

浙江理工大学

Zhejiang Sci-Tech University

硕士学位论文

*Master's Thesis*



中文论文题目: 基于十字线结构光的自由曲面工件表面信息提取方法研究

英文论文题目: Study on Method of Extracting Surface Information for  
Workpieces with Free Curved Faces Based on Cross Line  
Structured Light

学科专业: 机械电子工程

作者姓名: 沈烨钦

指导教师: 武传宇

递交日期: 2013-12-20

## 浙江理工大学学位论文独创性声明

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。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，也不包含为获得浙江理工大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：沈辉钦

签字日期：2014 年 3 月 7 日

<http://www.ixueshu.com>

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解浙江理工大学有权保留并向国家有关部门或机构送交本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权浙江理工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和传播，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授权书)

学位论文作者签名：沈辉钦

签字日期：2014 年 3 月 7 日

导师签名：刘红宇

签字日期：2010 年 3 月 10 日

<http://www.ixueshu.com>

## 摘 要

结构光三维测量技术是一种基于结构光三角测量原理，从而获取被测工件表面三维空间坐标信息的主要手段之一。本文通过研究建立了一种基于十字线结构光的自由曲面工件表面信息提取方法研究，能够精确地提取被测工件表面的空间三维信息，并且能保证工件端面信息不会丢失。本文主要研究内容和成果包括：

1) 分析了结构光视觉测量基本原理和透视投影转换模型。在此基础上，制作了平面棋盘式定标板，采用 Harris 角点检测算法和亚像素细化法提取了角点的子像素级坐标。采用基于平面靶标非线性模型的标定方法，同时开发了一款摄像机标定软件，标定了摄像机内、外参数，标定误差约为 0.2 个像素；利用机械调整法获得了相应的线结构光平面参数方程。

2) 介绍了十字线结构光光条图像处理过程。比较不同阈值分割方法，选用最大类间方差法进行图像分割，利用抛物线拟合的灰度重心法获得了光条中心坐标，并提出了一种对提取中心进行左右光条分类的方法。

3) 建立工件扫描模型，并根据这一模型搭建了实验平台；以 VC6.0 为软件开发平台，开发了一款相对应的控制处理软件，实现了图像采集处理、光条中心提取、三维坐标重建、工件表面信息生成。

4) 以鞋底为实验对象，分别利用十字线结构光和一字线结构光扫描鞋底表面，实现了鞋底表面信息的提取，测量的精度分别为 0.018mm 和 2.12mm，同时，十字线结构光可以保证工件端面信息不丢失，提高了提取的精度，验证了本方法的可行性。

**关键词：**系统标定；十字线结构光；中心条纹；表面信息

## Abstract

Structured light measurement technology is one of the main means to obtaining three-dimensional information of the measured workpiece surface based on principle of optical triangulation. Through studies, method of extracting surface information for workpieces with free curved faces based on cross line structured light has been established, which can extract the spatial three-dimensional information of workpiece surface accurately and ensure the workpiece end face information can not be lost. Main research contents and results are included:

1) Basic principle of structured light vision measurement and the model of perspective projection transformation was analyzed. On this basis, a planar calibration board was made and the subpixel coordinates of corners were extracted by using Harris corner detection algorithm and subpixel refining method. Calibration method was adopted based on planar target nonlinear model. At the same time, a camera calibration software was developed which was used to calibrate the camera internal and external parameters and calibration error was about 0.2 pixels. Mechanical adjustment method was adopted to obtain the corresponding linear structured light plane parameter equation.

2) Cross line structured light image processing was introduced. Different threshold segmentation methods were compared and OTSU was chosen for image segmentation. Parabolic fitting gray centroid method was adopted to obtain the light strip center coordinates, and a method for classification of light centers was put forward.

3) A artifacts scanning model has been established, and the experimental platform was built based on this model; Based on VC6.0 for software development platform, a corresponding control processing software was developed. and collection and processing of the image, extraction of light strip center, reconstruction of three-dimensional coordinates, extraction of workpiece surface information were all realized.

4) A sole was used as experimental object. Then cross line structured light and word line structured light was adopted to scan surface of the sole and the extraction of sole surface information was realized. The experimental results show that precisions respectively was 0.018 mm and 2.12mm. At the same time, the workpiece end face informations were ensured and the

accuracy of the extraction was improved by using cross line structured light. As a result, the feasibility of this method was verified.

**Keywords:** System calibration; Cross line structured light; Center stripe;  
Surface information

<http://www.ixueshu.com>

## 目 录

摘 要 .....	I
Abstract.....	II
目 录 .....	IV
第一章 绪 论.....	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.1.1 国内外研究现状.....	2
1.1.2 线结构光测量方法 .....	2
1.1.3 线结构光三维测量技术理论及应用研究现状.....	3
1.2 论文主要研究内容.....	6
第二章 线结构光测量技术及系统标定 .....	7
2.1 线结构光三角测量原理.....	7
2.2 摄像机模型建立.....	8
2.3 摄像机参数标定.....	10
2.3.1 定标板设计与制作 .....	10
2.3.2 定标板角点提取.....	11
2.3.3 基于平面靶标非线性模型的摄像机标定 .....	14
2.3.4 摄像机标定软件开发 .....	17
2.3.5 标定结果和误差.....	19
2.4 线结构光视觉测量模型 .....	20
2.5 线结构光结构参数标定 .....	22
2.5.1 机械调整法.....	22
2.5.2 十字线结构光平面方程标定 .....	24
2.6 本章小结 .....	25
第三章 十字线结构光光条图像处理算法研究.....	26

3.1 光条图像处理过程.....	26
3.2 光条图像自适应作用域设定 .....	27
3.3 十字线结构光光条图像滤波 .....	28
3.4 光条图像分割 .....	30
3.4.1 二级阈值分割.....	30
3.4.2 最大类间方差法.....	31
3.5 十字线结构光光条中心条纹提取.....	32
3.6 十字线结构光光条中心点分类 .....	33
3.7 本章小结 .....	35
<b>第四章 工件表面信息提取实验装置总体设计.....</b>	<b>36</b>
4.1 结构光工件扫描实验模型建立 .....	36
4.2 实验平台搭建 .....	37
4.2.1 结构光发射模块.....	38
4.2.2 图像采集模块.....	39
4.2.3 传输模块 .....	39
4.3 控制处理软件的开发.....	40
4.3.1 软件设计的任务和目标 .....	40
4.3.2 软件方案总体设计 .....	41
4.3.3 工序流程 .....	42
4.3.4 软件功能设计.....	43
4.4 本章小结 .....	52
<b>第五章 鞋底表面信息提取实验及相应分析.....</b>	<b>53</b>
5.1 实验目的 .....	53
5.2 实验设备 .....	53
5.3 实验主要步骤 .....	53
5.4 实验结论和分析.....	54
5.4.1 一字线结构光扫描得到的鞋底表面信息 .....	54



5.4.2 十字线结构光扫描得到的鞋底表面信息 .....	55
5.5 两种扫描方法结果及误差分析 .....	57
5.6 本章小结 .....	60
<b>第六章 总结和展望 .....</b>	<b>61</b>
6.1 全文总结 .....	61
6.2 研究展望 .....	61
<b>参考文献 .....</b>	<b>63</b>
<b>致 谢 .....</b>	<b>67</b>
<b>攻读硕士学位期间的研究成果.....</b>	<b>75</b>

