



Nanjing University of Aeronautics and Astronautics

The Graduate School

College of Mechanical-Electrical Engineering

**Research on Micro-vision based spindle
rotation error measurement method**

A Thesis in

Mechanical-Electrical Engineering

by

Yuan DeLiang

Advised by

Associate Professor Zhao ZhuanPing

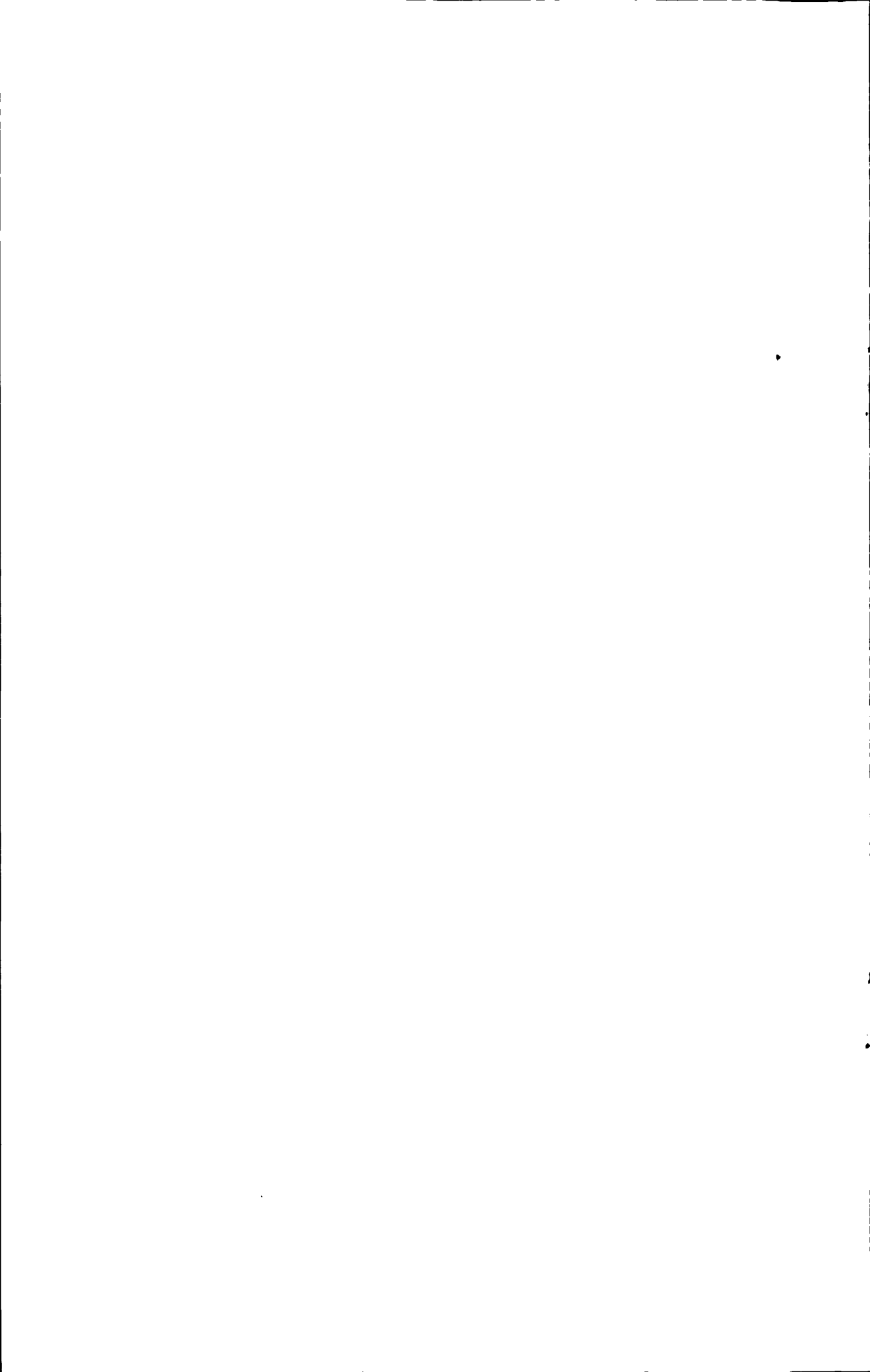
Submitted in Partial Fulfillment

of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

January, 2010



承诺书

本人声明所提交的硕士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。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，也不包含为获得南京航空航天大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。

本人授权南京航空航天大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本承诺书)

作者签名: 袁焯尧

日期: 2010.3.18

334
1000

摘 要

机床主轴的回转误差是影响机床加工精度的重要因素之一，它直接影响到加工零件的形状精度、表面质量及粗糙度。因此对主轴的回转误差进行测量是十分必要的。本文在充分研究了传统测量方法的原理及误差分离方法的基础上，提出一种基于显微视觉的主轴回转误差测量方法。该方法不需要使用标准球，可以对主轴回转误差进行直接测量，避免传统测量方法中必不可少的标准球安装偏心和形状误差的分离，测量结果将更加真实、准确。

本文综述了主轴回转误差的来源和评定方法，介绍了显微视觉的测量原理，分析了基于显微视觉的回转误差测量系统的测量原理、系统硬件组成及软件开发环境。本文重点研究了回转误差测量中靶标轨迹图像的处理及特征提取算法，其中包括图像滤波、自适应阈值分割、连通区域提取、刻线条纹的细化、亚像素直线定位算法以及特征点详细提取过程。本文还在分析摄像机成像模型和显微视觉系统特点的基础上，采用两步法对显微视觉测量系统进行标定，给出了用测微尺网格对摄像机镜头畸变系数进行标定的数学模型和具体操作方法。最后，本文对视觉测量系统的标定方法和回转误差测量进行了实验验证，给出了标定结果和回转误差测量结果。

关键词：主轴回转误差 显微视觉 图像处理 镜头标定 十字测微尺

Abstract

Spindle rotation error of the machine tools is a main factor that influences the machining precision. It influences the shape precision, surface quality and Roughness of the parts. So it's necessary to measure the rotation error. This essay researched the conventional method of measurement and error separating technique, then proposed a micro-vision based method to measure spindle rotation error. This method doesn't require the use of master ball and spindle rotation errors can be measured directly. It can avoid separating setting-up eccentricity and shape error of master ball, therefore the measurement results will be more realistic and accurate.

This essay summarized the source and the evaluation method of the spindle rotation error; introduced the measuring principle of the micro-vision; analyzed the measuring principle of the micro-vision based rotation error measurement, the system hardware composition and the software development environment. This essay researched image processing and character extracting algorithm for the image of the drone's movement locus, including image filter, adapter-threshold, connected region extracting, reticle stripes thinning, sub-pixel line locating and the detailed process of extracting characteristic points. Also, this essay use two step method to calibrate the micro-vision measurement system based on analyzed imaging model of the camera and the features of the micro-vision system, provided the mathematical model for calibrating the camera lens's aberration and its operation. Finally, the calibration methods and rotation error measurement was verified with experiment, and the results of calibration and the rotation error of measurement results was given.

Keywords: Spindle rotation error; Micro-vision; image processing; lens calibration; cross micrometer

目录

第一章 绪论.....	1
1.1 课题研究背景和意义.....	1
1.2 主轴回转误差测量的研究现状.....	2
1.2.1 主轴回转误差的测量方法.....	2
1.2.2 误差分离技术.....	4
1.2.3 国内外研究现状.....	5
1.3 显微视觉测量的研究现状.....	6
1.4 本论文的主要研究内容及论文的结构.....	7
第二章 回转误差显微视觉测量技术.....	9
2.1 主轴回转误差分析.....	9
2.1.1 主轴回转误差来源分析.....	9
2.1.2 主轴回转误差的评定方法.....	9
2.1.3 采用圆度误差数据处理的回转误差评定.....	10
2.2 显微视觉测量的原理.....	12
2.2.1 显微视觉成像原理.....	12
2.2.2 显微视觉成像模型.....	13
2.2.3 显微视觉测量精度分析.....	14
2.3 显微视觉回转误差测量原理及系统硬件组成.....	15
2.3.1 基于显微视觉的回转误差测量原理.....	15
2.3.2 摄像机靶标—十字形测微尺.....	16
2.3.3 工业显微镜头.....	17
2.3.4 CCD 摄像机.....	18
2.3.5 图像采集卡.....	19
2.3.6 光源系统设计.....	19
2.4 测量系统软件组成及软件开发环境.....	20
2.4.1 测量系统软件组成.....	20
2.4.2 Visual C++.....	21
2.4.3 OpenCV.....	21
第三章 靶标图像处理与特征提取.....	23
3.1 图像处理流程.....	23
3.2 图像噪声及滤波处理.....	24
3.2.1 常见图像噪声的分类.....	24
3.2.2 平滑滤波.....	24
3.3 灰度阈值分割.....	26
3.3.1 灰度阈值分割法.....	26
3.3.2 自适应灰度阈值分割.....	26

3.4 连通区域提取.....	28
3.4.1 连通成分标记.....	28
3.4.2 递归标记算法.....	29
3.4.3 改进后的连通区域提取算法.....	30
3.5 刻线条纹的细化算法.....	31
3.5.1 查表细化算法.....	32
3.6 亚像素直线位置检测.....	33
3.6.1 亚像素定位原理及选用条件.....	34
3.6.2 常用亚像素算法分析.....	34
3.6.3 十字形刻线的亚像素定位算法.....	35
3.7 十字刻线交点提取过程.....	36
第四章 视觉测量系统的标定.....	39
4.1 摄像机标定概述.....	39
4.2 摄像机成像模型及镜头畸变.....	40
4.2.1 摄像机成像模型.....	40
4.2.2 摄像机镜头的畸变.....	42
4.3 显微视觉测量系统的特点及其标定方法.....	43
4.3.1 显微视觉测量系统的特点分析.....	44
4.3.2 视觉测量系统的两步法标定.....	44
4.4 基于网格的摄像机镜头畸变标定.....	45
4.4.1 标定原理.....	45
4.4.2 平面网格标定模板的选择.....	46
4.4.3 网格交点实际像素坐标和理想像素坐标.....	47
4.4.4 图像畸变校正.....	48
第五章 实验结果及分析.....	49
5.1 摄像机标定实验.....	49
5.1.1 摄像机镜头畸变标定的流程.....	49
5.1.2 网格点的坐标提取及自动排序.....	49
5.1.3 镜头畸变标定结果.....	50
5.1.4 像素值标定.....	52
5.2 回转误差测量实验.....	53
5.2.1 测量实验过程.....	53
5.2.2 图像采集.....	54
5.2.3 提取图像靶标运动轨迹.....	54
5.2.4 主轴回转误差的评定.....	55
5.3 测量精度分析与检验.....	56
第六章 总结与展望.....	58
6.1 研究工作总结.....	58
6.2 进一步研究的展望.....	58
参考文献.....	60

致谢.....	63
在学期间的研究成果及发表的论文.....	64

图表清单

图 1.1 主轴回转误差的形式	1
图 1.2 打表测量法	3
图 1.3 单向测量法	3
图 1.4 双向测量法示意图	4
图 2.1 主轴回转误差图像与圆图像	10
图 2.2 理想圆圆心确定法	11
图 2.3 最小二乘法极坐标图	12
图 2.4 显微镜成像原理图	13
图 2.5 针孔成像模型	13
图 2.6 CCD 成像示意图	14
图 2.7 测量系统硬件原理图	16
图 2.8 十字测微尺	17
图 2.9 工业显微镜头	18
图 2.10 AFT-RL200 曲颈 LED 光源	20
图 2.11 系统软件组成框图	21
图 3.1 图像处理流程	23
图 3.2 均值滤波与中值滤波对比	26
图 3.3 阈值分割效果对比	27
图 3.4 含五个连通成分的二值图像	28
图 3.5 像素邻点扫描顺序	29
图 3.6 递归标记算法的前 5 步	30
图 3.7 递归标记算法	30
图 3.8 TABLE 二重链表数据结构	31
图 3.9 根据 8 个相邻点判断该点能否删除	32
图 3.10 八邻域模板	32
图 3.11 细化结果	33
图 3.12 原始图像	36
图 3.13 二值化图像	36
图 3.15 细化图像	37
图 3.16 断开交叉点后的图像	37
图 4.1 小孔成像模型	41
图 4.2 视觉测量系统两步法标定	44
图 4.3 平面网格标定模板	47
图 4.4 网格理想点计算	47
图 5.1 镜头畸变标定流程	49
图 5.2 网格点排序	50
图 5.3 网格模板	51

图 5.4 像素值标定	52
图 5.5 图像处理结果	53
图 5.6 实验测量过程	53
图 5.7 靶标运动轨迹处理过程	55
图 5.8 回转误差评定	55
表 5.1 网格交点实际坐标 (单位: 像素)	51
表 5.2 网格交点理想坐标 (单位: 像素)	51
表 5.3 像素值标定结果	53
表 5.4 回转误差测量结果 (单位: μm)	56
表 5.5 十字测微尺运动位移测量值与理论值 (单位: μm)	57

第一章 绪论

1.1 课题研究背景和意义

主轴是机床的关键部件,在其前部安装工件、刀具,直接参与切削加工,对机床的加工精度,工件表面质量和生产效率有很大的影响,其性能的好坏将对机床的最终性能和加工工件的质量有非常重要的影响。据研究表明中型车床在不同频率的动载荷作用下,各个部件反映在刀具与工件切削处的综合位移中主轴部件所占比例最大,未处于共振状态下占 30~40%,共振状态下占 60~80%^[1]。因此主轴是超精密加工机床中最重要的一个部件,通过机床主轴的精度和特性可以评价机床本身的精度。机床主轴的回转精度用运动回转误差来表示。主轴的回转误差是主轴在回转过程中实际回转轴线相对于理论回转轴线的漂移。

由于轴承和轴颈的加工误差以及静力学和动力学等方面的原因,主轴的瞬时回转轴线在空间的位置是不断变化的,它相对于平均轴线(处于瞬时回转轴线的平均位置处)的位移定义为主轴的回转误差运动^[2]。回转误差运动是影响机床加工精度的一个主要因素。主轴回转误差是一项综合性的误差,它可以分为三种基本形式,如图 1.1。

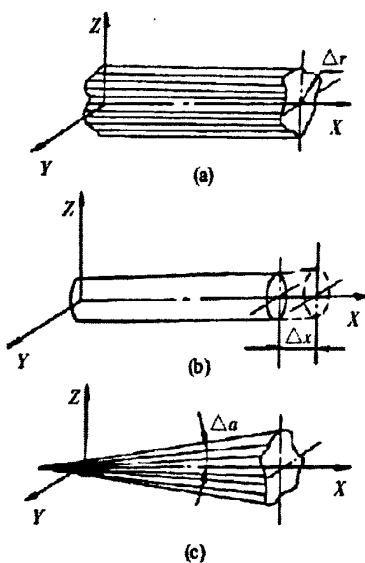


图 1.1 主轴回转误差的形式

(1) 纯径向跳动——实际回转轴线始终平行于理想回转轴线,在一个平面内作等幅的跳动,如图 1.1 (a)。

(2) 纯轴向窜动——实际回转轴线始终沿理想回转轴线作等幅的窜动,如图 1.1 (b)。

(3) 纯角度摆动——实际回转轴线与理想回转轴线始终成一倾角, 在一个平面上作等幅摆动, 且交点位置固定不变, 如图 1.1 (c)。

一般情况下, 这三种形式的误差是同时存在的, 由此产生的加工误差则是这三种误差的叠加。主轴理想回转轴心在空间具有五个自由度, 分别为沿 X、Y、Z 轴的平移和绕 Y、Z 轴的转动。为了方便测量, 一般主轴的运动误差简化成径向误差和轴向误差。其中径向的误差包括沿 Y、Z 轴的平移运动和绕 Y、Z 轴的旋在 YZ 平面内的投影; 轴向误差运动包括沿 X 轴的平移运动和绕 Y、Z 轴运动在 X 轴向的分量。其中轴向误差是一个一维的运动, 测量比较简单, 在标准轴端面用位移传感器采集位移信号即可。而径向误差是个二维平面运动, 测量过程及数据处理比较复杂。因为无法直接对理想的轴心进行直接测量, 而必须通过标准球或标准轴外轮廓的测量数据来间接计算出主轴的径向误差。因此径向误差的测量是主轴回转误差测量的研究重点。

机床主轴的回转运动误差是影响机床加工精度的重要因素之一, 它直接影响到加工零件的形状精度、表面质量及粗糙度。实验结果表明: 精密车削的圆度误差约有 30%—70%是由于主轴的回转误差引起的, 且机床的精度越高, 所占的比例越大^[5]。主轴回转误差是反映机床动态性能的主要指标之一。通过回转误差运动的测试, 可预测机床在理想加工条件下所能达到的最小形状误差和粗糙度; 也可用于机床加工预测补偿控制^{[4][5]}; 还可判断产生加工误差的原因; 以及可用于机床的状态监测和故障诊断^[6]。

随着科技的发展, 高速、高精度已成为当前机械装备的发展趋势, 人们对机械加工精度提出了越来越高的要求, 对机床的检测精度要求也越来越高。此外为了提高机床检验的效率, 满足现场环境下便于安装测量系统, 对测量系统的易于安装和测量的快速性也提出要求。传统的检测方法引入了标准件的误差、数据处理复杂、对安装要求非常严格, 越来越不能满足机床误差检测的需求。因此, 对精密和高精密机床主轴回转误差的测量技术的研究具有重要的意义。

1.2 主轴回转误差测量的研究现状

1.2.1 主轴回转误差的测量方法

传统的主轴回转误差测量方法有打表测量法、单向测量法和双向测量法。

打表测量法是在早期机床主轴回转精度不是太高时, 测量机床主轴径向误差的常用方法。这种方法是将一标准芯棒插入机床主轴锥孔, 通过在芯棒的表明及端面放置千分表来进行测量, 如图 1.2 所示。这种测量方法简单易行, 但会引入芯棒的偏心误差, 不能把性质不同的误差区分开, 而且不能反映主轴在工作转速下的回转误差, 更不能应用于高速、高精度的主轴回转精度测量。

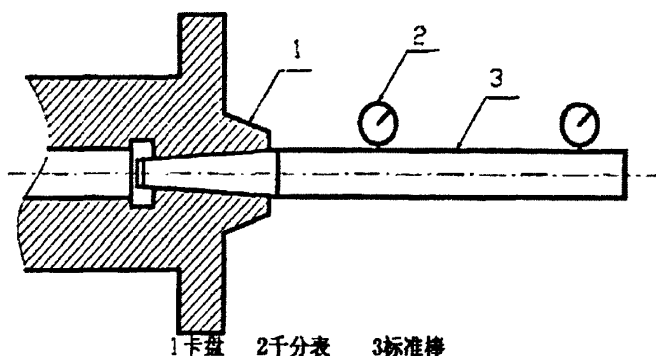


图 1.2 打表测量法

单向测量法又称为单传感器测量法，测量装置如图 1.3 所示。图中摇摆板用来调整小球的径向位置，是一种消偏机械装置。由传感器获取敏感方向的误差信号，经测微仪放大、处理后，送入记录仪，以待进一步数据处理。最后以主轴回转角作为自变量，将采集的位移量按主轴回转角度展开叠加到基圆上，形成误差圆图像。单向测量法测量的主轴回转误差运动实质上只是实际二维主轴回转误差运动在敏感方向的分量^[3]。因此，单向测量法只适用于具有敏感方向的主轴回转精度的测量，如工件回转型机床。单向测量法同样不可避免地会混入主轴或者标准球的形状误差，在机床主轴回转精度不太高，混入的形状误差可以忽略时，用单向测量法得到的车床主轴回转精度圆图像的外缘轮廓与工件的外缘很相似，所以这样得到的圆图像能很好地用来评价车床主轴的加工精度及加工质量。

