

北京交通大学

硕士学位论文

印刷电路板智能检测系统设计

姓名：李响

申请学位级别：硕士

专业：安全技术及工程

指导教师：谭南林

20061201

## 中文摘要

**摘要：**本文以数字图像处理方法为研究内容，采用机器视觉测技术方案，运用模板参考比较的缺陷检测方法来设计并实现印刷电路板智能检测系统。

在印刷电路板的生产过程中，会产生外观不整洁、阻焊不均匀、文字偏移、线路及焊盘破损等缺陷。对成批印刷电路板逐一进行检测时，需要及时发现各种缺陷并找出缺陷位置。印刷电路板智能检测设备的开发与应用成为解决这一问题的关键。为此，本文设计并实现了基于机器视觉检测技术的印刷电路板智能检测系统。该系统能够采集并分析印刷电路板的图像，从而发现印刷电路板的缺陷，实现印刷电路板的自动检测功能。同时，为了提高系统的检测能力与检测速度，在图像采集、图像预处理以及电路板缺陷的提取与识别方面进行了大量的工作。在图像采集方面，本文设计并实现了照明光源的光强自调整方法，完成了图像位图格式的快速转换，在保证图像质量的前提下提高了图像采集的速度；在图像的预处理方面，为了提高印刷电路板数字图像的信噪比，采用了灰度修正、图像平滑、中值滤波等优化图像质量的预处理算法；在电路板缺陷的提取与识别方面，采用基于序贯相似性检测的模板匹配算法与差影检测算法相结合的数字图像处理方法，实现了印刷电路板图像与模板图像之间的快速对准与参考比较。

系统的可行性与有效性在实验室环境下得到了验证。实验结果分析表明，该系统能够满足以较快的速度检测出电路板微小缺陷的要求。

**关键词：**印刷电路板；数字图像处理；机器视觉检测技术；模板参考比较

**分类号：**TP206+.3

## ABSTRACT

**ABSTRACT:** In this thesis, digital image processing methods are studied. And a intelligent detection system, which is based on the template reference comparison method and machine vision inspection technology, is designed for PCB ( Printed Circuit Board ).

In the production process of PCB, there are many defects such as surface smudginess, solder mask unevenness, text excursion, pad damage, track damage etc. The same specs of PCBs should be inspected one by one in order to find and fix their defects. The development and application of PCB detection equipments is the key to solve this problem. The intelligent detection system based on the machine vision inspection technology is designed for this. This system is capable of finding out and identifying the defects of PCBs with capturing and analyzing their images. Meanwhile, in the interest of detectability and speed, great effort is made for image capture, image preprocesses, defect detection and identification. In the procedure of image capture, a equipment of self-adjusting luminous intensity is desired and a method for the image data format fast conversion is achieved so that the speed of image capture is improved, which is under the premise of guaranteeing the image quality. In the procedure of image preprocesses, some image preprocesses algorithms such as Gray Balance, Image Smooth, Median Filter are used for enhancing the SNR (Signal Noise Ratio) of the PCB image. In the procedure of defect detection and identification, a series of digital image processing algorithms are adopted by the way of combining the SSDA (Sequential Similarity Detection Algorithm ) Template Matching Algorithm with Image Subtraction Algorithm. This process achieve the fast alignment and reference comparison between the PCB image with the template image.

The feasibility and validity of this system have been tested under laboratory environment. The experimental results show that this system is capable of detecting the micro defects with a relative high speed.

**KEYWORDS:** PCB (Printed Circuit Board) ; AOI(Automatic Optical Inspection) ; Digital Image Processing Technique; Multi-template Reference Comparison Method.

**CLASSNO:** TP206+.3

## 致 谢

本学位论文是在导师谭南林教授的亲切关怀和悉心指导下完成的。谭老师严谨求实的科研态度、执著追求的敬业精神、敏锐的洞察力以及平易近人的工作作风，无不使作者深受启迪，并将永远铭记在心。几年来，谭老师不仅一直对作者的课题研究和学位论文进行了精心指导，而且对本人的学习生活都给予无微不至的关心。值此论文脱稿之际，谨向导师表示衷心的感谢和深深的敬意。

在课题研究和论文撰写过程中，也得到了实验室苏树强、张冬泉、张乐乐、焦凤川和吴斌五位老师的具体指导和帮助。他们给了我很多建议，积极为我创造实验条件，才使我的论文工作顺利地完成。在课题的技术难点上，谭老师和苏老师进行了有益的指导，为作者完成课题和学位论文起了很大的帮助。在此向他们表示感谢。

在攻读硕士的两年半里，实验室的各位同学也在日常工作和学习中给了我极大的鼓励和帮助，他们是刘永新、杨亮、张勇、李国正、于宁等，我在此一并表示谢意。

另外，父母和亲人在漫长的求学历程中给予了作者最大的理解和支持，以及无限的关怀和奉献，值此学业完成之际，特向远方的父母和亲人表示深深的谢意和衷心的祝福。

最后，向所有关心和帮助过我的朋友表示衷心的感谢！

李 响

二零零六年十二月于北京交大

## 1 引言

印刷电路板是以绝缘板为基材加工成的一定尺寸板。该板面上至少有一个导电图形和所有设计好的孔(如元件孔,机械安装孔及金属化孔等),以实现元器件之间的电气互连。在印刷电路的各种制造方法中,最常用的是光刻法和网印刻蚀法。在一块绝缘板上覆有铜箔,利用照相法或丝网漏印法,在铜箔上按照所要求的电路图淀积上一层保护膜,接着把板放入酸槽中(对照相形成的薄膜而言)或利用刻蚀法(对丝网形成的薄膜而言)去掉未被保护的铜,留下来的铜层正好就是电路的布线图形<sup>[1]</sup>。

印刷电路板是电子设备中不可缺少的重要部件,在电子设备中起着电气和机械的双重连接作用。在高级及微波电路中,电路板本身还可以充当电路元件。例如导电铜箔及绝缘基材(电介质)可以构成电容、电阻、微带线等。电子设备采用印刷电路板可以缩小体积,减轻重量,降低成本,实现组装的规范化,提高装配的密度和整机可靠性。

### 1.1 选题背景

现代电子设备性能的优劣,不但受电子元件本身质量和性能的影响,而且很大程度上取决于印刷电路板质量的好坏。由于生产现场各种环境因素的影响,加工制作过程中各种误差的存在,电路板在生产制造过程中有可能产生各种各样的缺陷。因此,对印刷电路板的缺陷进行在线检测是保证电路板质量的必要环节。

在过去,生产厂家为保证印刷电路板质量,都是靠人工对印刷电路板进行检测。这种检测方式不但效率低,劳动强度大,而且由于人的主观因素的影响,检测精确性和可靠性大打折扣,同时工人也无法进行长时间的工作。随着计算机技术的发展和制造工艺的提高,现今的印刷电路板(如计算机主板或BDA板)已变得非常复杂:布线密度高,过孔间距小,已经达到用肉眼难以分辨的地步。加上印刷电路板是大批量生产,而现代生产质量管理越来越要求对零部件、产品进行百分之百的质量检验,而非抽样检查。所有这些都决定了单靠人工检测已无法适应现代大批量、高密度印刷电路板生产的需要,必须研制出一套高性能的自动检测设备<sup>[2]</sup>。这不仅具有很好的经济价值,更是促进电子工业发展的关键。

在印刷电路板制造业过程中的各个阶段都需要进行质量检测以保证产品质量,但是各个阶段的检测所起的作用是不同的。图 1-1 列出了多层印刷电路板的制造工艺过程及质量检测站设置的情况<sup>[1]</sup>。在内层板与外层板压合前进行的检测以

及最终成品板表面线路层的检测在整个工艺过程中对于保证生产质量、减少报废率的作用最为明显。本文所要研究的就是在压合前对内层印刷电路板基板的检测以及压合后对印刷电路板表面的缺陷进行检测和识别。

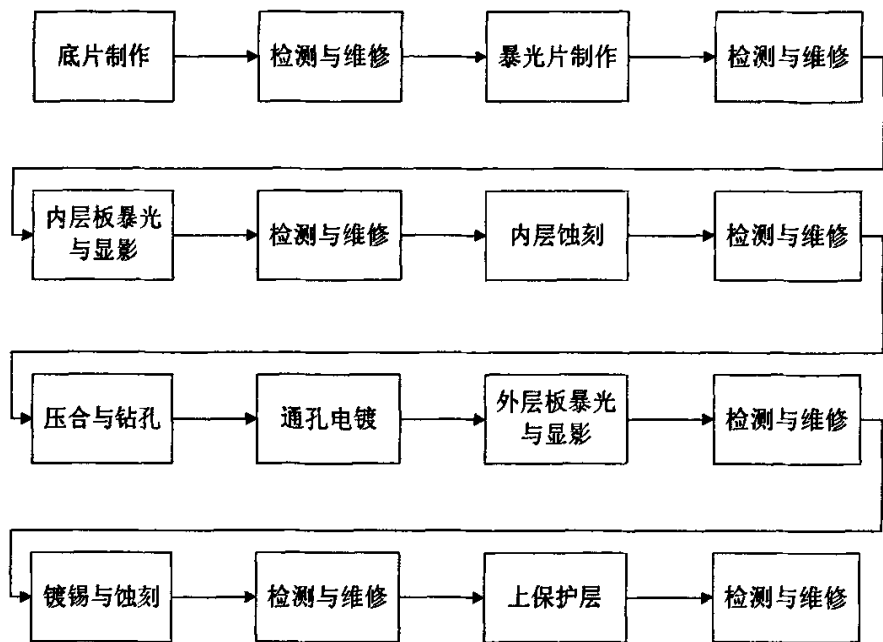


图 1-1 印刷电路板简要工艺流程

Fig. 1-1 Summary PCB Process Flow Chart

1.2 印刷电路板检测的发展现状

对印刷电路板缺陷检测的研究从二十世纪七十年代开始就没有间断过。其主要有电学检测、光学检查两种检查方法，也可按照其接触方式分为接触式测量和非接触式测量两种方法<sup>[3]</sup>。

1.2.1 电学检测法

电学检测法<sup>[3]</sup>，由于它要借助于与电路板接触的探针传递电信号，所以这种方法又可以称为接触式测量法。电学检测法可以理解为计算机控制的自动在线检测 ICT(In-Circuit Tester)，它将被测电路板固定于夹具上，选取  $n$  个检测点（通常  $n$  由电路板上焊盘或过孔的数量决定），通过一套特制的“针床”和选择开关阵列，将各检测点与在线检测系统相连。这时在线检测系统将电路板视为具有  $n$  个节点的网络，分别测得各结点间的电流与电压的关系（交流或直流）和某些结点对之间

的传输特性,结合预先录入的被测电路板的正确数据、和故障数据(故障字典),运用网络算法和计算机的数据处理技术,可以快速得到检测结果,准确找到故障点。整个过程由计算机控制自动进行,一般检测一块电路板只需几十秒的时间。显然,检测点的数目越多,对故障点的定位就越精确,但花费的时间也越多。

以上电学检测故障诊断方法,其过程需要经过检测和分析两个基本环节,因此其故障诊断策略不具有智能性,只是一种机械的数据比对分析,每一次故障诊断都需要进行大量的运算工作。其缺点是:对每一批诊断对象事先都要花很长时间去建立一组图像或网络参数数据库,另外,电学检测法还要特制一副“针床”。

### 1.2.2 光学检测法

光学检测法<sup>[3]</sup>主要是依靠分析印刷电路板的反射光或者透射光所形成的图像来检测印刷电路板的质量。光学检查又分为:可见光自动光学检查 AOI(Automatic Optical Inspection)和 X 光透视检查 AXI(Automatic X-ray Inspection)两种<sup>[4]</sup>。都是通过对待检电路板样品拍照成像后,通过计算机图像识别技术查找不良焊接点、连焊点、铜铂断裂点、短路点,或错装、漏装的元器件。

光学检测法是一种光学检查故障诊断方法<sup>[5]</sup>,其过程也需要经过检测和分析两个基本环节,但由于可以借助计算机的强大数据处理能力,它可以做到:高效、快速、准确。目前国内外许多研究单位和公司进行了相关检测设备的研究开发。

国外这方面的研究工作早在二十世纪七十年代就已经开始,所提出的电路板检测方法可归纳为三类:基于参考比较的方法、非参考检测方法和混合型检测方法。第一类方法采用点对点(或特征对特征)比较,它利用了待检印刷电路板的完整信息。这类方法主要有:图像相减法、特征匹配法、模板匹配法、相位图比较法、图匹配法等。第二类方法采用待测印刷电路板的一般特性,而不是特定的一个待测印刷电路板的信息。它不需要任何参考模式,如果待测模式不符合设计规则,就认为不合格或有缺陷,无需逐点比较待测印刷电路板图像和标准图像。这类方法主要有:膨胀收缩法、基于设计规则检验法、边界分析法等。第三类方法是上述二类方法的综合。这类方法有:基于边界分析的模式检测法、圆形模式匹配法、自学习法等<sup>[6]</sup>。目前国外已经研制出这类检测系统的产品,如以色列 Orbotech 公司的 Vision-300AP 系列,美国 Cyberoptics 公司的 KS 系列等<sup>[6]</sup>。

国内在这方面的研究工作起步不久,虽然没有见到相应检测设备实际投入工业应用的相关报导,但是已有许多缺陷检测的研究成果被提出。其中包括利用 Hough 变换判断标志形状和位置、将一种基于灰度期望值的图像二值化算法应用于印刷电路板检测系统以及对印刷电路板智能检测策略优化的研究<sup>[7]</sup>。

就目前国内情况来看,电子相关产业的生产及检测设备大多依赖进口。由于进口设备价格昂贵,给国内印刷电路板厂家带来了巨大的经济压力,而且这些设备往往不适合国内操作人员的习惯,在使用过程中不能充分利用其功能,造成了资源的极大浪费。因此,自行研制出性能优越、价格相对较低的电路板智能检测系统成为当前一个重要的研究课题<sup>[8]</sup>。

### 1.3 机器视觉检测技术

美国制造工程师协会(SME Society of Manufacturing Engineers)机器视觉分会和美国机器人工业协会(RIA Robotic Industries Association)的自动化视觉分会对机器视觉下的定义为:“机器视觉是通过光学的装置和非接触的传感器自动地接收和处理一个真实物体的图像,以获得所需信息或用于控制机器人运动的装置”<sup>[4]</sup>。现代机器视觉系统模型如图 1-2 所示。

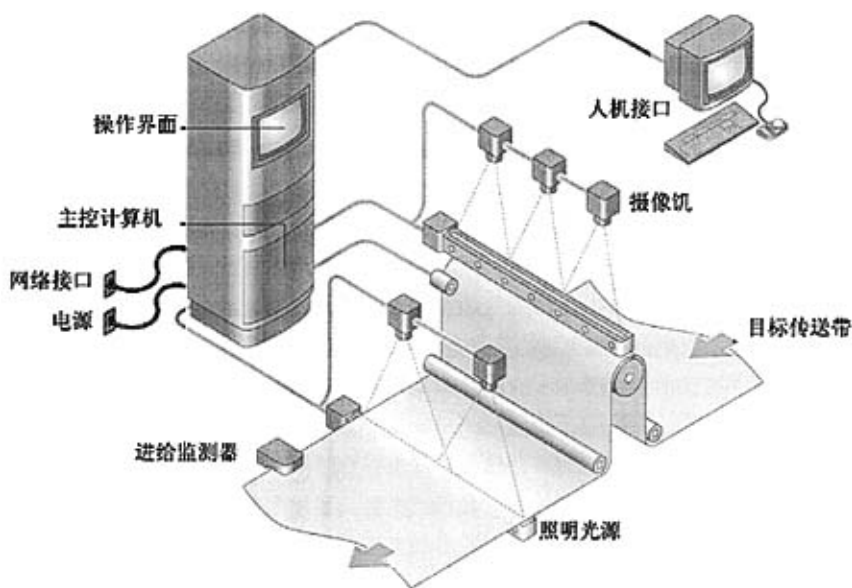


图 1-2 现代机器视觉系统模型

Fig. 1-2 Modern Machine Vision System Model

在现代工业自动化生产中,涉及到各种各样的检验、生产监视及零件识别应用,例如零配件批量加工的尺寸检查,自动装配的完整性检查,电子装配线的元件自动定位,IC 上的字符识别等。通常人眼无法连续、稳定地完成这些带有高度重复性和智能性的工作,其它物理量传感器也难有用武之地。由此人们开始考虑