<http://www.ixueshu.com>

## 第一章 绪 论

### 1.1 研究背景和意义

进入高科技信息化时代，在制造业中越来越强调自动化，制造业自动化是将自动化技术、制造技术、视觉测量技术、信息技术与现代控制技术相结合，从而改善制造类企业的产品研发、经营、管理和生产等各个环节，从而提高产品质量、生产效率以及企业综合创新能力。同时随着机械制造的复杂度和精密度的要求越来越大，传统的测量方法已经不能满足当代的实际需求。而且在产品生产过程中，各种自由曲面工件表面形状的复杂性和测量该类表面的实时性要求同样对传统的测量方法提出了极为严峻的挑战<sup>[1]</sup>。

随着自动化技术和柔性生产的不断发展，各种工件的形状已经不是传统的标准件而是根据客户的实际要求特制的。同时随着人们生活水平的不断改善，人们对物质的要求已经不仅仅限于实用和耐用，而是追求时尚、美观和个性化，比如现代人对鞋子的需求已经不完全只是耐用，而是对鞋的舒适度和样式提出了更高的要求，需要设计出更符合人体运动动力学的个性化鞋子。针对这类产品，首先必须得到它们的表面三维信息，所以正是由于这一需求，现代制造业对不规则复杂工件的表面信息需求越来越大，而结构光视觉测量技术的出现正好弥补了这一需求。

结构光视觉测量技术具有众多优点，比如非接触性<sup>[2]</sup>特点，其可以通过投射一条或数条结构光在工件表面，利用 CCD 等摄像机采集相应的图像，运用图像处理技术、标定技术以及三维重构技术就可以轻松地得到工件表面的三维信息，有了这些三维数据就为以后的三维重建或个性化设计提供了良好的基础；它的特点还包括精度适中、柔性化、高效率等。正是由于线结构光这些优良的特点，其在工业中的应用也越来越广泛<sup>[3,4]</sup>。

本文基于十字型结构光提取自由曲面工件表面信息的方法，结合计算机技术、摄像机标定技术、图像处理技术和曲线拟合技术，以实现根据工件实际情况自动提取其表面及轮廓信息，对于提高加工装配等生产领域的自动化和智能化程度具有较为重要的参考价值。

### 1.1.1 国内外研究现状

### 1.1.2 线结构光测量方法

采用线结构光对工件曲面和轮廓进行三维测量已发展成为视觉检测技术中应用最为广泛的，究其原因在于该方法具有测量速度快、算法稳定、使用方便、结构简单等优点。该测量方法主要基于结构光三角测量原理<sup>[5]</sup>，利用结构光发生器发出的光束以一定角度投射到工件被测表面上，然后再利用光电器件如 CCD 灰度摄像机等采集投射光条在被测工件表面的反射光，根据其在光电器件敏感面上的移动位移即可求得工件表面的三维坐标信息。根据结构光投射模式可将光源模式细分为：

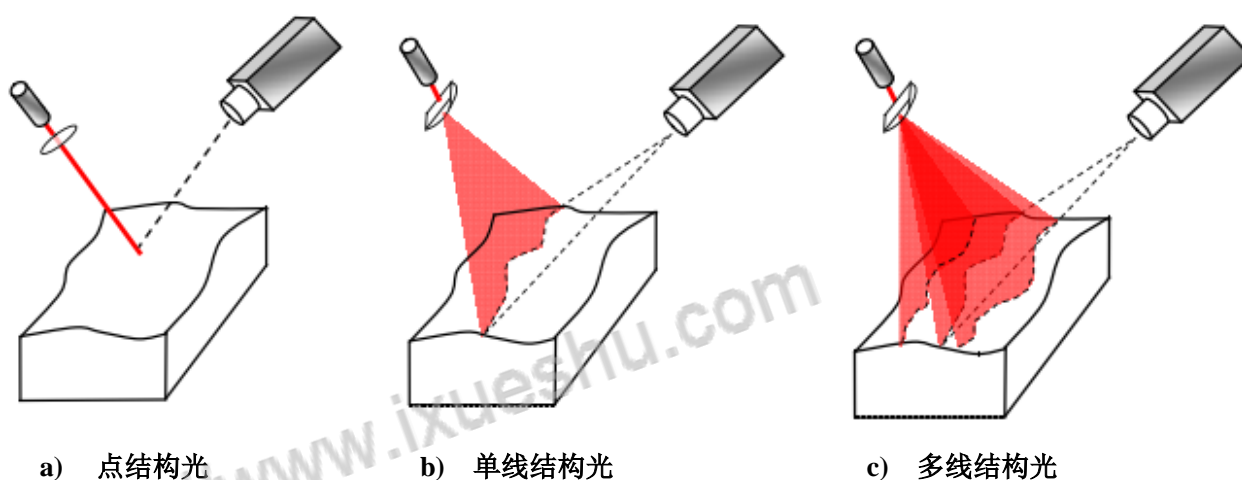


图 1.1 线结构光模式示意图

1) 点结构光<sup>[6]</sup>。如图 1.1a 所示，线结构光发生器投射一束光条，此时在被测工件表面会形成一个光点，同时该光点通过透视变换投射到对应摄像机的像平面上。但是，由于该方法只能得到一个点的三维坐标，信息量过少。

2) 单线结构光<sup>[7]</sup>。如图 1.1b 所示，线结构光发生器用线光源替代了点光源，在三维空间投射出一个结构光平面，当该平面与被测工件表面相交时会产生一条有一定厚度的亮条纹，然后通过坐标转换，就可以得到工件表面的三维信息，并且可以得到更多关于工件表面的信息，同时算法实现的复杂度也没有因此增加，故而，线结构光测量方法得到广泛的应用。

3) 多线结构光<sup>[8]</sup>。如图 1.1c 所示，线结构光发生器同时投射多条光条，从而在工件表面就形成了多条光条覆盖，同时也就可以得到更多关于工件表面的三维信息。与单线结构

光方法比较，多线结构方法大大增加了测量的范围，但相应地加大了系统标定的难度和光条图像的匹配难度。

### 1.1.3 线结构光三维测量技术理论及应用研究现状

世界上科技较发达的国家对线结构光测量技术的研究已经有一段相当长的时间了，并且得到了相当大的科研成果和实际应用。

线结构光三维测量法是由 Pennington<sup>[9]</sup>等学者在 20 世纪 70 年代首度提出的，但是研究成果只应用于物体间的距离测量。在接下来的一段时间里，国外的科研工作者开始将研究方向朝着工件三维重建方向发展。直到上世纪 80 年代，结构光视觉检测技术相继在美国和日本的工业领域成功得到了应用。比如在 20 世纪 80 年代末，Bremner<sup>[10]</sup>等研发了一套利用 XY 驱动条状外形的视觉尺寸检测系统，同时保证在 2mm×3mm 的视觉范围内的测量误差仅为 0.01mm。随后在 20 世纪 90 年代初，Dahle<sup>[11]</sup>等学者利用线结构光技术在线检测轮廓几何量，该方法成功应用于橡胶制品行业中。随着科技的不断更新发展，到 20 世纪末期，Richard<sup>[12]</sup>等数位科学家研发了一种新的结构光检测系统，此系统的工作原理是将灰度编码作 90° 转换，同时在不同的角度利用 CCD 摄像机采集光条图片，从而实现对整个工件的三维重构。

国外不仅在理论方面做出了重大的贡献，而且在实际应用方面也有着不菲的成绩。同时这些产品已经成功应用于逆向工程、机械制造、工业生产、产品缺陷检测、尺寸检测、文物考古以及人脸识别<sup>[13,14,15]</sup>等多种领域，极大地促进了国民经济的发展。下面简要介绍一下数款国外已经广泛应用的线结构光测量系统，如图 1.2 所示。

