩放的不变性。其计算方法如公式(3-29)所示:

$$\mu_{p,q} = \frac{1}{a} \sum_{(r,c) \in R} (r - n_{1,0})^p (c - n_{0,1})^q \quad (3-29)$$

式中  $n_{1,0}$ ——区域  $R$  重心的行坐标;

$n_{0,1}$ ——区域  $R$  重心的列坐标。

(6) **不变矩** 美籍华人胡名桂教授通过对不同阶几何矩的数学组合, 得到了七个对于平移、旋转和缩放均具有不变性的区域特征<sup>[44]</sup>, 可应用于模版匹配等物体特征识别的应用中。

### 3.5 本章小节

本章对于图像处理与特征提取基础算法的研究是实现贴片机视觉系统检测功能的重要基础。本章首先对像素精度和亚像素精度边缘检测算法的性能进行了分析, 并通过实验确定了适合贴片机视觉系统使用的边缘检测算法。本章还研究了几何基元提取算法, 该算法可以获取贴片元件或 PCB 基准标志轮廓的数学解析式; 本章最后对适用于贴片机视觉系统的区域特征提取算法进行了总结, 使用该算法可以对贴片元件或 PCB 基准标志的区域特征进行检测和分类。



## 第 4 章 贴片元件检测算法研究

### 4.1 引言

视觉系统对贴片元件的检测速度、精度以及可检测元件的类型范围主要由图像处理部分的算法决定。本章将在第三章的基础上对目标定位与特征检测模块做进一步深入的研究，重点研究体现对贴片元件进行精确定位和特征检测功能的算法。由于表面贴装元件的封装类型目前还无统一的国际标准，除了主流的元件封装类型外，一些元器件生产厂商还采用了极少数外形不规则的封装形式，一般称之为异形元件<sup>[45]</sup>。由于大多数异形元件的检测算法可以从本章设计的算法的原理中得到启发，因而本章仅针对常用封装形式的贴片元件进行检测算法的研究工作。

### 4.2 贴片元件封装形式的分类

在机器视觉领域，对目标物体的定位方法可以分为两大类，一是模板匹配法，二是特征分析法<sup>[6]38</sup>。其中模板匹配是一种比较通用的算法，适用于检测任意形状的目标，并可以以较高的精度获取目标相对于模板的位姿。但该算法灵活性不足，需要用户提供元件的标准模板。然而在 SMT 领域中，贴片元件的封装形式数目繁多，外形尺寸相差悬殊，且不断有新的封装形式的元件出现，让用户为贴片机提供每一种贴片元件的模板是不现实的。

相比之下，特征分析法不需要用户提供元件模板，算法通过分析元件的特征来完成元件的定位。由于大部分贴片元件的引脚规则的排列在贴片元件本体的四周或底部，因此可以将元件的引脚作为元件的特征并使用特征分析法来获取整个贴片元件的位姿。特征分析法的缺点在于通用性较差，一种算法只适用于具有同类特征的元件。因此，在使用特征分析法对贴片元件进行定位算法研究之前，首先要根据元件的特征做好元件的分类工作。

目前，表面贴装元件的封装形式有上百种之多，为每一种元件单独研究定位和检测算法是不现实的。本文对贴片元件的封装形式进行了分析，并按照贴片元件引脚的几何形状和空间排列方式将常用封装形式的贴片元件归纳为 CHIP(片式电阻电容元件)、MELF(Metal Electrode Face Bonding)、MLD(MOLDED Body)、SOT(Small Outline Transistor)、SOP(Small Outline Package)、SOJ(Small Outline J-Lead Package)、QFP(Quad Flat Package)、PLCC(Plastic Leaded Chip Carrier)、BGA(Ball Grid Array)、CSP(Chip Scale

Package)和 Flip Chip 等类型。并为每一类型的贴片元件单独设计了定位与检测的算法。

其中 CHIP、MELF 元件没有专门的引脚，本体的两端与焊盘直接相连，本文将其统称之为无引脚元件；SOP、SOJ、QFP、PLCC 和 SOT 等元件具有在本体周边规则排列的扁平矩形引脚，本文将其统称之为矩形引脚元件；BGA、CSP 和 Flip Chip 等面阵列贴片元件将位于本体底部以阵列形式排布的焊球作为与 PCB 焊盘的电气连接端，本文将该类元件统称之为球形引脚元件。

通过引脚特征对贴片元件进行归类，可以提高算法的通用性和灵活性。从引脚特征的角度来讲，近几年新出现的封装形式以及本章未涉及的异形元件大多可以归类于上文所总结的元件类型中的一种，或者可以在上述类型元件的定位算法中得到启发。因而使得视觉系统对各种异形元件具有较强的适应能力。

### 4.3 贴片元件的检测算法

本节在上节对贴片元件的封装形式进行分类的基础上，分别在无引脚元件、矩形引脚元件和球形引脚元件中选取一种典型元件进行视觉算法的研究。该算法主要完成两项工作，一是对元件进行精确定位，获取元件在图像坐标系下的精确坐标与旋转角度；二是对元件的特征进行检测，确保所要贴装的元件没有缺陷。

#### 4.3.1 无引脚元件的检测算法

本文将 CHIP、MELF 等元件归类为无引脚元件，两类元件的外形如图 4-1 所示。由于该类元件是靠本体的两端与 PCB 焊盘相连接，连接部分与本体部分的区别度比较小，因此该类元件是通过元件的本体来确定元件的位姿的。检测算法还需对元件本体的长度和宽度进行测量，确保元件的尺寸误差在允许的公差范围之内。下面以 CHIP 元件为例对无引脚元件的检测算法进行研究。

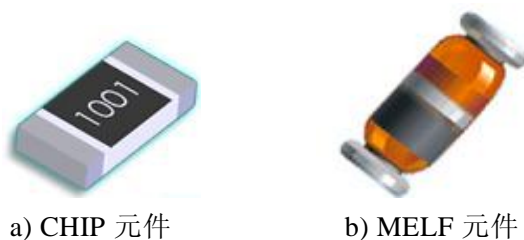


图 4-1 无引脚元件

#### 4.3.1.1 CHIP 元件检测算法原理

文献[9]使用的基于标尺技术的检测算法代表了当今主流贴片机在检测 CHIP 元件时所使用的算法。该算法首先使用标尺在 CHIP 元件每条边上获取数个边缘点，进而分别对每条边缘进行直线拟合。根据计算出的四条边缘的直线方程获取整个元件的中心点坐标和旋转角度。该算法具有简单高效的优点，但精度和鲁棒性较差。另外，该算法对吸嘴吸取元件的精度要求较高，一旦元件与吸嘴中心位置的偏差较大或者元件的旋转角度较大，该算法将难以可靠地提取元件的边缘点。

一个理想的视觉检测算法，应当能够检测图像中任意位置和旋转角度的目标，以尽量摆脱对机械系统和控制系统精度的依赖。文献[46]使用了基于不变几何矩的算法计算 CHIP 元件的位姿。该算法具有旋转、缩放和平移不变性的特点，因而对吸嘴的吸取精度几乎没有要求，能够匹配出图像中任意位置和旋转角度的 CHIP 元件。但是由于该算法对于元件长宽尺寸的等比例缩放不敏感，因此不能完全排除对元件的尺寸缺陷存在漏检的可能性。

当前，CHIP 元件在不断向着小型化的方向发展，目前最小的 CHIP 元件 0402 的尺寸已达到  $0.4\text{mm} \times 0.2\text{mm}$ 。在 SMT 行业中，尺寸越小的 CHIP 元件对于定位精度的要求越高，因此以上算法将很难完全满足 0402 这类小型 CHIP 元件对于定位精度的要求。

另外，由于 CHIP 元件的尺寸越来越小，因此当吸嘴稍微偏离 CHIP 元件的中心时，就很有可能在图像中显现出来。图像中吸嘴本身的灰度值可能会对 CHIP 元件的检测产生干扰。因此，CHIP 元件的检测算法还应该具有分辨元件和吸嘴之间形状差别的能力<sup>[47]</sup>。

本章针对上述问题对 CHIP 元件的定位与检测算法进行了研究。本章所设计的算法将元件在灰度图像和二值图像中的分析相结合，首先在较短的时间内完成对 CHIP 元件特征的粗定位，以确定出元件特征出现的大致区域。然后在该区域内对元件的特征进行更为精确的综合分析，并最终计算出元件精确的亚像素精度的位姿。

#### 4.3.1.2 CHIP 元件检测算法实验

本文将所研究的 CHIP 元件的检测算法在 VC++6.0 环境下进行了测试。电脑配置为 Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU，主频 2.10GHz，内存 2GB。测试图片的尺寸为  $136 \times 118$  像素，其中图片中元件的尺寸约为  $60 \times 38$  像素。