利用光电成像系统采集被控目标的图像，而后经计算机或专用的图像处理模块进行数字化处理，根据图像的像素分布、亮度和颜色等信息，来进行尺寸、形状、颜色等的判别。这样，就把计算机的快速性、可重复性，与人眼视觉的高度智能化和抽象能力相结合，由此产生了机器视觉的概念<sup>[9]</sup>。

一个成功的机器视觉系统是一个经过细致工程处理来满足一系列明确要求的系统。当这些要求完全确定后，这个系统就设计并建立来满足这些精确的要求。机器视觉的优点包括以下几点：

#### (1) 精度高

作为一个精确的测量仪器，设计优秀的视觉系统能够对上千或更多部件逐一进行空间测量。因为此种测量不需要接触，所以对脆弱部件没有磨损和危险。

#### (2) 连续性

视觉系统可以使人们免受疲劳之苦。因为没有人工操作者，也就没有了人为造成的操作变化。多个系统可以设定单独运行。

#### (3) 成本效率高

随着计算机处理器价格的急剧下降，机器视觉系统成本效率也变得越来越。一个价值 10000 美元的视觉系统可以轻松取代三个人工探测者，而每个探测者每年需要 20000 美元的工资。另外，视觉系统的操作和维持费用非常低。

#### (4) 灵活性

视觉系统能够进行各种不同的测量。当应用变化以后，只需软件做相应变化或者升级以适应新的需求即可。

许多应用满意过程控制（SPC）的公司正在考虑应用机器视觉系统来传递持续的、协调的和精确的测量 SPC 命令。在 SPC 中，制造参数是被持续监控的。整个过程的控制就是要保证这些参数在一定的范围内。这使制造者在生产过程失去控制或出现坏部件时能够调节过程参数。

机器视觉系统比光学或机器传感器有更好的可适应性。它们使自动机器具有了多样性、灵活性和可重组性。当需要改变生产过程时，对机器视觉来说“工具更换”仅仅是软件的变换而不是更换昂贵的硬件。当生产线重组后，视觉系统往往可以重复使用<sup>[9]</sup>。

## 1.4 主要内容

为了提高印刷电路板的检测效率，本文设计并开发印刷电路板智能检测系统，主要用于对印刷电路板成板以及未压合前内层基板的常见缺陷的检测。系统采用低角度高密度 LED 阵列光源、CMOS 数字摄像机，提取待测印刷电路板图像，运

用数字图像处理方法和模板参考比较法来检测和识别缺陷，从而实现印刷电路板的自动检测。

主要研究工作包括印刷电路板图像的采集和预处理、印刷电路板的缺陷特征提取与识别研究以及相关算法的软件实现等。

主要内容有：

(1) 印刷电路板图像的采集。这部分完成了对数字摄像机与照明光源的控制，实现了图像数据的采集和格式转换。

(2) 印刷电路板图像的预处理。针对不同环境噪声的影响，为了提高印刷电路板数字图像的质量，研究并采用了几种有效的图像预处理算法。

(3) 模板匹配与差影检测算法的运用。印刷电路板图像与模板图像间的匹配是提取印刷电路板缺陷的前提，它实现了印刷电路板图像与模板图像在像素空间的对准。在此基础上，运用差影检测技术从印刷电路板的数字图像中提取缺陷。

(4) 印刷电路板缺陷图像的分割算法研究。该算法可以划分出缺陷在印刷电路板图像中的区域，从而得到印刷电路板中的缺陷部位。

2 印刷电路板智能检测系统的总体结构及数学模型

机器视觉检测技术是用计算机来分析一个图像并得出结论。机器视觉检测技术有两种应用。第一，探测部件，光学器件允许处理器更精确的观察目标，对目标的合格性做出判断；第二，创造部件，即运用复杂光学器件和软件相结合直接指导制造过程<sup>[10]</sup>。本文针对印刷电路板的特点，采用了机器视觉检测技术的第一种应用。

2.1 印刷电路板智能检测系统的方案选择

基于机器视觉检测技术的印刷电路板检测方法可归纳为三类：基于参考比较的方法、非参考检测方法和混合型检测方法<sup>[11]</sup>。根据具体实际情况的不同，所选取的方法也应有所不同。因此根据印刷电路板的具体缺陷特征来确定系统的研究目标，从而选择系统的具体方案。

2.1.1 研究目标

印刷电路板主要缺陷是由于生产过程中某一流程的制造不合格所产生，主要表现在外观、阻焊、文字、线路、焊盘以及过孔上。表 2-1 列出了一些常见的印刷电路板缺陷。

表 2-1 印刷电路板常见缺陷  
Table 2-1 Common Defects of PCB

分类	具体缺陷
外观	1. 板面含有粉尘、水渍、斑点、污物、指印 2. 面板松香不均匀 3. 板材变形扭曲 4. 板面含有星点、刀痕 5. 板面烤焦发黑 6. 线路裸露
阻焊	1. 颜色不均匀 2. 阻焊上焊盘 3. 孔内有阻焊 4. 阻焊起泡 5. 底层污染 6. 阻焊划伤 7. 多阻焊或少阻焊 8. 阻焊不干
文字	1. 文字偏移 2. 文字错漏 3. 文字模糊
线路	1. 线路有缺口 2. 线过粗过细 3. 线路毛刺短路 4. 线路空洞针孔
焊盘	1. 焊盘偏移 2. 焊盘破损 3 焊盘堆锡
过孔	1. 孔多、孔少 2. 孔大、孔小 3. 孔未钻透 4. 孔变形 5. 塞孔

对于这些常见的缺陷，需要对压合前内板以及成品板进行质量检测。为了满足这一需要，本文首先确定了研究目标。即设计一套准确快捷的印刷电路板智能

检测系统,使其可检的缺陷包括:断路、短路、电路漏印、缺孔、毛刺、缺口、针孔、孔位偏移、铜渣、线宽违例(线宽过大或者过小)、间距违例(间距不足)等;缺陷漏检率小于0.5%,误差率小于3%;最大可检测的电路板的尺寸为300mm×400mm;检测精度范围为0.05mm~0.1mm;检测的时间保证在少于0.5s/image。

根据以上目标要求,在高效和经济的前提下,采用模板参考比较的方法,即将采集来的待测印刷电路板图像与已有的完好的同类印刷电路板模板图像进行参考比较,从而找出待测印刷电路板的缺陷特征。这种方法充分利用了待检印刷电路板的完整信息,保证了图像处理快捷方便且准确性高。

### 2.1.2 印刷电路板智能检测系统的总体结构

印刷电路板智能检测系统是一个典型的机器视觉检测系统,它由硬件系统和软件系统组成。前者是检测系统的基础,后者是检测系统的核心和关键。两者相辅相成,缺一不可。

#### (1) 硬件系统组成

印刷电路板智能检测系统的硬件系统组成如图2-1所示。其硬件由平移机械工作台、水平摄像机传送带、图像采集系统、照明系统和计算机系统等构成。

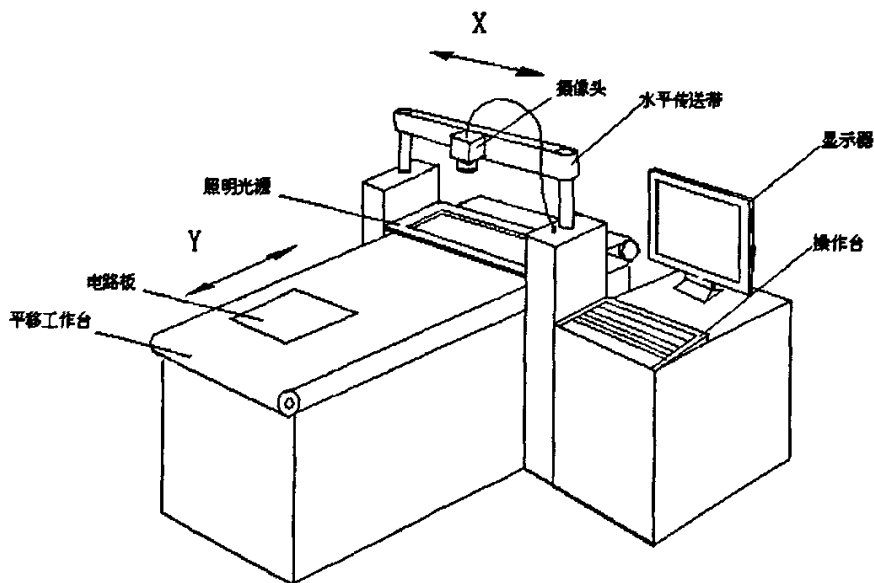


图 2-1 印刷电路板智能检测系统的硬件示意图

Fig. 2-1 Hardware Schema of PCB Intelligent Detection System

一个大的电路板由于数字摄像机的精度限制，往往一次采集难以包括全局的信息，所以就要对电路板进行分块多次采集，每次采集和处理电路板一个局部的图像，最后再将各块图像的处理结果拼接起来得到整体结果。由摄像机在 X 方向的平移和工作台在 Y 方向的平移即可保证印刷电路板相对于摄像机在整个平面内的平移自由度，从而保证了印刷电路板所有区域的可测性。照明系统采用高密度面 LED 光源低角度照明，保证了印刷电路板反射光的均匀，从而使得其特征清晰可辨。计算机系统采用工业 PC 以及高分辨率液晶显示器。

(2) 软件系统组成

印刷电路板智能检测系统的软件由用户界面、光强自调整、图像采集与预处理、步进电机驱动等几部分组成。用户界面模块是人机交互的通道，是系统对外的窗口。它向用户直观的显示检测过程和检测结果，并提供交互的操作方式。光强自调整部分自适应控制光源的光强，实现光源光强的自调整以及摄像机曝光率的自调整。它与图像采集系统和照明系统统一构成整个智能检测系统的眼睛，为系统采集高质量的目标图像提供了保证。

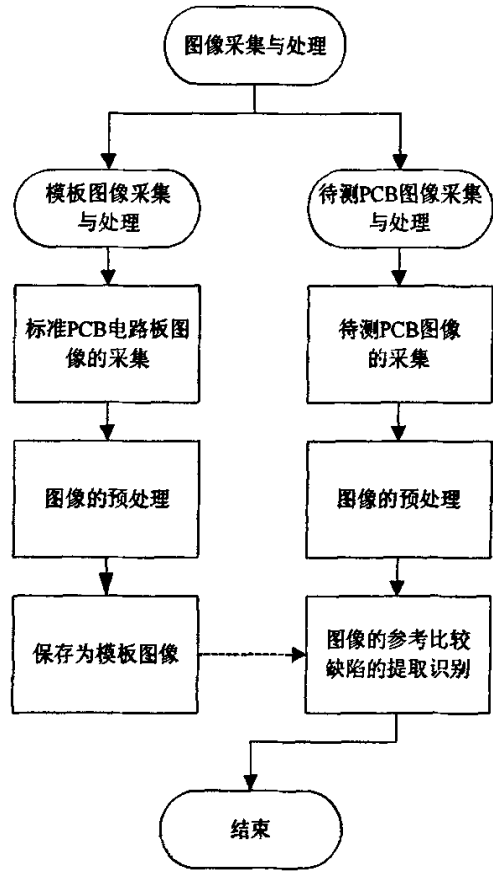


图 2-2 图像的采集和处理流程图

Fig. 2-2 Image Acquisition and Processing Flow Chart

图像的采集和处理是整个系统的关键环节。它的组成如图 2-2 所示, 主要包括待测印刷电路板图像的采集与处理和印刷电路板模板图像的采集与处理两个部分。印刷电路板图像的采集处理由: 图像获取、图像预处理、缺陷检出、缺陷特征提取、缺陷特征分类与识别、检测结果显示打印等部分构成。印刷电路板模板图像的采集处理包括: 模板图像的获取、图像预处理、模板图像结构特征的表达和多模板生成等部分。

图像采集和处理部分的工作流程是: 首先分块采集印刷电路板多模板的图像, 对图像进行定位并且确定板边尺寸和采集划分模式, 采集完成后对每块模板图像进行必要的预处理并保存。然后在相同划分模式下分块采集待测印刷电路板的图像, 预处理后与模板图像进行参考比较, 对比较结果进行分析然后输出的结果为待测印刷电路板的缺陷检出、缺陷识别与分类。最后对做好缺陷记号的划分图像进行拼接, 并显示或打印出来。

## 2.2 印刷电路板智能检测系统模型的建立

从系统的总体结构来看, 本系统基于机器视觉检测系统, 处理的对象是印刷电路板的数字图像。系统将印刷电路板反射光转化为电信号, 再经过模数转换, 得到印刷电路板的数字化图像后加以分析处理, 最终得出结果。现实图像的数字转化成为了系统模型建立的关键。

### 2.2.1 数字图像成像原理

自从上世纪 60 年代末期, 美国贝尔实验室提出固态成像器件概念后, 固体图像传感器便得到了迅速发展, 成为传感技术中的一个重要分支, 它是 PC 机多媒体不可缺少的外设, 也是监控中的核心器件<sup>[12]</sup>。目前主流的成像器件出要有两种: 互补金属氧化物半导体 (CMOS) 图像传感器与电荷耦合器件 (CCD) 图像传感器<sup>[12]</sup>。

CCD 型和 CMOS 型固态图像传感器在光检测方面都利用了硅的光电效应原理, 不同点在于像素光生电荷的读出方式。典型的 CMOS 像素阵列, 是一个二维可编址传感器阵列。传感器的每一列与一个位线相连, 行允许线允许所选择的行内每一个敏感单元输出信号送入它所对应的位线上, 位线末端是多路选择器, 按照各列独立的列编址进行选择。根据像素的不同结构, CMOS 图像传感器可以分为无源像素被动式传感器 (PPS) 和有源像素主动式传感器 (APS)<sup>[16]</sup>。根据光生电荷的不同产生方式 APS 又分为光敏二极管型、光栅型和对数响应型, 现在又提

出了 DPS(Digital Pixel Sensor)概念。

对于 CCD/CMOS 传感器来说, CCD/CMOS 感光表面的面积越大, 捕获的光子越多, 感光性能越好, 信噪比越低。CCD/CMOS 是机器视觉设备用来感光成像的部件, 相当于光学传统相机中的胶卷。CCD/CMOS 上感光组件的表面具有储存电荷的能力, 并以矩阵的方式排列。当其表面感受到光线时, 会将电荷反应在组件上, 整个 CCD/CMOS 上的所有感光组件所产生的信号, 就构成了一个完整画面的电量表示。在通过放大后经 A/D 变换将其转化为数字信号, 从而完成了把一个真实的连续画面转化为数字表示的过程, 这就是目前广泛应用的数字成像原理, 如图 2-3 所示。也是数字图像模型建立的前提与基础。

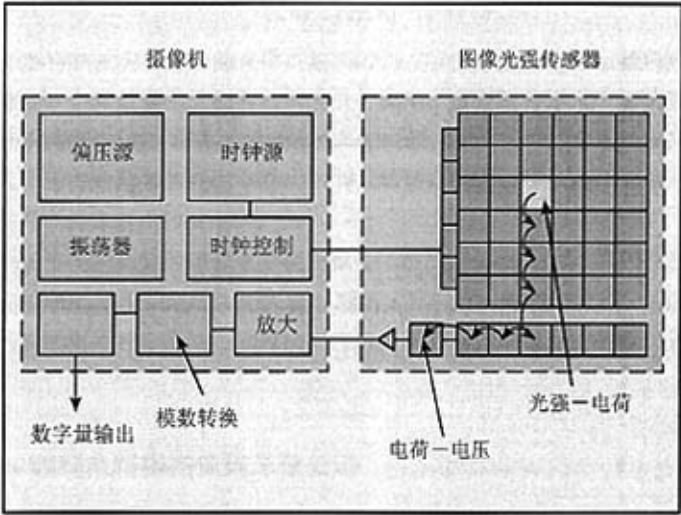


图 2-3 典型的数字摄像机相机的数字成像原理图

Fig. 2-3 Digital Imaging Diagram of Typical Digital Cameras

2.2.2 印刷电路板图像数学模型的建立

从以上的理论可知, 把可见光进行数字化转换乃至数字成像是可行的, 在此基础上建立印刷电路板图像的数学模型。对于任何图像或实物场景, 都可经传感器转换成图像信息<sup>[13]</sup>, 例如映射在黑白摄像机的靶面上后, 即成为在  $(x, y)$  坐标上反映亮度强弱的二维函数  $f(x, y)$ 。通常用此表示亮度的函数来处理及识别的图像, 其亮度范围大致在  $0.005-100 f t^2 \cdot e d(f t^2 \cdot e d$  为每平方英尺能量)之间, 为了将图像输入到计算机, 一般必须在空间坐标  $(x, y)$  上采样, 并且对图像的亮度幅值量化<sup>[14]</sup>。