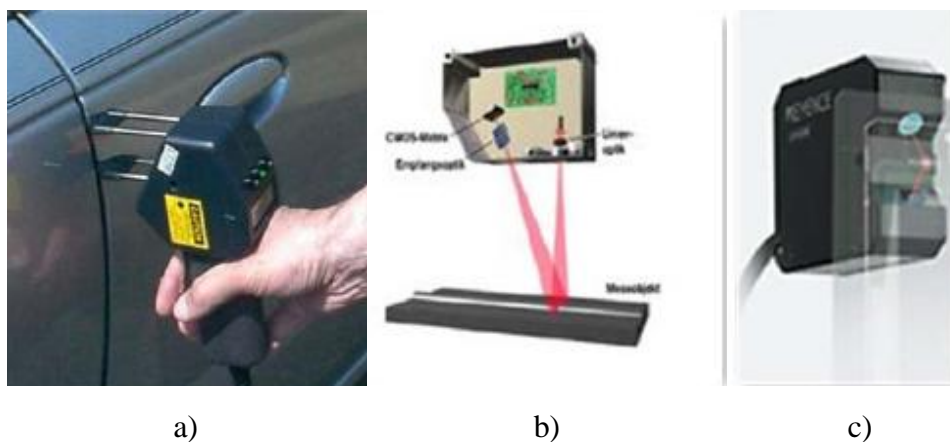


图 1.2 数款国外广泛应用的线结构光测量系统

a) 美国 LIM 公司自主研发生产的 LaserGauge-Measuring-System 系列产品, 如图 1.2-a 所示。该系列产品已广泛应用于飞机、车辆等表面尺寸大小检测, 所检测的尺寸包括平行度、表面粗糙度和接缝宽度等装配尺寸, 并且该公司的主打产品是基于嵌入式平台研发的, 可完全脱离 PC 机进行检测, 有很强的可操作性。

b) 德国 ME 公司自主研发的 ScanControl 系列产品如图 1.2-b 所示。该产品采用结构光三角测量原理在被测工件表面形成结构光扫描线, 从而量化分析被测工件表面轮廓。并且该系统的测量误差在 0.2% 以内。

c) 日本的 KEYENCE 公司的 LK-G500 系列产品如图 1.2-c 所示。该类产品主要采用光学体系和感光镜头。传感器末端能根据被测工件的形状、颜色等的变化而相应改变反射系数。其测量精度达到了 0.1%。

另外还有加拿大 DigitalScan 公司研发的 Digitalscanner 系列产品, 通过光栅扫描, 就可以达到工件的三维重构。美国 Immersion 公司研发的 MicroscribeMX 便携式三维数组扫描仪, 只要将扫描仪安装在机械手臂上, 使传感器移动更加灵活, 可以完成复杂工件表面的三维测量。

国内对线结构光视觉测量技术研究较晚, 但还是取得了一定的成果。国内研究主要分为理论研究和线结构光在工业中的应用。

在理论研究方面, 主要包括线结构光在检测中的算法实现。浙江大学宇飞鸿<sup>[16]</sup>通过设计一个能产生结构光的集成电路, 对光栅生成和图像特点进行了分析。李中伟<sup>[17]</sup>等研究人员提出了一种精度既高操作又简单的投影仪标定算法, 该方法通过在定标板上不同方向的两个光栅亮条纹, 从而建立起摄像机和投影仪的关系, 最后运用先进的摄像机标定方法标定出投影仪参数。与此同时, 许丽<sup>[18]</sup>等采用矩阵扰动理论和误差原理系统地分析了线结构光测量导致的标定以及测量误差, 同时提出了系统误差的理论传递模型, 为以后对线结构光的误差分析提供了理论支撑。此后天津大学的边琰<sup>[19]</sup>等提出了一种运用结构光测量原理对工件台阶尺寸进行精确测量的方法, 测量的精度小于 0.05mm。贾倩倩<sup>[20]</sup>等提出了一种对数个灰度摄像机同时进行标定的方法。张永斌<sup>[21]</sup>等人提出了一种基于多台阶的结构光检测方法, 该方法利用十字线结构光发射器, 能够对复杂多台阶进行精确快速地测量。浙江理工大学的武传宇、贺磊盈<sup>[22]</sup>等提出了一种基于线结构光自动生成鞋底喷胶轨迹的方法, 该方法利用线结构光连续扫描鞋底底面, CCD 连续采集光条图像, 对图像进行光条中心提

取, 对所有光条中心进行 B 样条拟合, 最后生成鞋底轨迹曲线, 进而得到喷胶轨迹, 该方法的误差为 0.91mm。清华大学<sup>[23,24]</sup>自主研发了一种基于线结构光测量原理的多用途传感技术, 该项技术可以对腐蚀性工件表面和运动的物体进行实时非接触式测量以及相应的三维重构, 同时可以保证极高的精度。浙江大学<sup>[25,26]</sup>发明了一种基于软件原理和硬件技术相结合的方法, 该方法可以用于工件三维重构。

在对应产品研发方面, 近十年国内高校出现了学习结构光测量的高潮, 涌现出了不少研究成果。如图 1.3 国内比较著名的光学测量仪器。

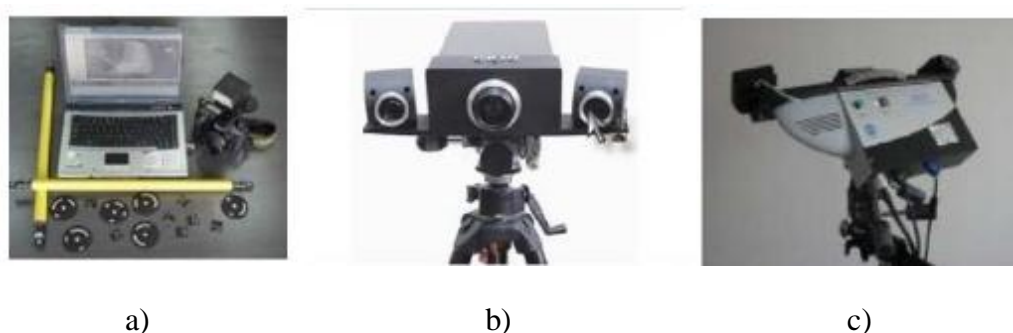


图 1.3 国内几款线结构光测量装置

1) 图 1.3a 显示了由北京天元三维科技公司研发的 Digimetric 三维测量系统。该系统通过摄像机采集数副含有特征点的图像, 然后再根据这些特征点实现对多副图的自动拼接, 从而完成整个工件的三维测量。

2) 图 1.3b 显示了同样由天元科技自主研发的 OKIO 系列三维扫描系统, 其运用双目视觉原理<sup>[27]</sup>, 最终也可实现工件的三维重建。

3) 图 1.3c 显示了由上海数造机电科技公司自主研发的 3DSS 系列扫描系统, 该产品运用了结构光光栅测量原理<sup>[28,29]</sup>, 主要通过光栅相位的编码以及相应的解码, 最终便可完成工件的三维重建。

综上所述, 国外对于线结构光检测技术已有大量的研究, 研发的检测设备可达 0.1% 的测量精度。但其不足之处在于设备总体价格过高, 难以在工厂生产线中大量应用。国内对线结构光的应用主要采用一字线结构光, 但由于一字线结构光扫描工件表面时, 总是存在工件端面关键图像帧的丢失, 导致端面测量精度不高, 稳定性也不太理想。鉴于以上两点不足之处, 本文提出了基于十字线结构光的三维检测系统, 该方法既可增加工件端面特征信息, 也可保证测量精度和稳定性, 同时又可大大降低整套设备的研发成本。

## 1.2 论文主要研究内容

本论文研究的主要内容包括以下几个内容

### 1) 结构光测量技术及系统标定

阐述并分析线结构光的视觉检测的基本原理和检测模型，介绍系统中常用的坐标系，摄像机模型以及世界坐标系下的视觉变换理论。制作了平面棋盘式定标板，采用了基于平面靶标非线性模型的标定方法，同时开发了一款摄像机标定软件，计算了标定误差；然后，为了获得线结构光平面方程，利用机械调整法得到了相应的线结构光平面参数方程。