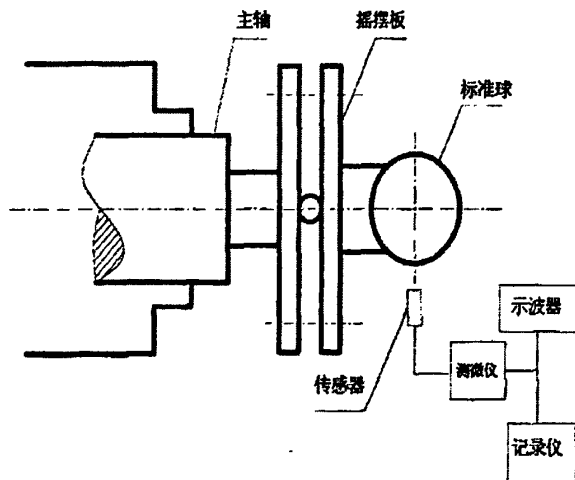


图 1.3 单向测量法

双向测量法又称双传感器测量法。主轴的回转误差运动是一个二维平面运动，需要至少两个传感器在主轴横截面内相互垂直的两个方向同时采集数据，再将两组位移数据合成才能复现主轴的实际回转误差轨迹。双向测量法如图 1.4 所示。传统的双向测量法同样忽略了主轴或者

标准球的形状误差，而且还会混入偏心误差，从而影响测量结果的精确性。

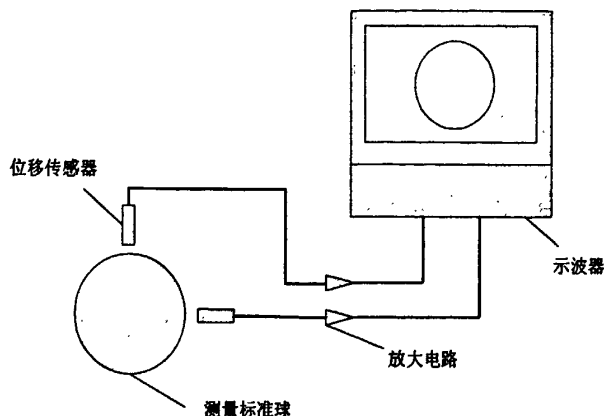


图 1.4 双向测量法示意图

1.2.2 误差分离技术

在进行主轴回转精度的测量过程中，标准球的形状误差和安装误差会对测量结果产生较大影响，必须从采集的数据中把他们分离出来。误差分离是指从采集的原始数据中分离并去除由测量系统引入的影响测量精度的信号分量，从而得到所要测量的准确信号。误差分离技术最初应用于圆度误差的测量，是指从传感器测得的信号中分离并除去圆度仪的主轴回转误差对测量结果的影响。随着高精度圆度测量技术的发展，误差分离技术也得到了不断的发展，并引入到主轴回转误差的测量中。在主轴回转误差的测量中，误差分离技术则要从传感器测得的信号中分离并除去被测件的形状误差、安装偏心误差，从而得到精确主轴的回转误差信号。主轴回转误差测量的误差分离技术与圆度测量误差分离技术相比，保留和去除的信号正好相反，但它们实质工作却是相同的，都是对混入了主轴回转误差和形状误差信号进行处理。误差分离技术主要有多步法、多点法和反转法。

多步法误差分离技术是使用一个传感器，分别在工件的一个测量截面的不同位置上拾取测量数据。多步法的全称是全周等角多步转位法，这种误差分离技术只使用一个传感器采集数据，通过转位工件或主轴到特定的测位工作。整周均匀采样，不断转位工件或主轴，用一个传感器在各测点采集数据。每个测量数据都包含主轴的径向回转误差和带有相位差的形状误差。最后对多次采集的数据进行处理就可以分离出主轴的回转误差和标准球的圆度误差，这种测量系统的结构比较简单，但测量时需要多次转位标准球比较繁琐。

多点法误差分离技术采用多个传感器在主轴径向同时采集数据，多个传感器在垂直轴心的平面内互成确定的角度布置，然后通过对采集的数据进行处理分离出形状误差与主轴的回转误差。通常较多采用三个传感器进行同时测量，即三点法。这种方法适用于主轴回转误差的动态

测量,但难以保证三个传感器的安装位置精度。

反向法误差分离技术是 Donaldson^[8]在 1972 年首先提出的,它使用一个测头对标准球分两步进行测量,当测头采集完一组数据后,将标准球和测头同时旋转 180 度安装,再进行一次测量,对两次测量的数据进行处理就可以将主轴的回转误差和标准球的形状误差分离出来。这种方法是一种完全的误差分离方法,能较彻底的去掉标准球的形状误差,但由于测量的过程中要旋转测头和标准球,会带来一定的安装误差,目前这种方法已经较普遍的运用于主轴静态回转误差的测量中。

1.2.3 国内外研究现状

由于主轴回转误差的测量对机床性能、加工质量等多方面都具有非常重要的意义,近几年来国内外学者对主轴回转误差的测量技术做了大量的研究,取得了许多成果。

国外方面, Bryan 提出一种采用基准球法的主轴加工过程回转误差的测量法。Donaldson 提出反转法误差分离技术测量主轴的回转误差^[8]。韦恩州立大学 Kim K 采用傅立叶分析法消除偏心误差,并补偿基准轴圆度误差^[9]。宾夕法尼亚大学的 Eric Marsh、Robert Grejda 则采用基准轴法进行主轴工作速度下带负载的回转误差测量方法^[10]。东京技术学院 Shoji NoguChi、Tadao TSukada 和 Atsushi Sakamoto 采用两个交布置的传感器采集数据,提出矢量指示法来计算示主轴径向运动误差^[11]。Gao W, Sat E, Ohnuma T 提出带倾角的三点法进行主轴圆度误差、回转误差的测量,采用误差分离技术分离出主轴的径向误差与角度误差,该法与传统三点法相比更适用于自由度主轴回转误差的测量^[12]。Liu Chien-Hung 在一个旋转装置中安装激光发射器,该装置装到主轴上,主轴旋转时,主轴的回转误差将改变激光束的方向,通过检测激光束的变化从而测量主轴的向误差和角度误差^[13]。Eric MarCh、Jeremiahc Cuey 等在空气轴承主轴测试装置上分别用反转法、多步法、多点法进行了纳米级回转精度重复测量和比较,并讨论了若干纳米级回转精度测量需考虑的问题^[14]。

国内方面,景岗、张立平等采用单点双向测量法实现了对气体润滑轴承主轴部件回转精度的高精度测量^[15]。电子科技大学李迅波、陈光禹应用计算机辅助测试(CAT)技术,提出了一种高精度主轴回转误差在线测量方法,并开发了在线测量和数据处理系统,但该方法需在主轴上装基准球^[16]。中国船舶工业总公司第 6354 所的阚光萍提出一种测量超精密花岗石空气主轴径向回转精度的测量方法——双向转位法,该法采用误差分离技术有效地提高了测量准确度^[17]。西安理工大学何钦象、张华容、杨静建立了无接触型的五自由度电磁主轴回转运动的复函数形式的数学模型,采用 Fourier 级数和复数形式,将其分解为许多作圆周运动的频率分量,最后推导出误差运动轨迹公式。在此基础上测量并分析电磁主轴在高转速时的回转精度,并给出了影响电磁主轴回转精度的主要因素^[18]。黄长征、李圣怡研制了超精密车床主轴回转精度动态测试

系统,该系统采用两点误差分离动态测试法测量,但该系统需要将测试轴装到车床的主轴锥孔内,有较大局限性,而且采样频率为 1000Hz 左右,远远满足不了高速空气主轴的采样频率需求^[19]。上海交通大学苏恒、李自军,魏员雷提出先用频域法确定圆度误差的误差初值,然后用时域三点法测量数控机床主轴运动误差的方法并实验验证了该方法的有效性和精确性^[20]。西安理工大学李旗、方海燕以复数型频率分析的回转精度的理论为指导在五自由度磁浮主轴工作台上,设计了回转精度的测试系统,测量磁浮主轴两个平行截面内的误差运动。该测试系统采用锁相倍频技术,实现了对磁浮主轴转速的在线自动跟踪。在数据处理中采用复序列 FFT 变换,测量分析效率高,能达到在线检测的要求^[21]。

这些测试方法在实际实施过程中常常会遇到一些困难,主要表现在:

(1)难以找到精度高于主轴回转误差的测量基准,回转误差往往被基准本身的误差所掩盖。

(2)标准球的安装偏心和球的表面粗糙度常给测量带来较大误差。从目前大多数的研究成果来看,对安装偏心造成的一次谐波误差进行消除的做法有很大的意见分歧,这种分歧的主要观点是在一次谐波误差消除的同时也将主轴实际回转误差的一次性分量进行了去除,从而造成测试结果的不准确性。

(3)即使找到高精度的测量基准(例如非常精密的小钢球),安装在主轴上以后,将不可避免的出现偏心,即使采用专门的调偏装置,偏心误差也往往比回转误差大的多。这样产生的结果是:一方面为了能够检测到回转误差,必须使测试仪器具有最高的分辨率;另一方面由于偏心误差较回转误差大的多,当测试仪器具有最高分辨率时偏心误差往往超过仪器本身的量程而无法进行测量。

(4)在采用多个传感器进行测量时,一般对传感器的安装位置精度要求很高,造成测量系统的安装调试比较困难。

1.3 显微视觉测量的研究现状

近年来,随着科技的发展,各个领域对测量微小尺寸的要求越来越迫切,但传统的测量技术和设备难以在精度、效率及自动化程度等方面完全满足要求。以数字图像处理为基础的 CCD 显微测量技术应运而生。CCD 显微测量技术,有时又称图像测量技术,是一种高精度的测量技术,它是指在综合运用显微光学成像技术,图像处理、分析技术等的基础上,对肉眼无法识别的微型物体进行放大、成像,以及图像的传输、显示、保存、处理和测量的过程。

CCD 显微测量系统由显微镜、CCD 摄像机、视频图像采集卡、计算机和数字图像处理相结合而组成。许多被测参数小、不便直接测量的物体,可以首先由光学显微镜成像放大,然后用 CCD 摄像机采集显微图像,用视频采集卡将其数字化,最后用计算机利用图像处理方法进行处理给出结果。系统集成精密制造、测量技术、计算机技术、光电技术等于一体,具有非接触性测量、

测量方法灵活、适应范围广、稳定性好、抗干扰力强等优点^[22]。

CCD 显微测量技术在国内外发展很快,已广泛应用到几何测量的尺寸测量、航空遥感测量、精密复杂零件的微尺寸测量和外观检测、医学图像观测辅助诊断,以及光波干涉图、应力应变场状态图等许多方面^[23]。CCD 显微测量技术的迅速崛起和发展除了由于应用领域的不断发展,还得益于计算机技术的突飞猛进和数字图像处理技术的日益完善。低价位的微处理器支持的并行处理技术,用于图像数字化的低成本图像卡,用于大容量、低成本存储阵列的新存储技术,以及低成本、高分辨率的彩色显示系统等更进一步刺激着这一技术领域的迅速成长。虽然目前 CCD 显微测量技术在超精密检测中用得较少,但是随着 CCD 本身精度的不断提高及新的信号处理方法的出现,在超精密的测量中将会大量的运用到 CCD 显微测量技术。

1.4 本论文的主要研究内容及论文的结构

由于无法直接对理想的主轴轴心进行直接测量,传统的测量方法都是通过对标准球、标准轴外轮廓的测量来间接测得主轴的径间回转误差,然后采用误差分离技术对混入的标准球、标准轴本身外轮廓的形状误差和标准球、标准轴的安装误差进行分离。本文提出一种基于显微视觉测量技术的主轴回转误差测量方法。这种方法不需要使用标准球或标准轴,可以对主轴回转误差进行直接测量,避免传统测量方法中必不可少的标准球安装偏心 and 形状误差的分离,测量结果将更加真实、准确。

本课题以高精度机床主轴为研究对象,在分析主轴回转误差来源的基础上,研究基于计算机视觉技术的主轴回转误差的测量方法。其主要内容是设计回转误差的测量方案;研究主轴回转误差特征图像的获取;重点研究主轴端面靶标运动轨迹图像的处理和特征提取算法、视觉测量系统的标定方法和回转误差测量数据的处理方法。

拟解决的关键问题:

- 1) 系统硬件的构建;
- 2) 分析确定靶标图像预处理算法;
- 3) 研究确定靶标图像中精确提取特征点位置的算法;
- 4) 分析显微视觉系统的标定原理和方法,选择合适的标定模板;
- 5) 实验验证测量方案及图像处理算法、特征提取算法。

本文的结构如下:

第一章绪论,阐述了本课题的研究目的和意义、相关理论、国内外回转误差测量及显微视觉的研究现状,提出了本文的主要研究内容和拟解决的关键问题,并给出了各章的内容安排。

第二章分析了主轴回转误差的来源和评定方法,显微视觉测量的原理;给出了本文的测量

方案和系统软硬件组成及软件开发环境；。

第三章研究图像处理及特征提取的算法，包括图像的滤波，图像分割，连通区域提取，刻线条纹的细化，亚像素直线定位及刻线交点的提取等算法。

第四章在分析现有摄像机标定方法及显微视觉标定的特点的基础上，给出了本文的显微视觉标定方法，建立了该标定方法的数学模型，分析了标定模板的选取及图像模板中理想像素点和实际像素点的计算，分析了图像的校正方法。

第五章给出了实验结果及分析。

第六章总结了本论文已取得的成就，分析了本文中尚未解决的问题。

第二章 回转误差显微视觉测量技术

本章在介绍主轴回转误差的评定方法和显微视觉测量的原理的基础上,提出本文的回转误差测量方法——基于显微视觉的回转误差测量法,并介绍该方法的测量原理、系统的软硬件组成和软件开发环境。

2.1 主轴回转误差分析

2.1.1 主轴回转误差来源分析

产生主轴回转误差的原因有很多,各种原因对主轴运动的影响也不尽相同,所以主轴回转误差的总体变化规律也是错综复杂的。主轴回转误差产生的原因,主要有主轴传动系统的几何误差、转动轴系质量偏心产生的误差、所受惯性力变形产生的误差、机床热变形产生的误差等确定性误差,例如主轴轴系中的轴套、主轴轴颈及滚动体的形状误差,特别是滚动件有尺寸误差时,主轴将产生有规律的位移。在一定时间内,主轴轴心位移量和位移方向不断变化,这种变化一般不是简单的正余弦周期信号,习惯上称为“漂移”。另一方面,主轴回转误差产生的原因还有许多随机性误差,如机械系统的振动对主轴回转的影响等^[20]。

从概率和数理统计的角度分析,可将主轴回转误差分为系统性差和随机误差两大类,主轴回转误差表示为:

$$\delta = \delta_{sys} + \delta_{rand} \quad (2-1)$$

式中: δ_{sys} 为系统性主轴回转误差; δ_{rand} 为随机性主轴回转误差;

文献[21]对主轴回转误差进行了大量的测量和分析。其测量方法是采用两个传感器在C6160普通车床上对高精度的标准棒进行主轴回转精度的测量,其中标准棒的9个圆柱面在TAYLOR HORSON73型高精度圆度仪上测得的圆度误差均在1 μ m以下。大量的结果显示:主轴回转精度中以周期性成分为主,并且主要是以1-4阶的低阶谐波为主;随机误差成分也占有一定的比重,对于高精度测量不能忽视。一般把以非简单正弦信号的周期性成分为主、同时含有相当比重的随机误差成分以及噪声的复合信号称为准周期信号。广义的准周期信号包括:(1)周期长度无规律变化的信号;(2)周期固定而幅值无规律变化的信号;(3)没有确定重复模式(周期或幅值等)的信号。

由以上分析可知,机床主轴回转误差信号是由叠加了白噪声的多个准周期信号组合而成的。

2.1.2 主轴回转误差的评定方法

主轴回转误差的评定是在测得主轴回转误差运动轨迹的条件下定量地求解其运动误差大小的一种方法^[25]。通常用主轴回转误差的特征值——回转精度来表示主轴回转误差的大小。主轴回转精度的定义方式主要有以下三种：

1. 以圆图像的圆度误差值作为主轴回转精度是较多采用的一种方法。传统测量方法的主轴回转误差的实际轨迹如图 2-1a)，是复杂而难以辨认的。因此要对轴系回转误差进行评定，方法如下：首先以主轴回转角作为自变量，将采集的位移量按主轴回转角度展开叠加到基圆上，形成圆图像，该法将轨迹复杂的主轴回转误差运动数据叠加到基圆上形成圆图像，从而可以直观看出主轴的回转误差。如图 2-1b)所示。本文所采用的测量方法中，靶标的运动轨迹是由安装偏心作为基圆，回转误差叠加在此基圆上的曲线，与图 2-1b)一致，本文采用圆度误差作为主轴回转误差的评定方法比传统测量方法更为简单。圆度误差的各种评定方法见 2.1.3 节。

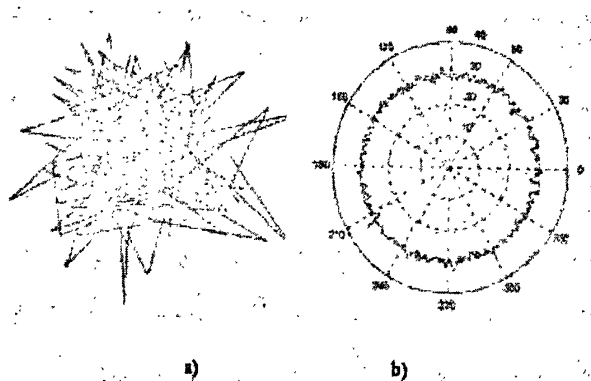


图 2.1 主轴回转误差图像与圆图像

2. 以最小包络圆的直径值作为主轴回转精度。如果直接用原始的主轴回转误差运动数据进行主轴回转误差的评定，可以通过求出运动轨迹的最小包络圆，以最小包络圆的直径来表示主轴回转精度。最小包络圆的直径值是用于比较和评价转轴回转误差的最客观指标^[26]。

3. 回转误差数据峰谷值差在单向测量中，可以用主轴回转误差运动数据峰谷值之差来表示主轴的回转精度。这种计算方法的中间处理环节少、计算简单、精确，能用于各种形式主轴回转误差的评定。

由于本文的测量方法中，靶标的运动轨迹是以安装偏小为基圆的半径，回转误差叠加在此基圆上，采用圆图像的圆度误差值比较直观。因此本文选用圆图像的圆度误差值作为主轴回转精度，即回转误差的评定方法。

2.1.3 采用圆度误差数据处理回转误差评定

在传统的测量方法中，主轴径向跳动误差反映在标准球或标准轴的轮廓的变化上，回转误差评定可以依据圆度误差的评定方法。本文的测量方法中，主轴径向运动误差反映在靶标的运动轨迹上，与传统测量方法类似，但没有引入标准球的表面形状误差。因此，在本文的测量方