由于实际中的图像性质不同，它们的计算机表示形式也不一样。一般来说，对于简单的集合曲线可以采用函数形式表示。对于不规则的非线性则采用参数表示。而对于信息非常丰富的图片和影像（例如航空照片，卫星图片，静态物体显微摄像）大都采用矩阵来表示。随着计算机的发展现在一般由硬件对其压缩编码并捕获至缓存，然后由软件对图像进行处理。一幅图像  $f(x, y)$  经采样离散化后，便获得  $n \times m$  的矩阵列形式：

$$f\{x, y\} = \begin{bmatrix} f(1,1) & f(2,1) & \dots & f(m,1) \\ f(1,2) & f(2,2) & \dots & f(m,2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f(1,n) & f(2,n) & \dots & f(m,n) \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

式(2-1)中  $m$  为  $x$  方向的采样点数， $n$  为  $y$  方向上的采样点数。该阵列中的每个元素都是一个离散量，它们各自对应一个像元，上式就是通常所谓的数学图像。由于显示扫描与 A/D 转换的速度存在匹配问题，所以采样过程是按纵向一列采样后送入计算机的图像的  $f(x, y)$  中，并将其转置， $f(x, y)$  中的每个元素对应于实际图像信号中的像素点的灰度<sup>[16]</sup>。

由于传感器采集的印刷电路板图像是二维的，所以其数学模型也建立成以上二维点阵形式，其中的元素  $f(x, y)$  对应第  $x$  行，第  $y$  列的象素点，其函数值大小由传感器采集的数字量经不同算法处理后得到的相应象素点的颜色信息或者光强信息<sup>[16]</sup>。

### 2.2.3 印刷电路板图像信息预处理

得到初始的数字图像模型后往往不能直接用于处理和分析，这是因为一般情况下，各类图像系统中图像模型的数字化传送和转换（如成像、复制、扫描、传输以及显示等）总要造成图像的某些降质。例如：在摄像时，光学系统的失真、相对运动大气流动等，都会造成图像的模糊；在传输过程中，由于噪声污染，图像质量会下降。为了后续识别处理的效果，必须对这些降质的图像进行改善处理，这就是图像的预处理。图像预处理的关键是建立降质模型<sup>[17]</sup>。

图像的数学表达式<sup>[18]</sup>可以表示为：

$$I = f(x, y, z, \lambda, t) \quad (2-2)$$

式中  $x$  —— 横坐标分量； $y$  —— 竖坐标分量；

$z$  —— 纵坐标分量； $\lambda$  —— 光强分量；

$t$  —— 时间分量。



式(2-2)表示的是活动的彩色的立体电视图像，当研究静止的单色的和平面的图像时，可以简化为式(2-3)：

$$I = f(x, y) \quad (2-3)$$

基于这样的表达式可以建立图像退化模型，如图 2-4 所示：

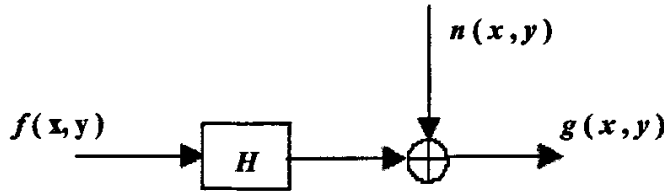


图 2-4 图像退化模型

Fig. 2-4 Image Degradation Model

由此可见，一幅纯净的图像  $f(x, y)$  是由于通过了一个系统  $H$  以及加入了外来噪声  $n(x, y)$  从而使其退化为一幅图像  $g(x, y)$  的。

图像复原可以看作一个估计过程。如果给出了已经退化的图像  $g(x, y)$  并估计出系统参数  $H$ ，从而可以近似恢复  $f(x, y)$ 。这里， $n(x, y)$  是一种统计性质的信息。当然为了对处理结果作出某种最佳估计，一般可以首先明确一个质量标准。

线性系统是具有均匀性和相加性的系统，图 2-4 可以表示为：

$$g(x, y) = H \cdot [f(x, y)] + n(x, y) \quad (2-4)$$

式中  $f(x, y)$  —— 原图像矩阵函数；

$g(x, y)$  —— 退化后图像矩阵函数；

$n(x, y)$  —— 噪声函数；

$H$  —— 系统变换。

如果暂时不考虑噪声，即  $n(x, y) = 0$ ，则图 2-4 可以表示为：

$$g(x, y) = H \cdot [f(x, y)] \quad (2-5)$$

在图像恢复处理中，尽管非线性和空间变化的系统模型更加普遍和准确，但是它却给处理工作带来了巨大的困难。它常常没有解或者很难用计算机来处理。因此在图像恢复中更多的采用的是线性和空间时不变模型来近似处理，即认为图像系统具有线性系统的特性：

$$H \cdot [k_1 f_1(x, y)] + H \cdot [k_2 f_2(x, y)] = k_1 g_1(x, y) + k_2 g_2(x, y) \quad (2-6)$$

和空间不变系统的特性：

$$H \cdot [f(x - \alpha, y - \beta)] = g(x - \alpha, y - \beta) \quad (2-7)$$

这样的优点是使得线性系统的众多理论直接用于解决图像复原问题<sup>[10]</sup>。

综上所述, 图像信息预处理方法的运用直接影响到了整个图像处理系统原始模型的质量。在印刷电路板智能检测系统中, 由于是一个典型的图像处理系统, 同样也存在印刷电路板数字图像的降质因素, 因此在有效的分析数字图像降质因素的基础上, 对印刷电路板图像采取了相应的图像平滑和图像增强技术。实验证明, 这样做的效果比单纯地采用一种图像预处理方法更有利于印刷电路板图像缺陷特征的提取。

## 2.3 印刷电路板智能检测系统的主要关键技术特点

在印刷电路板图像数学模型建立的基础之上, 如何对良好的数字图像模型进行分析和处理是至关重要的。这些用于采集、分析与处理的关键技术是整个印刷电路板智能检测系统的灵魂, 同时也使得系统形成了其非同一般的特点。

### 2.3.1 印刷电路板智能检测系统的主要关键技术

#### (1) 印刷电路板图像的采集

由于数字摄像机输出数据量大, 速度高。为保证实时检测, 必须使数据采集、传输与计算机图像处理和速度相匹配。因此在选择数字摄像机的同时, 不仅要考虑传感器像素大小、采集速度, 还应考虑摄像机的接口传输速度, 以保证图像的采集速度。

#### (2) 印刷电路板图像的预处理算法

数字摄像机采集的印刷电路板图像信息, 由于受光照变化、摄像机电磁干扰等因素的影响, 不可避免地还有噪声成分。故首先必须消除图像地噪声, 即平滑图像。图像平滑虽然可以消除随机噪声的影响, 但在一定程度上也使图像变得模糊, 因此, 需要进行图像边缘的增强(或称锐化)。

#### (3) 印刷电路板图像与模板的匹配算法

检测的关键在于缺陷图像的提取与识别。设计过程中必须充分考虑检测速度和检测能力的需求, 采取高效且检测能力强的算法。为了提高识别速度, 避免全图搜索, 需要先确定缺陷所在位置。必须在识别能力强的前提下运用尽可能快的模板匹配算法。

#### (4) 印刷电路板图像与模板图像比较后的缺陷图像分割算法

为了有效地进行图像识别, 还需划分出图像中感兴趣的部分或区域, 即图像分割。从而可以准确快速地找到缺陷所在的位置和类别, 完成智能检测任务。

### 2.3.2 印刷电路板智能检测系统的特点

(1) 采用高密度 LED 面光源，能够提供低角度、光照均匀、光强可调、发热量小的照明；并且采用基于直方图参考比较的光强自调整方法在图像提取时实时智能调节照明光源的光强大小，提供稳定性极高的照明，便于获取高品质的待测图像。

(2) 采用多模板方案和基于多模板的参考比较法。不仅能够检测出采用直接参考比较法检测出的所有缺陷，而且能够检测出常规的参考比较法不能检测出来的线宽违例和间距违例等瑕疵。

(3) 采用外轮廓检测和轮廓跟踪的快速算法获取电路板的基准板边的位置和尺寸以及缺陷相对基准的位置，提高识别速度，避免全图搜索。同时，运用处理速度快的 SSDA 图像匹配算法进行参考图像和模板图像之间的对位，保证了图像间比较的精度。

(4) 采用复杂的模板图像处理算法和相对简单的实时检验算法，保证了系统的实时处理速度。

### 3 印刷电路板智能检测系统的主要算法研究

一个大的电路板由于精度要求往往一次采集难以包括全局的信息，所以就要对电路板进行分块多次采集，每次采集和处理电路板一个局部的图像，最后再将各块图像的处理结果拼接起来得到整体结果。由于每次分块采集进行的处理方法和流程是一样的，所以可用单块采集图像的处理流程来说明系统算法的原理和目的，其流程如图 3-1 所示。

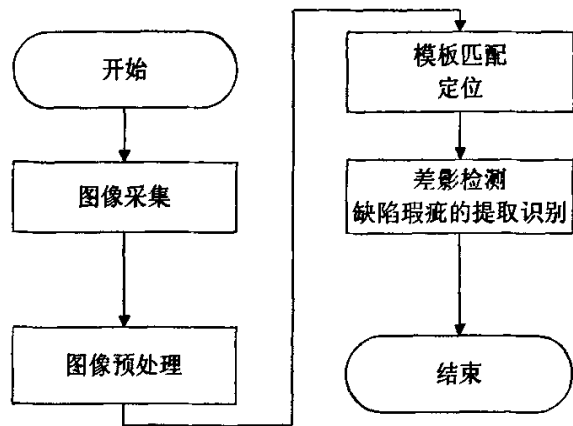


图 3-1 单块采集处理简要流程图

Fig. 3-1 Each Block Image Acquisition Flow Chart

#### 3.1 印刷电路板图像的采集

图像的获取实际上是将被测物体的可视化图像和内在特征转换成能被计算机处理的数据，它直接影响到系统的稳定性及可靠性。一般利用光源、光学系统，相机、图像处理单元获取被测物体的图像<sup>[24]</sup>，其一般形式如图 3-2 所示：

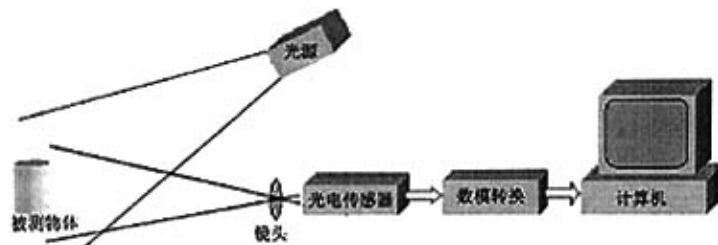


图 3-2 典型数字图像采集系统

Fig. 3-2 Typical Digital Image Capture System

### 3.1.1 图像采集传感器的选型

图像采集传感器俗称相机，它实际上是一个光电转换装置，即将图像传感器所接收到的光学图像，转化为计算机所能处理的电信号。光电转换器件是构成相机的核心器件。目前，典型的光电转换器件为真空摄像管、CCD、CMOS 图像传感器等。

真空摄像管由密封在玻璃管罩内的摄像靶、电子枪两部分组成。摄像靶将输入光学图像的光照度分布转换为靶面相应像素电荷的二维空间分布，主要完成光电转换和电荷存贮任务；电子枪则完成图像信号的扫描拾取过程。电视摄像管型成像系统具有高清晰度、高灵敏度、宽光谱和高帧速成像等特点。但由于电视摄像管属于真空管器件，其重量、体积及功耗均较大。

CCD 是目前机器视觉最为常用的图像传感器。它集光电转换及电荷存贮、电荷转移、信号读取于一体，是典型的固体成像器件。CCD 的突出特点是以电荷作为信号，而不同于其器件是以电流或者电压为信号。这类成像器件通过光电转换形成电荷包，而后在驱动脉冲的作用下转移、放大输出图像信号。典型的 CCD 相机由光学镜头、时序及同步信号发生器、垂直驱动器、模拟/数字信号处理电路组成。下图为 CCD 相机的原理框图。CCD 作为一种功能器件，与真空管相比，具有无灼伤、无滞后、低电压工作、低功耗等优点。

CMOS 图像传感器的开发最早出现在 20 世纪 70 年代初。90 年代初期，随着超大规模集成电路（VLSI）制造工艺技术的发展，CMOS 图像传感器得到迅速发展。CMOS 图像传感器将光敏元阵列、图像信号放大器、信号读取电路、模数转换电路、图像信号处理器及控制器集成在一块芯片上，还具有局部像素的编程随机访问的优点。目前，CMOS 图像传感器以其良好的集成性、低功耗、宽动态范围和输出图像几乎无拖影等特点而得到广泛应用。

从本系统的应用来看，与 CCD 图像传感器相比，CMOS 图像传感器具有明显的优势。CCD 存储的电荷信息，需在同步信号控制下一位一位地实施转移后读取，电荷信息转移和读取输出需要有时钟控制电路和三组不同的电源相配合，整个电路较为复杂，速度较慢。CMOS 光电传感器经光电转换后直接产生电压信号，信号读取十分简单，还能同时处理各单元的图像信息，速度比 CCD 快得多。

CCD 与 CMOS 两种传感器在“内部结构”和“外部结构”上都是不同的。CCD 器件的成像点为 X-Y 纵横矩阵排列，每个成像点由一个光电二极管和其控制的一个电荷存储区组成；CCD 仅能输出模拟电信号，输出的电信号还需经后续地址译码器、模数转换器、图像信号处理器处理，并且还需提供三相不同电压的电源和同步时钟控制电路。CMOS 器件的集成度高、体积小、重量轻，它最大的优势是具有

高度系统整合的条件,因为采用数字——模拟信号混合设计,从理论上讲,图像传感器所需的所有功能,如垂直位移、水平位移暂存器、传感器阵列驱动与控制系统(CDS)、模数转换器(ADC)接口电路等完全可以集成在一起,实现单芯片成像,避免使用外部芯片和设备,极大地减小了器件的体积和重量。

随着 CMOS 在制造工艺和影像处理技术上的不断突破,业内对 CMOS 的前景预测也越来越乐观。高清数字影像的普及更是 CMOS 技术发展的一个难得机遇。而且,与 CCD 相比,CMOS 的制造原理更加简单,体积更小,功耗可以大大的降低,种种迹象表明:图像传感器的领域正面临着一个重大转折,尽管从目前的状况看,CMOS 与 CCD 图像传感器的应用市场仍然有一个分界,但这个界限似乎越来越模糊。有专家预言,随着 300 万像素的 CMOS 图像传感器的上市,图像传感器即将进入“CMOS 时代”。

从兼容性来看,CCD 需要外部控制信号和时钟信号来获得满意的电荷转移效率,还需要多个电源和电压调节器,因此功耗大;而 CMOS-APS 使用单一工作电压,功耗低,仅相当于 CCD 的 1/10~1/100,还可以与其他电路兼容,具有功耗低、兼容性好的特点。CCD 传感器需要特殊工艺,使用专用生产流程,成本高;而 CMOS 传感器使用与制造半导体器件 90% 的相同基本技术和工艺,且成品率高,制造成本低,目前用于摄像的 50 万像素的 CMOS 传感器不到 10 美元<sup>[16]</sup>。

根据以上 CMOS 传感器的优势,本系统选用了基于逐行扫描 CMOS 传感器的 MV-USB1301 型数字摄像机。

### 3.1.2 印刷电路板图像的采集

一般的数字摄像机的工作流程为:在用户应用程序的初始化中完成摄像机的开始操作和初始化参数的设置,摄像机的结束操作在应用程序退出前执行。

在 Microsoft 的 32 位 Windows 操作系统中,操作系统提供给用户一个简单明确的应用接口。用户可通过应用接口库直接操作数字摄像机,在编制自己的应用程序时,可以直接调用这些库函数来实现指定的功能。应用接口库划分为以下应用功能模块:开始(初始化指定设备,申请资源)、结束(释放其资源)、参数设置(分辨率、图像窗口、曝光、增益等)、采集图像到内存(采集、停止、读取、存储)。数字摄像机应用接口库还应包括数字摄像机的控制、采集图像到内存、错误处理等功能<sup>[25]</sup>。