在有无吸嘴干扰情况下，元件的定位效果分别如图 4-2 a)与图 4-2 b)所示。在原始图像中各加入强度为十的加性噪声和椒盐噪声后，元件的定位效果分别

如图 4-2 c)和图 4-2 d)所示,其中加性噪声强度的定义为噪声造成原始图像中每个像素的灰度值上下随机浮动的范围;椒盐噪声强度的定义为图像中噪声点数所占图像像素总数目的百分比。四种情况下元件定位的实验数据见表 4-1。测试结果表明,有吸嘴或噪声干扰情况下的得到的元件定位结果的各项数据和在原始图像中元件定位结果的各项数据之间的偏差很小,表明本章所设计的定位算法具有很强的鲁棒性,能够容忍吸嘴和噪声相当程度的干扰。实验数据同时表明该算法同时具有很高的执行效率,能够满足高档高速贴片机对于算法实时性的要求。

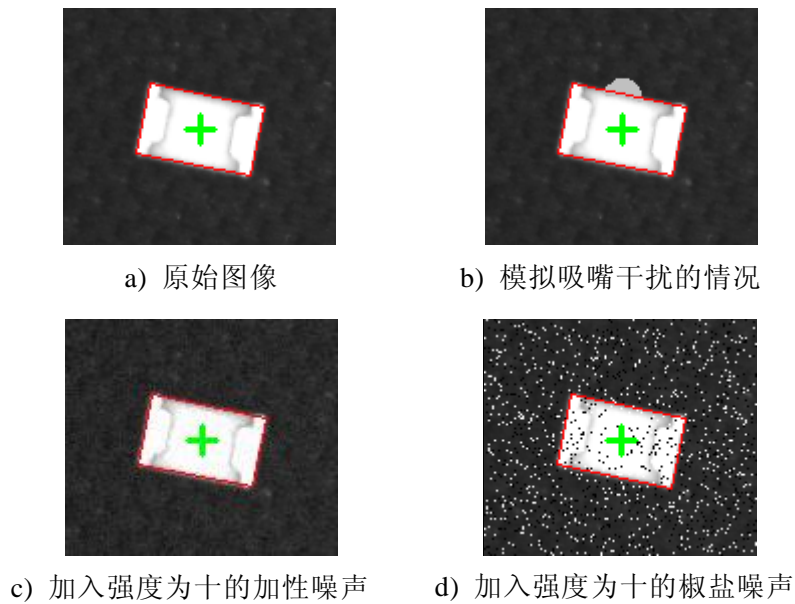


图 4-2 各种情况下 CHIP 元件的定位效果

表 4-1 各种干扰情况下元件定位结果数据

	元件中心 X 坐标 (pixel)	元件中心 Y 坐标 (pixel)	元件旋转角度 (度)	算法运行时间 (ms)
原始图像	67.718	60.449	-11.300	1.9
吸嘴干扰	67.733	60.371	-11.355	2.4
加性噪声	67.723	60.493	-11.335	2.1
椒盐噪声	67.705	60.259	-11.502	3.5

### 4.3.2 矩形引脚元件的检测算法

本文将 SOP、SOJ、QFP、PLCC 和 SOT 等元件归类为矩形引脚元件，几种元件的外形如图 4-3 所示。

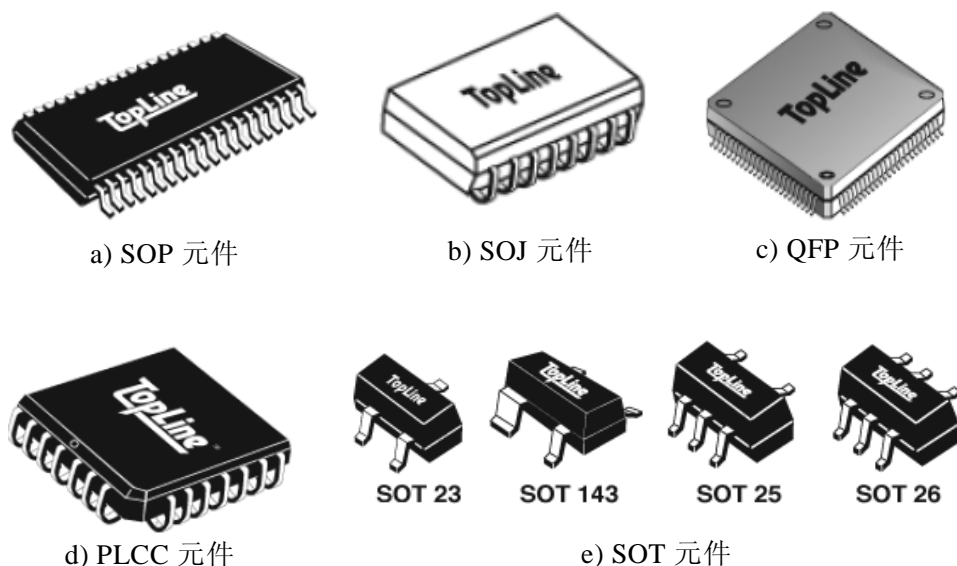


图 4-3 矩形引脚元件

该类元件通过元件两侧或四周整齐排列的 J 型或鸥翼型引脚与 PCB 焊盘连接。元件的引脚一般为明亮的金属材质，元件本体一般为黑色塑料材质，引脚与本体在图像中的对比度较高。因此，本文将元件引脚作为该类元件的特征，并通过对引脚的识别和定位来间接实现整个元件的精确定位。检测算法还需要对引脚的长度、宽度、间距以及数目进行测量，以确保将要贴装的元件不存在引脚丢失、错位、弯曲或桥接的情况。

在所有的矩形引脚元件中，QFP 元件对定位精度的要求最高，且定位和检测的算法最为复杂。因此本文将重点研究 QFP 元件定位算法的原理及实现，并作为实现其他类型矩形引脚元件定位算法的基础。

#### 4.3.2.1 QFP 元件检测算法原理

QFP 元件的检测算法与 LED 照明系统所采用的照明方式有很大关系。文献[9]对 QFP 元件采用了背光照明的方式，采集到的图像接近于二值图像，元件与背景的对比度非常高，通过适当的算法可以达到很高的定位精度。该文献使用了基于“第一元件引脚扫描检测”的方法来对 QFP 元件的所有引脚进行分类。由于该方法需要根据元件的尺寸和吸嘴取料的精度来事先估计元件的“第一引

脚”在图像中出现的位置，因而对吸嘴吸取元件的精度提出了较高的要求。当吸嘴吸取元件的角度误差较大时，该方法有可能失效。

由于在贴片机中使用背光照明方式会受到光源在贴片头上安装空间的限制，因此本文采用的是正面照明的方式。使用本文所设计的 LED 照明系统和光学成像系统所获取的 QFP 元件的图像如图 2-3 c)所示。文献[6]对采用正向照明条件下 QFP 元件的精确定位和特征检测算法做了研究，采用了如图 4-4 所示的引脚集定义。

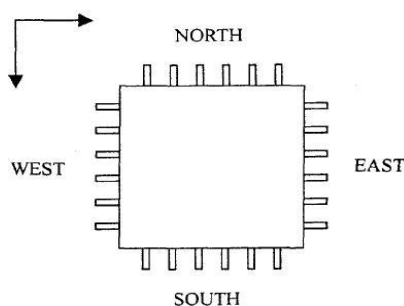


图 4-4 QFP 元件的引脚集定义<sup>[6]</sup>

该文献[6]为 QFP 元件定义了 NORTH、SOUTH、WEST 和 EAST 四个引脚组，首先根据元件的中心和细长型引脚的长轴方向将所有引脚分别归到四个引脚组中，然后对每个引脚组分别进行引脚的完好性检查，最终通过最小二乘匹配的方法计算出元件的位姿。该文献使用此方法时，默认图像分割算法分割出的每个引脚是完整的。然而实际上由于 QFP 元件引脚的各个部分弯曲程度不同，在接受正向照明时，引脚的各个部分在图像中的灰度值并不均匀。因此，在使用该文献提到的图像分割算法后，元件的引脚在图像中事实上存在着断裂的情况，如图 4-5 所示。

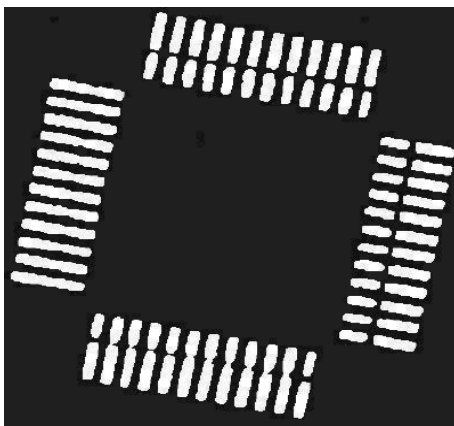


图 4-5 QFP 元件断裂的引脚<sup>[48]</sup>

文献[48]针对 QFP 元件引脚断裂的问题, 使用了基于数学形态学中闭合运算的方法来对引脚进行修复。为了防止在对引脚断裂处进行闭合运算时将相邻的引脚连接, 该文献首先估计出 QFP 元件的大致旋转角度, 然后沿着引脚的方向使用直线型结构体实施定向的数学形态学闭合运算。该方法较为巧妙地解决了文献[6]中忽略的问题, 对于 QFP 元件引脚的修复是比较理想的, 如图 4-6 所示。该文献在 QFP 元件引脚的分类问题上, 同样采用了基于数学形态学的操作。其思路是, 使用十字形的结构元素在二值图像中执行多次膨胀操作, 直至同一个引脚组中的相邻引脚形成一个连通域。然后通过连通域标记的方法, 区别开不同引脚组的引脚所形成的连通域。