法中，主轴回转误差的评定仍然可以使用圆度误差的评定方法。常用的圆度误差数据处理方法有如下几种：

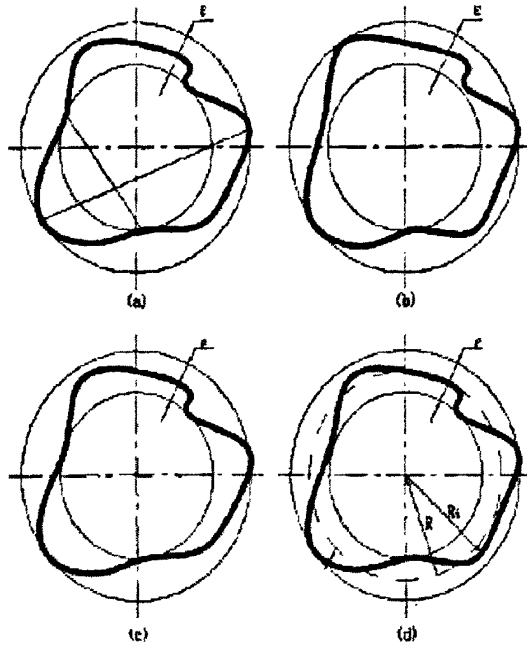


图 2.2 理想圆圆心确定法

1. 最小包容区域法

以包含实际轮廓(也称最小半径法)且半径差为最小的两同心圆的圆心为理想圆心，但是至少有四个实测点内外相间地分布在内外两个圆周上，如图 2-2 (a) 所示。

2. 最小外接圆法

以包含实际轮廓，且半径差为最小的外接圆的圆心为理想圆心，在该外接圆上至少有两点与实际轮廓相切，如图 2-2 (b) 所示。

3. 最大内切圆法

以内切于实际轮廓(至少有两点)且半径差为最小的最大内切圆圆心为理想圆的圆心，如图 2-2 (c) 所示。

4. 最小二乘法

被测实际轮廓的最小二乘圆圆心至轮廓的最大距离与最小距离之差即为圆度误差，如图 2-2 (d) 所示。所谓最小二乘圆是这样的一个圆(其圆心是唯一的)，实际轮廓各点到此圆的距离平方和最小。

$$\sum_{i=1}^n (r_i - R)^2 = \min, i = 1, 2, \dots, n \quad (2-2)$$

式中, r_i 为被测实际轮廓上第 i 点到最小二乘圆的圆心 O' 的距离, R 为最小二乘圆的半径, 如图 2.3 所示。

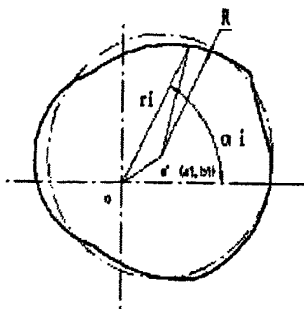


图 2.3 最小二乘法极坐标图

可以求出圆心坐标 (a, b) 如下:

$$\begin{cases} a = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n r_i \cos \theta_i \\ b = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n r_i \sin \theta_i \end{cases} \quad (2-3)$$

式中 r_i 表示被测实际轮廓上各点至坐标原点 O' 的距离。被测实际轮廓上各点至最小二乘圆圆心的距离为:

$$R_i = r_i - (a \cos \theta_i + b \sin \theta_i) \quad (2-4)$$

根据定义, 最小二乘法的圆度误差为:

$$\varepsilon = R_{\max} - R_{\min} \quad (2-5)$$

最小二乘法计得的理想圆圆心唯一, 精度高, 并有成熟计算公式。因此, 本文选用最小二乘圆法根据靶标的运动轨迹评定主轴的回转误差。

2.2 显微视觉测量的原理

2.2.1 显微视觉成像原理

显微系统是用来观测近距离微小物体的光学系统。它由物镜和目镜组成, 其成像原理如图 2-4 所示。当物体 AB 位于物镜的一倍和二倍焦距之间, 经物镜成一放大倒立的实像 $A'B'$ 于目镜物方焦平面处或焦平面之内, 再经目镜放大成一位于无限远或明视距离处虚像 $A'B''$ 。

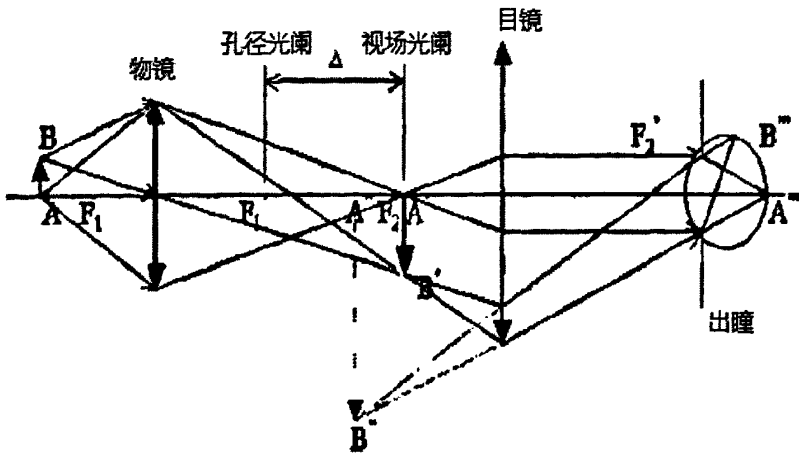


图 2.4 显微镜成像原理图

在实际显微镜中，为了减少各种像差，物镜和目镜都是复杂的透镜，由于目镜只是对经物镜放大的像进行进一步处理，同时在显微视觉中保证在 CCD 成像面上成实像，所以对被测物体起放大作用的主要是物镜。

2.2.2 显微视觉成像模型

描述 3-D 物体点到 2-D 图像平面点的模型称为成像模型（透视变换模型）。理想的投影成像是光学中的中心投影，也称为针孔模型。针孔模型假设物体表面的反射光都经过一个针孔而投影在像平面上，即满足光的直线传播的条件。针孔模型主要由光心、成像面和光轴组成，图 2-5 是针孔模型成像原理示意图，其中的焦距等于光心到像面的距离，物距等于光心到物面的距离。实际摄像系统通常由透镜或者透镜组合而成，其中的物距、像距和焦距满足高斯成像公式，但是透镜成像与针孔成像两者的焦距不是一样的概念，在针孔成像中焦距等于像距，而在透镜成像中，焦距并不等于像距。但两者都满足像点是物点与光心的连线与图像平面的交点。因此，可以用针孔模型作为摄像机成像模型。

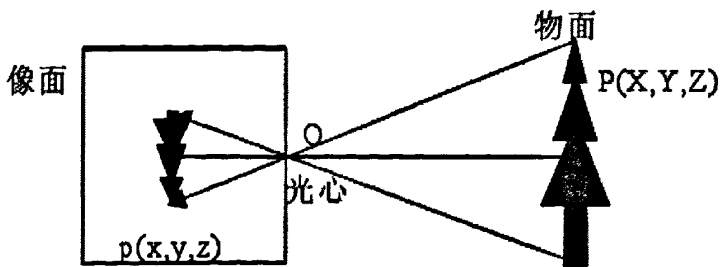


图 2.5 针孔成像模型

设物点坐标为 $P(X, Y, Z)$ ，像点坐标为 $p(x, y, 0)$ ，投影中心为 $O(0, 0, f)$ ，则像点与物点对

应关系为:

$$\begin{cases} x = f \frac{X}{f-Z} \\ y = f \frac{Y}{f-Z} \end{cases} \quad (2-6)$$

在无穷远视场和大伸缩比假设满足的情况下, 上式可以表示为:

$$\begin{cases} x = -f \frac{X}{Z} \\ y = -f \frac{Y}{Z} \end{cases} \quad (2-7)$$

2.2.3 显微视觉测量精度分析

CCD 和图像采集卡分辨率确定后, 在不超过衍射极限的情况下, 放大倍数越大, 测量精度越高, 但被测的视野越小。图 2-6 为成像面、焦距、视野、景深等之间的相互关系。

焦距、工作距离、视野范围和成像面大小之间满足如下关系:

$$F_1 = v * D / V \quad F_2 = h * D / H$$

其中, F_1, F_2 为水平和垂直方向焦距, D 为最大工作距离, $v * h$ 为 CCD 像面大小, 而 $V * H$ 为视野 FOV。

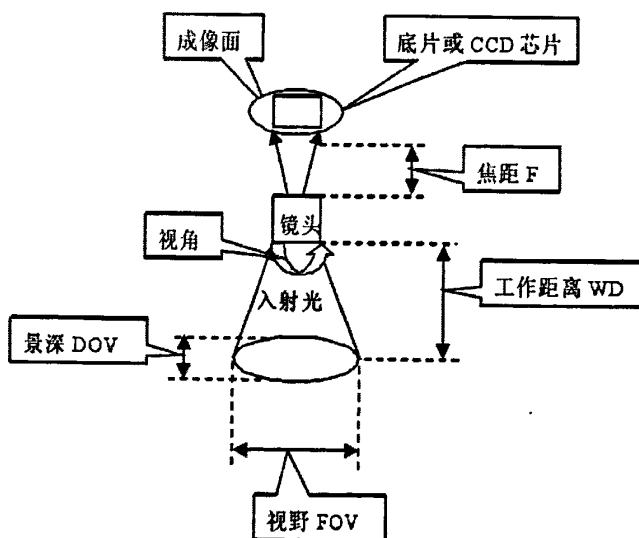


图 2.6 CCD 成像示意图

选择镜头焦距时,也可以根据下式计算:

$$F = \frac{WD}{M + 2 + \frac{1}{M}} \quad M = \frac{L}{FOV} \quad (2-8)$$

其中, L 为 CCD 成像部分长边(mm), FOV 是水平视场(mm)。

如果已知视野范围 V 和 CCD 芯片的像素数量 M , 则由式(2-9)可以计算像素值 P :

$$\begin{aligned} P_x &= V_x / M_x \\ P_y &= V_y / M_y \end{aligned} \quad (2-9)$$

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

或者知道视野 V 及其测量的精度 T , 可以参考下式计算所要选取 CCD 的像素大小 M

$$\begin{aligned} M_x &= V_x / T_x \\ M_y &= V_y / T_y \end{aligned} \quad (2-10)$$

理论上说, 显微镜的放大倍数越大, CCD 的像素越多, 测量精度就越高, 但是放大倍数越大, 视野越小, 而且光学系统像差、球差及衍射现象的存在限制了光学放大倍数不能无限增大。尽管如此, 测量时将被测参数范围内的物体尽量充满 CCD 芯片中的有效成像面, 可在同样的硬件条件下, 获得最好的测量精度^[25]。

2.3 显微视觉回转误差测量原理及系统硬件组成

传统的测量方法都是通过对标准球或标准轴外轮廓的测量间接获得主轴的回转误差, 这种方法对标准球的精度和测量过程中的安装有很高的要求, 采用误差分离技术对原始数据的处理也较复杂。本文提出一种基于显微视觉测量技术的主轴回转误差测量方法。这种方法不需要使用标准球或标准轴, 可以对主轴回转误差进行直接测量, 避免传统测量方法中必不可少的标准球安装偏心 and 形状误差的分离, 测量结果将更加真实、准确。

2.3.1 基于显微视觉的回转误差测量原理

基于显微视觉的回转误差测量系统由十字测微尺靶标、工业显微镜头、CCD 摄像机、调整装置和计算机组成, 如图 2-7 所示。

系统各部分具体功能如下:

1) 十字测微尺安装在标准心轴端面的中心, 作为摄像机拍摄的靶标。主轴旋转时, 由于靶标的安装偏心 and 主轴回转误差的存在, 十字测微尺会有偏离理想轴心的误差运动, 由靶标的运动轨迹可以计算出主轴的回转误差。

2) 工业显微镜头作为摄像机的镜头, 用于调整摄像机的视场, 使视场小于等于 1mm。测量

前, 调整显微镜头和摄像机的位置, 使测量标记位于视场的中央。

3) 摄像机用于主轴旋转时连续拍摄由工业显微镜头放大后的靶标的图像, 这些图像记录了靶标的运动轨迹。

4) 调整装置用于装载摄像机和显微镜头以及调整摄像机的位置。测量前调节调整装置, 使摄像机对准靶标中心。

5) 最后由计算机处理摄像机获取的图像, 由每幅图像可识别出测量标记在对应时刻的位置, 这些位置就是测量标记的运动轨迹, 最终由测量标记的运动轨迹计算出主轴的回转误差。

对主轴的回转误差进行测量时, 图像传感器检测到的十字测微尺的两条长刻线的交点经图像处理成为一个特征点。它的运动在水平和垂直方向上的分量可以用下列数学表达式描述:

$$\begin{cases} x = E \cos(2f_0 t) + \delta_x \\ y = E \sin(2f_0 t) + \delta_y \end{cases} \quad (2-11)$$

式中 f_0 为主轴回转频率, E 为测微尺十字刻线交点相对于理论轴线的偏心, δ_x 与 δ_y 分别为主轴回转误差 δ 在 x 与 y 方向的投影。安装偏心在后期的处理当中可由计算得到, 可以很方便、直观地显示出一个半径为 E 的基圆误差图。

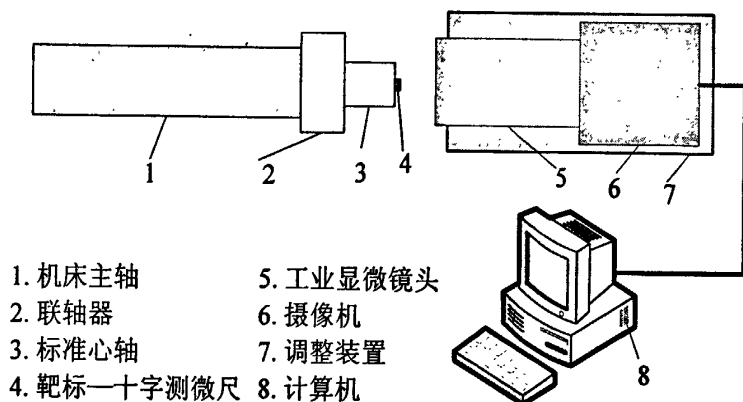


图 2.7 测量系统硬件原理图

2.3.2 摄像机靶标—十字形测微尺

为获取主轴回转过程中轴心的运动轨迹, 需要高精度的靶标。十字交叉线, 圆形, 网格等都可以作为靶标。其中十字刻线容易加工, 特征容易识别。测微尺上的刻线加工精度高, 平行刻线的间距可以用于摄像机标定, 获取图像单位像素代表的实际尺寸, 简化系统的标定。因此, 本文选用十字形刻线作为靶标上的特征目标。

测微尺是作为标准用的长方形刻尺。测微尺可以扩大显微镜的使用功能, 对微观尺寸进行

定量分析。与目镜测微尺适当配合，可以测量细微物质的长度、直径和面积等。如图 2-9 所示的十字测微尺，X 方向 10mm 分为 100 格，Y 方向没刻度。

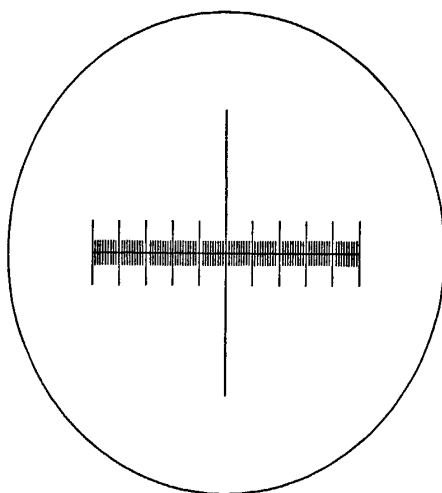


图 2.8 十字测微尺

测量时，拍摄一系列测微尺刻线图像后，需要从每幅图像中提取最长两条刻线的交叉点，从交叉点的运动轨迹可以提取主轴的回转误差。

2.3.3 工业显微镜头

镜头的质量直接影响到机器视觉的整体性能，选用镜头主要根据镜头的几个参数来确定。一般情况下，考虑镜头的成像面、焦距、视角、工作距离、视野和景深等参数。镜头的焦距与视野成反比，而与最小工作距离成正比，市场上常见型号为 50mm、25mm 和 16mm 的镜头，16mm 的镜头焦距最小，而视角、视野最大，但最小工作距离最近，50mm 的镜头焦距最大，其视角、视野最小，而工作距离最远。

镜头的选用原则是：工作距离越近越好、镜头畸变越小越好、视野越大越好。由于三者不可能同时满足，所以在选择显微视觉用镜头的时候，优先考虑镜头畸变因素。在定焦和变焦镜头的选择中优先选用定焦镜头，对精度要求高的场合，还可以选用物方或者像方远心物镜，消除物距、像距的误差对测量精度的影响，当然，成本会随之增加。

显微镜是一种应用非常广泛的光学仪器，它通过光学系统的作用放大被观察的对象，对微观组织结构进行显示，从微观形态来认识和研究对象的特性。用于显微测量的物镜，一般将孔径光阑设在物镜的像方焦平面处，以形成物方远心光路，即使物距发生改变，像距也发生改变，但像高并没有发生改变，即测得的物体尺寸不会变化。因此，在测量过程中主轴的轴向跳动不会影响靶标在 CCD 中的成像大小。此外，远心镜头用于工业精密测量，畸变极小。

在本文中，显微镜的主要目的是测微尺靶标进行放大，获得较小的视野，从而得到较高的

测量精度。为了便于测量系统的安装，本测量系统选用 AFT 工业显微镜头，如图 2.9 所示。工业显微缩放镜头具有大倍率、景深大、镜头畸变小、超低失真设计和采用焦阑法。由于采用了远心光路，测微尺靶标安装在主轴端面时沿轴线微小的运动不会影响靶标的成像。

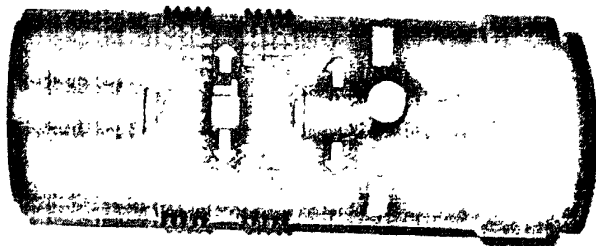


图 2.9 工业显微镜头

2.3.4 CCD 摄像机

CCD 是电荷耦合器 (Charge Coupled Device) 的简称，是一种利用光电效应原理来实习图像摄取的专用芯片。CCD 器件的结构就是将许多基本独立的光电转换单元排列在一个平面上，这些纵横排列的单元集成几十万、几百万甚至几千万个光电二极管及译寻址电路。这些基本微小单元称之为像素，像素的数目越多则成像的清晰度越高，成像的质量就越好。

CCD 的选择要根据系统的要求，综合考虑镜头和图像采集卡来选择 CCD 相机的参数。CCD 的基本参数包括：

1. 单色/彩色 彩色相机适用于提取场景中颜色信息进行简称和识别的场合。但是选择彩色摄像机就意味着更高的价格和更多的处理时间。黑白相机只能生成灰度图像，相对于同精度的彩色相机来说，黑白相机具有成本低、数据量少、速度快等优点。对于本课题的测量系统来说，所关心的就是目标对象的形状和和位置信息，与颜色无关，因此选择黑白 CCD。
2. 分辨率 一般的 CCD 摄像机所采用的制式为标准的电视制式 NTSC/PAL, 因此 CCD 的分辨率除了以像素表示以外，更多的是用电视图像的分辨率，即电视线 (TVL) 来表示。所谓电视的分辨率是指画面分辨黑白相间条纹的能力。常用黑白摄像机的分辨率一般为 380~600 线，数值越大成像越清晰，一般的监控场合，400 线左右的黑白摄像机就可以满足要求，对于特殊场合，为了获得更清晰的图像，应选择 600 线以上的摄像机。
3. CCD 尺寸 CCD 摄像机成像尺寸常用的有 2/3"、1/2"、1/3"、1/4" 等规格，对应的 CCD 芯片尺寸为 8.8mm*6.6mm、6.4*4.8mm、4.8*3.6mm、3.6*2.7mm 等，成像尺寸越小，摄像机的体积可以做得越小，当摄像机的空间分辨率很高的时候，不应该选择尺寸过小的 CCD 芯片，因为这样的芯片像素的集成度过高，因为像素的尺寸过小，会导致成像不准确，噪音过多。

4. 灵敏度 灵敏度也称为最小照度, 是 CCD 对环境光线的敏感程度, 或者说是 CCD 正常成像时所需的最弱程度。照度的单位是勒克斯 (LUX), 数值越小, 摄像机越灵敏。
5. 快门速度 CCD 芯片摄取每一帧图像的曝光时间即位快门速度。快门速度越高, 在拍摄运动物体时图像在 CCD 芯片上位置相对移动越小, 得到的运动物体图像就越清晰。对本测量系统来说, 快门的速度要求比较高。