通过数字摄像机采集进计算机的印刷电路板图像是 24 位真彩色位图<sup>[26]</sup>(RGB 三原色各占其中 1 字节)。为了后续处理的方便,系统还需要把 24 位的真彩色位图转换为 8 位 256 色的灰度位图(只有 0~255 这 256 级灰度)。

计算机屏幕通常采用RGB彩色系统,它是通过颜色的相加产生其他色彩。除此以外还存在北美电视系统即YIQ系统<sup>[6]</sup>。其中Y是指颜色的明视度即亮度信息,也就是图像的灰度信息(Gray value),而IQ指色调RGB与YIQ的对应关系如下:

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.274 & -0.322 \\ 0.211 & -0.523 & 0.312 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

由上式可以看出位图的灰度可以通过式(3-2)来计算

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (3-2)$$

Y 即位图的灰度,从上式可以看出红绿蓝三原色在视觉系统中是如何组合产生灰度值<sup>[27]</sup>。由此就可以编制程序实现 24 位真彩色位图到 256 色灰度图的格式转换。

## 3.2 印刷电路板图像的预处理

数字摄像机拍摄的印刷电路板图像信息,由于受光照变化、摄像机本身等因素的影响,不可避免地还有噪声成分。故首先必须消除图像地噪声,即平滑图像。图像平滑虽然可以消除随即噪声的影响,但在一定程度上也使图像变得模糊,因此,需要进行图像边缘的增强(或称锐化)。

### 3.2.1 印刷电路板图像的增强

图像增强的变换域法是在图像的某种变换域中(通常在频域中)对图像的变换值进行某种运算处理,然后再变换回到空间域<sup>[10]</sup>。例如,在图像的傅立叶变换中,在图像的频域里做某种修改算法(如滤波),最后把修正的图像进行反傅立叶变换回到空间域,从而增强该图像。它是一种间接的处理方法。其数学描述如下:

$$F(u, v) = \psi\{f(x, y)\} \quad (3-3)$$

$$G(u, v) = H(u, v) \cdot F(u, v) \quad (3-4)$$

$$g(x, y) = \psi^{-1}\{G(u, v)\} \quad (3-5)$$

式中

- |                        |                              |
|------------------------|------------------------------|
| $\psi\{\}$ —— 频域变换;    | $\psi^{-1}\{\}$ —— 频域变换的反变换; |
| $f(x, y)$ —— 原始图像;     | $g(x, y)$ —— 增强后的图像;         |
| $F(u, v)$ —— 频域正变换的结果; | $H(u, v)$ —— 频域中的修正函数;       |
| $G(u, v)$ —— 修正后的结果。   |                              |

图像增强主要有图像的灰度修正和图像平滑两种处理方法:

### (1) 图像的灰度修正

灰度修正是图像在空间域中简单而有效的增强办法。通常根据图像不同的降质现象而采用的不同的修正方法。常见的有以下一些:

第一种方法针对图像的不均匀性而对图像逐点进行不同程度的灰度级校正,目的是使图像灰度均匀。第二种方法针对图像某部分或者整体曝光不足而进行灰度级校正,目的是增加图像的灰度对比度。最后一种方法就是直方图修正,它是使图像具有期望的灰度分布,从而有选择的突出所需要的图像特征。

本系统在此理论基础上,采用图像尺度变换<sup>[29]</sup>,实现了二维图像空间上的灰度均衡化。变换公式为:

$$g(x,y)=\begin{cases} (c/a)f(x,y) & 0 \leq f(x,y) \leq a \\ [(d-c)/(b-a)]f(x,y)+C & a \leq f(x,y) \leq b \\ [(M_s-d)/(M_f-b)][f(x,y)-b]+d & b \leq f(x,y) \leq M_f \end{cases} \quad (3-6)$$

式中

$M_s$ ——全图最小灰度值;

$M_f$ ——全图最大灰度值;

$f(x,y)$ ——原始图像矩阵;

$g(x,y)$ ——变换后的图像矩阵。

这一变换把原图灰度区间 $[a, b]$ 上的像素点映射到灰度区间 $[c, d]$ 上,实现了变换后图像所有像素点的灰度值都在灰度区间 $[c, d]$ 范围内,完成了图像的灰度修正<sup>[26]</sup>。

### (2) 图像的平滑

图像的平滑是一种实用的数字图像处理技术,主要目的是为了减少图像的噪声。一般情况下,在空间域可以用邻域平均来减少噪声;在频域,噪声多出现在高频段,因而可以采用低通滤波来减少噪声<sup>[30]</sup>。

此外,模板操作<sup>[33]</sup>是数字图像处理技术里常用到的一种运算,图像的平滑、锐化、细化、边缘检测都会使用模板。可用以下方法来描述模板操作在图像平滑处理中的应用:

$$\frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 \bullet & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

设式(3-7)为模板,中间的黑点“ $\bullet$ ”表示该元素为中心元素,也是要进行处理的元素。图像平滑处理通过此模板操作的过程是将原图中一个像素和灰度值和它周围邻近8个像素的灰度相加,然后以求得的平均值作为新图中该像素点的灰



度值。

通常模板不允许移出边界，这样就使得处理后的新图像比源图像要小。

例如，当模板为式(3-8)时，图中的黑点“·”表示该元素为中心元素，也是要进行处理的元素。图像平滑处理通过此模板操作的过程是将原图中一个像素和灰度值和它右下邻近的 3 个像素的灰度相加，然后以求得的平均值作为新图中该像素点的灰度值。

$$\frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 \cdot & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

假设原图灰度值矩阵如式(3-9)，

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 & 2 \\ 3 & 3 & 3 & 3 \\ 4 & 4 & 4 & 4 \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

经过模板计算后的图像矩阵如式(3-10)，

$$\begin{bmatrix} 5 & 5 & 5 & - \\ 8 & 8 & 8 & - \\ 11 & 11 & 11 & - \\ - & - & - & - \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

其中“-”表示边界上无法进行模板邻域计算，在实际中一般采取复制源图像的灰度值，不再进行其他处理了。

模板运算实现了一种邻域操作，即某个像素点的结果不仅和本像素点的值有关，而且和其领域里面的点有关，这种运算的实际上就是卷积。

空间域滤波也是图像平滑中最常用的一种方法<sup>[34]</sup>。它的原理是把需要处理的图像分成很多小区域进行滤波，这个小区通常用 $(3 \times 3)$ 的 $h(x, y)$ 作卷积，选择不同的 $h(x, y)$ 做卷积就相当于用不同的方法进行滤波，达到平滑图像的效果。

本课题对比了模板操作与空间域滤波这两种方法应用于印刷电路板图像的处理效果与处理速度，决定采用通过模板操作的图像平滑处理方法。

另外，图像模糊的实质就是图像受到平均或者积分运算造成的，因此可以对图像进行逆运算或者积分运算使得图像清晰。从频谱的角度来分析，图像模糊的实质就是其高频分量被衰减，因而可以通过高通滤波来清晰图像。由于图像锐化需要较高的信噪比，所以一般需要抑制噪声后才进行锐化处理<sup>[35]</sup>。

### 3.2.2 印刷电路板图像的中值滤波

中值滤波是一种非线性的信号处理方法,于1971年由J.W.Tukey首先提出并应用在一维信号处理中的技术,后来被二维图像信号分析技术所引用<sup>[36]</sup>。中值滤波的主要特性是可以在一定条件下克服线性滤波器带来的图像细节模糊,而且对滤除脉冲干扰以及图像扫描噪声最为有效。由于实际运算过程中不需要图像的统计特征,因此这也带来不少的方便。但是对于一些细节特别多,特别是点、线、尖顶细节特别多的图像不宜采用中值滤波。在电路板图像的传输以及量化等过程中,可能存在各种寄生效应,主要表现在图像的灰度直方图中存在能量变异的点。经过实验验证,考虑对电路板图像进行中值滤波处理。

中指滤波的基本原理是把数字图像中一点的位置的值用该点的一个邻域中各点值的中值来代替。中值的定义如下:

一组数  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  把  $n$  个数按值的大小顺序排列于下:

$$x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq \dots \leq x_n \quad (3-11)$$

设  $y$  为序列  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  的中值。把一个点的特定长度或形状的邻域称为窗口。在一维的情况下中,值滤波器是一个含有奇数个像素的滑动窗口。窗口中间的像素的灰度值由窗口内的各像素的中值来代替。对于二维的图像,可以采用某种形式的二维窗口。利用一个含有奇数个点的滑动窗口,将窗口中各点灰度值的中值来代替指定点(一般是窗口中点)的灰度值其取值的基本方法如式(3-12)所示:

$$y = Med(x_1, x_2, \dots, x_n) = \begin{cases} x_{i(\frac{n+1}{2})} & n \text{ 为奇数} \\ \frac{1}{2}[x_{i(\frac{n}{2})} + x_{i(\frac{n}{2}+1)}] & n \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (3-12)$$

在本文中采用的滤波窗口是一个  $3 \times 3$  的二维中值滤波器如式(3-13)所示:

$$\begin{bmatrix} f(i-1, j-1) & f(i-1, j) & f(i-1, j+1) \\ f(i, j-1) & f(i, j) \bullet & f(i, j+1) \\ f(i+1, j-1) & f(i+1, j) & f(i+1, j+1) \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

式中 “ $\bullet$ ” —— 需要处理的像素点;

$f(i, j)$  —— 图像在  $(i, j)$  处的灰度值。

通过此方法处理的图像  $f(x, y)$  会按灰度值大小重新盘列后得到的新的序列。而  $(i, j)$  处的灰度值就由  $(\frac{x_n + x_1}{2})$  序列  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  的中值代替,从而实现中值滤波的功能。

### 3.3 印刷电路板图像的模板匹配与差影检测

经过预处理，所得到的印刷电路板图像清晰特征明显，从而能够与相应的模板图像进行参考比较以获得缺陷特征的提取。采集的图像和模板图像往往由于摄像机移动或者工作台移动的位置不准而产生错位，因此就需要经过一系列算法解决其相应坐标的象素与模板图像象素匹配的问题。

对已经匹配好的印刷电路板图像，如何在准确快捷的前提下将其与模板图像进行参考比较以便找出瑕疵（也即缺陷特征）成为整个检测系统的关键算法问题。

#### 3.3.1 印刷电路板图像的模板匹配法

在机器识别事物的过程中，常需把不同传感器或同一传感器在不同时间、不同成像条件下对同一或相似景物获取的两幅或多幅图像在空间上对准，或根据已知模式到另一幅图中寻找相应的模式，这种处理过程称为匹配。在遥感图像处理中需要把不同波段传感器对同一景物拍摄的多光谱图像按象点对应套准，然后根据像点的性质进行地物分类。如果利用在不同时间对同一或相似事物拍摄得两幅照片，经过套准后找出其中特征有了变化的像点，就可以用来分析图中哪些部分发生了变化，本系统采用的模板匹配法就是这一应用的典型范例。在其他方面如对序列图像匹配求光流场、描述三维动态景物、计算物体的空间结构和运动参量等，匹配技术都起着至关重要的作用，自然地受到人们的重视，现已提出众多匹配方法<sup>[37]</sup>。

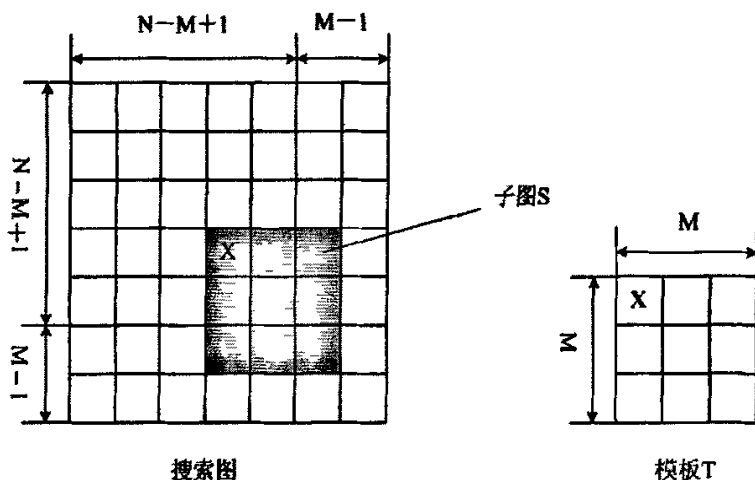


图 3-3 模板搜索模型图

Fig. 3-3 Template Search Model

早期的图像匹配技术主要用于几何校正后的多波段遥感图像的套准，借助于

求相互关函数的极值来实现。下面就一些代表性的方法来对匹配问题做一些分析。以图 3-3 所示的模型为例，设模板  $T$  叠放在搜索图上平移，模板覆盖下的那块搜索图为子图  $S^j$ ， $i, j$  为这块子图的左上角像点  $X$  在  $S$  图中的坐标，称为参考点。可以从图 3-3 中看出  $i$  和  $j$  的取值范围为  $1 < i, j < N - M + 1$ 。

搜索时，比较  $T$  和  $S^j$  的内容。若两者相似， $T$  和  $S^j$  之差近似为零，则两图认作是匹配的。可以用下列两种测度之一来衡量  $T$  和  $S^j$  的相似程度：

$$D(i, j) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M [S^j(m, n) - T(m, n)]^2 \quad (3-14)$$

或者

$$D(i, j) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M |S^j(m, n) - T(m, n)| \quad (3-15)$$

式中  $D(i, j)$  —— 相似性测度；

$S^j$  —— 子图；

$m$  —— 子图尺寸；

$T$  —— 模板；

$n$  —— 搜索图尺寸。

展开式 (3-14)，可得到式 (3-16) 如下：

$$R(i, j) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M [S^j(m, n)]^2 - 2 \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M S^j(m, n) \times T(m, n) + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M [T(m, n)]^2 \quad (3-16)$$

右边第三项为模板的总能量，是一个与  $(i, j)$  无关的常数，第一项是模板覆盖下那块子图图像的能量，它随  $(i, j)$  位置的改变而缓慢变化，第二项是子图像和模板的相关性，随  $(i, j)$  位置的改变而变化。 $T$  和  $S^j$  匹配时这一项的取值最大，因此可以用式 (3-17) 作相似性测度：

$$R(i, j) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M S^j(m, n) \times T(m, n)}{\sqrt{(\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M [S^j(m, n)]^2)}} \quad (3-17)$$

式中  $S^j$  —— 子图；

$T$  —— 模板；

$R(i, j)$  —— 相似性测度；  $m$  —— 子图尺寸；

$n$  —— 搜索图尺寸。

或者归一化为式 (3-18):

$$R(i, j) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M S^y(m, n) \times T(m, n)}{\sqrt{(\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M [S^y(m, n)]^2)} \sqrt{(\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M [T(m, n)]^2)}} \quad (3-18)$$

根据施瓦兹不等式可以知道式(3-18)中  $0 < R(i, j) < 1$ , 并且仅在比值  $\frac{S^y(i, j)}{T(m, n)}$  为常数时  $R(i, j)$  取极大值 1。因此, 式 (3-18) 可以写成更简洁的内积形式, 令  $S_1(i, j)$  表示子图,  $t$  表示模板。则有:

$$R(i, j) = \frac{t^T S_1(i, j)}{\sqrt{(t^T t)} \sqrt{(S_1^T(i, j) S_1(i, j))}} \quad (3-19)$$

当向量  $t$  和  $S_1$  之间的夹角为零时, 即  $S_1(i, j) = kt$  时 (这里  $k$  为标量常数), 有  $R(i, j) = 1$ , 否则有  $R(i, j) < 1$ 。用相关法求匹配的计算量很大, 因为模板要在  $(N-M+1)$  个参考位置上做相关计算。其中除一点以外都是在非匹配点上做无用功。

在此基础上, 为了减少计算量, 本课题采用了序贯相似性检测算法, 简称 SSDA<sup>[38]</sup> (Sequential Similarity Detection Algorithm)。其要点是:

(1) 定义绝对误差值。

$$\varepsilon(i, j, m_k, n_k) = |S^y(m_k, n_k) - \hat{S}(i, j) - T(m_k, n_k) + \hat{T}| \quad (3-20)$$

式中:

$$\hat{S}(i, j) = \frac{1}{M^2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M S^y(m, n) \quad (3-21)$$

$$\hat{T}(i, j) = \frac{1}{M^2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M T(m, n) \quad (3-22)$$