### 2) 十字型结构光光条处理算法研究

采集原始光条图像，对阈值分割的不同方法进行了比较，并根据图像处理结果选定合理的方法，然后利用基于抛物线拟合的灰度重心法得到了光条中心坐标，最后提出了一种对提取中心进行左右光条分类的方法。

### 3) 工件表面和轮廓信息提取实验装置总体设计

建立工件扫描模型，并搭建了一个实验平台；同时根据实际开发需要，以 VC6.0 为软件开发平台，开发了一款相对应的控制处理软件，功能包括运动控制，图像采集处理，三维坐标重建和工件表面信息生成。

### 4) 鞋底表面信息提取实验及相应分析

以鞋底为实验对象，分别利用十字线结构光和一字线结构光扫描鞋底表面，实现了鞋底表面信息的提取，并对结果进行相应地分析。

## 第二章 线结构光测量技术及系统标定

本章的内容包括摄像机参数标定以及线结构光传感器参数方程的标定。目前视觉测量方法众多，其中线结构光视觉测量技术由于其抗干扰能力强、实时性好、适用范围广、测量范围大、精度较高且可控性强，因此被广泛应用于各种三维工件的精确测量。

### 2.1 线结构光三角测量原理

线结构光三角测量法是随着激光技术而发展起来的，特别是机器视觉、自动化制造、工业检测等领域有着广泛的应用。如图 2.1 所示，设  $\lambda$  为线结构光发生器产生的光平面， $M$  为  $\lambda$  光平面与待测工件表面相交形成的具有一定厚度的亮条纹，其包含了待测工件表面的空间三维信息，但是采集到的数字图像仅包含二维信息。所以结构光测量技术需要解决的关键问题就是实现图像二维到三维的转化。因此，为了得到二者之间的对应关系，即实现数字图像点  $(U, V)$  重建其对应的三维空间点  $(X_w, Y_w, Z_w)$ ，就是线结构光视觉测量原理，如式 2-(1)所示。

$$(X_w, Y_w, Z_w) = T(x, y) \quad 2-(1)$$

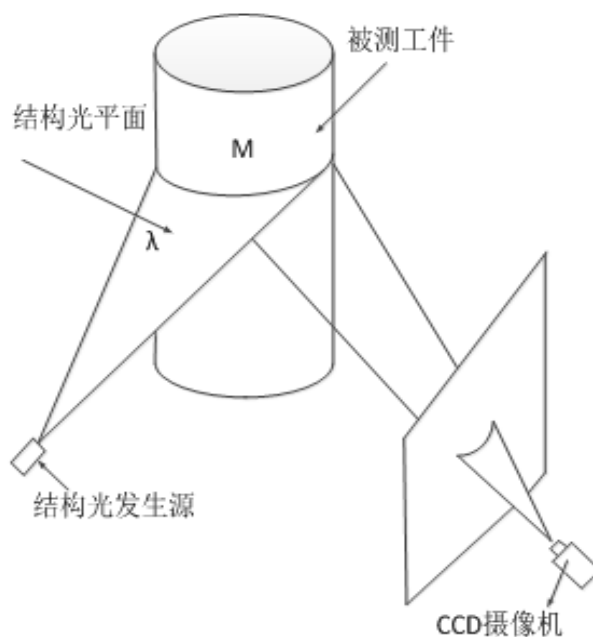


图 2.1 结构光测量原理图



## 2.2 摄像机模型建立

摄像机定标参数总是基于一个已知几何模型，根据不同的需求建立不同的几何模型，一般此类模型可分为两大类：一类是不考虑各种镜头畸变的线性模型，比如小孔模型<sup>[32-34]</sup>和直接线性模型，主要应用于镜头视角不大或者物体在光附近的情况，是所有其他模型的基础；另一类是考虑各种畸变的非线性模型，为针孔模型的拓展，具有很高的测量精度，主要应用于广角镜头场合，如投影测量法、Tsai<sup>[35]</sup>模型和双平面模型等。本文采用基于张正友提出的非线性摄像机模型，同时考虑四阶径向畸变和两阶切向畸变。

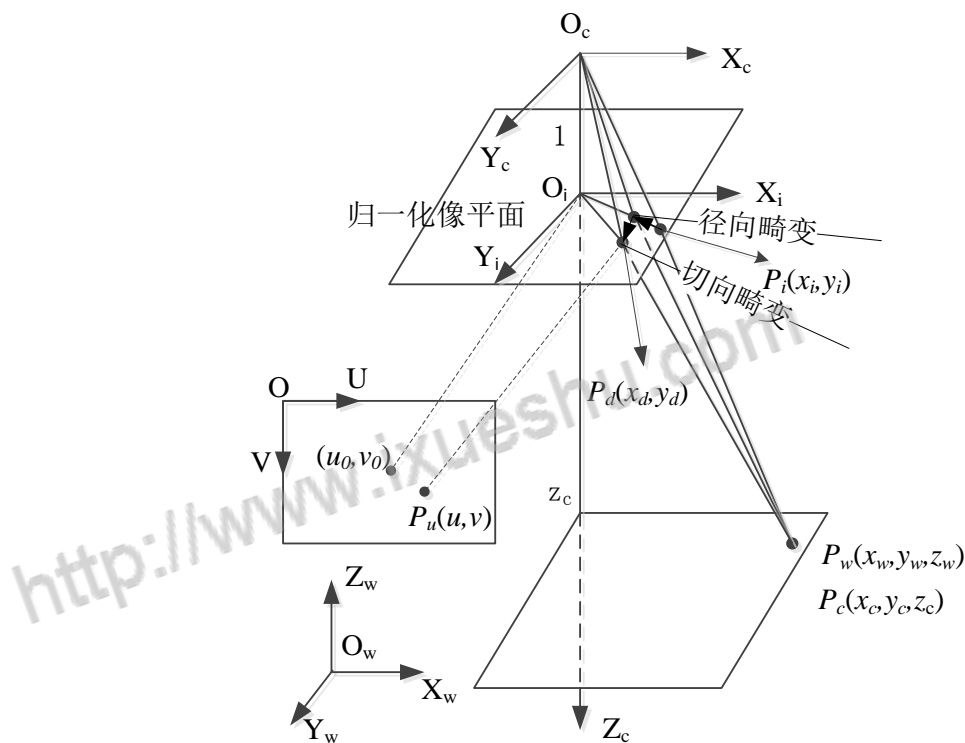


图 2.2 非线性摄像机模型

在视觉测量的过程中，工件从三维空间到计算机图像的显示，成像关系复杂，变换过程主要包括4个坐标系，如图2.3所示，包括从世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 转换到摄像机坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$ ，然后从摄像机坐标系转换到摄像机像面坐标系 $O_i-X_iY_i$ ，最后通过比例缩放投影到计算机上的图像坐标系 $O-UV$ 。

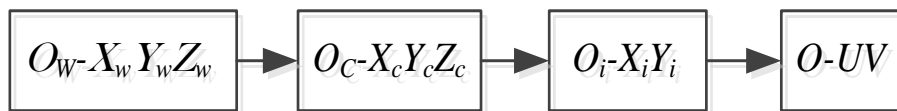


图 2.3 四个坐标转换

从世界坐标系中的坐标 $(x_w \ y_w \ z_w)$ 到摄像机坐标系中坐标 $(x_c \ y_c \ z_c)$ 的转化关系

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad 2-(2)$$

其中  $\mathbf{R}$  为单位正交的旋转矩阵,  $\mathbf{T}$  为平移向量,  ${}^c\mathbf{M}_w$  即为摄像机外参数矩阵。

