

分类号

江南大学

硕士学位论文

题目： 基于视觉检测技术的量表验定系统的
设计和研究

英文并列题目： Design and Study of Dialgauge Inspection System
Based on Vision Detecting Technology

研 究 生： 陈 杰 来 专 业： 机械设计与理论

研 究 方 向： 机 电 一 体 化

导 师： 尤丽华 副教授 张秋菊 教授

学位授予日期：

答辩委员会主席： 赵永武 教授

江 南 大 学

地址：无锡市青山湾

二〇〇五 年 六 月

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及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含本人为获得江南大学或其它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谢意。

签名: 陈杰来 日期: 2005 年 6 月 21 日

关于论文使用授权的说明

本学位论文作者完全了解江南大学有关保留、使用学位论文的规定: 江南大学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, 允许论文被查阅和借阅, 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, 可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文, 并且本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。

保密的学位论文在解密后也遵守此规定。

签名: 陈杰来 导师签名: 张永菊 日期: 2005 年 6 月 21 日

目 录

摘 要	I
Abstract	II
第一章 绪 论	1
1. 1 计算机视觉及应用	1
1. 1. 1 计算机视觉理论研究	1
1. 1. 2 计算机视觉应用技术	2
1. 2 视觉检测技术	2
1. 2. 1 视觉检测技术及应用	3
1. 2. 2 国内视觉检测技术应用及发展趋势	3
1. 3 本文研究的内容和目的	4
第二章 量表验定系统硬件结构和组成	6
2. 1 系统硬件结构与工作原理	6
2. 2 成像系统及其参数选择	7
2. 2. 1 摄像头的分类和选择	7
2. 2. 2 光源	9
2. 2. 3 镜头	9
2. 2. 4 图像采集卡原理和选择	10
2. 3 位移控制单元设计	11
2. 3. 1 步进电机和电机驱动器	11
2. 3. 2 光栅传感器	12
2. 3. 3 单片机	12
第三章 量表验定系统的实现	13
3. 1 计算机和位移控制单元的通讯	13
3. 1. 1 计算机与单片机通讯	13
3. 1. 2 单片机串口通讯程序设计	15
3. 2 基于图像采集卡的应用软件开发	18
3. 2. 1 系统软件体系	18
3. 2. 2 双缓存采集处理方法	19

3. 2. 3 格式的转换	20
3. 3 系统运行时序	21
第四章 数字图像处理方法	23
4. 1 本系统图像处理方案	23
4. 2 图像的预处理	24
4. 2. 1 图像的滤波	24
4. 2. 2 图像的二值化	27
4. 3 图像的逻辑处理	29
4. 4 图像的细化处理	30
4. 5 直线提取	31
4. 5. 1 霍夫变换的基本原理	31
4. 5. 2 极坐标 ρ 的范围	32
4. 5. 3 系统采用的具体算法	33
第五章 图像采集处理部分检验及误差分析	35
5. 1 实验检验	35
5. 2 图像采集处理部分误差分析	36
第六章 图像边缘检测技术的研究	40
6. 1 边缘检测	40
6. 2 小波基本理论	44
6. 2. 1 小波变换的定义	44
6. 2. 3 小波变换边缘检测	46
6. 3 实验	48
总结与展望	51
致谢	53
参考文献	54
攻读硕士学位期间发表的论文清单	57

摘要

检测技术是工业自动化的基础，视觉检测技术具有非接触、速度快、柔性好等突出优点，已经成为精密测试技术领域内最具有发展潜力的新技术。将视觉检测技术应用于量表验定工序中，研究、设计基于视觉检测技术的指针式量表验定系统能够提高企业生产效率，满足生产自动化的要求。

本文首先介绍了系统总体结构以及硬件选择，内容包括：为提高检测效率，系统采用了位移控制单元和图像处理同步的工作方式；根据量表验定的精度要求硬件系统的设计。

接着介绍了 VC++开发工具下系统的实现，研究内容包括：计算机和位移控制单元串口通讯；软件体系结构；Matrox MeteorII 图像采集卡开发的特点；系统工作时序。然后对系统获得直线参数采用的图像处理步骤做了详细的介绍：通过对比常用的滤波方法，系统采用中值滤波；图像二值化阈值的选取；图像的逻辑运算；图像的快速细化；霍夫变换直线提取。最后介绍了检验系统精度的方法，结果显示系统达到应用要求。

在对系统误差深入研究、分析的基础上，结合系统实际对图像处理的方法进行了进一步研究。研究内容包括：图像边缘检测的一般方法的比较和小波变换在图像边缘检测中的应用。实验结果显示采用小波变换能够达到更高的精度。

关键词 **视觉检测** **图像处理** **量表** **小波变换** **精度**

Abstract

The detecting technology is the base of industrial automation. Vision detecting has standing out strongpoint such as non-contacting, flexibility, high-efficiency. It has become the most potential technology in the field of precise testing. Vision detecting was applied to the procedure of dialgauge inspection. Researching dialgauge inspection system which based on vision detecting technology could improve production efficiency and satisfy the require of manufacturing automation.

Firstly, the paper describes the structure of the system and the choice of hardware .The context included as follows:

1 In order to improve the testing efficiency, synchrony-running mode was adopted between movement unit and image processing

2 according to the request of the precision of dialgauge inspection, the hardware system was designed

Secondly, the realization of the system was introduced: the serial communication between computer and movement unit, structure of software, the character of development on MeteorII image collection clip, working sequence. Then, the steps of image processing to gain the parameter of line was described in detail: adopting median filter after comparing two method of filter, choosing threshold value in binary converting, image Boolean calculation, quick thinning, line extracting .At last, the method of verifying the system is present and result shows the system meets the requirements of application.

Based on thorough analyzing system error, combining with the actual system, further researching about other image processing method is described: accustomed method in edge detection was compared in the paper. Wavelet transformation was applied in edge detection. At last the result indicates the wavelet transformation edge detection could achieve higher precision

Key vision detecting image processing dialgauge inspection
wavelet transformation precision

第一章 绪 论

1. 1 计算机视觉及应用

视觉是一个从图像发现外部世界中有什么物体和物体在什么地方的过程,也就是产生对观察者有用的描述。视觉实际上也是一系列的信息处理过程。计算机视觉又称为图像理解和分析,是当今世界上最为活跃也是最有争议的学科之一。是实现机器智能化和第五代计算机关键技术之一。IEEE1988年8月的会刊组织了计算机视觉专辑,在其引言中,定义计算机视觉为用任何方法对2D图像数据做出理解^[1]。计算机视觉的研究、应用已经有40多年历史,在工业、农业、航天、医学等领域都有了很多应用^[2]。

1. 1. 1 计算机视觉理论研究

计算机视觉是一门交叉性很强的学科,不仅涉及计算机、数学、光学、最优控制、神经生理学、神经心理学和临床病理学等自然学科,还涉及哲学、心理学以至美学等社会科学,在理论研究上碰到了相当多的问题。理论体系也还处在一个百花齐放、百家争鸣的孕育期。比较著名的学派有以美国MIT的Marr为首的重建学派,以美国马里兰大学计算机视觉研究实验室的Aloimonos Y为首的主动主义学派;美国宾夕伐尼亚大学计算机系Bajcsy的主动主义学派等。重建学派是计算机视觉的主流派,他们认为计算机视觉的具体目标应该根据一个景物的一到几幅图像定量地、精确地决定场景中物体的形状、位置、物理特性,对景物进行3D重建。在70年代里,Marr从神经生理学、心理物理学和临床病理学角度对人的视觉进行了系统的理论研究。由于该理论第一次把复杂、神秘的视觉过程变成一个可计算的信息处理过程,为计算机视觉提供了理论框架,所以当时学术界相当兴奋和激动。有的人甚至以为不到10年就会出现类似人类视觉的计算机视觉系统。但是两三个10年过去了。人们在通用计算机视觉系统上并没有突破。这使人们认识到Marr的理论框架有严重的不足,对Marr的批评主要集中在两个方面:①他把视觉看成一个完全被动的过程。缺乏于环境的交流 ②他的理论局部优先,引入大量噪声^[3,4]。

为了解决视觉实际研究中碰到的问题。Aloimonos、Bajcsy等创造了目的、主动学派。以生物视觉系统的演化为依据提出用主动方式控制数据的获得,以定性的方式去描述景物。Aloimonos、Bajcsy等认为。以Marr视觉计算理论为代表的理论将视觉规定为由场景的图像精确地获得三维几何计算机视觉成本太高了,是不必要的,计算也太复杂,求解太困难。而这些定量计算没有必要,可用定性视觉来代替定量视觉^[4]。

重构视觉模型为计算机视觉模型研究建立起系统的理论框架,虽然它所规定的视觉任务较单一且要求高,但它对认识视觉过程的本质是具有指导意义的,它应是计算机视觉研究的远期目标。而目的视觉则为面向应用的实时视觉系统的建立提供了有效的方法,为通用视觉的实现建立了近期易于实现的子目标。另外,重构视觉的研究更偏重于基础理论,目的视觉更面向应用,它们是一个问题的两个方面,两者都是值得研究的^[5]。

1. 1. 2 计算机视觉应用技术

计算机视觉应用技术研究领域主要包括三个方面：（1）信号处理：把输入图像转换成具有所希望特性的另一幅图像（2）模式识别（图像识别）：模式识别技术根据从图像抽取的统计特性或结构信息，把图像分成预定的类别（3）图像理解（景物分析）：给定一幅图像，图像理解程序不仅描述图像本身，而且描述和解释图像所代表的景物，以便对图像代表的内容做出决定。实现计算机视觉的应用，实现类比人视觉的计算机视觉，却存在以下困难^[2]。

（1）由于图像是三维景物的二维投影，一幅图像本身不具备复现三维景物的全部几何信息。

（2）图像在形成过程中受到许多因素的影响，诸如摄像头的质量，光传播介质的特性，照射景物光的特性，目标的反对特性等，很难具体分清每个因素对具体图像所产生的影响。

（3）图像本身不具有精确理解三维景物的全部信息，还需要知识的导引。

（4）计算机视觉是模仿人的视觉，人的感知机理影响着计算机视觉的研究。

（5）实现图像理解，计算机数据量很大。

尽管实现计算机视觉应用有诸多困难，但随着计算机技术的发展，数字图像算法的研究以及基于 DSP 的专用图像处理芯的出现等。计算机视觉得到广泛的应用。

目前，计算机视觉已经在工业生产自动化、机器人智能化、导航、目标跟踪以及工业检测、医疗和军事应用得到了很多应用。^[4]计算机视觉产品的市场也在迅速扩大。在美国，1984 年的计算机视觉系统销售总额达到 6000 万美元，而到 1994 年近 12 亿美元。^[4]Frost & Sullivan 公司 (www.frost.com) 测试测量部的行业经理 Sunderraju Ramachandran 认为，计算机视觉市场可能会在 2005 年之后取得明显发展，从 2002 年的 12 亿美元（不包括 X 光系统）增长到 2009 年的 26.2 亿美元。可以预见，计算机视觉的发展和应用是值得期待的。在日本，在 2000 年计算机视觉市场有 1,000 亿日元，日本市场 300~400 亿日元。以上是狭义上的计算机视觉的数据，如果包含外表检查系统，包含画像和关系较深的半导体制造装置和 PCB 等关联装置的话，图像处理关联的市场，在日本国内有数千亿日元的规模。可以预见，计算机视觉的发展和应用是值得期待的^[6]。

1. 2 视觉检测技术

计算机视觉在工业中的具体应用可细分为两大类：视觉检测和视觉控制机器人导航^[5,7]。检测技术是工业自动化的基础，随着制造水平的快速发展，制造领域不断扩大，产品质量不断提高。相应地，对检测技术提出了新的需要，传统意义上的很多检测方法已经不能适应现代制造业的要求。而视觉检测技术具有非接触、柔性好、成本效率高等突出优点，在现代制造业中有着重要的应用前景。视觉检测技术是指综合运用高速 A/D 转换、数字图

像处理、人工智能等技术的非接触检验方法,对得到的景物图像进行分析,从而得到所需要的测量信息,判断出目标是否符合要求^[7]。

1.2.1 视觉检测技术及应用

国外视觉检测技术起步于始于上个世纪的70年代,到了80年代中期,视觉检测技术得到了越来越多的应用。在1984年,西欧的工业视觉系统的销售总额达到589万美元,到1989达到近4320万美元。以视觉检测技术在汽车工业上的应用为例,美国Michigan大学研制的汽车车身尺寸视觉检测系统已在美国通用、福特等主要汽车厂得到应用,产生了良好的社会效益^[6]。

在进入二十一世纪前,国内的大多视觉检测技术随着国外跨国企业的生产线进入中国。中国的视觉厂商有自己产品的少之又少,主要在摄像头、采集卡、光源方面有少量的低端产品,在视觉软件和其他环节还基本处于空白状态。从整体上来说国内本土化的产品在各项性能指标上和国外都有很大的差距。由于门槛较高,绝大多数从事该行业的公司都是以产品代理为主同时兼顾一些项目集成应用。经过数年的发展,现在国内许多自动化设备制造商和高校、科研单位合作正将视觉检测技术用于其产品设计以提高功能及性能档次,改善产品及加工质量^[8]。

国内工业生产中视觉检测技术应用举例:

(1) 纸张匀度视觉检测方法的研究:应用计算机视觉理论与方法,结合纸张匀度测试理论,对图像中的相关信息进行分析。不仅能模拟人类视觉的分析过程,对整个测定面积内的纤维、絮块在纸面上的分布状况进行分析和描述,而且能综合各种参数,确定一个更加全面、更加正确的匀度指数^[9,10]。

(2) 基于视觉检测的PCB板自动定位钻孔系统的研制:综合运用光学、机械、电子、计算机图像处理等相关技术,设计PCB板自动定位钻孔系统^[11]。

(3) 基于计算机视觉钢板形位检测系统:采用多台面阵CCD摄像机获取整块钢板的图像,并经图像采集卡将灰度图像数字化,由计算机进行预处理,完成边缘提取、人工标记的自动识别,从而得到钢板的长宽尺寸^[12]。

1.2.2 国内视觉检测技术应用及发展趋势

(1) 随着产业化发展对计算机视觉的需求将呈快速上升趋势

视觉检测技术主要应用在半导体和电子行业,而据我国相关数据显示,全球集成电路产业复苏迹象明显;与此同时,全球经济衰退使我国集成电路产业获取了市场优势、成本优势、人才回流等优势;国家加大对集成电路产业这一战略领域的规划力度,“信息化带动工业化”,走“新兴工业化道路”为集成电路产业带来了巨大的发展机遇,特别是高端产品和创新产品市场空间巨大,设计环节、国家战略领域、3C应用领域、传统产业类应用领域成为集成电路产业未来几年的重点投资领域。以及随着中国其他加工制造业的发展,视觉检测技术需求快速上升^[8]。

(2) 基于嵌入式的产品将取代板卡式产品

从产品本身看,视觉检测技术会越来越趋于依靠 PC 技术,并且与数据采集等其他控制和测量的集成会更紧密。基于嵌入式的产品将逐渐取代板卡式产品,这是一个不断增长的趋势。主要原因是随着计算机技术和微电子技术的迅速发展,嵌入式系统应用领域越来越广泛,尤其是其具备低功耗技术的特点得到人们的重视。另外,嵌入式操作系统绝大部分是以 C 语言为基础的,因此使用 C 高级语言进行嵌入式系统开发是一项带有基础性的工作,使用高级语言的优点是可以提高工作效率,缩短开发周期,更主要的是开发出的产品可靠性高、可维护性好、便于不断完善和升级换代等。因此,嵌入式产品将会取代板卡式产品。

(3) 标准化、一体化解决方案也将是视觉检测技术的必经之路

由于视觉检测技术是自动化的一部分,没有自动化就不会有视觉检测技术,视觉检测技术软硬件产品正逐渐成为协作生产制造过程中不同阶段的核心系统,无论是用户还是硬件供应商都将视觉检测技术产品作为生产线上信息收集的工具,这就要求计算机视觉产品大量采用“标准化技术”,直观的说就是要随着自动化的开放而逐渐开放,可以根据用户的需求进行二次开发。当今,自动化企业正在倡导软硬一体化解决方案,计算机视觉的厂商在未来 5-6 年内也应该不单纯是只提供产品的供应商,而是逐渐向一体化解决方案的系统集成商迈进。

1. 3 本文研究的内容和目的

指针式量表是一种在工业领域特别是制造业中大量使用的量具,种类多,用量大。由于是测量器具,国家标准计量局特制定其出厂质量检定和使用期定期精度检定标准(GB/T1219-2000),以保证该量具测量的可信度。为此量表生产企业和用户单位都要寻求指针式量表的检定设备。指针式量表测量时,沿其轴线方向运动的测杆接触工件,量表指针根据测杆的位移旋转并指示在某示值上。指针的位置是否正确地表示出测杆的位置是衡量该量表的精度的主要方面。我们把测杆位置和指针指示位置之间的不一致性称为示值误差。精度检定的最主要目的是找到量表全量程上的示值误差,并且要在整个量程上按标准规定的众多位置上检定其示值误差。

目前对指针位置的判断大多还用人工目测。人工目测不可避免会受到个人的视力、颜色鉴别力、情绪、疲劳、光线等因素的影响。必须多次重复才能保证检定精度,效率低,难于实现自动化,不能满足大批量生产的要求。因此研究、设计满足量表精度检定需要的视觉检测系统是有必要的。本文研究内容就是对该视觉检测系统的设计、研究。

视觉检测系统是光学、图像传感、图像处理、测量技术、数学形态学等有机结合,其综合性强,需要各个环节精心设计和匹配^[13,14]。视觉检测系统一般包括图像采集系统、图像处理部分以及输入输出和执行机构等。图像采集和图像处理部分是计算机视觉检测的核心。图像采集环节负责将对象的可视化图像和特征转换为能被计算机处理的一系列数据。由于视觉检测系统强调速度和精度,因此图像采集系统需要及时、准确地提供清晰图像。图像采集系统一般由光源、镜头、摄像机、图像采集卡组成。图像处理部分对采集到的图

像进行理解获得需要的数据。研究内容:

- 1 系统硬件系统设计, 包括满足量表验定要求的成像系统和位移控制单元的设计。
- 2 由于系统拟采用图像处理和位移发生同步工作, 所以必须考虑计算机和位移控制单元的通讯和工作时序。以达到满足系统速度要求的研究。
- 3 实现系统图像处理目标算法的研究。
- 4 对系统的误差进行研究, 并研究减小误差的图像处理方法, 以达到提高系统精度的研究。

量表验定采用视觉测量技术难点在于图像背景复杂, 背景中有刻度、产品商标、小指针。从查阅文献来看, 目前, 在工业视觉检测中, 达到像素级的测量都是能够建立良好的背景条件下的^[15, 16, 17]。而且应用也大多数集中在长度测量方面。长度测量可以直接建立在像素多少的基础上, 相对来说比角度测量实施起来要容易。本文研究了在较复杂的图像背景下对图像的精确测量。