(2) 取一不变阈值  $T_k$ , 也即计算时阈值  $T_k$  为常量。

(3) 在子图  $S^y(m, n)$  中随机选取像点。计算它同  $T$  中对应点的误差值  $\varepsilon$ , 然后把此插值同其他点的差值累加起来, 当累加  $r$  次后误差超过  $T_k$ , 则停止累加, 认为该点不是匹配点, 并记下次数  $r$ 。同时, 定义 SSDA 的检测曲面为:

$$I(i, j) = \{r \mid \min_{1 \leq r \leq m^2} [\sum_{k=1}^r \varepsilon(i, j, m_k, n_k)] \geq T_k\} \quad (3-23)$$

(4) 把  $I(i, j)$  即式(3-23)取最大值时的  $(i, j)$  点作为匹配点, 因为在这点需要很多次累加才使总误差  $\sum \varepsilon$  超过  $T_k$ , 如图 3-4 所示。图中给出了 A、B、C 三个参考点上的误差累计增长曲线。A、B 反映模板  $T$  不在匹配点上, 这时  $\sum \varepsilon$  增长很快, 超出阈值。曲线 C 中,  $\sum \varepsilon$  增长很慢, 该点很可能是一个匹配套准点。

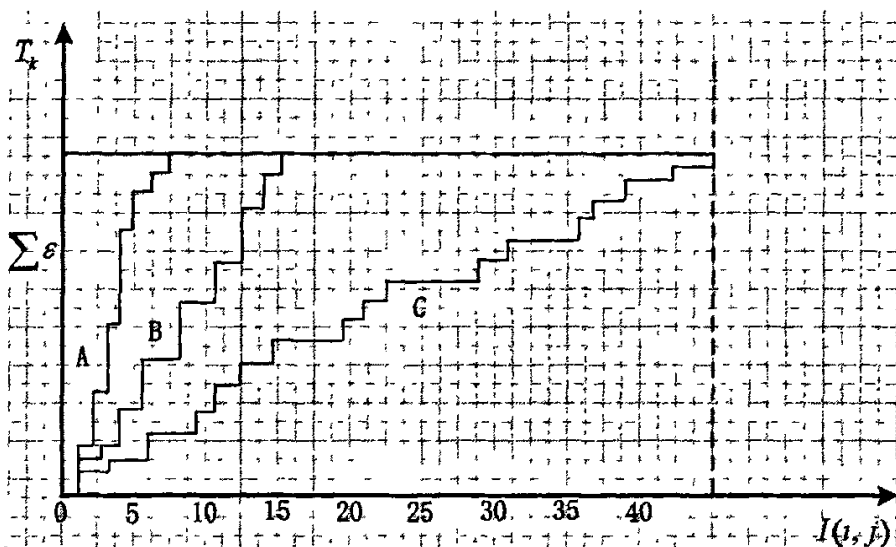


图 3-4 累计误差增长曲线 ( $T_k = \text{常数}$ )

Fig.3-4 Error cumulative growth curve ( $T_k = \text{Constant}$ )

SSDA 算法还可以进一步改进计算效率<sup>[38]</sup>, 办法是:

(1) 对于  $(N-M+1)$  个参考点的选用顺序可以不逐点推进, 即模板不一定平移到每个像素点。例如可用粗细结合的均匀搜索, 即先每隔  $m$  点搜索以下匹配好坏, 然后在有极大匹配值周围的局部范围内对各参考点位置求匹配。这一策略能否不丢失真正匹配点, 将取决于表面  $I(i, j)$  的平滑性和单峰性。

(2) 在某参考点  $(i, j)$  处, 对模板覆盖下的  $M^2$  个点, 可用与  $i, j$  无关的随机方式决定计算误差的先后顺序。也可以采用适应图像内容的方式, 按模板中的突出特征选取伪随机序列, 决定计算机误差的先后顺序, 以便及早抛弃那些非匹配点。

(3) 模板在  $(i, j)$  点得到的累计误差映射为曲面数值的方法。

(4) 不选用固定阈值  $T_k$ , 而改用单调增长的阈值序列, 使得非匹配点在计算过程中达到阈值而被丢弃, 真匹配点则需要更多次误差累计才达到阈值, 如图 3-5 所示。

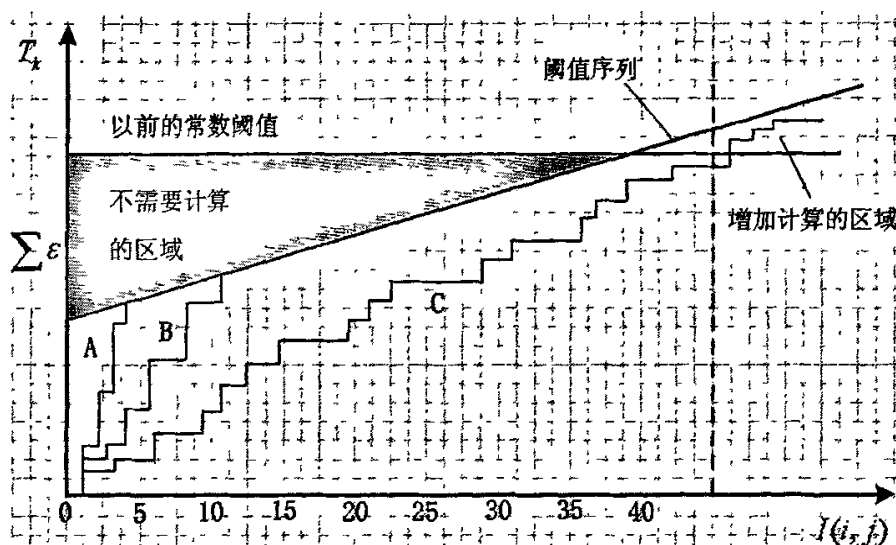


图 3-5 用单调最佳阈值序列的情形

Fig. 3-5 Monotonous Sequence of Circumstances With the Best Threshold

从处理速度上看, SSDA 方法比 FFT 的相关算法<sup>[37]</sup>快了近 50 倍。所以本系统在模板匹配算法的研究中借用了这种运算快, 匹配精度高的算法。

### 3.3.2 印刷电路板图像的代数运算与差影法

#### (1) 代数运算

代数运算<sup>[33]</sup>是指对两幅输入图像进行点对点的加、减、乘、除四则运算而得到输出图像的过程。

四种图像处理代数运算的数学表达式如下:

$$C(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \quad (3-24)$$

$$C(x, y) = A(x, y) - B(x, y) \quad (3-25)$$

$$C(x, y) = A(x, y) \times B(x, y) \quad (3-26)$$

$$C(x, y) = A(x, y) \div B(x, y) \quad (3-27)$$

式中  $A(x, y)$  —— 输入图像矩阵;

$B(x, y)$  —— 输入图像矩阵;

$C(x, y)$  —— 输出图像矩阵。

图像相加的一个重要运用是对同一场景的多幅图像求平均值。这点经常被用来有效地降低加性随机噪声的影响。图像相加也可以将一幅图像的内容加到另一幅图像上去, 以达到二次暴光的效果。图像相减可用于去除一幅图像中不需要的加性图案, 加性图案可能是缓慢变化的背景阴影, 周期性的噪声或者是在图像上

每一像素的附加污染等。减法也可用于检测同一场景的两幅图像之间的变化。例如：通过对一场景序列图像的减运算可以检测运动或者提取缺陷等。另外，计算用于确定物体边界位置的梯度也要用到图像减运算。在数字图像处理中，乘和除用的较少一些，但是也有着很重要的用途。量化器对一幅图像各点的敏感程度有可能造成变化，乘和除运算有可能用于纠正这种影响。用一幅掩膜图像乘以某一图像可遮住该图像中的某些部分，使其仅留下感兴趣的部分<sup>[33]</sup>。

## (2) 差影法

差影法<sup>[34]</sup>实际上就是图像的相减运算（又称减影技术），是指把同一景物在不同时间拍摄的图像或同一景物在不同波段的图像相减<sup>[33]</sup>。差值图像提供了图像间的差异信息，能用以知道动态监测、运动目标检测和跟踪、图像背景消除及目标识别等工作。在利用遥感图像进行动态检测时，用差影图像可发现森林火灾、洪水泛滥及监测灾情变化，估计损失等；也能用以监测河口、海岸的泥沙淤积及监视江河、湖泊、海岸等的污染。利用差值图像还能发现图像上的云和阴影，鉴别除耕作地及不同作物覆盖情况。类似地技术也可用于诊断集成电路掩膜地缺陷。

在本文中印刷电路板智能检测系统正是运用这项技术把采集的待测印刷电路板与完全无瑕疵的电路板模板图像进行减影，从而突出其与模板图像的不同之处。其效果如图 3-6 所示：

图像在作差影法运算时必须使两相减的图像对应像点位于空间同一目标点上，若不是，则必须先做几何校正与匹配，这一算法在前面已经有所阐述。而且在采取差影检测的同时，电路板图像的噪声和也会被提取出来，在后续章节中会介绍如何将包含与差影结果中的噪声去除，只留下缺陷特征，从而达到识别与分类的目的。

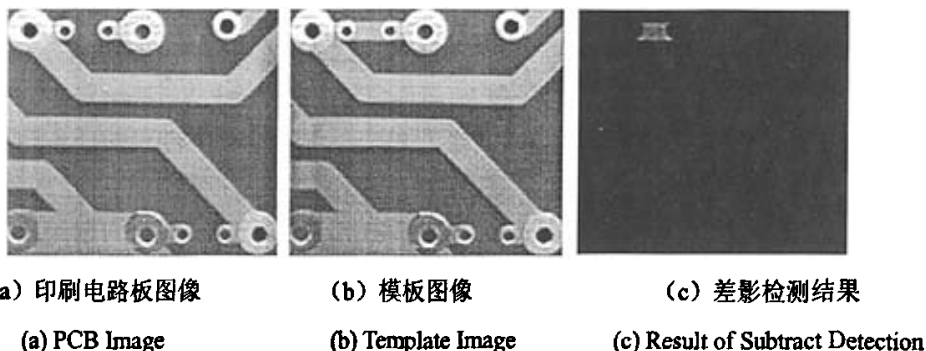


图 3-6 差影检测

Fig.3-6 Image Subtraction



### 3.4 印刷电路板图像的分割算法

#### 3.4.1 印刷电路板图像分割的目的

经过差影检测得到的图像往往灰度差别不显著，并没有明显的缺陷特征，如图 3-6 (c) 所示。为了将缺陷区域图像从整体图像中“提取”出来，需要对差影检测后的图像进行分割。

从数学角度描述一幅数字图像的分割就是将图像  $f(x, y)$  划分为满足如下条件的子图  $f_1, f_2, \dots, f_n$ ：第一， $\bigcup_{k=1}^n f_k(x, y) = f(x, y)$  所有子图的相加能够组成整幅图像；第二，各子图  $f_k$  必须是连通的图像数据子区域；第三， $f_k(x, y) \cap f_m(x, y) = \phi, k \neq m$  即任意两个不同的子图不存在公共像素；第四，图像  $f(x, y)$  满足一定的均匀性条件，所谓的均匀性条件指的是同一区域的像素之间的灰度值差别比较小<sup>[34]</sup>。

#### 3.4.2 印刷电路板图像分割算法选择

目前用于图像分割的方法可以分为特征阈值化和聚类、边缘检测以及区域检测三大类。在所有这些方法中，图像的灰度特征是分割的重要依据。在实际的成像过程中，由于各种环境因素的影响，使得图像中的景物与背景之间存在不确定性和模糊性，如何准确地将感兴趣的区域从背景图像中分割出来成为了人们长期研究的目标。近年来的分割方法有 J.C.Yen 等人提出的最大相关性原则选择阈值法<sup>[35]</sup>、N.Papamarkos 等人提出的最小值法<sup>[50]</sup>、P.Sahoo 等人提出的用 Renyi 熵代替常规熵的最大熵原则的方法<sup>[51]</sup>、H.D.Cheng 等人提出的模糊-C 分类最大熵原则的方法<sup>[52]</sup>等。这些方法的几本原理都是基于图像灰度的幅度分割方法。

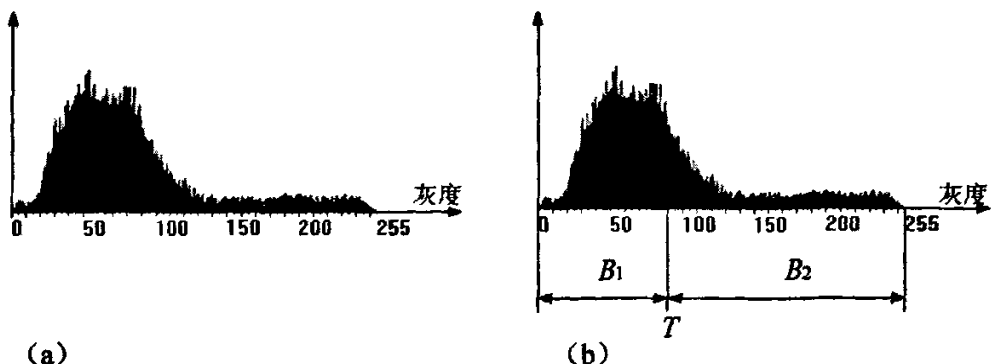


图 3-7 图像  $f(x, y)$  的灰度直方图

Fig.3-7 Histogram of Image  $f(x, y)$

幅度分割方法是把图像的灰度分成不同的等级, 确定提取目标区域的灰度范围, 根据此范围设置一个阈值门限, 然后对每一个像素点进行阈值分割。例如, 假设一幅图像有如图 3-7 (a) 所示的直方图, 由图可知图像  $f(x, y)$  的大部分像素取值较低, 其余像素较均匀地分布在其他灰度级上。由此可以推断这幅图像是由有灰度级的物体叠加在一个暗背景上形成的。可以设一个阈值  $T$ , 把直方图分成两个部分, 如图 3-7 (b) 所示,  $T$  的选择要本着如下原则:  $B_1$  应尽可能包含与背景相关联的灰度级, 而  $B_2$  则应包含物体的所有灰度级。一般地, 对一副图像进行分割应首先确定一个阈值门限  $T$ , 然后对每个像素点进行判断并分割, 其数学描述如式 (3-28) 所示:

$$f_1(x, y) = \begin{cases} 255 & f(x, y) \geq T \\ 0 & f(x, y) < T \end{cases} \quad (3-28)$$

式中  $T$  —— 阈值门限;

$f(x, y)$  —— 原图像;

$f_1(x, y)$  —— 分割后的图像。

在确定阈值的时候, 如果阈值定的过高, 偶然出现的物体就会被认做为背景; 如果阈值定得过低, 则会发生相反的情况。因此, 幅值法分割的最关键的地方是阈值  $T$  的选择。选择方法有  $P$  片法、最佳阈值分割法、峰谷法等<sup>[35]</sup>。

$P$  片法的典型应用是如果知道一张打印纸上的字符所占整个打印纸的面积, 就可以找到适当的阈值, 把字符的边缘求出来。 $P$  片法需要预先知道目标面积比的情况。

最佳阈值分割法是找到一个门限阈值, 使得在这个阈值下划分目标下背景的错误分割率最小。这种方法也需要知道目标像点数占有总图像点数的百分比, 也就是知道先验概率, 通过一定的数学模型, 比如假设目标的像素点作正态分布, 就可以通过求出错划概率的最小值来确定门限阈值。

峰谷法应用在图像的灰度图呈现明显双峰的情况。这时候图像的前景的内部有比较均匀一致的灰度值, 背景的灰度分布也比较平均。在这样的情况下选择两峰之间的谷底作为门限阈值, 就可以很好地得到目标图像。

由于印刷电路板缺陷图像是缺陷图像和背景图像的叠加, 主要由两类灰度组成, 其灰度直方图也主要表现为双峰状, 如图 3-8 所示。为了对印刷电路板缺陷图像实行最有效的分割, 综合考虑数据量、分析时间、算法复杂程度等指标后, 本课题在对印刷电路板缺陷图像分割处理中, 采用峰谷法选取阈值门限。其分割处理的效果如图 3-9 所示。

