

# 精密塑料注射成型加工质量的在线检测系统的研究

## 摘要

精密注塑产品广泛应用于各行业,在我国工业生产中日益发挥重要的作用,而小模数塑料齿轮作为精密注塑产品的典型代表,其设计、生产、检测越来越受到重视。小模数塑料齿轮一般都是大规模自动化生产,由于生产工艺与生产条件的局限,成品存在多种缺陷,例如制件不满、飞边、毛刺等,这些存在缺陷的制品肯定是不能进入市场的,目前主要应用人眼检测识别次品齿轮,由于齿轮本身形状较复杂,识别精度要求也较高,人眼识别对工人的识别能力和耐力都有较高要求,齿轮人工检测是耗时耗力,成效不大。

本文研究开发了一种基于 HALCON 软件的非接触测量系统。根据小模数塑料齿轮的结构和具体检测要求,选择了合适的光源、工业摄像机、镜头、图像采集卡等视觉系统硬件,通过设置合适分辨率、曝光率、图像制式等,利用高速工业摄像机多次采集图像,图像对比度明显,特征清晰,充分体现了小模数塑料齿轮的轴孔、齿廓等特征,在 PC 机上运用 HALCON 软件进行图像去噪、平滑、阈值分割、特征轮廓优化、提取、计算等操作,并对摄像机系统进行精确标定,多次测算小模数齿轮轴孔尺寸、齿数、齿距,目前可以达到 10 微米级的检测精度。通过对实验结果进行分析,在现有条件下不断改进实验,提高检测精度,模拟现场环境以指导实际生产,提高生产效率。

**关键词:** 小模数塑料齿轮 机器视觉 图像处理 HALCON

# RESEARCH ON THE ONLINE INSPECTION SYSTEM OF QUALITY OF PRECISION PLASTIC INJECTION MOLDING PRODUCTS

## ABSTRACT

Precision injection molding products are widely used in various industries, which play an increasingly important role in domestic industry. Small module plastic gears are typical representative of precision injection molding products, which design, manufacturing, testing get more and more attention. Small module plastic gears are generally large-scale automated production. Production technology and conditions are limited, so there are a variety of product defects, such as dissatisfaction, joint flash, burrs, etc.. These defective products can't be allowed to flow into the market. Now the main applied inspection and recognition of defects is under human eyes. Due to gear itself complex shapes, high recognition accuracy, the human eye recognition have a higher requirements of recognition ability and endurance , so gear manual inspection is time-consuming , low efficiency.

A non-contact measurement system based on HALCON software is developed. According to the small module plastic gear structure and the

specific testing requirements, select the appropriate illumination, industrial cameras, lenses, frame grabbers and other visual system hardware, by setting the appropriate resolution、 exposure rate、 image format and taking so many image acquisition by the high-speed industrial camera , the image's contrast significantly and features clearly, which fully reflects the small modulus plastic gear inner hole, tooth profile and other characteristics. Using HALCON software in the PC for image de-noising、smoothing、segmentation、feature profile optimization、extraction、computing operations、and precise calibration of the camera system, measure the inner hole size, number of teeth, tooth pitch again and again, So far the hardware and software had allowed we reached up to 10 micron level precision measurement. Experimental results were compared and analyzed, based on the existing experimental conditions, we modified our experiment parameters to reach more and more accurate result, simulated environment of the practical scene to guide the actual production and improve productivity.

**KEYWORDS:** Small modulus plastic gear, machine vision, image processing, HALCON

## 北京化工大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者签名： 徐迪 日期： 2010.5.28

### 关于论文使用授权的说明

学位论文作者完全了解北京化工大学有关保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属北京化工大学。学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许学位论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存、汇编学位论文。

保密论文注释：本学位论文属于保密范围，在2年解密后适用本授权书。非保密论文注释：本学位论文不属于保密范围，适用本授权书。

作者签名： 徐迪 日期： 2010.5.28

导师签名： 张新彦 日期： 2010.5.27

# 第一章 绪论

## 1.1 课题来源和研究背景

### 1.1.1 国内塑料齿轮生产与检测现状

目前,国内精密塑料注塑发展已经有了一定的规模,但是其检测一直是处于无序化状态,小模数塑料齿轮作为精密注塑的典型代表,对研究精密注塑件的质量检测有很大的借鉴意义。小模数塑料齿轮一般采用大规模自动化生产,生产成本低,效率高,生产环境复杂,而专用的齿轮检测仪器操作复杂,价格昂贵,检测速度慢,不适于大规模生产的要求。笔者考察了很多江浙一带的小齿轮生产企业,一般都是采用人眼或借助简单工具进行质量检测,工人专业素质不高,工作时间长,强度大,长时间疲劳工作,效率低、准确性差。因此这种小模数塑料齿轮检测办法难以满足高速增长的生产需要和走向国际的发展趋势<sup>[1][2]</sup>。

### 1.1.2 国内外齿轮测量技术研究综述

精密齿轮测量技术及其仪器的研发已有近百年的历史,在这不短的发展历程中,有6件标志性事件:

(1) 1923年,德国 Zeiss 公司在世界上首次研究成功一种称为“Tooth Surface Tester”的仪器,实际上是机械展成式万能渐开线检查仪<sup>[3]</sup>。在此基础上经过改进, Zeiss 于1925年推出了实用性仪器,并投放市场。该仪器的长度基准采用了光学玻璃线纹尺,其线距为1微米。该仪器的问世,标志着齿轮精密测量的开始,在我国得到广泛使用的 VG450 就是该仪器的改进型<sup>[4]</sup>。

(2) 50年代初,机械展成式万能螺旋线检查仪<sup>[5]</sup>的出现,标志着全面控制齿轮质量成为现实。

(3) 1965年,英国研制成功光栅式单啮仪<sup>[6]</sup>,标志着高精度测量齿轮动态性能成为可能。

(4) 1970年,以黄童年为主的中国工程技术人员研制开发的齿轮整体误差测量技术<sup>[7]</sup>,标志着运动几何法测量齿轮的开始。

(5) 1970年,美国 Fellows 公司在芝加哥博览会展出 Microlog50,标志着数控齿轮测量中心<sup>[8]</sup>的开始。

(6) 80年代末,日本大阪精机推出了基于光学全息原理的非接触齿面分析机 FS-35<sup>[9]</sup>,标志着齿轮非接触测量法的开始。

综上所述，齿轮测量技术的发展主要经历以下几个阶段：

(1) 20 世纪 70 年代以前，齿轮测量原理主要以比较测量为主，其实质是相对测量。

具体方式有两种：

① 将被测齿轮与标准齿轮进行比较，从而得到各项误差。

② 展成式测量法，就是将仪器的运动机构形成的标准特征线与被测齿轮的实际特征线作比较，来确定相应误差。

比较测量的主要缺点是：测量精度依赖于标准件或展成机构的精度，机械结构复杂，柔性较差，同一个齿轮需要多台仪器测量。

(2) 传动元件的运动几何测量法，可以在一台仪器上快速获取齿轮的全部误差信息。将被测对象作为一个刚性的运动元件或传动元件与另一标准元件作啮合运动，通过测量啮合运动误差来反求被测对象的误差。该方法需要标准元件并且测量精度不仅与测量仪器相关，更取决于标准元件的精度。

(3) 坐标测量法，将被测零件作为一个纯几何体，将齿轮件坐标化，求取各关键点的坐标值，并与理想要素的数学模型作比较，从而确定相应得误差。

表 1-1 是金属齿轮的检测要求<sup>[10]</sup>

表 1-1 齿轮检测要求

Table.1-1 gear test

公差组:	公差与极限偏差项目	误差特性	对传动性能的主要影响
I	$F'_i, F_p, F_{pk}, F_i'', F_r, F_w$	以齿轮一转为期 的误差	传递运动的准确性
II	$f'_i, f_f, \pm f_{pt}, \pm f_{pb}, f_i'', f_{f\beta}$	在齿轮一周内，多次 周期地重复出现的误 差	传动的平稳性、噪声、 振动
III	$F_\beta, F_b, \pm F_{px}$	齿向线的误差	载荷分布的均匀性

$F'_i$  -切向综合公差； $F_p$  -齿距累积偏差； $F_{pk}$  -K 个齿距累积公差； $F_i''$  -径向综合公差； $F_r$  -齿圈径向跳动公差； $F_w$  -公法线长度变动公差； $f'_i$  -一齿切向综合公差； $f_f$  -齿形公差； $\pm f_{pt}$  -齿距极限偏差； $\pm f_{pb}$  -基节极限偏差； $f_i''$  -一齿径向综合公差； $f_{f\beta}$  -螺旋线波度公差； $F_\beta$  -齿向公差； $F_b$  -接触线公差； $\pm F_{px}$  -轴向齿距极限偏差  
注意各个公差组内各项公差和极限偏差必须保持一致。

### 1.1.3 注塑齿轮主要缺陷及影响

研究小模数齿轮缺陷主要从其生产工艺出发，小模数塑料齿轮为精密注塑件，主

要存在两大缺陷<sup>[11]</sup>：

(1)制件不满：一般塑料齿轮都是注塑成型的，制件不满就是制品没有完全成型，导致这种缺陷的原因有：①进料调节不当：一是计算装置调节得不正确；二是装料室内被压实和未熔化的塑料形成了“料塞”，使部分塑料从装料室中跳出，部分地堵住装料室出料口（柱塞不能推到最前位置）。②射入模具中的料量太少：一是塑料温度低，塑料流动性差。二是塑模的温度低，沿成型部分左面而流过的塑料很快冷却到失去流动性，以致不能完全填满模腔的各个角落；三是注射压力不足；四是生产周期过短，料温来不及跟上，影响充模成型。③模具设计不合理：一是模具本身结构复杂，浇口数目不足或形式不当。二是模腔内排气措施不当，这种原因导致制件不满的现象是屡见不鲜的。④模具浇注系统有缺陷：一是流道太小、太薄或太长，增加了流体的阻力。二是流道、浇口有杂质、异物塑料碳化物堵塞所致。三是流道、浇口粗糙有伤痕，光洁度不足，影响物料流动。

这类缺陷表现在小模数塑料齿轮上为缺齿，齿翘曲，齿形公差大，轴孔偏离等。

(2)飞边：飞边又称溢边、毛刺等，大多发生在模具的分合位置上，导致该缺陷的主要原因有：①模具分型面精度差，模具分型面上粘有凸出异物、活动模板变形曲翘等。②模具设计和入料配置不合理。③注射机的锁模力不足。注射成型时，由于机械上的缺陷，致使真正的锁模力不足或不恒定，也会产生飞边。另一方面由于模具本身平行度不好，也会导致锁模不紧密而产生飞边④注射工艺条件差。一是塑料充模状态过分剧烈。二是预塑量调得不准确，也就是说从料斗进入料筒的料量不一致。

缺齿、翘曲是重要缺陷，直接不能安装；飞边，毛刺等缺陷会直接导致齿轮机构卡死和影响安装；齿形公差过大、轻微翘曲等，会导致齿面受力不均、磨损加剧、影响机构力和运动的传递；轴孔偏差，齿圈径向跳动等，会导致机构运动不稳、机构噪声等，所以齿轮的全面检测是很必要的。

#### 1.1.4 小模数塑料齿轮检测现状

小模数塑料齿轮精度直接影响到仪器的工作性能和使用寿命，因此对它各项参数的测量是仪器仪表制备过程中不可缺少的环节。小模数塑料齿轮由于体积小、齿数多、齿形小等特点，使用传统的齿轮测量仪器或其它仪器进行接触式测量时，测量难度大，测量时间长，且工作量很大。即使用万能工具显微镜<sup>[12]</sup>进行非接触式瞄准测量时，由于是手动测量，目视瞄准，不仅操作不便，效率低下，而且增加了测试人员的主观误差，与现代测量的要求相差甚远，急需技术改造和升级。

## 1.2 机器视觉

### 1.2.1 机器视觉的定义

机器加装视觉装置的目的,是为了使机器具有类似于人类的视觉功能,从而可以提高机器的自动化和智能化程度。由于机器视觉涉及到光学,电子,机械,软件等多个学科,有好多不同的提法。美国制造工程师协会 (Society of Manufacturing Engineers) 机器视觉分会和美国机器人工业协会(Robotic Industries Association)自动化视觉分会关于机器视觉的定义是:“machine vision is the use of devices for optical non-contact sensing to automatically receive and interpret an image of a real scene in order to obtain information and/or control machines or processes”中文译为:“机器视觉是使用光学器件进行非接触感知,自动获取和解释一个真实场景的图像,以获取信息,控制机器或过程。”历经多年的发展,尤其是近几年芯片和电子通信行业的高速发展,机器视觉已经形成了一个特定的人工智能行业。机器视觉涉及到光源和照明技术、成像元器件(半导体芯片、光学镜头等)、数据传输技术,计算机软硬件(图像前处理算法、图像采集设备、IO卡等)、过程控制,自动化等各个领域,是大工业化的前提和基础。

### 1.2.2 机器视觉的发展现状

随着光电技术和芯片技术等新兴技术的发展,机器视觉检测技术也迎来了发展的春天。通过把图像当作检测和传递信息的载体,对产品进行光学测量。它是以现代学为基础,融合电子学、信息处理和传输、计算机图像学、图像显示等科学技术为一体的现代测量检测技术。机器视觉系统可以快速获取大量实时数字化信息,易于与设计信息及加工控制信息系统通信,基于视觉检测技术的仪器设备能够与PC机联接实现数字化、智能化、网络化,实现在线检测、实时分析、实时控制和实时查询总结等功能,在食品<sup>[13]</sup>、物流<sup>[14]</sup>、医学<sup>[15]</sup>,工业生产<sup>[16]</sup>等领域得到广泛关注和应用。

机器视觉检测通常涉及指定零件的特征如配件完整性、匹配性、表面完好性和几何尺寸的测量等,也可以是简单的对某一表面的图形检测<sup>[17]</sup>。在大批量工业生产过程中,用机器视觉检测方法比用人眼借助工具检测方法可以获得更高的精度和效率,机器视觉检测可以保证产品检测标准的一致性,并且量化测量结果,提出精度要求,进而实现对产品生产过程的监控、统计和分析,调整生产周期,提高生产效率。机器视觉检测技术还可以应用在一些不适合人工作业的危险环境中,化工,生物,医学等各个领域都可以进行机器视觉的应用研究。机器视觉检测技术主要依赖图像处理和模式识别技术。对于字符、图形和三维物体某表面等平面内检测属于二维视觉方法;对于三维物体的识别、重建和测量属于三维视觉方法,三维机器视觉是机器视觉的发展方向。

机器视觉图像处理方法<sup>[18]</sup>包括:图像的增强、复原、变换、重建、分割、特征提取、几何处理、模板匹配等。根据图像处理原理的不同又可分为基于区域的图像分析、



基于特征的图像分析、基于模板的图像分析和基于灰度值的图像分析等。其中基于特征(主要指边缘信息)的图像分析方法应用较广泛,它是目前我们常见图像处理程序的核心思想。

### 1.2.3 影响机器视觉在线检测的关键因素

经过对多个机器视觉现场项目进行需求分析和总结,摄像机采集精度、图像处理算法速度和精度是影响机器视觉检测应用关键的因素<sup>[19]</sup>。

#### (1)检测速度

视觉检测大多集成在大型工业生产线中,对于实时性要求较高,如何有效地将视觉测量系统嵌入到相应的工序中,调整检测速度和生产进度,是视觉测量商用的前提。提高处理速度的方法很多,可以通过合理的选择光源以及调节系统安装位置使被测物体感兴趣部分尽可能锐利,选择合适的摄像机节约图像前处理时间;通过对目标物进行精确限位,限制自由度等;开发或者改进图像处理算法、采用合适的图像采集参数等,这些方法都可以提高检测速度。

#### (2)检测精度

精度指标是检测系统最重要的性能指标,我们应该根据检测要求设计视觉系统,保证检测结果的可信性和可靠性。一般来说,为了保证系统的检测精度需要选择合适的摄像机,摄像机的 CCD 大小和基本像素大小都有要求,根据目标物尺寸和精度要求定出画幅大小,要使拍得的目标物尽可能满的充满整个视域。增加成像系统的分辨率,成本会成倍地增加;较为廉价的做法是:采用亚像素边缘检测技术、视觉系统标定等方法可以提高检测精度。

因此构建实际的视觉测量系统需要在测量速度、精度、成本之间寻求一个最优组合,要从硬件和软件两个方面优化系统,以达到要求的测量精度。

### 1.2.4 塑料齿轮机器视觉检测现状

在国内小模数塑料齿轮机器视觉检测的研究刚处在起步阶段,主要有以下特点<sup>[20][21][22]</sup>:

(1) 主要着重于检测算法的研究,如边缘提取,轮廓拟合等,不注重尺寸精度和检测误差。

(2) 一般都是离线操作,对检测速度和视觉系统接口,兼容性考虑较少

(3) 视觉系统二次开发困难,开发周期长,程序兼容性差,一般不可移植。

基于上述讨论,利用机器视觉检测小模数塑料齿轮,但是由于实验条件和检测技术的限制,目前能做的是对齿轮齿数,轴孔尺寸,齿顶圆,齿根圆,齿距等参数的精

确检测，我们的检测精度可以达到 $10\mu\text{m}$ 级，对应目前国内精密注塑的生产现状，以及目前的检测条件和要求，机器视觉检测能够较好地满足质量检测的要求。

### 1.2.5 本课题的意义

本课题开发的小模数塑料齿轮机器视觉质量检测系统具有以下优点：①计算机视觉检测具有高度的一致性、可靠性、低生产和维护费用，检测质量的可预见性；②计算机视觉检测可满足生产线上速度的需求，采用电脑控制，协调性好；③可以在相对复杂或有毒有害的环境下工作；④可实现100%检测，并建立数据库备查；⑤检测数据精度较高可调节，程序移植性好，开发周期短，开发成本低。

小模数齿轮是制造行业的一个非常重要的基础部件，应用于玩具、日常工具、汽车等各个领域，直接关系到各个领域产品的使用性能和寿命。在材料，工艺都相差无几的情况下，加强成品检测方面的投入显得尤为重要，在市场竞争日益激烈的当前国际国内环境下，质量就是生命，好的检测精度和效率是小模数塑料齿轮检测的发展方向。

本课题的实施，不但可以减少因出厂产品质量问题造成的损失，同时能大大削减检测工人和检测设备的数目。因此可以大大提高企业的效益<sup>[23][24]</sup>。

## 1.3 本论文研究的主要内容

本论文研究主要内容如下：

(1) 针对小模数塑料齿轮的生产工艺和检测要求，学习视觉系统各个部件的原理，采购办法，性能参数，注意事项等。

(2) 通过变换光源照明方式，摄像机图像采集参数，镜头焦距等，采集大量图像进行图像对比、分析。

(3) 视觉系统误差分析和视觉系统标定，通过标定不断提高计算精度。

(4) 利用 HALCON 软件进行图像处理和分析，通过编写并改进相关算法程序进行齿轮轴孔测量，误差分析，齿间距测量和分析。

本文的章节安排

第一章 绪论

第二章 视觉平台设计

第三章 图像处理基本算法研究

第四章 视觉系统标定原理及实现

第五章 小模数齿轮质量检测

第六章 结论与展望

## 第二章 视觉平台设计

### 2.1 机器视觉系统概述及功能实现

机器视觉系统用图像采集设备摄取环境图像，用计算机或内嵌式图像处理单元来进行处理。

#### (1) 图像采集单元

光学系统采集图像，图像转换成数字格式并传入计算机存储器或嵌入式系统存储器中。该单元包括光源、镜头、摄像机、支架、图像采集卡等。

#### (2) 图像处理单元

内嵌式处理器运用不同的算法来提高对结论有重要影响的图像要素。PC 机采用特定软件或算法处理图像我们采用 PC 机搭建视觉平台，系统目标主要流程如图 2-1。

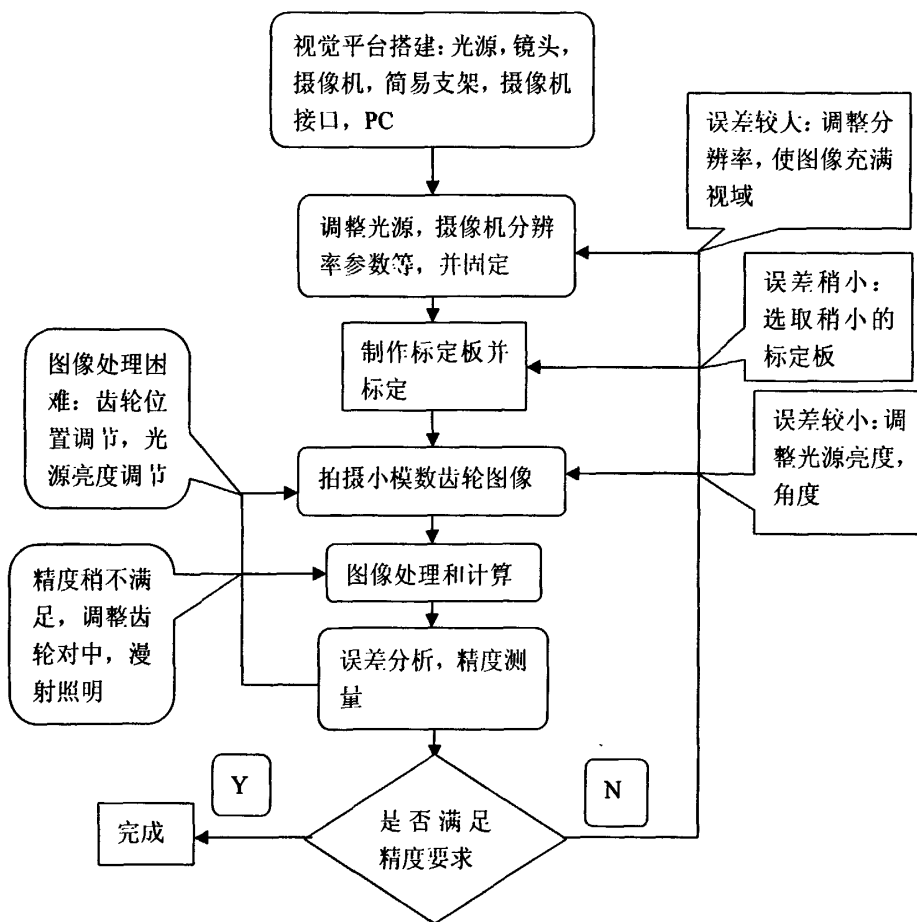


图 2-1 系统总体结构图

Fig.2-1 structure of system

### 2.1.1 视觉系统总体结构

目前的机器视觉检测系统从总体上可以分为两类，一类是使用 PC 机作为计算中心，将采集得到的图像传给 PC 机，再由 PC 机进行图像处理并输出结果或控制信号，我们把这类机器视觉检测系统称为 PC-based system；另一类则是将图像采集、AD 转换、图像处理、IO 控制等封装在一个智能相机中，称为 DSP-based system。图 2-2 和图 2-3 分别显示了这两类机器视觉检测系统的典型结构。