除了上述因素外, 还要考虑扫描频率、信噪比、CCD 与图像采集卡之间的接口以及 CCD 与镜头间的接口等因素。

根据以上要求, 本文所选用的 CCD 为 TOPICA 公司生产, 型号为 TP-505D/3D 的 CCD 芯片。规格是 1/3", 电视制式为 PAL/CCIR, 分辨率为 768*576。在视场为 0.7*0.5mm 的情况下, 该 CCD 的测量精度可以达到 1 μ m, 采用亚像素定位技术后可以达到更高的精度。

2.3.5 图像采集卡

图像采集卡是机器视觉硬件的重要组成部分, 具有控制摄像机拍照、数字化视频信息等功能。它是连接图像采集和处理分析部分的桥梁, 同时也是机器视觉系统中最为昂贵的部件之一, 在降低系统硬件成本、提高性价比方面占着举足轻重的左右。图像采集卡接收从 CCD 摄像头中输入的模拟信号, 由 A/D 转换为离散的数字信号, 将离散的信号存储在图像的一个或者多个存储单元中, 当计算机发出传送指令时, 经过 PCI 总线将图像信息传到计算机内存以便于计算机的运算处理, 或者直接送到显示卡上进行显示。

考虑到系统的兼容性和系统的要求, 本文采用 NI 公司的 PXI-1409 图像采集卡。此图像采集卡支持多种视频制式: PAL, NTSC 等。它不但能够输出四路模拟信号, 还具有外部触发功能, 并且通过 RTSI (实时系统总线) 与运动控制卡连在一起相互触发, 从而完成视觉系统与运动控制系统的相互的数据信号交换功能。此图像采集卡支持的软件开发平台有: LabView、LabWindows/CVI、Visual C++、Visual Basic、Borland C++。

本系统对图像采集卡的设置参数如下:

1. 设置输入信号模式: PAL;
2. 设置图像采集窗口的最大范围: 768*576;
3. 设置图像保存格式: PNG;
4. 缩放的比例: 1: 1;
5. 图像的深度: 8 位。

2.3.6 光源系统设计

光源是视觉测量中的重要组成部分, 照明结构设计是视觉测量中的重要环节, 在主动视觉测量中, 采用人工光源实现照明。由于没有通用的机器视觉照明设备, 所以针对每个特定的应

用实例，要选择相应的照明装置，以达到最佳效果。

由于显微物镜的视场一般比较小，而且要求像面上有均匀的照度，因此显微系统要求成像光束无渐晕，除此之外，要保证有足够的光能量；足够大的照明范围；被照明物体上各点发出的光束应充满物镜的入瞳；尽可能地限制视场以外的杂光进入视场，以免降低像面的对比度；还要满足仪器尺寸布局要求等。

本测量系统选用 AFT-RL200 高亮度曲颈 LED 光源，如图 2-10 所示。

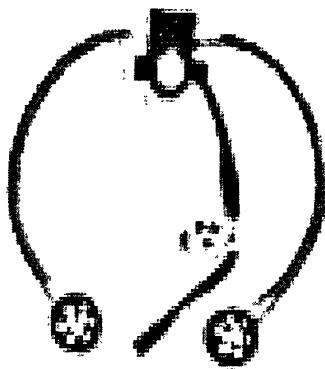


图 2.10 AFT-RL200 曲颈 LED 光源

AFT-RL200 高亮度曲颈 LED 光源是专为机器视觉、工业检测、显微成像设计的，低温、均衡、无闪烁，无阴影。每一颗 LED 均经过分光测色仪器的筛选，保证了 LED 灯高亮度的一致性、一致性的色温，确保 LED 光源的使用寿命，良好的聚光性能从而显著提高图象质量。

AFT-RL200 的技术指标如下：

灯的颜色为红色；输入电压为 7V；亮度连续可调；尺寸(mm)：565×25×35；各曲径长约:230mm；有效光斑直径：30mm

2.4 测量系统软件组成及软件开发环境

2.4.1 测量系统软件组成

软件是视觉测量系统的核心部分，从功能上划分如图 2.11 所示。

1) 摄像机标定模块

建立摄像机坐标系与图形坐标系的对应关系，标定摄像机镜头的畸变系数。

2) 图像获取模块

通过图像采集卡和 CCD 相机，获取靶标在运动过程中的图像。

3) 特征提取模块

从靶标运动轨迹的图像中提取表征靶标运动轨迹的特征点坐标。

4) 回转误差分析模块

利用从图像中提取的特征点坐标，分析和计算主轴的回转误差。

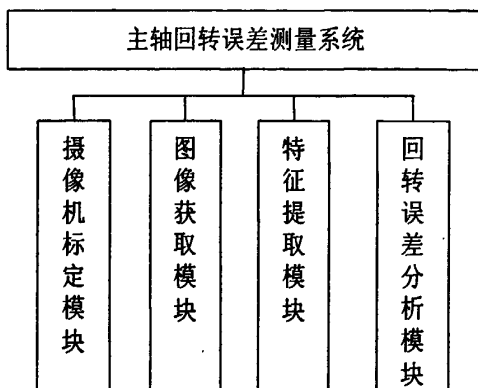


图 2.11 系统软件组成框图

考虑到测量系统软件需要访问计算机硬件，对性能要求较高，本文选用 Visual C++ 作为开发环境；另外为了重用一些通用的图像处理和数学计算的算法，减少不必要的编码，本文使用了 OpenCV 开源库。

2.4.2 Visual C++

Visual C++ 是一个功能强大的可视化软件开发工具。自 1993 年 Microsoft 公司推出 Visual C++1.0 后，随着其新版本的不断问世，Visual C++ 已成为专业程序员进行软件开发的首选工具。从底层软件到上层直接面向用户的软件都可以用 VC 开发，而且强大的调试功能也为大型复杂软件的开发提供了高效的排错手段，它是目前综合性最高、最强大、也是最复杂的软件开发工具之一，应用极为广泛。Visual C++ 不但具有程序框架自动生成、灵活方便的类管理、代码编写和界面设计集成的功能、可开发多种程序（应用程序、动态链接库、组件开发）等优点，而且通过简单的设置就可使其生成的程序框架支持数据库接口、组件等。另外 Visual C++ 还具有如下几个方面的优势，也是本文选用 Visual C++ 的几个因素：

首先，Visual C++ 使用的 C/C++ 语言是运行效率最高的高级语言，程序与代码的可复用性强，生产效率高，非常适合大型软件的开发。

其次，Visual C++ 向用户提供了一个庞大的 MFC (Microsoft Fundamental Class) 类库^[28]。该类库封装了绝大部分 Windows 的底层 API 调用，使得开发 Windows 程序条理清晰，快捷方便。

2.4.3 OpenCV

OpenCV (Open Source Computer Vision Library) 是 Intel 开发的一套基于 C/C++ 语言的图像处理 and 计算机开源视觉函数库，它由一系列 C 函数和少量 C++ 类构成，实现了图像处理和计算机视觉方面的很多通用算法^[29]。OpenCV 拥有包括 300 多个 C 函数的跨平台的中、高层 API。它不依赖于其它的外部库。OpenCV 提供的视觉处理算法非常丰富，并且以 C 语言编写，

加上其开源的特性，处理得当，不需要添加新的外部支持也可以完整的编译链接生成执行程序，所以很多人用它来做算法的移植总的来说，OpenCV 作为一个基本的计算机视觉、图像处理和模式识别的开源项目，可以直接应用于很多的领域，是作为二次开发的理想工具。在实际的应用中有着如下几个方面的优势：

- 1) 开放的 C/C++ 源码；
- 2) 基于 Intel 处理器指令集开发的优化代码；
- 3) 非常多的图像处理通用算法；
- 4) 强大的图像和矩阵运算能力；
- 5) 方便灵活的用户接口；
- 6) 同时支持 Windows、Linux、MacOS 平台。

第三章 靶标图像处理与特征提取

测量中拍摄的靶标运动轨迹图像中包含了靶标在每一时刻的位置信息，根据靶标的运动轨迹可以计算出主轴的回转误差。此外，对摄像机进行标定时也需要获得标定模板图像中所有特征点的坐标值。因此，摄像机获取靶标运动轨迹图像以及获取标定模板图像后，需要从每幅图像中提取表征靶标位置的点特征和标定模板图像的特征点的坐标值。一般情况下，在对图像进行特征提取前需要进行滤波和图像分割等预处理。图像特征提取的准确性必然受到预处理效果的影响，预处理效果不佳的图像，图像特征甚至无法提取。常用的图像特征有颜色特征、纹理特征、形状特征和空间关系特征。本文根据测微尺和标定模板的形状特征，采用图像细化、最小二乘法直线拟合及求直线交点等步骤，从图像中提取线条交叉点的坐标。

3.1 图像处理流程

测量系统采用十字测微尺作为测量时的靶标，采用网格分划板作为标定模板。图像处理的目的是提取十字测微尺和网格分划板上刻线的交点。图 3-1 是系统图像处理和特征提取的流程。

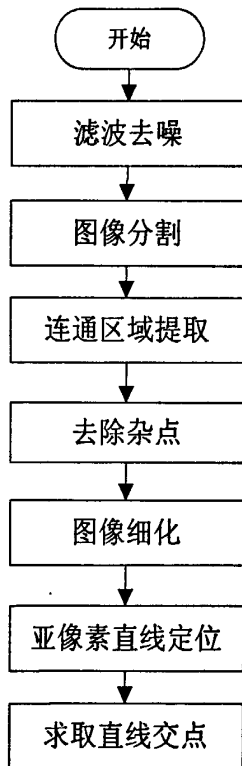


图 3.1 图像处理流程

- 1) 对原始图像进行滤波, 消除噪音;
- 2) 对图像进行自适应阈值分割, 目标图像中的线条特征从背景图像中分离出来;
- 3) 为了去除图像中的杂质点, 提取二值图像中的连通区域, 将图像中的每个连通的区域内的像素点分别提取出来;
 - 4) 根据连通区域的面积大小, 面积很小的区域作为杂质点去除;
 - 5) 图像细化, 得到线条的骨架, 实现对线条位置的粗定位;
 - 6) 采用亚像素技术定位每条线条的直线位置, 实现对线条位置的精确定位;
 - 7) 由相交直线的直线方程求解直线交点, 完成交点特征的提取。

3.2 图像噪声及滤波处理

由于拍摄环境以及设备质量等因素的影响, 使得数字化后的图像不可避免的带有各种噪声, 为了减少噪声的影响, 图像平滑滤波是图像处理的第一步。

3.2.1 常见图像噪声的分类

在图像的获取过程中由于环境因素、成像设备和 CCD 传感器自身质量的影响, 在图像的传输过程中因传输信道的干扰等, 都可能出现噪声。去除图像噪声是对图像进行预处理的重要方面。在机器视觉检测系统中, 为了提高精度, 必需对噪声加以抑制, 以便对零件的边缘进行精确的定位。

图像噪声按其产生原因分为外部噪声和内部噪声。外部噪声指系统外部干扰波或经电源串进系统内部而引起的噪声。

内部噪声分为下列几种:

1. 电器的机械运动产生的噪声。包括机械震动引起电流变化产生的噪声, 磁头或磁带起的抖动噪声等。
2. 系统内部设备电路引起的噪声。包括交流电源、偏转系统和电路引起的噪声等。
3. 元器件本身引起的噪声。
4. 由光、电基本性质引起的噪声。包括电流产生的散颗粒及热噪声, 以及光子产生的噪声等。

3.2.2 平滑滤波

图像的滤波去噪算法视其噪声本身的特性而定, 可在空间域或在频率域采用不同的措施。空域滤波是在图像空间借助模板进行邻域操作完成的, 根据其特点一般可分为线性和非线性两类。

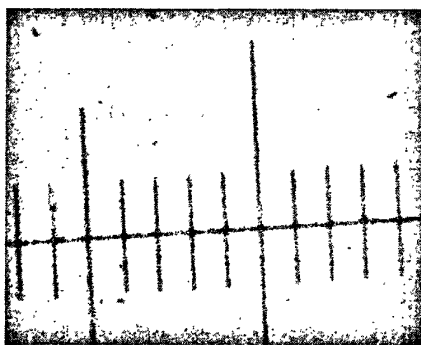
线性滤波器的数学形式简单而且它具有某些理想特性, 这使得它容易设计和实现, 线性平

平滑滤波器对去除高斯噪声有很好的效果，且在大多数情况下，对其他类型的噪声也有很好的效果。然而，当信号中含有非叠加性噪声时，例如由系统的非线性引起的噪声或存在非高斯噪声等情况时，线性滤波器的处理结果就很难令人满意。预处理图像时，线性滤波器会破坏边缘，而且不能有效滤除脉冲噪声。就是说，线性滤波器在信号与噪声彼此相关情况下不能很好工作。

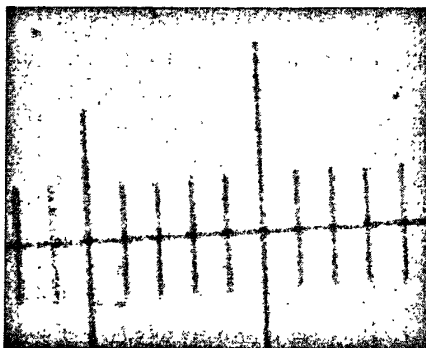
最简单的线性滤波器是局部均值运算，一般而言，邻域 N 的大小控制着滤波程度。作为消除大噪声的代价，大尺度滤波器也会导致细节的损失和计算量的增加。均值滤波的主要问题是有可能模糊图像中的尖锐不连续部分。

如果既要消除噪声又要保持图像的细节，可以使用非线性滤波算法。非线性滤波器具有抑制噪声和保存细节的双重功能。中值滤波是最简单的非线性滤波器，其基本思想是用像素点邻域灰度值的中值来代替该像素点的灰度值。中值滤波法在去除脉冲噪声、椒盐噪声的同时又能保留图像的边缘细节，所以产生的模糊比较少。中值滤波对模板大小的选择也很关键，模板太大有可能造成边界信息的丢失，并且由于计算量增大而使速度减慢；如果模板选的太小，则去噪效果不理想。

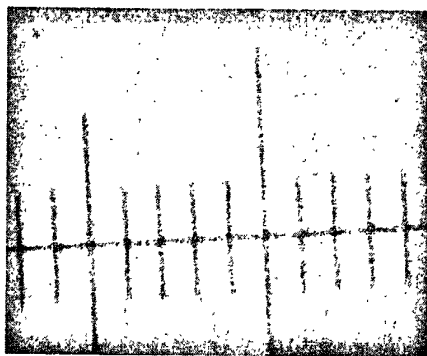
图 3-2a) 是原始的测微尺刻线图像，图 3-2b) 是采用均值滤波的效果，图 3-2c) 是采用中值滤波的效果，滤波模板的大小都是 9×9 。采用均值滤波后，图像中的线条明显的变模糊了，而中值滤波保留了更多的线条边缘细节。因此，中值滤波更适合与本课题中的测微尺刻线图像的滤波处理。



a) 原始图像



b) 均值滤波



c) 中值滤波

图 3.2 均值滤波与中值滤波对比

3.3 灰度阈值分割

图像分割是数字图像处理中的关键技术之一，是指把图像分成各具特点的区域并提取出感兴趣目标的技术和过程^[30]。它是进一步进行图像识别、分析和理解的基础。根据图像的局部区域像素的特征来分，图像分割可分为阈值分割、边缘检测、区域生长等。其中灰度阈值分割是使用最多的一种图像分割技术。通过阈值分割可以将测微尺刻线和标定模板特征从背景图像中分离出来。

3.3.1 灰度阈值分割法

灰度阈值分割法是一种简单的基于区域的技术，这种方法是把每个象素的灰度值与一个阈值 T 进行比较，根据它是否超过该阈值而将该象素归于两类中的一类。

阈值运算可以看作是一种对图象中某点的灰度函数，或者该点的某种局部特性(比如平均灰度)及该点在图象中的位置的检验，这种阈值检验函数可以记作：

$$T(x, y, N(x, y), g(x, y))$$

式中 $g(x, y)$ 是点 (x, y) 的灰度值， $N(x, y)$ 是点 (x, y) 的局部区域特性。

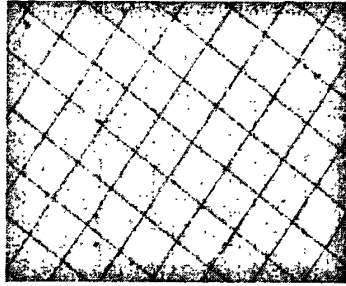
根据对 T 的不同约束，可以得到三种不同类型的阈值，即

- 1) 全局阈值 $T(g(x, y))$
- 2) 局部阈值 $T(N(x, y), g(x, y))$
- 3) 动态阈值 $T(x, y, N(x, y), g(x, y))$

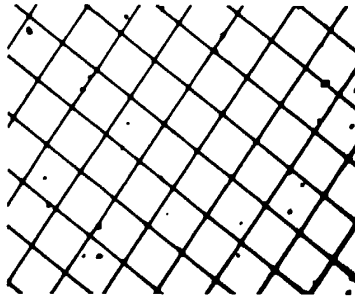
3.3.2 自适应灰度阈值分割

视觉测量系统中经常出现光照不均匀等情形，如图 3.3a)，局部有阴影、反光等现象。这种情况下用全局阈值分割是不合适的，全局阈值的结果如图 3.3b)，二值图像中线条变得很不均匀，影响后续特征提取的精度。采用自适应阈值分割的效果如图 3.3c)所示，保留了更多的原

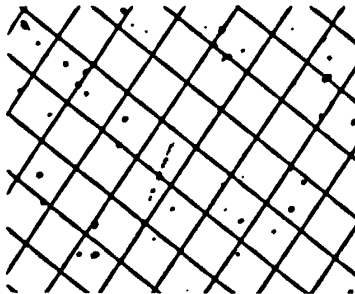
始图像中的图像灰度突变信息，这样虽然看起来图像中很多杂点，但线条非常均匀，更符合实际的刻线特征，而且图像中的杂点可以去掉，不影响后续的特征提取。



a) 原始图像



b) 全局阈值分割



c) 自适应阈值分割

图 3.3 阈值分割效果对比

局部阈值分割适用于灰度分布已知的场合，在视觉测量中很难满足这一点。动态阈值分割则不需要知道图像的灰度分布，图 3.3c) 是使用自适应灰度阈值分割的效果，这种方法考虑了局部灰度统计特征，自动产生局部的分割阈值，所以能比较好的分割光照不均匀的图像。

自适应灰度阈值分割法的步骤如下：

1. 把整个图像分成许多相等的子区域。
2. 对每个子区域，在包含它的邻域取一个合适的窗口进行局部灰度分析，采用最大类间方差确定局部的分割阈值，确定阈值后对子区域内所有象素作简单阈值分割。进行局部灰度分析

的窗口大小要选取合适,太大了处理效果会和全局阈值分割一样,太小了则二值化图像中会留下很多灰度变化的细节,类似于边缘检测。

3. 依次处理每个子区域,直至所有子区域即整幅图象处理完毕。

3.4 连通区域提取

经过阈值分割的二值图像,各个目标被分割成彼此分离的连通区域,对连通区域的提取在机器视觉领域里是一种非常重要的处理方法,连通区域提取过程就是要寻找图像中所有的目标对象。通过某种方法把各个连通区域区分开来,分别研究各个连通区域的性质是提取图像特征、进行目标检测和识别的重要一步。

在本文中,连通区域提取主要有两个目的:1)由于测微尺靶标标定模板表面细小的污渍和加工缺陷,在显微图像中特征较明显,采用一般的滤波方法无法去除,阈值分割后在二值图像中成为一些面积较小(约几十到几百像素)的斑点。通过阈值分割提取图像中的每个区域,判断每个区域的面积大小,可以将面积较小的区域作为的杂点去除。2)在图像细化并断开刻线交叉点后,每个连通区域都是可以用于拟合直线的曲线轨迹点,需要先将这些连通区域提取出来才能得到曲线轨迹点的坐标,然后进行直线拟合。