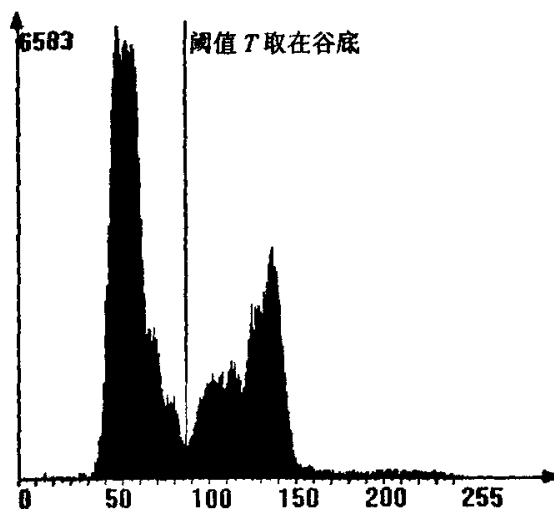


图 3-8 电路板缺陷图像具有双峰的灰度直方图

Fig. 3-8 Histogram With Bimodal of PCB Defect Image

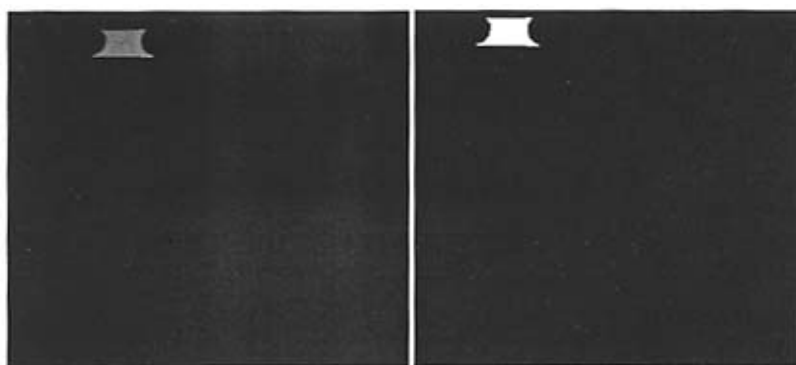


图 3-9 电路板缺陷图像阈值分割效果图 (图 3-6 中 c 图的分割)

Fig. 3-9 Result of Image Thresholding Segmentation of PCB Defect Image

(Thresholding Segmentation of Fig. 3-6-c)

### 3.4.3 印刷电路板图像的边缘检测与提取

利用计算机进行图像处理有两个目的：一是产生更适合人观察和识别的图像；二是希望能够由计算机自动识别和理解图像。无论为了哪种目的，图像处理中关键的一步就是对包含有大量各式各样景物信息的图像进行分解。分解的最终结果是图像被分解成一些具有某种特征的最小成分，称为图像的基元。相对于整幅图

像来说，这种基元更容易被快速处理。

物体的边缘是由灰度不连续性所反映的。经典的边缘提取方法是考察图像的每个像素在某个邻域内灰度的变化，利用边缘邻近一阶或二阶方向导数变化规律。用简单的方法检测边缘。这种方法称为边缘检测局部算子法<sup>[37]</sup>。

边缘的种类可以分为两种：一种称为阶越性边缘，它两边的像素的灰度值有着显著的不同；另一种称为屋顶状边缘，它位于灰度值从增加到减少的变化转折点。对于阶越性边缘，二阶方向导数在边缘处呈零交叉；而对于屋顶状边缘，二阶方向导数在边缘处取极值。如果一个像素落在图像中某一个物体的边界上，那么它的邻域将成为一个灰度级的变化带。对于这种变化最有用的两个特征就是灰度的变化率和方向，它们分别以梯度向量的幅度和方向来表示。

边缘检测算子检查每个像素的领域并对灰度变化率进行量化，也包括方向的确定。大多数使用基于方向导数掩模求卷积的方法。各种算子边缘检测的效果图如图 3-10 所示：

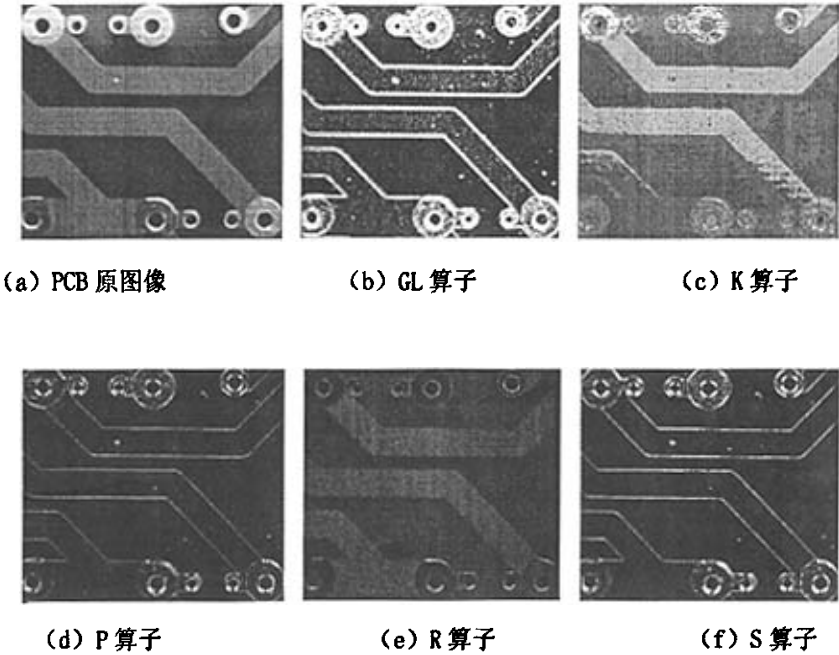


图 3-10 各种算子的边缘检测效果图

Fig. 3-10 Operators of The Various Edge Detection

### 3.4.4 图像的轮廓提取和轮廓跟踪

轮廓提取和轮廓跟踪的目的都是获得图像的外部轮廓。在必要的情况下应用一定的方法表示轮廓的特征，为图像的形状分析做准备。

二值图像轮廓提取的算法主要是如何剔除内部黑点：如果原图中有一黑点，其他的 8 个相邻的黑点，则该点剔除。考虑到轮廓线是连续的，轮廓跟踪的基本方法是：先根据某些严格的“探测标准”找出目标物体轮廓上的像素，再根据这些像素的某些特征用一定的“跟踪准则”找出目标物体的其他像素。

首先，找到第一个边界像素的“探测准则”是按照从左到右，从下到上的顺序搜寻。找到的第一个黑点是最左边下方的边界点，记为 A；它的右、右上、上、左上四个邻点中至少有一个是边界点，记录为 B；从 B 开始找，按照右、右上、上、左上、左、左下、下、右下的顺序找相邻点中的边界 C；如果 C 与 A 是同一个点，表明已经完成一圈，程序结束。否则从 C 点继续找，直到找到 A 为止。判断是不是边界点的方法：如果它的上下左右四个邻点都不是黑点则它是边界点。这即为跟踪准则<sup>[37]</sup>。

该算法的处理效果如图 3-11 所示。

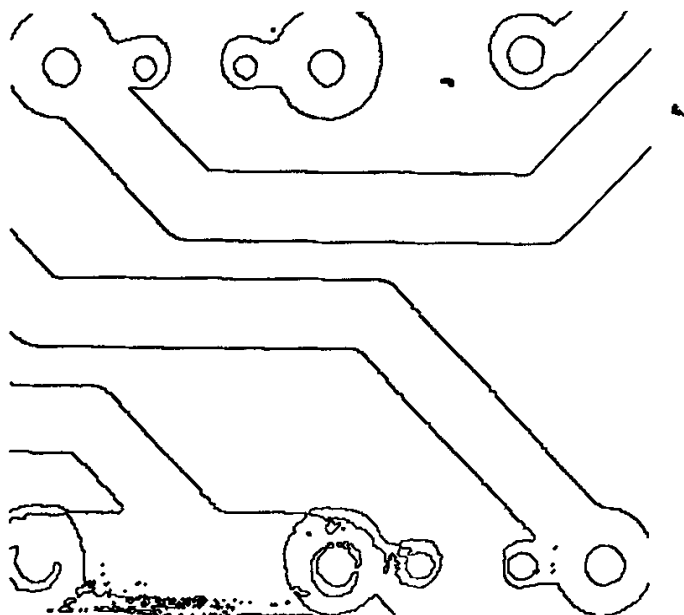


图 3-11 印刷电路板图像边缘检测效果图

Fig. 3-11 Result of Edge Detection of PCB Image

## 4 印刷电路板智能检测系统的硬件设计

### 4.1 总体硬件设计

印刷电路板智能检测系统的总体硬件系统按各部分信号流方向可划分为：输入设备和输出设备。输入设备可分为：采集设备、照明系统、人机接口。输出设备分为：显示设备、摄像机平移设备、工作台进给设备。其总体硬件结构如图 4-1 所示：

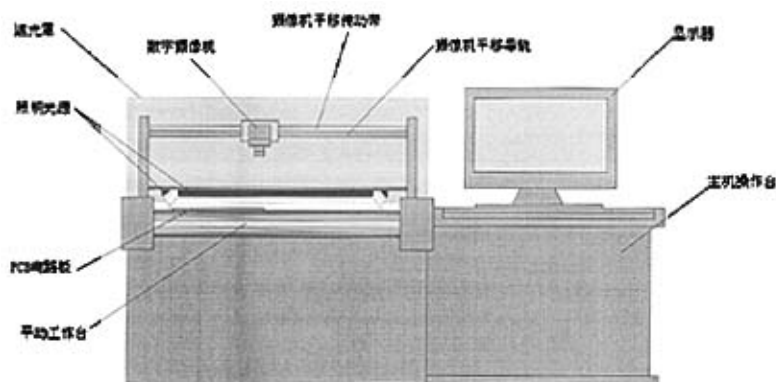


图 4-1 系统总体结构图

Fig. 4-1 Systems Architecture Plan

其中图像采集通道主要研究的问题为：数字摄像机的安装与固定，数字摄像机平移运动和工作台进给移动机构设计，印刷电路板在工作台平面的定位夹紧装置等。光源照明系统的设计主要涉及到光源的选取以及照明角度的设计。人机接口设备的关键在于工控计算机的选择与显示器、操作台的合理配置。

### 4.2 系统的输入设备

#### 4.2.1 图像采集通道硬件设计

采用的基于逐行扫描 CMOS 传感器的 MV-USB1301 摄像机是彩色数字摄像机，具有高分辨率、高精度、高清晰度、色彩还原好、低噪声等特点，摄像机具备 USB2.0 标准接口，安装、使用方便。其具体性能和特点如表 4-1 所示。

表4-1 数字摄像机性能列表

Table 4-1 Performances of Digital Camera

性 能	参 数
最高分辨率	1280X1024 (1, 310, 720个像素)
图像尺寸	5. 2umX5. 2um
传感器类型	逐行扫描COMS
光学尺寸	1/2 英寸
水平光学分辨率	>750线
帧率	1280X1024 (15帧/秒), 640X480 (30帧/秒)
信噪比	>45dB
动态范围	60dB
敏感度	1. 6v@550nm/lux/s
曝光方式	ERS
同步方式	外触发或连续
可编程控制	图像尺寸、亮度、增益、帧率、曝光时间
输出方式	USB2. 0
数据传输距离	5m
供电要求	5v (符合USB标准)
功耗	最大2. 25w
外形尺寸	54. 5X54. 5X41. 5mm

从其分辨率 1280×1024 来看，在 1 个像素对应最小精度 0.05mm 的比例下可以计算出其一次采集范围为 64mm×51.2mm。考虑到近焦情况下摄像设备采集图像的四角会存在鼓型变形的因素，同时也要为分块图像拼接时，在图像尺寸上留有一定的余量，所以系统每次分块采集电路板局部图像的有效尺寸为 60mm×45mm。

该摄像机内部已经完成了从模拟量到数字量的转换（模/数转换精度：10 位），直接通过 USB2.0 接口给主机传输数字信号，保证了数据传输的速度，同时也减轻了主机的负担。

4.2.2 光源的选取与照明系统设计

光源是影响机器视觉系统输入的重要因素，因为它直接影响输入数据的质量和至少 30%的应用效果。由于没有通用的机器视觉照明设备，所以针对每个特定的应用实例，要选择相应的照明装置，以达到最佳效果。许多工业用的机器视觉系统用可见光作为光源，这主要是因为可见光容易获得，价格低，并且便于操作。常用的几种可见光源是白帜灯、日光灯、水银灯和钠光灯。但是，这些光源的一

个最大缺点是光能不能保持稳定。以日光灯为例,在使用的第一个 100 小时内,光能将下降 15%,随着使用时间的增加,光能将不断下降。因此,如何使光能在一定的程度上保持稳定,是实用化过程中急需解决的问题。另一个方面,环境光将改变这些光源照射到物体上的总光能,使输出的图像数据存在噪声,一般采用加防护屏的方法,减少环境光的影响<sup>[47]</sup>。

对于本系统来说,其能够稳定工作的必要条件是:在外部条件不断变化的情况下,持续获得对比鲜明的图像。LED 光源以其高亮度、高稳定性、高性价比满足了这一要求。LED 光源的主要特征有:

#### (1) 形状的自由度

一个 LED 光源时由许多单个 LED 发光管组合而成的,因而可做成多种的形状,更容易针对用户的需求,设计光源的形状和尺寸。

#### (2) 使用寿命长

为了使图像处理单元得到精确的,重复性号的测量结果,照明系统必须保证相当常的时间内能够提供稳定的图像输入。LED 光源可连续工作 10000 到 30000 小时。此外,用控制系统使其间断工作,可抑制发光管发热,寿命将延长一倍。

#### (3) 响应时间短

LED 发光管响应时间很短,响应时间的真正意义使能按要求保证多个光源之间或一个光源不同区域之间的工作切换。采用专用电源给 LED 光源供电使,达到最大照明度的时间小于 10ms。

#### (4) 可以自由选择颜色

除了光源的形状以外,欲得到稳定图像输入的另一个方面就是选择光源的颜色。甚至相同形状的光源,由于颜色的不同得到的图像也会有很大的差别。实际上,如何利用光源颜色的特性得到最佳对比度图像的效果一直是光源开发的主要方向。

#### (5) 综合成本低

选用低廉而性能没有保证的产品,初次投资的节约资金很快就会被日常的维护、维修费用抵消。其他光源不仅耗电量是 LED 光源的 2~10 倍,而且几乎每月就要更换,浪费了维修工程师许多宝贵的时间,因此选用寿命长的 LED 光源从长远看是很经济的。

基于以上特点,本照明系统的光源采用高密度阵列 LED 光源。但是光源系统不仅只包括光源的选取,还应考虑到自动视觉检测系统中照明系统设计的普遍规则<sup>[48]</sup>:

(1) 确定被测部分或特征,使被测部分或特征清楚的与周围的背景区分开来。例如,使两者的灰度值的差别尽可能地大,尽量增强被测部分或特征的边缘的对



比度等。因为与人们可以用透视、阴影、视差和个体经验等线索从图像中得到信息不同，而自动视觉检测系统必须使用预先定义好的程序，例如滤波、图像减运算、边缘增强等技术才能从图像中找到所需的信息，所以如果可以把欲检测的物体和背景清楚的分开，那么就可以大大减少图像处理算法的复杂性，从而减少图像处理的运算时间，也减少了软件开发的时间和难度。

(2) 减少反射。这样可以减少由于光照而给图像带来的额外噪声，使客观景物尽量以不失真的面貌成像，减少图像处理算法的步骤。尽量屏蔽环境光线的影响。在实验室中周围环境光线是基本恒定的，而在工业现场则是一个时变的噪声，例如，在白天和晚上环境光线就会发生很大的变化。采用封闭的照明方案或者增强光照强度就可以屏蔽环境光的影响。

依照上述设计规则，本系统采用封闭的照明方案，选用高密度的 LED 阵列置于紧凑的矩形倾斜照明单元中。而且安装角度可按所要求调整，以适应不同情况的用途。照明角度和方向完全能够改变一幅采集到的图像，在光泽度、是否损失掉了表面特征方面有很大的差异。因此，光源的照明角度设计成低角度漫射照明，以获得最佳的图像。低角度照明系统的构成如图 4-2 所示。