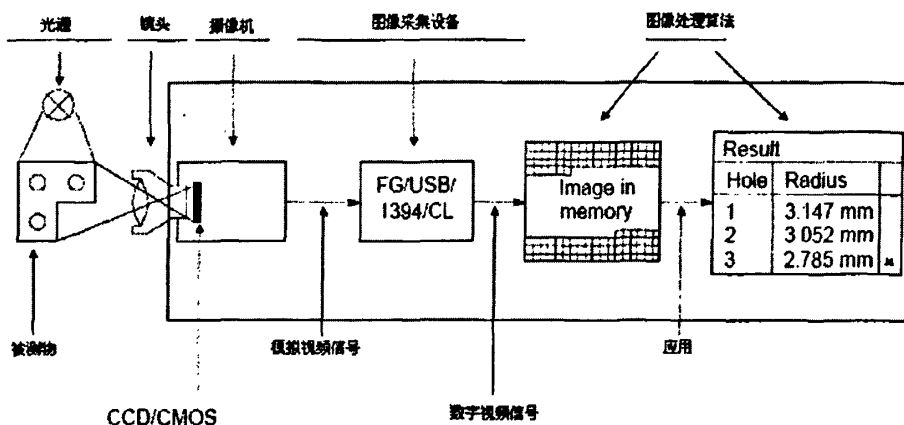


图 2-2 基于 DSP 的机器视觉监测系统基本组成结构

Fig.2-2 (DSP-based system)

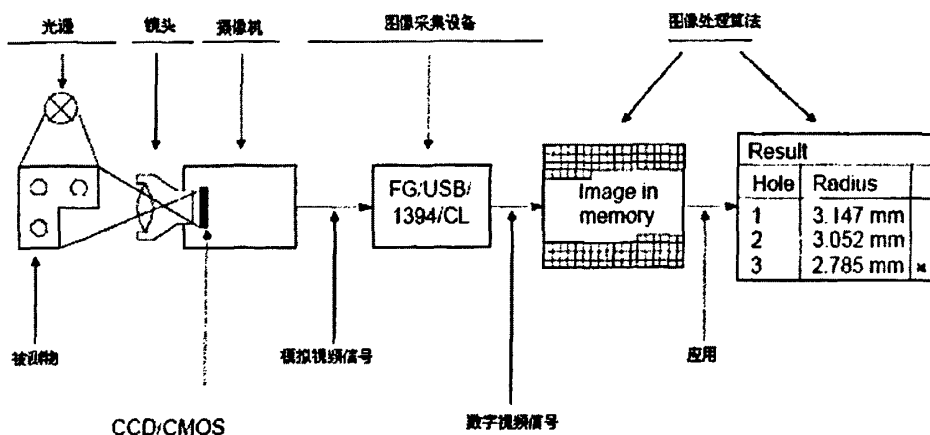


图 2-3 基于 PC 的机器视觉系统基本组成结构

Fig.2-3 PC-based system

## 2.2 系统硬件组成

系统硬件把被测试样转化成图像信息，以便后续的图像处理软件进行分析处理和

检测。它主要包括：照明系统、工业摄像机、图像采集卡及支架，垫板等。这部分系统的设计原则是：在系统稳定的前提下，获取大小合适，较高分辨率和清晰度的图像，缩短图像获取和传输的时间，节约成本，提高效率。

### 2.2.1 照明系统

机器视觉中照明的目的是使被测物体的重要特征显现，而抑制不必要的特征。为达到这个目的，我们需要考虑光源和被测物体的相互作用，其中一个重要的因素就是光源和被测物体的光谱组成。我们可以用单色光照彩色物体以增强相应特征的对比度。照明的角度也可以用于增强某些特征。本节将介绍上述这些内容。

#### 2.2.1.1 光源类型

在讨论机器视觉如何使用光源之前，先让我们看看目前常见的光源<sup>[25]</sup>有哪些。

##### (1) 白炽灯

通过在灯丝传输电流产生热辐射，白炽灯的优点是相对较亮，而且可以产生色温为 3000-3400K 的连续光谱，可以工作在低电压，但发热严重，能量利用率低，寿命短，不能用作闪光灯，随着时间推移，老化加快。

##### (2) 氙灯

在紧闭的玻璃灯泡中充上氙气、氙气可以被电离产生 5500-12000K 的非常亮的白光。可用作闪光灯。其缺点是供电复杂且昂贵，另外在几百万次闪光后会老化。

##### (3) 荧光灯

通过电流激发在如氩、氖等惰性气体环境中的水银蒸汽，产生紫外线辐射。其优点是价格便宜，照明面积大，缺点是寿命短，老化快，光谱分布不均匀，不能用于闪光灯。

##### (4) LED

发光二极管（LED）是一种通过电致发光的半导体，能产生类似于单色光的光谱非常窄的光。亮度与通过的电流有关，光色取决于半导体材料成分。其优点是寿命长，超过 100000 小时的 LED 灯非常常见。另外可以用作闪光灯，响应速度快，几乎无老化现象。直流供电，亮度易控制，功耗低，发热小，其缺点是性能与环境温度有关。目前它是机器视觉中应用最多的一种光源。

#### 2.2.1.2 光与被测物相互作用

光与被测物有多种作用方式如下图：

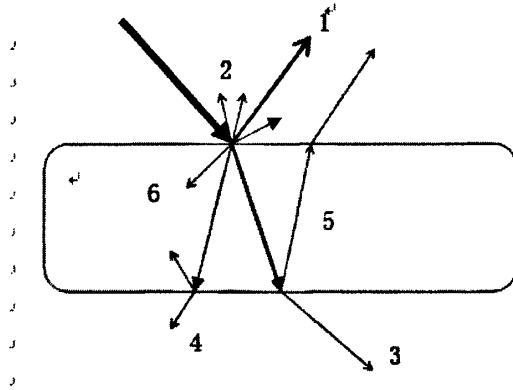


图 2-4 光与被测物的相互作用

(1) 镜面反射；(2) 漫反射；(3) 定向透射；(4) 漫透射；(5) 背反射；(6) 吸收

Fig.2-4 Interaction between light and objects in various ways

(1) Specular Reflection; (2) Diffuse Reflectance; (3) Direct Transmission; (4) Diffuse Transmission; (5) Back Reflection; (6) Absorption

反射发生在不同介质的分界面上。被测物体的粗糙程度等细微机构，决定光线有多少发生漫反射，多少发生镜面反射。在两个透明的介质分界面上也会有反射，这样产生了背反射，从而产生了重影。实际物体要比这复杂的多，比如有的物体有好几层不同的材料组成，表层对于一定波长的光透明，而反射其他波长的光，下一层又可能反射从上一层透过来的光，因此，为实物找一个合适的光源常常需要大量的实验。

### 2.2.1.3 光谱对照明效果的影响

如上所述，彩色物体反射了一部分光，其他部分被吸收，利用这一点来增强需要的特征，比如使用合适的光源只看到希望看到的波长范围内的被物体反射的光，不希望看到的被吸收，绿色背景红色物体需要增强，应使用红色照明。

另外还有滤镜的使用注意事项，由于 CCD 和 CMOS 对于红外敏感，需要加上红外截止滤光片来避免图像过亮或颜色变化。

### 2.2.1.4 照明的方向性

方向性有两种效果。一方面，光源可以漫射或直接照射。漫射在各个方向的强度是一样的，直接照射时，光源强度其中在非常窄的空间范围内；另一方面，光源和被测物体的物理位置相对关系也很重要。图 2-5 到图 2-9 说明了几种照明方法的特点和用途。

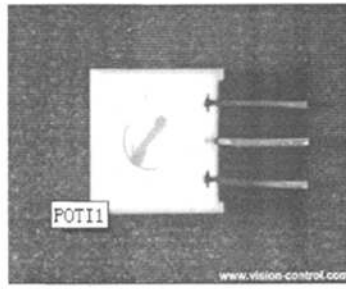


图 2-5 明视场  
Fig.2-5 bright field

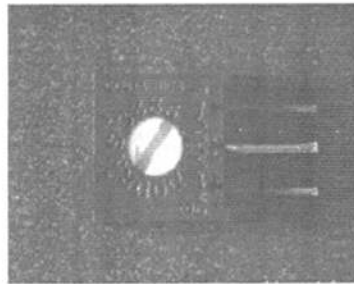


图 2-6 暗视场  
Fig.2-6 dark field



图 2-7 低角度照明  
Fig.2-7 Low Angle Illumination

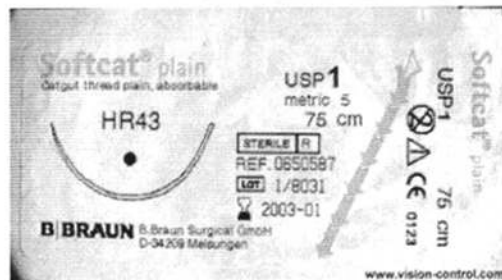


图 2-8 前向光漫射照明  
Fig.2-8 Diffuse illumination to the light before

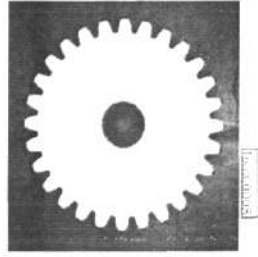


图 2-9 前向光直射照明  
Fig.2-9 Direct light to the light before

### 2.2.2 光学镜头的选择

镜头是一种光学设备，用于聚集光线在内部成像，镜头的作用是产生锐利的图像，以得到被测物的细节。镜头配合工业摄像机工作，是整个视觉系统的核心，它们之间的相互配合直接关系到成像的质量。

选择光学镜头注意以下几点：

- (1) 镜头的成像尺寸应与工业摄像机 CCD 尺寸相一致。
- (2) 镜头的分辨率，描述镜头成像质量的内在指标是镜头的光学传递函数与畸变，但对用户而言，需要了解的仅仅是镜头的空间分辨率，以每毫米能够分辨的黑白条纹数为计量单位。

由于摄像机 CCD 靶面大小已经标准化，如 1/2 英寸摄像机，其靶面为 6.4mm (H) × 4.8mm (V)。摄像机的靶面越小，对镜头的分辨率要求越高。

表 2-1 CCD 尺寸规格标准

Table2-1 CCD size criterion

规格	对角线长度(mm)	宽(mm)	高(mm)
1/4	4.5	3.6	2.7
1/3	6	4.8	3.6
1/2	8	6.4	4.8
2/3	11	8.8	6.6

(3) 镜头焦距与视野角度，首先根据摄像机到被检测目标的距离，选择镜头的焦距，镜头焦距  $F$  确定后，则由摄像机靶面决定了视野。

(4) 光圈或通光量，镜头的通光量以镜头的焦距和通光孔径的比值来衡量，以  $F$  为标记，每个镜头上均标有其最大的  $F$  值，通光量与  $F$  值的平方成反比关系， $F$  值越小，则光圈越大。另外光圈大小与曝光时间也有联系。

根据测量要求和经费预算，我们选择了日本 Computar 公司的 M3Z1228-MP 变焦镜头，具体参数见表 2-2:



表 2-2 镜头详细参数

Table 2-2 Detailed parameter of the lens

焦距	12mm - 36mm				
镜头直径与焦距之比的最大值	1:2.8				
图像最大尺寸	8.8mm x 6.6mm (Ø 11mm)				
工作范围	光圈	F1.4 - F16 C			
	焦点	0.2m - Inf.(Tele) 0.05m - Inf.(Wide)			
	光圈	手动			
控制	焦点	手动			
	焦距	手动			
	对象大小	12mm	4.0(H)cm x 3.0(V)cm		1/2"
视角	36mm	4.8(H)cm x 3.6(V)cm		1/2"	
	D	50.4°-16.8°		37.5°-12.5°	
	H	2/3	41.0°-13.6°	1/2	30.2°-10.0°
	V	31.2°-10.4°		22.8°- 7.6°	
工作温度	-20°C + 50°C				
有效孔径	Front	Ø27.2mm			
	Rear	Ø12.1mm			
	Tele	13.5mm			
后焦距	Wide	14.7mm			
	Tele	2/3"	+3.5% (y=5.5)	1/2"	+1.7% (y=4.0)
变形率	Wide	-2.6% (y=5.5)		-1.9% (y=4.0)	
凸缘衬圈长度	17.526mm				
固定架	C 形接口				
滤镜尺寸	M35.5 P=0.5mm				
大小	f41.6mm x 53mm				
重量	105g				

### 2.2.3 工业摄像机

摄像机的作用是将通过镜头聚集于像平面的光线生成图像。摄像机中最重要的部件是数字传感器。目前市场上主要有 CCD<sup>[26]</sup>和 CMOS<sup>[27]</sup>两种，两者的主要区别是从芯片中读出数据的方式即读出结构不同。

CCD 传感器由一行光线敏感的光电探测器组成，光电探测器一般为光栅晶体管或发光二极管，我们把光电探测器看做是能将光子转成电子并将电子转成电流的设备。每个光电探测器都有最多可以储存电子数量的限制，常取决于光电探测器的大小。曝光时光电探测器累积电荷，通过转移门电路，电荷被移至串行读出寄存器从而读出。每个光电探测器对应一个读出寄存器。串行读出寄存器也是光敏的，必须由金属护罩遮挡以避免读出期间被其接受到其他光子。读出的过程是将电荷转移到电荷转换单

元，转换单元将电荷转为电压，并将电压放大。转移门电路和串行读出电路是子耦合设备。每一个 CCD 最多由 4 个门组成，这些门在一定方向上传输电荷。电荷转换成电压并放大后，可以转换成模拟或数字信号。

CCD 主要分为线阵和面阵传感器两种。线阵传感器只能生成一行图像，在实际用途中，需要多行组成二维图像，如图 2-9。在面阵传感器中，光在光电探测器中转换成电荷，电荷按行的顺序转移到串行读出电路寄存器，然后与线阵传感器的方式一样转换为视频信号，如图 2-10。

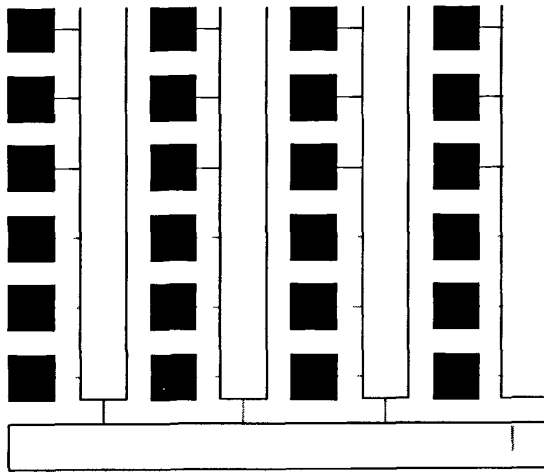


图 2-10 CCD 行转移

Fig.2-10 Serial transfer sensor

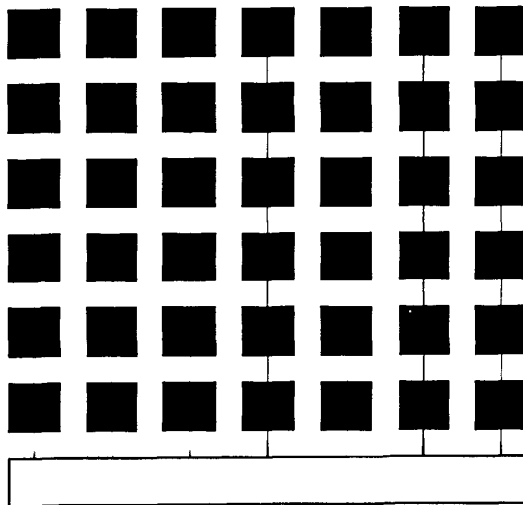


图 2-11 全帧转移

Fig.2-11 full frame sensor

面阵 CCD 的主要参数有：

(1) 分辨率: 是 CCD 主要性能指标, 它决定了显示图像的清晰程度, 分辨率越高, 图像细节表现力就越强。面阵 CCD 是由面阵感光元素组成, 每一个元素又称为像素, 像素物理尺寸越小, 像素总数越多, 图像越清晰, 检测精度也越高

表 2-3 为主要的 CCD 分辨率和尺寸规格:

表 2-3 面阵 CCD 主要规格

Table2-3 SCCD criterion

对角线有效尺寸(单位: 英寸)						
1	2/3	1/1.8	1/2	1/2.7	1/3	1/4
12.8*9.6	8.8*6.6	7.18*5.32	6.4*4.8	52.7*3.96	4.8*3.6	3.6*2.7
分辨率						
659*494	782*582	1034*779	1392*1040		1628*1236	
VGA	SVGA	XGA	SXGA		UXGA	

(2)灵敏度: 是 CCD 对信号光线的敏感程度, 或者说是 CCD 正常成像时所需的最暗光线。灵敏度的单位是勒克斯 (LUX), 数值越小, 表示需要的光线越少, 摄像机也越灵敏。

(3)信噪比: 信噪比指的是信号传输过程中信号与噪音的强度比值, 通常表现为 46 分贝, 如果为 50 分贝, 则图像有少量噪声, 但图像质量较好; 如果能达到 60 分贝, 就不会出现噪声。

(4)拖影和高光溢出: 拖影是由于面阵传感器在读出过程中, 仍有电荷在累积, 上面的像素要经过下面的像素移出, 通过像素累积的全部场景信息就会发生拖影现象。高光溢出是指当累积的电荷超过了光电探测器的容量时, 电荷就会溢出到相邻的光电探测器中, 因此图像中亮的区域就会显著放大, 需要增加溢流通道。

## 2.2.4 工业摄像机接口类型

摄像机采集到的模拟或数字信号必须传输到计算机上, 由于在实验室内使用, 数据传输量一般, 推荐使用 1394 接口。

表 2-4 工业摄像机接口类型

Table2-4 camera-computer interface

	Cameralink	Usb2.0	1394a	1394b	Gige	Ethernet
速度	base:1.5g medium:3.8g full:5.1g	480m	400m	800m	1000g	100m
距离	10m	5m	4.5m	4.5m	100m	100m
优势	1. 带宽高 2. 抗干扰能力强 3. 有待于处理功能的采集设备	1.易用 2.价格低 3.多相机	1.易用, 价格低, 多相机 2.传输距离远 3. 标准 DCAM 协议 4.cpu 占用低	易用, 价格低, 多相机 传输距离远, 线缆价格低 标准 gige vision 协议	易用, 价格低 传输距离远, 线缆价格低	
缺点	价格高 线中不带供电	无标准协议 Cpu 占用高	长距离传输线缆贵	cpu 占用高 对主机配置要求高 有时存在丢包现象	无标准协议 带宽过低 Cpu 高	

德国 AVT 的 STINGRAY 系列数字摄像 Stingray F201C 参数如表 2-5:

表 2-5 Stingray F201C 数字摄像机性能指标

Table2-5 Stingray F201C performance

	STINGRAY F-201B/C
成像设备	1/1.8"(Diag 9mm)逐行扫描 SONY CCD ICX 274
有效成像	1628(H)×1236(V)
像素尺寸	4.4 μm×4.4 μm
像素深度	8bit/14bit(16 bit 高信噪比模式)
镜头接口	C 接口/CS 接口
数字接口	IEEE1394B:IIDC V1.3 S800 daisy chain
传输速率	100,200,400,800Mbit/s
帧率	最高可达 14fps(最大分辨率)
帧调节	手动:0-24 dB;自动增益(可选 AOI)
曝光时间	47 μ s...67s;自动快门;(可选 AOI)
图像预处理	可编程查找表;阴影校正;高信噪比模式;白平衡,颜色插值(bayer 变换)局部抗颜色失真色调,色饱和度调整,子采样;2×8×binning 或子采样;独立基准 AOI 特征自动调整
内置智能属性	32M 内置缓存;延迟图像传输;触发延迟;多帧图像采集;图像镜像;多触发模式;SIS;序列模式;可储存用户设置