从理论上来说, 所有的视觉检测系统都是建立目的主义学派理论基础上的。系统并不是完全意义上的计算机视觉系统, 强调的是仅仅根据检测需要设计系统, 而不是完全重建计算机视觉。本系统的建立也是建立在量表验定标准基础上的^[13]。由于量表验定精度要求高, 系统的硬件必须根据量表验定的标准精心设计和匹配。在图像处理部分, 要在尽量节约硬件成本下研究精度高、速度快的算法。同时, 系统为提高效率采取了位移单元和图像处理同步工作的方式, 必须考虑工作时序和通讯。因此该系统已经不是一个单纯的计算机视觉的研究, 而是一个集其他多种技术的综合系统的研究。

第二章 量表验定系统硬件结构和组成

量表验定系统的设计可以分为硬件部分设计和软件部分设计，本章介绍根据量表验定的标准，系统的硬件结构的设计和硬件选择。实际上，对任何视觉检测系统来说硬件和软件部分设计是一体的。因为软件部分的设计是建立在硬件基础上的。本系统最终能够达到检测效果是建立在合理的硬件配置和合适图像处理方法相互匹配基础上的。

2. 1 系统硬件结构与工作原理

本视觉测量系统由位移控制单元（电机驱动器、步进电机、光栅传感器）、成像系统（镜头、CCD 摄像头、图像采集卡）和计算机组成，如图 2-1 所示。系统运行时位移控制单元在计算机控制下提供量表测杆精确位移，量表指针旋转，成像系统和计算机采集量表表盘图像，进行图像处理，识别指针指示值。计算机识别的指针指示值和位移控制器提供的精确位移之间的误差作为示值误差。根据验定标准和各验定点的示值误差检定量表。

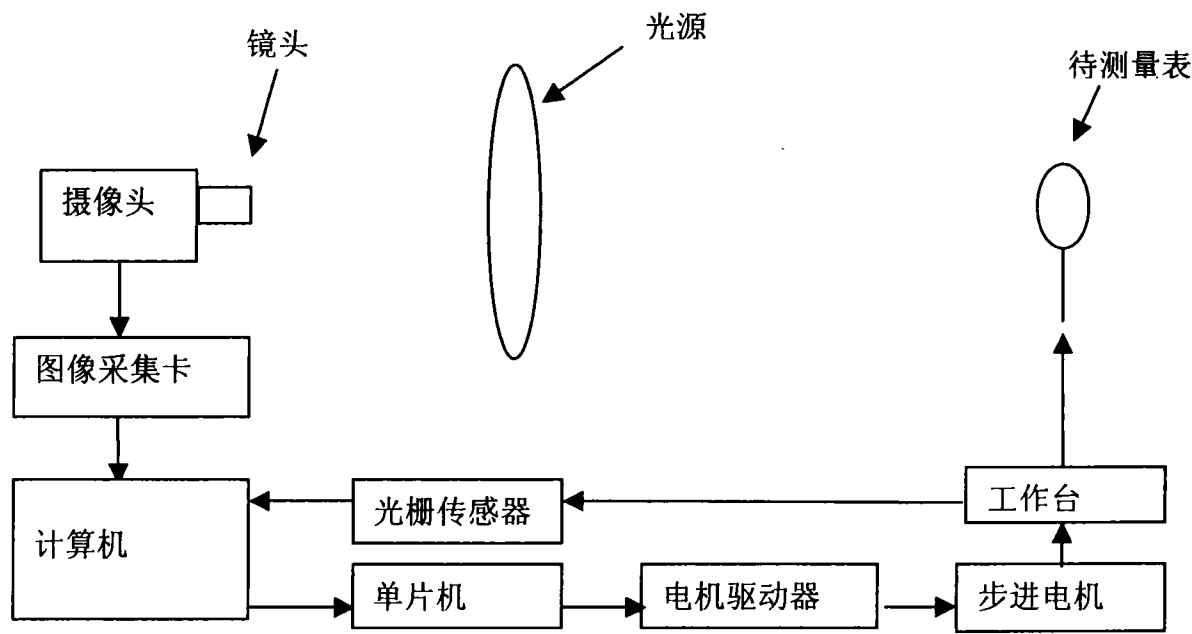


图 2-1 量表验定系统组成

根据国家量表出厂质量检定和使用期定期精度检定标准(GB/T1219-2000)（表 2-1）。该表给出了各种分度值量表的允许误差，如分度值为 $0.01mm$ 的百分表, 最小允许误差为 $\pm 0.005mm$, 分度值为 $0.001mm$ 的千分表, 最小允许误差为 $\pm 0.001mm$ 。从图像处理的角度出发，按最苛刻条件的百分表计，系统分辨率必须小于 $0.001mm$ ，折合成系统对指针旋转角度的分辨率： $360^{\circ} / 100 / 10 = 0.36^{\circ}$ 。根据系统要求设计系统硬件。

表 2-1 GB/T 1219-2000

技术指标			分 度 值			
			0. 01 (mm)	0. 002 (mm)	0. 001 (mm)	
					A	B
允 许 误 差	任意 1/10 转	mm	± 0. 005	± 0. 001	± 0. 001	± 0. 001
	任意 1/2 转		± 0. 008	± 0. 003	± 0. 002	± 0. 002
	任意 1 转		± 0. 010	± 0. 004	± 0. 003	± 0. 003
	任意 2 转		± 0. 015	± 0. 006	± 0. 004	± 0. 004
	全量程		± 0. 020	± 0. 008	± 0. 005	± 0. 005

2. 2 成像系统及其参数选择

成像系统由摄像头、镜头、光源组成。其品质是影响测量精度的关键因素。对具体检测目的必须选择适合的元件和参数。

2. 2. 1 摄像头的分类和选择

摄像头的核心是感光芯片。感光芯片是一片由光敏感材料制成的芯片。光敏感性材料，可以将入射的光线中的光量子，转变成电子，并累积成电荷。摄像头拍照时，快门打开，光线射入芯片的感光部分。将光能转换成电能，最终成为电压信号。摄像头根据不同的分类方法有多种选择

(1) 以不同图像传感器分类：CCD 摄像头与 CMOS 摄像头

CCD 摄像头：使用 CCD 式感光芯片（电荷耦合器件）为图像传感器的摄像头。

CMOS 摄像头：使用 CMOS 式感光芯片（互补金属氧化物半导体）为图像传感器的摄像头。

CCD 摄像头，是目前绝大多数计算机视觉系统所使用的摄像头。现在市场上公开销售的 CCD 摄像头，无论是在图像格式、分辨率还是敏感度等各个方面都有着广阔的选择空间。可以这样说：CCD 摄像头所提供给我们的优越性能，可以满足 99% 的项目要求^[18]。

与 CCD 摄像头相比，虽然 CMOS 摄像头有着如：工艺简单、成本低廉、低功耗、系统整合性好、区域读取图像灵活等诸多优点。但由于生产工艺上的差距，CMOS 目前在除噪及灵敏度方面仍逊于 CCD，因此使得 CMOS 摄像头现在处于民用阶段，尚无法达到工业领域的要求。

(2) 以不同图像颜色分类：单色摄像头与彩色摄像头

单色摄像头：输出图像为单色图像的摄像头。

彩色摄像头：输出图像为彩色图像的摄像头。

就目前的生产工艺来说，由于使用滤片使得彩色摄像头的灵敏度远低于单色摄像头。同时由于彩色摄像头中的像素只“存放”一种色光的灰度值，因此彩色摄像头的分辨率也远远不及单色摄像头。这便使得彩色摄像头只能用于需要“色彩认识”的系统，还不能被

普通使用于高精度的测量、定位等系统。

(3) 不同传感器格式分类：面扫描摄像头与线扫描摄像头

面扫描摄像头：CCD 感光芯片上的点阵呈面状分布的摄像头，其所成图像为二维“面”图像。

线扫描摄像头：CCD 感光芯片上的点阵呈线状（一行或两行）分布的摄像头，其所成图像为一维“线”图像。

(4) 不同传传方式分类：模拟信号摄像头与数字信号摄像头

模拟信号摄像头：在模拟信号摄像头中，从传感器中传出的信号，被转换成模拟电压信号，即普通视频信号，后再传到图像采集卡中。

数字信号摄像头：在数字信号摄像头中，信号自传感器中的每一个像素输出后，在摄像头内部就被数字化了，数字化之后的图像可直接被计算机所接受。

模拟信号摄像头的成本一般上低于数字信号摄像头。但是在除噪、速度方面则比数字信号摄像头来得差。如我们常常听到的，EIA, RS-170、NTSC、CCIR、PAL，都是常用模拟信号传输标准。数字信号摄像头除了在除噪及速度方面优于模拟信号摄像头外，由于是数字信号传输方式，因此在计算机中所得到的由数字信号摄像头拍出的图像，更加“逼真”。而且，数字信号摄像头在分辨率及速度方面有更多选择^[16]。

对一个视觉检测系统选择摄像头首先要考虑满足精度要求的分辨率，这是因为摄像头的分辨率会直接影响到整个视觉系统的计算精度。而衡量系统精度的标准，就是我们常常听到的像素值—CCD 芯片上像素所对应的实际长度。

像素值的计算公式如下：

像素值（X 方向）= 视野范围（X 方向）÷ CCD 芯片像素数量（X 方向）

像素值（Y 方向）= 视野范围（Y 方向）÷ CCD 芯片像素数量（Y 方向）

这个像素值越小，系统的计算精度就越高^[18, 19]。

理论像素值指的是，根据测量精度的要求，通过推算得出的像素值在理论上所应该达到的数值。即像素值只有达到这一数值，才能确保系统的计算精度符合要求。

根据系统精度要求，系统选择摄像头采用 Honeywell 公司 GC-145CB 面阵 CCD 模拟黑白摄像头。摄像头，基本参数：CCD：1/3 英寸宽 4.8mm*高 3.6mm、点阵为 752X582，像素间距为 6.3 μm、水平分辨率为 570 线。被测量表的外径 D 为 60mm，取图像传感器的靶面的 3.6X3.6 mm² 的正方形作为成像有效区域，因此系统放大倍数 M 为 3.6/60=0.06。其图像直线分辨率为 6.3/M=0.105mm，角度分辨率为 $\tan^{-1}1/(0.5X582)=0.2^\circ$ 。满足系统对角度分辨率应低于 0.36° 的要求。实际上如果有好的良好的成像系统和图像处理系统，CCD 的分辨率可以达到半个像素，那么分辨率将会达到 0.1°^[18]。

CCD 对于不同波长的光有着不同的灵敏度（图 2-2）。从图中曲线（实线）的走向，CCD 的两个特点：1，CCD 对于波长 500~600 的光，即红色光，最为敏感。因此实际应用中，红色光源被用的最为广泛；2，CCD 对于红外线（波长小于 500）仍有一定的敏感度。也就是说 CCD 极易受温度的影响，因此 CCD 摄像头不宜在高温环境下工作。CCD 摄像头装有红

外消除滤片，其感光特征如曲线（虚线）所示^[18]。

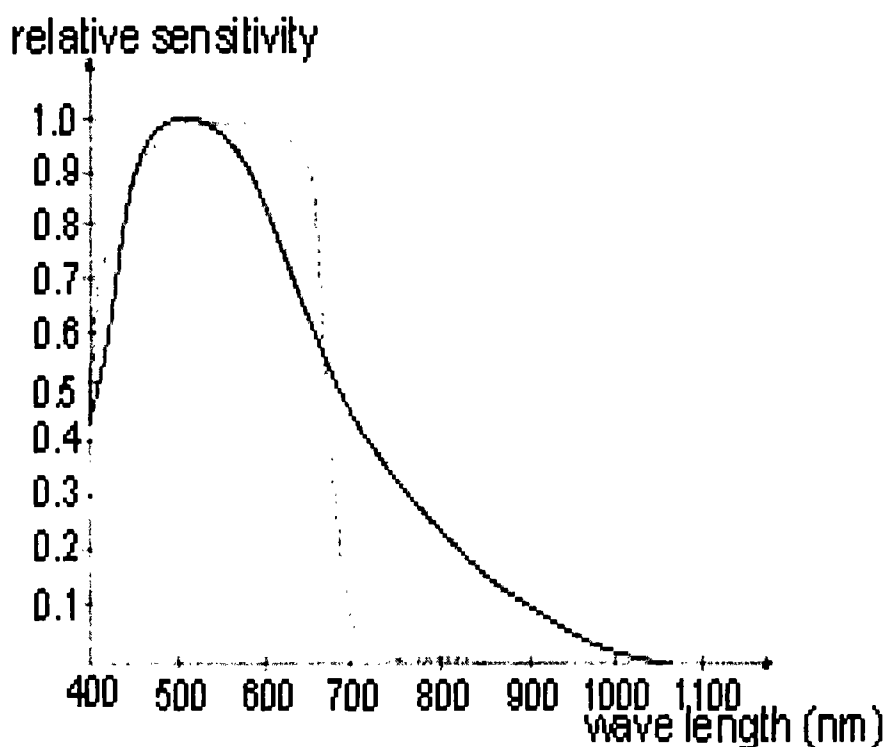


图 2-2 CCD 相对灵敏度

2. 2. 2 光源

照明系统是 CCD 应用技术关键部分之一，光源的选择其主要目标是以合适的方式将光线投射到被测物体上，突出被测特征部分对比度。好的设计能够改善整个系统的分辨率，简化软件的运算，它直接关系到整个系统的成败。不合适的照明，则会引起很多问题，例如花点和过度曝光会隐藏很多重要的信息；阴影会引起边缘的误检；而不均匀的照明引起信噪比的降低导致图像处理阈值选择的困难^[18, 20]。

对于每种不同的检测对象，必须采用不同的照明方式才能突出被测对象的特征，有时可能需要采取几种方式的结合，本系统光源选择为红色 LED 圆环同轴光源。LED 装配限流电阻，以保证照明均匀性和可靠性。红色 LED 光源显色性好（图 2-2），光谱范围宽。漫反射光源可增加亮度均匀性且无反射、无光晕。圆环形减小阴影。

2. 2. 3 镜头

一般情况都把成像系统看作具有平移不变性，或线性系统，因此，可用图 2-3 作为计算参考图。在设计成像系统时尽量将被测图像满幅映射 CCD。被测量表的外径 D 为 60mm，取图像传感器的靶面的 $3.6 \times 3.6 \text{ mm}^2$ 的正方形作为成像有效区域，因此系统放大倍数 M 为 $3.6/60=0.06$ 。从图 2 可见， df 为被测物至镜头的距离， di 为镜头至靶面的距离，因为 $M=di/df$ ，而镜头焦距 $f=df \cdot M/(1+M)$ 。根据结构条件，选择 df 等于 200mm，则应选择焦距为 12.72 的镜头。实际系统中选择了 16mm 焦距的镜头，用调节 df 的方

法改变成像范围。镜头视角应大于 $\beta = 2 \tan^{-1} (0.5D/df) = 17.06^\circ$ 。选择镜头视角为 20° [2,4]。

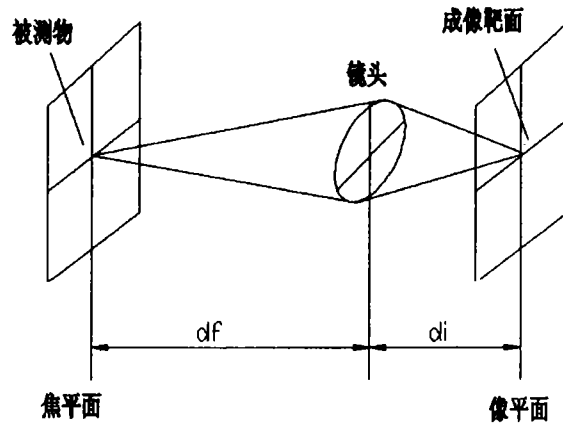


图 2-3 成像示意图

2.2.4 图像采集卡原理和选择

在视觉系统设计中，图像采集卡的选择主要考虑以下几个方面：

(1) 摄像头支持：随着市场上各种新功能摄像头的出现，板与摄像头的匹配问题便更加显得重要了。一、制式。CCD 摄像头有各种不同制式，如 CCIR、RS170 等等。确定板卡是否支持所有制式的信号；二、异步信号。异步信号可以节省拍照时间。不过在选用具有异步信号功能的摄像头之前，首先要确定板卡也有此功能。这一功能对于运行速度要求极高的系统来说，至关重要。以 RS170 为例，如果没有这一功能，系统等待拍照的时间为 0~40 毫秒；三、逐行扫描。越来越多的系统会使用到逐行扫描摄像头，因此要首先知道板卡是否支持这种摄像头；四、多分辨率支持。不是每张板卡都可以支持所有分辨率的摄像头 [4]；

(2) 图像存储：摄像头采集一幅图像一般 40ms，而系统对于图像进行分析、测量的时间则要漫长得多。因此，在实际操作中，常常会出现摄像头“等待”电脑的情况。因此，一些板卡便另设有一些内存，作为图像的缓冲区。即，在前一幅图像尚未分析完之间，接下来摄像头所传来的图像，暂时存放到缓冲区中。之后，再以先进先出的方式，逐一送至电脑内存。

(3) 其他参数：如，信号转换速度等

(4) 图像采集卡软件包

任何一个采集卡都需要一套软件包来支持。图像采集卡需要依靠软件才能将其潜力发挥至极。硬件是躯体而软件则是灵魂。使用与图像采集卡相匹配的软件包，不仅可以避免在板卡的实际应用过程中，出现“软硬不配”的问题。选用带有合适的软件包的图像采集卡，可以大大缩短应用系统的开发周期、并且可以使我们便于优化系统，易于进行系统维护、源代码管理。

本系统中的图像采集卡采用的是加拿大 Matrox 公司的 Matrox Meteor 系列中的标准型

Matrox Meteor II Standard, 此采集卡支持 NTSC/PAL/RS-170/CCIR, 彩色/黑白 PCI 采集, 7 路视频输入, 4MB 视频传输缓存; 支持异步信号; 通过采集卡上的 VIA (Video interface ASIC) 可以使图像高速传输到系统主存或其他 PCI 设备上, 最高传输速率可达到 132Mb/s。为了有效利用此图像采集卡, 需要根据系统组成所使用的硬件环境对它进行适当配置, 最基本的配置包括制式选择、缓存分配、开发程序包指定等。

2. 3 位移控制单元设计

位移控制单元的目的在于计算机指令下提供适时、精确位移。选择执行元件时应综合考虑负载能力、调速范围、运行精度、可控性、可靠性以及体积、成本等多方面要求^[21]。

2. 3. 1 步进电机和电机驱动器

由于该系统属于精密测量系统, 故本系统中选用两相混合式步进。选用常州市三协电机电器有限公司的 57HS51MS01, 步距角误差 $\pm 5\%$, 温升: 80°C , 使用环境温度: $20^{\circ}\sim +55^{\circ}\text{C}$, 绝缘电阻: $100\text{M}\Omega$ MIN. 500V DC, 绝缘介电强度: 500V AC。两相混合式步进电机在低速运转时有振动和噪声大是其固有的缺点, 一般可用以下方案来克服^[18]:

- a. 如步进电机正好工作在共振区, 可通过改变减速比等机械传动避开共振区;
- b. 采用带有细分功能的驱动器, 这是最常用的、最简便的方法;
- c. 换成步距角更小的步进电机, 如三相或五相步进电机;
- d. 换成交流伺服电机, 几乎可以完全克服震动和噪声, 但成本较高;
- e. 在电机轴上加磁性阻尼器, 市场上已有这种产品, 但机械结构改变较大。

本系统采用 b 种方法来克服电机的振动和噪声大的固有缺点^[22, 23]。

电机的驱动采用 常州市三协电机电器有限公司的 57HS51MS01 步进电机的配套产品: 两相混合式步进电机驱动器 3X-215M。3X-215M 它集合了脉冲环形分配器、驱动器和步距角的细分功能, 采用高频恒流斩波, 脉宽调制式驱动方式, 使用电压范围宽, 电流可调。具有低噪声, 高可靠性等步进电机步距角细分驱动的工作原理:

在每次脉冲输入切换时, 不是将绕组电流全部通入或切除而是只改变相应绕组中部分电流, 电机转子的每步运动只是步距角的一部分。这里绕组电流不是方波, 而是阶梯波。电流的台阶表明需要多少控制脉冲转过一个原始步距角, 1 个步距角细分成若干步的驱动方法成为细分驱动^[23]。

在使用时, 需要注意的一点是, 细分后步进电机的步距角变小对控制系统所发出的步进信号的频率相应改变。驱动器细分以后的主要优点为^[19]:

- a. 提高了电机的分辨率
- b. 克服步进电机的低频振荡
- c. 提高了电机的输出转距

2.3.2 光栅传感器

位移传感器在本套设备中起到一个非常重要的作用,是本测量仪中相当于标准位移发生器的部分,他的精度高低直接影响系统的实际精度。本系统选海德汉(HEIDNHAIN)天津光学有限公司的 HEIDNHAIN-CT6002 型长度计。精度 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 。长度计的配套产品 ND281B 测量数显装置,其测量值通过通讯口传送给计算机进行处理分析。它的数据接口为 A 标准的 RS-232-C 串行数据接口,数据传输波特率为:110 至 38400 波特率,数据输出为 TTL 电平的压缩 BCD 码,可以与计算机的 com 口直接连接。

2.3.3 单片机

本系统中选用 ATMEL 公司生产的 AT89C51 型单片机,AT89C51 是一种带 4K 字节闪烁可编程可擦除只读存储器(FPEROM—Falsh Programmable and Erasable Read Only Memory)的低电压,高性能 CMOS8 位微处理器。该器件采用 ATMEL 高密度非易失存储器制造技术制造,与工业标准的 MCS-51 指令集和输出管脚相兼容。由于将多功能 8 位 CPU 和闪烁存储器组合在单个芯片中,ATMEL 的 AT89C51 是一种高效微控制器,为很多嵌入式控制系统提供了一种灵活性高且价廉的方案^[24]。计算机通过 COM 和单片机实现通讯。PC 计算机的 COM 口接口电平为 RS-232 标准,若计算机与单片机通信,由于单片机 UART 为 TTL 电平,故需将 RS-232 电平与 TTL 电平转换,可直接使用 MAX232, MC1489 等实现电平转换功能。

在本系统中选用 MAX232 芯片实现电平转换,它可完成 TTL \longleftrightarrow EIA 双向电平转换。MAX232 是一种双组驱动器/接收器,片内含有一个电容性电压发生器,以便在单 5V 电源供电时,提供 EIA/TIA-232E 电平。每个接收器将 EIA/TIA-232E 电平输入为 5VTTL/COMS 电平。这些接收器具有 1.3V 的典型门限值 0.5V 的典型迟滞,而且可以接收 $\pm 30\text{v}$ 输入。每个驱动器 TTL/COMS 输入电平转换为 EIA/TIA-232E 电平。

小结

本章介绍了本系统工作原理和整个系统的硬件选择。在选择成像系统硬件时主要考虑了精度的要求。控制系统选择时主要考虑到调速范围、运行精度和系统通信。整个系统的实现和系统各部分通信将在下章介绍。在设计视觉测量系统的时候计算机的选择也是需要考虑的。图像处理数据量大,需要高的内存和快的运算速度。本系统采用 CPU 1.7G 内存 256M PC 机。

第三章 量表验证系统的实现

在完成了系统总体方案设计和硬件选择后,本章将研究系统实现方法。研究内容包括:(1)计算机和位移单元的通讯(2)图像的采集、处理。测量图像的采集是建立在位移控制单元通信基础上的,而图像处理是和位移控制单元同步的,必须考虑时间上的匹配。本系统是在 Windows 2000 操作系统上实现的。开发工具为 VC++6.0,VC++6.0 的 32 位面向对象的程序设计及 Active X 的灵活性而受广大软件开发者的青睐。VC ++6.0 中提供串行通信 ActiveX 控件,可以真正把串口看作一个对象,能够方便的实现串口通信。而在图像处理程序设计中,由于图像处理数据量大,为提高运行速度采用 VC++是较好的选择。

3. 1 计算机和位移控制单元的通讯

本系统中和位移控制单元的通讯包括:COM1 口和单片机的通讯;COM2 口和测量数显通讯。

3. 1. 1 计算机与单片机通讯

计算机与单片机之间的数据交换,串行通信是重要的通信手段,它高效、方便,并遵循统一的国家标准。一般用 Visual C++ 6.0 开发串行通信程序有二种方法:一是利用 Windows 的通信 API 函数;另一种是采用 Visual C++ 6.0 提供的串行通信 ActiveX 控件实现。该控件的相应文件是 MSCOMM32.OCX,以下简称为 MSCOMM 控件。第一种方法需要声明及调用许多 API 函数,十分烦琐。第二种方法实现简便,且可满足一般情况下通信要求。本系统利用 Visual C++ 6.0 提供的 MSComm 通信控件编写的 VC 程序,完成了计算机与单片机之间的 RS-232 串行口通信。由于单片机 UART 为 TTL 电平,故为实现计算机与单片机的通讯首先需将 RS-232 电平与 TTL 电平转换,系统选用 MAX232 实现 RS-232 电平与 TTL 电平转换功能。

电平转换功能

MAX232 是一种双组驱动器/接收器,片内含有一个电容性电压发生器,以便在单 5V 电源供电时,提供 EIA/TIA-232E 电平。每个接收器将 EIA/TIA-232E 电平输入为 5VTTL/COMS 电平。这些接收器具有 1.3V 的典型门限值 0.5V 的典型迟滞,而且可以接收 $\pm 30\text{V}$ 输入。每个驱动器 TTL/COMS 输入电平转换为 EIA/TIA-232E 电平。

模块的设计如下:

一条通讯线为:89C51 脚 11(TXD 数据发送线) \rightarrow MAX232 第 8 脚 \rightarrow MAX232 第 9 脚 \rightarrow RS232 口第 2 脚(RXD 数据接收)。

另一条通讯为:RS232 口第 3 脚(TXD 数据发送线) \rightarrow MAX232 第 10 脚 \rightarrow MAX232 第 7 脚 \rightarrow 89C51 第 10 脚(RXD 数据接收线)各管脚见图 3-1。

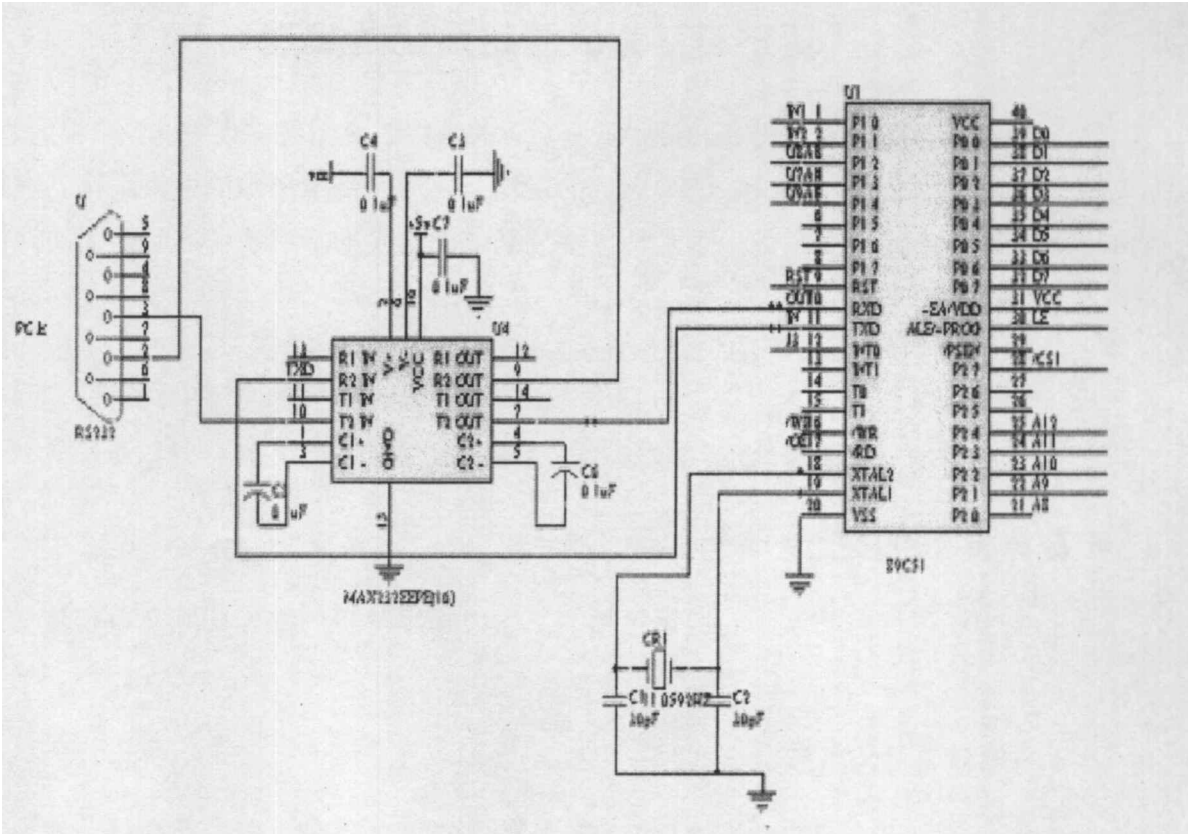


图 3-1 串行通讯模块设计

(2) 通信协议

计算机和位移控制单元均采用查询方式发送控字符和数据、中断方式接收控制字符和数据。帧格式为 9600, n, 8, 1。每次计算机向单片机发数据时，先发送握手信号“0n”（n为从机号），下位单片机收到握手信号则发应答信号“22”至计算机，计算机收到应答信号后判断是目标从机即发数据。同样，当单片机要向计算机发数据时，也先向计算机发握手信号“33”，计算机收到握手信号后发应答信号“22”，单片机收到应答信号后则发数据。

(3) 计算机通信程序设计

使用 VC++ 提供的串行通信控件 MSComm，其主要步骤为：首先，创建一个基于对话框的工程。在对话框中加入通信控件的方法是：选择 Project 菜单下的 Add to Project 项，打开 Components and Controls 对话框，选择 Registered ActiveX Controls 来注册 MSComm，此时只需将该控件从工具箱中拉到对话框中即可^[25, 26]。在 ClassWizard 中为新创建的通信控件定义成员对象（CMSComm m_commute），通过该对象便可以对串口属性进行设置^[22, 23]。

```
对串口进行初始化程序：
BOOL CcommuteDlg::PortOpen()
{
    BOOL m_Opened;
```

```

.....

m_commute.SetCommPort(1);    //指定串行口 1,
m_commute.SetSettings("4800,N,8,1");//设置波特率、奇偶校验、数据位、//停止
位。
m_commute.InputMode(1);      //设置数据获取方式为二进制方式
m_commute.SetInputLen(0);     //设置读取方式为读取缓冲区的全部内容
m_Opened= m_commute.SetPortOpen(1); //打开指定的串口
return m_Opened;             //返回端口状态
}

```

事件驱动是处理串行端口交互作用的一种非常有效的方法。OnComm 事件的 CommEvent 属性可以捕捉并检查通信事件和错误。发生通信事件或错误时, 将触发 OnComm 事件, CommEvent 属性的值将被改变, 应用程序检查 CommEvent 属性值并做出相应的反应。双击对话框中 CMSComm 控件, 添加 OnComm 事件的代码:

```

if (m_commute.GetCommEvent()==2) //判断 comEvReceive 事件发生否
{
    short m_size=m_commute.GetinBufferCount();
    if (m_size==11) //缓冲区为 11 个字符为满
    {
        m_commute.SetInputLen(L); //读取接收到的数据
        VARIANT vReply=m_commute.GetInput(); //处理接收到的数据
    }
}

```

3. 1. 2 单片机串口通讯程序设计

根据机与位移控制单元的通讯协议, 单片机串行口设置为中断方式 1, 8 位数据位, 1 位开始位, 1 位停止位, 无奇偶校验位, 波特率设为 4800。

```
ORG 0000H
```

```
LJMP INIT
```

```
ORG 0023H
```

```
LJMP SERVE
```

```
ORG 0100H
```

```
INT:MOV SP,#60H
```

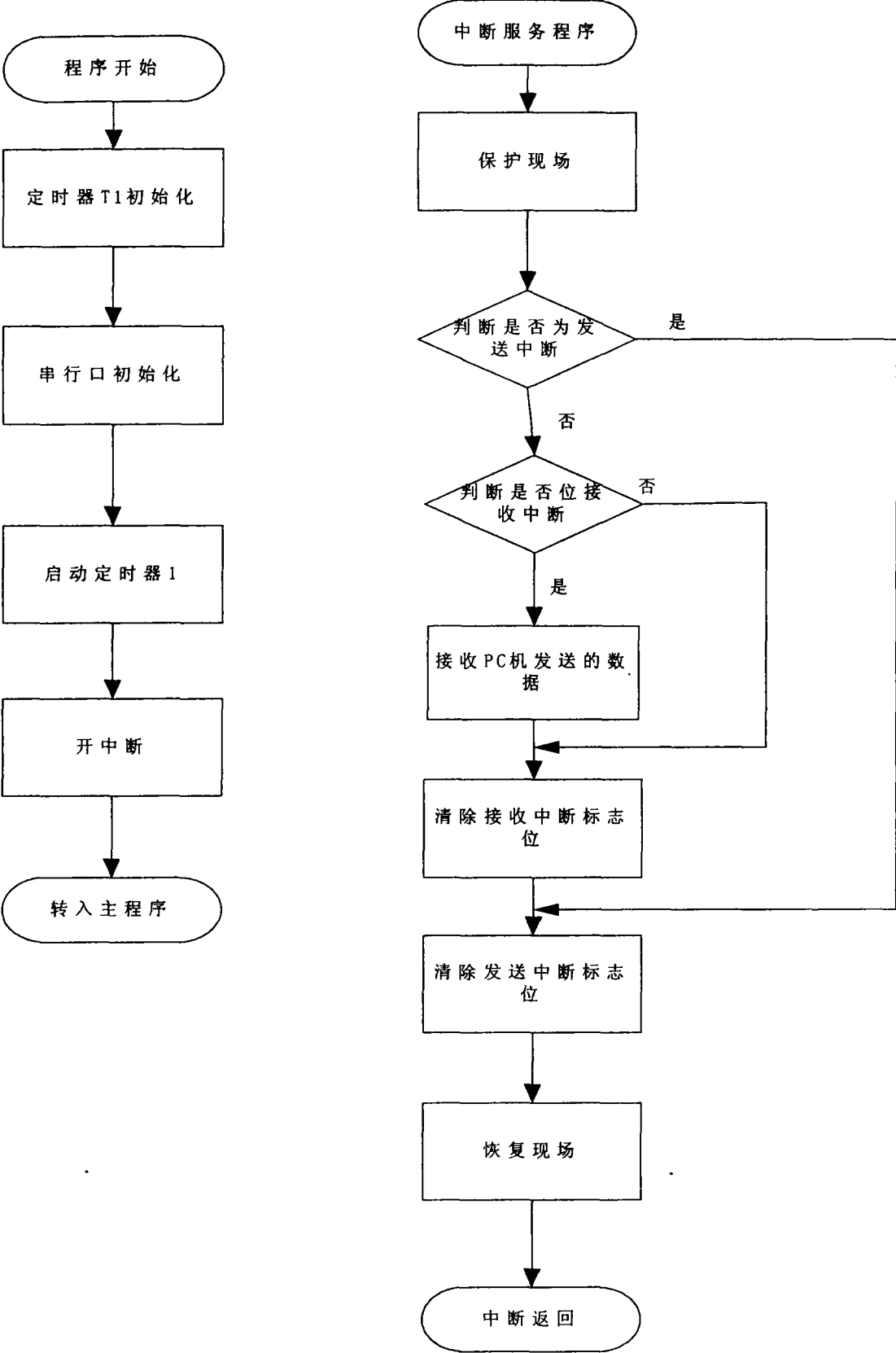
```
MOV R1,#dat ; 设置数据存储地址
```

```
MOVTMOD,#20H ; 定时器 T1 初始化
```

```
MOV TH1,#0F3H
```

```
MOV TL1,#0F3H
```

```
MOV SCON,#50H    ; 串行口初始化, 方式 1,  
允许接收  
MOV PCON,#80H    ; 置 SMOD=1, 波特率加倍 4800bps  
SETB T           ; 启动定时器 T1  
SETB ES          ; 允许串行口中断  
SETB EA          ; 开中断  
LJMP MAIN        ; 转主程序  
SERVE:PUSH DPH   ; 保护现场  
PUSH DPL  
PUSH A  
JB TI, TEMP1     ; 判断是否为发送, 是则 跳转  
JNB RI, TEMP2    ; 判断是否为接收, 否则跳转  
MOV A, SBUF      ; 将接收的数据送到数据地址内  
MOV @R1, A  
TEMP2:CLR RI     ; 接收中断  
TEMP1: CLR TI    ; 清发送中断  
POP ACC         ; 恢复现场  
PUSH DPL  
PUSH DPH  
RETI           ; 中断返回
```



3-2 单片机程序流程图

3. 1. 3 计算机与光栅长度计数单元的串行通讯

光栅长度计数单元通过 RS-232-C 串行数据接口直接与计算机 com2 口相连，数据传输波特率为：110 至 38400 波特率，数据输出为 TTL 电平的压缩 BCD 码，测量精度为 0.01um，测量范围最大值为 60 毫米。

```
{ BOOL m_Opened;
.....
m_Serial.SetCommPort(2); // 指定串口号 2
m_Serial.SetSettings("9600,N,8,1");// 通信参数设置
m_Serial.SetInBufferSize(1024);// 指定接收缓冲区大小
m_Serial.SetInBufferCount(0);// 清空接收缓冲区
m_Serial.InputMode(1);// 设置数据获取方式
m_Serial.SetInputLen(0);// 设置读取方式
m_Opened=m_Serail.SetPortOpen(1);// 打开指定的串口
return m_Opened;
}
```