3.4.1 连通成分标记

假设 B 是一幅二值图像,而且 $B[r,c] = B[r',c'] = v$, 其中 $v=0$ 或者 $v=1$ 。如果存在一个像素序列 $[r,c] = [r_0,c_0], [r_1,c_1], \dots, [r_n,c_n] = [r',c']$, 其中 $B[r_i,c_i] = v, i = 0, \dots, n$, 并且对任何 $i=1, \dots, n$, $[r_i,c_i]$ 与 $[r_{i-1},c_{i-1}]$ 都是相邻的,则像素 $[r,c]$ 与像素 $[r',c']$ 通过值 v 连在一起。像素序列 $[r_0,c_0], \dots, [r_n,c_n]$ 就形成了从 $[r,c]$ 到 $[r',c']$ 的连通路径。一个值为 v 的连通成分,即值为 v 的像素集合 C , 集合中的每一对像素都通过值 v 相连接。图 3.4a 是一幅二值图像,内有值为 1 的五个连通成分。实际上这些成分是 8 邻域连通或者是 4 邻域连通。

1	1	0	1	1	1	0	1
1	1	0	1	0	1	0	1
1	1	1	1	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	1
1	1	1	1	0	1	0	1
0	0	0	1	0	1	0	1
1	1	0	1	0	0	0	1
1	1	0	1	0	1	1	1

a) 二值图像

1	1	0	1	1	1	0	2
1	1	0	1	0	1	0	2
1	1	1	1	0	0	0	2
0	0	0	0	0	0	0	2
3	3	3	3	0	4	0	2
0	0	0	3	0	4	0	2
5	5	0	3	0	0	0	2
5	5	0	3	0	2	2	2

b) 连通成分标记

图 3.4 含五个连通成分的二值图像

连通成分标记是对二值图像 B 做标记,生成标号图像 LB , 标号图像中每个像素的值就是像

素所在连通成分的标号。

标号是专门命名一个实体所用的符号。虽然可以用字符标记，但正整数用起来更加方便，因此常常用正整数标记连通成分。图 3.4b) 显示的是连通成分标记，是对图 3-4a 的二值图像进行标记的结果。

连通成分标记有很多种不同的算法。一些算法假设内存能够载入整幅图像，使用简单的递归算法每次处理一个成分，可对整幅图像进行扫描。有点算法针对较大的图像，由于内存有限而不能载入整幅图像，算法每次只处理图像种的两行。还有其他一些算法适合在大型并行机上使用，采用并行传播策略。本节讨论递归搜索算法。

3.4.2 递归标记算法

假设 B 是 MaxRow+1 行、MaxCol+1 列的二值图像。我们希望找到像素值为 1 的连通成分，并输出标号图像 LB，在标号图像种每个像素的值就是连通成分的标号。参考 Tanimoto 所著的《Artificial Intelligence》^[31]，算法策略是：首先把二值图像的像素值取反，使原来值为 1 的像素变成值为-1。这样就可以把未处理的像素（值为-1）与成分标记 1 分开。由函数 negate 实现这一功能，输入的是二值图像 B，输出的是取负后的图像，这个图像最后成为标号图像 LB。寻找连通成分的过程变成了寻找 LB 中值为-1 的像素的过程，把找到的像素赋以一个新的标号，并调用过程 search 取寻找值为-1 的邻点，并对这些邻点递归的重复执行这个过程。用函数 neighbors (L, P) 中的 L 和 P 确定行像素的位置。该函数返回所有邻接像素的位置，可以是 4 邻域也可以是 8 邻域，只返回二值图像中合法的邻接点位置。函数返回邻点的顺序与扫描顺序一致，如图 3.5 所示。

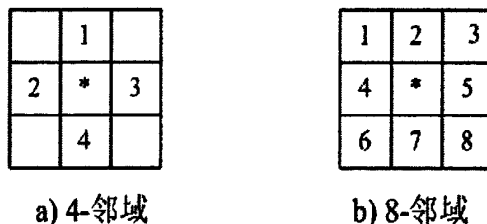


图 3.5 像素邻点扫描顺序

图 3.6 以二值图 3.4 的第一个成分（左上角区域）为例，显示递归连通标记算法的运行过程。递归连通成分标记算法包括六个程序块，其中 negate、print、和 neighbors 省略，recursive_connected_components、find_components 和 search 用伪代码描述如图 3.7 所示。

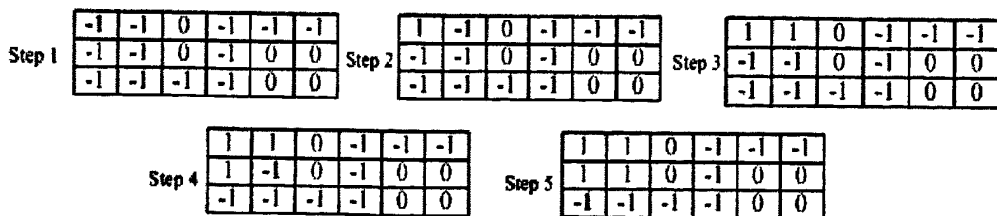


图 3.6 递归标记算法的前 5 步

B 是原始二值图像。

LB 是连通成分标号图像。

```
procedure recursive_connected_components(B, LB);
```

```
{
```

```
  LB := negate(B);
```

```
  Label := 0;
```

```
  find_components(LB, label);
```

```
  print(LB);
```

```
}
```

```
procedure find_components(LB, label);
```

```
{
```

```
  for L := 0 to MaxRow
```

```
    for P := 0 to MaxCol
```

```
      if LB[L,P] == -1 then
```

```
        {
```

```
          label := label+1;
```

```
          search(LB, label, L, P);
```

```
        }
```

```
      }
```

```
procedure search(LB, label, L, P);
```

```
{
```

```
  LB[L, P] := label;
```

```
  Nset := neighbors(L, P);
```

```
  for each[L1, P1] in Nset
```

```
    {
```

```
      if LB[L1, P1] == -1;
```

```
      then search(LB, label, L1, P1);
```

```
    }
```

```
}
```

图 3.7 递归标记算法

3.4.3 改进后的连通区域提取算法

连通成分标记虽然能标识每个连通区域，但由于生成的是标号图像，不便于对其中的每个区域进行处理和识别。连通区域提取是在二值图像中找出所有的连通成分，分别记录下每个连通成分内所有像素点在图像中的坐标位置，并把这些坐标值存入一定的数据结构，如数组、链表等。本算法由递归连通成分标记算法演变而来，目的是提取二值图像中每个连通区域内的所有像素坐标点，提取的坐标点用于直线拟合、特征点提取等分析和计算。

改进后的算法策略是：首先创建一个空的二重链表 TABLE，它将存放的每一个元素是一个线性表的地址，线性表内存放的是一个连通区域所有点的坐标。二重链表 TABLE 的数据结构如图 3.8 所示。具体处理过程如下：把二值图像取负，使原来值为 1 的像素变为 -1，这样把未处理的像素（值为 -1）与成分标记 1 分开。寻找连通成分的过程变成了寻找取反后图像中值为 -1 的像素的过程，把找到的像素的坐标值 (x, y) 放入一个新创建的线性表 LIST 中，并递归寻找值为 -1 的邻点，找到后将该像素的坐标值存入创建的线性表 LIST 中，并把该像素值改为 1，表示该像素已经处理过。递归返回时，将该线性表地址存入 TABLE 中。重复上述过程提取其他的连通成分。

提取连通成分后，后续的直线拟合等处理都可以从广义表 TABLE 中取出每个连通成分的所有坐标位置，即 TABLE 中每个 LIST 中的所有坐标点。

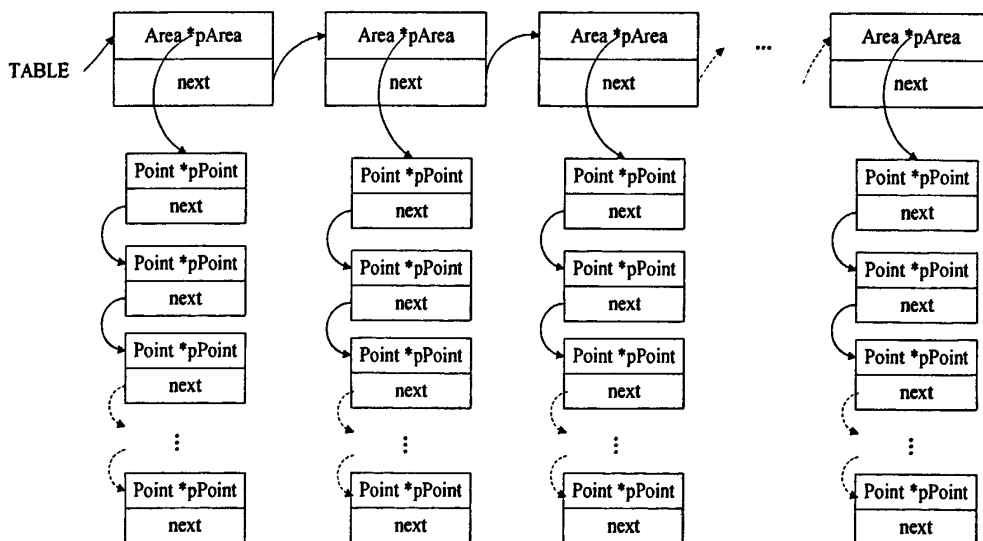


图 3.8 TABLE 二重链表数据结构

3.5 刻线条纹的细化算法

为了能快速准确地提取十字测微尺和标定模板中的线条信息，构造一种快速有效的细化算法是非常重要的。细化是在保持原来的区域形状的前提下，从原来的图中去掉一些多余的点。实际上，是保持原图的骨架。所谓骨架，可以理解为原图的中轴，例如长方形的骨架是它的长方向上的中轴线，正方形的骨架是它的中心点，圆形的骨架是它的圆心，直线的骨架是它自身，

孤立点的骨架也是自身。显然，本文中十字测微尺和网格标定模板图像经细化后得到的刻线骨架是若干条细线。

对细化的一般要求是：(1)保证细化后曲线的连通性；(2)保留原图的细节特征；(3)细化结果是原曲线的中心线；(4)保留曲线的端点；(5)细化处理速度快；(6)交叉部分中心线不畸变。针对各种不同的应用，国内外已发表了许多线细化算法，如经典细化算法^[32]，Deutsch 算法^[33]，Pavlidis 异步细化算法^[33]，Zhang 快速并行细化算法^[34]等。为了得到较好的细化效果和较快的处理速度，本文采用查表细化算法^[35]对测微尺图像进行细化处理。

3.5.1 查表细化算法

查表细化的原理是根据像素点的 8 个相邻点的情况来判断该像素点能否去掉。以图 3.9 为例，(1)不能删，因为它是个内部点，否则骨架会被掏空；(2)不能删，和(1)原因相同；(3)可以删，这样的点不是骨架；(4)不能删，因为删除后原来相连的部分断开了；(5)可以删，这样的点不是骨架；(6)不能删，因为它是直线的端点，如果删除了，最后整个直线也被删了；(7)不能删，因为孤立点的骨架就是自身。

总结如下：(1)区域内部点不能删除；(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，如连通分量不增加，则 P 可以删除。

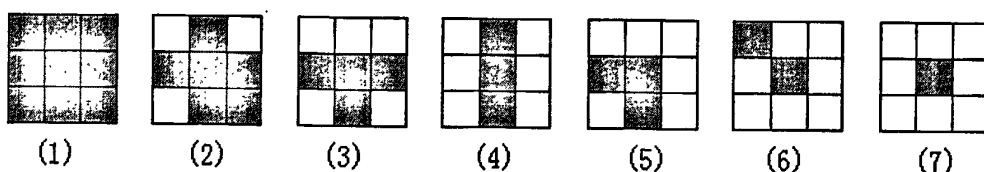


图 3.9 根据 8 个相邻点判断该点能否删除

P1	P2	P3
P4		P5
P6	P7	P8

图 3.10 八邻域模板

按顺序根据图 3.10 的 8 邻域值计算用于查表的索引值：

$$S = \sum_{i=1}^8 P_i \times 2^{i-1}$$

P1~P8 分别为取值为 0 或 1，则有 256 种索引与数值 0 到 255 一一对应。

根据上述判据，事先做出一张表，从 0 到 255 共有 256 个元素，每个元素是 0 或 1。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，则表示该点可删除，否则保留。查表的方法是，下标分别与象素的索引值 S 对应，数组元素值设为 0 表示该组合的中

心点应该保留，设为 1 则表示应该删除。这张表如下：

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

每次都逐行地将整个图像扫描一遍，对于每个点(不包括边界点)，计算它对应表中的索引，若为 0，则保留，否则删除该点。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。图 3.3c) 自适应阈值分割的图像采用查表法进行细化后的结果如图 3.11 所示。细化不但得到了线条的骨架，而且保证了区域的连通，交叉点也没有畸变。

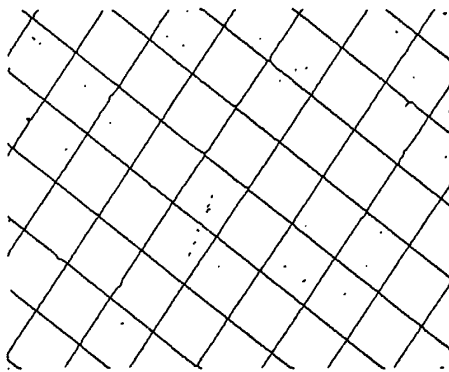


图 3.11 细化结果

3.6 亚像素直线位置检测

在测量视场一定的条件下，提高视觉测量系统的测量精度最直接的方法是提高 CCD 摄像机的分辨率。然而这种提高硬件分辨率的代价是相当昂贵的。而且在图像传输速度和图像存储容量方面都大大增加了对系统的要求。通过提高硬件分辨率的方法来提高测量精度是不经济的和有限制的。近二十年来，在数字图像处理领域，许多研究者试图利用软件处理的方法来解决图像中的高精度定位问题。如果能利用软件方法将图像上的特征目标定位在亚像素级别，就相当于提高了测量系统精度。对图像中目标进行高精度的定位成为了提高视觉测量系统测量精度的

主要环节之一。这种亚像素定位技术具有十分重要的理论意义和实践意义。

本文亚像素定位的主要目标是利用十字测微尺靶标图像细化后的刻线骨架，定位出刻线的亚像素精度位置，进而得到十字刻线交点和网格交点的亚像素精度位置，提高系统的测量精度。

3.6.1 亚像素定位原理及选用条件

亚像素理解为一种提高精度的算法，或者说一种可以使分辨率小于1个像素的图像处理技术。亚像素定位技术使用的前提是：目标不是由孤立的单个像素点，而必须是由特定灰度分布和形状分布的一组像素点组成，例如目标特征是圆点、角点、“十字”交叉点、直线、特征曲线等，有明显的灰度变化和一定的面积大小。目标特性主要分为基于几何特性，基于灰度分布特性和基于几何与灰度耦合特性等三类。本文可以利用十字测微尺和网格标定模板图像细化后骨架的直线形状特性，对刻线进行亚像素定位。

利用预知的目标特性，对图像目标进行处理分析（例如滤波噪声，突出特征，提取特征和拟合灰度特征等），识别并确定与目标特征最吻合的位置。在此分析过程中，采用浮点运算，可实现对目标优于整像素精度的定位。这种利用目标特性从图像中分析计算出最符合此特性的目标位置方法称为图像目标亚像素定位技术。

亚像素算法的建立和选择，是基于许多条件的。首先假设已经用普通的特征检测方法对目标进行了初步定位，即得到了整像素精度的定位，此过程称为粗定位。然后进行亚像素定位分析，作为细定位。

由于实际中存在的一些误差因素，如灰度量化误差和噪声等，因此使用亚像素定位技术并不能把目标定位到绝对准确的边缘位置上，其定位精度是有限的。通常情况下，亚像素算法的精度是通过实验仿真来检验的，即用已知精确位置的目标的图像中，在图像中叠加不同程度的噪声，然后用亚像素算法进行目标定位，最后根据统计该算法的定位精度。

3.6.2 常用亚像素算法分析

20世纪70年代开始，很多学者提出了许多有效的亚像素算法，如 Hueckel 用拟合参数方程的方法达到了亚像素精度定位^[36]；Tabatabai 和 Mitchell 提出了用灰度矩的思想来定位边缘到亚像素精度^[37]；Huertas 和 Medioni 使用 Laplacian Gaussian 模板合成边缘局部表面模型的方法构造了自己的亚像素检测算子^[38]；Englande 利用数字信号处理的方法对图像进行重新采样，也提出了一种亚像素检测算子^[39]；EP Lyvers 和 OR Mitchell 提出了空间矩的思想并构造了空间矩算子来进行亚像素定位^[40]；K Jensen 和 D Anatasious 采用非线性插值的方法达到亚像素检测精度^[41]；M Kisworo 和 S Venkatesh 等人提出了使用局部能量法来对边缘进行亚像素定位^[42]。近些年来，有很多学者研究了亚像素边缘定位的应用及其计算。现有的亚像素定位算

法可以分为矩方法、拟合法、相关算法等。其中拟合法可以利用图像的形状特征,对目标特征进行亚像素定位,而且算法实现简单,对噪音的抗干扰能力较强。本文采用最小二乘拟合法实现对测微尺刻线的亚像素定位。

3.6.3 十字形刻线的亚像素定位算法

在采用细化算法得到十字刻线的中轴线后,将中轴线上的点采用最小二乘法拟合出直线方程,然后通过两条垂直刻线对应的直线方程可以求解出亚像素精度的十字刻线交点坐标。

采用最小二乘法实现十字刻线交点的亚像素定位分为以下三步:

1. 采用查表法图像细化算法得到像素级精度的十字刻线的中轴线;
2. 提取每条刻线中轴线的坐标点;
3. 采用最小二乘法拟合直线,得到亚像素精度的十字刻线位置,拟合的直线方程,求解出两条最长刻线的交点,即得到亚像素精度的十字刻线交叉点的位置。

本节主要介绍第3步最小二乘法直线拟合及求取直线交点坐标。

设 x 和 y 之间的函数关系由直线方程 $y = a_0 + a_1x$ 给出。式中有两个待定参数, a_0 代表截距, a_1 代表斜率。对于等精度测量所得到的 N 组数据 $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, N$, x_i 值被认为是准确的,所有的误差只联系着 y_i 。下面利用最小二乘法把观测数据拟合为直线。

用最小二乘法估计参数时,要求观测值 y_i 的偏差的加权平方和为最小。对于等精度观测值的直线拟合来说,可使

$$\sum_{i=1}^N [y_i - (a_0 + a_1x_i)]^2 |_{a=\hat{a}}$$

最小即对参数 a (代表 a_0, a_1) 最佳估计,要求观测值 y_i 的偏差的平方和为最小。应有

$$\frac{\partial}{\partial a_0} \sum_{i=1}^N [y_i - (a_0 + a_1x_i)]^2 |_{a=\hat{a}} = -2 \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{a}_0 - \hat{a}_1x_i) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial a_1} \sum_{i=1}^N [y_i - (a_0 + a_1x_i)]^2 |_{a=\hat{a}} = -2 \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{a}_0 - \hat{a}_1x_i)x_i = 0$$

整理后得到正规方程组

$$\begin{cases} \hat{a}_0 N + \hat{a}_1 \sum x_i = \sum y_i, \\ \hat{a}_0 \sum x_i + \hat{a}_1 \sum x_i^2 = \sum x_i y_i. \end{cases}$$

解正规方程组便可求得直线参数 a_0 和 a_1 的最佳估计值 \hat{a}_0 和 \hat{a}_1 。即

$$\hat{a}_0 = \frac{(\sum x_i^2)(\sum y_i) - (\sum x_i)(\sum x_i y_i)}{N(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2}$$

$$\hat{a}_1 = \frac{N(\sum x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{N(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2}$$