供电要求	DC8V - 36V 通过 IEEE 1394 接口或者 12 针 I/O 接口
功耗	少于 3 瓦特(@12 V DC)
尺寸	73mm×44mm×29mm (L×W×H);不含三脚架和镜头
重量	小于 100g(不含镜头)
工作温度	+5°C ... +45°C
储存温度	-10°C ... +60°C
符合标准	CE, FCC Class B; RoHS (2002/95/EC)
可选项	可旋转光学头;光学滤波镜;1394 线;板极版本;冷却装置;满足医学需求 开发包:AVTFirePackage/Direct FirePackage/Fire4Linux/AVT Active FirePackage

### 2.3 本章小结

根据机器视觉平台搭建原理,针对课题所研究的小模数齿轮检测和实验室经费现状等情况,完成了机器视觉相关硬件配置和选型,确定了实验装置的性能参数和注意事项,实验装置如图 2-12。

实验装置如下图:

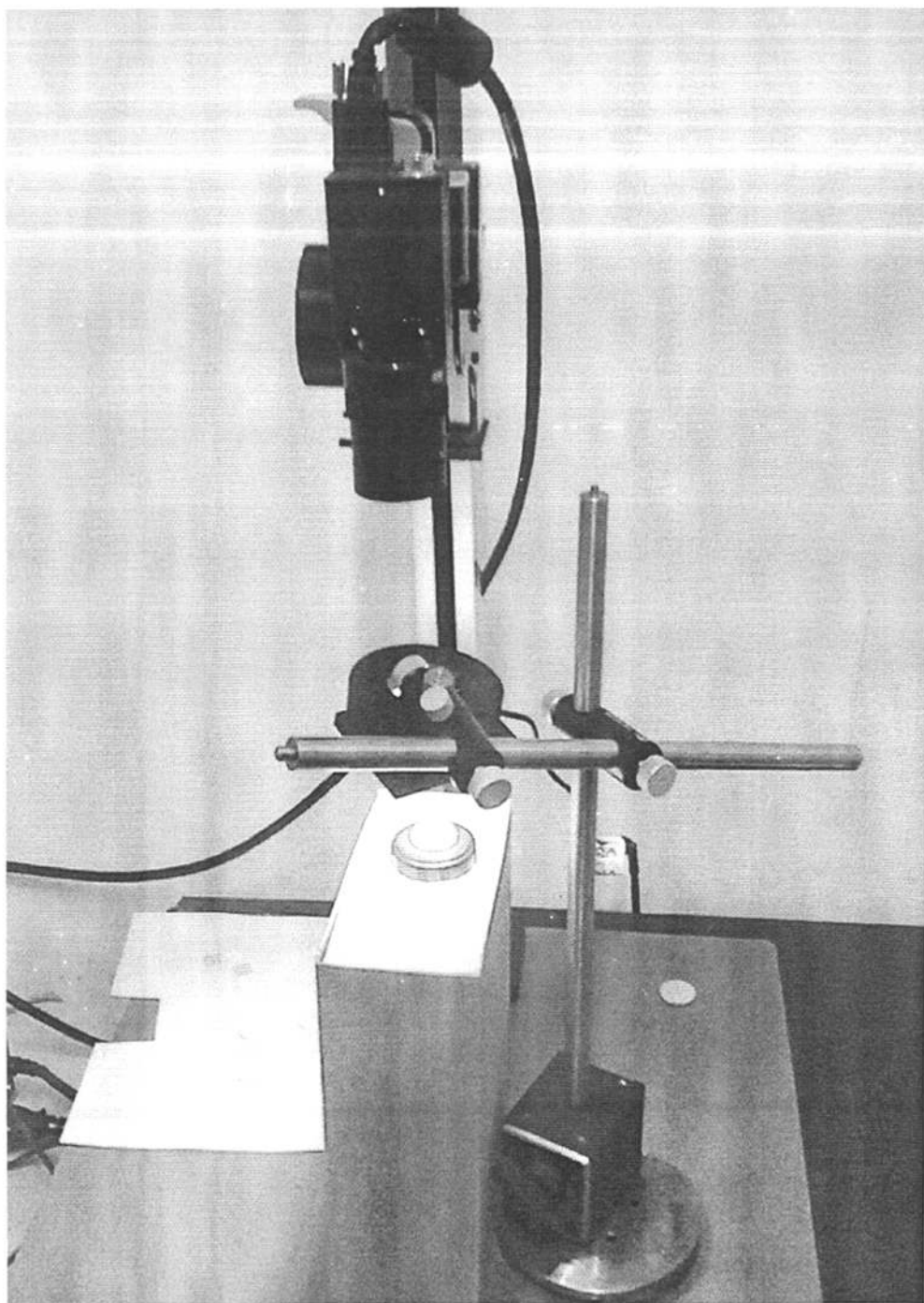


图 2-12 实验装置

Fig.2-12 experimental facilities

## 第三章 图像处理基本算法研究

前一章讲述了拍摄图像到图像传输到计算机这一过程中所需要的各个硬件部件。所有这些硬件部件在机器视觉中发挥重要的作用。例如，为了突出感兴趣物体时，光源经常是至关重要的；为了在恰当的时候用正确的曝光来拍摄一幅图像，带有外触发功能的图像卡和摄像机就是解决问题的关键；为了获取清晰没有畸变的图像，镜头又显得尤为重要，不过，这些视觉设备不能真正给我们直接可用的东西，机器视觉的真正关键所在是图像处理。本章将讨论一些最重要的机器视觉算法，这也是整个检测系统的核心。

### 3.1 图像：数据结构，区域

在深入研究机器视觉算法前，首先分析机器视觉应用中涉及到的基本数据结构。

#### 3.1.1 图像数据结构

机器视觉中，图像是基本的数据结构，它储存在计算机的内存中，一个像素可被看成是能量的采样结果，该能量是传感器上的感光单元在曝光过程中所累积到的<sup>[28]</sup>。根据摄像机的不同，传感器的光谱响应也不同，黑白摄像机会返回每个像素多对应的一个能量采样结果，这些结果组成了一个单通道灰度值图像。对于 RGB 彩色摄像机，一般有 R、G、B、三个通道，三个采样结果。理论上，一幅图像可以是一组任意多的通道图像。

一幅图像离散化后，可以把它看作是一个二维数组，因此，像素  $(r, c)$  处的灰度值可以被解释为矩阵： $g = f_{r,c}$  中的一个元素。同理，一个多通道图像可视为一个函数  $f: R \rightarrow R^N$ ，这里的  $N$  表示通道的数目。

基于上面的讨论，灰度值可由实数表示，现实情况是，图像采集设备不但在空间上把图像离散化，同时也会把灰度值离散到某一固定的灰度级范围内，例如，8 位图像，所有可能的灰度值集合为  $G_8 = \{0, \dots, 255\}$ 。位深为  $b$  时， $G_b = \{0, \dots, 2^b - 1\}$ 。

#### 3.1.2 区域

机器视觉的任务是识别图像中包含某些特征的区域，比如执行一个阈值分割处理，因此我们至少还需要一个数据机构，它可以表示整幅图像中任意一个像素子集，此外，对于形态学处理，能将区域延伸到边界外也是很重要的，所以我们把区域定义为离散平面的一个任意子集： $R \subset Z^2$ 。

区域的表达方式有很多种。所谓穷举法，把所有的点用集合表示出来，但是这有明显的缺陷：它必须储存那些区域外的点，而这些点有时是很多的，这种表示法效率也不高，因为图像上的每个点都需要占用一个位来保存。

推荐一种行程法的区域表示方法，如图 3-1 和表 3-1，首先注意到沿水平或垂直方向，行程延伸过覆盖的临近像素形成一个区域，这样我们可以用每次行程的必要特征来表示该小块区域，每次行程的累积就是整个区域。行程表示法数据量的大小只是该行程的横或纵坐标值，行程开始和行程结束的坐标值。

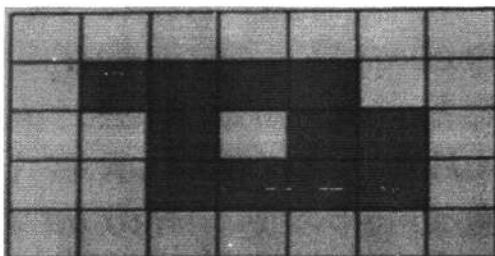


图 3-1 一个区域的行程编码示例

Fig.3-1 an example of run-length representation

表 3-1 一个区域的行程编码

Table3-1 an example of run-length representation

Run	Row	Start column	End column
1	1	1	4
2	2	2	2
3	2	4	5
4	3	2	5

利用行程编码可以有效地减少储存空间，降低内存的使用频率，显著减少执行的时间，并且，使用行程编码可以很容易的表示含有负坐标的区域，区域运算上也有很多便利之处，这一点我们在后面进行轮廓提取或形态学运算的时候会注意到。

### 3.2 图像增强

采集图像时，环境因素和硬件设备的限制，采集到的图像难免有不足之处，图像或明或暗，噪声等环境因素都会导致误差的增大。本节将介绍常用的图像增强算法。

灰度值变换是改变照明条件的补充，调整一个图像灰度值的一个原因是图像对比度太弱，光源的调整可以调整整个对比度，但是局部对比度的调整需要软件实现。

灰度值变换函数  $f(g) = g_{r,c} : t_{r,c}$ ，注意  $f(g)$  表示进行灰度值变换的函数，它的值



域范围通常是  $G_0$ ，也就是说离散，为提高变换的速度，灰度值变换通常通过查找表 (LUT<sup>[29]</sup>) 来进行，即将每一个输入值和输出值相对应，保存到 LUT 中。如图 3-2 是变换灰度值的效果图。

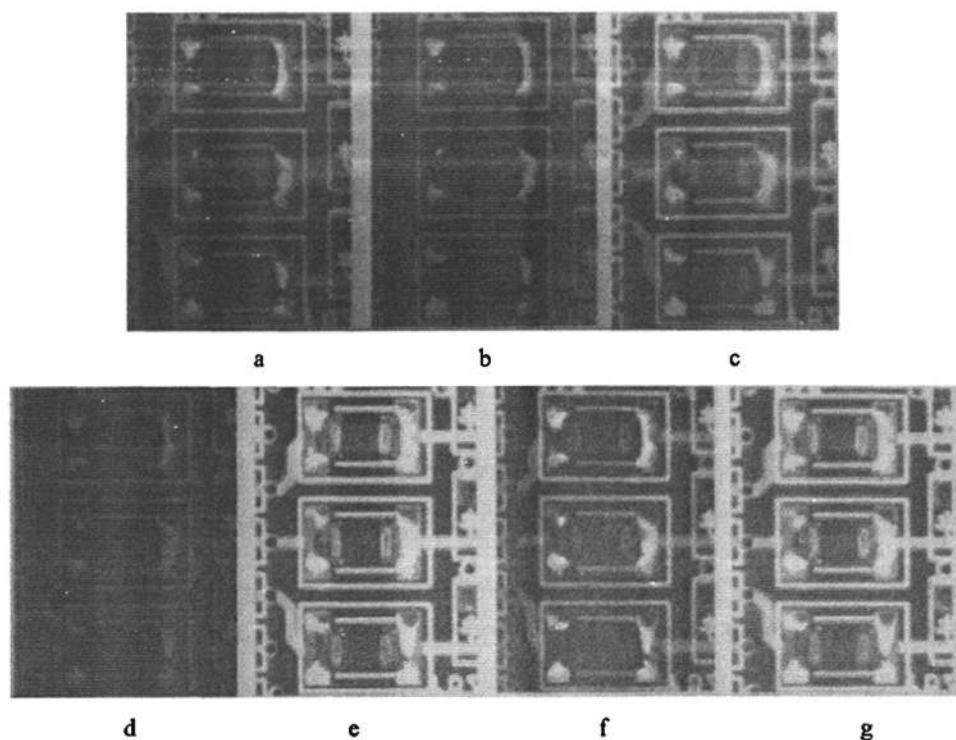


图 3-2 线性灰度值变换的例子

(a)原始图像；(b)降低亮度；(c)增加亮度；(d)降低对比度；(e)增强对比度；(f)灰度值归一化处理；(g)鲁棒的灰度值归一化处理

Fig.3-2 the example of Linear Transformations

(a)original drawing; (b) Decrease Brightness; (c) increase Brightness; (d) Decrease Contrast; (e) increase contrast; (f) gray value normalization; (g) robust gray value normalization

### 3.3 图像平滑

每幅图像包涵某种程度的噪声，在图像处理把噪声<sup>[30]</sup>看做是多种原因造成的灰度值的随机变化，比如光子通量的随机性而产生的噪声。这些噪声可以通过图像平滑处理来抑制。

在更正规的方式下，噪声被视为一种平稳随机过程。这表示像素值  $g_{r,c}$  被一噪声项  $n_{r,c}$  干扰后得到的灰度值  $\hat{g}_{r,c} = g_{r,c} + n_{r,c}$ 。我们视噪声  $n_{r,c}$  为一个针对每一个像素的平均值为 0 且方差为  $\sigma^2$  的随机变量。

### 3.3.1 时域平均法

通过以上的讨论，噪声抑制能被视为随机估计问题，也就是说，用实测到包含有噪声的像素值  $\hat{g}_{r,c}$  来估计像素值的真值  $g_{r,c}$ ，一个显而易见的方法是采集同一场景多幅图像，并对这些图像进行平均，由于多幅图像在不同时间进行采集，称之为时域平均或时域平均值，计算方法如下：

$$g_{r,c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{g}_{r,c,i} \quad (3-1)$$

上式中  $\hat{g}_{r,c,i}$  代表第  $i$  幅图像上位置  $(r,c)$  处的灰度值。因为这个时域平均图像是对灰度值真值的一种出色估计，所以用来计算平均图像的一组原始图像中，任意一副图像减去次平均图像就可以得到这幅图像的噪声。时域平均法的缺点是必须采集多幅图像才能进行噪声抑制，在对实时性有较高要求的机器视觉中就没那么有效了。

### 3.3.2 空间平均法

由上述随机过程理论，可以发现：如果某随机过程是遍历的，时域平均就可以被空域平均代替，这样，空间平均或者空域平均值可以通过像素数  $(2n+1) \times (2m+1)$  的一个窗口（也称作掩码）按如下方法计算：

$$g_{r,c} = \frac{1}{(2n+1) \times (2m+1)} \sum_{i=-n}^n \sum_{j=-m}^m \hat{g}_{r-i,c-j} \quad (3-2)$$

这就是均值滤波器，与时域平均类似，采用了几次均值测量，噪声的方差就降低到原来的  $1/[(2n+1) \times (2m+1)]$ 。例如采用  $5 \times 5$  的均值滤波，噪声的标准差就下降到原来的五分之一，但是均值滤波有它固有的缺陷，由于原始图像并非遍历的，采用均值滤波后图像边缘不如时域平均法锐利，因此会产生边缘模糊的图像。

基于上述滤波器的优缺点考虑，我们一直在寻找一种滤波器，它应该满足的条件如下：

- (1) 线性的，无论出现在哪个位置，都产生同样的结果；
- (2) 旋转对称的，对图像中不同方向的物体应用滤波器后产生的效果是一样的；
- (3) 存在一个参数  $t$  来控制平滑的程度， $t$  值越高表示平滑程度越大，图像中更多的局部最大值被消除。

这就是高斯滤波器<sup>[31]</sup>，这个函数也描述了正态分布随机变量的概率密度。

$$g_{\sigma}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/(2\sigma^2)} \quad (3-3)$$

对比图 3-3 到图 3-8（截取部分塑料齿轮图像放大图），与均值滤波器和中值滤波

器相比，高斯滤波器既能滤除噪声，又能很好的保留塑料齿轮图像中的轮齿齿廓细节，而均值滤波则出现边界模糊，中值滤波轮廓清晰，但边界出现了变形。

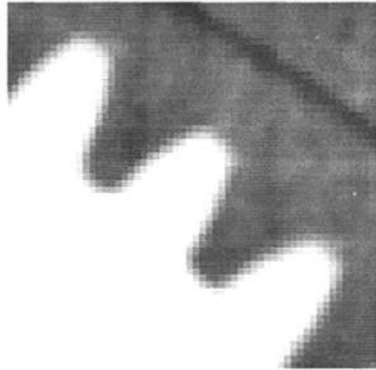


图 3-3 原图  
Fig.3-3 original

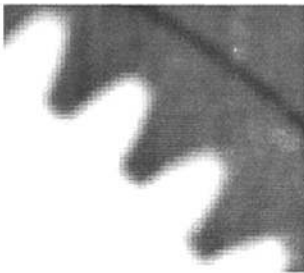


图 3-4 高斯平滑 (sigma=5)  
Fig.3-4 gauss (sigma=5)



图 3-5 高斯平滑 (sigma=3)  
Fig.3-5 gauss (sigma=3)

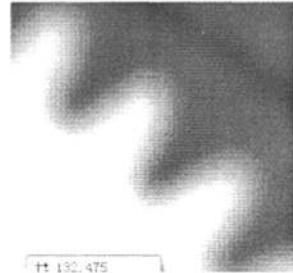


图 3-6 高斯平滑 (sigma=11)  
Fig.3-6 gauss (sigma=11)

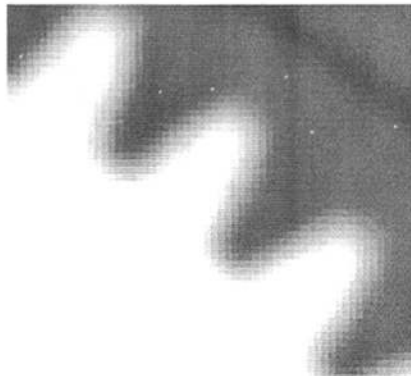


图 3-7 均值平滑 (MaskWidth=MaskHeight=5)  
Fig.3-7 mean (MaskWidth=MaskHeight=5)

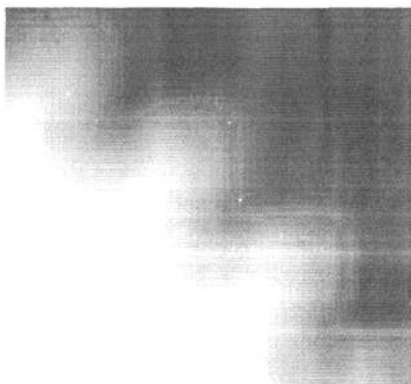


图 3-7 均值平滑 (MaskWidth=MaskHeight=15)  
Fig.3-7 mean (MaskWidth=MaskHeight=15)

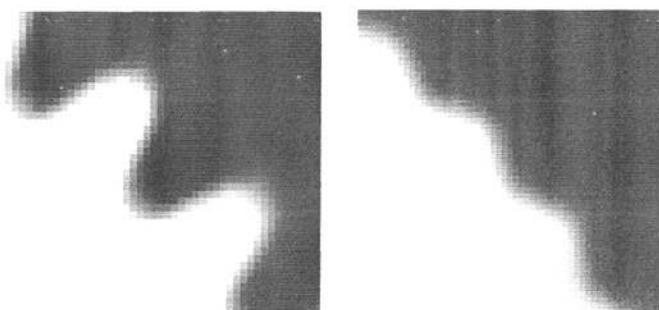


图 3-7 中值平滑 (Radius =5)      图 3-8 中值平滑 (Radius =15)  
Fig.3-7 median (Radius =5)      Fig.3-8 median (Radius =15)

### 3.4 图像分割

在对图像进行了优化处理了以后，图像中目标物的信息逐渐清晰，为了提取有用的信息，必须进行图像分割，即提取图像中感兴趣的区域 (ROI)，更正式点的说法是：返回一个或多个区域、轮廓或亚像素轮廓作为输出结果。

#### 3.4.1 阈值分割

最简单的是图像的固定阈值分割：

$$S = \{(r, c) \in R \mid g_{\min} \leq f_{r,c} \leq g_{\max}\} \quad (3-4)$$

因此，阈值分割将图像 RIO 灰度值低于某一灰度值范围内全部点选到输出区域 S 中。只要被分割的物体和背景之间存在非常明显的灰度差，都能使用固定阈值分割。示例如图 3-9 和 3-10。

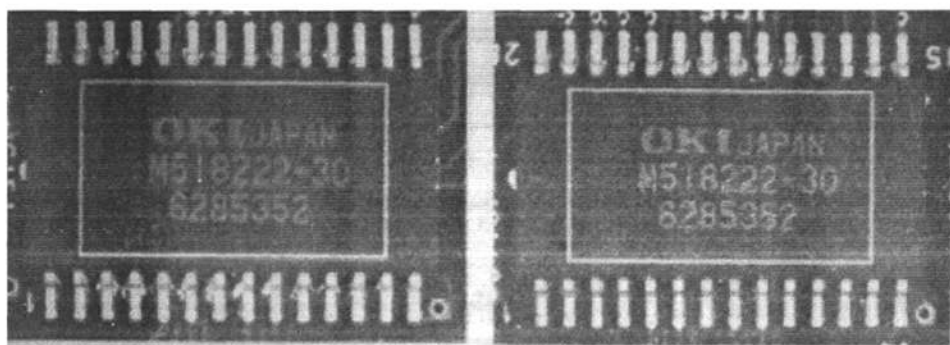


图 3-9 印刷在 ic 上字符的图像

Fig.3-9 two images of ICs on a printed circuit board



图 3-10 图 3-9 阈值分割后的结果 (90-255)

Fig.3-10 fig.3-9 after threshold (90-255)

通过视觉平台采集到的图像及其灰度直方图如图 3-11 和 3-12:

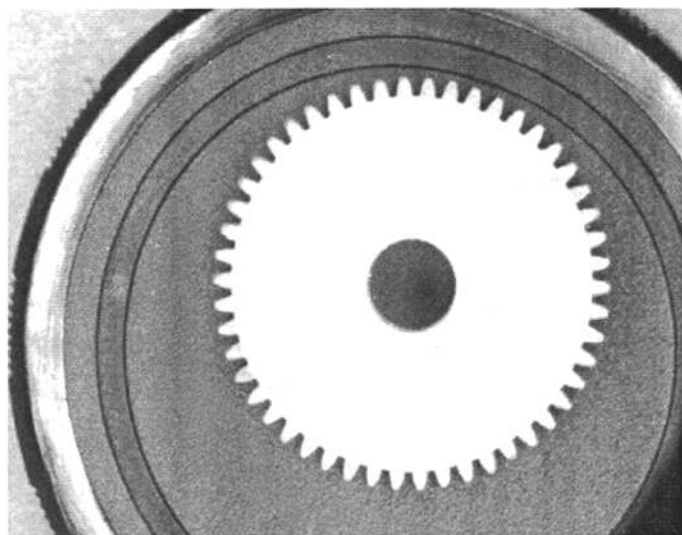


图 3-11 采集的图像

Fig.3-11 image acquired

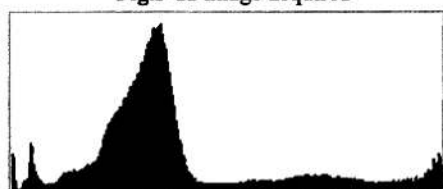


图 3-12 整幅图的直方图  
Fig.3-12 Histogram of the whole image

通过选取区域，得到主要部分及其直方图如图 3-13 和 3-14:

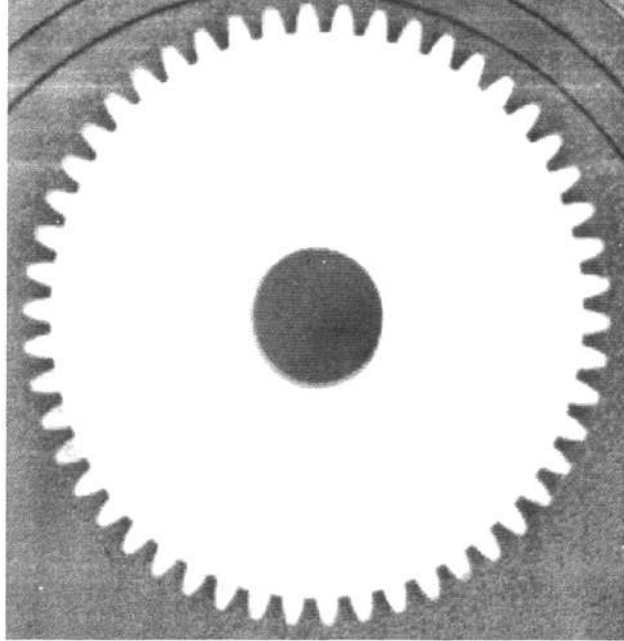


图 3-13 裁剪完后图像  
Fig.3-13 image after cut

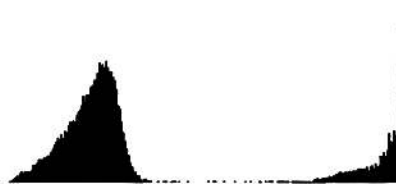


图 3-14 主要部分的直方图  
Fig.3-14 Histogram of the main part

如图 3-15，我们通过阈值分割得到的齿轮齿面图像。

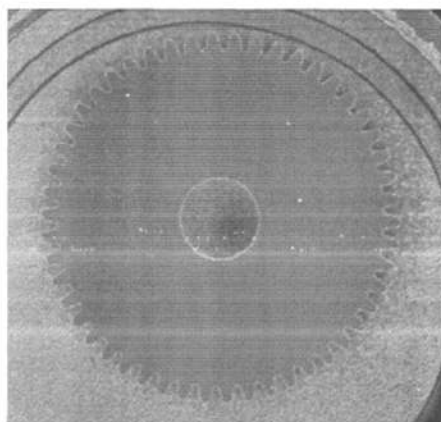


图 3-15 阈值分割效果  
Fig.3-15 main part after threshold

固定阈值仅在物体的灰度值和背景的灰度值不变时效果很好。但是这种情况很少，照明环境的变化和目标物的稍作改变都会使固定阈值出现错误判断。这时要选取一个称之为自适应阈值的灰度值，如图 3-16 到 3-20

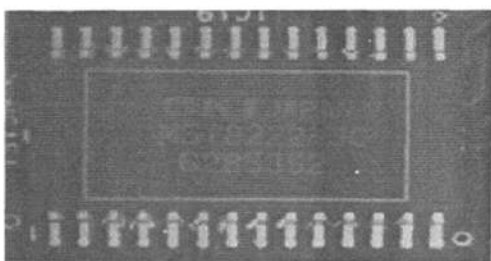


图 3-16 一个 IC 上印字的图像 (a)  
Fig.3-16 image of ICs on a printed circuit board

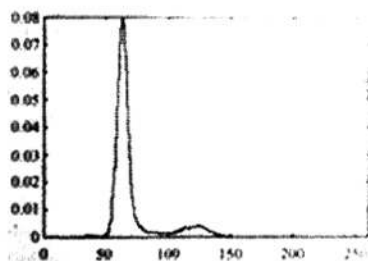


图 3-17 图 3-16 的灰度直方图  
Fig.3-17 the Histogram of Fig 3-16

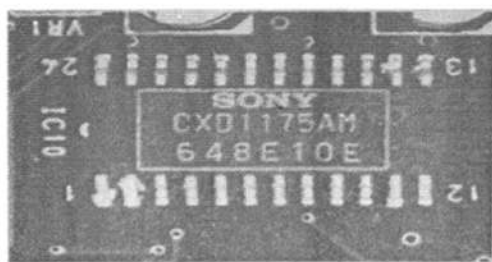


图 3-18 另一个 IC 上印字的图像 (b)  
Fig.3-18 image of ICs on a printed circuit board

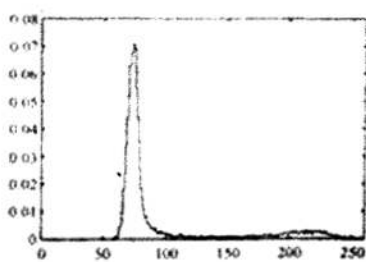


图 3-19 图 3-18 的灰度直方图  
Fig.3-19 the Histogram of Fig 3-18



图 3-20 自动阈值处理结果

Fig.3-20 result of bin\_threshold

另外更为不幸的是并不能得到理想的背景和目标灰度值相差很大的图像（这种图像在灰度值直方图上不能表现为双峰值），复杂的照明或变幻莫测的目标特征无法进行阈值分割处理，因为不能找到一个对整幅图像都合适的阈值，有必要引入动态阈值或局部阈值的概念，如图 3-21 和 3-22

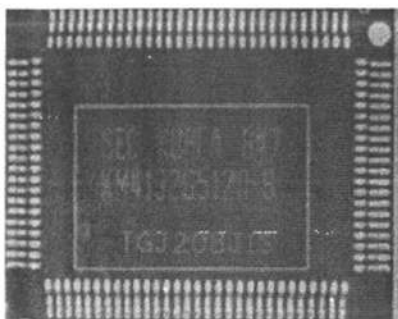


图 3-21 另一个 IC 上印字的图像 (c)

Fig.3-21 image of ICs on a printed circuit board

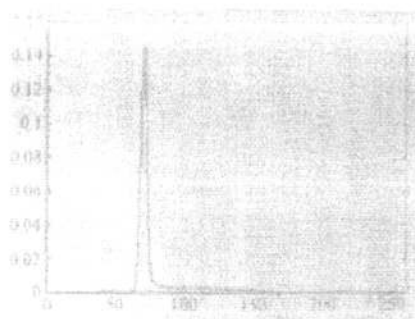


图 3-22 图 3-21 的灰度直方图

Fig.3-22 the Histogram of Fig 3-21

可以看到，该直方图只存在一个明显的最大值，不存在明显的最小值。因此我们使用均值，高斯，中值等滤波器进行平滑处理计算出当前像素为中心的窗口内的平均灰度值，把这个作为对背景灰度值的估计，将图像与其局部背景进行比较的操作称为动态阈值分割处理。用  $f_{r,c}$  表示输入图像，用  $g_{r,c}$  表示平滑后的图像，则对亮物体的动态阈值分割处理如下：

$$S = \{(r,c) \in R \mid f_{r,c} - g_{r,c} \geq g_{diff}\} \quad (3-5)$$

而对暗物体的动态阈值分割是：

$$S = \{(r,c) \in R \mid f_{r,c} - g_{r,c} \leq g_{diff}\} \quad (3-6)$$

在动态阈值分割处理中，平滑滤波器的尺寸决定了能被分割出来的物体的尺寸。如果滤波器的尺寸太小，那么在物体的中心估计出的局部背景将不再理想，凭经验，均值滤波器的宽度必须大于被识别物体的宽度，对中值和高斯滤波器同样适用。

讨论到目前为止，动态阈值分割处理被用来将图像和图像的局部背景进行对比，局部背景是图像平滑处理得到的。稍作调整，动态阈值分割处理就可以被用来检测某一物体上的缺陷，比如，检测印刷缺陷，齿轮轮廓检测等。

### 3.5 提取连通区域

在前面进行了图像分割以后，得到的是一些相互连通的像素集合而已，所以，为



了获得每一个区域，我们必须计算出分割后所得到的区域内包含的所有连通区域（分支）。

为了计算出连通区域，我们必须定义何时两个像素可视为彼此连通：

(1) 两个像素有共同的边缘，也就是说，一个像素在另一个的上方，下方，左侧或右侧，称为 4 连通。如图 3-23：

(2) 第二种为第一种的发展，将对角线上的像素元素也包括进来，称为 8 连通。如图 3-24：

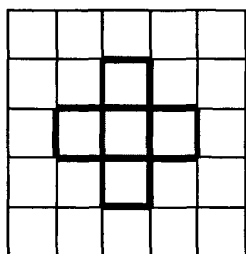


图 3-23 四连通  
Fig.3-23 4-neighborhood

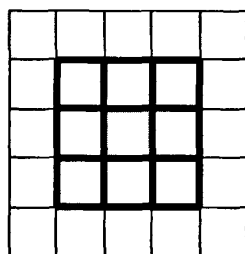


图 3-24 八连通  
Fig.3-24 eight-neighborhood

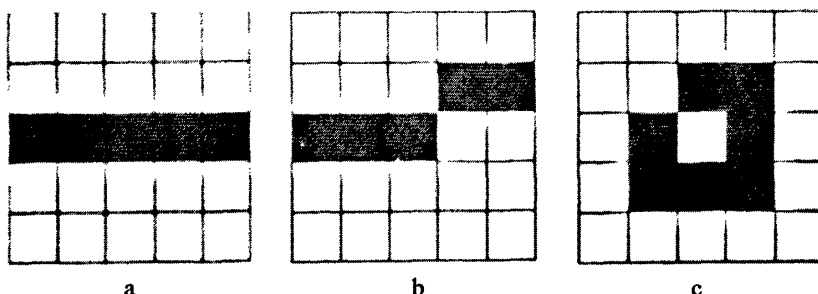


图 3-25 (a) 一条线分成两个区域；(b) 线旋转，前景不变，背景也只有一个连通区域；(c) 前景一个洞，背景也只有一个连通区域

Fig.3-25 (a) one line, two regions; (b) one line, one region; (c) there is a hole in foreground, but there is no hole in background

用行程表示法描述的区域上计算连通区域，可以使用经典的深度优先搜索<sup>[32]</sup>。我们反复搜索第一个未处理的行程，然后在此行程上下两行中搜索与此行程交叠的所有行程。判断两行程是否交叠的依据就是连通性的定义。对于 4 连通，两交叠的行程中必须至少有一个像素位于同一列。对于 8 连通，两行程必须至少对角接触，观察图 3-25 可以发现，在同一幅图上，应用 4 连通和 8 连通可以产生不同的结果。

深度优先搜索的例子见图 3-26：

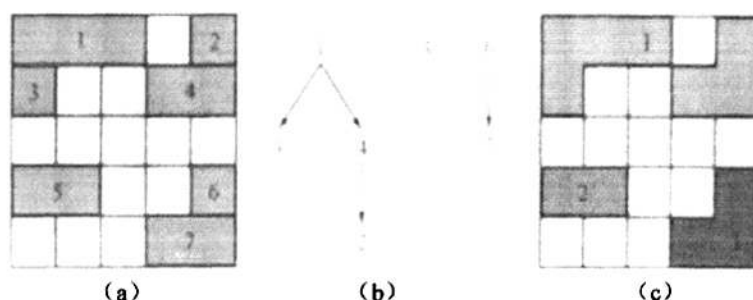


图 3-26 (a) 行程法描述的一个区域, 此区域中包含了 7 个行程; (b) 用 8 连通对图 (a) 中的区域执行深度优先搜索时的搜索树, 图中数字代表行程; (c) 搜索后返回的连通区域结果  
Fig.3-26 (a) a region with 7 route; (b) searched with eight-neighborhood rule; (c) result

### 3.6 亚像素精度轮廓

到目前为止, 本文所有讨论都是基于像素精度的, 在大多数情况下, 这种精度是够用的。但是有些场合需要的精确度要高于像素精度。因此, 需要提出一种能返回亚像素精度结果的算法。显然, 亚像素精度分割结果不是一个区域(区域是像素精度的)。为此, 表示结果的适当数据是亚像素精度轮廓, 轮廓表示图像中两个区域的边界, 这两个区域中一个区域的灰度值大于阈值  $g_{sub}$ , 为了获取这个边界, 将图像的离散表示转换成一个连续函数。例如, 通过双线性差值完成这种转换:

$$\tilde{g} = b(ag_{11} + (1-a)g_{01}) + (1-b)(ag_{10} + (1-a)g_{00}) \quad (3-7)$$

一旦我们获得了表示一个图像连续函数, 从概念上讲亚像素分割处理的结果就可以使用常量函数  $g(r,c) = g_{sub}$  与图像函数  $f(r,c)$  相交得到。图 3-27 给出了经过双线性内插<sup>[33]</sup>处理后图像  $f(r,c)$  在一个由 4 个临近像素的中心构成的  $2 \times 2$  局部。

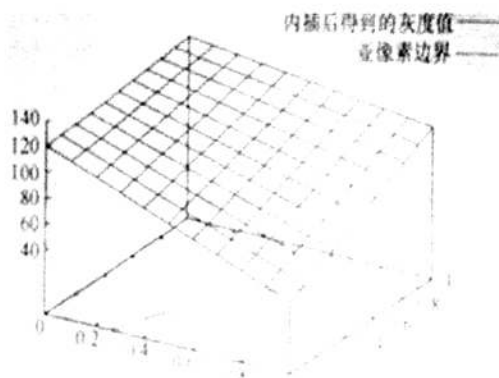


图 3-27 此图显示的灰度值是四个像素间双线性插值得到的, 四个像素的中心在图形的四个角上, 以及在灰度值  $g_{sub} = 100$  时的相交曲线, 曲线在图形的下方。

Fig.3-27 the bilinearly interpolated image in a  $2 \times 2$  block of the four closest pixel centers, the curve is

under the graph

### 3.7 形态学

由于目标固有缺陷或者视觉系统的误差等因素,分割结果中经常有不想要的干扰,如塑料齿轮的毛刺,齿形弯曲等,必须调整分割后区域的形状以获取我们想要的结果。这是数学形态学的课题,数学形态学被定义为一种分析空间结构的理论<sup>[34]</sup>。

所有的区域形态学处理都是基于六个非常简单的操作:并集,交集,差集,补集,平移,转置。

两个区域 R 和 S 的并集是所有点的集合:

$$R \cup S = \{p | p \in R \vee p \in S\} \quad (3-8)$$

两个区域 R 和 S 交集是不但位于 R 而且位于 S 的所有点的集合:

$$R \cap S = \{p | p \in R \wedge p \in S\} \quad (3-9)$$

差集:  $R \setminus S = \{p | p \in R \wedge p \notin S\} = R \cap \bar{S} \quad (3-10)$

补集:  $\bar{R} = \{p | p \notin R\} \quad (3-11)$

平移:  $R_t = \{p | p - t \in R\} = \{q | q = p + t | p \in R\} \quad (3-12)$

转置:  $\tilde{R} = \{-p | p \in R\} \quad (3-13)$

使用上述基本操作 (区域 R, 结构元 S):

闵可夫斯基加法:

$$\begin{aligned} R \oplus S &= \{r + s | r \in R, s \in S\} = \bigcup_{s \in S} R_s \\ &= \bigcup_{r \in R} S_r = \{t | R \cap (\tilde{S})_t \neq \emptyset\} \end{aligned} \quad (3-14)$$

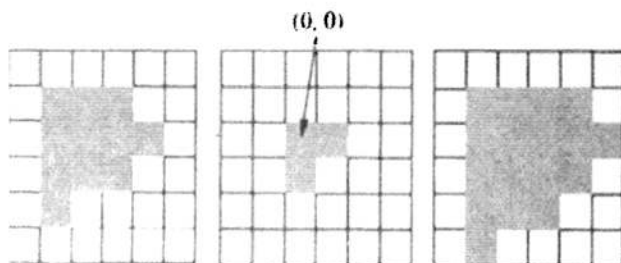


图 3-28 闵可夫斯基加法的例子

Fig.3-28 Minkowski addition

闵可夫斯基加法很简单,但它有个缺点,其几何学准则是转置后结构元至少与区域存在一个公共点,于是我们在闵可夫斯基加法中使用转置后的结构元,此操作称为膨胀:

$$R \oplus \tilde{S} = \{t \mid R \cap S_t \neq \emptyset\} = \bigcup_{s \in S} R_s \quad (3-15)$$

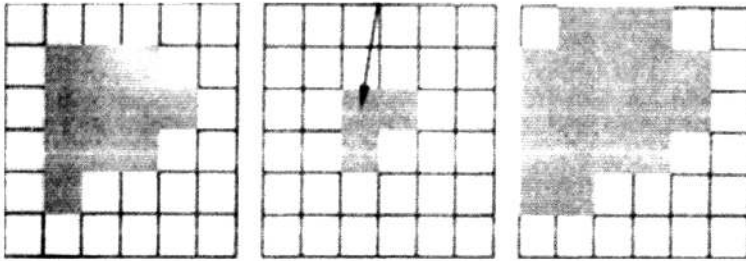


图 3-29 膨胀的例子

Fig.3-29 dilation

形态学的第二个操作是闵可夫斯基减法:

$$R \ominus S = \bigcap_{s \in S} R_s = \{r \mid \forall s \in S: r - s \in R\} = \{t \mid (\tilde{S})_t \subseteq R\} \quad (3-16)$$

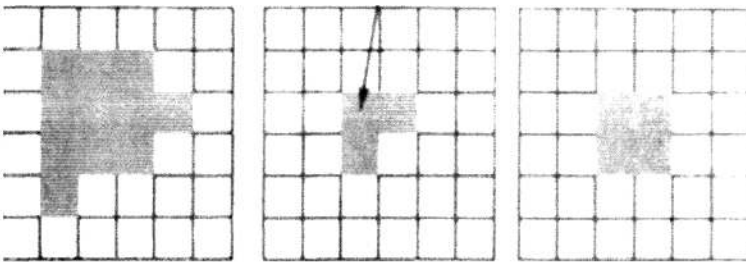


图 3-30 闵可夫斯基减法的例子

Fig.3-30 Minkowski subtraction

在闵可夫斯基减法中使用转置结构元被称为腐蚀:

$$R \ominus \tilde{S} = \bigcap_{s \in S} R_s = \{t \mid S_t \subseteq R\} \quad (3-17)$$

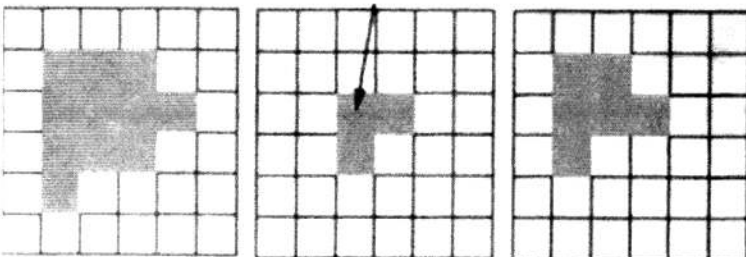


图 3-31 腐蚀的例子

Fig.3-31 erosion

引用一个例子来说明膨胀腐蚀的作用和具体细节, 如图 3-32~3-37:



图 3-32 印刷字符的图像  
Fig.3-32 image

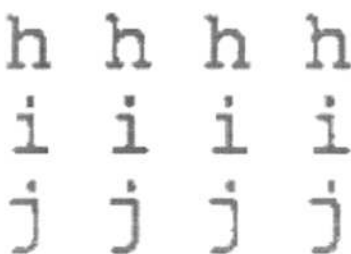


图 3-33 阈值分割  
Fig.3-33 threshold



图 3-34 提取连通区域  
Fig.3-34 connection

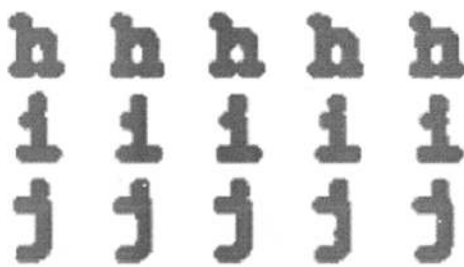


图 3-35 膨胀 (结构圆直径=5)  
Fig.3-35 dilation (diameter=5)