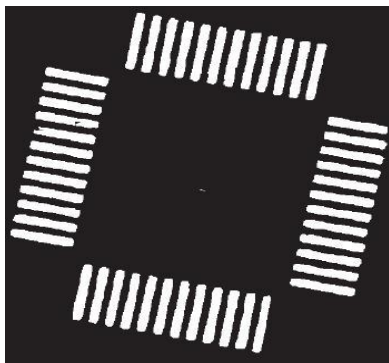


图 4-6 修复后的 QFP 元件引脚<sup>[48]</sup>

该方法的主要缺点在于进行引脚分类和修复操作时所使用的全局形态学算法消耗时间较长, 当图像较大时, 该算法的实时性将变得较差。另外, 由于引脚修复前所估计的元件旋转角度存在较大误差, 因而使用定向闭合运算得到的修复后的引脚与真实的引脚之间存在一定的差距, 并最终造成元件的定位误差增大。

为了满足细间距 QFP 元件对于贴装精度和速度的严格要求, 本章对该类元件的定位与检测算法进行了深入的研究。本文将 QFP 元件在图像中的引脚划分为三段: 与本体连接部分、引脚末端以及引脚弯曲部分。其中前两部分反光较强, 因而在图像中比较明显。本文认为, 由于元件视觉定位的最终目的是将元件的引脚末端与 PCB 焊盘准确的对应起来, 而与引脚的其他两部分无关。因而仅对与 PCB 焊盘连接的引脚末端部分进行检测是最直接和精确的方法。基于这种理解, 本文提出了以下的 QFP 元件定位与检测算法:

- (1) 对原始图像进行预处理, 滤除图像中的噪声;
- (2) 对滤波之后的图像进行自动阈值分割, 使用标记算法在生成的二值图

像中标记出每个连通区域，并置为前景；

(3) 对标记出的连通区域进行特征提取，选择出符合引脚特征的连通区域；

(4) 使用聚类算法将所有连通区域划分为 NORTH、SOUTH、WEST 和 EAST 四类，并使用一定的方法从各类引脚中挑选出与引脚末端对应的连通域，如图 4-7 所示。将图像中引脚末端的数量与标准数目相比较，以识别出可能存在的引脚丢失缺陷。

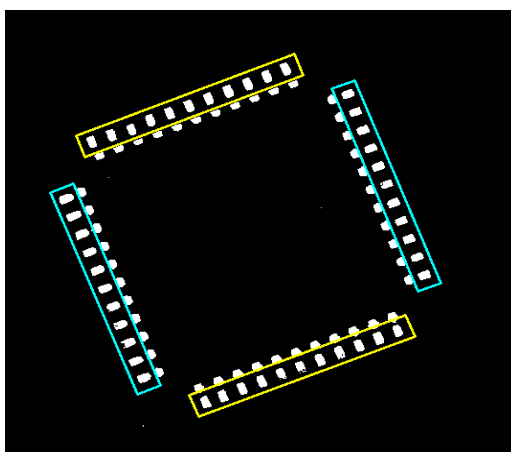


图 4-7 QFP 元件引脚末端的聚类效果

(5) 使用标尺对引脚的长度、宽度、间距进行测量，检测出可能存在的引脚错位、弯曲或桥接等缺陷。使用标尺测量出的数据波形如图 4-8 所示。其中横轴表示沿标尺方向的像素点数，纵轴表示梯度幅度。

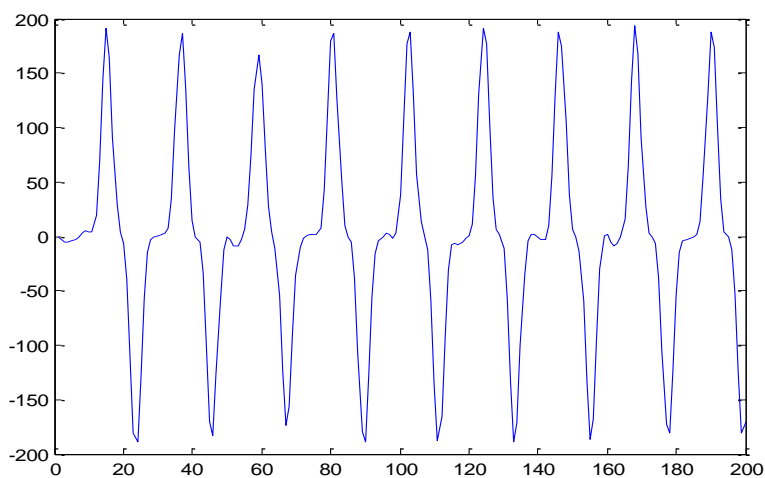


图 4-8 使用标尺对 QFP 元件引脚进行测量



(6) 计算出各个引脚特征的坐标，基于这些特征对元件进行综合分析，并最终计算出整个 QFP 元件的精确位姿。

#### 4.3.2.2 QFP 元件定位精度分析

在所有的表面贴装元件中，细间距的 QFP 元件对于贴装精度的要求是最高的。QFP 元件的定位误差包括平移误差和旋转误差，其中旋转误差被定义为元件理论贴装位置和实际贴装位置间的角度误差，如图 4-9 所示。该误差主要是由视觉系统的定位误差和贴片头 Z 轴的旋转误差引起的<sup>[49]</sup>。

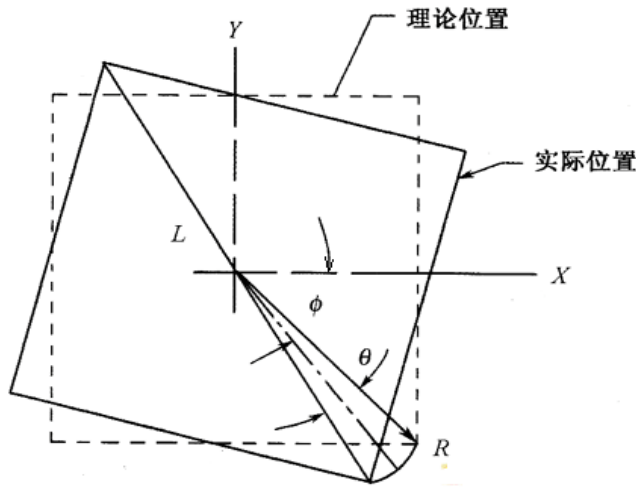


图 4-9 QFP 元件的旋转误差

当元件旋转误差为  $\theta$  时，QFP 元件对角线顶点移动的长度  $R$  的计算方法如公式(4-1)所示：

$$R = \frac{L}{2} \theta \quad (4-1)$$

式中  $R$ ——QFP 元件顶点移动的长度；

$\theta$ ——QFP 元件的旋转误差(弧度)；

$L$ ——QFP 元件的对角线长度。

若以  $X$  轴和  $Y$  轴方向的误差来表示旋转误差，则如公式(4-2)与公式(4-3)所示：

$$X_T = L \sin \phi \cdot \sin \frac{\theta}{2} \quad (4-2)$$

$$Y_T = L \cos \phi \cdot \sin \frac{\theta}{2} \quad (4-3)$$

式中  $\theta$ ——QFP 元件的旋转误差(弧度)；

$\phi$ —— $X$  轴与 QFP 元件旋转误差  $\theta$  角平分线间的角度。

由于 QFP 元件一般为大尺寸的方形元件，由公式(4-2)与公式(4-3)可知即使是较小的旋转误差也可能使得元件顶点处的引脚大大偏移理论上的贴装位置。

在测量学中，精度往往由两方面的指标来衡量：一是准确度，表示测量结果与真值间的一致程度，反映了测量结果中系统误差大小的程度；二是精密度，表示测量结果中重复误差大小的程度。精密度高，表示重复误差较小，测量数据集中，但系统误差的大小并不确定。

由于获取测量真值比较困难，因此本文无法对算法测量元件角度的准确度进行实验，但是算法测量元件旋转角度的精密度是可以通过实验测量出来的。另外，由于检测算法对于元件旋转角度的分辨率也是算法的一个重要指标，因此下文将对算法测量 QFP 元件旋转角度的分辨率和精密度进行实验，以确保该算法的实用性。