3. 2 基于图像采集卡的应用软件开发

Matrox 图像采集卡有着强大的图像处理程序库——图像处理和模式识别库（MIL）和 MIL 的子库 MIL-LITE（基本图像处理）。MIL 是一个硬件独立的 32 位图像处理库，利用了 Intel 的 MMX 的多媒体图形加速功能对图像处理程序库进行了优化，可以处理二进制、灰度或彩色图像，它是独立于硬件平台的。为了在 VB、VC 等 RAD 开发工具中实现快速程序开发，Matrox 公司还提供了基于 MIL 的 ActiveX 控件库 ActiveMIL 和子库 ActiveMIL-Lite，本控件库可以实现所有 MIL 的所有功能，而且由于使用了 ActiveX 控件，所以很大程度上降低了程序设计的难度和开发程序的时间。

3. 2. 1 系统软件体系

系统应用软件的结构如图 3-3 所示^[28]：

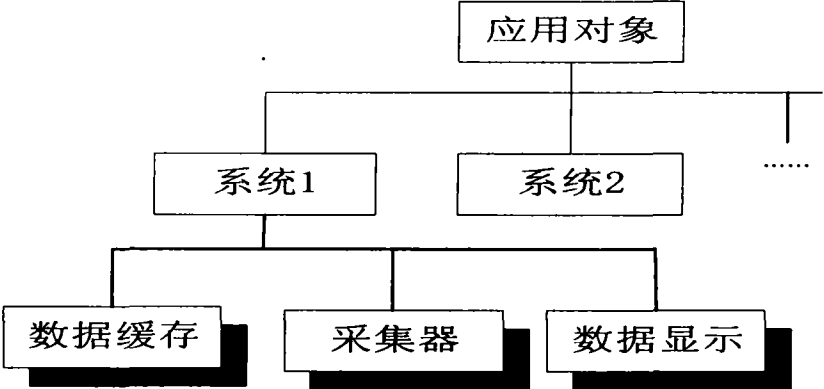


图 3-3 应用软件体系结构图

图像采集处理程序的基本思路是^[26]:

- 1) 打开通信通道,即确定一个应用对象(Application),并对每个应用对象创建一个或多个系统对象(System)。
- 2) 初始化硬件资源,即为每个系统对象分配数据缓存(Data Buffer)、数据采集器(Digitizer)和数据显示(Display)对象。
- 3) 启动采集过程,即将图像读入数据缓存,并将缓存赋值给数组,通过对数组的处理实现对图像的处理,图像数据与数据显示相关联后就可以通过显示控件或窗体显示预处理后的结果。

系统设计两种连续采集图像和单帧采集图像。连续采集图像是为了观察图像成像系统的工作状况进行观察。例如:光源情况、镜头对焦是否良好。单帧采集图像是在 OnComm 事件下对测量图像的采集。用 Visual C++6.0 操作图像采集卡,实现图像采集和图像显示功能的部分源码^[29]。

```
#include <mil.h> //包含 mil 头文件用于编译
MappAlloc(M_DEFAULT, &MilApplication); /分配 MIL 应用程序
MsysAlloc(M_SYSTEM_ METEOR II_ DIG, M_DEVO, M_SETUP, &MilSystem);
//分配硬件系统
MdigAlloc(MilSystem, M_DEVO, "Uniq_UP-600.DCF", M_DEFAULT, &MilDigitizer);
/分配数字转换器
MbufAlloc2d(MilSystem, SizeX, SizeY, 8L+M_UNSIGNED,
M_IMAGE+M_DISP+M_PROC, &MillImageDisp);
/分配二维数据缓冲区
MdispAlloc(MilSystem, M_DEFAULT, M_DEF_DISPLAY_FORMAT, M_DEFAULT,
&MilDisplay ); /分配显示器
MdispSelectWindow(MilDisplay, MillImageDisp, m_hWnd); //选择子窗口显示图像
MdigGrabContinuous(MilDigitizer, MillImageDisp ); /连续采集图像(方式 1)
MdigHalt(MilDigitizer); /终止连续采集图像
MdigGrab(MilDigitizer, MillImageDisp); /单帧采集图像(方式 2)
MbufFree(MillImageDisp); /操作完毕, 释放所有资源
MbufFree(MillImage);
MdigFree (MilDigitizer);
MsysFree (MilSystem);
MappFree (MilApplication);
```

3. 2. 2 双缓存采集处理方法

Matrox MeteorII 图像采集卡支持同步和异步两种采集方式^[28]。

同步采集方式适用于连续采集显示图像而不做运算处理的情况,这是因为同步采集方

式下,在每次采集图像之前,CPU 都向采集卡发送采集同步信号,然后等待采集结束,所以在采集过程中 CPU 由于得不到图像数据而只能处于等待状态。由于 CCD 仅采集一帧图像就需要 40 ms 左右,这与人的视觉滞留大致相当,所以在同步方式下无法保证采集和处理在 40 ms 内完成,也就无法达到实时处理的要求。

异步采集方式下,采集工作和计算机对图像的处理工作可以同时进行,即当 CPU 处理当前帧的图像时,CCD 摄像头可以进行下一帧的图像采集。因此,在程序编制时,需要一个缓存机制用来缓存当前已采集完成的图像和缓存 CCD 摄像头将要采集或正在采集的图像,从而实现图像采集与处理的并行工作。显然,利用这种双缓存采集方法既可以降低对硬件系统的要求,还可以大大提高系统的处理速度,满足实时处理的要求。

计算图像缓存区大小的公式为 $\text{MemSize} = \text{ImageWidth} \times \text{ImageHeight} \times \text{Frames}$ 。实验表明:采用同步采集方式采集 752X582,每像素 8bits 的 10 帧图像大致需要 4Mb 的缓存空间;采用异步双缓存采集方式采集相同分辨率的图像只需要不到 2Mb 的缓存就可以连续不间断地保存图像。由此可见,使用异步双缓存采集方式不仅可以节约系统资源,而且可以获得更好的采集效果^[30]。

```
CExampleDlg::ProcessingWorkFunction()
{
    //采集第一帧图像存在 m_GrabImage1 中
    m_Digitizer->Image = m_GrabImage1;
    m_Digitizer->Grab(); while(!m_StopProcessing&&!m_KillProcessing)
    {
        //采集第 2 帧 m_GrabImage2,处理第 1 帧//m_GrabImage1
        ProcessImage(m_GrabImage1);
        m_Digitizer->Image = m_GrabImage2;
        m_Digitizer->Grab();
        m_Image->Copy(m_GrabImage1, imAllBands); //显示第 1 帧图像
        //采集第 1 帧 m_GrabImage1 处理第 2 帧//m_GrabImage2
        ProcessImage(m_GrabImage2);
        m_Digitizer->Image = m_GrabImage1;
        m_Digitizer->Grab();
        m_Image->Copy(m_GrabImage2, imAllBands); //显示第 2 帧图像 }
}
```

3. 2. 3 格式的转换

Matrox MeteorII 图像采集卡的控件库 ActiveMIL7.0 由于采用了 ActiveX 技术,所以采集到的图像的数据格式与一般的图像采集卡不同,它使用了 Windows OLE 技术中的 Variant 数组,因此要对采集的图像数据进行处理,就必须对数据格式进行转换。需要注意的是,从图像采集卡抓取的图像不同于一般 BMP 图像,它的图像数据是按列组织,从上到下,从左到右,而 BMP 图像是按行组织,从左到右,从上到下。下列程序就是基于这种思路处理图像格式转换的。

1) 将 Variant 数据转换成 unsigned char 型:

```

COleSafeArray MyArray;
unsigned char * ModelBuffer;
//设置图像数组的大小为 SizeX*SizeY
DWORD q[2]={SizeX,SizeY};
//建立一个 BYTE 型的二维数组,
//大小为 SizeX*SizeY
MyArray.Create(VT_UI1,2,q);
m_Image->Get(MyArray,imPlanar, imAllBands,0,0,SizeX,SizeY);
//将 Variant 数据指针转换成 unsigned char 型//数据保存在 ModelBuffer 中
ModelBuffer=(unsigned char*)MyArray.parray->pvData;
2) 将 unsigned char 转换成 Variant 型:
long index[2];
_variant_t ImageArrayVariant;
//将处理完的图像 (ModelBuffer)
//逐像素保存成 Variant 数组 MyArray
for(index[1]=0; index[1] < SizeY; index[1]++)
for(index[0]=0;index[0]<SizeX;index[0]++){MyArray.PutElement(index,ModelBuffer);
ModelBuffer++; }

```

3. 3 系统运行时序

本系统设计时,为获得满意的检测精度。设计了位移控制单元和图像处理同步的方式。所以必须考虑系统运行时序^[31]。系统运行是首先 COM1 口发出开始信号,单片机接收到信号后运行程序,电动机运转带动量表测杆运动。运动到检测点时,数显单元经过 COM2 口发送信号计算机,计算机通过 COM1 口发送信号,单片机接受信号,中断程序。步进电机停止。采集结束,计算机开始再次发送 COM1 口信号直到所有检测点图像采集结束。各部分所用时间:图像每帧 $T_1=40\text{ms}$; 图像采集时间 $T_4=40\sim 80\text{ms}$; 位移控制单元到下个检测点时间 $T_3=400\text{ms}$; COM2 口信号间隔时间 $T_2=T_4+T_3=440\sim 480\text{ms}$ 。经过测算系统对采集到的指针图像进行识别需要 $T_5=350\text{ms}$ 。由于实现位移控制和图像处理同步。整个系统检测每点时间在 $400\text{ms}\sim 480\text{ms}$ 左右。时序如图 3-4 所示。

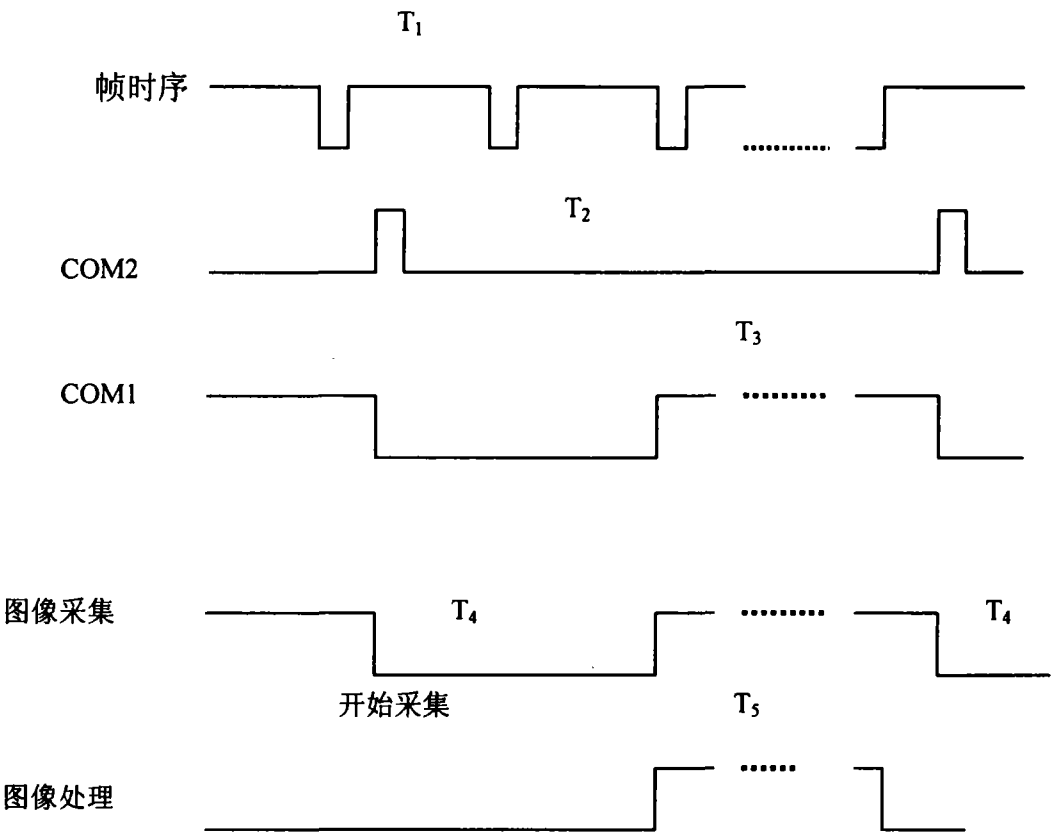


图 3—4 系统运行时序

小结

本章主要介绍在 VC 开发工具下系统的实现。整个系统实际上是由位移控制单元和图像采集系统同步工作的，所以在设计时必须考虑系统的通讯和时序匹配。图像处理的具体算法也是系统实现的一部分，本章节考虑阐述简洁，没有涉及。下一章介绍该系统图像处理中算法。

第四章 数字图像处理方法

图像是客观世界能量或状态以可视化形式在二维平面上的投影，是社会生活中最常见的一种信息媒体。它传递着物理世界的能量和事物状态的信息，是人类获取外界原始信息的主要途径^[31, 32]。

数字图像处理实际上是利用计算机（或数字技术）对数字图像信息进行加工处理，以改善图像质量、压缩图像数据或从图像数据中获取需要的信息。随着计算机、VLSI、DSP 等技术和新的理论、处理方法不断发展，数字图像处理已经成为一门独立的新学科，并有着广泛的应用，正在空间、时间和功能上的扩展人类视觉。

数字图像处理的研究目的与研究内容^[33]：

1. 改善视觉效果——图像增强和恢复，图像变换；
2. 提高图像传输和存储效率——图像编码，图像变换；
3. 进行图像理解与识别——图像增强，图像分割与描述，

图像作为信息的载体，对不同的用途，所关心的图像信息的含义或感兴趣的图像基元不同。比如，远距离红外小目标检测研究时，我们关心的只是目标周围小区域内的信噪比，或图像的信息量等；人脸识别时，关心的就是五官的形状和位置关系，至于脸色就不是很重要。所以对针对不同的目的，选择合适的图像处理方法。

4. 1 本系统图像处理方案

图像采集到计算机内存后，就需要按照系统设计的要求进行图像处理和识别，获得指针的指示值。采集到的图像如图 4-1 所示：

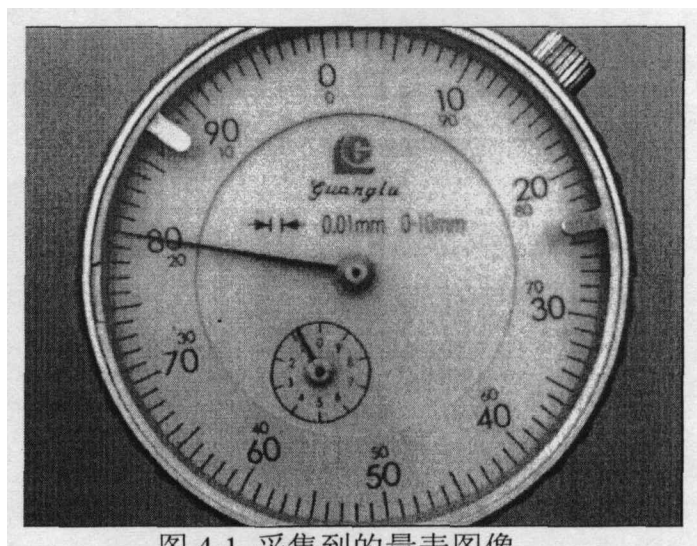


图 4-1 采集到的量表图像

获得指针的位置可以有不同的方法。如采用先确定量表的刻度线的位置，再经过扫描获得指针相对于刻度线的位置。这种方法和人眼的判别步骤相似。这种方法需要寻找量表的圆心，既要处理刻线，又要处理指针，处理工作量大，图像处理时间长。根据量

表检测标准我们可以知道检测的时候。检测的是两次指针的相对指示角度。我们只要识别指针的相对于一固定目标的相对位置。因为量表在检测过程中位置是固定的，所以我们设计每次识别的是指针相对于 CCD 中心的位置。在提取指针角度过程中，为提高效率，系统采用了图像和基准图像相减的处理方法，减小图像处理的工作量。设计图像处理方案如下：

- 1 采集基准图像，经过预处理（滤波、二值化）后记为 X_0
- 2 采集检测图像，经过预处理（滤波、二值化）后记为 X_i ($i=1, 2, \dots, k$ | k =需要检验的点数)
- 3 对分别经过预处理后的二值化图像进行逻辑运算 $\bar{X}_0 \bullet X_i = Y_i$
- 4 对 Y_i 进行细化
- 5 Hough 变换提取直线特征,记录直线特征值

4. 2 图像的预处理

在系统中对采集到的图像都先经过预处理，图像的包括：滤波和两值化。滤波为减小图像中的噪声。两值化后可以突出图像特征，为后续处理作好准备。

4. 2. 1 图像的滤波

图像在形成、传输、接受等过程中不可避免的存在着外部干扰和内部干扰，如光电转换中敏感元件灵敏度的不均匀性、数字化中的量化噪声等。噪声与要研究的对象不相关，它以无用的信息形式出现，扰乱图像的可观测信息。噪声可被译成或多或少的极值，这些极值通过加减作用于一些像素的真实灰度级上，在图像上造成黑白亮暗点干扰，极大降低了图像质量，影响图像复原、分割、特征提取、图像识别等后继工作的进行。因而对其抑制处理是图像处理中非常重要的一项工作^[34]。

图像滤波的方法有很多种，其滤波的效果也不一样，如：中值滤波、邻域平均滤波、多图像平均滤波^[35]等。两种常见的图像滤波的方法,邻域平均法和中值滤波法。

(1) 邻域平均滤波法

对一些图像进行线性滤波可以去除图像中某些类型的噪声，如采用邻域平均法的均值滤波器就非常适用于去除图像中的颗粒噪声。邻域平均法是空间域平滑噪声技术。对于给定的图像 $f(i,j)$ 中的每个像点 (m,n) , 取其邻域 S 。设 S 含有 M 个像素, 取其平均值作为处理后所得图像像点 (m,n) 处的灰度。用一像素邻域内各像素灰度平均值来代替该像素原来的灰度，即是邻域平均技术。邻域 S 的形状和大小根据图像特点确定, 一般取的形状是正方形, 矩形及十字形等, S 的形状和大小可以在全图处理过程中保持不变, 也可根据图像的局部统计特性而变化, 点 (m,n) 一般位于 S 的中心. 如 S 为 3×3 邻域, 点 (m,n) 位于 S 中心, 则:

$$\bar{f}(m, n) = \frac{1}{9} \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 (m+i, n+j) \quad (4-1)$$

假设噪声 n 是加性噪声,在空间各点互不相关,且期望为 0,方差为 σ^2 , g 是未受污染的图像,含有噪声的图像 f 经过邻域平均后为

$$\bar{f}(m, n) = \frac{1}{M} \sum f(i, j) = \frac{1}{M} g(i, j) + \frac{1}{M} \sum m(i, j) \quad (4-2)$$

由上式可知,经邻域平均后,噪声的均值不变。方差 $\frac{1}{M} \sigma^2$,即噪声方差变小,说明噪声强度减弱了,即抑制了噪声。由上式还可以看出,邻域平均法也平滑了图像信号,特别是可能使图像目标区域的边界变得模糊。可以证明,对图像进行邻域平均处理相当于图像信号通过一低通滤波器。