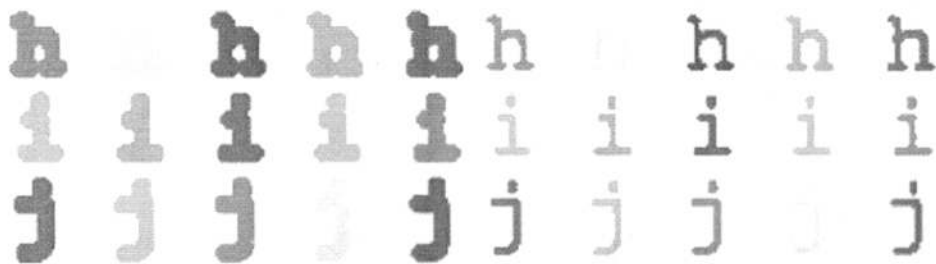


图 3-36 提取连通区域  
Fig.3-36 connection



图 3-37 相交处理  
Fig.3-37 intersection

### 3.8 边缘提取

在一维和二维中边缘的定义边缘就是图像中的一些区域,在这些区域中灰度值变化非常明显,为了得到更正式的描述,暂时将图像视为一个一维函数  $f(x)$ 。基于初等积分学的知识,当  $f(x)$  的一阶导数与 0 差距非常大时,灰度值发生很明显的变化:  $|f'(x)| \gg 0$ 。但是这一点还不足以定义一个唯一的边缘位置,背景灰度值到前景灰度值的过渡是平滑的。因此为了获得唯一的边缘位置,必须加入额外的要求,即一阶导数的绝对值  $|f'(x)|$  是局部最大的,称之为非最大限制。而当  $|f'(x)|$  局部最大时,其二阶导数  $|f''(x)| = 0$ 。所以,边缘是由  $f(x)$  得拐点位置给出的,为了消除平坦拐点,要

求  $f'(x)f''(x) < 0$ 。所以一阶导数绝对值最大对应的是二阶导数为零的那些位置。

现在讨论二维图像的边缘，二维图像是一个曲线  $s(t) = (r(t), c(t))$ ，此曲线用一个参数  $t$  描述（如  $t$  为曲线弧长），二维图像边缘定义为：将一个边缘定义为图像中的若干点，这些点的方向导数在垂直于边缘的方向上是局部最大的，它可以由图像的梯度向量算出，图像的梯度向量：

$$\nabla f = \nabla f(r, c) = \left( \frac{\partial f(r, c)}{\partial r}, \frac{\partial f(r, c)}{\partial c} \right) = (f_r, f_c) \quad (3-18)$$

注：脚标表示偏导关系

所以二维上将边缘定义为通过图像上若干点的梯度量值在梯度方向上局部最大。

### 3.8.1 一维边缘提取

真实图像是离散的且包含噪声。先计算离散一维灰度值剖面的导数：

$$f'_i = \frac{1}{2}(f_{i+1} - f_{i-1}) \quad (3-19)$$

其二阶导数为：

$$f''_i = \frac{1}{2}(f_{i+1} - 2f_i + f_{i-1}) \quad (3-20)$$

### 3.8.2 二维边缘提取

重点讲下二维边缘提取，我们先使用有限差分<sup>[35]</sup>来计算偏导数：

$$f_{r,i,j} = \frac{1}{2}(f_{i+1,j} - f_{i-1,j}) \quad (3-21)$$

$$f_{c,i,j} = \frac{1}{2}(f_{i,j+1} - f_{i,j-1}) \quad (3-22)$$

但是通常图像必须被平滑处理以获取好的提取效果。对运行时间的苛刻，滤波掩码器应尽可能的小，即  $3 \times 3$ 。通过适当的对系数进行按比例缩放，所有  $3 \times 3$  边缘滤波器都能如下形式表示：

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ a & 0 & -a \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 & a & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -a & -1 \end{pmatrix} \quad (3-23)$$

- (1) 当  $a=1$  时，Prewitt 滤波器<sup>[36]</sup>，它是垂直于导数方向上的一个均值滤波器。
- (2) 当  $a=\sqrt{2}$  时，Frei 滤波器<sup>[37]</sup>。
- (3) 当  $a=2$  时，Sobel 滤波器<sup>[38]</sup>，此滤波器在垂直于导数的方向上执行一个近似于高斯平滑的处理。

在以上三个滤波器中，Sobel 滤波器返回的结果是最好的。由于对运行时间的要

求，非最大抑制相对耗时较多，因此常被忽略掉，只对梯度量值进行阈值分割，这将返回宽度大于一个像素的边缘，所以阈值分割后的边缘区域要被骨架化<sup>[39]</sup>。

### 3.9 边缘拟合

#### 3.9.1 直线拟合

一般直线的表示方法为（黑塞范式）：

$$\alpha r + \beta c + \gamma = 0 \quad (3-24)$$

这是过度参数化的表达，但参数 $(\alpha, \beta, \gamma)$ 是齐次的，比例因子 $\alpha^2 + \beta^2 = 1$ 是固定的，为了从一系列点 $(r_i, c_i)$ ， $i = (1, \dots, n)$ 来拟合一条直线，对这些点到直线的距离的平方和进行最小化处理，但考虑到 $(\alpha, \beta, \gamma)$ 三者都为零时，加入一个约束条件 $\alpha^2 + \beta^2 = 1$ 作为拉格朗日乘子：

$$\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^n (\alpha r_i + \beta c_i + \gamma)^2 - \lambda(\alpha^2 + \beta^2 - 1)n \quad (3-25)$$

#### 3.9.2 圆拟合

圆拟合方法类似，总和最小化：

$$\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^n (\sqrt{(r_i - \alpha)^2 + (c_i - \beta)^2} - \rho)^2 \quad (3-26)$$

式 3.26 中， $(\alpha, \beta)$ 是圆心， $\rho$ 是圆的半径。与直线拟合不同，这是一个非线性优化问题，算法细节参考<sup>[40]</sup>

#### 3.9.3 椭圆拟合

椭圆隐式方程：

$$\alpha r^2 + \beta rc + \gamma c^2 + \delta r + \zeta c + \eta = 0 \quad (3-27)$$

与直线类似，上述参数也是齐次的，即只能定义到一个比例因子。椭圆要求 $\beta^2 - 4\alpha\gamma < 0$ ，定义 $\beta^2 - 4\alpha\gamma = -1$ ，通过线性方法来最小化代数误差以得到拟合椭圆的最佳解法由 Fitzgibbon 提出的<sup>[41]</sup>。

### 3.10 本章小结

本章系统地介绍了图像处理的基本概念，在灰度图像的基础上研究图像增强，图像分割，特征提取，形态学，边缘提取和拟合等处理方法，通过小模数塑料齿轮进行各种方法的比较和分析。



## 第四章 视觉系统标定原理及实现

首先介绍下 HALCON 软件, 在这个软件的基础上实现了视觉系统的标定。

HALCON 是全球机器视觉当中的佼佼者, 有 20 多年的生产和研发经验, HALCON 软件到目前为止发展到了 9.0 版本, 它提供了一个全面的视觉处理库, 包括了所有标准和高级的图像处理方法, 覆盖了从不同的硬件采集图像到高级的模式匹配算法, 提供了机器视觉应用程序中通常所需的工具, 如文件处理、数据分析、算法操作或分类等。另外, 它还具有快速原型化和开放结构的重要特征, 通过交互编程环境迅速开发机器视觉应用程序, 或加入新的算子来融合自己的视觉功能。他在社会生产和生活的各个领域发挥作用, 以下为 HALCON 成熟应用的领域<sup>[42][43]</sup>:

光学行业、遥感、印刷、铁路运输、监控、航空宇航、造船、无线通信、交通、木材纸制品、半导体、汽车制造、制陶业、化学业、电子部件及设备、食品业、玻璃业、药物、生命科学、医学、钢铁、矿业、照相学

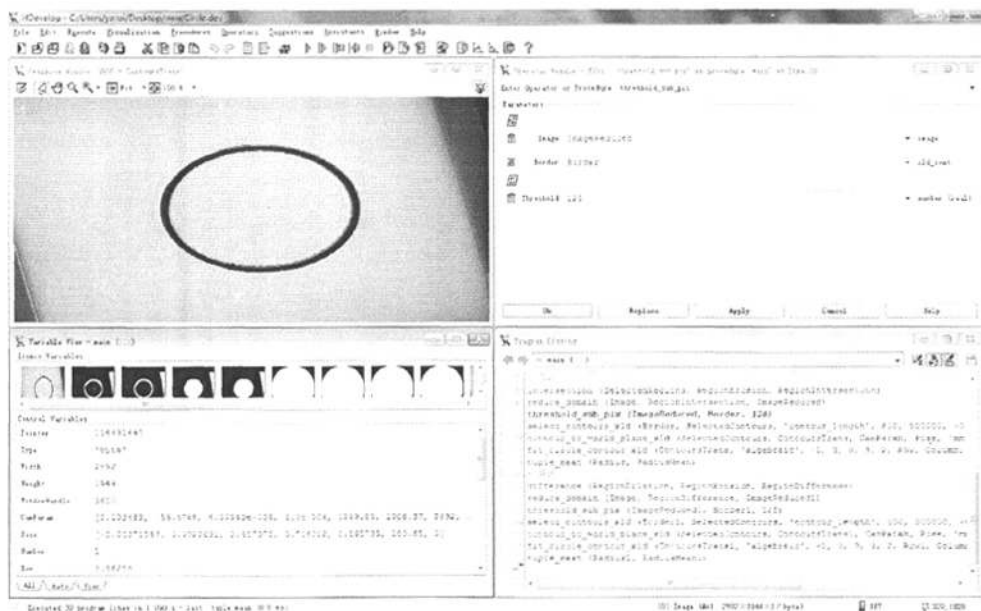


图 4-1 halcon 软件

Fig.4-1 halcon

标定是对摄像机的内参和外参的确定。摄像机一旦出厂, 它的内参是确定的, 但是, 随着视觉环境的改变, 我们也要对内参进行标定, 以免畸变, 景深误差等因素过多的影响测量结果, 而外参的标定是我们的最终目的, 借此我们得到我们需要的世界坐标系信息, 即通常所说的米制信息。

下面介绍一下标定的基本知识, 它们是标定的基础。

## 4.1 三维坐标和转换

### 4.1.1 点和坐标系的平移

一个点  $P$  的位置一般描述为  $(x_p, y_p, z_p)$ ，这也可以看做是一个矢量，下标  $c$  来表示摄像机坐标系，下标  $w$  表示世界坐标系。所以点  $p$  的坐标为：

$$p_c = \begin{pmatrix} x_p^c \\ y_p^c \\ z_p^c \end{pmatrix} \quad p_w = \begin{pmatrix} x_p^w \\ y_p^w \\ z_p^w \end{pmatrix} \quad (4-1, 4-2)$$

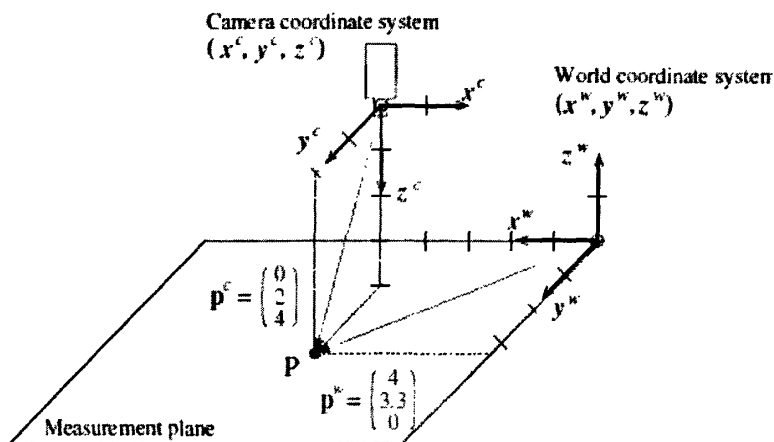


图 4-2 两个不同坐标系内的点

Fig.4-2 Coordinates of a point in two different coordinate systems

图 4-2 显示了一点  $p$ ，它的摄像机坐标系坐标和世界坐标系的坐标。

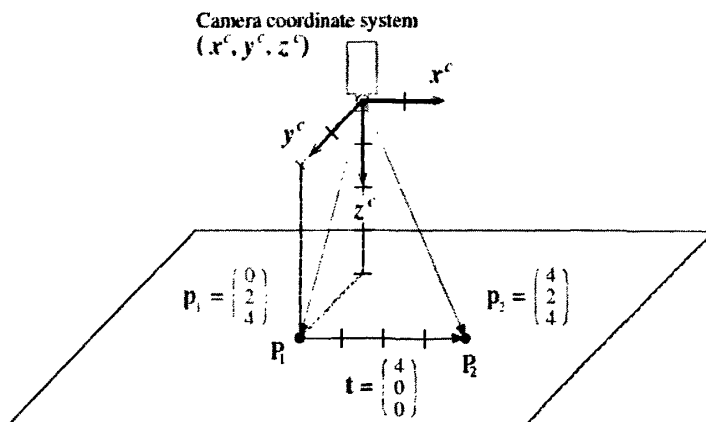


图 4-3 点的平移

Fig.4-3 Translating a point.

图 4-3 显示了点  $p$  沿着  $x$  轴正向平移了 4 个单位，在向量上表示为：

$$p_2 = p_1 + t = \begin{pmatrix} x_{p1} + x_t \\ y_{p1} + y_t \\ z_{p1} + z_t \end{pmatrix} \quad (4-3)$$

注意这种转换是无序的。

下面讲下坐标系的转换：如图 4-4，坐标系  $c1$  平移到了另一坐标系  $c2$ ，它们之间的转换矢量  $o_{c_2}^{c_1}$ ：

$$o_{c_2}^{c_1} = t^{c_1} \quad (4-4)$$

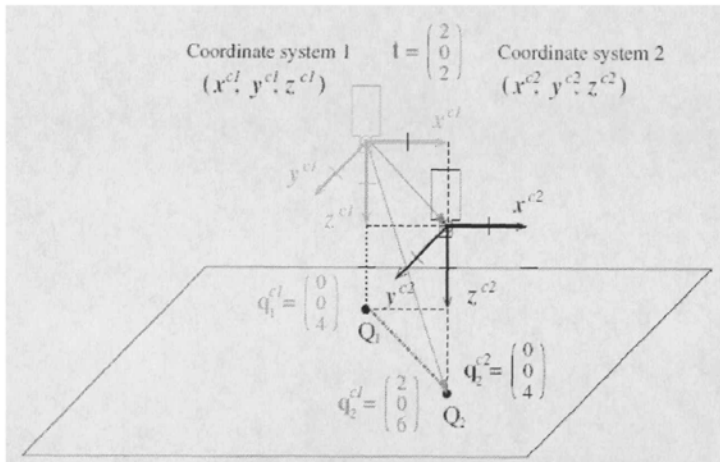


图 4-4 坐标系的平移（包括点）

Fig.4-4 Translating a coordinate system (and point)

因为点的坐标系上，所以点的平移可以看作是它随着坐标系的平移，只要加上那个转换矢量就可以实现点不同坐标系之间的转换。

$$q_2^{c_1} = q_2^{c_2} + t^{c_1} = q_2^{c_2} + o_{c_2}^{c_1} \quad (4-5)$$

#### 4.1.2 点和坐标系的旋转

如图 4-5a，点  $p$  绕着  $z$  轴旋转了 90 度（根据右手原则<sup>[44]</sup>），该角度应为负的，旋转一个点可以表示为乘以一个  $3 \times 3$  得矩阵，绕  $z$  轴的旋转矩阵可以表示如下：

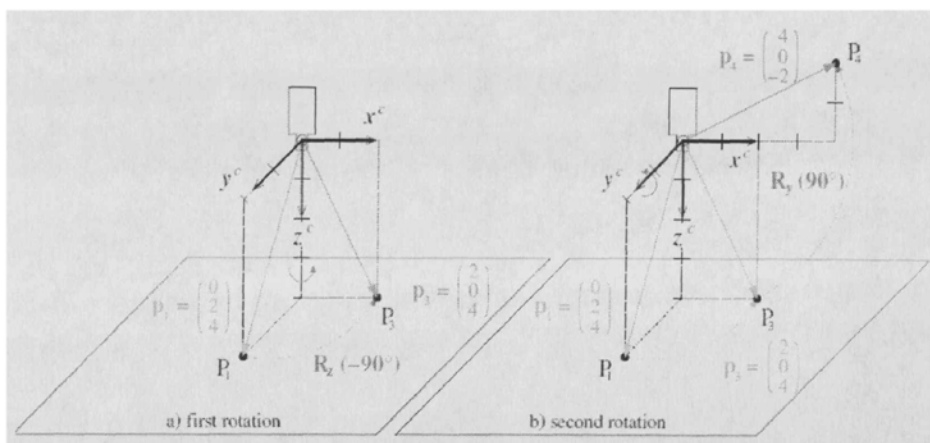


图 4-5 旋转一个点 (a) 先绕 z 轴 (b) 再绕 y 轴

Fig.4-5 Rotate a point: (a) first around z-axis; (b) then around y-axis

用乘以矩阵表示为:

$$p_3 = R_z(\gamma) \cdot p_1 = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{p1} \\ y_{p1} \\ z_{p1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \gamma \cdot x_{p1} - \sin \gamma \cdot y_{p1} \\ \sin \gamma \cdot x_{p1} + \cos \gamma \cdot y_{p1} \\ z_{p1} \end{pmatrix} \quad (4-6)$$

绕 x 轴和绕 y 轴的分别表示如下:

$$R_y(\beta) = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \quad (4-7)$$

$$R_x(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (4-8)$$

下面来讨论下连续旋转的情况。

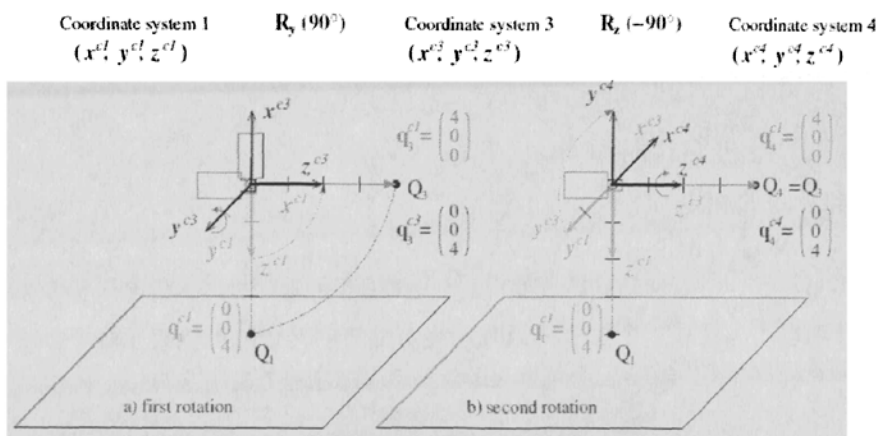


图 4-6 坐标系带点旋转: (a) 先绕 z 轴 (b) 再绕 y 轴

Fig.4-6 Rotate coordinate system with point: (a) first around z-axis; (b) then around y-axis

图 a 显示了  $c1$  坐标系统绕着  $y$  轴旋转了  $90^\circ$  度, 得到  $c3$  坐标系, 图 b 显示了  $c3$  坐标系统绕  $z$  轴旋转了  $-90^\circ$  (根据右手原则定正负), 正如平移矢量的效果一样, 采用了旋转矩阵来定义这种转变:

$$R = [x_{c3}^{c1} \quad y_{c3}^{c1} \quad z_{c3}^{c1}] \quad (4-9)$$

在上图中

$$R_y(90^\circ) = \begin{pmatrix} \cos(90^\circ) & 0 & \sin(90^\circ) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(90^\circ) & 0 & \cos(90^\circ) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4-10)$$

$$x_{c3}^{c1} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} \quad y_{c3}^{c1} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad z_{c3}^{c1} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4-11, 4-12, 4-13)$$

这样可以得到一个阶段性的成果了, 凡是要得到  $c3$  坐标系下点  $p$  的  $c1$  坐标系下的点坐标, 只要乘以旋转矩阵即可:

$$q_3^{c1} = {}^{c1}R_{c3} \cdot q_3^{c3} \quad (4-14)$$

在图 4-6 中的连续旋转可以表示如下:

$$q_4^{c1} = {}^{c1}R_{c3} \cdot {}^{c3}R_{c4} \cdot q_4^{c4} = R_y(\beta) \cdot R_z(\gamma) q_4^{c4} = {}^{c1}R_{c4} \cdot q_4^{c4} \quad (4-15)$$

## 4.2 刚性转变和同质转换矩阵

### 4.2.1 点的刚性转变

如果把平移和旋转统一起来, 得到了所谓的刚性转变。

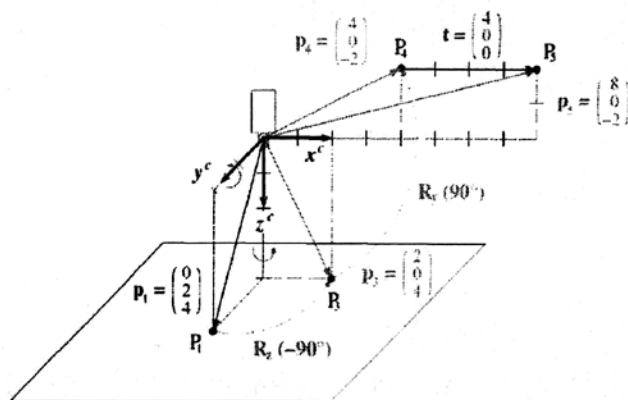


图 4-8 组合图 4-3 的平移和 4-5 的旋转形成刚性转变

Fig.4-8 Combining the translation from fig.4-3 and the rotation of fig.4-5 to form a rigid transformation.