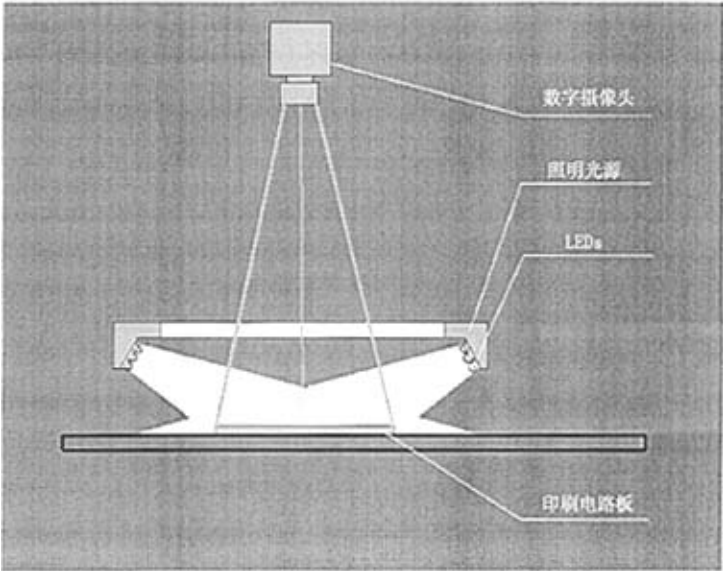


图 4-2 低角度照明系统示意图

Fig. 4-2 Low-angle Lighting System Sketch Design

### 4.2.3 人机接口设备

HID (Human Interface Device) 人机接口设备主要指人用于控制计算机系统操作的器件, 其目标是让机器为人服务, 降低人与机器的沟通难度, 人机之间基于直接感观的智能化沟通将成为必然, 由于人与人和人与机器的沟通方式没有差别, 机器能够随时随地介入人的工作、生活中, 帮助人们自动记录、整理资料。同时一个好的系统, 人也可以随时随地地介入其机器的工作, 这样, 整个系统一旦失控, 可以人为停止或做相应修正。

印刷电路板智能检测系统的主控计算机采用工业 PC 机, 各部分均与其相连, 从而形成一个完整的闭环数据流。但是该智能系统仍然不能脱离于人而自主完成所有的工作, 所以系统就必须存在人机接口设备。其必不可少的人机接口设备为: 电源管理设备、系统启动与停止设备、操作设备、以及显示设备。在此基础之上, 为了调试维护及程序升级的方便, 工控机和系统整体机架上还应留有键盘、鼠标、USB 等通用接口。

## 4.3 系统的输出设备

闭环系统输入信号的质量可以影响系统的各个状态以至影响输出的结果, 然而输出信号的精度通过反馈却可以直接影响闭环系统的输入或系统的各个状态量。印刷电路板智能检测系统的输出量主要为: 用于输出结果的显示设备、用于驱动数字摄像机做水平平移运动的脉冲信号以及用于驱动工作台做进给运动的脉冲信号。其中用于显示检测结果的显示设备并无反馈, 只是用于操作人员记录和观察印刷电路板缺陷的具体情况。对于驱动数字摄像机和进给工作台的脉冲信号却直接影响了印刷电路板和数字摄像机之间的相对位置, 从而影响了数字摄像机采集印刷电路板图像的区域。保证其精度不仅在于对输出脉冲信号的控制, 还需要设计一套精密的电机驱动设备及其传动机构来满足系统的要求。

### 4.3.1 显示设备

考虑到电机的电磁干扰以及系统连续工作的时间较长, 而且系统硬件的结构需要紧凑、耐用。所以选取的显示设备的显示品质、尺寸、抗干扰性和耐久性都必须高于一般的显示设备。

工业液晶显示器选用工业级液晶屏和机芯, 采用专业造型设计和 EMC 设计、

具有抗振、防电磁干扰、画质稳定。随着液晶显示技术的不断发展和完善,工业液晶显示器产品广泛用于军事、电信、电力、石油、化工、冶金、机械、数控、医疗、交通、仪器仪表、航空航天及各类现场控制监视等方面。工业液晶显示器已形成倒装式(B)、壁挂式(BH)、嵌入式(Q)、机架式(QS)四大系列产品,涵盖6~40英寸规格,可选配视频(XV)、电视(XT)、专业信号输入端子。

对于本系统所采用的机架式工业液晶显示,其主要规格必须满足或高于表4-2所列要求。

表4-2 系统显示设备要求

Table 4-2 The Lowest Index of System Display Device

显示	17.1" TFT LCD 显示屏
架构	铝合金前面板, 钢制机壳。具有钢化玻璃显示面框, 防尘、防振
安装	铝19"标准工业机箱, 8U高面板嵌入式
信号	标准15针D-SUB接口, RGB信号, 提供多重扫描功能。
尺寸(W*D*H)	主体尺寸: 482 × 56 × 355mm
最大分辨率	XGA 1280×1024
最大色彩	16.2M
对比度	450:1
亮度	280(cd/m <sup>2</sup> )
灯管寿命	50000小时

#### 4.3.2 数字摄像机的工作距离及其安装固定

数字摄像机是整个系统的图像数据来源, 它的安装与移动影响到了所采集图像的质量。在数字摄像机安装过程中, 如何确定它与被测电路板之间的距离(也即确定其相对高度)使得印刷电路板在其聚焦和拍摄范围之内以保证数字摄像机拍摄画面的精度成了关键技术问题。下面从成像原理角度阐述如何确定数字摄像机的安装高度的计算方法<sup>[49]</sup>。

##### (1) 成像的几何关系

图4-3是两个理想半透镜的成像示意图, 该图地反应了物、象、透镜这三者间的几何关系。其中A到B的箭头为物体,  $y$ 为物高; A'到B'的箭头为透镜所成的像;  $F$ 为左边透镜的焦距,  $F'$ 为右边透镜的焦距;  $H$ 为左边透镜所在的位置,  $H'$ 为右边透镜所在的位置;  $l$ 为物距,  $l'$ 为像距。

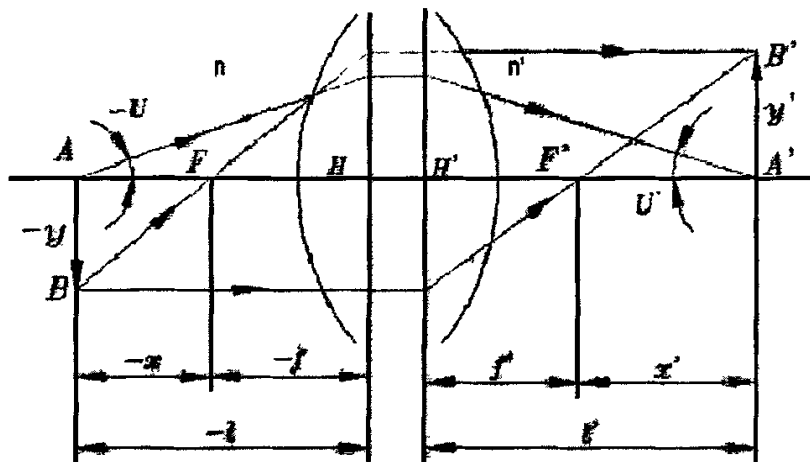


图 4-3 理想光学系统的成像

Fig. 4-3 Ideal Optical Imaging System

## (2) 物像公式

$$\frac{1}{l'} + \frac{1}{l} = \frac{1}{f} \quad (4-1)$$

式中  $l$  —— 物距; $l'$  —— 像距; $f$  —— 焦距。

## (3) 物距公式

$$l = \left(\frac{B}{b} + 1\right)f, l' = f(l + B) \quad (4-2)$$

式中  $B$  —— 物面宽度; $b$  —— 像面上探测器宽度。

## (4) 视场公式

$$2\omega = 2\arctg \frac{y'}{f} \quad (4-3)$$

式中  $y'$  —— 像高; $f$  —— 焦距; $\omega$  —— 视场。

光学系统的视场有以下几种, 如表 4-3 所示。

表 4-3 光学视场角度列表

Table 4-3 Field Angle Optical Table

光学系统	望远系统	远距摄像	标准物镜	宽视场	超宽视场
视场	6°	12°	46°	65°	>100°

视场取决于传感器芯片的规格化敏感面尺寸和物镜的焦距，如图 4-4 所示。

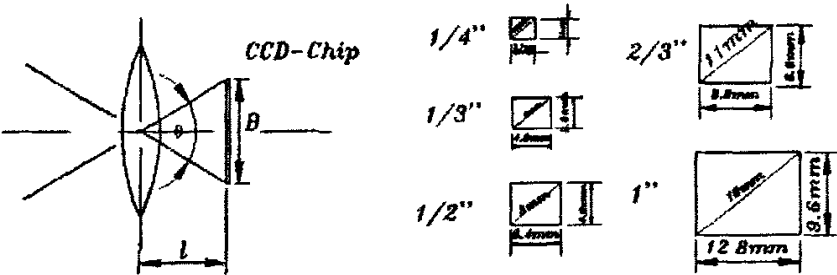


图 4-4 视场和规格化敏感面尺寸

Fig.4-4 Field Size and Standardized Sensitive Surface

(5) 孔径

物镜的常用孔径有(mm):0.7、1、1.4、2、2.8、4、5.6、8、11、16、22、32。

(7) 焦深

$$\Delta f = \pm \frac{\lambda}{8n' \sin^2 \frac{U'}{2}} \tag{4-4}$$

式中  $\lambda$  —— 观测波长；  
 $U'$  —— 像方孔镜角。

(8) 垂轴放大率

如图 4-5 所示，

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{f'l}{f'l} \tag{4-5}$$

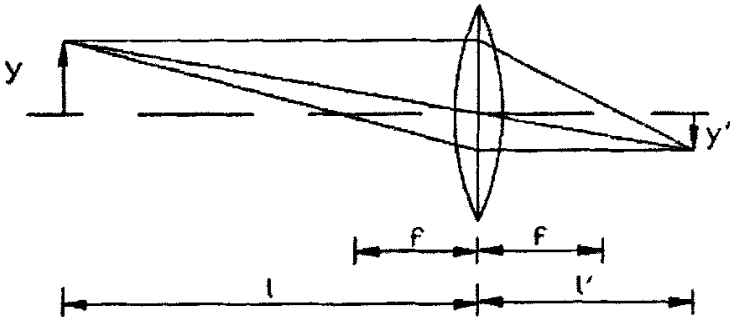


图 4-5 垂轴放大率

Fig. 4-5 Vertical Axis Magnification

由此可根据实际镜头尺寸来确定不同的摄像机工作距离。本系统采用的百万像素固定焦距镜头，焦距为 8mm，其工作在不同放大率下的工作距离如表 4-4 所示。

表 4-4 工作距离与光学放大率

Table 4-4 Working Distance and Optical Magnification

工作距离(mm)	光学放大率	扩展环(mm)
300	0.03X	8
200	0.04X	5
150	0.05X	0
100	0.07X	0

对于数字摄像机的安装，由于其需要横向平移，所以将其安装于一个移动滑块上，并保证其相对位置可调，调整范围为 200mm。并且需要对数字摄像机的垂直度做相应校准，保证其镜头中心线与印刷电路板待测平面垂直。

#### 4.3.3 数字摄像机平行移动设备及工作台进给设备

对于数字摄像机与工作台的运动需要通过一系列复杂的机构设计来实现，所有运动的控制都由主控 PC 机控制。数字摄像机安装于一个有水平导轨的移动滑块上，滑块连接于一条精确带上由步进电机通过精确带传动确定其移动的距离。为保证工作稳定性，要求传动应该平稳、精确、迅速，并保证平行度。移动的范围为 0~500mm，每次移动精度为 $\pm 0.01\text{mm}$ 。采集结束后自动归位，基准误差不得大于 $\pm 0.01\text{mm}$ 。工作台的尺寸为 500mm $\times$ 1000mm，印刷电路板由六点定位原则固定在工作台上。保证其在纵向平移进给运动的平稳、精确、迅速，并保证平行度。移动的范围为 0~1000mm，每次移动精度为 $\pm 0.01\text{mm}$ 。

## 5 印刷电路板智能检测系统的软件设计

Visual C++由于其强大的指针和内存操作使得其在处理图像数据时有着其他开发环境无法比拟的优势,所以本系统以 Visual C++为开发平台,设计并调试了印刷电路板智能检测系统的应用程序。

实验结果表明,该程序算法周密,流程合理,良好地完成了印刷电路板智能检测任务。

### 5.1 总体软件功能概述

印刷电路板智能检测系统的软件的主要功能旨在完成对待测印刷电路板图像的采集、预处理,然后将其与模板图像进行智能参考比较,从而获得印刷电路板的缺陷瑕疵。在此之前应先对无瑕疵的标准印刷电路板进行图像的采集、预处理并将结果保存为模板图像。

因此,总体软件功能大体上包括两部分:对标准印刷电路板图像的采集处理和对待测印刷电路板进行智能检测。

### 5.2 软件功能模块划分

总体软件功能可以分为对标准印刷电路板图像的采集处理和对待测印刷电路板进行智能检测两个部分,每个部分实现功能不同。然而每个部分又可以按其工作目的以及实现步骤继续细分为若干个功能模块。

对于标准印刷电路板模板图像的采集处理,其各功能模块为:图像采集模块、图像预处理模块、边缘检测判断模块、数字摄像机移动控制模块、工作台进给控制模块。

对标准印刷电路板模板图像进行采集处理时,各模块间的流程如图 5-1 所示:

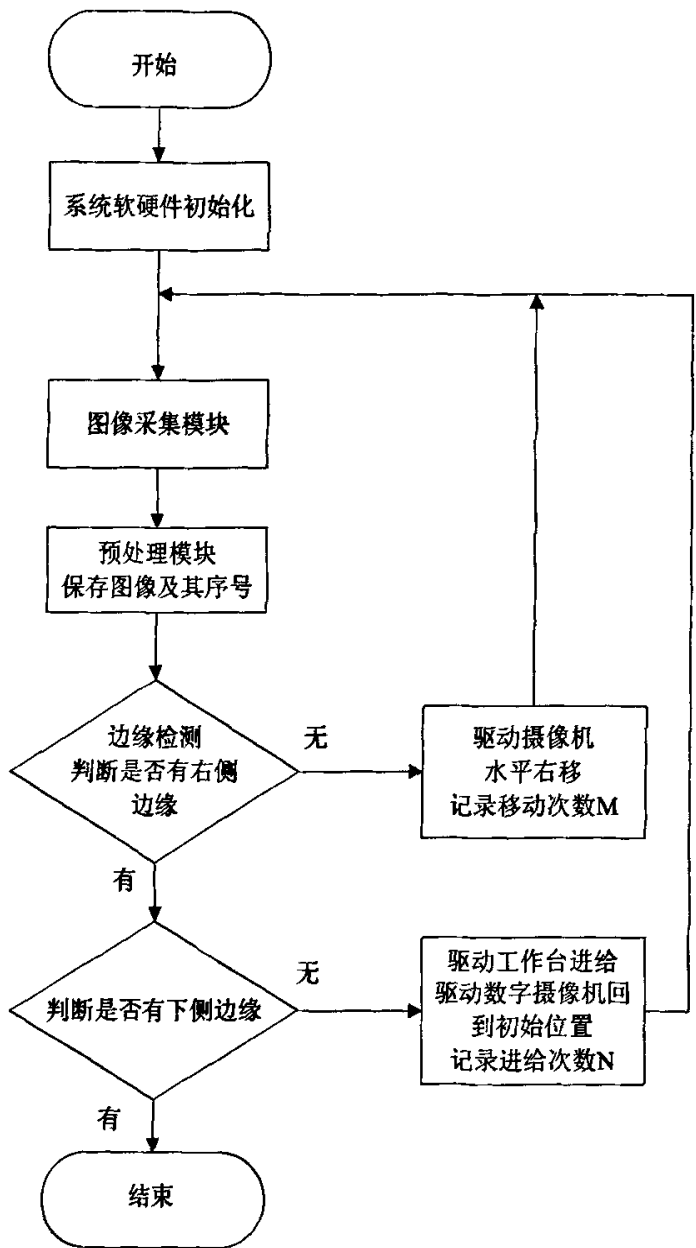


图 5-1 标准印刷电路板模板图像的采集处理流程图

Fig. 5-1 PCB Standard Template Image Acquisition and Processing Flow Chart

对待测印刷电路板进行智能检测，其各功能模块有：图像采集模块、图像预处理模块、参考比较模块、特征提取识别模块、摄像机与工作台移动模块、综合显示模块。

对待测印刷电路板进行智能检测时，各模块间的流程如图 5-2 所示：



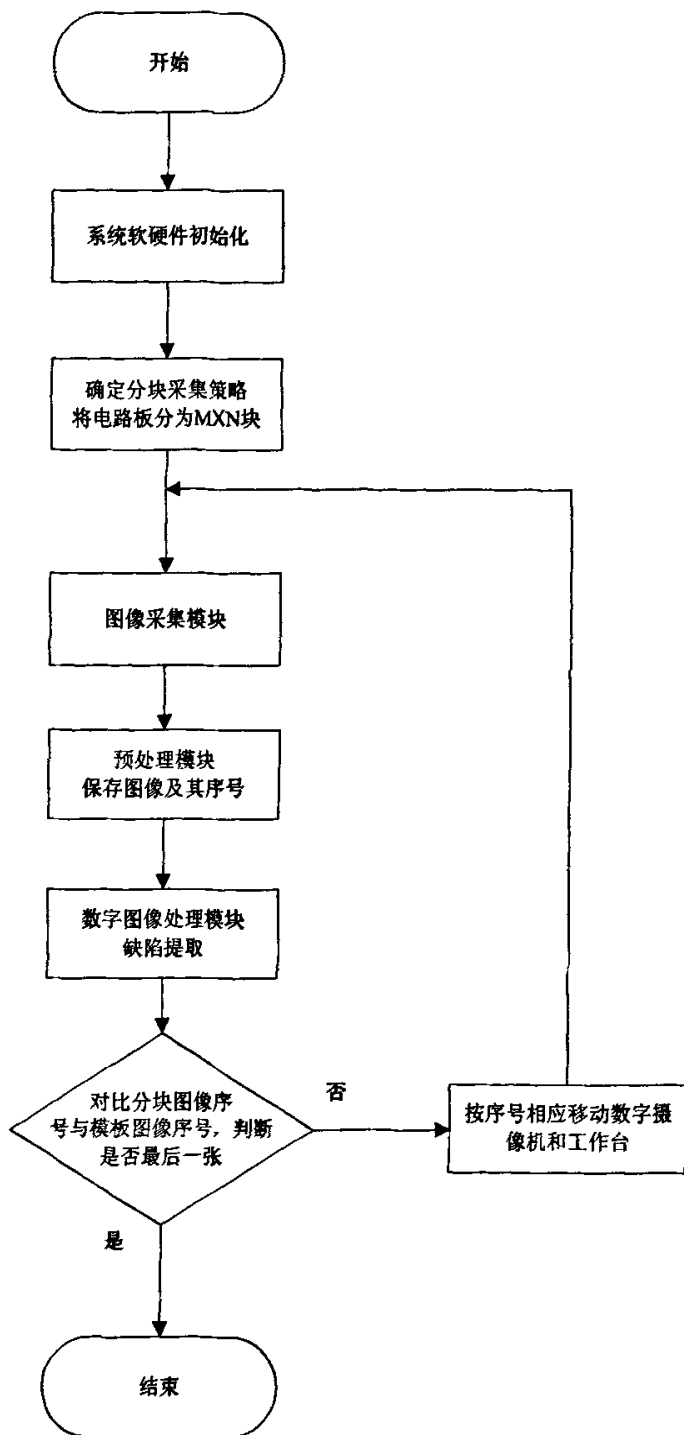


图 5-2 待测印刷电路板进行智能检测流程图

Fig.5-2 The PCB for Intelligent Detection Flow Chart

### 5.3 主要功能模块设计

印刷电路板智能检测系统的软件算法核心在于数字图像部分，其主要功能模块包括：印刷电路板图像采集模块、图像预处理模块、图像的比较与识别模块。下面就分别介绍这三个功能模块的程序流程。

#### 5.3.1 印刷电路板图像的采集模块及预处理模块

印刷电路板图像采集模块的主要内容分为：对数字摄像机的操作、内存分配、图像格式转换。其具体程序流程如图 5-3 所示。印刷电路板图像预处理模块的主要内容分为：对 256 色灰度数字图像的灰度平均化、增强、滤波去噪、锐化。其具体程序流程如图 5-4 所示。

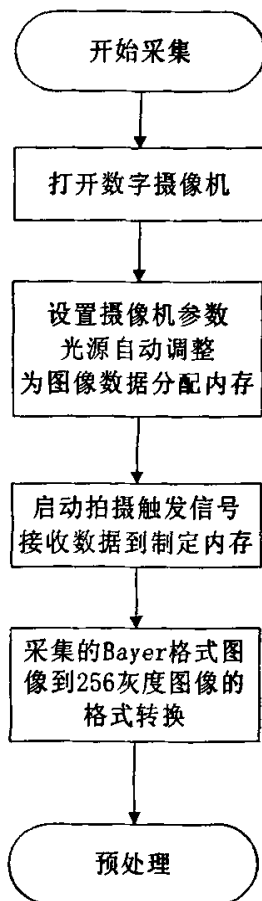


图 5-3 图像采集模块流程图

Fig.5-3 Image Capture Module Flow Chart

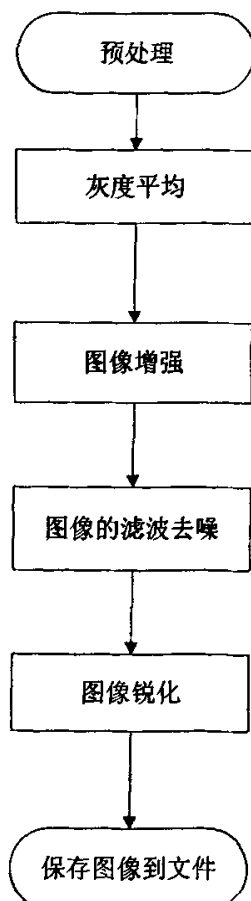


图 5-4 图像预处理模块流程

Fig.5-4 Image Preprocess Module Flow Chart

### 5.3.2 印刷电路板图像的参考比较与识别

印刷电路板图像与模板图像的参考比较、特征提取与识别的主要算法研究在第三章已经进行了详细的阐述，它们是印刷电路板智能检测系统的技术关键。下面给出系统在进行智能检测时运用这些算法的步骤与流程，如图 5-5 所示：

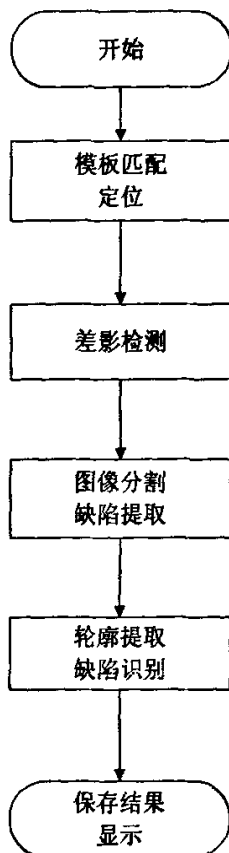


图 5-5 印刷电路板图像与模板图像的参考比较、特征提取与识别流程图

Fig.5-5 PCB Template Image and The Reference Image  
Feature Extraction and Recognition Flow Chart

## 6 结论

本文以数字图像处理方法为研究内容,在图像采集、图像预处理、图像模板匹配、图像分割、缺陷提取等相关算法的综合运用方面进行了大量工作。分析了机器视觉检测技术的基本原理,设计并实现了印刷电路板智能检测系统。实验表明,该系统可以快速、准确地实现印刷电路板的自动智能检测。

主要工作和成果如下:

### (1) 印刷电路板图像的采集

采集部分的研究包括了摄像机参数的自动调整、照明系统的自动调整以及采集原始 bayer 格式图像到计算机指定内存、图像的 256 色灰度位图的格式转换以及分块采集策略的制定等。这部分是本系统智能的体现之一。

### (2) 印刷电路板图像的预处理算法

实际情况下,数字摄像机拍摄的印刷电路板图像信息存在各种噪声,影响了图像的质量。本文采用了灰度修正、图像平滑、中值滤波等优化图像质量的预处理算法,在不同的噪声影响下采用相应的预处理算法,使得印刷电路板图像的信噪比得到了明显的提高。

### (3) 印刷电路板图像的快速模板匹配算法

检测的关键在于缺陷图像的提取与识别,模板匹配算法是这一要求实现的前提。设计过程中充分考虑检测速度和检测能力的需求,采用检测能力强的算法。为了正确而快速地识别缺陷,在识别准确的前提下运用了 SSDA 模板匹配算法,使得计算量在很大程度上减少,加快了处理的速度。

### (4) 印刷电路板图像与模板图像比较后的图像分割算法

为了对印刷电路板缺陷图像实行最有效的分割,对比了几种高效的图像分割算法,综合考虑数据量、分析时间、算法复杂程度等指标后,采用峰谷法选取阈值门限并在此门限下分割图像提取缺陷。

后续的工作可以从这些方面展开:首先,为了进一步提高运算速度可以考虑研究这些算法的并行处理方法。其次,神经网络方法是一种高效的图像识别方法,可以考虑在对缺陷图像的识别中加以应用。

## 参考文献

- [1] 熊祥玉. 印制电路板外形加工工艺新议. 电子工艺技术. 1992. 2:61~64
- [2] B.H. 格里戈里也夫. 印制电路板生产中的自动光学检验电子. 工艺技术. 1989. 4:55~60
- [3] 谢华. 印制电路板自动测试系统的设计与应用研究. 电子科技大学学报. 2000. 5:515~517
- [4] C.Tsuan. R.Ram. Audio-Visual Integration in Multimedia Communication. Proceedings of IEEE. 86(5):837~852. 1998
- [5] 胡毅. 胡咏梅. 基于网络的多媒体远程监控系统的研究与实现. 计算机应用研究. 2000. Vol 9 .P100~P102
- [6] Azriel RoSenfield. From Image Analysis to Computer Vision: An Annotated Bibliography1959~1979. COMPUTER VISION & IMAGE UNDERSTANDING. Vol 40. No. 6. 2001. 902~908
- [7] 葛广英. 实时监控技术的发展历程和发展趋势. 电视技术. 2000. 总 220 期. 63~P66
- [8] 张利. 高永英. 汪浩等. PCB 板检测中的定位研究. 中国图像图形学报. 1999. 8:659~662
- [9] M. Moganti. F.Ercal. C.H.Dagli et al . Automatic PCB inspection algorithms: a survey. Computer Vision and Image Understanding. 1996. 63(2):287~313.
- [10] Ando Moritoshi. Oka Hiroshi. Okada Hideo et al. High speed autoverifying technology for printed wiring boards. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering. 1996. 2899: 628~636
- [11] E.B.David Lees. Philip D.Henshaw. Printed circuit board inspection-A novel approach. SPIE-Autom. Insp. Meas. 1986. 730
- [12] 余松煜. 周源华. 吴时光. 数字图像处理. 第二版. 北京. 电子工业出版社. 1989
- [13] 何斌. 马天予. 王运坚. 朱红莲. Visual C++数字图像处理. 第一版. 北京. 人民邮电出版社. 2001
- [14] 夏正良等. 数字图像处理. 第二版. 南京. 南京大学出版社. 1999
- [15] 吕风军. 数字图像编程入门. 第一版. 北京. 国防工业出版社. 1999
- [16] 刘元航. 刘妍. 丁启芬. 扫描仪数码相机数码摄像仪的选购与使用. 第一版. 北京. 人民邮电出版社. 2000
- [17] 吴敏金. 图像形态学. 第一版. 上海. 上海科学技术文献出版社. 1991
- [18] 章毓晋. 图像工程上册数字图像处理和分折. 第一版. 北京. 清华大学出版社. 1999
- [19] Ahmed M. Darwish. Anil K. Jain. A rule based approach for visual pattern inspection. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 1988. PAMI-10(1):56~68
- [20] Yung-Nien Sun. Ching-Tsorng Tsai. A model based approach for industrial visual inspection. Pattern Recognit. 1992. 25(11):1327~1336
- [21] Paul M.Griffin. J.Rene Villalobos. S.L.Messimer. Automated visual inspection of bare printed circuit boards. Comput. Ind. Eng. 1990. 18(4): 505~509
- [22] Joseph W. Foster III. Paul M. Griffin. Automated visual inspection of bare printed circuit boards. Comput. Ind. Eng. 1990. 18(4): 493~504

- [23] A. J. E. Goodall, E. K. Lo. A review of inspection techniques applicable to PCB manufacturing and assembly, particularly with respect to SMT. Adv. Manuf. Eng. 1991
- [24] M. Ouslim, K. M. Curtis. PCB inspection based on a variant of n-tuple technique. IEEE Conference Publication on Image Processing and Its Application. 1990. 410: 677~681
- [25] 王汇源. 基于 PSTN 的远程图像监控系统. 山东济南. 山东大学. 2000. 16~P27
- [26] A. V. 奥本海姆, R. W. 谢弗, 董士嘉, 杨耀增译. 数字信号处理. 第一版. 北京. 科学出版社. 1980
- [27] Sanjit K. Mitra. Digital Signal Processing : A Computer-Based Approach. 2th Edition. 北京. 清华大学出版社. 2001
- [28] B. smolka, A. Chydzinski, K. W. Wojciechowski, K. N. Plataniotis, A. Nvenetsanopoalos. On the reduction of impulsive noise in multichannel image processing. Optical Engineering. Vol. 40. No. 6. 902~908
- [29] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用. 第一版. 北京. 科学出版社. 1999
- [30] 刘忠贵, 邸双亮. 小波分析及其应用. 第一版. 西安. 西安电子科技大学出版社. 1992
- [31] 李建平. 小波分析与信号处理理论应用及软件实现. 第一版. 重庆. 重大出版社. 1997
- [32] T. S. Huang. Image Sequence Analysis. 1st Edition, Germany. Springer-Verlog Berlin Heidelberg Network. 1981
- [33] Kenneth R. Castleman. Digital Image Processing. 第一版. 北京. 清华大学出版社. 1998
- [34] Zahid Hussain. Digital Image Processing : Practical Applications of Parallel Processing Techniques. 1th Edition. Sigapore . ELLIS HORWOOD LIMITED. 1991
- [35] W. K. Ptatt. Digital Image Processing. New York. John Wiley and Sons. 2th Edition. 1991
- [36] H. G. Senel, R. A. Peters and B. Dawant. Topological Median Filters. IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING. 2001. Vol. 11. No. 2. 89~103
- [37] H. Moon, R. Chellappa, A. Rosenfeld. Optimal Edge-Based Detection. IEEE TANSATIONS ON IMAGE PROCESSING. 2002. Vol. 11. No. 11. 1209~1227
- [38] Z. les. The Processing method as a set of the image transformation in shape understanding. 2001. Vol. 25. No. 2. 223~234
- [39] H. T. Nguyen, M. Worring, R. vandenBoomganrd, A. W. M. Seneulders. Tracking Nonparameterized Object contours in IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING. Vedio. 2002. Vol. 11. NO. 9. 1057~1070
- [40] 候成刚. 印刷电路板智能检测和检测策略优化的研究: [博士学位论文]. 西安: 西安交通大学机械工程学院. 1997
- [41] 廖晏生, 杨长维, 金甘平. 电脑视觉在电路板检测上的应用. 中国机械工程学会第 14 届全国学术研讨会论文集. 1997: 280~287
- [42] 吴传嘉. 电脑视觉在电路板分析上的应用: [硕士学位论文]. 台湾: 淡江大学资讯科学研究所. 1986
- [43] 吴坤达. 模式引导之视觉系统工业检测系统: [硕士学位论文]. 台湾: 成功大学资讯工程研究所. 1990
- [44] 杨弘吉. 以推论法则为基础的印刷电路板检测: [硕士学位论文]. 台湾: 台湾工业技术学院工程技术研究所. 1990

- [45] 周党群, 程宪平, 李刚健. PCB 视觉检测系统中目标图像提取的研究. 电子测量与仪器学报. 2001 (4): 10~13
- [46] 周党群. 印刷电路板视觉检测系统的研究: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学机械学院. 2001
- [47] 萧泽新, 安连生. 冷光源的设计. 光学技术. 1996 (5): 37~41
- [48] 蒋世磊. 冷光照明系统光源的选择与设计. 光学仪器. 1995. 17(3): 21~24
- [49] B.K.P.Horn. Robot Vision. Cambridge: MIT Press. 1986
- [50] Lam L.Suen C.Y. An evaluation of parallel thinning algorithms for character recognition. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1995. 17(9): 914~919
- [51] Vincent Luc. Local grayscale granulometiries based on opening trees. Mathematical Morphology and Its Applicatons to Image Processing. France: Kluwer Academic Publishers. 1996: 273~280
- [52] Lennart Thurfjell. Ewert Bengtsson. Bo Nordin. A boundary approach for fast neighborhood operation on three-dimensional binary data. Graphical Models & Image Processing. 1995 (1)

## 独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京交通大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名：李响

签字日期：2006 年 12 月 18 日



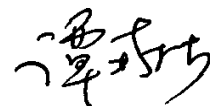
## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解北京交通大学有关保留、使用学位论文的规定。特授权北京交通大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

（保密的学位论文在解密后适用本授权说明）

学位论文作者签名：李向

导师签名：



签字日期：2006年12月18日

签字日期：2006年12月18日

## 攻读学位期间发表论文情况

李响, 谭南林, 杨亮。 PC104 温度采集卡设计, 国外电子测量技术, 2006 年 7 月, 卷 26 (8)