#### 4.3.2.3 检测算法测量元件旋转角度的分辨率和精密度实验

本文使用所研究的 QFP 元件的定位算法在 VC++6.0 环境下进行了测试。电脑配置为 Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU，主频 2.10GHz，内存 2GB。测试图片中 QFP44 元件的尺寸约为  $330 \times 330$  像素，整幅图像尺寸为  $536 \times 503$  像素。

由于缺少  $X-Y-\theta$  精密运动平台，因此无法使用本文所搭建的贴片机视觉系统对微小移动的贴片元件进行实际采图。本文使用了下面的方法来验证检测算法测量元件旋转角度的分辨率和精密度：首先使用算法测量原始图像中 QFP44 元件的旋转角度；然后对原始图像使用双线性插值法生成一系列旋转角度的测试图像，如图 4-10 所示；最后使用算法测量测试图像中 QFP44 元件相对于原始图像中元件的旋转角度，并记录与期望旋转角度的误差。实验数据见表 4-2。

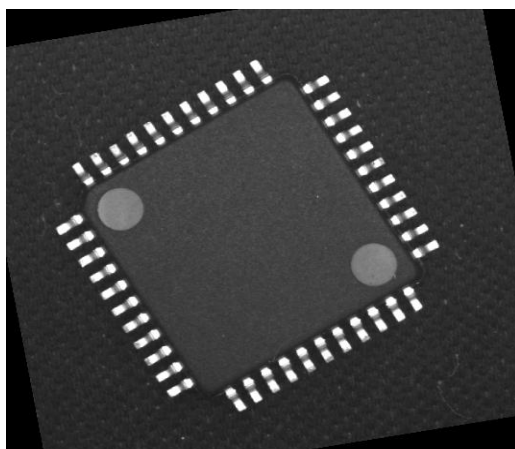


图 4-10 使用双线性插值法生成的测试图像

表 4-2 QFP44 元件旋转角度测试数据

图像序号	期望旋转角度 (度)	算法测量角度 (度)	误差 (度)	算法执行时间 (ms)
1	-10.000	-9.996	0.004	9.1
2	-1.000	-0.995	0.005	8.9
3	-0.100	-0.098	0.002	8.9
4	-0.010	-0.008	0.002	8.8
5	-0.001	-0.002	-0.001	9.0
6	0.001	0.002	0.001	9.0
7	0.010	0.008	-0.002	9.1
8	0.100	0.105	0.005	9.1
9	1.000	0.996	-0.004	9.0
10	10.000	9.994	-0.006	9.2

通过对表 4-2 所示的数据进行分析,可以得出以下结论:本文所研究的算法可以分辨出图像中元件非常微小的旋转角度;算法的执行时间约为 9ms;对于原图像在(-10,10)度内的旋转,算法测得的 QFP 元件的旋转角度与期望旋转角度间的误差不超过 0.006 度。将该角度误差带入公式(4-2)与公式(4-3),并假设 QFP 元件的形状是边长为 330 像素的方形,得到元件顶点位置在 X 轴和 Y 轴方向的误差均为 0.0173 像素,该误差对于贴装 QFP 元件的影响可以忽略不计。

表 4-2 内所示的角度测量误差有随着图像旋转角度增大而增大的趋势,这主要是由于生成测试图像时,使用的双向性插值算法造成的。当图像的旋转角度增大时,测试图像中生成的无效像素增多(图 4-10 内的黑色像素)。这影响到图像分割时阈值的选取,进而影响到引脚特征的坐标,并最终反映到元件旋转角度的测量误差上。可以预见,若能解决双线性插值算法在测试图像中产生大量无效像素的问题,则测得的各项误差数据将更小。

实验说明本文所提出的 QFP 元件的定位与检测算法对图像中元件的旋转角度具有较高的分辨率和精密度,该算法还具有较高的执行效率。但是,本实验测得的各项数据还不能完全说明整个贴片机视觉系统的测量精度和灵敏度。整个系统的测量精度和灵敏度还要考虑到光学成像系统和 LED 照明系统的因素,特别是光学成像系统将元件的微小位移真实的反映到图像中的能力。

### 4.3.3 球形引脚元件的检测算法

本文将 BGA、CSP 和 Flip Chip 等面阵列封装元件归类为球形引脚元件，该类元件的外形如图 4-11 所示。

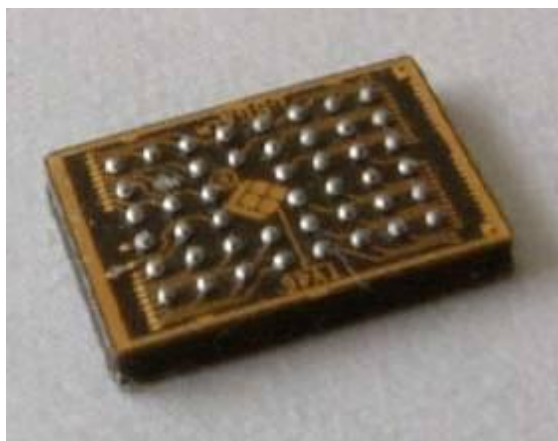


图 4-11 球形引脚元件

面阵列封装元件是在芯片的底部按阵列方式制作出球形凸点用以代替矩形引脚，形成芯片与 PCB 基板之间信号传输的通路。从组装技术的角度来看，该类元件有着比 QFP 元件更为优越的特点，主要体现在该类元件不存在 QFP 等矩形引脚元件存在的引脚变形问题，且对贴装精度的要求不如 QFP 元件严格。因此，近年来已在各类电子产品上广泛使用。

由于贴片机视觉系统在检测各种球形引脚元件时，使用的算法的原理相同。因此，本文将以应用最广泛的 BGA 元件为代表来进行球形引脚元件检测算法的研究。

球形引脚元件的焊球一般为明亮的金属材质，元件本体一般为黑色塑料材质。当对该类元件进行图像采集时，LED 照明系统一般工作于正向低角度照明方式，焊球在图像中呈现出明亮的圆环状。由于焊球与本体的对比度较高，因此本文将该类元件的球形引脚作为该类元件的特征，并通过对球形引脚的检测和定位来间接实现整个元件的精确定位。为了保障该类元件与 PCB 良好连接，检测算法还需要对球形引脚的半径、间距以及数目进行检测，以检测出元件可能存在的焊球丢失、多余、错位或桥接的缺陷，或者尺寸和形状错误。

#### 4.3.3.1 BGA 元件检测算法原理

由于 BGA 等面阵列封装元件有日益广泛应用的趋势，国内外很多学者及

企业都展开了面阵列封装设备以及面阵列封装元件视觉定位技术的研究<sup>[50-52]</sup>。这些文献广泛的使用了如图 4-12 所示的 BGA 元件几何描述。

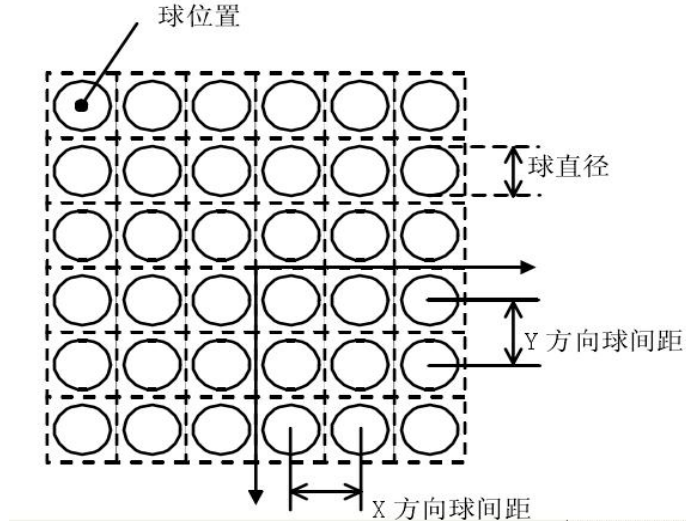


图 4-12 BGA 元件的几何描述

由图 4-12 所示的 BGA 元件的几何描述可知，BGA 元件的球形引脚一般成正方形对称的分布在芯片的底面，因此大部分 BGA 的定位算法都基于元件最外层的引脚位置<sup>[51]376</sup>，本文设计的算法也同样基于元件最外层的引脚。

尽管国内外有不少关于 BGA 元件定位技术的文献，但大部分文献并不涉及 BGA 元件焊球的完好性检查。本文考虑了 BGA 元件可能存在的焊球丢失、多余、错位、桥接以及尺寸和形状缺陷，并研究出了用于 BGA 元件定位和焊球缺陷检测的算法，该算法的大致流程说明如下：

- (1) 对原始图像进行预处理操作，滤除图像中存在的各种噪声；
- (2) 对滤波后的图像进行自动阈值分割，使用标记算法在生成的二值图像中标记出每个连通区域，并置为前景；
- (3) 对标记出的连通区域进行特征分析，根据连通区域的特征检测出焊球可能存在的尺寸、形状或桥接缺陷，如图 4-13 所示。其中，用圆形标记出的是尺寸不在容许误差范围内的连通域，用方形标记出的是圆度不不在容许误差范围内的连通域，同时用圆形和方形标记出的是两个焊球间存在的桥接缺陷；