如图 4-8, 从  $p_1$  到  $p_5$  的转变:

$$p_5 = R \cdot p_1 + t \quad (4-16)$$

在这里要引入一个称之为同质矩阵和同质向量的概念, 同质矩阵用  $H$  吧表示, 他包含了旋转矩阵和平移向量, 用同质矩阵改写上式:

$$\begin{pmatrix} p_5 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p_1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R \cdot p_1 + t \\ 1 \end{pmatrix} = H \cdot p_1 \quad (4-17)$$

连续刚性转变时, 同质矩阵的优势就显现出来了:

$$H_1 \cdot H_2 = \begin{bmatrix} R_a & t_a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_b & t_b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a \cdot R_b & R_a \cdot t_b + t_a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-18)$$

#### 4.2.2 坐标系的刚性转换

${}^{c1}H_{c5}$  表示为坐标系  $c_1$  到  $c_5$  的转变, 它的列向量表示的是轴向量坐标和初始坐标。

$${}^{c1}H_{c5} = \begin{bmatrix} x_{c5}^{c1} & y_{c5}^{c1} & z_{c5}^{c1} & o_{c5}^{c1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-19)$$

$$p_5^{c1} = {}^{c1}H_{c5} \cdot p_5^{c5} \quad (4-20)$$

### 4.3 三维位姿

同质矩阵可以很清楚的描述转变, 但是它们很难被读取, 尤其是旋转部分。而采用三维位姿描述可以很好的解决这个问题。

三维位姿包括六个参数, 3 个是旋转, 3 个是平移, (TransX, TransY, TransZ, RotX, RotY, RotZ)。这就很容易被理解, 一个坐标系在六个自由度上平移或旋转。

### 4.4 摄像机模型和参数

如果要从图像中提取精确的世界坐标系坐标, 对视觉系统必须精确地标定。市面上存在两种不同的镜头 (或者说摄像机), 第一种是针孔摄像机, 它的成像随着物距的增大而减小, 如同人眼一般, 第二种称为远心镜头, 它把世界坐标系上的东西平行

透射到成像平面上，它的成像大小和物距无关。

如图 4-9，世界坐标系上的点  $p$  通过镜头光学中心落到了在光学中心后焦距  $f$  处的成像平面上，事实上，这个  $f$  是不准确的并只对一段有限的距离有效，为了简化计算，我们假设成像平面在光学中心前面  $f$  处，这里要注意标定过程中这个镜头焦距是固定的，物距也是固定的。

点  $p$  世界坐标系 (WCS) 到摄像机坐标系 (CCS) 的转变：

$$p^c = {}^cH_w \cdot p^w \quad (4-21)$$

${}^cH_w$  的六个参数  $(t_x, t_y, t_z, \alpha, \beta, \gamma)$  被称作摄像机外参，它们决定世界坐标系的摄像机位置。在 HALCON 中，它们作为一个位姿和一个表示平移和旋转顺序的量储存在一起。(所以在 HALCON 中这个位姿包含 7 个量)。

下一步是把摄像机坐标系中的点  $p$  投射到图像平面 (IPCS) 上，针孔模型中用下式表示：

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \frac{f}{z^c} \begin{pmatrix} x^c \\ y^c \end{pmatrix} \quad (4-22)$$

当投射到像平面上时，有个问题产生了：镜头畸变使点  $p$  的 IPCS 坐标  $(u, v)^T$  发生了变化  $(\tilde{u}, \tilde{v})^T$ ，如图  $p$  点位置发生了偏移。

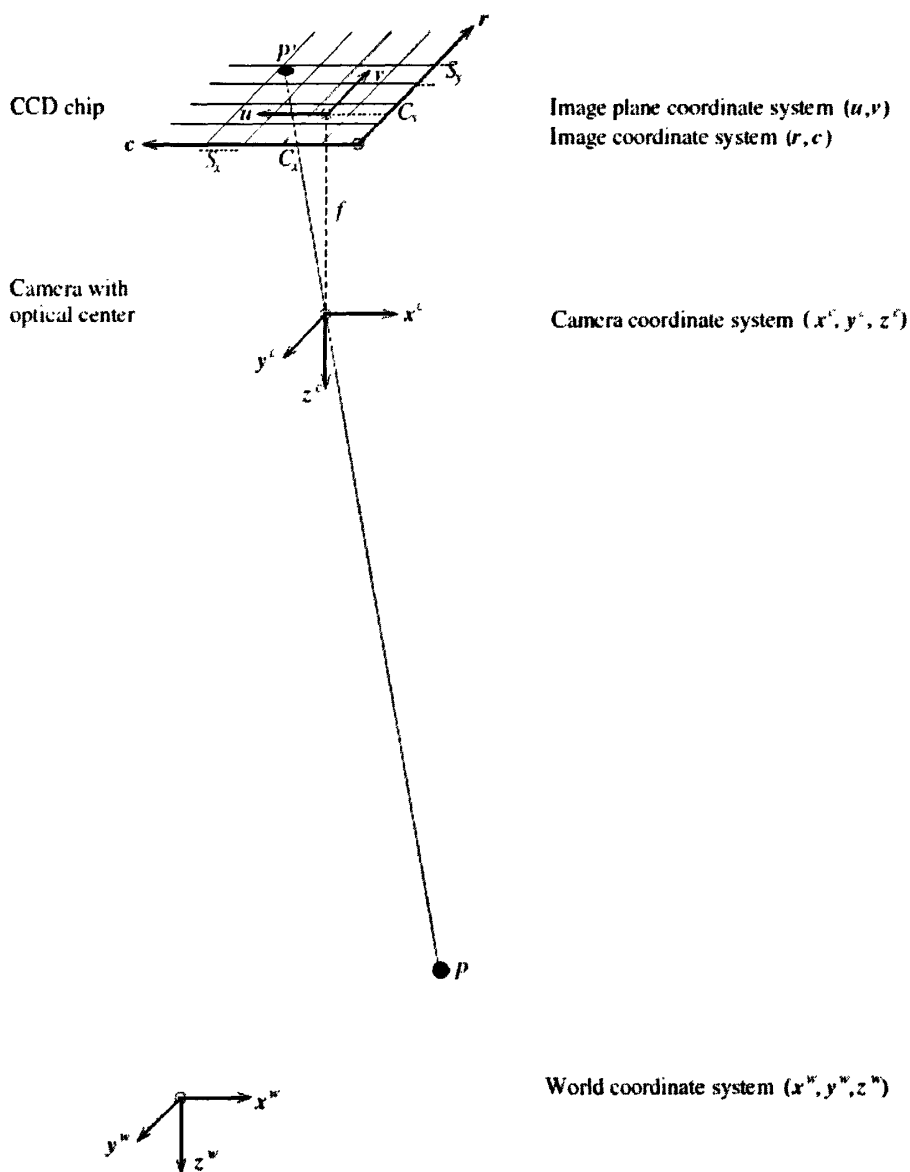


图 4-9 针孔模型的垂直投影

Fig.4-9 Perspective projection by a pinhole camera.

这种畸变可以看作是一个刚性矩阵，在 HALCON 中，这种畸变可以被弥补。参数  $\kappa$  用来弥补辐射畸变<sup>[45]</sup>，下式表示的是带畸变的 IPCS 到不带畸变的 IPCS 的过程。

$$u = \frac{\tilde{u}}{1 + \kappa(\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2)} \quad v = \frac{\tilde{v}}{1 + \kappa(\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2)} \quad (4-23, 4-24)$$



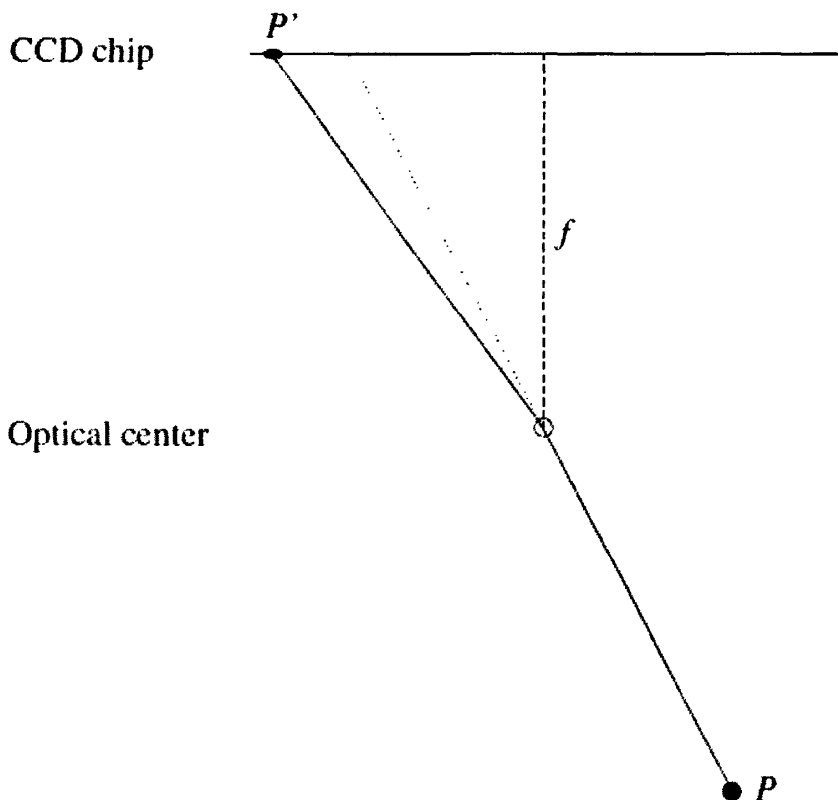


图 4-10 镜头畸变图解

Fig.4-10 Schematic illustration of the effect of the lens distortion

最后，完成点  $p(\tilde{u}, \tilde{v})^T$  从图像平面坐标系到图像坐标系的转变。

$$\begin{pmatrix} r \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\tilde{v}}{S_y} + C_y \\ \frac{\tilde{u}}{S_x} + C_x \end{pmatrix} \quad (4-25)$$

其中  $S_y$ ,  $S_x$  是 CCD 的像素大小，点  $(C_x, C_y)$  是基本点，在针孔摄像机中，它代表了镜头光学中心在图像平面上的垂直投影，它也是辐射畸变的中心。这六个参数称为摄像机的内参  $(f, \kappa, S_x, S_y, C_x, C_y)$ 。

摄像机标定是确定内参  $(f, \kappa, S_x, S_y, C_x, C_y)$  和外参  $(t_x, t_y, t_z, \alpha, \beta, \gamma)$  的过程。

## 4.5 标定过程

要取得无畸变的图像需要同一时间对同一目标拍摄多幅图像，但是有时工业上或实验室内是没有那个条件的，只有一个相机，而时间是连续的，所以需要的是一个被标定过的相机。

一般采用 HALCON 标准标定板对摄像机进行标定，先介绍下标定板<sup>[46]</sup>，如图 4-11，这是一个标准件，它有自己的描述文件：例如 caltab\_30mm.descr。

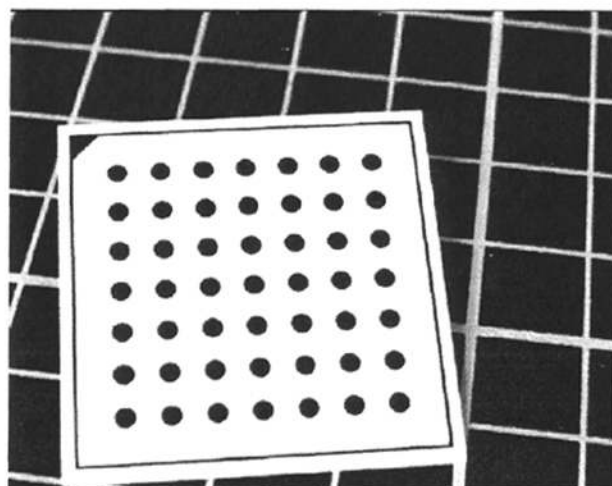


图 4-11 halcon 标定板  
Fig.4-11 The HALCON calibration plate

HALCON 标定板有 49 个黑点，总宽有好多规格，用于不同大小视域的标定，6mm、10mm、30mm、100mm、800mm，小到 650um 等等，举 30mm 标定板为例介绍下它的具体参数。

标定板呈正方形，按照边框长度来定规格，30mm 的标定板，即为黑框长度 30mm，有 7 行 7 列，每行每列都有 7 个黑点，称之为 mark 点，新版的 HALCON 30mm 标定板，有个黑色小三角，用于区分正方向，黑点半径为 0.0009375m，黑点之间的距离为 0.00375m，边框与黑点的距离为 0.0028125m，边框宽度为 0.0009375m，标准标定板只有黑白两色，每个 mark 点都有详细的世界坐标系描述。

标定的主要步骤是：

```
find_caltab (Image, Caltab, CaltabName, SizeGauss, MarkThresh, MinDiamMarks)
find_marks_and_pose (Image, Caltab, CaltabName, StartCamPar, StartThresh, DeltaThresh,
MinThresh, Alpha, MinContLength, MaxDiamMarks, RCoord, CCoord, StartPose)
```

把标定板放到已经固定的调焦完毕的摄像机视域内，find\_caltab 命令主要是读取标定板描述文件，对视域内的图像进行高斯平滑和 mark 点的阈值处理，区域提取处

理。find\_marks\_and\_pose 命令提取 mark 点的数量和边界，读取 mark 点的圆心像素坐标等。再调用 camera\_calibration 命令，它决定了摄像机的内参和标定图像中标定板内 mark 点的位姿。

camera\_calibration (X, Y, Z, NRow, NCol, StartCamPar, NStartPose, 'all', CamParam, NFinalPose, Errors)

有了 mark 点的位姿，就可以很容易的得到图像坐标系和世界坐标系的转变了。

image\_points\_to\_world\_plane (CamParam, Pose, Row, Col, 'mm', X1, Y1)

通过该命令就得到了目前标定状态下的图像像素米制信息。

实验所拍标定板图像如图 4-12（经过缩放且没有完全列出）

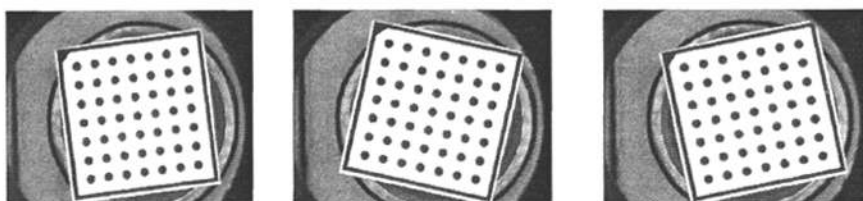


图 4-12 实验中的标定板例子

Fig.4-12 the example of calibration plate

标定程序如下：

\* Code generated by Image Acquisition 01

close\_all\_framegrabbers ()

dev\_close\_window ()

dev\_set\_draw ('margin')

read\_image (Image1, 'C:/0411calib/01.BMP')

get\_image\_pointer1 (Image1, Pointer, Type, Width, Height)

dev\_open\_window (0, 0, Width/4, Height/4, 'black', WindowHandle1)

dev\_display (Image1)

\* 读取标定板描述文件

caltab\_points ('caltab\_10mm.descr', X, Y, Z)

\* 设置摄像机初始内参

StartCamIntPar:=[0.005,0,0.0000044, 0.0000044,Width/2.0,Height/2.0,Width,Height]

\* find\_marks\_and\_pose 函数参数,find\_catlab 函数的参数

SizeGauss := 5

MarkThresh := 65

MinDiamMarks := 15

```

StartThresh := 248
DeltaThresh := 1
MinThresh := 18
Alpha := 0.5
MinContLength := 5
MaxDiamMarks := 400
* 声明一些 tuples 存放标定板上点的坐标信息和初始位姿
Rows1 := []
Cols1 := []
StartPoses1 := []
for i := 1 to 22 by 1
    read_image (Image, '0'+i)
    dev_display (Image)
    find_caltab (Image, Caltab1, 'caltab_10mm.descr', SizeGauss, MarkThresh,
MinDiamMarks)
    dev_display (Caltab1)
    find_marks_and_pose (Image, Caltab1, 'caltab_10mm.descr', StartCamIntPar,
StartThresh, DeltaThresh, MinThresh, Alpha, MinContLength, MaxDiamMarks, RCoord1,
CCoord1, StartPose1)
    visualize_results_of_find_marks_and_pose (Image, WindowHandle1, RCoord1,
CCoord1, StartPose1, StartCamIntPar)
    wait_for_confirm (WindowHandle1, RightOrWrong)
        Rows1 := [Rows1,RCoord1]
        Cols1 := [Cols1,CCoord1]
        StartPoses1 := [StartPoses1,StartPose1]
endfor
stop ()
camera_calibration (X, Y, Z, Rows1, Cols1, StartCamIntPar, StartPoses1, 'all', CamParam,
NFinalPose, Errors)
write_cam_par (CamParam, 'campar.dat')
* close_framegrabber (AcqHandle)
write_pose (NFinalPose[(22-1)*7:(22-1)*7+6], 'campose.dat')

```

我们共使用了 22 幅不同角度不同位姿的图像进行标定，得到两个文件 `campar.dat` 和 `campose.dat`，它们分别记做摄像机的内参和外参。

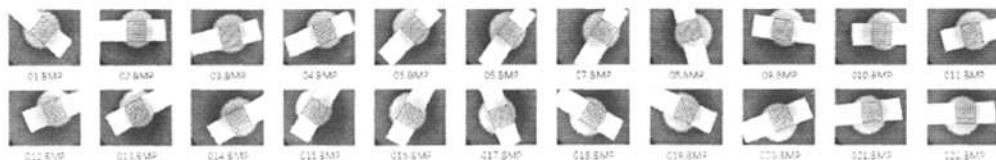


图 4-12 20 幅不同方位的标定板的图

Fig.4-12 20 images of calibration plate in different orientation

内参:

[0.00470784, -646.307, 4.41538e-006, 4.4e-006, 620.614, 1187.19, 1600, 1200]

外参(共 22 组, 未完全列出):

[0.00385011, -0.0172025, 0.0242818, 0.49814, 0.767084, 41.1962, 0;

0.00458059, -0.0168411, 0.0243575, 1.09872, 0.641009, 0.367899, 0;

0.00590989, -0.0141096, 0.024387, 1.11539, 0.501028, 348.161, 0;

0.00723712, -0.0160882, 0.0243418, 1.15402, 0.327524, 339.012, 0;

0.00621638, -0.0173977, 0.0243078, 0.957587, 0.060776, 315.971, 0]

其中外参有 22 组, 它是个不断优化的过程, 我们使用的是最后一组, 摄像机一经标定, 其世界坐标系位置, 焦点, 物距等参数都不可以改变, 否则必须重新标定。

经过多次打印不同标定板进行标定实验, 关于标定板标定的总结如下:

- ①标定板要干净
- ②标定板要尽量全部出现在摄像机视域内, 多次拍摄图像
- ③不断旋转标定板, 每次旋转推荐取  $45^\circ$ 。
- ④至少 10-15 幅图像
- ⑤照明上背景最好比标定板暗一点
- ⑥标定板亮的区域灰度值最好大于 100
- ⑦标定板亮的区域灰度值最好超过暗的区域 100 以上
- ⑧图像不要过度曝光<sup>[47]</sup> (灰度值大于 255)
- ⑨mark 点直径最好大于 10 个像素
- ⑩拍摄时尽量减少噪声

因为齿轮是齿顶圆直径是 20.8mm, 选择的标定板大小要和小齿轮尺寸匹配, 在现有标定板的规格中选择了 10mm 规格的标定板, 经过多幅图像的标定并在该摄像机状态下拍摄图像。由于实验条件有限, 标定板也是自己打印制作的, 标定板有一定厚度的话, 也会对实验结果数据产生不利影响, 这时就需要在软件中采用算法弥补, 图 4-13 为采得的原图。

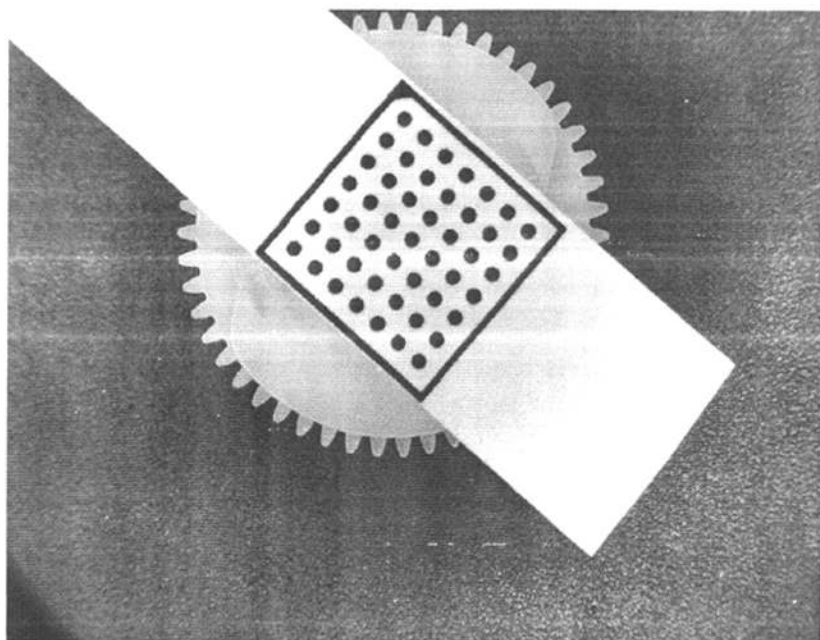


图 4-13 标定板和齿轮原图 (a、b)