(2) 中值滤波法

中值滤波是抑制噪声的非线性处理方法。对于给定的 n 个数值 $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$,将它们按大小有序排列。当 n 为奇数时,位于中间位置的那个数值称为这 n 个数值中值。当 n 为偶数时,位于中间位置的两个数值的平均值称为这 n 个数值的中值,记作 $m(a_1, a_2, \dots, a_n)$ 。中值滤波就是这样的一个变换,图像中滤波后某像素的输出等于该像素邻域中各像素灰度的中值。中值滤波的一种简单实现:中值滤波是指在图像中以当前像素 $f(i, j)$ 为中心切出一个 $N \times M$ (例如 3×3) 像素组成的图像块,如上图像块所示的那样,设当前像素 $f(i, j)$ 的灰度值为 $g(i, j)$ 时,则 $g(i, j)$ 取 $N \times N$ 个像素灰度值中的中值。中值滤波的方法运算简单,易于实现,而且能较好地保护边界,但有时会。失掉图像中的细线和小块的目标区域。

(3) 两中滤波性能分析与比较^[35, 36]:

1 对白噪声的处理能力

便于分析,假设图像 $\{x_{ij}\}$ 由一固定亮度 H 与一独立同分布的白噪声 $\{n_{ij}\}$ 组成:

$$\begin{aligned} x_{ij} &= H + n_{ij} \\ n_{ij} &\sim N(0, \sigma_x^2) \end{aligned}$$

显然

$$x_0 \sim N(H, \sigma_x^2) \quad (4-3)$$

设 x_{ij} 的概率密度为 $f(x)$ (同 x_{ij} 同分布省去下标), 分布函数为:

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx \quad (4-4)$$

若中值滤波器 W 大小为 n (n 为奇数), 经中值滤波输出为:

$$y_l = \text{Median}[x_{kl}] \quad (k, l) \in W(i, j) \quad (4-5)$$

其分布函数为:

$$F_m(x) = \sum_{k=m}^n \binom{n}{k} F^k(x) (1 - F(x))^{n-k} \quad (4-6)$$

其中 $m=(n+1)/2$ 利用分布积分法可推导出:

$$F_m(x) = \frac{n!}{(m-1)!(n-m)!} \int_0^{F(x)} t^{m-1} (1-t)^{n-m} dt \quad (4-7)$$

因此, 输出中值的概率密度为:

$$f_m(x) = \frac{n!}{(m-1)!(n-m)!} F^{m-1}(x) (1-F(x))^{n-m} f(x) \quad (4-8)$$

当窗口很大时, 可推导其极限分布:

$$f_m(x) \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} e^{-\frac{(x-x_m)^2}{\sigma_y^2}} \quad (4-9)$$

式中 x_m 为理论中值, 由 $F(x_m)=0.5$ 确定, σ_y^2 为方差:

$$\sigma_y^2 = 1/(4nf^2(x_m)) \quad (4-10)$$

对于白噪声情况, 由式得:

$$x_m = H, \quad f(x_m) = 1/\sqrt{2\pi}\sigma_x \quad (4-11)$$

$$\sigma_y^2 = \pi\sigma_x^2/2n \quad (4-12)$$

而当采用邻域平均法滤波输出时, 方差为:

$$\sigma_{Ay}^2 = \sigma_x^2/n \quad (4-13)$$

则:

$$\sigma_y^2/\sigma_{Ay}^2 = \pi/2 = 1.57 \quad (4-14)$$

可以看出: 在白噪声的影响下, 中值滤波与邻域平均法一样能有效去除噪声, 但中值滤波输出方差比邻域平均法输出方差大 57%, 若要使中值滤波达到与同样的效果, 其处理窗口应增加 57%。

2 对脉冲噪声的处理能力

脉冲噪声是指信号受到非常大且短暂的尖峰干扰。假设图像由一正常值 s_{ij} 与固定干扰 d 组成, 固定干扰出现的频率为 p , 且与图像灰度及其他像素点上的干扰无关, 即:

$$x_{ij} = \begin{cases} s_{ij} & \text{以概率 } 1-p \\ d & \text{以概率 } p \end{cases} \quad (4-15)$$

设窗口大小为 n , 窗口内干扰像

素为 n_0 则:

$$y_{ij} = \text{Median}[x_{ij}] = \begin{cases} s_{ij} & \text{当 } n_0 \leq (n-1)/2 \\ d & \text{当 } n_0 > (n-1)/2 \end{cases} \quad (4-16)$$

显然输出中出现干扰点的数目服从二项分布, 输出为抑制干扰的概率为:

$$P(n, p) = \sum_{k=0}^{\frac{n-1}{2}} p_k (1-p)^{n-k} \quad (4-17)$$

输出为不干扰的概率为:

$$Q(n, p) = 1 - P(n, p) = \sum_{k=\frac{n+1}{2}}^n p^k (1-p)^{n-k} \quad (4-18)$$

3 保持边缘的性质

当窗口 W 绕中心对称且包含中心点时,中值滤波器具有保护图像边缘的能力.如图 4-2 图像边缘一侧具有公共值 a , 另一侧具有公共值 b .当用 3×3 中值滤波器作用时,窗口中心输出仍为 b , 而用邻域平均法作用时,窗口中心输出为 $(3a+6b)/9$, 显然造成边缘模糊^[31]。

a	a	a	a	a	b
a	a	a	a	b	b
a	a	a	b	b	b
a	a	b	b	b	b
a	b	b	b	b	b
b	b	b	b	b	b

图 4-2 图像边缘示意

综合考虑两种滤波方法,由于本系统需要得到的是图像中指针的指示值.在后续图像处理中(图像的细化)是建立在较好的边缘基础上的.所以本系统采用 3×3 中值滤波。

4. 2. 2 图像的二值化

图像二值化的目的是将图像一分为二,即将图像划分为物体和背景两个部分。二值化是预处理中最关键的步骤,二值化结果的好坏决定了后续图像识别结果的好坏,从而决定了指针指示值度数的准确性。利用图像的灰度直方图以确定相应的分割阈值是实现图像二值化的一个方法^[36]。考虑到采集到的表盘图像中的每一个区域都是由许多灰度级相似的像素所组成的,而指针和表盘盘面以及刻度等其灰度级则存在明显的差别。此时,采用借助图像的灰度直方图选取灰度阈值,即可得到较好的二值化图像。数字图像的直方图就是具有某一个灰度级的点或者像素的个数。

一、灰度直方图的定义^[34]:

灰度直方图是灰度级的函数,描述的是图像中该灰度级的像素的个数。即:横坐标表示灰度级,纵坐标表示图像中该灰度级出现的个数。公式:

$$p_r(r_k) = \frac{n_k}{n} \quad (4-19)$$

n_k : 图像中出现 r_k 级灰度的像素数; n : 图像像素总数

$$0 \leq r_k \leq l-1 \quad k = 0, 1, 2, \dots, l-1$$

图 4-1 直方图如图 4-3 所示

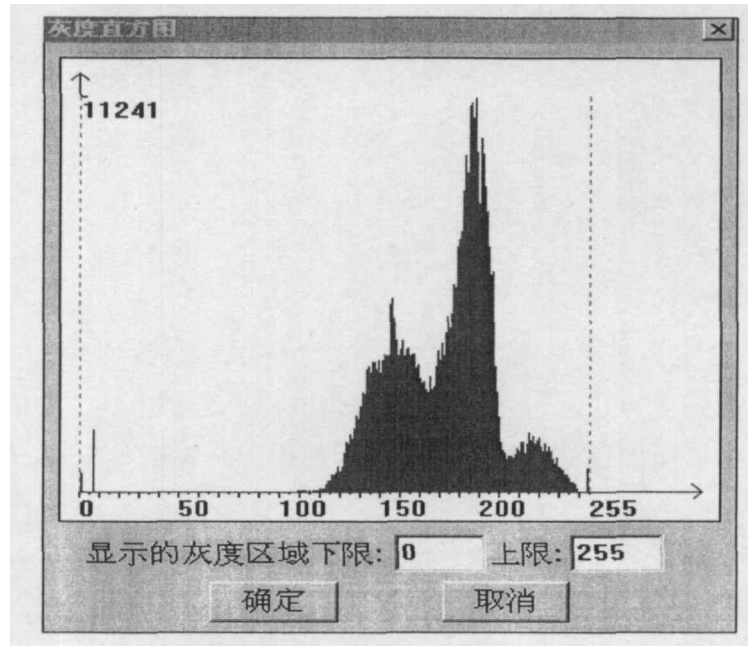


图 4-3 图 4-1 的直方图

二值化阈值的取法很多,如:极小值点阈值、最优阈值、迭代阈值等。系统采用“组内方差最小化方法”,由 Otsu 于 1979 年提出。它的思路是,最好的阈值应该使得被阈值分开的两组的方差的加权和达到最小,其中某组的加权系数就是该组的概率(其实就是该组像素数目占总像素数目的比例)。算法:

设图像灰度级 $1 \sim M$, 第 i 级像素 n_i 个,总像素 $N = \sum_{i=1}^M n_i$, 则第 i 级灰度出现的概率为 $P_i = n_i / N$ 。 (4-20)

设灰度门限值为 k , 则图像像素按灰度级被分为两类:

$$C_0 = \{1, 2, \dots, k\}, C_1 = \{k+1, \dots, M\} \quad (4-21)$$

图像总平均灰度级: $\mu = \sum_{i=1}^M i \cdot P_i$ (4-22)

C_0 类的平均灰度级为: $\mu(k) = \sum_{i=1}^k i \cdot P_i$, 像素数为: $N_0 = \sum_{i=1}^k n_i$

C_1 类的平均灰度级为: $\mu - \mu(k)$, 像素数为: $N - N_0$

两部分图像所占比例分别为:

$$w_0 = \sum_{i=1}^k P_i = w(k) \quad w_1 = 1 - w(k) \quad (4-23)$$

对 C_0 , C_1 均值作处理:

$$\mu_0 = \mu(k) / w(k) \quad \mu_1 = [\mu - \mu(k)] / [1 - w(k)] \quad (4-24)$$

图像总均值可化为: $\mu = w_0 \mu_0 + w_1 \mu_1$ (4-25)

类间方差: $\sigma^2(k) = w_0(\mu - \mu_0)^2 + w_1(\mu - \mu_1)^2 = w_0w_1(\mu_0 - \mu_1)^2$ (4-26)

化为: $\sigma^2(k) = [\mu \cdot w(k) - \mu(k)]^2 / \{w(k) \cdot [1 - w(k)]\}$ (4-27)

k 从 1~ M 变化, 使 $\sigma^2(k)$ 最大的 k^* 即为所求之最佳门限。

$\sigma^2(k)$ 称为目标选择函数。

图 4-1 图像经过滤波, 二值化后, 如图 4-4 所示:

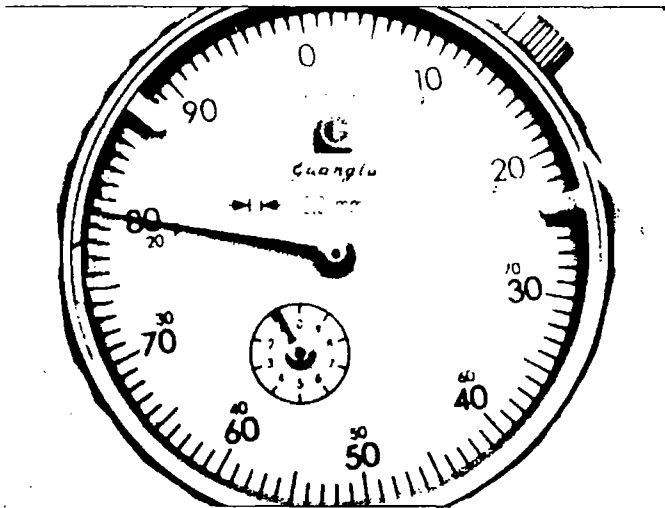


图 4-4 预处理后图像

4. 3 图像的逻辑处理

对分别经过预处理(滤波、二值化)后的基准图像图和检测图像图进行逻辑运算。图 4-5 所示设为检测图像。

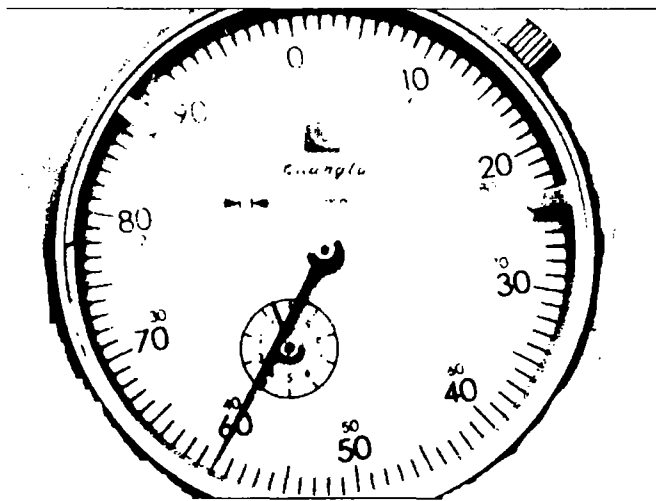


图 4-5 待检测图像

设 4-4 为预处理后的基准图像, 经过系统采用的逻辑运算后^[40], 图像如图 4-6 所示



图 4-6 逻辑运算后的图像

4. 4 图像的细化处理

细化处理是指在不影响图像连通性的基础上，删除图像的边缘像素，直到纹线为单像素宽为止。理想细化后的纹线骨架应该是原始纹线的中间位置，并保持图像的连接性、拓扑结构和细节特征。细化的方法很多^[41, 42]，在设计细化方法的时候都是建立在如下的一些判据基础上：(1) 内部点不能删除；(2) 孤立点不能删除；(3) 直线端点不能删除；(4) 如果 P 是边界点，去掉 P 后，如果连通分量不增加，则 P 可以删除^[31]。系统采用了如下快速细化方法：事先做出一张表，从 0 到 255 共有 256 个元素，每个元素要么是 0，要么是 1。我们根据某点(要处理的黑色点)的八个相邻点的情况查表，若表中的元素是 1，则表示该点可删，否则保留。查表的方法是，设白点为 1，黑点为 0；左上方点对应一个 8 位数的第一位(最低位)，正上方点对应第二位，右上方点对应的第三位，左邻点对应第四位，右邻点对应第五位，左下方点对应第六位，正下方点对应第七位，右下方点对应的第八位，按这样组成的 8 位数去查表。

```
static int erasetable[256]={
    0,0,1,1,0,0,1,1,    1,1,0,1,1,1,0,1,
    1,1,0,0,1,1,1,1,    0,0,0,0,0,0,0,1,
    0,0,1,1,0,0,1,1,    1,1,0,1,1,1,0,1,
    1,1,0,0,1,1,1,1,    0,0,0,0,0,0,0,1,
    1,1,0,0,1,1,0,0,    0,0,0,0,0,0,0,0,
    0,0,0,0,0,0,0,0,    0,0,0,0,0,0,0,0,
    1,1,0,0,1,1,0,0,    1,1,0,1,1,1,0,1,
    0,0,0,0,0,0,0,0,    0,0,0,0,0,0,0,0,
    0,0,1,1,0,0,1,1,    1,1,0,1,1,1,0,1,
    1,1,0,0,1,1,1,1,    0,0,0,0,0,0,0,1,
    0,0,1,1,0,0,1,1,    1,1,0,1,1,1,0,1,
    1,1,0,0,1,1,1,1,    0,0,0,0,0,0,0,0,
    1,1,0,0,1,1,0,0,    0,0,0,0,0,0,0,0,
    1,1,0,0,1,1,1,1,    0,0,0,0,0,0,0,0,
    1,1,0,0,1,1,0,0,    1,1,0,1,1,1,0,0,
    1,1,0,0,1,1,1,0,    1,1,0,0,1,0,0,0
```

};

查表方法：先是水平方向扫描)第一行最左边的点；第一行最右边的点；第二行最左边的点；第二行最右边的点；.....最后一行最左边的点；最后一行最右边的点；(然后是垂直方向扫描)第二列最上边的点(因为第一列最上边的点已被删除)；第二列最下边的点；第三列最上边的点；第三列最下边的点；.....倒数第二列最上边的点(因为倒数第一列最上边的点已被删除)；倒数第二列最下边的点。全部扫描结束，如果这次扫描没有一个点被删除，则循环结束，剩下的点就是骨架点，如果有点被删除，则进行新一轮扫描，如此反复，直到没有点被删除为止。

4. 5 直线提取

二值化图像直线提取的方法一般采用霍夫（Hough）变化^[30, 38]。霍夫变换可以检测较好的检测直线形状的目标，而且受噪声和曲线间断的影响小。采用霍夫(Hough)变换，在二值化图像中检测直线，确定其参数的方法如下：

4. 5. 1 霍夫变换的基本原理

霍夫变换的基本思想是利用点---线的对偶性。如图 4-7 所示：

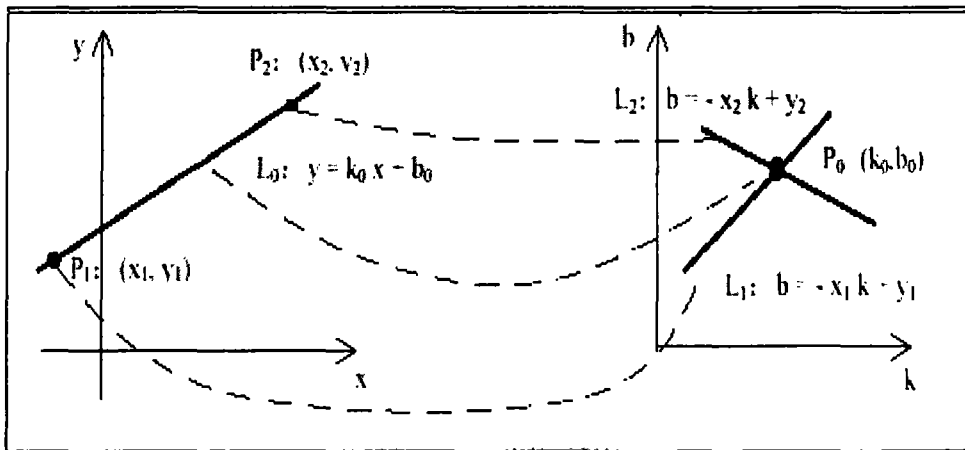


图 4—7 点线对偶关系

从图 4-7 中可看出，x-y 坐标和 k-b 坐标有点---线的对偶性。x-y 坐标中的点 P_1 、 P_2 对应于 k-b 坐标中的 L_1 、 L_2 ；而 k-b 坐标中的点 P_0 对应于 x-y 坐标中的线 L_0 。

由于 x-y 坐标中的垂直线的 k 值为无穷大，给计算带来不便，故使用点---正弦曲线对偶变换解决这一问题。直角坐标 X-Y 中的一点(x,y)，经过点---正弦曲线对偶变换：

$$\rho = x \cos(\alpha) + y \sin(\alpha) \quad (4-28)$$

在极坐标 α - ρ 中变为一条正弦曲线， α 取 $(0^\circ - 180^\circ)$ 。可以证明，直角坐标 X-Y 中直线上的点经过 Hough 变换后，它们的正弦曲线在极坐标 α - ρ 有一个公共交点，也就是说，极坐标 α - ρ 上的一点 (α, ρ) ，对应于直角坐标 X-Y 中的一条直线。而且它们是一一对应的。为了检测出直角坐标 X-Y 中由点所构成的直线，可以将极坐标 α - ρ 量化成许多小格。根