亚像素的定位精度与参加拟合的点数及噪声有关，参加拟合的点数越多，直线的亚像素定位越精确，但运算所花费的时间也越多。噪声越小，定位精度越高。求得两条直线的方程 $y = k_1 x + b_1$ 和 $y = k_2 x + b_2$ 后，求解方程组

$$\begin{cases} y = k_1 x + b_1 \\ y = k_2 x + b_2 \end{cases}$$

得交点坐标 $(\frac{b_2 - b_1}{k_1 - k_2}, \frac{b_2 k_1 - b_1 k_2}{k_1 - k_2})$ 。

3.7 十字刻线交点提取过程

为获取两条长刻线交点的运动轨迹，需要将每幅图像中两条长刻线的交点作为特征点提取出来。以原始图像图 3.12 为例，在图像中提取特征点的步骤如下。



图 3.12 原始图像

- 1) 图像预处理，采用中值滤波法去除噪音。
- 2) 图像二值化，采用自适应阈值分割法，得到二值图像如图 3.13 所示。

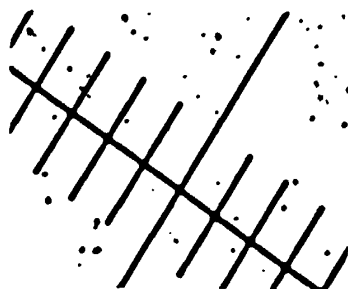


图 3.13 二值化图像

- 3) 删除杂质点。连通区域提取，根据每个区域的面积大小，将面积很小的区域作为杂质点删除，如图 3.14 所示。

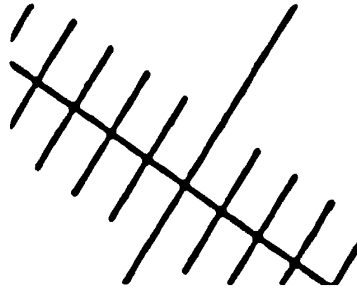


图3.14 清除杂质点后

4) 图像细化, 用查表法细化算法得到刻线的骨架, 如图 3.15 所示。

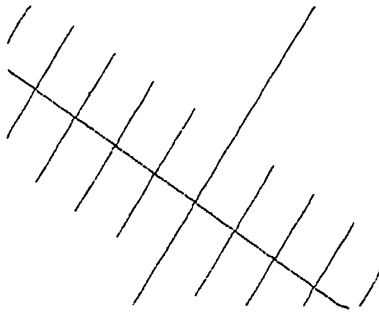


图 3.15 细化图像

5) 断开线条交叉点。断开交叉点的方法是: 用一个大小为 N 的窗口扫描图像, 判断位于窗口内的前景像素点的个数, 如果像素点个数大于 N 一定程度则认为当前位置是交叉点, 把当前位置的像素点用背景色代替。经过断开交叉点处理后, 图像中每一个连通区域是一小段线段。本文中取 $N=7$, 窗口内前景色的像素点个数超多 N 值的 1.5 倍, 则认为当前点是交叉点, 并用背景色代替, 效果结果如图 3.16 所示。

6) 提取每条线段的像素坐标。将图像中每个连通的区域提取出来, 存放到 3.4.3 节所述的二重链表中, 用于后面的直线拟合。

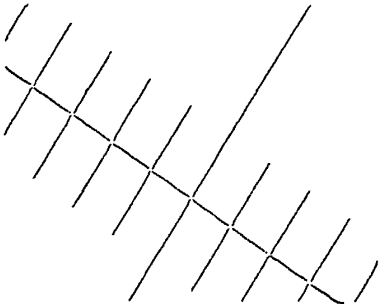


图 3.16 断开交叉点后的图像

7) 将提取出来的各个连通区域像素点分别采用最小二乘法拟合直线。

8) 将斜率相差很小而且距离接近的线段合并。即把用于拟合这些线段的所有像素点一起重新采

用最小二乘法拟合直线。

9) 以像素点中距离最远的两个点到直线的投影最为线段L的两个端点，则线段L对应于原始图像中的一条刻线。从上一步拟合的所有线段中通过比较线段的长度，得到两条最长的线段；

10) 根据两条最长线段的直线方程求解交点坐标，即为特征点坐标，本例中最长两条刻线的交叉点坐标为 (389.137, 378.055)。

第四章 视觉测量系统的标定

为了从靶标在图像中的运动轨迹获得靶标的实际运动轨迹, 需要知道图像中单位像素代表的实际尺寸, 这个对应关系需要通过摄像机标定来获得。另外, 为了提高测量精度, 需要对摄像机镜头的畸变进行标定。

4.1 摄像机标定概述

计算机视觉测量的主要任务是通过摄像机拍摄的图像获取三维空间中物体的几何信息。空间物体某点的位置与其在图像中对应点之间的对应关系取决于摄像机成像的几何模型, 该几何模型参数也就是摄像机参数。在大多数条件下, 摄像机的参数必须通过实验与计算才能获得, 获取这些参数的过程称为摄像机标定。标定过程就是确定摄像机的几何和光学参数、摄像机相对于世界坐标系的方位。标定精度直接影响着计算机视觉测量精度。近年来, 学术界对摄像机标定进行了大量的研究和实验, 摄像机标定的理论问题已得到较好的解决。当前对摄像机标定来说, 要解决的主要问题是针对具体的工程应用, 采用简单、迅速、准确的标定方法。

摄像机标定技术使用的方法是数学解析方法, 在标定过程中利用数学方法对从数字图像中获得的数据进行处理。通过这些数学运算, 能够获得摄像机的内部参数和外部参数。摄像机的内部参数指的是摄像机成像的基本参数, 包括主点、实际焦距、镜头畸变系数等参数; 摄像机的外部参数是指摄像机相对于外部世界坐标系的方位。摄像机标定的方法是由计算机视觉的如下特点决定的:

1) 视觉系统中使用的 CCD 摄像机参数未知或者不稳定, 从而导致成像过程不稳定, 并且 CCD 摄像机数字化图像分辨率低, 存在量化误差和较大的非线性镜头畸变。

2) 对于显微视觉测量, 使用了高倍放大镜, 视野变得很小, 小孔模型中的大视场前提条件不成立。

3) 不同的应用场合也对标定方法提出了不同的要求。如果视觉系统的任务是目标识别, 则目标相对于某一个参考坐标系的绝对定位显得并不特别重要, 更重要的是目标的特征点之间相对位置的精度。如果视觉系统的主要任务是目标的定位, 相对于某一个参考坐标系的绝对定位精度就非常重要。

上述特点和应用问题的要求使得定标技术、精度和实时性等问题的研究显得特别重要, 同时也导致了研究成果的多样性。

摄像机的参数总是相对于某一种特定的几何成像模型的, 这个模型是对光学成像过程的简化。目前使用最多的是针孔模型, 是摄像机定标研究的基本模型。然而在近距、广角等情形下,

这种线性模型不能准确无误的描述摄像机成像过程中空间坐标系与图像坐标系中物体的几何关系, 必须考虑线性或非线性的畸变校正, 才能得到更高的测量精度。因此, 成像模型和畸变补偿是视觉测量中摄像机标定技术研究的重点。

目前的摄像机标定技术主要有两类: 传统的摄像机标定方法和摄像机自标定方法^{[43][44]}。传统的摄像机标定是在一种的摄像机成像模型下, 拍摄形状和尺寸已知的标定模板的图像, 对其进行图像处理, 运用数学计算, 求解摄像机的内部参数和外部参数。传统的摄像机标定可以分为四种方法, 利用摄像机透视变换矩阵的标定方法、利用最优化算法的标定方法、进一步考虑畸变补偿的两步法和采用更为合理的摄像机成像模型的双平面标定法。摄像机自标定方法是指不依赖于标定参照物的摄像机标定^[45], 它完全利用摄像机在运动过程中周围环境的图像与图像之间的对应关系进行摄像机标定。摄像机自标定分为基于主动视觉的摄像机自标定技术、利用本质矩阵和基本矩阵的自标定技术、利用灭点和通过弱透视投影或平行透视投影进行摄像机标定以及利用多幅图像之间的直线对应关系的摄像机自标定等。摄像机自标定方法的使用非常灵活, 然而标定过程比较复杂, 不适合对实时性要求较高的应用场合, 并且其最大的不足是精度不高。

当视觉测量系统的所要求的精度很高, 而摄像机的参数一般很少发生变化时, 应优先选用传统的摄像机标定方法。摄像机的自标定方法一般应用于精度要求不高的场合, 如虚拟现实等。选择摄像机的标定方法时, 应综合考标定方法的精度、便捷性和快速性等因素。

本章在分析摄像机的成像模型和显微视觉测量的特点的基础上, 主要考虑视觉测量系统的精度和标定方法的便捷性两个因素, 研究用于基于显微视觉的主轴回转误差测量系统中摄像机的两步法标定。

4.2 摄像机成像模型及镜头畸变

要识别图像中所包含的三维物体的形状、位置等信息, 需要了解三维物体形成二维图像的几何模型, 即摄像机成像模型。摄像机的成像模型对识别二维图像中的三维景物信息、图像畸变校正、等研究是十分重要的。

4.2.1 摄像机成像模型

摄像机通过成像透镜将三维景物投影到摄像机二维成像平面上, 这个投影可用成像变换来描述, 即摄像机成像模型。摄像机成像模型有线性和非线性模型。其中线性模型也就是针孔成像模型。针孔成像模型是一种理想化的成像模型, 它的优点是成像关系为线性, 简单实用而不失准确性。

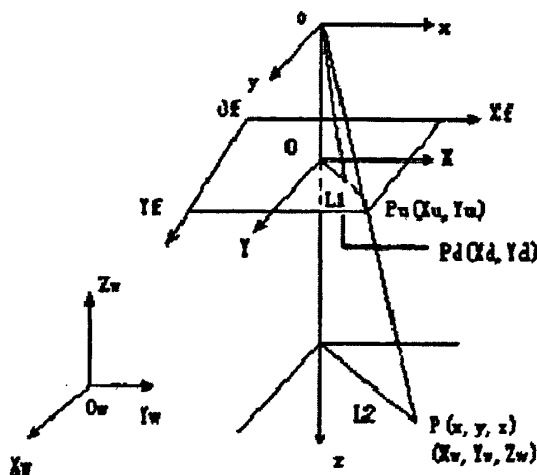


图 4.1 小孔成像模型

图 4-1 所示为针孔成像模型，图中 $O_w - x_w, y_w, z_w$ 为世界坐标系， $O - xyz$ 为摄像机坐标系， $O - XY$ 为图像物理坐标系， $O_f - x_f, y_f$ 为图像像素坐标系， (x_w, y_w, z_w) 为空间点 P 在世界坐标系中的坐标，该点在摄像机坐标系中的坐标为 (x, y, z) ， (X_u, Y_u) 是空间任意一点 P 的像点 P_u 的坐标。焦距 f 为图像平面到光学中心的距离。由比例关系有如下关系成立：

$$\begin{cases} X_u = f \frac{x}{z} \\ Y_u = f \frac{y}{z} \end{cases} \quad (4-1)$$

图像点的像素坐标 (u, v) 表示的是像素位于数字图像矩阵中的行数和列数，像素坐标系与物理坐标系之间的关系见式 (4-2)

$$\begin{cases} u = s_x X_u + u_0 \\ v = s_y Y_u + v_0 \end{cases} \quad (4-2)$$

其中 s_x, s_y 为图像平面单位距离上的像素数 (pixels/mm)， (u_0, v_0) 为摄像机光轴与图像平面交点的像素坐标，称为主点坐标。由公式 (4-1)、(4-2) 可得：

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & (\tan \alpha) f_v & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x/z \\ y/z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & s & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x/z \\ y/z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

其中， $f_u = fs_x, f_v = fs_y$ ， f_u 称为图像 u 轴的尺度因子， f_v 称为图像 v 轴的尺度因子，

由于摄像机制造及工艺等原因, 像素点可能发生畸变, 其中 s 为考虑像素点畸变的畸变因子。对图像坐标作归一化处理, 得到像素坐标 m 与归一化图像坐标 p 之间的关系以齐次坐标表示:

$$m = \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & s & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x/z \\ y/z \\ 1 \end{bmatrix} = Kp \quad (4-4)$$

其中, 矩阵 K 称为摄像机内参数矩阵, 包含了 5 个成像参数。

由于摄像机可以安放在环境中的任何位置, 摄像机坐标系与世界坐标系的变换可由一个正交变换矩阵 R 和一个平移变换矩阵 T 表示:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

R 和 T 反映的是摄像机坐标系与世界坐标系之间的位置关系, 因此称为外参数。联立 (4-4) 和 (4-5), 可得空间点的实际三维坐标与像素坐标之间的关系为:

$$\begin{aligned} z \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} f_u & s & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & s & u_0 & 0 \\ 0 & f_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= M_1 M_2 X = MX \end{aligned} \quad (4-6)$$

其中 M 为 3×4 矩阵, 称为透视变换矩阵, M_1 只与摄像机内部结构有关, 称为摄像机内部参数, M_2 只与摄像机相对于世界坐标系的方位有关, 称为摄像机外部参数, X 为空间点在世界坐标系下的齐次坐标。由此可知, 如果已知摄像机的内外参数, 即 M 矩阵已知, 对任何空间点 P , 知道它的世界坐标 $(x_w, y_w, z_w, 1)^T$, 就可以求出其图像像素坐标系中该图像点 P_u 的坐标 (u, v) 。反过来, 如果已知空间某点的图像坐标, 即使已知其内外参数, 空间坐标也不是唯一确定的。当已知图像点 P 时, 由针孔成像模型, 任何位于 OP 上的空间点的图像点都是 P 点。

4.2.2 摄像机镜头的畸变

在视觉测量系统中, 摄像机镜头一般都为由多片透镜组成的光学镜头。将这些光学镜头按理想化的针孔成像模型, 存在着一定的误差, 二维图像存在着不同程度的非线性变形。我们把这种非线性变形称为几何畸变。除了几何畸变之外, 摄像机成像过程不稳定, 图像分辨率低引起的量化误差等其他因素的影响, 使得空间点与空间点在摄像机成像平面上实际所成的像之间

存在复杂的非线性关系。

摄像机镜头的畸变分三类：径向畸变、偏心畸变和薄棱镜畸变。径向畸变产生径向位置的偏差，偏心畸变和薄棱镜畸变则既产生切向偏差，又产生径向偏差。

(1) 径向畸变 光学镜头径向曲率的变化是引起径向变形的主要原因。这种变形会引起图像点沿径向移动，离中心点越远，其变形量越大，由表达式(4-7)表示。

$$\begin{aligned}\delta X_r &= k_1 X_d (X_d^2 + Y_d^2) + O[(X_d, Y_d)^5] \\ \delta Y_r &= k_1 Y_d (X_d^2 + Y_d^2) + O[(X_d, Y_d)^5]\end{aligned}\quad (4-7)$$

(2) 偏心畸变 由于装配误差，组成光学系统的多个光学镜头的光轴不可能完全共线，从而引起偏心变形，这种变形是由径向变形分量和切向变形分量共同构成，由表达式(4-8)表示。

$$\begin{aligned}\delta X_d &= p_1 X_d (3X_d^2 + Y_d^2) + 2p_2 X_d Y_d + O[(X_d, Y_d)^4] \\ \delta Y_d &= 2p_1 X_d Y_d + p_2 X_d (X_d^2 + 3Y_d^2) + O[(X_d, Y_d)^4]\end{aligned}\quad (4-8)$$

(3) 薄棱镜变形 薄棱镜变形是指由光学镜头制造误差和成像敏感阵列制造误差引起的图像变形，如镜头与摄像机像面有很小的倾角等，这类畸变相当于在光学系统中附加了一个薄棱镜，其变形包括径向变形分量和切向变形分量，数学模型由公式(4-9)表示：

$$\begin{aligned}\delta X_p &= s_1 (X_d^2 + Y_d^2) + O[(X_d, Y_d)^4] \\ \delta Y_p &= s_2 (X_d^2 + Y_d^2) + O[(X_d, Y_d)^4]\end{aligned}\quad (4-9)$$

上述三种类型的非线性畸变都存在于光学镜头拍摄的图像中，图像的非线性畸变是这三种畸变的叠加，由此可以建立图像坐标系中的非线性畸变模型。图像平面理性图像点坐标 (X_u, Y_u) 等于实际图像点坐标 (X_d, Y_d) 与畸变误差之和，即：

$$\begin{aligned}X_u &= X_d + \delta X_r + \delta X_d + \delta X_p \\ Y_u &= Y_d + \delta Y_r + \delta Y_d + \delta Y_p\end{aligned}\quad (4-10)$$

一般情况下，在图像边缘处存在较大的畸变误差。在工业视觉中，一般只需要考虑径向畸变，然而对于显微视觉测量，标定精度对测量参数的精度影响非常大，所以需要考虑除径向畸变之外的其它两种畸变，但为了使模型不至于过分复杂，建模时不考虑4阶和4阶以上的高阶分量。

综上所述，摄像机标定实际上是要求出六个外参数 R, T ，五个内参数 f_u, f_v, u_0, v_0, s 和各种畸变系数 $k_1, k_2, p_1, p_2, s_1, s_2$ 。

4.3 显微视觉测量系统的特点及其标定方法

4.3.1 显微视觉测量系统的特点分析

与普通的视觉系统不同，本论文的显微视觉测量系统有如下特点：

1) 视野小、畸变大。在 CCD 分辨率一定的条件下，为了提高测量精度，可以增加成像系统放大倍数，使摄像机的视野竟可能的小，但是视野越小使得镜头畸变会加大，且破坏了无穷远视场的针孔成像模型的假设；

2) 需要修正误差。对于精度有特别要求测量，要考虑修正针孔模型存在的误差，以提高视觉测量系统的测量精度。

3) 特征点位于同一水平面。在显微视觉测量系统中，特征点一般位于与光轴垂直的平面内；

4) 标定参数可以简化。与三维重构等视觉测量不同，本课题的视觉测量不需要知道物体的方位参数，可以将世界坐标系、摄像机坐标系合二为一，因此不需要考虑计算机摄像机标定中外参数的标定，内参数中需要标定的有：水平和垂直方向单位像素代表的实际尺寸和镜头畸变系数；

4.3.2 视觉测量系统的两步法标定

根据上述显微视觉测量系统的特点，显微视觉标定需要解决镜头畸变系数和像素值两个主要问题。为此本文采用两步法标定。

第一步，通过标定模板求取显微视觉系统的镜头畸变系数，只要不更换物镜和目镜，则认为畸变系数不变（更精确的情形可以考虑将放大倍数分组，不同组使用不同的畸变修正系数）。

第二步，实际测量时，由测微尺上刻线的间距可以计算出水平和垂直方向单位像素代表的实际尺寸。

对每幅十字测微尺图像进行预处理和亚像素定位，得到实际特征点坐标，代入畸变校正公式中，得到特征点的理想值坐标。最后用标定的水平和垂直方向像素值计算出特征的实际位置。

两步法标定的流程见图 4-2。

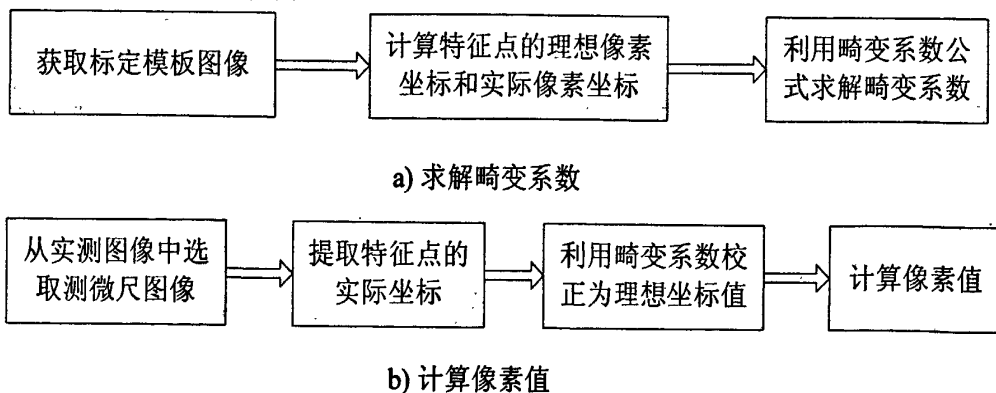


图 4.2 视觉测量系统两步法标定

4.4 基于网格的摄像机镜头畸变标定

采用基于平面网格模板的镜头畸变校正技术, 针对显微视觉测量多用于平面测量的特点, 利用设计的平面网格模板计算镜头畸变系数。

4.4.1 标定原理

在本章前面, 已经推导了考虑径向畸变、偏心畸变和薄棱镜畸变时摄像机镜头的畸变公式。

$$\begin{cases} \delta_x(x, y) = k_1 x(x^2 + y^2) + (p_1(3x^2 + y^2) + 2p_2 xy) + s_1(x^2 + y^2) \\ \delta_y(x, y) = k_1 y(x^2 + y^2) + (p_2(x^2 + 3y^2) + 2p_1 xy) + s_2(x^2 + y^2) \end{cases} \quad (4-11)$$