由于从摄像机坐标系转换到像面坐标系存在一个比例转换关系, 为了问题的简化, 本文将摄像机成像平面进行归一化处理如图 2.2 所示, 则摄像机坐标系坐标 $(x_c \ y_c \ z_c)$ 到归一化像面理想坐标 $(x_i \ y_i)$ 的转换关系

$$\begin{cases} x_i = \frac{x_c}{z_c} \\ y_i = \frac{y_c}{z_c} \end{cases} \quad 2-(3)$$

由于真正的镜头通常存在一些畸变, 主要为径向形变, 同时也会有轻微的切向畸变, 所以

$$\begin{cases} x_i = x_d(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + 2p_1 x_d y_d + p_2(r^2 + 2x_d^2) \\ y_i = y_d(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + 2p_2 x_d y_d + p_1(r^2 + 2y_d^2) \end{cases} \quad 2-(4)$$

上式中  $r^2 = x_d^2 + y_d^2$ ,  $k_1$  和  $k_2$  分别为一阶和二阶径向形变系数,  $p_1$  和  $p_2$  分别为一阶和二阶切向形变系数。

从图像坐标 $(u \ v)$ 到实际归一化像面坐标 $(x_d \ y_d)$ 的转换

$$\begin{cases} x_d = f_x^{-1}(u - u_0) \\ y_d = f_y^{-1}(v - v_0) \end{cases} \quad 2-(5)$$

式中 $(u_0 \ v_0)$ 为图像的主点(通常在图像的中心),  $f_x$  和  $f_y$  分别为图像坐标 X 方向和 Y 方向的比例缩放系数, 也可以认为是以像素为单位的焦距。

以上各式中需要标定的参数包括旋转矩阵  $\mathbf{R}$ , 平移向量  $\mathbf{T}$ , 畸变系数  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $p_1$  和  $p_2$ , 比例缩放系数  $f_x$  和  $f_y$  以及图像主点 $(u_0 \ v_0)$ 。

## 2.3 摄像机参数标定

### 2.3.1 定标板设计与制作

一般情况下,进行摄像机标定时,需要放置一个被称为定标板<sup>[36]</sup>的参照物,该参照物的形状和大小必须已知。在选择定标板时,需要符合两个基本条件<sup>[37]</sup>: a) 已知定标板特征点之间相对位置关系; b)容易提取特征点图像坐标。在实际摄像机标定过程中,经常使用的靶标特征点有圆形中心点、方块顶点或中心点、直线交点、十字交叉点及平面角点等,如图 2.4 所示。本文采用方块顶点方式提取特征点。

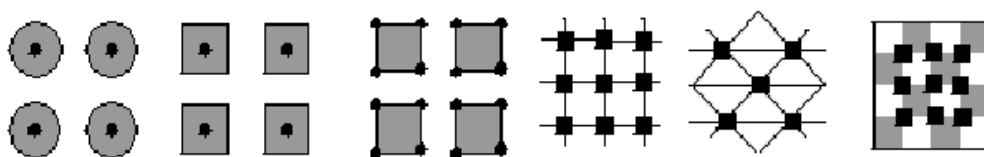


图 2.4 靶标特征点类型

按照结构定标板可以分为立体式和平面式。考虑到立体式成本较高,同时较难保证加工的精度。所以本文采用平面棋盘式定标板,如图 2.5 所示。

平面棋盘式定标板上均匀分布着黑白相间的方格,方格尺寸为 19mm×19mm,共有角点(即特征点)9×9 个。

定标板制作过程如下:

- (1) 运用 AutoCad 等画图软件绘制一组 10×10 黑白相间的方格图形,方格大小设定为 20mm×20mm;
- (2) 将绘制好的图形 1:1 打印在 A4 纸上;由于打印过程中图形的实际大小与纸张有关,实际的大小会按比例缩放,所以打印完成后必须用游标卡尺进行再次测量(精度为 0.02mm),最终测量显示方格的大小为 19mm×19mm;
- (3) 打印完毕后,将打印好的 A4 纸黏贴在已经准备好的矩形框架里;至此定标板制作完毕。

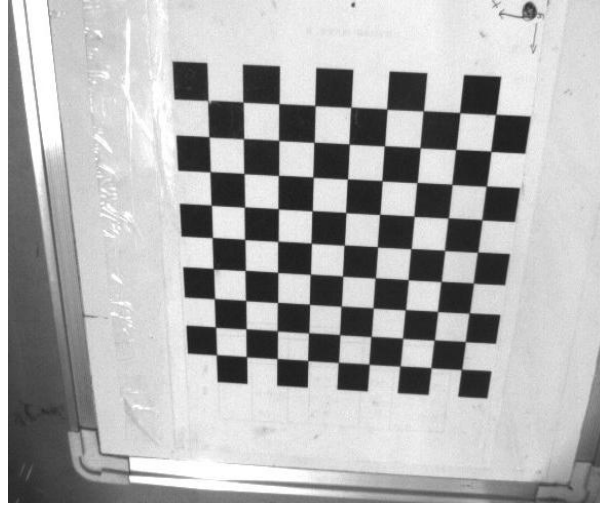


图 2.5 平面棋盘式定标板

### 2.3.2 定标板角点提取

数字图像中的角点为图像亮度变化剧烈的点或图像边缘曲线上曲率的极大点，一般该类点的提取方法分为两类：一类是基于图像边缘信息，同时运用多项式拟合技术拟合这些边缘信息，角点就是这些多项式线段的交点；还有一类就是利用图像灰度信息，角点就是这些灰度信息的最大曲率点。考虑到 Harris<sup>[38]</sup>算法实现简单，故本文先采用该算法进行像素级角点提取，然后再进行亚像素检测。

#### 1) Harris 像素级角点提取

Harris 角点检测算法基于信号处理中自相关函数原理，该原理认为角点与自相关函数有关，且自相关函数描述了局部图像灰度变化的程度，同时把灰度变化量定义为：

$$T(x, y) = \sum_{u,v} w_{u,v} |I_{x+u,y+v} - I_{u,v}|^2 \quad 2-(6)$$

式中  $T(x,y)$  为灰度平均变化度量， $I_{u,v}$  图像初始位置灰度值， $I_{x+u,y+v}$  为移动偏移量为  $(x,y)$  后图像的灰度值， $w$  为窗口函数。

将上式化为二次型：

$$T(x, y) = [u, v] M \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad 2-(7)$$

其中矩阵  $M$  为实对称矩阵：

$$M = \sum w \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x \bullet I_y \\ I_x \bullet I_y & I_y^2 \end{bmatrix} \quad 2-(8)$$

对式 2-(13)进行对角化处理得：

$$T(x, y) = R^{-1} \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} R \quad 2-(9)$$

式 2-(9)中， $R$  为旋转矩阵； $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  为特征值；检测的判断条件为：

- a) 若  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  都较大，则检测为角点；
- b) 若  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  其中有一个较大，另一个较小，则为边界区；
- c) 若  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  都较小，则为平坦区。