据直角坐标中每个点的坐标 (x,y) , 在 $\alpha=0^\circ-180^\circ$ 内以小格的步长计算各个 ρ 值, 所得值落在某个小格内, 便使该小格的累加计数器加1。当直角坐标中全部的点都变换后, 对小格进行检验, 计数值最大的小格, 其 (α, ρ) 值对应与直角坐标中所求直线^[40]。

2 直角坐标上的一直线经过 Hough 变换后对应于极坐标上的一点

设直角坐标 X-Y 中一直线的直线方程为: $y=kx+b$, 斜率为 k 、截距为 b , 在其上有两点 (x_1,y_1) 、 (x_2,y_2) 。证这两点经过 Hough 变换后, 所得正弦曲线交于一点, 该点只与 k 、 b 有关。

$$\text{即, 由方程组: } \begin{cases} \rho = x_1 \cos(\alpha) + y_1 \sin(\alpha) \\ \rho = x_2 \cos(\alpha) + y_2 \sin(\alpha) \end{cases} \quad (4-29)$$

求: α, ρ ,

由(4-27)方程组可得:

$$x_1 + y_1 \operatorname{tg}(\alpha) = x_2 + y_2 \operatorname{tg}(\alpha) \quad (4-30)$$

$$\operatorname{tg}(\alpha) = -(x_2 - x_1)/(y_2 - y_1) = -1/k \quad (4-31)$$

$$\text{即} \quad k = -\operatorname{ctg}(\alpha) \quad (4-32)$$

$$\text{由} \quad \rho = x_1 \cos(\alpha) + y_1 \sin(\alpha) \quad (4-33)$$

将 $y_1 = k * x_1 + b$ 代入 (4-29) 式得:

$$\rho = x_1 \cos(\alpha) + (k * x_1 + b) \sin(\alpha) \quad (4-34)$$

将 (4-28) 式代入上式, 得:

$$\rho = b \sin(\alpha) = b \sin(\operatorname{arctg}(-1/k)) \quad (4-35)$$

故方程组的解为:

$$\begin{cases} \alpha = \operatorname{arctg}(-1/k) \\ \rho = b \sin(\operatorname{arctg}(-1/k)) \end{cases} \quad (4-36)$$

显然, 正弦曲线交点 (α, ρ) 只与 k 、 b 有关。反之, 已知点 (α, ρ) , 可确定直线参数 k 、 b 。

$$\text{当} \alpha \neq 0 \text{ 时, } k = -\operatorname{ctg}(\alpha) \quad b = \rho / \sin(\alpha); \quad (4-37)$$

$$\text{当} \alpha = 0 \text{ 时, } k = +\infty, \text{ 直线为垂直线。} x = \rho \quad (4-38)$$

4. 5. 2 极坐标 ρ 的范围

检测的图像在第一象限, 右上角坐标为 (m,n) 。我们对 $\rho = x \cos(\alpha) + y \sin(\alpha)$ 求导, 得^[41,42]:

$$\rho' = -x \sin(\alpha) + y \cos(\alpha) \quad (4-39)$$

若 $\rho' = 0$

则 $\operatorname{tg}(\alpha) = y/x$

即 $\alpha = \operatorname{arctg}(n/m)$ 时, 有极大值 ρ_{\max} 。

$$\rho_{\max} = m \cos(\alpha) + n \sin(\alpha) \quad (4-40)$$

$$\rho_{\max} = \sqrt{m^2 + n^2} \quad (4-41)$$

4. 5. 3 系统采用的具体算法

因为 ρ 的分辨率为一个像素。所以, 直线位置精度的关键在于 α 的分辨率。系统中 α 的分辨率为 0.1° , 因为采用的 CCD 摄像头对指针角度分辨率为 $\tan^{-1}1/(0.5 \times 582) = 0.2^\circ$ 。霍夫变换直线提取角度分辨率高于摄像头对指针角度分辨率。

2) 提高检测速度的算法^[43]

在为了提高计算精度, 又节约时间, 采取两次检测法。第一次全局检测, α 的分辨率为 1 度、 ρ 的分辨率为一个像素, 找到一条直线, 得其参数 k 、 b ; 第二次在此直线的邻域进行检测, α 的分辨率为 0.1 度。再次求其 k 、 b 。第二次局部检测在第一直线的邻域进行检测。分两种情况:

a. 直线倾向于 x 轴 $k \leq 1$, 由 x 计算 y

即根据第一次计算出的 k 、 b , 在

$$\begin{cases} y_1 = kx + b - 10 \\ y_2 = kx + b + 10 \end{cases} \quad (4-42)$$

这两条线内进行检测。

b. 直线倾向于 y 轴 $k > 1$, 由 y 计算 x

限定检测区域的两直线为:

$$\begin{cases} x_1 = (y - b) / k - 10 \\ x_2 = (y - b) / k + 10 \end{cases} \quad (4-43)$$

如果是垂直线, 即: $x = \rho_1$, 则两直线为:

$$\begin{cases} x_1 = \rho_1 - 10 \\ x_2 = \rho_1 + 10 \end{cases} \quad (4-44)$$

此时 α 的域值为 $(\alpha_1 - 9, \alpha_1 + 9)$; α_1 为第一次检测到的角度值, α 分辨率为 0.1 度。

3) 提取直线特征为提高精度, 采用三条直线拟合的方法

直线提取算法部分程序:

```
long m_radius_max=0; //ρ
m_radius_max=(long)sqrt((long)(Height*Height+
Width*Width)); //ρ 的最大值
long *lpRadiusAngelArray;
```

```
lpRadiusAngelArray=new long [m_radius_max*180];
memset(lpRadiusAngelArray,0,m_radius_max*180);//内存空间初始化
```

.....

//纵坐标判断象限

```
if (pos_ordinate>neg_ordinate)// pos_ordinate 正向坐标数    neg_ordinate 负向坐标数
{
    m_maxline_angel=m_maxline_angel+180;//角度加 180
}

if( pos_ordinate<neg_ordinate)
{
    m_maxline_angel=m_maxline_angel;
}
```

小结

本章中对系统采用的图像处理方法的选择上进行了详细说明。在一个视觉测量系统中，硬件确定后，图像处理的方法的选用是重点。图像处理方法的好坏直接影响测量的精度和测量速度。在本章图像处理方法的选用上已经考虑到应用好的算法提高系统测量的速度和精度，例如采用快速细化，和在直线提取的时候采用先全局检测后局部检测的方法。图像处理整个运行速度在 350ms 内。满足系统时序匹配。在下面章节中，对系统运行检测说明采用本系统图像处理方法系统能够达到较好的精度。

第五章 图像采集处理部分检验及误差分析

5. 1 实验检验

系统完成设计后,必须对系统进行检验。检验的最好的方法是对精确指针位置的量表图像进行检测,量表指针的精确定位可以通过激光等仪器获得。我们采用直接利用表盘上的刻度的方法,获得较精确的指针位置。调节指针使指针在刻度线上。运行系统,采集图像进行指针角度判别。两个刻度相对应的角度差作为检验的真值。如图 4-1 和图 5-1 所示作为一组指针图像,两指针真实角度我们认为是 72° 。

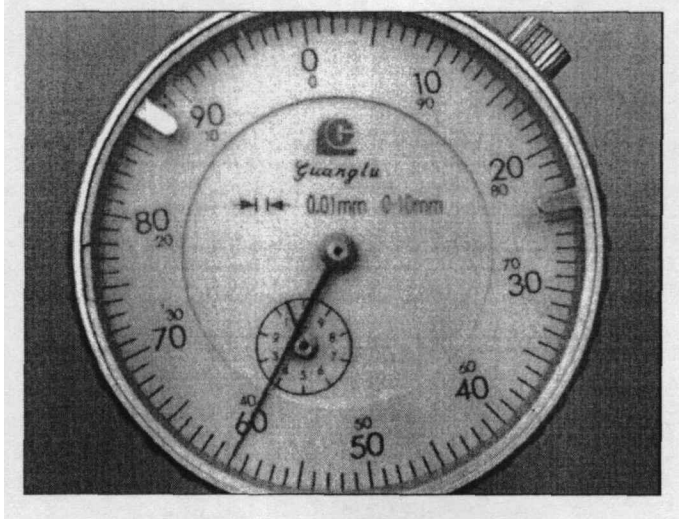


图 5-1 采集到的图像 2

共取 10 组图像,每组图像采集,测量五次,记录数据,见表 5-1。表中列出了量表指针 5 组图像指针相对角度的测量数据,每个点给出了 5 次测量数据的平均值、最大值和最小值。平均值作为实际测量值,它和理论值之差作为绝对误差。而各点最大值和最小值之差作为测量值最大随机误差即重复误差。

表 5-1 实测数据

图像 序列 (组)	真值	检 验 获 得 值				
		1	2	3	4	5
1	7.2	7.283	7.096	7.104	7.241	7.163
2	25.2	25.194	25.159	25.221	25.291	25.093
3	39.6	39.524	39.624	39.527	39.558	39.651
4	90	90.042	89.959	90.021	89.989	90.001
5	108	108.071	107.963	107.959	108.072	108.1
6	154.8	154.706	154.882	154.729	154.731	154.863
7	169.2	169.109	169.281	169.158	169.263	169.143
8	183.6	183.523	183.689	183.703	183.601	183.558
9	255.6	255.559	255.681	255.613	255.609	255.616
10	316.8	316.873	316.779	316.831	316.763	316.837

表 5-2 测量误差值

图像 序列 (组)	真值(°)	平均值(°)	最大值(°)	最小值(°)	绝对误差(°)	重复误差(°)
1	7.2	7.1774	7.283	7.096	-0.0226	0.187
2	25.2	25.1916	25.291	25.093	-0.0084	0.198
3	39.6	39.5768	39.651	39.524	-0.0232	0.127
4	90	90.0024	90.042	89.959	0.0024	0.083
5	108	108.033	108.1	107.959	0.033	0.141
6	154.8	154.7822	154.882	154.706	-0.0178	0.176
7	169.2	169.1908	169.281	169.109	-0.0092	0.172
8	183.6	183.6148	183.703	183.523	0.0148	0.18
9	255.6	255.6156	255.681	255.559	0.0156	0.122
10	316.8	316.8166	316.873	316.763	0.0166	0.11

最大重复误差为 0.198°,最大绝对误差 0.033°,将最大误差综合,测量误差为 0.231°。分辨率接近一个像素。系统采用的硬件结构和图像处理方法是合适的。

5. 2 图像采集处理部分误差分析

从根本上来说,对目标特征的测量是要从数字化的数据中精确地估计出产生这些数据模拟量的性质。因为这是一个估计过程,所以误差是不可避免的。另外在这个过程中还有许多影响因素。我们需要研究导致误差产生的原因并设法减小各种因素的影响。

图像是客观世界的映射,但在数字图像的分析中,由于各种因素的作用和影响,原始的和连续的信息有所损失,只留下它们的一个离散近似。视觉测量系统测量误差首先

是因为像素的限制。另外在本系统中，从图像的采集和整个图像处理和分析过程中，对测量精度产生的原因有（图 5-2）。

- 1 图像采集过程（从连续到离散）的影响，又可分为空间采样和灰度量化的影响，仪器的影响。
- 2 目标分割（二值化，逻辑），信息的丢失的影响
- 3 目标特征值提取（直线参数提取）精度的影响
- 4 图像采集和处理过程中噪声等干扰的影响

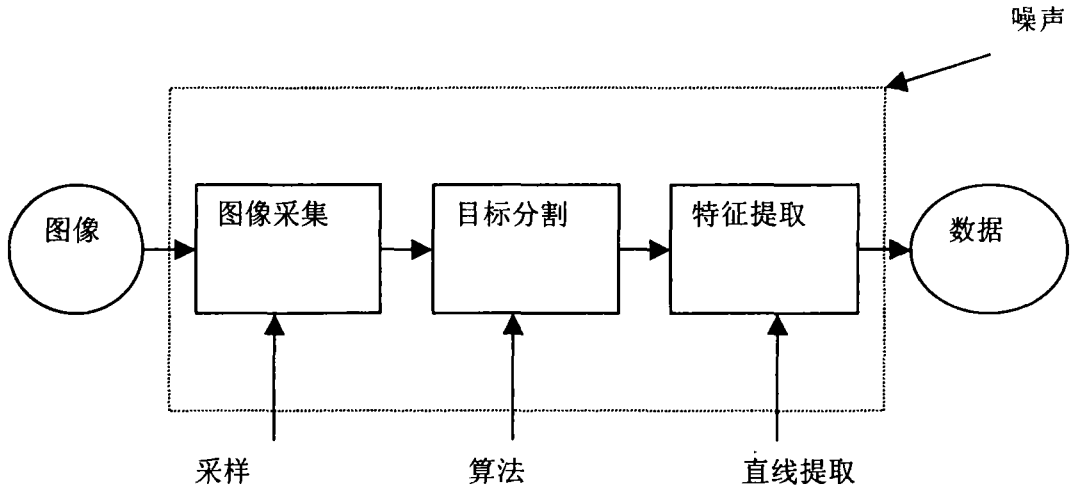


图 5-2 系统若干影响测量精度的因素

下面对误差产生的这些原因具体分析

（1）采样的影响

采样定理指出：对一个有限带宽的信号，如果利用 2 倍其最高频率的频率间隔对其采样就可以从采样中恢复出原信号。但这在图像处理中只适用于诸如滤波和重建等图像处理过程，如果要从图像分析中得到某些数据信息，仅仅采用满足采样定理的图像采样频率是不够的。从根本上说，这时并不能只从采样定理出发来选取采样率。

这里为讨论方便，借助 1-D 函数，但讨论结果可方便地推广到高维。如果 1 个信号 $f(x)$ 中的最高频率分量为 ω_0 (如果 $f(x)$ 具有傅立叶频谱 $F(\omega)$ ，则对所有 $|\omega| > \omega_0$ ，有 $F(\omega)=0$ ，那么根据采样定理，要从采样完全恢复信号，则采样频率 ω_s 必须满足 $\omega_s > \omega_0$ 。采样过程的数学模型可用下式来表示

$$f(x) = f(x) \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \delta(x - nx_s) = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} f(nx_s) \delta(x - nx_s)$$

(5-3)

根据上式，采样集合可表示为 $\{f_n\} = \{f(nx_s) | n = -\infty, \dots, -1, 0, 1, \dots, +\infty\}$ 可见根据采样定理，为完全表示 1 个带限信号 $f(x)$ ，需要无穷个采样。如果把这个信号限制在某个有限区间 $[x_1,$

$x_2]$, 那么上式中的无穷求和可转化为对有限 N 个采样的求和($N \approx (x_2 - x_1)/x_s$)。但是信号这时却不是带限的, 采样定理不能应用。根据以上讨论可知, 对任 1 个信号 $f(x)$ 和与其对应的傅里叶频谱 $F(\omega)$, 或者是信号在空域有限, 或者是频谱在频域有限, 但不能同时有限。带宽在光学镜头和摄像机采集图像的过程中信号的变化:

1* 进入光学镜头的连续信号是没有带限的(无穷带宽), 这点可由能从信号中观察到任意微小的细节来证明。

2* 由光学镜头出来的信号是有带限的, 光学传输函数限制了输出图像的频谱, 这个频谱的宽度就是镜头系统的带宽。

3* 图像采集时将以上带限信号在有限面积(摄像机光电感受面)上成像, 所以只有其中一部分信号被利用, 由摄像机出来的信号不再是带限的了。

4* 对所获得的图像进行采样, 并把所得结果存入计算机内的储存器, 这里只用了有限个数字来表示图像, 所以即使摄像机具有面积为无穷的光电感受面, 用来表示图像的数据量仍是有限的, 混迭效应总是不可避免的。

从以上过程和讨论可知, 由于摄像机的孔径是有限的, 且计算机只采用有限的数据量, 在实际中我们并不能如在理想情况那样正常地应用采样定理^[45]。

(2) CCD 像元光电响应不均匀性及非线性形的影响

CCD 应该满足下面的关系

$$V(x, y) = K[x, yE(x, y)]E(x, y) \quad (5-4)$$

式中: $V(x, y)$ 是面阵 CCD 的 (x, y) 像元输出的电压; $E(x, y)$ 是面阵 CCD 的 (x, y) 像元的曝光量; $K[x, y, E(x, y)]$ 是与位置 (x, y) 和曝光量 $E(x, y)$ 有关的比例系数。使用的 CCD 器件并不是理想元件, CCD 中每个像元对光进行反应的灵敏度是不一样的。而我们在测量假设 CCD 器件是理想的, 因此带来误差。

(3) 处理电路带来的误差

CCD 摄像头对图像进行抓取实际就是对图像进行采样的过程, 自然数据采集部分误差的来源有量化误差和截断误差。

(4) 指针图像分割中产生的误差

本系统中指针图像分割包括图像二值化、逻辑产生的误差。在计算机采集到 CCD 摄像头图像后进行图像处理。系统中图形处理的目的是对指针角度的精确判断。系统中对指针角度判断采用前后两幅图像二值化后逻辑的方法。对指针角度的判别要经过预处理、二值化、前后两副图像逻辑处理。这些过程中不可避免的出现信息丢失, 且在表盘上还有较为复杂的背景图像。这些对指针角度判别都产生误差。从图像中就可以看出明显的信息丢失。如图 4-4 所示。

(5) 特征提取中精度的影响, 系统提取直线时候, 精度为 0.1° 。这主要是受 CCD 像素大小的限制。

(6) 噪声的影响, 噪声产生的原因有电源、空气扰动、光源, 环境震动等等。

小结

本章介绍了本系统的检验精度的方法，检验结果显示系统测量误差为接近一个像素分辨率。从资料来看利用 CCD 摄像头检测分辨率一般能达到能够达到一个像素。影响本系统没有达到一个像素精度主要原因由于背景复杂，图像处理过程较多。提高视觉测量系统测量精度主要方法是提高 CCD 摄像头的分辨率和更好的图像处理方法的运用。

第六章 图像边缘检测技术的研究

我们知道数字图像处理有很多种方法。在设计视觉测量系统时，必须根据不同的测量目的选择合适的数字图像处理方法，提取需要的信息。不同的图像处理方法或同一方法中的参数选取不同时都会导致处理结果的变化。变化直接影响各个特征量的测量结果。所以说一个测量系统中图像处理方法的选择直接关系到系统测量效果。在上一章中，我们分析了本系统误差产生的原因。在这些原因中图像处理方法和 CCD 摄像头像素的限制是产生误差的重要因素。在本章中，将研究利用更好的图像处理方法提高测量精度。

6.1 边缘检测

图像的边缘对图像的识别和计算机分析十分有用^[43,44]。在前面系统图像处理方法中虽然没有直接用到图像的边缘，但实际上细化是建立在二值化图像边缘基础上的。在系统中图像的二值化的阈值的确定虽然是建立在组内方差最小化方法上。其获得的边缘是很不精确的。