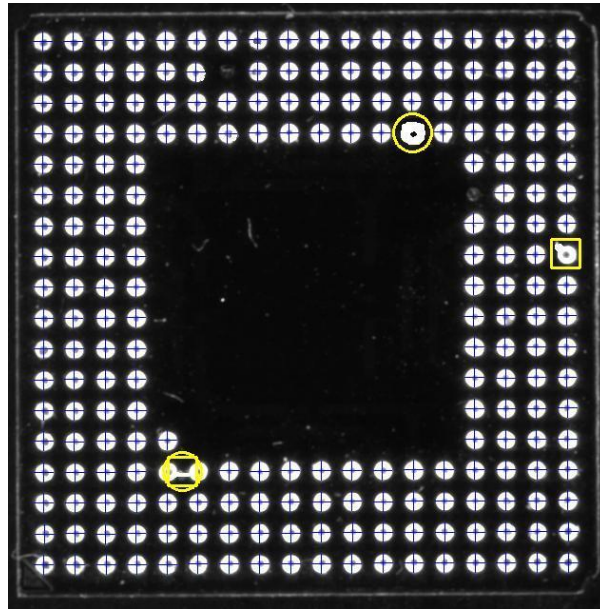


图 4-13 BGA 元件焊球缺陷的检测

(4) 采用一定的算法分割出元件外围的焊球，并按照其空间分布划分为 NORTH、SOUTH、EAST 和 WEST 四组，如图 4-14 所示；

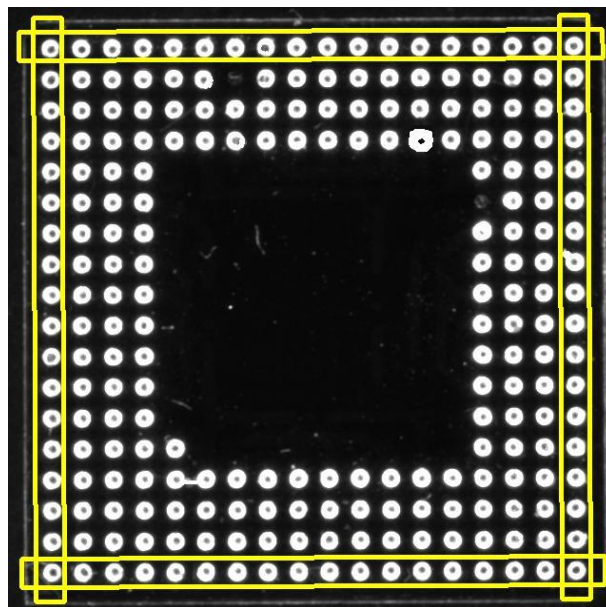


图 4-14 BGA 元件外围焊球分类结果

(5) 根据四组外围焊球的中心坐标计算出 BGA 元件的旋转角度以及中心点坐标。根据计算出的元件旋转角度及焊球间的标准行距、列距检查相邻焊球的



间距误差是否在允许范围之内,以及是否存在焊球丢失或多余等缺陷,如图 4-15 所示。图 4-15 中用红色十字线表示出元件的中心点坐标;红色矩形框表示出使用外围焊球所计算出的元件旋转角度;黄色菱形标记出多余的焊球;黄色斜十字线标记出焊球丢失或者错位的缺陷。

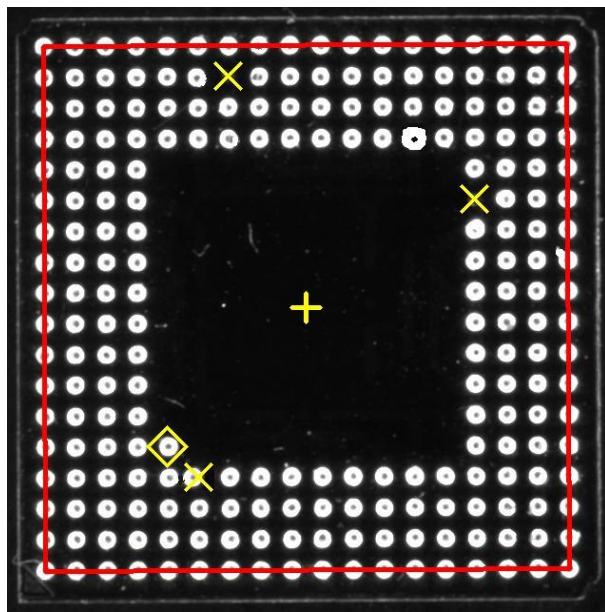


图 4-15 BGA 元件定位及焊球缺陷检测结果

(6) 通过以上分析,若 BGA 元件的焊球不存在任何缺陷,则返回 BGA 元件的旋转角度和中心坐标;若存在缺陷,则将该元件丢弃。

#### 4.3.3.2 BGA 元件检测算法实验

BGA 元件同 QFP 元件一样,均为尺寸较大的方形芯片,因此对元件旋转角度的测量误差较为敏感。算法对于元件旋转角度的精密度和灵敏度的测量方法与 4.3.2.3 中提供的方法相同,这里不再重复类似的实验。

这里仅对 BGA 元件检测算法的运行时间进行实验。软件编译环境为 VC++6.0。电脑配置为 Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU,主频 2.10GHz,内存 2GB。测试图片的尺寸为  $848 \times 815$  像素,其中图片中元件的尺寸约为  $610 \times 610$  像素。测得检测算法的运行时间约为 60ms,能够满足高档贴片机对于 BGA 元件检测实时性的要求。

## 4.4 本章小节

本章首先对贴片元件的封装形式进行分析,根据元件的特征对常用封装形

式的贴片元件分为三大类,并在每大类贴片元件中分别选取 CHIP、QFP 和 BGA 元件进行定位与检测算法的研究。本章为这三类贴片元件提出了较为新颖的算法,并通过详尽的实验来说明本章所研究算法的高执行速度、高精度以及强鲁棒性。另外,与大多数品牌的贴片机视觉系统相比,本章所研究的元件检测算法可以识别出图像中任意位置和旋转角度的贴片元件,因而不依赖于贴片头对贴片元件吸取精度的优点。



## 第五章 PCB 基准标志检测算法研究

### 5.1 引言

对 PCB 基准标志的可靠定位是实现任何贴片元件精确贴放的第一步。视觉系统通过对 PCB 基准标志的精确定位，实现了 PCB 坐标系向机器坐标系的变换。随着 PCB 向着小型化、高集成度的方向发展，贴片机、锡膏印刷机等 SMT 设备对检测基准标志的各项指标也提出了越来越高的要求。在 SMT 领域，常用的基准标志有圆形、十字形、矩形和菱形等形状，如图 5-1 所示，不同形状的基准标志采用的定位算法不同。由于圆形基准标志广泛适用于各种材质的 PCB，且具有便于制作和定位精度较高的优点，因而在实际应用中绝大部分的基准标志都制作成圆形。本章将对圆形基准标志的检测算法做重点研究。

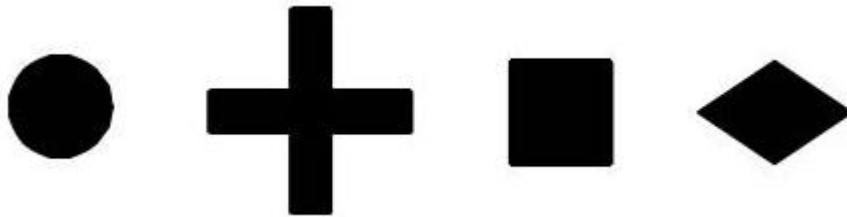


图 5-1 常用 PCB 基准标志形状

### 5.2 圆形基准标志的使用方法

一种经典的基准标志分布如图 5-2 所示。图中基准标志可以分为全局基准标志和局部基准标志，其中全局基准标志用来确定 PCB 的旋转角度以及在 X 和 Y 方向的偏移，以完成 PCB 坐标系向机器坐标系的变换。由于大型的 PCB 往往存在着翘曲的现象，因此通过全局基准标志的位置计算出的元件贴装坐标会有一定的偏差。为了避免 PCB 翘曲对 QFP 等精密元件贴装精度的影响，一般会在精密元件的对角位置做两个局部基准标志，元件的贴装坐标通过两个局部基准标志来修正。

由于基准标志的定位精度直接影响到 PCB 上所有元件的贴装精度，因此在 SMT 领域，对基准标志的定位精度提出了非常高的要求。当前大多数中高档贴片机对于贴片元件的贴放精度已经到达 50  $\mu\text{m}$  左右，因此 PCB 基准标志的定位精度应该在微米级别。另外，在实际生产条件下，来自制造工艺的氧化、电路