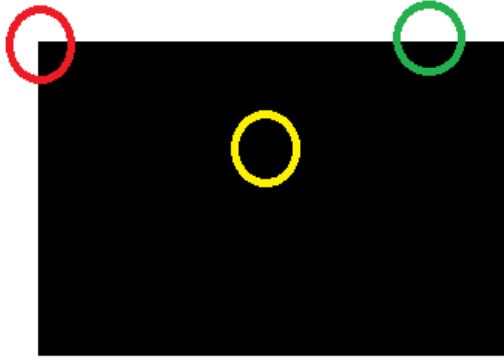


图 2.6 角点（红）、平坦（黄色）、边界（绿色）

为了能顺利得到角点，故建立了一个角点响应函数（HFR），可以表示为：

$$HRF(x, y) = \det(M) - k(\text{trace}(M))^2 \quad 2-(10)$$

式 2-(10)中， $k$  值通过经验得到，一般取  $k=0.04$ ； $\det(\mathbf{M})$  为矩阵  $\mathbf{M}$  的行列式值， $\text{trace}(\mathbf{M})$  为矩阵  $\mathbf{M}$  的迹。所以选取合适的阈值，当像素的 HFR 大于阈值时，该像素就是角点。

## 2) 亚像素检测

Harris 角点检测法只能提取像素级角点坐标值，如果需要确定图像中一个尖锐的峰值点位置，而峰值的位置往往都不会恰好位于一个像素正中心。所以需要采用亚像素检测方法，将求得的角点位置精确到亚像素级精度。本文采用连续迭代的方式得到亚像素级精度的角点位置，如图 2.7 所示放射鞍点  $q$ 。

亚像素级角点提取算法是基于向量正交性原理，即从角点  $q$  到其某个邻域点  $p_i$  的向量和  $p_i$  点处的图像梯度正交，初始邻域中心为上一步得到的像素级角点。

$$\varepsilon_i = DI_{p_i}^T \bullet (q - p_i) \quad 2-(11)$$

式中： $DI_{p_i}$  表示在  $q$  的一个邻域点  $p_i$  的图像梯度。

$q$  的值通过最小化  $\varepsilon_i$  得到, 所以可以通过设  $\varepsilon_i=0$ , 建立一个点积表达式为 0 的方程组

$$\sum_{i=0}^n (DI_{p_i} \bullet DI_{p_i}^T) \bullet q - \sum_{i=0}^n (DI_{p_i} \bullet DI_{p_i}^T \bullet p_i) = 0 \quad 2-(12)$$

式中表示对  $q$  的邻域中的所有点的梯度求和。

设  $G = \sum_{i=0}^n (DI_{p_i} \bullet DI_{p_i}^T)$ ,  $b = \sum_{i=0}^n (DI_{p_i} \bullet DI_{p_i}^T \bullet p_i)$ , 将上式改写为

$$q = G^{-1}b \quad 2-(13)$$

通过上式可以得到一个新的角点位置  $q$ , 然后需要以这个新的角点作为新的初始点进行迭代直到满足迭代的终止条件。

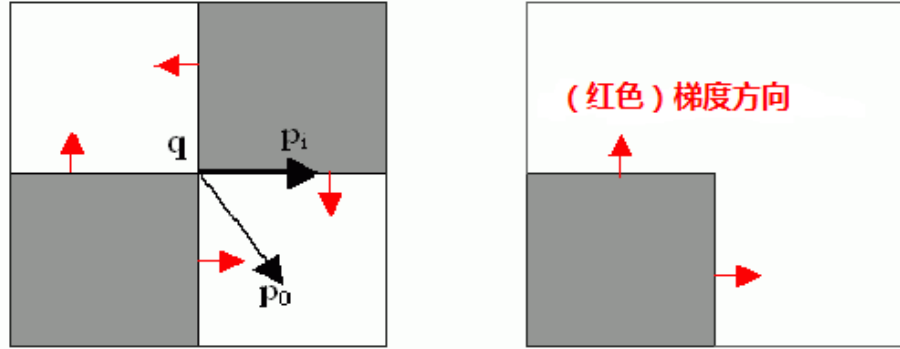


图 2.7 亚像素级精度角点提取示意图

角点提取的效果图如图 2.8 所示。

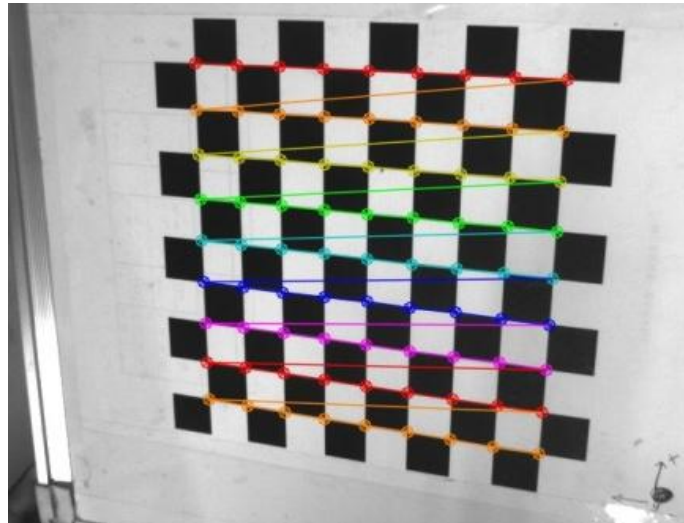


图 2.8 角点提取效果图

### 2.3.3 基于平面靶标非线性模型的摄像机标定

摄像机标定就是利用采集到的数字图像信息，然后根据工件表面某些点的三维坐标和其在数字图像中对应点之间的关系，构建相对应的摄像机几何模型，最后经过计算得到摄像机模型的几何参数。

本文采用的是张正友提出的非线性模型摄像机的线性标定方法，采用平面棋盘式定标板，通过在不同的多个视点采集定标板图像，从而实现摄像机的标定。其标定原理是：首先在不考虑摄像机畸变的情况下，对摄像机的内外参数模型的线性参数进行标定，从而获得线性参数的初始值，然后利用标定出的线性参数初始值，对非线性参数即畸变系数进行标定；由于标定线性参数时没有考虑畸变，故得到的线性参数的初始值精度较低，同理非线性参数精度也不高；为了提高标定精度，需要再利用非线性参数重新标定线性参数，然后利用新的线性参数再重新计算非线性参数，直到线性参数和非线性参数的值收敛为止。

其标定步骤包括：单应性矩阵求取、摄像机内参数和外参数求取、畸变系数求取以及迭代参数优化。

#### 1) 单应性矩阵求取

假设定标板位于世界坐标系  $Z_w=0$  的平面上，由于求取单应性矩阵不考虑畸变情况，则

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = M_{in} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = M_{in} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad 2-(14)$$

式中：s 为深度系数； $M_{in} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$  为摄像机的四参数模型内参数矩阵。

先将上式改写为

$$sI = HP \quad 2-(15)$$

式中： $I$  为特征点的图像坐标； $P$  为特征点的世界坐标； $H = M_{in} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \end{bmatrix}$  为笛卡尔空间到图像空间的单应性矩阵。

将上式展开后为

$$\begin{cases} su = \bar{h}_1^T P \\ sv = \bar{h}_2^T P \\ s = \bar{h}_3^T P \end{cases} \quad 2-(16)$$

式中： $\bar{h}_i^T$  为  $H$  的第  $i$  行。

消除  $s$  后得到

$$\begin{bmatrix} P^T & 0^T & -uP^T \\ 0^T & P^T & -vP^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{h}_1 \\ \bar{h}_2 \\ \bar{h}_3 \end{bmatrix} = 0 \quad 2-(17)$$

式中： $\bar{h}_i$  是  $H$  的第  $i$  行转置后形成的列向量。

对于  $n$  个特征点，可以得到  $n$  个如式 2-(17) 所示的方程，可以表达为

$$A\bar{H} = 0 \quad 2-(18)$$

式中： $A$  为  $2n \times 9$  的矩阵； $\bar{H}$  为  $9 \times 1$  矩阵。

$A$  的最小特征值对应的特征向量，即为  $\bar{H}$ ；然后由  $\bar{H}$  得到  $H$ ；最后以得到的  $H$  为初始值利用最大似然估计法优化  $H$  值，即由式 2-(19) 对  $F$  最小化获得。

$$F = \sum \|I - \hat{I}\|^2 \quad 2-(19)$$

$$\text{式中：} \hat{I} = \frac{1}{\bar{h}_3^T P} \begin{bmatrix} \bar{h}_1^T P \\ \bar{h}_2^T P \end{bmatrix}。$$