实际像素坐标 (x, y) 、理想像素坐标 (\bar{x}, \bar{y}) 和畸变量之间的关系如公式 (4-12) 所示。

$$\begin{cases} \bar{x} = x + \delta_x(x, y) \\ \bar{y} = y + \delta_y(x, y) \end{cases} \quad (4-12)$$

改成向量相乘的形式如公式 (4-13)。

$$AP = \bar{X} - X \quad (4-13)$$

其中:

$$A = \begin{bmatrix} x(x^2 + y^2) & 0 & 3x^2 + y^2 & 2xy & x^2 + y^2 & 0 \\ 0 & y(x^2 + y^2) & 2xy & x^2 + 3y^2 & 0 & x^2 + y^2 \end{bmatrix}$$

$$P = [k_1 \quad k_2 \quad p_1 \quad p_2 \quad s_1 \quad s_2]^T$$

$$\bar{X} = [\bar{x} \quad \bar{y}]^T \quad X = [x \quad y]^T$$

图像点的一对理想值和实测值, 可以建立二个方程, 六个未知的畸变系数, 需要 3 对被测点像素坐标的理想值和实测值。为了提高标定精度, 选取超过 3 对特征点。假设选取的 N 对特征点的像素坐标的理想值和实测值分别为:

$$(\bar{x}_1, \bar{y}_1), (x_1, y_1), (\bar{x}_2, \bar{y}_2), (x_2, y_2), \dots, (\bar{x}_N, \bar{y}_N), (x_N, y_N)$$

则:

$$A = \begin{bmatrix} x_1(x_1^2 + y_1^2) & 0 & 3x_1^2 + y_1^2 & 2x_1y_1 & x_1^2 + y_1^2 & 0 \\ 0 & y_1(x_1^2 + y_1^2) & 2x_1y_1 & x_1^2 + 3y_1^2 & 0 & x_1^2 + y_1^2 \\ x_2(x_2^2 + y_2^2) & 0 & 3x_2^2 + y_2^2 & 2x_2y_2 & x_2^2 + y_2^2 & 0 \\ 0 & y_2(x_2^2 + y_2^2) & 2x_2y_2 & x_2^2 + 3y_2^2 & 0 & x_2^2 + y_2^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_N(x_N^2 + y_N^2) & 0 & 3x_N^2 + y_N^2 & 2x_Ny_N & x_N^2 + y_N^2 & 0 \\ 0 & y_N(x_N^2 + y_N^2) & 2x_Ny_N & x_N^2 + 3y_N^2 & 0 & x_N^2 + y_N^2 \end{bmatrix}$$

$$\bar{X} - X = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 - x_1 \\ \bar{y}_1 - y_1 \\ \bar{x}_2 - x_2 \\ \bar{y}_2 - y_2 \\ \vdots \\ \bar{x}_N - x_N \\ \bar{y}_N - y_N \end{bmatrix}$$

A 为 $2n \times 6$ 的矩阵且 $2n > 6$, 因此对于 $AP = \bar{X} - X$ 方程的个数多于未知数的个数, 称为超定方程组。该方程组没有精确解, 求解的方法是找到一个向量 P 使它对 $2n$ 个方程的总误差为最小, 最为常用的方法是最小二乘法。通过最小二乘法解超定方程 $AP = \bar{X} - X$ 即得镜头畸变系数矩阵 P 。

4.4.2 平面网格标定模板的选择

标定模板的精度, 直接影响着镜头畸变系数和特征点的准确性。标定模板的选择, 要综合考虑对标定精度的影响和制作的难易程度, 标定模板成像后, 在图像上能方便地求出特征点的实际像素坐标和理想像素坐标, 从而求出畸变系数和像素值。为此选用图 4-3 所示的平面网格标定模板。显微放大倍数越大, 要求网格间距也越小。本文选用网格测微尺。网格测微尺由相互平行和垂直且等间距的直线交叉而成, 如果存在镜头畸变, 则不同位置的网格线交点偏离理想的位置距离不同。成像后首先通过滤波、阈值分割、细化等步骤提取亚像素级精度的实际网格交点坐标。网格交点的理想像素坐标是基于图像中心及附近畸变很小, 可以忽略的假设, 通过网格中心若干个交点的坐标和计算得到的网格间距, 推算出中心附近以外其它网格交点的理想坐标。为了方便地求取网格中心, 控制工作台移动, 使图像中央网格的中心点最大限度地接近图像的中心, 即帧存中心, 采集此时的标定模板图像用于求取镜头畸变系数。

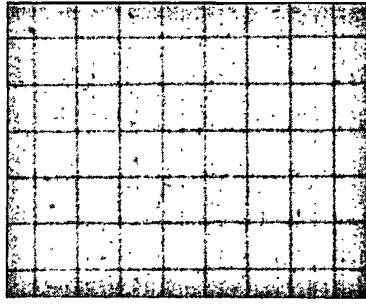


图 4.3 平面网格标定模板

4.4.3 网格交点实际像素坐标和理想像素坐标

1. 网格交点实际坐标

网格交点的实际坐标值按如下步骤获取：

- 1) 图像预处理，得到细化的二值图像，断开线条的交叉位置；
- 2) 拟合每条线条的直线方程，有相交的两条直线方程求解交点坐标值，即为得网格交点坐标值。

2. 网格交点理想坐标

假设图像中心无畸变，中心附近小范围内畸变很小可以忽略，以中心对角邻域的四个网格交点作为无畸变的理想点，由于网格线平行且等间距的，可以推算出其他网格交点的理想坐标。

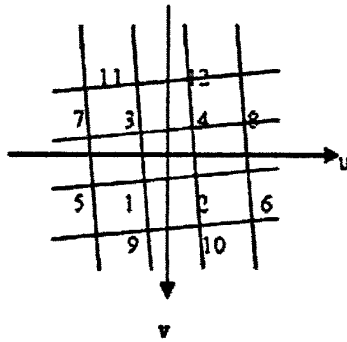


图 4.4 网格理想点计算

一般情况下网格模板与坐标轴存在旋转偏置，即网格线与坐标轴不平行，如图 4-8 所示。可以按如下方法推导网格交点的像素理想坐标。假设网格交点 1、2、3、4 无畸变，其理想坐标值等于实测的像素坐标值，分别为： (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) 、 (x_4, y_4) ，定义 $\bar{x}, \bar{y}, \Delta x, \Delta y$ 为

$$\bar{x} = \frac{(x_2 - x_1) + (x_4 - x_3)}{2}$$

$$\bar{y} = \frac{(y_1 - y_3) + (y_2 - y_4)}{2}$$

$$\Delta x = \frac{(x_1 - x_3) + (x_2 - x_4)}{2}$$

$$\Delta y = \frac{(y_1 - y_2) + (y_3 - y_4)}{2}$$

则由第 m 行 n 列的网格点坐标 (x_{mn}, y_{mn}) 可以推导出其他网格点的理想值

$$x_{mj} = x_{mn} + (j - n)\bar{x}$$

$$y_{mj} = y_{mn} + (j - n)\Delta y$$

所以

$$x_{ij} = x_{mj} + (i - m)\Delta x = x_{mn} + (j - n)\bar{x} + (i - m)\Delta x$$

$$y_{ij} = y_{mj} + (i - m)\bar{y} = y_{mn} + (i - m)\bar{y} + (j - n)\Delta y$$

实际计算的时候, 先计算出 $\bar{x}, \bar{y}, \Delta x, \Delta y$, 然后取 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) 、 (x_4, y_4) 中的任何一个坐标点作为上述公式中的 (x_{mn}, y_{mn}) , 并记录该点在图像中对应的行列序号, 最后计算出所有网格点的理想坐标值。

由若干对网格交点的实际和理想像素坐标值, 代入超定方程 $AP = \bar{X} - X$, 就可以求出镜头畸变系数向量。

4.4.4 图像畸变校正

图像的畸变校正包括两方面的内容:

1) 像素点位置的移动, 像素点移动前后的位置关系必须符合从实际图像到理想图像的非线性畸变模型, 同时保持灰度值不变, 称之为几何校正;

2) 是灰度插值问题, 常用的灰度插值方法有最近邻域法、双线性内插法和三次内插法, 在许多情况下, 最近邻域法的方法可以被接受, 但当图像中像素之间灰度变化细微时, 或者图像中的像素点较少时, 最近邻域插值法会在校正图像中留下人工痕迹。双线性插值法效果较好, 但会使图像边缘轮廓模糊, 图像清晰度降低; 三次内插法精度高, 能较好地保持图像边缘的细节, 但计算过程复杂, 计算量大, 实际应用中受到了限制。

对于视觉测量来说, 只需要知道特征点在图像中的理想位置, 因此可以不做灰度插值, 只做几何校正。先从图像中提取亚像素级精度的特征点坐标值, 然后再对特征点进行几何校正处理, 这样既可以提高精度, 又可以简化处理流程和减少计算量。

第五章 实验结果及分析

前几章对主轴回转误差的显微视觉测量方法和系统的标定方法进行了详尽的理论分析。为了进一步验证该方法的有效性，本章将采用本文提出的测量方法、图像处理及特征提取算法进行主轴回转误差的测量实验。

实验的方案是：先对摄像机镜头的畸变进行标定，得到镜头畸变系数，然后以多自由度运动平台的垂直旋转轴为被测对象，获取该主轴回转过程中端面靶标的运动轨迹图像，从运动轨迹图像中提取靶标的运动轨迹并用畸变系数进行校正，最后根据靶标的运动轨迹计算主轴的回转误差，以验证系统方案的可行性。

5.1 摄像机标定实验

5.1.1 摄像机镜头畸变标定的流程

镜头畸变的标定流程如下：

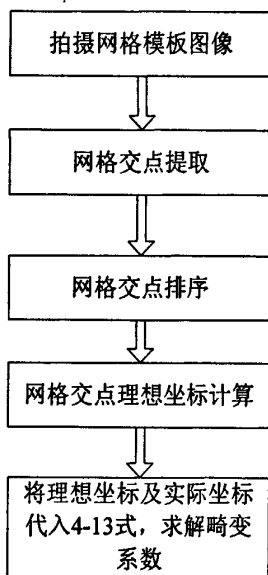


图 5.1 镜头畸变标定流程

5.1.2 网格点的坐标提取及自动排序

网格点的提取和十字刻线交点的提取方法类似，先从标定模板图像中定位每条刻线的位置，得到每条直线的直角坐标方程，然后求所有直线中任意两条相交直线的交点。步骤如下：

1) 执行 3.7 节所述的十字刻线交点提取过程的 1) 至 8) 步，得到所有网格线的直线方程，将每条直线方程的参数存入数组 A 中；

2) 判断任意两条直线是否垂直相交, 由于不是理想的垂直, 本文的判断方法是根据两条直线的夹角是否接近 90 度。如果两直线垂直则求取其交点, 将交点坐标存入数组 B 中。

交点坐标数组 B 中的点的排列顺序是不固定的, 计算每个网格点的理想坐标的时候需要知道它在图像中的位置, 因此需要将数组 B 中的坐标点按其在模板图像中对应网格点排列的规律进行排序。为了简化网格点的排序及理想坐标的计算, 拍摄模板图像时将网格模板旋转至网格线在图像中处于大致水平和垂直的位置。网格点按图 5-2 所示进行排序。

网格交点排序的方法如下:

- 1) 对坐标点按行进行分组, 即将纵坐标值接近的点分为一组, 每一组对应网格模板图像中的一行网格点;
- 2) 分别对每组坐标点按横坐标从小到大进行排序;
- 3) 由于同一组的纵坐标值很接近, 大约为几个像素, 而不同组之间的纵坐标差别比较大, 大约几十个像素, 因此可以对所有的组按纵坐标从小到大进行排序。最后得到如图 5-2 所示的排列顺序。

1	2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31	32
33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48

图 5.2 网格点排序

5.1.3 镜头畸变标定结果

获取如图 5-3 所示的网格模板图像。从该网格模板图像中提取网格交点的坐标, 按照 5.2.2 节的方法对坐标点进行排序, 结果如表 5-1 所示。

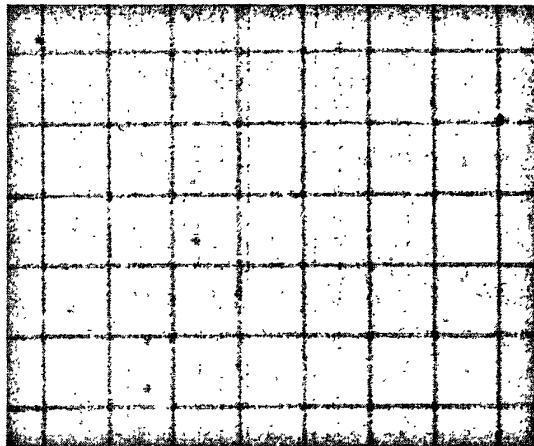


图 5.3 网格模板

表 5.1 网格交点实际坐标 (单位: 像素)

行 \ 列	1	2	3	4	5	6	7	8
1	55.378	145.665	235.909	326.554	417.240	507.253	597.906	688.614
	73.102	72.520	71.938	71.353	70.768	70.187	69.602	69.017
2	56.035	146.348	236.575	327.264	417.909	508.010	598.597	689.344
	161.615	161.391	161.167	160.943	160.718	160.494	160.270	160.045
3	56.720	147.055	237.262	327.994	418.592	508.780	599.297	690.081
	253.807	253.523	253.241	252.957	252.673	252.390	252.106	251.822
4	57.383	147.743	237.929	328.705	419.258	509.531	599.981	690.802
	343.218	342.987	342.756	342.523	342.291	342.060	341.828	341.595
5	58.053	148.432	238.596	329.411	419.918	510.272	600.652	691.506
	433.336	432.765	432.196	431.623	431.052	430.481	429.911	429.337
6	58.721	149.124	239.268	330.127	420.589	511.029	601.341	692.231
	523.385	522.861	522.339	521.813	521.289	520.765	520.241	519.715

用 4.4.3 节的方法计算网格交点理想坐标值, 选用表 5-1 中粗体部分所示的 4 个坐标点作为图像的非畸变点, 推算出其他网格交点的理想点坐标, 结果如表 5-2 所示。

用表 5-1 中的网格交点实际坐标和表 5-2 中的网格交点理想坐标, 按照 4.4.1 节所述的方法, 计算出矩阵 A 和矩阵 $\bar{X}-X$, 最后求解超定方程 $AP=\bar{X}-X$ 得畸变系数矩阵 $P=[0.00072 \quad -0.00014 \quad -0.00126 \quad -0.00280 \quad 0.00172 \quad 0.00513]$ 。

表 5.2 网格交点理想坐标 (单位: 像素)

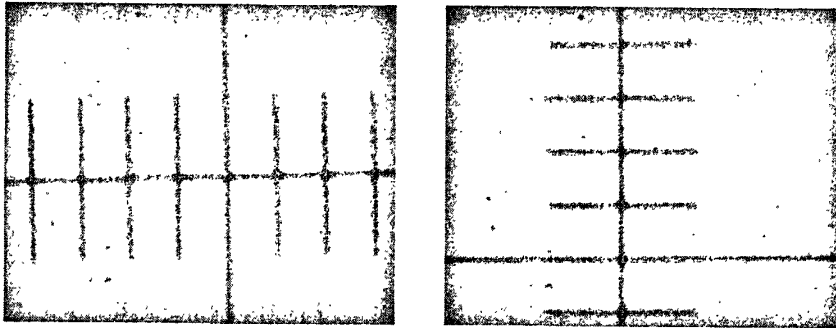
行 \ 列	1	2	3	4	5	6	7	8
1	54.912,	145.488,	236.064,	326.640,	417.216,	507.792,	598.367,	688.943,
	72.972	73.230	73.488	73.746	74.004	74.262	74.520	74.778
2	55.600,	146.176,	236.752,	327.994	418.592	508.480,	599.056,	689.632,
	162.564	162.822	163.080	252.957	252.673	163.854	164.112	164.370

基于显微视觉的主轴回转误差测量方法研究

3	56.289, 252.157	146.864, 252.415	237.440, 252.673	328.016, 252.931	418.592, 252.673	509.168, 253.447	599.744, 253.705	690.320, 253.963
4	56.977, 341.749	147.553, 342.007	238.129, 342.265	328.705, 342.523	419.258, 342.291	509.856, 343.039	600.432, 343.297	691.008, 343.555
5	57.665, 431.341	148.241, 431.599	238.817, 431.857	329.393, 432.115	419.969, 432.373	510.545, 432.631	601.121, 432.889	691.697, 433.147
6	58.354, 520.934	148.929, 521.192	239.505, 521.450	330.081, 521.708	420.657, 521.966	511.233, 522.224	601.809, 522.482	692.385, 522.740

5.1.4 像素值标定

像素值的标定在现场测量阶段进行，目的是求取水平方向和垂直方向的像素值（每个像素对应的物理尺寸）。首先调整测微尺，使测微尺带刻度的线条与图形的水平方向平行，并且使测微尺尽量位于图像中央，得到图像 A。然后将测微尺旋转 90 度，使测微尺带刻度的线条与图像的垂直方向平行，得到图像 B。图像 A 和 B 如图 5-4 所示。分别从图像 A 和 B 中提取所有交叉点的坐标。用前面标定的镜头畸变系数校正交叉点的坐标值。图像 A 和 B 中校正后的交叉点之间的像素数目和实际距离分别用于标定水平方向和垂直方向的像素值，即：像素值=实际距离/像素数目。



A) 水平方向

B) 垂直方向

图 5.4 像素值标定

图像 A 和 B 的处理结果如图 5-5 所示。从图 5-5A) 中提取最左边和最右边两交点的坐标，得到左右两条刻线的间距；从图 5-5B) 中提取最上面和最下面两交点的坐标，得到上下两条刻线的间距。最终的标定结果如表 5-3 所示。

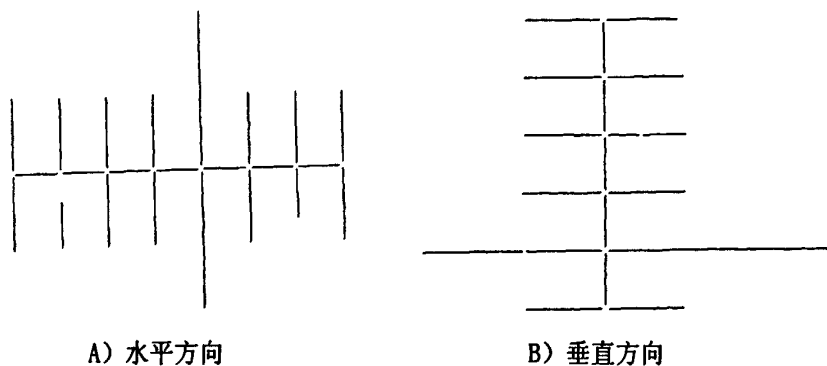


图 5.5 图像处理结果

表 5.3 像素值标定结果

数值 \ 方向	水平方向	垂直方向
像素	664.905	473.009
实际距离 (mm)	0.7	0.5
像素值 (mm/像素)	0.001053	0.001057