板的变形、镀锡和波峰焊料导致的各种变化可能导致基准标志的外观发生极大的改变。因此，基准标志的定位算法还必须对各种干扰有相当强的鲁棒性，才能提高 PCB 对位的成功率，减少人工的干预<sup>[47]144</sup>。

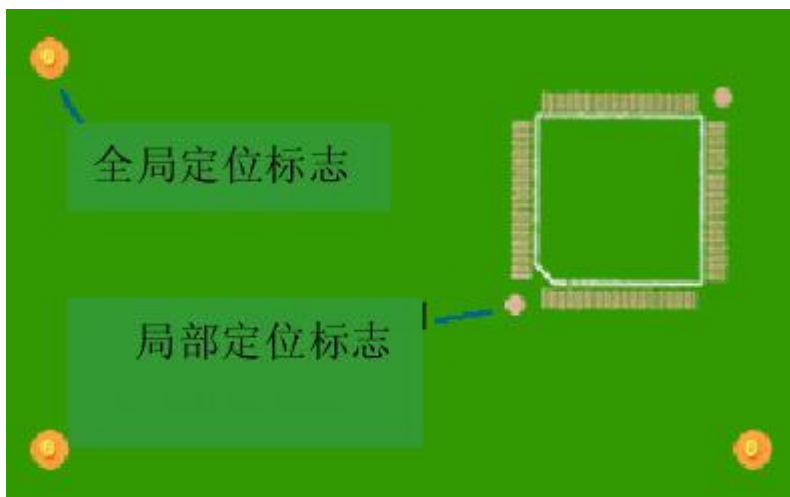


图 5-2 PCB 基准标志的分布

### 5.3 圆形基准标志检测算法研究

#### 5.3.1 圆形基准标志检测算法的原理

由于圆形基准标志在表面贴装技术中的广泛应用，许多文献都对圆形基准标志的定位算法做了研究<sup>[41,53-55]</sup>。常用的圆形检测的策略有重心法、HOUGH 变换及其改进方法<sup>[41]</sup>、投影法<sup>[53]</sup>、最小二乘法<sup>[54]</sup>以及模板匹配法<sup>[55]</sup>。其中重心法、投影法以及最小二乘法具有简单高效的优点，但受圆的形状的影响比较大，因此只适用于圆的质量较高的场合。HOUGH 变换法和模板匹配法鲁棒性较强，可以使用在图像质量比较差的场合，但计算复杂，耗时长，精度一般也只能达到像素级别。

以上文献大多集中于研究如何提高圆形检测算法的速度和定位精度上，而对来自于生产现场复杂干扰的研究不足，因此这些算法的鲁棒性还不能够得到完全的保证。本文在前人研究的基础上，提出了一种将改进的 HOUGH 变换算法和最小二乘算法相结合的圆形基准标志定位算法。该算法既具有较高的执行速度和定位精度，又对实际生产环境下各种干扰具有很强鲁棒性。该算法的大致流程说明如下：

- (1) 对原图像进行预处理操作，滤除图像中存在的噪声；
- (2) 对滤波后的图像进行自动阈值分割，使用标记算法在生成的二值图像中标记出每个连通区域，并置为前景；
- (3) 对二值图像中的连通区域进行特征提取，与事先设定的基准标志的标准特征向量相比较，选定各项特征符合要求的连通区域，如图 5-3 所示。

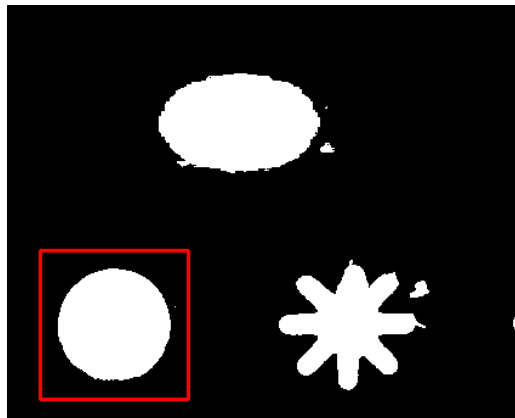


图 5-3 通过连通域特征分析排除图像中的干扰

- (4) 对图像进行边缘提取操作，并使用改进的 HOUGH 变换算法，快速确定圆形基准标志像素级精度的参数。
- (5) 使用亚像素边缘检测算法将基准标志边缘点坐标的精度提高到亚像素级别；
- (6) 使用最小二乘算法对边缘点坐标进行圆拟合，最终得到圆形基准标志亚像素精度的圆心坐标和半径，如图 5-4 所示。

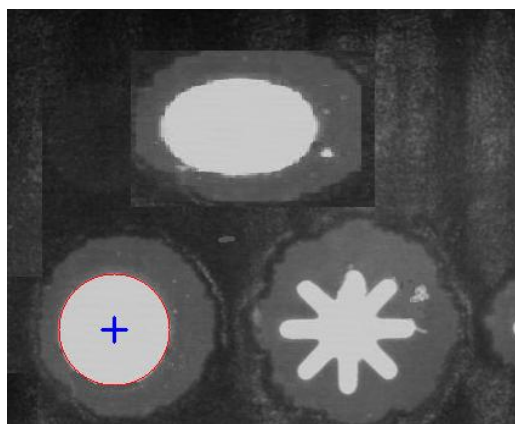
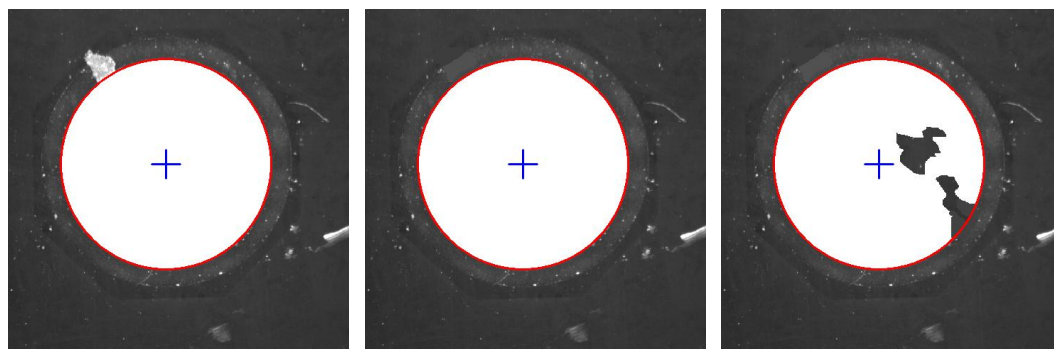


图 5-4 圆形基准标志的定位结果

### 5.3.2 圆形基准标志检测算法实验

本文将圆形基准标志的定位算法在 VC++6.0 环境下进行了测试。电脑配置为 Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU，主频 2.1GHz，内存 2GB。测试图片的尺寸为  $480 \times 480$  像素，其中图片中圆形基准标志的尺寸约为  $300 \times 300$  像素。由上文的分析可知，贴片机等 SMT 设备对于圆形基准标志的定位精度和鲁棒性要求非常高，因此下文将重点对这两个指标进行实验。

图 5-5 a)为使用基准摄像机拍摄的一张被焊锡所污染的圆形基准标志的图像，被污染部分位于基准圆的左上方；图 5-5 b)为将图 5-5 a)中被焊锡污染的部分擦除后的图像；图 5-5 c)为模拟来自生产工艺的氧化造成基准标志缺损的情况。定位三张图像中圆形基准标志的实验数据如表 5-1 所示。



a) 被焊锡污染的基准

b) 正常的圆形基准

c) 氧化后缺损的基准

图 5-5 各种情况下圆形基准标志的定位效果

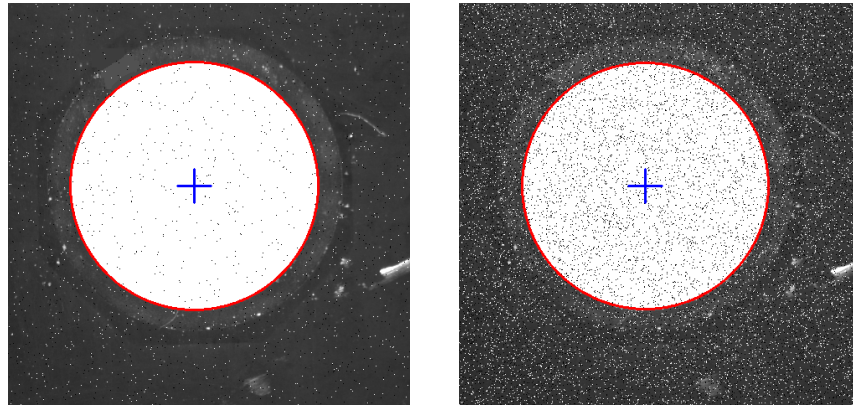
表 5-1 各种情况下圆形基准标志的定位数据

	圆心 X 坐标 (pixel)	圆心 Y 坐标 (pixel)	半径 (pixel)	定位时间 (ms)
正常基准	222.088	218.369	147.558	24
被焊锡污染基准	222.066	218.330	147.581	25
氧化后缺损的基准	222.049	218.341	147.533	25