边缘检测在图像识别中有很多应用^[46,47]，边缘检测的方法也有很多，主要有 Sobel 算法、Roberts 算法、Prewitt 算法等。在这些算法中，首先求出原始图像的横向和纵向梯度图像，然后根据这两个梯度图像得到梯度的模值和幅角值，最后沿幅角方向求模极大值，这样就可以检测到图像的边缘。连续图像 $f(x,y)$ ，其方向导数在边缘（法线）方向上有局部最大值。

边缘检测：求 $f(x,y)$ 梯度的局部最大值和方向

$f(x,y)$ 在 θ 方向沿 r 的梯度

$$\frac{\partial f}{\partial r} = \frac{\partial f}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial r} + \frac{\partial f}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial r} = f_x \cos \theta + f_y \sin \theta \quad (6-1)$$

$$\frac{\partial f}{\partial r} \text{ 的最大值条件是 } \frac{\partial \left(\frac{\partial f}{\partial r} \right)}{\partial \theta} = 0 \quad (6-2)$$

$$f_x \sin \theta_g + f_y \cos \theta_g = 0 \quad (6-3)$$

$$\theta_g = \tan^{-1} \frac{f_y}{f_x}, \text{ or } \theta_g + \pi \quad (6-4)$$

$$\text{梯度最大值 } g = \left(\frac{\partial f}{\partial r} \right)_{\max} = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \quad (6-5)$$

$$\text{或 } g = |f_x| + |f_y| \quad (6-6)$$

梯度算子

图像 $U(m,n)$ 在两个正交方向上的梯度 $g_1(m,n)$ 和 $g_2(m,n)$

$$g_1(m,n) = U(m,n) * H_1(m,n) \quad (6-7)$$

$$g_2(m,n)=U(m,n)*H_2(m,n)$$

表 6-1 常用边缘检测算子

算子名	H_1	H_2	特点
Roberts	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$	· 边缘定位准 · 对噪声敏感
Prewitt	$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	· 平均、微分 · 对噪声有抑制作用
Sobel	$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$	· 加权平均 · 边宽 ≥ 2 像素
Isotropic Sobel	$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -\sqrt{2} & 0 & \sqrt{2} \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & -\sqrt{2} & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & \sqrt{2} & 1 \end{bmatrix}$	· 权值反比于邻点与中心点的距离 · 检测沿不同方向边缘时梯度幅度一致

各向同性（isotropic）微分算子

坐标系统旋转 (x,y) ——未旋转, (x',y') ——旋转后

$$x = x' \cos \theta - y' \sin \theta, \quad y = x' \sin \theta - y' \cos \theta \tag{6-8}$$

$$\frac{\partial f}{\partial x'} = \frac{\partial f}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial x'} + \frac{\partial f}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial x'} = \frac{\partial f}{\partial x} \cos \theta + \frac{\partial f}{\partial y} \sin \theta \tag{6-9}$$

$$\frac{\partial f}{\partial y'} = \frac{\partial f}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial y'} + \frac{\partial f}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial y'} = -\frac{\partial f}{\partial x} \sin \theta + \frac{\partial f}{\partial y} \cos \theta \tag{6-10}$$

$\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}$ 不是各向同性的, 但它们的平方和各向同性。

即
$$\left(\frac{\partial f}{\partial x'}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y'}\right)^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \tag{6-11}$$

定义 Laplacian 算子,
$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \tag{6-12}$$

可以证明 ∇^2 是各向同性的, 即

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y'^2} = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \tag{6-13}$$

$$\nabla^2 f(x,y) = [f(i+1,j) + f(i-1,j) + f(i,j+1) + f(i,j-1) - 4f(i,j)] \tag{6-14}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -2 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{6-15}$$

$$\nabla^2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{6-16}$$

$\nabla^2 f$ 算子对角，线和孤立点反映更强烈



为抑制噪声，可先平均然后微分，可采用

$$\frac{1}{4} \begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ -1 & -1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}$$
$$\frac{1}{3} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \text{ 或 } \frac{1}{4} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

LOG(Laplacian of Gaussian)算子

$$f(x,y) = \nabla^2 [G(r) * I(x,y)] = \nabla^2 [G] * I(x,y) \tag{6-17}$$

其中 $I(x,y)$ —— 图像

$$G(r) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), \quad r = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{6-18}$$

$$\nabla^2 G(r) = -\frac{1}{\pi\sigma^2} \exp\left(1 - \frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \tag{6-19}$$

边缘点—— $f(x,y)$ 中的过零点

对图 4-1 采用不同边缘检测方法图:

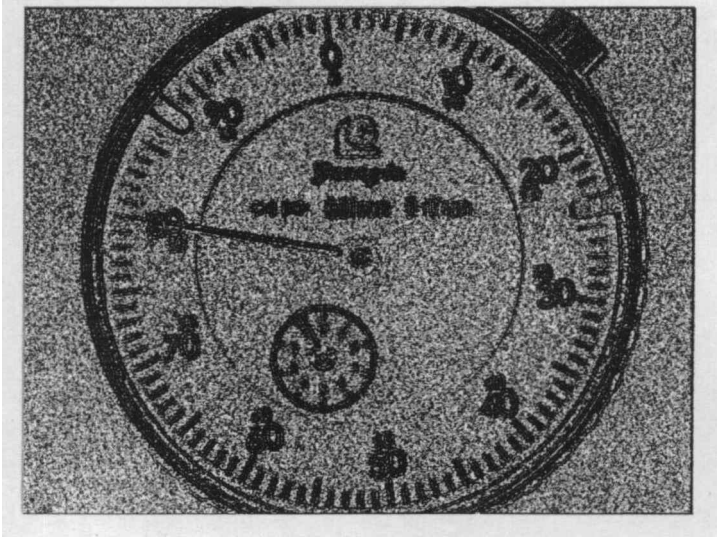


图 6-1 采用 gauss-laplace 算子边缘检测

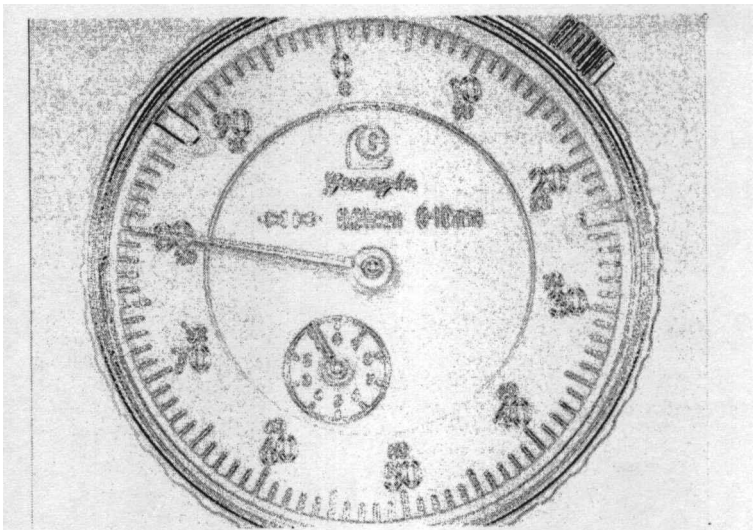


图 6-2 采用 sobel 算子边缘检测

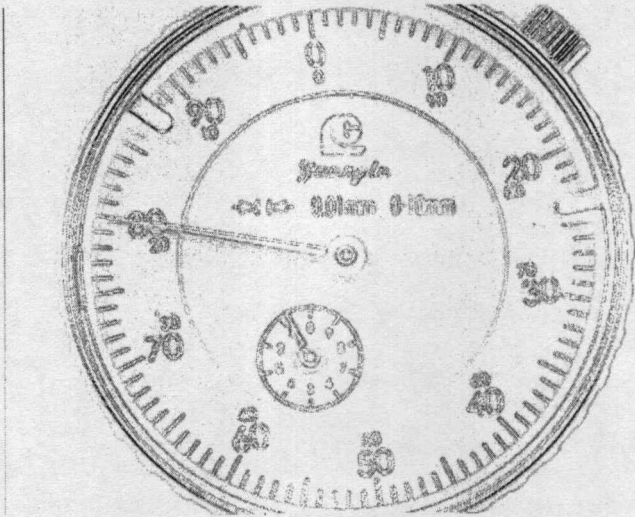


图 6-3 采用 prewitt 算子边缘检测

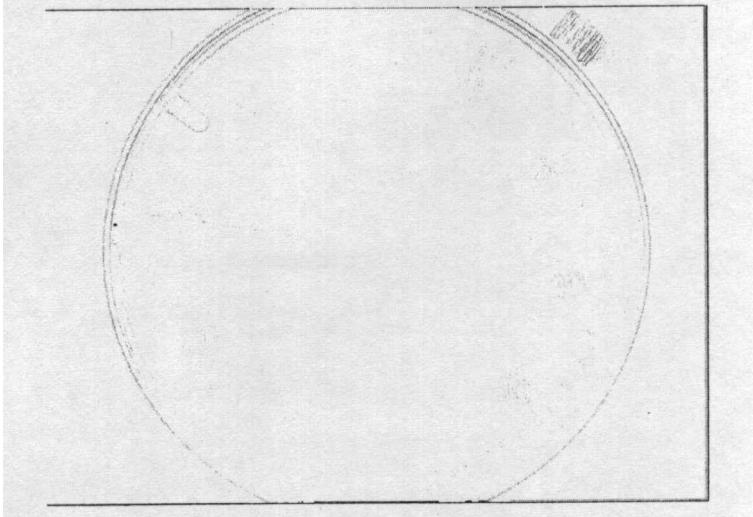


图 6-4 采用 robel 算子边缘检测

从检测图来看，prewitt 算子和 robel 算子对本系统采集到的图像边缘检测的效果较好。

sobel 算子边缘为 2 像素。gauss-laplase 算子边缘检测效果较差。

在这里我们为获得更好的边缘采用基于小波变换算法的图像边缘检测。小波变换把图像信号分解成呈现在不同尺度上的多个分量。小波变换具有良好的时——频局部化特征、尺度变化特征和方向特征,由 Mallat 和 Meyer 提出的多分辨率分析(MRA)进而形成的小波理论是边缘检测的十分理想的工具。

6. 2 小波基本理论

6. 2. 1 小波变换的定义

设 $f(t) \in L^2(-\infty, +\infty)$, 定义其连续小波变换为:

$$W_f(a, b) = \langle f, \Psi_{ab} \rangle = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (6-20)$$

其中: $\Psi(t)$ 为基本小波, $\Psi(t) \in L^2(-\infty, +\infty)$, 满足条件:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\hat{\Psi}(\omega)|^2 |\omega|^{-1} d\omega < +\infty \quad \hat{\Psi}(\omega) \text{ 为 } \Psi(t) \text{ 的 Fourier 变换} \quad (6-21)$$

$$\text{令: } \Psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \overline{\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} \quad a, b \text{ 为实数, 且 } a \neq 0 \quad (6-22)$$

称 Ψ_{ab} 为由基本小波 $\Psi(t)$ 生成的依赖于参数 a, b 的连续小波,
a 为尺度因子或频率因子, b 为时间因子。

小波函数 $\psi(t)$ 是具有震荡特性、能迅速衰减到零的一类函数($\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0$), 它是一个带通滤波器, 通过 $\psi(t)$ 的伸缩和平移后派生出一族函数 $\psi_{ab}(t)$ 。小波变换是对 $f(t)$ 按不同尺度进行分解, 实质是对 $f(t)$ 用不同滤波器进行滤波, 滤波器的脉冲响应为 $\psi_{ab}(t)$ 。在图像处理中必须将连续小波变换离散化。取 $a=a_0^j, b=kb_0a_0^j, a_0>1, b_0 \in \mathbb{R}, k, j$ 为整数, 则 $f(t)$ 的离散小波变换为:

$$W_\psi f(j, k) = a_0^{-j/2} \sum_R f(t) \overline{\psi(a_0^{-j}t - kb_0)} dt \quad (6-23)$$

当 $a_0=2, b_0=1$ 时, 即为离散二进小波变换:

$$W_\psi f(j, k) = 2^{-j/2} \int_R f(t) \overline{\psi(2^{-j}t - k)} dt \quad (6-24)$$

窗口宽度:

设基本小波 $\Psi(t)$ 满足窗口函数[6-22]要求, 则连续小波 Ψ_{ab} 的[6-23]

$$\text{窗口中心: } t_{\Psi_{ab}}^* = at_{\Psi}^* + b \quad (6-25)$$

$$\text{窗口宽度: } \Delta_{\Psi_{ab}} = |a| \Delta_{\Psi} \quad (6-26)$$

设基本小波的 Fourier 变换 $\hat{\Psi}(\omega)$ 满足窗口函数[6-21]要求, 则连续小波 Fourier 变换 $\hat{\Psi}_{ab}(\omega)$ 的

$$\text{窗口中心: } t^*_{\hat{\Psi}_{ab}} = \frac{1}{a} t^*_{\hat{\Psi}} \quad (6-27)$$

$$\text{窗口宽度: } \Delta_{\hat{\Psi}_{ab}} = \frac{1}{|a|} \Delta_{\hat{\Psi}} \quad (6-28)$$

随着 $|a|$ 的减小, Ψ_{ab} 的频谱向高频方向移动, 且 Ψ_{ab} 的宽度越来越小, 满足了信号处理中“高频时窗口应小, 低频时窗口应大”的要求, 因此小波分析是较理想的对信号进行局部频谱分析、变系数线性微分算子等的数学工具。

6. 2. 2 多分辨分析

Mallat 使用多分辨分析的概念统一了各种具体小波基的构造方法, 并由此提出了现今广泛使用的 Mallat 快速小波分解和重构算法^[29]。

空间 $L^2(R)$ 的多分辨分析是指构造 6 该空间内一个子空间列 $\{V_j\}_{j \in Z}$, 使其具有以下性质:

$$\text{单调性 (包容性)} \quad \cdots \subset V_2 \subset V_1 \subset V_0 \subset V_{-1} \subset V_{-2} \subset \cdots$$

$$\text{逼近性:} \quad \text{close} \left\{ \bigcup_{j=-\infty}^{\infty} V_j \right\} = L^2(R), \quad \bigcap_{j=-\infty}^{\infty} V_j = \{0\}$$

$$\text{伸缩性:} \quad \phi(t) \in V_j \Leftrightarrow \phi(2t) \in V_{j-1}$$

$$\text{平移不变性:} \quad \phi(t) \in V_j \Leftrightarrow \phi(t - 2^{j-1}k) \in V_j, \quad \forall k \in Z$$

为了构造正交小波基, 引入尺度函数概念:

令 $\{V_j\}_{j \in Z}$ 是 $L^2(R)$ 空间的一个多分辨分析, 则存在一个唯一的函数 $\phi(t) \in L^2(R)$ 使得:

$$\phi_{j,k} = 2^{-j/2} \phi(2^{-j}t - k), \quad k \in Z \quad \text{必定是 } V_j \text{ 内的一个标准正交基, 其中 } \phi(t) \text{ 称为尺度函数。}$$

若 $\phi(t)$ 生成一个多分辨分析, 那么 $\phi \in V_0$ 也属于 V_{-1} , 并且因为 $\{\phi_{-1,k} : k \in Z\}$ 是 V_{-1} 的一个 Riesz 基, 所以存在唯一的 l^2 序列 $\{h(k)\}$, 它描述尺度函数 ϕ 的两尺度关系:

$$\phi(t) = \sqrt{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k) \phi(2t - k) \quad (6-29)$$

由性质单调性 (包容性) 可知 $V_{j+1} \in V_j, \forall j \in Z$, 所以

$$V_j = V_{j+1} \oplus W_{j+1} \quad (6-30)$$

反复上式, 可得

$$L^2(R) = \bigoplus_{j \in Z} W_j \quad (6-31)$$

同样, 象 $\phi(t)$ 生成 V_0 一样, 存在一个函数 $\psi(t)$ 生成闭子空间 W_0 , 且有双尺度方程:

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(k) \phi(2t - k) \quad (6-32)$$

上式称为小波函数双尺度方程。从以上分析可知,尺度函数与小波函数的构造归结为系数 $\{h(k)\}, \{g(k)\}$ 的设计,若令 $H(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{h(k)}{\sqrt{2}} e^{-j\omega k}$, $G(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{g(k)}{\sqrt{2}} e^{-j\omega k}$, 则把尺度函数和小波函数的设计可以归结为滤波器 $H(\omega), G(\omega)$ 的设计。构造正交小波时滤波器 $H(\omega)$ 与 $G(\omega)$ 必须满足以下三个条件:

$$|H(\omega)|^2 + |H(\omega + \pi)|^2 = 1 \quad (6-33)$$

$$|G(\omega)|^2 + |G(\omega + \pi)|^2 = 1 \quad (6-34)$$

$$H(\omega)G^*(\omega) + H(\omega)G^*(\omega + \pi) = 0 \quad (6-35)$$

联合求解可得:

$$G(\omega) = e^{-j\omega} H^*(\omega + \pi) \quad (6-36)$$

$$g(k) = (-1)^{1-k} h^*(1-k), k \in Z \quad (6-37)$$

所以,要设计正交小波,只需要设计滤波器 $H(\omega)$ 。

小波变换具有时间-频率都局部化的特点。在对低频分析时可加宽时间窗,减小频率窗;而对高频分析时可以加宽频率,减小时间窗。小波变换的这种特性也称为“变焦”特性,它决定了小波变换能够提供多分辨率的分析。小波变换在图像处理中的应用主要集中在图像的压缩,图像的增强方面^[49]。在边缘检测方面也得到了运用,其实现思想是:在大尺度下抑制噪声,可靠地识别边缘,在小尺度下精确定位。

6.2.3 小波变换边缘检测

将二维小波变换引入图像边缘检测中,它由水平小波变换 $\omega^1(x, y)$ 和垂直小波变换 $\omega^2(x, y)$ 构成。

$$\psi^1(x, y) = \partial \theta^1(x, y) / \partial x \quad (6-38)$$

$$\psi^2(x, y) = \partial \theta^2(x, y) / \partial y \quad (6-39)$$

$\theta^1(x, y)$ 和 $\theta^2(x, y)$ 是平滑函数,记

$$\psi_{2^j}^1(x, y) = \frac{1}{2^{2j}} \psi^1 \left[\frac{x}{2^j}, \frac{y}{2^j} \right] \quad (6-40)$$

$$\psi_{2^j}^2(x, y) = \frac{1}{2^{2j}} \psi^2 \left[\frac{x}{2^j}, \frac{y}{2^j} \right] \quad (6-41)$$

在尺度 2^j 时图像沿水平方向和垂直方向的二进小波变换由下式给出:

$$\psi_{2^j}^1 f(x, y) = f * \psi_{2^j}^1(x, y) \quad (6-42)$$

$$\psi_{2^j}^2 f(x, y) = f * \psi_{2^j}^2(x, y) \quad (6-43)$$

称 $[\psi_{2^j}^1 f(x, y), \psi_{2^j}^2 f(x, y)]$ 为图像 $f(x, y)$ 的二维二进小波变换。其中 $\psi_{2^j}^1 f(x, y)$ 和 $\psi_{2^j}^2 f(x, y)$ 分别是原图像的水平方向和垂直方向的边缘信息。适当选择 $\theta^1(x, y)$ 和 $\theta^2(x, y)$

$$\theta_{2^j}^1(x, y) = \frac{1}{2^{2j}} \theta^1 \left[\frac{x}{2^j}, \frac{y}{2^j} \right] \quad (6-44)$$

$$\theta_{2^j}^2(x, y) = \frac{1}{2^{2j}} \theta^2 \left[\frac{x}{2^j}, \frac{y}{2^j} \right] \quad (6-45)$$