5.2 回转误差测量实验

5.2.1 测量实验过程

回转误差的实验测量过程如图 5-6 所示。

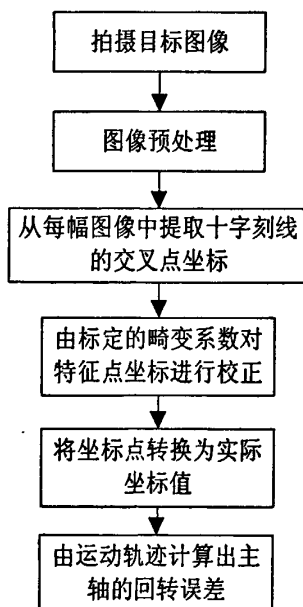


图 5.6 实验测量过程

5.2.2 图像采集

采用 2.3 节所述的硬件系统获取主轴回转过程中的十字测微尺靶标运动轨迹图像。首先将靶标安装在标准心轴端面的中心，然后将标准心轴安装到机床主轴上。调整工业显微镜物镜与靶标（十字测微尺）的相对位置，直到测微尺出现在图像的中央，然后调整工业显微镜的焦距，改变显微镜的放大倍数，根据图像中刻线的数目将视场范围调整到 0.7mm 左右，最后逐渐调整显微镜与靶标的距离使得成像最清晰。主轴回转过程中，每一圈采集 36 幅图像，共采集 3 圈的图像，按顺序编号作为每幅图像的文件名，保存到同一个文件夹中。

5.2.3 提取图像靶标运动轨迹

从采集的多幅图像里面提取靶标的运动轨迹的过程如图 5-6 所示。

- 1) 设置工作目录，加载所有待处理图片的路径到文件名数组 `strNameArr`;

```
extern g_strImageDir;
CFileFind finder; // MFC 自带的文件查找类
CString strFileToFind = g_strImageDir; // 保存图像的目录
strFileToFind += "*. *";
CStringArray strNameArr;
CString strFileName;
BOOL bResult = finder.FindFile(strFileToFind); // 查找指定目录下的任意文件
while (bResult)
{
    bResult = finder.FindNextFile(); // 查找下一个文件
    if (finder.IsDirectory()) continue; // 当前文件是目录，不处理
    strFileName = finder.GetFilePath(); // 返回查找到的文件的路径
    // 根据文件名的后缀判断该文件是否为图像文件
    if ( (strFileName.Right(4).CompareNoCase(". bmp") == 0)
        || (strFileName.Right(4).CompareNoCase(". png") == 0) )
    {
        strNameArr.Add(strFileName); // 将查找到的文件路径存放到字符串数组中
    }
}
```

- 2) 由于图像处理的过程比较耗时，为提高处理速度，可以在多处理器的计算机上采用多任务的方式并行处理每幅图像。本文通过创建多个相同的图像处理线程，并行的处理每幅图像，得到对应时刻的轨迹点。每幅图像的具体过程见 3.7 节。
- 3) 将每个处理得到的轨迹点存入数组 `fOrbitArr`。
- 4) 用镜头畸变系数对数组 `fOrbitArr` 内的所有点进行校正。
- 5) 将轨迹点的直角坐标值分别乘以表 5.3 中标定的水平和垂直方向的像素值，得到靶标的实际

运动轨迹。

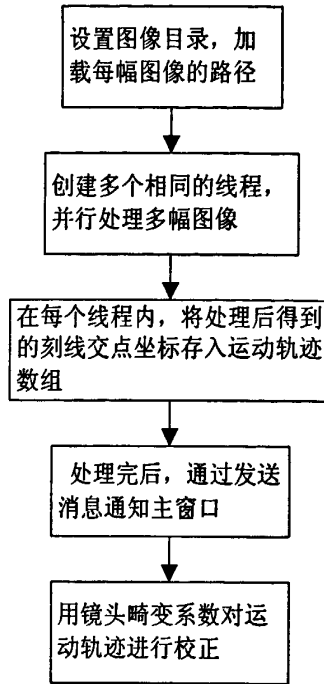


图 5.7 靶标运动轨迹处理过程

5.2.4 主轴回转误差的评定

采用 2.1.3 节所述的最小二乘圆评价主轴的回转误差，如图 5.8 所示，曲线为靶标的运动轨迹， R 为拟合的最小二乘圆半径， R_{\min} 为离最小二乘圆圆心距离最小的轨迹点， R_{\max} 为离最小二乘圆圆心距离最大的轨迹点。五次测量结果如表 5.4 所示。

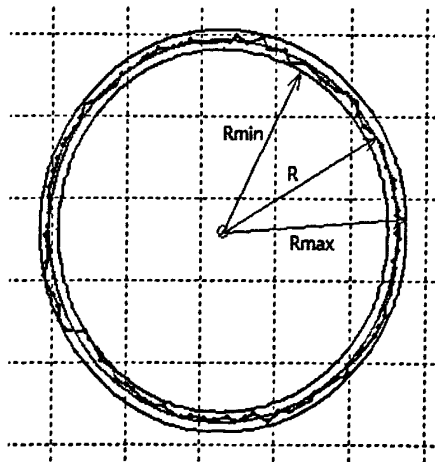


图 5.8 回转误差评定

表 5.4 回转误差测量结果 (单位: μm)

实验次数	R	R_{\min}	R_{\max}	ε
1	23.363	21.87	24.56	2.69
2	23.351	21.91	24.63	2.72
3	23.374	21.93	24.83	2.90
4	23.360	21.94	24.58	2.64
5	23.387	21.98	24.51	2.53

由表 5.4 计算主轴回转误差平均测量值 $\bar{\varepsilon} = \sum_{i=1}^5 \varepsilon_i = 2.696\mu\text{m}$ 。

测量的重复精度可以通过标准差来衡量, 标准差越小, 测量值相对均值变化越小, 重复精度越高。标准差的相对误差是标准差与均值的比值, 反映了测量值偏离均值的相对大小。测量的

不确定度即标准差 $S = \sqrt{\frac{1}{5-1} \sum_{i=1}^5 (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2} = 0.121\mu\text{m}$, 对应的标准差相对误差为 $100\% \times$

$0.121/2.696 = 4.49\%$ 。

5.3 测量精度分析与检验

影响测量系统的精度的主要因素有硬件系统的误差和软件算法误差。

1. 硬件系统误差

1) CCD 分辨率

视觉测量系统的精度主要取决于 CCD 摄像机的分辨率, 即一个像素所代表的空间物体的实际尺寸大小。分辨率越高, 视野越小, 图像的物面分辨率就越高, 测量系统的精度就越高。本系统采用的 CCD 分辨率为 768×576 , 实验中视野大约为 $0.8\text{mm} \times 0.6\text{mm}$, 不采用亚像素精度可以达到 $1\mu\text{m}$, 采用亚像素技术后可以达到 0.1 像素的分辨力, 即可以达到 $0.1\mu\text{m}$ 的测量精度。如要达到更高的精度, 一方面可以进一步减小视野, 另一方面可以采用更高精度的亚像素算法。

2) 十字测微尺靶标的精度和网格模板的精度

网格模板的制造存在误差, 网格间距不是理想的。本文选用加工精度为微米级, 标定后可达 0.1 微米精度的网格分划板作为标定模板。

十字测微尺的加工精度很高, 而且刻线均线。其加工误差低于 1 微米, 通过工具显微镜校正后可以高于 0.1 微米的精度。

2. 软件算法误差

1) 特征点定位精度

在图像处理和特征提取过程中，图像预处理中的滤波和图像分割会引起一定的误差，为减小误差，本文采用中值滤波降低滤波处理对线条边缘的模糊，采用自适应滤波得到背景不均的情况下最好的阈值分割效果。此外，采用最小二乘法对特征点进行亚像素级精度的定位，可以达到 0.1 像素的定位精度。

2) 镜头中心小范围无畸变的假设

按照畸变公式，镜头中心畸变为零，但偏离中心后产生畸变，因此小范围无畸变的假设与实际情况存在一定的误差，本文采用的镜头畸变非常小，镜头中心的畸变可以忽略。

3) 帧存中心与镜头中心的重合程度

本文的标定假设帧存中心与镜头中心重合，实际上帧存中心与镜头中心并非完全重合，这也会给标定带来一定误差，该误差一般很小，可以忽略。

测量精度是通过测量值与理论值进行比较评定。本文通过对微小位移的测量来检验测量系统的测量精度。在实验平台上用本文的方法测量十字测微尺的在平面内的直线位移，并与理论位移值相比较。测得的位移值与理论值如表 5.5 所示。

表 5.5 十字测微尺运动位移测量值与理论值（单位：um）

测量次数	未校正畸变的 测量值	校正畸变后的 测量值	理论值	校正前偏差	校正后偏差
1	100.33	100.21	100.04	0.29	0.17
2	100.28	100.16	100.01	0.27	0.15
3	100.26	100.12	99.97	0.29	0.15
4	100.19	100.08	99.99	0.20	0.09
5	100.22	100.10	100.03	0.19	0.07

从表 5.5 可见对镜头畸变进行校正后测量精度有所提高。未校正镜头畸变前最大测量偏差 0.29um，相对测量精度为 $100\% \times 0.29/99.97 = 0.29\%$ 。校正镜头畸变后最大测量偏差为 0.17，相对测量精度为 $100\% \times 0.17/100.04 = 0.17\%$ 。测量精度与预计的 0.1um 的测量精度有一定的差距，主要是由于实验平台稳定性不是很好，另外获取的图像质量不是很好影响了十字刻线交叉点的定位精度。排除这些误差因素，在较好的硬件平台上可以实现甚至超过预计的测量精度。

第六章 总结与展望

6.1 研究工作总结

主轴回转误差是影响机床加工工件的几何精度和表面光洁度的重要因素之一。主轴回转误差的测试在机械制造业中是一项很重要的应用广泛的测试项目，找出产生主轴回转误差的原因，对设计高精度主轴和保障加工零件的精度有着重要的实际意义。

本论文在分析当前主轴回转误差的各种测量方法的基础上，将计算机视觉测量技术运用于主轴回转误差的测量中。该测量方法与以往测量方法相比具有如下特点：可以对主轴回转误差进行直接测量，避免传统测量方法中必不可少的标准球安装偏心 and 形状误差的分离；测量系统安装方便，不需安装标准球或标准棒，不需精密的装夹工具，测量方法简单、灵活；如果采用高速摄像机可以对高速旋转主轴的回转误差进行动态和在线测量。论文的主要研究内容如下：

1) 介绍了主轴回转误差测量的研究意义和国内外的研究现状，并介绍了计算机视觉测量的研究现状。

2) 分析了主轴回转误差的来源和评定方法，介绍了显微视觉的测量原理，分析了基于显微视觉的回转误差测量系统的测量方案、系统硬件组成及软件开发环境，分析了该系统的关键技术。

3) 对十字测微尺图像的处理及特征提取算法进行了深入的研究，分析了各种图像处理的算法，包括图像滤波处理、灰度阈值分割、连通区域提取、刻线条纹的细化、基于最小二乘法的亚像素直线定位及十字交叉点的提取过程。

4) 设计了视觉测量系统的标定方法。在分析了摄像机成像模型、镜头畸变、显微视觉测量的基础上，采用两步法对系统进行标定，也就是用测微尺网格分化板作为标定模板对镜头畸变系数进行标定，现场测量时用十字测微尺上的刻度对像素值进行标定。这种标定方法既保证了测量精度，又简化了测量系统的安装和调试。

5) 采用实验对摄像机的标定和回转误差测量进行验证。

6.2 进一步研究的展望

回转误差显微视觉测量的方法虽然得到了验证，但由于时间有限，对一些理论和技术问题来不及深入研究，另外由于研究经费的制约，在硬件系统的设计方面也遇到一定困难。针对存在的不足，可以从以下几方面进一步开展研究。

1) 进一步研究精度更高的特征点亚像素定位技术，提高测量精度；

2) 本文尚未考虑算法的效率问题，因此图像处理比较耗时，后期研究要考虑不损失精度

的前提下，采用速度更快的图像处理算法；

- 3) 采用成本较高的高速摄像机，拍摄主轴在高速回转时靶标的运动轨迹图像，可以对主轴回转误差进行动态和在线测量。
- 4) 采用加工精度更高的十字测微尺和网格模板，进一步提高视觉测量系统的标定精度和测量精度。

参考文献

- [1]张耀满、王旭东、蔡光起、滕立波. 高速机床有限元分析及其动态性能试验[J], 组合机床与自动化加工技术, 2004, 12, 15-17
- [2] 黄伯文、尹苟保、刘桂秋. 高精度车床主轴回转误差运动数字式测量法. 精密机床动态检测与精度控制论文选集[C]. 1987. 10
- [3] 李旗, 方海燕, 磁浮主轴回转精度的测试仁[J]. 机床与液压, 2004(8).
- [4] 孙彤, 谭久彬, 强锡富. 主轴回转误差 Prony 谱模型[J]. 计量学报, 1997, 18(3):211~215.
- [5] 倪军. 数控机床误差补偿研究的回顾与展望[J]. 中国机械工程, 1997, 8(1):211~215.
- [6] 颜景平. 精密检测技术 (M). 南京:东南大学出版社, 1992.
- [7] 陈恩平. 机床主轴回转精度计算机辅助测试系统[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2004(9).
- [8] Bryan J.B., Vanherck P, Unification of terminology concerning the error motion of axes of rotation. CONF750818-2. Jun 1975:34
- [9]Donaldson RR. A simple method for separating spindle error from test ball roundness. Ann CIRP 1972, 21:125-26.
- [10] Kim K. Development of microprocessor-based spindle error motion measurement System. Microcomputer Applications, 1985, p10-14.
- [11]Shoji Noguchi, Tadao Tsukada. Atsushi Sakamoto. Evaluation method to determine radial accuracy of high-precision rotating spindle units. Precision Engineering. 1995, 17(1)
- [12] Eric Marsh, Jeremiah Couey, Ryan Vallance. Nanometer-level comparison of three spindle error motion separation. Techniques Transactions of the ASME. February, 2006:180-187
- [13] Gao W, Sato E, Ohnuma T etc. Roundness and spindle error measurement by angular three-probe method. Journal of the Japan Society of precision engineering. September, 2002
- [14] Liu, Chien-Hung. Development of a simple test device for spindle error measurement using a position sensitive detector. Measurement Science and Technology. September, 2004:1733-1741
- [15]景岗, 张立平等. 高精度主轴回转精度的测试与研究. 制造技术与机床. 1996. 6
- [16]李迅波, 陈光禹. 机床主轴的回转误差计算机辅助测试. 电子科技大学学报. 1998. 27(2).

- [17] 阚光萍. 超精密空气主轴回转精度的测量与数据处理. 航空精密制造技术, 1999, 35 (3).
- [18] 王晓慧, 李占魁, 袁哲俊. 圆度、圆柱度在线测量及补偿控制实验研究. 哈尔滨工业大学学报. 1995. 2
- [19] 张景和, 冯晓国, 刘伟. 用反向法测量轴系回转误差. 光学精密工程. 2001, (4):155-158
- [20] 黄长征, 李圣怡. 超精密车床主轴回转精度动态测试机构的研制. 航空精密制造技术. 2002, 38(2):8-10
- [21] 苏恒, 李自军, 魏员雷. 机床主轴运动的在线高精度测量. 现代制造工程. 2002 (3)
- [22] 吴世法. 近代成像技术与图像处理[M]. 北京:国防工业出版社, 1997. 3:242-340
- [23] 吴晓波, 杨永琴. 图像测量技术的新应用. 光学精密工程, 1998. 6(3):10-15
- [24] 韩良. 主轴回转误差补偿控制技术研究[D]. 补偿控制器与执行件研制. 东南大学硕士学位论文 1993.
- [25] 林洁. 主轴径向回转误差评定的最小径向间距算法[J]. 振动、测试与诊断, 1991(6).
- [26] 何钦象, 张华容, 杨静. 高速电磁主轴回转精度的分析[J]. 机械科学与技术. 1999, 18(4).
- [27] 朱铮涛. 基于计算机视觉图像精密测量的关键技术研究. 华南理工大学博士学位论文. 2004. 10, 20~21
- [28] Robert D. Thompson. 前导工作室译, MFC 开发人员参考手册, 北京: 机械工业出版社, 1998. 8
- [29] 刘瑞祯. OpenCV 教程——基础篇. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007, 1-3
- [30] 图像处理和分析技术 章毓晋 高等教育出版社 2002. 12 p:186
- [31] Tanimoto, S. L. 1990. The Elements of Artificial Intelligence Using Common LISP. W. H. Freeman and Company, New York.
- [32] 林春蔚等. C 环境下地图图像矢量化及图形编辑技术与实例. 北京: 海洋出版社, 1993
- [33] 马建波. C 语言图像处理程序集. 北京: 海洋出版社, 1992
- [34] 王占全 徐慧 Visual C++数字图像处理技术与工程案例 2009 人民邮电出版社
- [35] 徐慧. VisualC++数字图像实用工程案例精选[M]. 北京:人民邮电出版社, 2004.
- [36] Hueckel., M. F. A operator which locates edges in digitized pictures. JACM. 1971(18):113~125.
- [37] Tababai A. J. and Mitchell, O. E. Edge location to sub-pixel values in digital imagery. IEEE Trans. On Pami. 1984(2):188~210.
- [38] Huertas, A. and Medioni, G. Detection of intensity changes with subpixel accuracy using Laplacian-Gaussian mask. IEEE Trans. On PAMI 1986(5):651~664.
- [39] Englander, A. Expanding machine vision gauging with subpixel techniques. Machine Perception. 1987(6):9~18.

- [40]Edward P. Lyvers, Owen Robert Mitchell. Subpixel measurements using a moment-based edge operator. IEEE Trans. On PAMI. 1989(12):1293~1309.
- [41]Jensen, K. and Anastassiou, D. Subpixel edge localization and interpolation of still images. IEEE Trans: Image Processing. 1995(3):285~295.
- [42]Kisworo, M. et. al. Modeling edges at subpixel accuracy using the local energy approach. IEEE Trans on PAMI. 1994(4):405~410.
- [43]全红艳, 张田文. 基于运动的摄像机定标方法的综述[J]. 计算机工程与应用, 2003, (22):198-201.
- [44]吴文琪, 孙增圻. 机器视觉中的摄像机定标方法综述[J]. 计算机应用研究, 2004, (2):4-6.
- [45]雷成, 吴福朝, 胡占义. 一种新的基于主动视觉系统的摄像机自标定方法[J]. 计算机学报, 2000, 23(11):1130-1140.

致谢

在本论文完成之际，作者深深感谢所有在硕士学习和论文期间的工作生活上给予我关心、支持和帮助的人。

本文是在导师赵转萍副教授的悉心指导下完成的。在两年半的硕士研究生学习期间，导师无论是在学业上还是在生活上都给予了我无微不至的关怀和指导，论文和课题的完成无不渗透着导师的谆谆教导和大量的心血。导师知识渊博、治学严谨、谦虚坦诚、诲人不倦，使我得到深深的启迪。导师给我提供了许多学习、锻炼的机会，使我开阔了视野，提升了自我的专业水平。在此谨向导师表示深深的谢意。

同时感谢杨明老师、吴贤莉老师、杨桂珍老师、赵宇老师，感谢他们在我读研究生期间给予的帮助和鼓励。

在论文的完成过程中，还得到了实验室同学的热情帮助，在此向他们表达由衷的感谢。

我还要感谢我的父母以及所有关心和支持我的亲人们，你们的关爱一直伴随我走过这一段人生的重要旅程。

最后，感谢审阅本文的专家学者。

在学期间的研究成果及发表的论文

1. 袁德亮 赵转萍. 基于显微视觉的主轴回转误差测量, 机械与电子, 贵阳, 2010 年第 1 期。