Fig.4-13 image of the calibration plate and the gear (a、b)

## 第五章 小模数齿轮质量检测

由于实验设备和被测目标的限制,参考传统齿轮检测要求,确定了针对小模数塑料齿轮的检测要求,其中包含了齿轮齿数检测、齿顶圆直径、齿根圆直径等尺寸的检测,齿距极限偏差 $\pm f_{pt}$ ,  $k$ 个齿距累计公差 $F_{pK}$ ,齿距累积总公差 $F_p$ 等检测。其中 $F_p$ 、 $F_{pK}$ 属于传递运动的准确性误差组, $\pm f_{pt}$ 属于传动的平稳性,噪声,振动误差组。测量的小模数塑料齿轮基本参数如表 5-1:

表 5-1 小模数齿轮基本参数表

Table 5-1 Basic parameters of a small module gear list

齿轮数据	齿数	模数	齿顶圆直径	齿根圆直径	分度圆直径	齿距(10级)	轴孔直径(10级)	齿距总偏差
	50	0.4mm	$20.8_0^{+0.1}$	19mm	20mm	$1.257_{-0.026}^{+0.026}$ mm	$4.5_{-0.048}^0$ mm	$62.8318_{-0.064}^{+0.064}$

通常大量的实验,通过改变光照方式,强度,调整试验台,摄像机方位,调整镜头,改变图像采集参数,调整齿轮位置,得到一系列的图像。

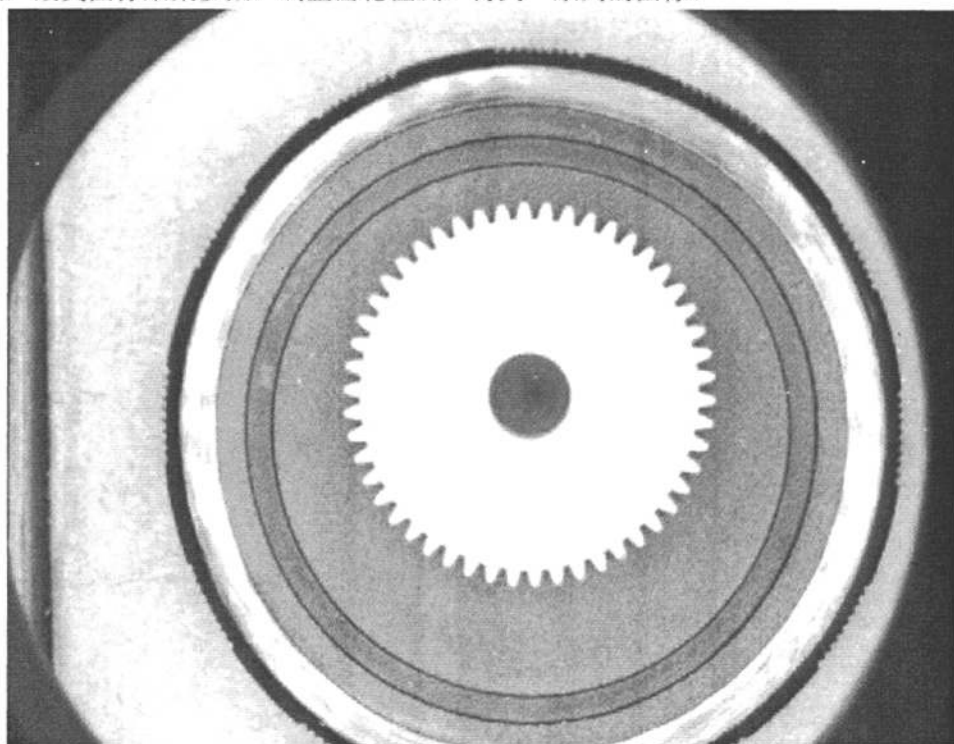


图 5-1 合格件

Fig.5-1 qualified product

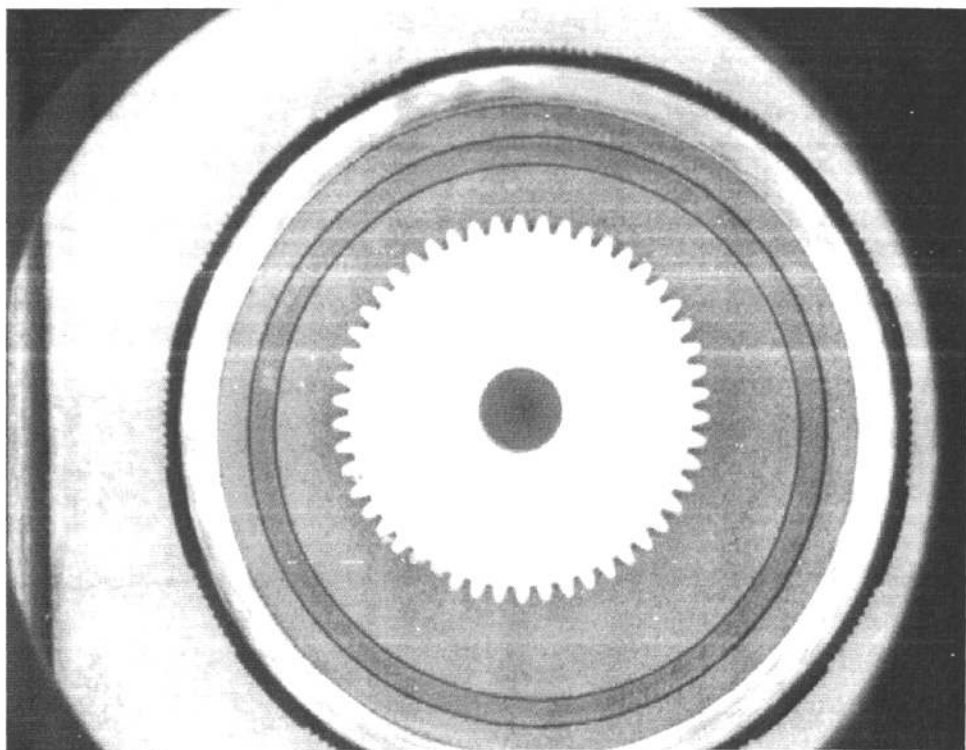


图 5-2 缺齿

Fig.5-2 shortage of perforation

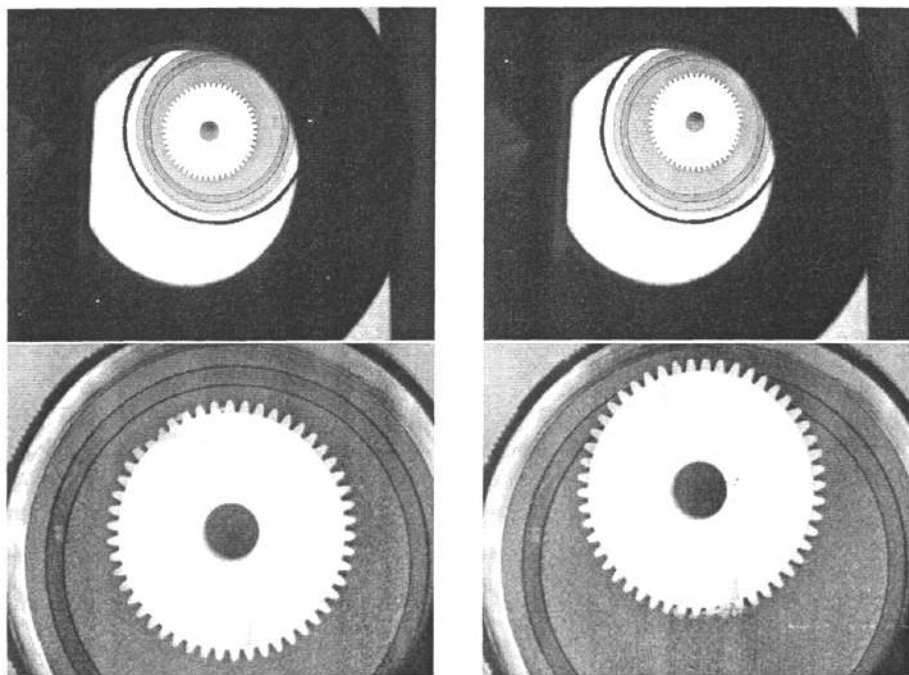


图 5-3 齿轮(a、b、c、d)

Fig.5-3 gear(a、b、c、d)



由于视觉平台和齿轮相对位置的不同以及采集参数调整，各图像参数如下

表 5-2 图像采集参数参考图

Fig.5-2 Image acquisition parameters reference

	文件大小	色彩制式	图像分辨率	帧率
图 5-1	1.83m	Mono8	1600*1200	7.5fps
图 5-2	1.83m	Mono8	1600*1200	7.5fps
图 5-3(a)	5.49m	YUV411	1600*1200	7.5fps
图 5-3(b)	5.49m	YUV411	1600*1200	7.5fps
图 5-3(c)	900k	RGB8	640*480	7.5fps
图 5-3(d)	900k	RGB8	640*480	7.5fps

要取得 10 微米级的精度，而齿轮大小在 20mm 左右，需要大概 200 万像素的图像<sup>[48]</sup>，1600\*1200 分辨率勉强达到了这个效果。综合精度、采集速度和数据处理时间的考虑，选择分辨率 1600\*1200、色彩制式为 Mono8 的采集模式。这是最高分辨率的灰度图像，如图 5-1 和 5-2。

其具体采集参数如下：

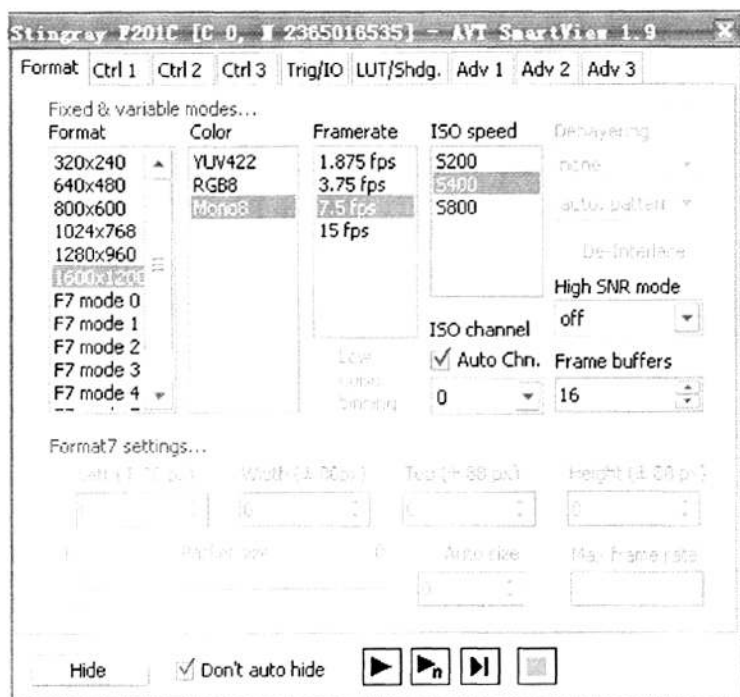
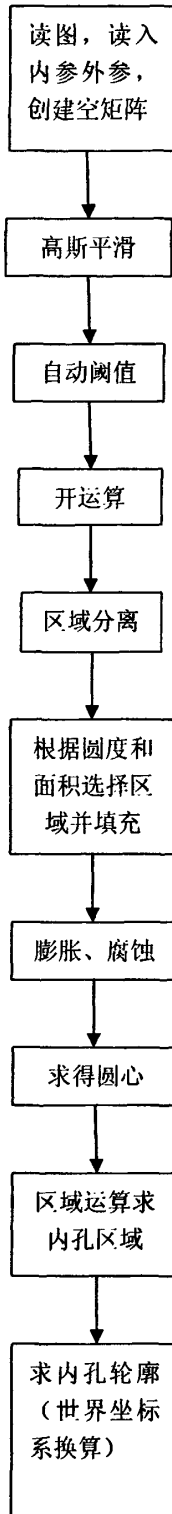


图 5-4 图像采集参数

Fig.5-4 Image acquisition parameters

## 5.1 小模数齿轮内孔检测，孔径测量



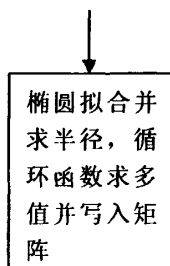


图 5-5 测内孔流程图

Fig.5-5 flow chart of inner bore measurement

程序和注释如下:

```

dev_close_window ()
read_image (Image, 'C:/0411/06.BMP')**读图
get_image_pointer1 (Image, Pointer, Type, Width, Height)**得到图像参数
dev_open_window_fit_image (Image, 0, 0, -1, -1, WindowHandle)**打开窗口
dev_set_line_width (2)**设置线宽
dev_set_color ('red')**设置颜色
dev_display (Image)**显示图像
set_display_font (WindowHandle, 16, 'mono', 'true', 'false')**设置字体、文字颜色
disp_continue_message (WindowHandle, 'black', 'true')**提示信息 (点击继续)
stop ()**暂停点
read_cam_par ('C:/0411/calib/campar.dat', CamParam)**读入内参
read_pose ('C:/Users/yanzi/Desktop/0411/calib/campose.dat', Pose)**读入外参
dev_set_draw ('margin')**设置画图方式
tuple_gen_const (20, 0, Newtuple)**创建一个空矩阵
for i := 1 to 20 by 1** (下列为循环语句, 因为我们有 22 幅图)
read_image (Image1, '0'+i)
gauss_image (Image1, ImageGauss, 5)**高斯平滑
bin_threshold (ImageGauss, Region)**自动阈值
opening_circle (Region, RegionOpening, 3.5)**开运算
connection (RegionOpening, ConnectedRegions1)**区域分离
select_shape (ConnectedRegions1, circles, ['circularity','area'], 'and', [0.85,30000], [1.0,50000])**选择区域 (这里选择条件是圆度和面积)
count_obj (circles, Number)**区域个数)
fill_up (circles, RegionFillUp)**填充当前区域
dilation_circle (RegionFillUp, RegionDilation1, 3.5)**膨胀
erosion_circle (RegionFillUp, RegionErosion1, 3.5)**腐蚀
  
```

```

area_center (RegionErosion1, Area, Row, Column)**求中心
intersection (circles, RegionErosion1, RegionIntersection)**求交集(这里是求上图内圈和
中间那个圈的交集)
reduce_domain (Image, RegionIntersection, ImageReduced)**原图减去刚才所得交集, 得
到一个内孔
gen_contour_region_xld (ImageReduced, Contours, 'border')**得到内孔轮廓
contour_to_world_plane_xld (Contours, ContoursTrans, CamParam, Pose, 'mm')** 把轮廓
改成世界坐标系
fit_circle_contour_xld (ContoursTrans, 'algebraic', -1, 0, 0, 3, 2, Row1, Column2, Radius,
StartPhi, EndPhi, PointOrder)**分别用 n 个圆拟合这些轮廓, 求得圆半径 (上述轮廓可
能是 n 段不同半径的曲线段, 分别用 n 个圆去拟合)
tuple_mean (Radius, Mean)**记录全部半径并求均值
Newtuple[i] := Mean*8 把每个齿轮的均值写入矩阵
Endfor**完

```

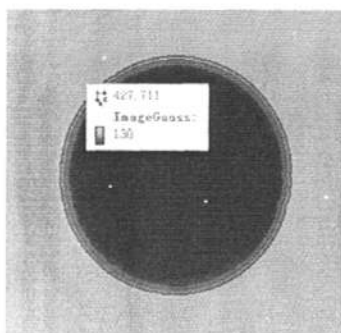


图 5-6 膨胀与腐蚀效果  
Fig.5-6 dilation and erosion

我们处理了 20 个齿轮图片, 得到数据如下:

4.50022,4.49674,4.49068,4.49096,4.49944,4.48232,4.48818,4.47332,4.4867,4.48428,4.499  
8,4.49276,4.49264,4.49252,4.49224,4.49296,4.49232,4.49278,4.4921,4.49306

最大值为 4.5002, 最小值为 4.4733。

Matlab 绘图如下:

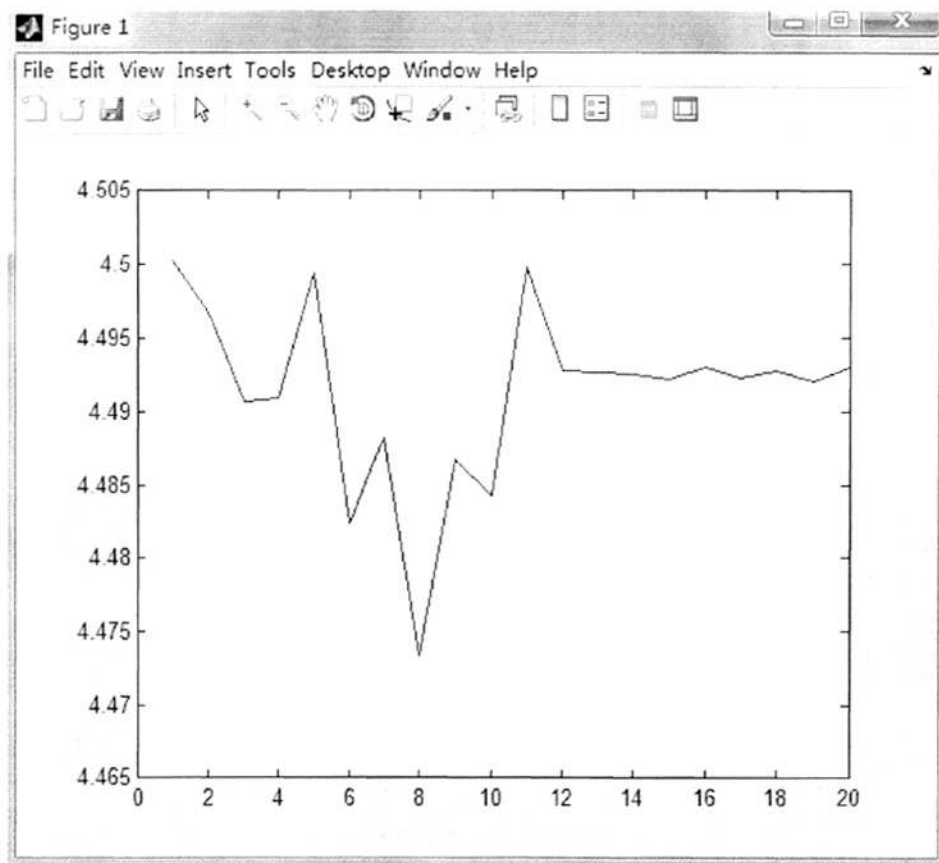


图 5-7 直径误差分析

Fig.5-7 Tolerance Analysis of the diameter

## 5.2 小模数齿轮齿数和齿距测量

原理流程图如下：



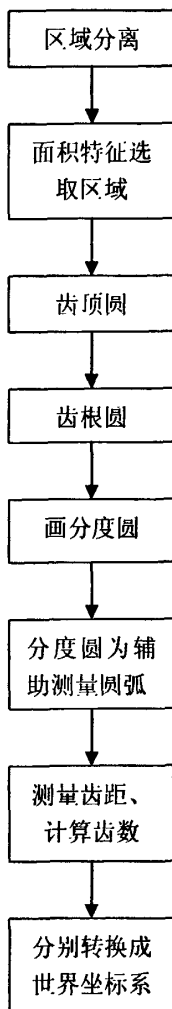


图 5-8 测齿数、齿距流程图

Fig.5-8 flow chart of tooth number and pitch measurement

程序如下:

```
dev_close_window ()  
read_image (Image, 'C:/0411/010.BMP')  
get_image_pointer1 (Image, Pointer, Type, Width, Height)  
dev_open_window_fit_image (Image, 0, 0, -1, -1, WindowHandle)  
dev_set_line_width (2)  
dev_set_color ('red')  
dev_display (Image)  
set_display_font (WindowHandle, 16, 'mono', 'true', 'false')  
disp_continue_message (WindowHandle, 'black', 'true')
```

```

stop ()
read_cam_par ('C:/0411calib/campar.dat', CamParam)
read_pose ('C:/0411calib/campose.dat', Pose)
dev_set_draw ('margin')
dev_set_line_width (2)
dev_set_color ('red')
invert_image (Image, ImageInvert)
bin_threshold (ImageInvert, Region)
connection (Region, ConnectedRegions)
count_obj (ConnectedRegions, Number)
select_shape (ConnectedRegions, SelectedRegions, 'area', 'and', 400000, 600000)
count_obj (SelectedRegions, Number1)
fill_up (SelectedRegions, RegionFillUp)
smallest_circle (RegionFillUp, Row, Column, RadiusMax)
inner_circle (RegionFillUp, Row1, Column1, RadiusMin)
disp_circle (WindowHandle, Row, Column, RadiusMax)
disp_circle (WindowHandle, Row, Column, RadiusMin)
Radius := (4*RadiusMax+5*RadiusMin)/9
AnnulusRadius := (RadiusMax-RadiusMin)/6
gen_measure_arc (Row, Column, Radius, 0, 6.28318, AnnulusRadius, Width, Height,
'bilinear', MeasureHandle)
measure_pairs (ImageInvert, MeasureHandle, 1, 30, 'negative', 'all', RowEdgeFirst,
ColumnEdgeFirst, AmplitudeFirst, RowEdgeSecond, ColumnEdgeSecond,
AmplitudeSecond, IntraDistance, InterDistance)
NumCogs := |RowEdgeFirst|
disp_message (WindowHandle, 'Number of cogs: '+|RowEdgeFirst|+'
>window', 260, 10, 'black', 'true')
Distance := IntraDistance+InterDistance
tuple_mean (Distance, Mean)
tuple_deviation (Distance, Deviation)
gen_circle_contour_xld (ContCircle, Row, Column, Radius, 0, 6.28318, 'positive', 1)
contour_to_world_plane_xld (ContCircle, ContoursTrans, CamParam, Pose, 'mm')
fit_circle_contour_xld (ContoursTrans, 'algebraic', -1, 0, 0, 3, 2, Row2, Column2, Radius1,
StartPhi, EndPhi, PointOrder)
ratio := 0.024876