## 2) 摄像机内参数和外参数求取

由于单位向量  $r_1$  和  $r_2$  正交的，可以推出以下两个约束关系

$$h_1^T M_{in}^{-T} M_{in}^{-1} h_2 = 0 \quad 2-(20)$$

$$h_1^T M_{in}^{-T} M_{in}^{-1} h_1 = h_2^T M_{in}^{-T} M_{in}^{-1} h_2 \quad 2-(21)$$

令  $B = M_{in}^{-T} M_{in}^{-1}$ ，将  $M_{in}$  带入  $B$ ，通过计算得



$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{f_x^2} & 0 & -\frac{u_0}{f_x^2} \\ 0 & \frac{1}{f_y^2} & -\frac{v_0}{f_y^2} \\ -\frac{u_0}{f_x^2} & -\frac{v_0}{f_y^2} & \frac{u_0^2}{f_x^2} + \frac{v_0^2}{f_y^2} + 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix} \quad 2-(22)$$

显然,  $\mathbf{B}$  是一个对称矩阵, 共有六个不同元素。因此, 可以定义一个六维向量  $\mathbf{b}$ :

$$\mathbf{b} = [B_{11} \quad B_{12} \quad B_{22} \quad B_{13} \quad B_{23} \quad B_{33}]^T \quad 2-(23)$$

于是, 有

$$h_i^T B h_j = v_{ij}^T \mathbf{b} \quad 2-(24)$$

$$\text{式中: } v_{ij} = [h_{i1}h_{j1} \quad h_{i1}h_{j2} + h_{i2}h_{j1} \quad h_{i2}h_{j2} \quad h_{i3}h_{j1} + h_{i1}h_{j3} \quad h_{i3}h_{j2} + h_{i2}h_{j3} \quad h_{i3}h_{j3}]^T$$

将式 2-(24) 分别带入式 2-(20) 和式 2-(21), 得

$$\begin{bmatrix} v_{12}^T \\ (v_{11} - v_{22})^T \end{bmatrix} \mathbf{b} = 0 \quad 2-(25)$$

对于  $n$  副图像, 得到  $n$  组式 2-(25) 方程, 将其写成矩阵形式为

$$\mathbf{V} \mathbf{b} = 0 \quad 2-(26)$$

式中:  $\mathbf{V}$  是  $2n \times 6$  的矩阵。

当采集的图像数  $n \geq 3$  时, 通过式 2-(26) 可以求出向量  $\mathbf{b}$ 。  $\mathbf{V}_b$  的最小特征值对应的特征向量, 即为所求  $\mathbf{b}$ 。根据  $\mathbf{B}$  和  $\mathbf{b}$  的定义, 根据式 2-(22) 和式 2-(23), 可以求得摄像机的内参数:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_0 = \frac{a}{b} \\ u_0 = -\frac{B_{13}f_x^2}{c} \\ f_x = \sqrt{\frac{c}{B_{11}}} \\ f_y = \sqrt{\frac{cB_{11}}{b}} \end{array} \right. \quad 2-(27)$$

式中：  $a = B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23}$ ，  $b = B_{11}B_{22} - B_{12}^2$ ，  $c = B_{33} - \frac{B_{13}^2 + v_0 b}{B_{11}}$ 。

获得摄像机内参数后，由单应性矩阵  $H = M_{in} [r_1 \ r_2 \ t] = [h_1 \ h_2 \ h_3]$ ，求得外参数矩阵

$$\begin{cases} r_1 = M_{in}^{-1} h_1 \\ r_2 = M_{in}^{-1} h_2 \\ r_3 = r_1 \times r_2 \\ t = M_{in}^{-1} h_3 \end{cases} \quad 2-(28)$$

### 3) 畸变系数求取

摄像机镜头畸变系数求取包括切向畸变系数和径向畸变系数，同时假设在摄像机坐标系的 X 轴和 Y 轴的畸变相同。如式 2-(4)所示。

将式 2-(5)代入 2-(4)，得

$$\begin{bmatrix} x_i r^2 & x_i r^4 & 2x_i y_i & 2x_i^2 + r^2 \\ y_i r^2 & y_i r^4 & 2y_i^2 + r^2 & 2x_i y_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_d - x_i \\ y_d - y_i \end{bmatrix} \quad 2-(29)$$

式中：无畸变理想坐标  $(x_i, y_i)$  通过式 2-(2)和式 2-(3)求得，实际坐标  $(x_d, y_d)$  通过式 2-(5)求得。

对于 n 幅图像每幅取 81 个特征点，则可以构成 81n 个式 2-(29)的方程组。最后利用最小二乘法求解畸变系数  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $p_1$  和  $p_2$ 。

### 4) 参数迭代优化

获得畸变系数后，利用式 2-(30)通过使  $F'$  最小，优化摄像机的内外参数。反复迭代畸变系数和摄像机内外参数，直到收敛为止。

$$F' = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{81} \|I_{ij} - \hat{I}_{ij}(M_{in}, k_1, k_2, p_1, p_2, R_i, t_i, P_j)\| \quad 2-(30)$$

#### 2.3.4 摄像机标定软件开发

采用的摄像机为 Point Grey 公司 Grasshopper2 系列的 CCD 灰度级摄像机，分辨率为 640×480。开发本款软件的目的是为了更方便地标定出摄像机的内外参数以及得到相应的

标定误差，同时为了能使标定结果能够达到可视化效果，本文采用 Win7 操作系统和 Vc++6.0 软件开发平台，在开发过程中部分采用了 OpenCV1.0<sup>[39]</sup>的一些库函数。