可得到

$$\psi_{2^j}^1 f(x, y) = 2^j \frac{\partial}{\partial x} (f * \theta_{2^j}^1)(x, y) \quad (6-46)$$

$$\psi_{2^j}^2 f(x, y) = 2^j \frac{\partial}{\partial y} (f * \theta_{2^j}^2)(x, y) \quad (6-47)$$

二进小波变换 $\psi_{2^j}^1 f(x, y)$ 、 $\psi_{2^j}^2 f(x, y)$ 分别是在尺度 2^j 时所平滑图像 $f(x, y)$ 沿水平方向和垂直方向的部分导数。它对应于图像水平方向和垂直方向的边缘信息,可看作被 $\theta_{2^j}^1(x, y)$ 、 $\theta_{2^j}^2(x, y)$ 所平滑图像 $f(x, y)$ 的梯度矢量的两个分量。定义在尺度 2^j 时图像的模和幅角为

$$M_{2^j} f(x, y) = \sqrt{|\omega_{2^j}^1 f(x, y)|^2 + |\omega_{2^j}^2 f(x, y)|^2} \quad (6-48)$$

$$A_{2^j} f(x, y) = \arg \tan \left[\frac{|\omega_{2^j}^2 f(x, y)|^2}{|\omega_{2^j}^1 f(x, y)|^2} \right] \quad (6-49)$$

若图像 $f(x, y)$ 二进小波变换的局部极大值点是点 (x, y) ,则在该点上, $M_{2^j} f(x, y)$ 在沿由 $A_{2^j} f(x, y)$ 给定的梯度方向上为局部极大,即在尺度 2^j 时所平滑图像 $f(x, y)$ 的灰度突变点对应于沿着梯度方向 $M_{2^j} f(x, y)$ 的局部极大值。这些取极大值点的位置就给出了图像的一个多尺度边缘。

用 $S*(A, B)$ 表示将图像 S 的每一行与一维滤波器 A 作卷积,再将结果的每一列与一维滤波器 B 作卷积下面给出小波变换的算法,其中 g, h 分别是由所选小波函数推导出来的一维高通和低通滤波器, l 是相应的全通滤波器。

J=0

While(j<J){

$$\psi_{2^{j+1}}^1 = s_{2^j} f * (g_{2^j}, l_{2^j})$$

$$\psi_{2^{j+1}}^2 = s_{2^j} f * (l_{2^j}, g_{2^j})$$

$$s_{2^{j+1}} f = s_{2^j} f * (h_{2^j}, h_{2^j})$$

j=j+1;}

end while

由 $\psi_{2^{j+1}}^1, \psi_{2^{j+1}}^2$ 计算出 $M_{2^j} f(x, y)$ 和 $A_{2^j} f(x, y)$ 。将 $A_{2^j} f(x, y)$ 量化为八个等级(0,1,...,沿图

像行方向检测 $M_{2,i}f(x,y)$ 的局部极大值,如此时极大值位置所对应的 $A_{2,i}f(x,y)$ 为 0 或 4, 则接受该点;再沿图像列方向检测 $M_{2,j}f(x,y)$ 的局部极大值,如此时极大值位置所对应的 $A_{2,j}f(x,y)$ 为 2 或 6,则接受该点.将两次结果按下式合并:

$$f(x,y)=\begin{cases} 1 & \text{两次结果中只有一次} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

应用该算法对图像边缘检测,小波为 Marr 小波,小波变换尺度 $j=3$ 结果如图 6-5。和图 6—1, 2, 3, 4 比较,可以看出基于小波变换的该算法在对指针边缘检测中比其他一些算法要好。

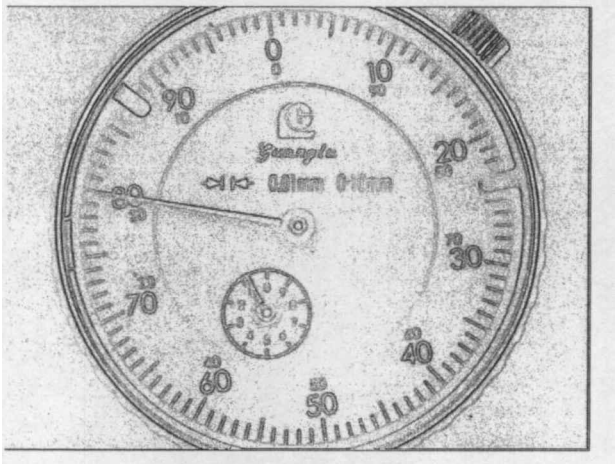


图 6-5 小波变换边缘检测图像

6. 3 实验

对采集到的图像进行小波变换边缘检测后,仍然采用与同样经过小波变换边缘检测的基准图像进行逻辑运算,采用霍夫变换抽取直线特征,抽取的是两条直线(指针的两条边缘)取中心线作为指针指示角度.采用与第五章同样的实验验证,获得数据如表 6-1, 计算误差为表 6-2

6-1 指针角度实测数据

图像 序列 (组)	真值	检 验 获 得 值				
		1	2	3	4	5
1	28.8	28.727	28.766	28.821	28.793	28.802
2	36	36.071	35.999	35.968	36.031	35.979
3	43.2	43.163	43.202	43.199	43.263	43.222
4	79.2	79.221	79.271	79.137	79.149	79.248
5	100.8	100.821	100.831	100.769	100.831	100.769
6	165.6	165.631	165.671	165.631	165.579	165.644
7	255.6	255.641	255.523	255.671	255.569	255.667
8	262.8	262.831	262.812	262.793	262.806	262.783
9	277.2	277.241	277.189	277.163	277.249	277.251
10	291.6	291.578	291.589	291.601	291.631	291.597

6-2 指针角度实测数据误差值

图像 序列 (组)	真值(°)	平均值(°)	最大值(°)	最小值(°)	绝对误差(°)	重复误差(°)
1	28.8	28.7818	28.821	28.727	-0.0182	0.094
2	36	36.0096	36.071	35.968	0.0096	0.103
3	43.2	43.2098	43.263	43.163	0.0098	0.1
4	79.2	79.2052	79.271	79.137	0.0052	0.134
5	100.8	100.8042	100.831	100.769	0.0042	0.062
6	165.6	165.6312	165.671	165.579	0.0312	0.092
7	255.6	255.6142	255.671	255.523	0.0142	0.148
8	262.8	262.805	262.831	262.783	0.005	0.048
9	277.2	277.2186	277.251	277.163	0.0186	0.088
10	291.6	291.5956	291.631	291.578	-0.0044	0.053

最大重复误差为 0.148°,最大绝对误差 0.0312°,将最大误差综合,综合测量误差为 0.1792°。精度高于原系统。说明采用小波变换边缘检测在本系统中能够更好的定位指针位置。

小结

本章中在本系统的基础上研究了更好的图像处理方法确定指针位置的方法。边缘检测能够达到更好的检测效果。应用小波变换能够提取到较好的图像边缘。实验论证了采用小波变换边缘检测在确定指针位置具有更好的效果。但是并不能突破像素的限制。进一步提高测量精度可以采用像素细分技术。像素细分技术是建立在数学形态学的基础上的, [57,58]方法也很多,包括质心法、抛物线拟合法等。在本系统下,由于背景复杂采用

像素细分技术能否达到好的效果，需要进一步研究和验证^[60]。

图像处理方法的选择直接关系到系统测量效果，效果包括速度和精度。精度的提高一般都会带来处理速度的下降。因此在设计工业现场视觉实时检测系统时，必须考虑到速度和精度两方面要求。

总结与展望

本课题完成了基于视觉检测技术的量表验定系统的设计和图像处理方法的研究。设计、研究内容包括：

1 在设计要求下完成对系统总体结构方案的设计和系统硬件的选择包括成像系统和位移控制单元。使得整个硬件系统达到良好的匹配。

2 设计了移控制单元和图像处理同步工作方式，研究了计算机串口通讯技术。

3 对采集到的图像，实现了滤波、二值化，逻辑运算，快速细化和直线提取完成指针图像的直线特征识别。并对一些图像处理的特点进行了研究。图像处理中采用图像逻辑运算只留下指针图像，提取直线特征，提高了系统检测速度。

5 设计了对图像处理部分误差分析方法，并对图像采集处理过程中产生的误差做了分析和研究

6 对图像处理方法上做了进一步的探讨和研究，研究了利用小波变换对图像边缘检测的方法。实验论证了利用小波变换能够提高检测精度。

整个系统完成，经过实际检验能够达到满意的处理速度和精度。系统实际上是一个现场适时视觉检测系统，其设计思想和方法对工业现场视觉检测系统的设计均具有参考性。

本文创新点：

将视觉测量技术成功的应用到生产实际中去，满足生产自动化的要求。

对小波变换在边缘检测中的应用做了研究。

研究成果

1 视觉检测系统设计是一门涉及光学、电子、数学形态学、计算机技术等综合性的技术，整个系统的设计过程需要精心设计和研究。

2 视觉检测系统通过硬件的良好匹配，能够达到一个像素分辨率之内。

3 图像的边缘是图像识别和分割的重要信息。利用小波分析对图像边缘检测能够达到好的效果。

展望

应用亚像素细分技术是进一步提高视觉测量精度的方法，研究和探讨亚像素细分技术是视觉检测技术发展的一个重要方面。更好的图像处理方法的应用虽然可以提高检测精度，但会降低检测速度，可以采用基于 DSP 的专用图像处理芯片实现。

在线、动态、数控、自动化、综合参数测量是现代检测技术发展的方向，视觉检测正是能够适应现代检测技术发展方向的一门新技术。视觉检测的特点决定了其应用前景广阔。美国国家标准局九十年代在调查的基础上曾作过预测：今后工业检测工作的 80% 将由视觉检测技术完成^[6]。而视觉检测技术和计算机辅助质量系统（CAQ）的集成是更灵活和自动化计算机辅助质量系统的发展趋势。因此，视觉检测技术的研究和应用是值得关注的。

致谢

在尤丽华副教授、张秋菊教授的精心指导下，我的硕士论文得以顺利完成，在此，向两位老师致以诚挚的谢意！

研究生学习期间，不仅在学术上我在两位老师指导、帮助下得到了长足的进步。而且两位老师严谨的学术态度和认真的科研精神也深深的影响了我，而这一切将使我终生收益。

在做毕业论文期间得到上海交通大学杨杰教授，梁栋博士的真诚帮助在此表示衷心的感谢！

研究生期间，也得到了实验室的张美娟、王灯照、郭秀华各方面的帮助，在此一并表示感谢。

在江南大学生活了将近三年人生最美好的时光，得到了机械工程学院很多老师的关心和照顾，十分感谢！

参考文献

- [1] LiHungwen, Kender J R. Scanning the Issue——Computer Vision. Proc. of IEEE, 1988(8): 859~861
- [2] 马颂德, 张正友, 计算机视觉, 北京, 科学出版社, 1998
- [3] Computer Vision, by Linda G. Shapiro, and George C. Stockman, Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2001.
- [4] [美] Linda G. Shapiro/George C. Stockman. 计算机视觉. 北京: 机械工业出版社 2005
- [5] 计算机视觉. 林华敬卿. 国防科技参考, 1995, 12 : 65-69
- [6] 浅说机器是系统概述机器国内外现状 中国视觉网
<http://www.china-vision.net/articleview.asp?articleid=54>
- [7] 马玉真 胡亮 方志强 曹素芝. 计算机视觉检测技术的发展及应用研究. 济南大学学报(自然科学版), 2004, 9: 222-227
- [8] 中国视觉网 机器视觉在中国
<http://www.china-vision.net/articleview.asp?articleid=106>
- [9] 常发亮 王平 乔谊正 季鸿雁. 基于机器视觉的纸张匀度金字塔结构分析方法. 山东大学学报(工学版), 2004, 2: 35-37.
- [10] 季鸿雁 王永秀 范秋华. 一种计算机视觉纸张匀度检测方法. 青岛大学学报, 2003, 3: 35-39.
- [11] 范小涛 夏雨人. 一种基于图像处理的 PCB 检测算法研究. 计算机工程与应用, 2004, 13: 91-92
- [12] 阳桂 吴久峰 邓志刚. 基于机器视觉工业实时测量技术的研究. 制造业自动化, 2003, 2: 10-13
- [13] 齿轮外表视觉检测系统设计 雷良育, 李秀莲, 商俊敏, 吴瑞明 《机床与液压》 2004, 6: 155-157
- [14] 郝继贵 王仲 周富强. IVECO 车身视觉检测系统现场溯源研究. 计量学报, 2000, 21(1): 28-33.
- [15] 唐宇慧 杨敏 叶邦彦 刘其洪. 基于计算机视觉的圆轴直径精密检测. 现代制造工程, 2004, 9: 67-69
- [16] 许昌 周铭 骆瑞伦 金荣泰. 基于面阵 CCD 成像技术的测量仪器及系统的研制. 仪器仪表学报, 2001, 8: 218-220
- [17] 雷良育 周晓军 潘明清. 基于机器视觉的轴承内外径尺寸检测系统. 农业机械学报, 2005, 3: 131-134
- [18] 王庆有. CCD 应用技术. 天津. 天津大学出版社 2000
- [19] 万振凯. 面阵 CCD 摄像机视频信号数据采集及其图象处理的应用 电子与自动化, 1998, 3: 14-19

- [20]蒲昭邦 屈玉福 王亚爱.视觉检测系统中照明光源的研究.仪器仪表学报(增刊),2003,8:438-439
- [21] (美) David G.Alciatove、Michael B.Histand.机电一体化与测量系统基础教程..影印版. 北京.清华大学出版社.2005
- [22]机电一体化实用手册 / (日)三浦宏文主编 科学出版社 2001.8
- [23]李正吾等编著 机电一体化技术及其应用 北京 机械工业出版社 1990.
- [24]张洪润 蓝清华 编著单片机应用技术教程 北京 清华大学出版社 1997
- [25]李圣怡等编著.Windows 环境下软硬件接口技术.北京.国防科技大学出版社.2001
- [26]夏春梅.P L C 与计算机的串行通信.自动化仪表 2004,8:40-41
- [27]王永刚.基于数码相机的图像采集系统.测控技术,2000, 5:17-19.
- [28]雷晓峰,王耀南,段 峰. 利用 VC++开发图像采集卡与图像预处理库. 微型机与应用, 2002,1: 44-46.
- [29]何 斌,马天予,王运坚,等. Visual C++数字图像处理. 第2版. 北京:人民邮电出版社, 2002.
- [30]Visual c++实用图像处理 清华大学出版社 陈兵棋 孙明 编著 2004
- [31]苏秀琴 王飞.CCD 测量系统实现及其实时性讨论.光子学报. 2002.6:774-777
- [32]阮秋琦著.数字图像处理学.北京:电子工业出版社,2001.
- {33}Kenneth R. Castleman.数字图像处理.朱志刚译.北京.电子工业出版社.2002.
- [34]Akopian D, Vainio O, Agaian S, Astola J, Processors for generalized stack filters,IEEE Trans.1995.6,SP-43(6):1541-1546.
- [35] 刘文耀 编著 光电图像处理.北京.电子工业出版社. 2002.
- [36]机械零件视觉检测图像二值化处理 杨敏 叶邦彦 吴春波 现代制造工程 2003 11:54-56
- [37] 图像处理和分析基础 章毓晋 高等教育出版社 2002
- [38]数字图象处理及模式识别 沈庭芝 方子文 编著 北京理工大学出版社 1998
- [39]《数字图像处理疑难解析》[英]Maria Petrou/[希]Panagiota Bosdogianni 赖剑煌/冯国灿 等 北京机械工业出版社 2005 年
- [40]VC++图像处理设计 杨淑莹 编著 清华大学出版社 2003
- [41]Nachache N J,Shinghal R.SPTA:A Proposed Algorithm for Thinning Hinary Patterns.IEEE System Man Cybern .SMC-14.1986(3):409-418
- [42]Gorman L.k*k Thinning .Computer Vision Graphics and IMAGE PROCESSING,1990(51)215
- [43]卜佳俊 王亮 陈纯.一种可参数化的快速直线提取算法.浙江大学学报(工学版), 2003,7: 410-414
- [44]杨向结 林柏森 带直线特征的数字图像的位置检测 光电工程, 1997, 12: 7-11
- [45]Karunaseka S A ,et al.A Distortion measure for bloking artifacts in image based on human visual .IEEE Trans,IP, 1995,4(6):713-724.

- [46]边缘检测方法及其在医学图像处理中的应用研究 苏红彬 白凤娥 光电子技术与信息 2005, 4: 23-27
- [47]周 龙 基于数学形态学的储粮害虫图像边缘检测算法研究微计算机信息 2005, 3: 32-33.
- [48]MallatS.Zero-crossingsofwavelettransform.IEEETrans.Inform.Theory,1991,37:1019-1033
- [49]刘胜璞, 刘振安.基于图像处理的啤酒成品检测系统.计算机仿真,2004,21,(8):138-140.
- [50] 赵静, 唐晓静.小波变换及骨架提取在图像边缘检测中的应用.宁夏大学学报,2004, 25 (4) :328-331.
- [51]李宏贵 李兴国.一种新的基于小波变换的边缘检测方法. 计算机应用与软件,2003,3:103-104
- [52]王俊一,王 乘,孙 涛小波变换阈值选取的博弈与图像边缘点检测 2005.4:87-90
- [53] 吕四化,史萍,王惠明 小波变换模极大值法在图像边缘检测中的应用 2005, 3: 54-58
- [54]郇正良,朱向彩,杨国青.小波变换在图像边缘检测中的应用研究.泰山学院学报, 2003,6:22-25.
- [55]Serra J., Image analysis and mathematical morphology, New York: Academic, 1982.
- [56]张雪 肖旺新 吴坚 吴斌.用二次B样条小波进行图像的自适应阈值边缘检测.红外技术,2003,1:19-23
- [57]数字图像直线特征的亚像素位置检测 于新瑞,王石刚,王高中,邵萌.2004,3:138-141
- [58]戴青云 余英林 数学形态学在图像处理中的应用进展 控制理论与应用, 2001, 4: 478-481
- [59]杨敏 叶邦彦 牟丽 吴春凌.机械零件图像中直线边缘亚像素定位方法. 华南理工大学学报(自然科学版),2003,12:30-33
- [60]屈玉福 浦昭邦 王亚爱.视觉检测系统中亚像素边缘检测技术的对比研究. 仪器仪表学报.2003,8:459-462

攻读硕士学位期间发表的论文清单

数字图像处理技术在指针式仪表读数系统中的应用	江南大学学报（录用）
基于图像处理量表验定系统的研究	盐城工学院学报（录用）