```

```

WCSDistance := Distance*ratio
WCSRradiusMax := RadiusMax*ratio
WCSRradiusMin := RadiusMin*ratio
tuple_mean (WCSDistance, Mean1)
tuple_deviation (WCSDistance, Deviation1)

```

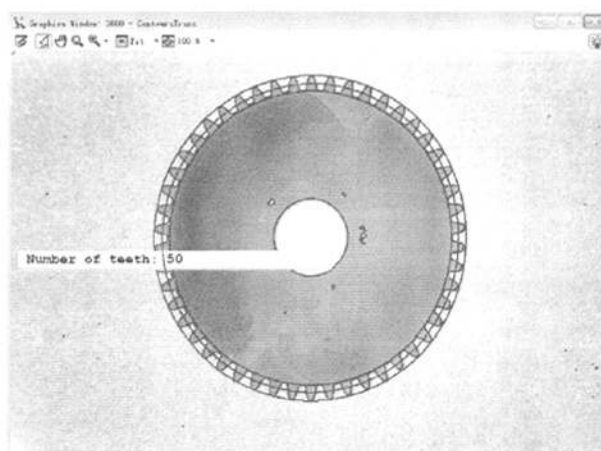


图 5-9 齿数测量

Fig.5-9 Teeth Measurement

如图 5-9, 三个红色圆分别是我们画的齿顶圆, 齿根圆, 分度圆, 由图也可读出齿数为 50, 我们采集了 20 个齿轮的图像, 其缩略图如下如下:

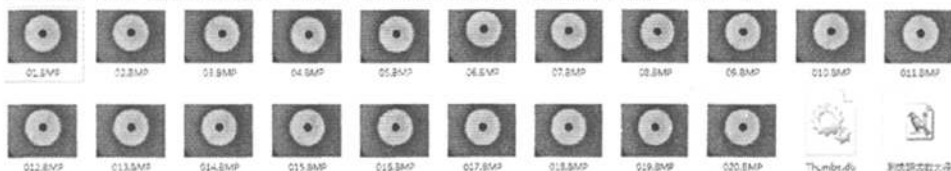


图 5-10 齿轮图像

Fig.5-10 images of gear

取 09 号齿轮图像为例, 处理数据如下:

齿数: 50

齿距: [1.25275, 1.25111, 1.25288, 1.25121, 1.24851, 1.26054, 1.2524, 1.25956, 1.25705, 1.25385, 1.25766, 1.25456, 1.25439, 1.25593, 1.25038, 1.26021, 1.25078, 1.2545, 1.25146, 1.25393, 1.26012, 1.2443, 1.25548, 1.25801, 1.25644, 1.25513, 1.2531, 1.2476, 1.25455, 1.262, 1.26143, 1.26663, 1.26442, 1.26096, 1.25655, 1.25548, 1.27011, 1.26119, 1.25848, 1.26259, 1.25479, 1.27506, 1.25552, 1.2625, 1.25145, 1.27089, 1.24852, 1.25781, 1.25497, 1.25265]



单个像素米制信息: 0.024876mm/pix

齿顶圆直径: 20.8145

齿根圆直径: 19.1077

齿距均值: 1.25668、最大值: 1.2751、最小值: 1.2443

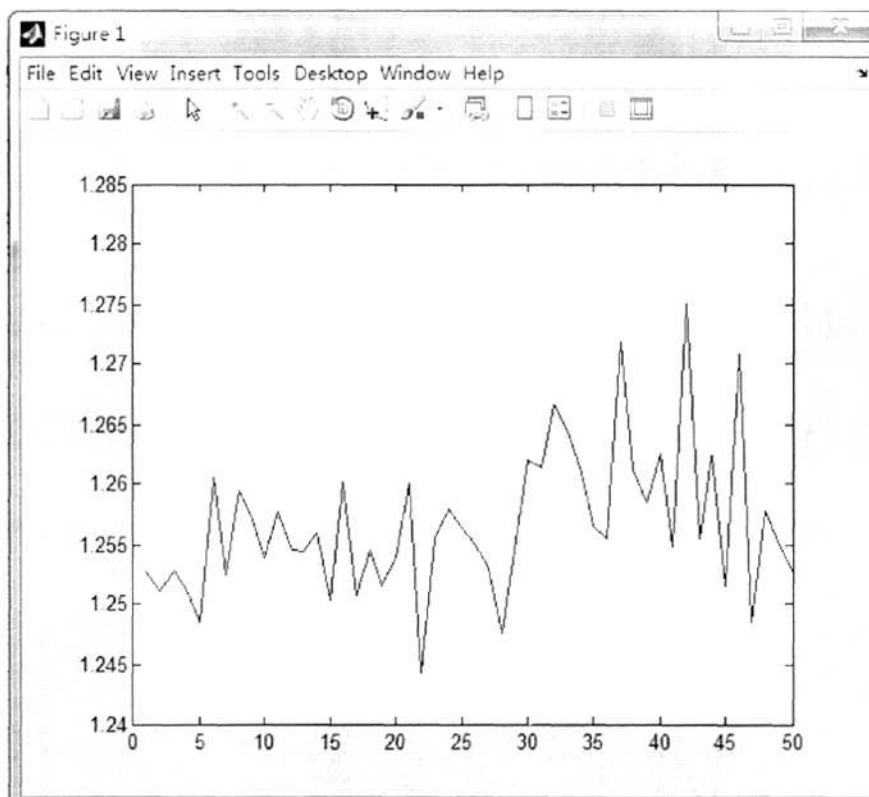


图 5-11 09 号尺寸齿距画图

Fig.5-11 figure of Tooth Pitch of number 09

09 号齿轮齿距累积总偏差: 62.8342mm, 而标准值为 62.8318mm, 取 10 级精度, 上下偏差为  $64\mu\text{m}$ , 满足要求。

### 5.3 数据处理

20 组图像处理数据如下表 (未完全列出):

01:

[1.2627, 1.25657, 1.25175, 1.25933, 1.26165, 1.25672, 1.26448, 1.27034, 1.26724, 1.26917, 1.26519, 1.27245, 1.26447, 1.27012, 1.26815, 1.26004, 1.26704, 1.25176, 1.26618, 1.25521, 1.25132, 1.26087, 1.26298, 1.26122, 1.26695, 1.25556, 1.25822, 1.26411,

1.25563, 1.25401, 1.26887, 1.26435, 1.26477, 1.26705, 1.27292, 1.2648, 1.27646, 1.25991, 1.28007, 1.26799, 1.27163, 1.26655, 1.26048, 1.26197, 1.26049, 1.25469, 1.26206, 1.26112, 1.26101, 1.25897]

02

[1.25205, 1.25491, 1.2592, 1.25371, 1.26013, 1.2654, 1.26239, 1.26218, 1.26443, 1.27066, 1.26043, 1.26272, 1.2664, 1.25841, 1.26087, 1.25386, 1.26148, 1.25615, 1.24624, 1.26134, 1.2606, 1.2611, 1.26632, 1.25922, 1.26022, 1.25963, 1.26299, 1.25106, 1.27624, 1.26727, 1.26568, 1.27735, 1.26817, 1.27225, 1.28293, 1.26792, 1.27179, 1.277, 1.27197, 1.27047, 1.26617, 1.26314, 1.25602, 1.26071, 1.25789, 1.26278, 1.25822, 1.25953, 1.25811, 1.25608]

03

[1.2582, 1.26431, 1.25549, 1.25559, 1.25367, 1.25957, 1.24995, 1.25328, 1.25827, 1.25219, 1.25218, 1.25319, 1.25955, 1.25536, 1.25042, 1.26374, 1.2577, 1.26412, 1.26202, 1.26402, 1.26218, 1.26353, 1.25999, 1.26056, 1.26562, 1.26768, 1.26264, 1.26352, 1.2587, 1.26513, 1.26645, 1.26163, 1.26015, 1.26079, 1.26633, 1.25721, 1.2557, 1.25276, 1.25196, 1.2596, 1.25811, 1.25867, 1.25825, 1.25615, 1.25292, 1.25494, 1.25221, 1.25589, 1.2475, 1.25293] 全部 20 组齿轮数据汇总如表 5-3:

表 5-3 齿轮数据处理

Fig.5-3 data processing of gears

齿轮号	齿距最大值	齿距最小值	齿距累积总偏差	齿顶圆直径	齿根圆直径	齿数	内孔直径
01	1.2801	1.2513	62.8935	20.8512	19.05214	50	4.50022
02	1.2820	1.2462	62.8749	20.8504	19.0114	50	4.49674
03	1.2677	1.2475	62.8335	20.8109	19.06482	50	4.49068
04	1.2807	1.2479	62.8835	20.8947	19.0897	50	4.49096
05	1.2776	1.2502	62.8738	20.8123	19.0897	50	4.49944
06	1.2805	1.2485	62.8508	20.8866	19.06482	50	4.48232
07	1.2690	1.2478	62.8124	20.8728	19.06482	50	4.48818
08	1.2771	1.2419	62.7616	20.8740	19.07626	50	4.47332
09	1.2751	1.2443	62.8342	20.8604	19.05238	50	4.4867
010	1.2987	1.2231	62.8077	20.8664	19.03995	50	4.48428
011	1.2777	1.2419	62.8617	20.8749	19.07726	50	4.4998
012	1.2939	1.2135	62.8825	20.8777	19.05238	50	4.49276
013	1.3001	1.2304	63.2835	21.1078	19.05238	50	4.49264
014	3.1435	1.2435	/	/	19.05258	48	4.49252
015	1.2980	1.2108	62.8846	20.8784	19.05238	50	4.49224
016	1.2976	1.2110	62.8846	20.878	19.05238	50	4.49296

017	<u>1.2940</u>	<u>1.2113</u>	62.8859	20.8789	19.05237	50	4.49232
018	<u>1.2982</u>	<u>1.2118</u>	62.8864	20.8791	19.05238	50	4.49278
019	<u>1.2988</u>	<u>1.2129</u>	62.8869	20.8792	19.05238	50	4.4921
020	<u>1.2991</u>	<u>1.2106</u>	62.8864	20.8791	19.05238	50	4.49306

注：其中 015-020 是同一个齿轮不同时间和位置的拍摄图像

对比以上数据和齿轮精度范围，结论如下：

014 号齿轮缺齿，导致某个齿距极大，015-020 号齿轮为同一齿轮拍摄，相互数据相差不大，但都超出了精度范围，013 号齿轮齿廓上有毛刺，导致了测量所得齿顶圆偏大，根据算法分度圆也偏大，齿距偏大，整体数据都偏大。010、012 号齿轮为不合格件，单个齿距极限偏差过大。01-09 号齿轮为合格件，全部齿轮内孔基本都满足要求。

## 5.4 本章小结

通过大量拍摄图像进行图像处理分析，对比相互之间的精度和处理效率，我们拍得合适的小模数齿轮灰度图像，在 HALCON 中编程实现对小模数齿轮的内孔直径、齿数、齿距等检测和数据分析，可以检测出毛刺、飞边、缺齿等常见缺陷，算法快速、准确，精确度高，误差小。

## 第六章 结论与展望

本文通过建立一个机器视觉实验平台,进行了机器视觉精确测量检测方向的研究和探索。通过打印自制 10mm 标定板进行机器视觉平台标定,得到了图像平面和世界坐标系平面的相互对应关系,通过编辑算法和程序对一组 20 个小模数塑料齿轮的内径和齿数,齿距等参数的测量,可以检测出毛刺、飞边、制件不满等缺陷,借鉴金属齿轮的检测要求,提出了小模数塑料齿轮自己的检测精度要求,在此要求的基础上,对小模数塑料齿轮的尺寸进行检测和尺寸精度分析。光源照明方式、摄像机色彩制式,尤其是采集图像分辨率对我们的测量结果精度有直接影响,所幸实验室设备刚刚满精度要求,20 个齿轮大部分可满足质量要求,少数存在齿距偏大问题,检测精度达 10 级。

小模数塑料齿轮作为一个典型的精密注塑件,在各行各业都有广泛的应用,随着对小模数塑料齿轮的精度要求的提高,我们需要不断地对生产进行改进,对检测进行把关,10 $\mu\text{m}$  级的非接触快速自动检测技术的开发,适应了这种发展需求。

但是到目前为止,相较于金属齿轮的检测,我们对小模数塑料齿轮的检测还不够完善,检测项目还没有全面覆盖,对小齿轮的测量也仅仅停留在基本尺寸和偏差上,对精密齿轮注重的切向综合公差、跳动公差、径向综合公差等没有进行检测,所以只能说是对小模数塑料齿轮的高精度的小范围检测。

随着机器视觉软硬件的发展,在纵向上,通过搭建高分辨率,高识别率,高响应速度的视觉平台,开发亚像素甚至高于亚像素的快速图像算法,不断改善图像轮廓提取,尺寸测量,模板识别的精度和速度;在横向上,开发功能强大的图像处理和识别软件,大力拓展具有可移植性,易扩展的,提供可编程接口的开源软件和图像处理模块化程序,是未来图像处理技术的发展前景。

## 参考文献

- [1] 郝瑞贤,李元宗.对我国塑料齿轮发展的一些思考[J].工程塑料应用,2007,35(3): 71-73
- [2] 牛建岭.塑料齿轮成型工艺最新进展[J].前沿科技.2006,24(6):57-59
- [3] 张成悌.高精度渐开线检查仪研制成功[J].计量技术,1981,07:46
- [4] 王玉,在 VG-450 万能渐开线检查仪上测量内齿轮齿形误差[J].计测技术,2007,05:39-41
- [5] 自动化在线. 未来齿轮量仪的现状和发展[OL].<http://www.autooo.net/autooo/jx/dongtai/2007-10-24/24386.html>
- [6] 吴纯,文晓希.光栅式齿轮单啮仪升级改造的设想[J].企业技术开发,2005,24(1):21-22
- [7] 廖传静,李杰.齿轮整体误差测量技术的应用[J].工具技术,2007,41(10):108-109
- [8] 王阔.改进后的齿轮测量中心 Mahr891 测量不确定度评定[D].大连:大连理工大学,2007
- [9] 百度百科.全息技术[OL]. <http://baike.baidu.com/view/128966.htm>
- [10] 吴宗泽等.机械设计实用手册[M].北京:化学工业出版社,1999,1,1045
- [11] 胡德峰.塑料传动齿轮的成型缺陷分析和对策[J].机械设计与制造,2007,12(12):190-191
- [12] 于晓洋,胡霞珍,王竹萍.基于图像的万能工具显微镜设计与误差分析[J].中北大学学报,2006,27(3):263-267
- [13] 凌云,王一鸣,孙明,孙红,张小超.基于机器视觉的大米外观品质检测装置[J].农业机械学报,2005,36(9):89-92.
- [14] 司永胜,乔军,刘刚,刘兆祥,高瑞.基于机器视觉的苹果识别和形状特征提取[J].农业机械学报,2009,8:161-165
- [15] 徐富新,杨春艳,中冬玲,陈芳.基于机器视觉的果蝇复眼坏区甄别系统的图像处理设计[J].生物医学工程研究,2006,25(2):67-70
- [16] 王梁.基于机器视觉的啤酒灌装质量检测系统研究[D].江苏:江苏大学,2009
- [17] 尚会超.印刷图像质量在线检测的算法研究与系统实现[D].安徽:华中科技大学,2006
- [18] William K. Pratt 著,邓鲁华,张延恒等译.数字图像处理[M].北京:机械工业出版社,2005
- [19] 于秀辉.基于机器视觉的测量系统关键技术研究[D].黑龙江:哈尔滨工程大学,2008
- [20] 郭晓然.基于机器视觉的渐开线小模数齿轮测量方法的研究[D].陕西:西安理工大学,2007
- [21] 任翠池.基于计算机视觉的齿轮质量监测系统研究[D].天津:天津理工大学,2007
- [22] 高立国.基于计算机视觉的小模数塑料齿轮检测系统的研究[D].吉林:吉林大学,2007
- [23] 韩宇.橡胶挤出成型技术的最新进展[J].世界橡胶工业,2007,6:41-44
- [24] 袁京鹏,高明建,吕柏源.橡胶挤出设备的技术进步和发展(上)[J].橡胶技术与设备,2006,32:12-14
- [25] 苏小华,张加深.几种常见光源特性的研究[J].大学物理实验,2004,16(1):52-55

- [26] 杨博雄.CCD 细分技术及其应用研究[D].北京:国家地震局地球物理研究所,2005
- [27] 潘银松,袁祥辉,林聚承,孟丽娅,黄友恕.CMOS 数字图像传感器研究进展[J].重庆大学学报,2005,9:23-25
- [28] 杨绍荣,吴迪靖,段德山.机器视觉算法与应用[M].清华大学出版社,2008
- [29] 杨劲秋. 基于 LUT 结构的 FPGA 的工艺映射算法的研究[D].四川:电子科技大学,2006
- [30] 张旗,梁德群,樊鑫,李文举.基于小波域的图像噪声类型识别与估计[J].红外与毫米波学报,2004 23(4).
- [31] T.LINDBERG. Scale-Space Theory in Computer Vision. Kluwer Academic, Dordrecht,1-994
- [32] R.SEDGEWICK. Algorithms in C.AddisonWesley,Reading,MA,1990
- [33] 孙成叶,桑农,张天序,王新赛.图像双线性插值无极放大及其运算量分析[J].计算机工程,2005,31(9)
- [34] 叶昆权.数学形态学在图像分割中的应用[D].广东:广东工业大学,2009
- [35] 谢焕田.Burgers 方程的有限差分方法研究[D].天津:南开大学,2007
- [36] 文学力,文颖.一种对比度图像的增强处理方法[J].电子设计应用,2005(7),90-92
- [37] K. R. Castleman 著;朱志刚,林学焮,石定机等译.数字图像处理[M].电子工业出版社,1998
- [38] 杨春林,于英林.基于模糊融合技术的图像恢复方法研究[J].华南理工大学学报,2002,30(6),40-42
- [39] Rafael C. Gonzales, Richard E. Woods 著.阮秋奇,陆宇智译.数字图像处理(第二版)[M].电子工业出版社 2007
- [40] R.M.HARALICK, L.G.SHAPIRO. Computer And Robot Vision [M], Vol. I. Addison Wesley, Reading, MA, 1992
- [41] A.FITZGIBBON, M, PILU, R.B. FISHER .Direst least square fitting of ellipses [M]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 21(5):476-480, May 1999
- [42] 彭晓辉.基于 HALCON 的 IC 卡喷码符号识别技术与实现[D].广东:广东工业大学,2006
- [43] 孙怀远,廖跃华,周夫之,黄忆君.基于 HALCON 的药品包装瓶批号检测技术研究[J].包装工程,2008,29(8):71-73
- [44] 右手原则-百度百科.[OL].<http://baike.baidu.com/view/538413.htm>
- [45] 贺威,亲其明,付炜.可见光与热红外辐射标定方法浅述[J].影像技术,2005(1):34-36
- [46] III-C 3D Machine Vision [CP/DK] .MVTec HALCON 9.0
- [47] 钟易.直接数字化摄影自动曝光过度 293 例分析[J].实用医技杂志,2009,16(3):224-225
- [48] 彭瑞东,谢和平,鞠扬.二维数字图像分形维数的计算方法[J].中国矿业大学学报,2004,33(1):19-24

## 致 谢

岁月如梭，3年的研究生生活即将结束了，在这短暂而漫长的3年时间里，导师张莉彦老师的敦敦教诲和言传身教使我受益匪浅，在进行机器视觉研究的日子，特别要感谢张老师的指导和鼓励，感谢师弟徐俊成的无私帮助，感谢北京大恒图像几位工作人员的悉心指导，让我在机器视觉上从零的开始到慢慢有了小小收获，并由衷喜欢上了这门交叉学科。

平常的研究工作是枯燥和漫长的，但唯有辛勤和汗水才能铸就美好的篇章，但愿这种研究精神可以督促我不断前进，迎接新的挑战！

## 研究成果及发表的学术论文

### 发表及已接受的论文

1. 徐堰, 张莉彦. 基于机器视觉的小齿轮质量检测研究. *科技信息*. 2009, 36: 103-104



## 作者和导师简介

### 导师简介

导师：张莉彦，女，博士，副教授，北京化工大学机电学院。主要研究方向：产品建模、CAD/CAM 一体化、数控加工等。

### 作者简介

徐堰，男，北京化工大学硕士研究生，浙江慈溪人，主要研究方向为：机械设计及理论。