由表 5-1 可知，圆形基准标志被图 5-5 a)中的多余焊锡污染后，圆的各个参数的定位误差分别为：-0.022 像素、-0.039 像素和 0.023 像素。本文使用的基准摄像机的分辨率约为  $15\mu\text{m}/\text{pixel}$ ，则由于焊锡污染导致的圆心定位误差仅  $0.67\mu\text{m}$ ，其影响可以忽略不计。对于图 5-5 c)测得的各项数据进行分析，可得

出类似的结论。

为了进一步验证算法的鲁棒性，在图 5-5 b)所示的原始图像中加入椒盐噪声，并逐步增大噪声的强度。图 5-6 a)和图 5-6 b)分别是当椒盐噪声的强度为一和十时，圆形基准标志的定位效果。



a) 椒盐噪声强度为一时的定位效果 b) 椒盐噪声强度为十时的定位效果

图 5-6 圆形基准标志加入椒盐噪声后的定位效果

表 5-2 记录了椒盐噪声的强度从一增加到十时，算法测得的圆形基准标志各项参数的误差数据。

表 5-2 噪声图像中圆形基准标志各项参数的测量数据

噪声强度	圆心 X 坐标 (pixel)	圆心 Y 坐标 (pixel)	圆半径 (pixel)	X 坐标误差 (pixel)	Y 坐标误差 (pixel)	半径误差 (pixel)	定位时间 (ms)
0	222.088	218.369	147.558	0.000	0.000	0.000	24
1	222.091	218.368	147.557	0.003	-0.001	-0.001	26
2	222.071	218.384	147.545	-0.017	0.015	-0.013	28
3	222.091	218.398	147.519	0.003	0.029	-0.039	28
4	222.088	218.397	147.545	-0.000	0.028	-0.013	32
5	222.087	218.362	147.510	-0.001	-0.007	-0.048	34
6	222.065	218.330	147.460	-0.023	-0.039	-0.098	38
7	222.135	218.300,	147.491	0.047	-0.069	-0.067	40
8	222.049	218.284	147.447	-0.039	-0.085	-0.111	44
9	222.105	218.312	147.457	0.017	-0.057	-0.101	49
10	222.057	218.405	147.406	-0.031	0.036	-0.152	51

从表 5-2 可以得出以下结论：本文所设计的圆形基准标志定位算法对椒盐噪声具有较强的鲁棒性。当存在椒盐噪声干扰时，圆心的定位误差最大仅有 0.09 个像素，半径的最大误差仅有 0.152 像素。由于本文所使用的基准摄像机的分辨率约为  $15\mu\text{m}/\text{pixel}$ ，因此在最坏情况下，椒盐噪声造成的圆心位移仅有  $1.4\mu\text{m}$ ，因此强椒盐噪声不会对圆形基准标志的定位造成严重影响。

另外，该算法的执行时间与图像中噪声的严重程度有关，这是因为图像中的椒盐噪声的强度会影响到标记算法的执行时间。在质量较好的图像中，定位算法的执行时间约为 25ms。即便在噪声最严重的图像中，概算法的执行时间也达到约 50ms，完全满足高档贴片机对于基准标志定位的实时性要求。

## 5.4 本章小节

本章首先简单的研究了 PCB 基准标志的种类及使用方法，然后重点分析了圆形 PCB 基准标志定位算法的原理，并在前人研究的基础上提出了兼顾执行速度、定位精度和鲁棒性的算法。该算法可以自动对图像进行分析，找出特征最符合用户要求的目标，并对该目标进行精确的分析与定位。本章还设计了大量的实验来验证生产现场的焊锡污染、氧化以及椒盐噪声对于基准标志定位精度的影响。实验表明，本章所设计的圆形基准标志定位算法无论在执行速度、定位精度和鲁棒性上都有着较高的指标，能够满足高档贴片机对于 PCB 基准标志定位算法多方面的要求。

## 结 论

本文对一个完整的拱架式贴片机视觉系统做了较为深入的研究。本文的主要研究内容可以分为三大部分：拱架式贴片机视觉系统的总体方案，图像采集系统的设计和硬件选型方法，以及贴片元件和 PCB 基准标志的定位与检测算法。本文还通过大量的实验验证了所设计的图像采集系统以及检测算法的可行性和实用性。本文取得的主要研究成果如下：

(1) 将拱架式贴片机视觉系统划分为光学成像系统、LED 照明系统、触发控制单元、目标定位与特征检测模块以及贴片元件特征数据库这五大模块。详细阐述了各大模块的功能和相互关系，并提出了视觉系统的性能指标。

(2) 本文为拱架式贴片机专门设计的 LED 照明系统对各类贴片元件具有很强的适应能力，能够为绝大多数贴片元件提供最佳角度及强度的照明。设计的光学成像系统可以在 LED 照明系统的配合下，在很短的曝光时间内拍摄到各种封装形式贴片元件的高质量图像，使得视觉系统具备了拍摄高速运动状态下贴片元件清晰图像的能力。

(3) 对图像处理与特征提取的基础算法进行了比较研究。对各种边缘检测算法、几何基元提取算法以及区域特征提取算法做了重点分析，并通过实验确定了适用于贴片机视觉系统的算法。对于基础算法的研究为实现贴片元件和 PCB 基准标志的识别、定位和检测打下了重要基础。

(4) 贴片元件的精确定位与特征检测算法是本文研究的重点内容。本文首先按照元件的特征将所有常用封装形式的贴片元件分为三大类，通过分类提高了视觉算法的通用性和灵活性。本文在三大类元件中各选取一种典型元件，并对其定位与检测算法进行了研究。与大多数品牌的贴片机视觉系统相比，本文研究的算法可以识别图像中任意位置和旋转角度的元件，因而不依赖于贴片头吸取元件精度的优点。该部分通过大量实验对算法的各项性能进行了验证，实验证明本文所研究的算法具有较高的执行速度、定位精度和强鲁棒性，而且能够准确识别出贴片元件可能存在的各类缺陷。

(5) PCB 基准标志的定位与检测算法也是本文的重点研究内容。本文首先介绍了 PCB 基准标志在 SMT 领域的使用方法，然后对使用最为广泛的圆形基准标志的定位算法进行了重点研究。本文充分的考虑了来自生产现场的复杂干扰，对

识别算法在焊锡污染、氧化、强噪声干扰下的定位效果进行了实验。实验表明，本文所设计的算法对以上各种干扰均具有很强的鲁棒性，因而是一种实用性很强的算法。

贴片机视觉系统是一个比较复杂的系统，由于时间限制，本人的工作主要集中在图像采集系统的设计与搭建，以及视觉算法的研究与实现上。除此之外，视觉系统与生产管理软件和控制系统的接口工作也是非常重要的研究内容，这将是下一步研究工作的重点。除此之外，由于缺少  $X-Y-\theta$  精密运动平台等实验设备，本文无法对发生微小位移前后的元件进行图像采集，因而也未能就整个视觉系统对于贴片元件的定位精度进行实验验证。因此，搭建测试整个视觉系统定位精度的硬件实验平台也是下一步工作的重要内容。



## 参考文献

1. Lee N C. Introduction to Surface Mount Technology[J]. Reflow Soldering Processes, 2001:1-18.
2. 立冬. 中国 SMT 自动贴片机市场占全球 40%[N]. 中国电子报, 2007-04-17 (C07).
3. Luo B, Zhang Y, Yu G Z, et al. ANN Ensembles Based Machine Vision Inspection for Solder Joints[C]//IEEE International Conference on Control and Automation(ICC A 2007). 2007: 3111-31115.
4. Acciani G, Brunetti G, Fornarelli G. Application of neural networks in optical inspection and classification of solder joints in surface mount technology[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2006, 2(3): 200-209.
5. 程志国, 孙小文, 莫锦秋, 等. 全视觉贴片机的控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2005, 13(7): 665-667.
6. 李秦川. 基于机器视觉的贴片机元件定位检测技术研究[D]. 西安: 西安理工大学学位论文, 2006.
7. 宋福民, 张小丽, 马如震. SMT2505 全视觉多功能贴片机的研制[J]. 电子工业专用设备, 2002, 31(4): 219-223.
8. 胡跃明, 杜鹃, 吴忻生, 等. 基于视觉的高速高精度贴片机系统的程序实现[J]. 计算机集成制造系统, 2003, 9(9): 760-764.
9. 王洪. 机器视觉元件辅助贴放技术研究[D]. 上海: 上海交通大学学位论文, 2002.
10. 朱爽宁. SMT 表面组装技术中贴片机精度提高的研究[D]. 天津: 天津大学, 2003: 5-18
11. 陈浙泊. 高动态范围成像技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学学位论文, 2009: 10-23.
12. Storm G, Henderson R, Hurwitz J E D. Extended Dynamic Range From a Combined Linear-logarithmic CMOS Image Sensor[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2006, 41(9): 2095-2106.
13. Golnabi H, Asadpour A. Design and Application of Industrial Machine Vision System[C]//International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing. 2007, 23(6): 630-637.

14. Wu H H, Yang J G, Hsu M M, et al. Automatic Measurement and Grading of LED Dies on Wafer by Machine Vision[C]//IEEE International Conference on Mechatronics. 2007: 1-6.
15. Richard P W, Asmuth J C, Green G L, et al. A Machine-vision System for Iris Recognition[J]. Machine Vision and Applications, 1996, 9(1): 1-8.
16. Muthu S, Gaines J. Red, Green and Blue LED-based White Light Source: Implementation Challenges and Control Design[C]//Industry Applications Conference. 2003: 515-522
17. Ko K W, Kim J W, Cho H S, et al. Enhancement of Placement Accuracy for SMD via Development of a New Illumination System[J]. Optomechatronic System, 2001, 4190: 51-61.
18. Burel G, Bernard F, Venema W J. Vision Feedback for SMD Placement Using Neural Network[C]//IEEE International Conference of Electronic Packing, 1995: 1491-1496.
19. Wei L S, Jiao Z X. Visual Location System for Placement Machine Based on Machine Vision[C]//IEEE International Symposium on Embedded Computing. 2008: 141-146.
20. 陈向伟. 机械零件计算机视觉检测关键技术的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
21. Zhai L, Dong S P, Ma H L. Recent Methods and Applications on Image Edge Detection[C]//International Workshop on Geoscience and Remote Sensing. 2008: 332-335.
22. Zhang J R, Jiang X Z. Research on Edge Extraction with Level Set Method[C]//The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, 2008, XXXVII(Part B4): 43-438.
23. Ulupinar F, Medioni G. Refining Edges Detected by a LoG Operator[J]. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 1990, 51(3): 275-298.
24. 朱铮涛. 基于计算机视觉图像精密测量的关键技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2004: 45-54.
25. Canny J. A Computational Approach to Edge Detection[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6): 679-698.
26. Deriche R. Using Canny's Criteria to Derive a Recursively Implemented Optimal Edge Detector[J]. International Journal of Computer Vision, 1987, 1(2):

- 167-187.
27. Takeshima H, Kaneko T. Image Registration Using Subpixel-shifted Images for Super-resolution[C]//IEEE International Conference on Image Processing, 2008: 2404-2407.
  28. Sziranyi T. Subpixel Pattern Recognition by Image Histograms[J]. Pattern Recognition, 1994, 27(8): 1079-1092.
  29. Ruyten W. Subpixel localization of synthetic refereces in digital images by use of an augmented template[J]. Optical Engineering, 2002, 41(3): 601-607.
  30. Hiroi T, Maeda S, Kubota H, et al. Precise visual inspection for LSI wafer patterns using subpixel image alignment[C]// Proceedings of the Second IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, 1994: 26-34.
  31. Ohtani K, Baba M. A Fast Edge Location Measurement with Subpixel Accuracy[C]//IEEE International Conference on Instrumentation and Measurement Technology, 2001(3): 2087-2092.
  32. Yang X Q, Zhang C, Liu Y, et al. A Geometric Method for Subpixel Boundary[C]//IEEE International Conference on Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2007: 208-212.
  33. 李庆利, 张少军, 李忠富, 等. 一种基于多项式插值改进的亚像素细分算[J]. 北京科技大学学报, 2003(3): 280-283.
  34. Tabatabai A J, Mitchell O R. Edge location to subpixel values in digital imagery[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intenlligence, 1984, 6(2): 188-201.
  35. Lyvers E P, Mitchell O R, Akey M L, et al. Subpixel Measurements Using a Moment-based Edge Operator. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(12): 1293-1309.
  36. 屈玉福, 浦昭邦, 王亚爱. 视觉检测系统中亚像素边缘检测技术的对比研究[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(4): 460-462.
  37. Illingworth J, Kittler J. A survey of the Hough transform[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1988, 44(1): 87-116.
  38. Hart P E. How the Hough Transform was Invented[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2009, 26(6): 18-22.
  39. Leandro A F, Manuel M O. Real-time line detection through an improved Hough transform voting scheme[J]. Pattern Recognition, 2008, 41(1): 299-314.

40. Zhu Y X, Carragher B, Mouche F, et al. Automatic Particle Detection Through Efficient Hough Transforms[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2003, 22(9): 1053-1062.
41. 柏长冰, 齐春, 宋福民, 等. Hough 变换快速检测圆形 PCB Mark[J]. 光电工程, 2005, 32(9): 75-78.
42. Peckinpugh S H, Holyer R J. Circle detection for extracting eddy size and position from satellite imagery of the ocean[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(2): 267-273.
43. 张铮. 数字图像处理与机器视觉[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010: 379-397.
44. Hu M K. Visual pattern recognition by moment invariants[J]. IRE Transactions on Information Theory, 1962, 8(2): 179-187.
45. 袁鹏, 胡跃明, 刘海明. 贴片机屏蔽罩视觉定位算法研究[J]. 计算机测量与控制, 2009, 17(6): 1141-1174.
46. 何绪昊, 胡跃明, 戚其丰. 芯片检测中不变几何矩算法的研究[J]. 电子工艺技术, 2008, 29(1): 8-11.
47. 鲜飞. 贴片机视觉系统综述[C]//中国高端 SMT 学术会议论文集. 张家界: 2007: 139-145.
48. 毛磊. 贴片机高精度视觉检测技术的研究[D]. 南京: 河海大学, 2008: 40-49.
49. <http://www.chinabaike.com/z/keji/dz/pcb/654404.html>
50. Yamauchi A. Submicron flip chip bonding technology for opto-electronic devices[C]//IEEE Electronic Components and Technology Conference, 2000: 1743-1746.
51. Gao H X, Hu Y M, Liu H M, et al. A Fast Method for Detecting and Locating BGA Based on Twice Grading and Linking Technique[C]//IEEE International Symposium on Intelligent Control, 2007: 375-378.
52. Drozd Z, Hackiewicz H, Jezior H, et al. New Flip-chip assembly system for prototyping and process investigations[C]//IEEE 24th International Spring Seminar on Electronics Technology, 2001: 68-72.
53. Wu H H, Zhang X M, Kuang Y C, et al. A Real-time Machine Vision System for Solder Paste Inspection//IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2008: 205-210.

54. Moura L, Kitney R. A Direct Method for Least-Squares Circle Fitting[J]. Computer Physics Communications, 1991, 64(1): 57-63.
55. 柏长冰, 齐春, 杨莹, 等. Hausdorff 匹配快速检测 PCB 基准标记[J]. 光电子·激光, 2006, 17(4): 498-501.

## 哈尔滨工业大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《拱架式贴片机视觉系统的研究》，是本人在导师指导下，在哈尔滨工业大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签字

丁长兴

日期： 2011 年 6 月 25 日

## 哈尔滨工业大学硕士学位论文使用授权书

《拱架式贴片机视觉系统的研究》系本人在哈尔滨工业大学攻读硕士学位期间在导师指导下完成的硕士学位论文。本论文的研究成果归哈尔滨工业大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解哈尔滨工业大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门送交论文的复印件和电子版本，允许论文被查阅和借阅。本人授权哈尔滨工业大学，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。

保密 ☐，在      年解密后适用本授权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名：

丁长兴

日期： 2011 年 6 月 25 日

导师签名：

刘国良

日期： 2011 年 6 月 25 日

## 致谢

在毕业论文完成之际，我要向我的导师刘国良副教授和高会军教授致以深深的谢意。特别是高会军教授，感谢他给我机会去做这个综合性比较强而且充满挑战性的课题。回想硕士阶段的两年时光里，每当课题遇到困难时，都是老师的指导、支持与坚持才使得本课题度过一个个难关。两年来，老师对学生的关心、对科研的严谨以及对工作的热忱都给我留下了深刻的印象。两位导师对我做人、做事和做研究的方法与观念都产生了极大的影响，在此再次向两位恩师表示感谢。

感谢智能控制与系统实验室所有做计算机视觉方面研究工作的同学，特别感谢本课题组的李瑛和钟贤德师弟，是你们活跃的思维、热心的帮助和辛勤的工作才使得本课题顺利完成。

感谢实验室的各位老师和全体师兄姐妹对于我生活、学习和科研方面的帮助；感谢大家共同维持的实验室良好科研气氛与环境；特别感谢刘宁老师、于金泳老师、孙光辉老师、王庆领师兄、由嘉师兄、苏晓杰师兄、舍友王建锋和师弟卫作龙，大家一起努力的日子，将是我一生中最难以忘怀的时光。

感谢工大 09 级控制科学与工程专业的所有同学，大家在冰城哈尔滨的相识是难得的缘分。

最应该感谢的还是在远方挂念我的父母，你们对我的爱护、理解和支持，将是我一生勇往直前的不竭动力。