标定软件流程图如图 2.9 所示：

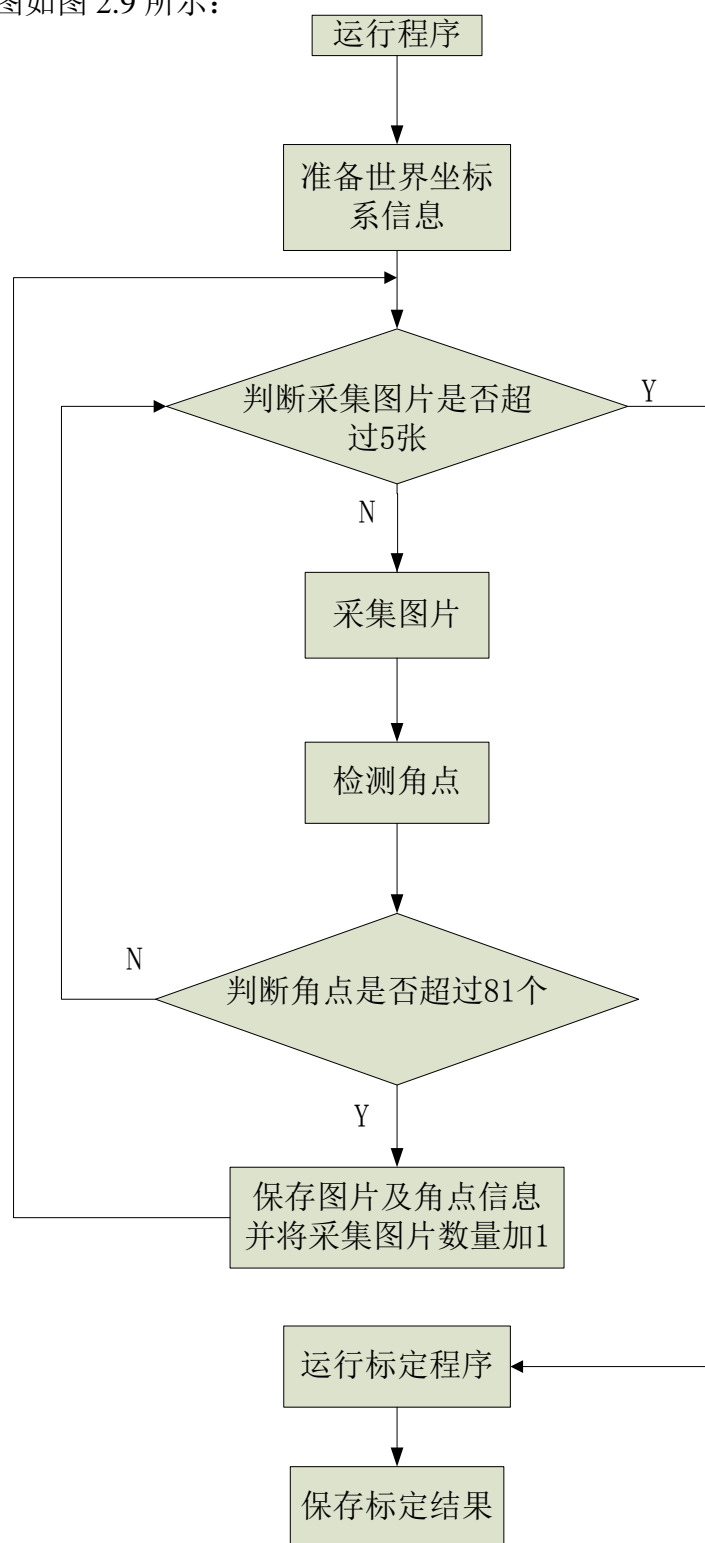


图 2.9 标定程序流程图

本款软件的优点是将靶标图像的采集和摄像机的标定集合在一起，并能对角点提取效果图进行可视化显示，同时能查询每幅图的角点信息，并能指定用于标定摄像机外参数的靶标图像，而且可以在线多次标定。摄像机标定软件具体显示界面如图 2.10 所示。

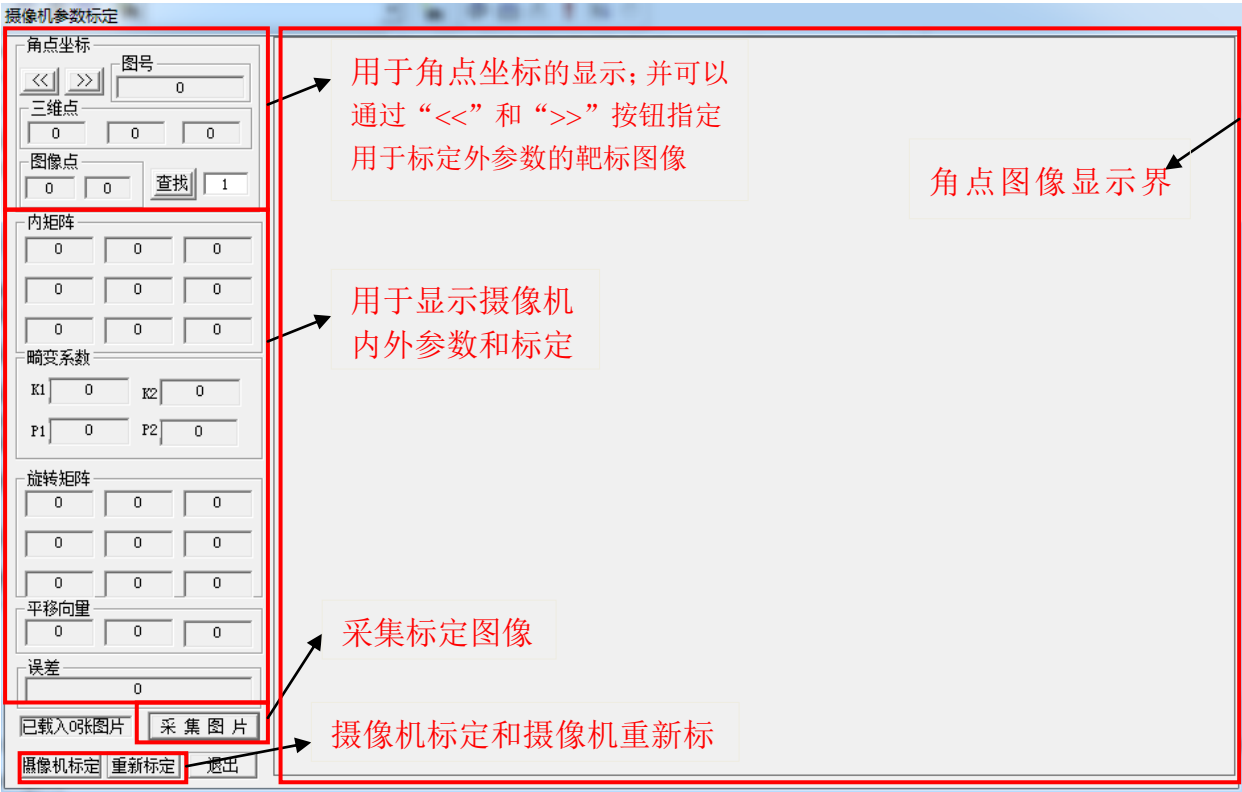


图 2.10 摄像机参数标定软件

2.3.5 标定结果和误差

运行摄像机标定软件，连续采集不同位置的 10 张原始靶标图片，并选用第 7 张做为摄像机外参数标定的参考图片。每张图片可提取 81 个角点，表 3.1 记录了第七张图片提取的部分角点坐标。

表 3.1 角点坐标（部分）

$x_{wi}(mm)$	$y_{wi}(mm)$	$u_i(pixel)$	$v_i(pixel)$	$x_{wi}(mm)$	$y_{wi}(mm)$	$u_i(pixel)$	$v_i(pixel)$
234	82	225.287	100.72	234	101	227.257	131.57
215	82	259.117	101.991	215	101	260.453	132.748
196	82	293.687	103.218	196	101	294.345	134.022
177	82	328.459	104.415	177	101	328.348	135.368
158	82	363.067	105.576	158	101	362.162	136.532

139	82	397.704	106.73	139	101	396.069	137.726
120	82	432.952	107.938	120	101	430.488	139.004
101	82	468.161	109.199	101	101	464.904	140.306
82	82	502.744	110.422	82	101	498.696	141.469
...	...	...	...	...	...	...	...

由此可以得到摄像机的内外参数

$$f_x=831.014, f_y=829.407, u_0=325.727, v_0=214.004$$

$$k_1=-0.1234, k_2=0.2389, p_1=1.022 \times 10^{-3}, p_2=3.348 \times 10^{-4}$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} -0.9978 & -0.0041 & 0.0656 \\ -0.0395 & 0.8356 & 0.5478 \\ 0.0526 & 0.5492 & -0.834 \end{bmatrix}, \mathbf{T} = [178.395 \quad -121.607 \quad 399.057](\text{mm})$$

摄像机标定过程必定存在误差, 现根据标定结果估算图像上的坐标误差。设 $(u_i \ v_i)$ 为提取的靶标图像上对应的点坐标,  $(u'_i \ v'_i)$ 为运用已标定参数反算的图像坐标点。理论上这两个坐标点是重合的, 但由于标定过程存在误差, 使两者之间存在不同程度的位置偏差, 先定义位置偏差

$$e_i = \sqrt{(u_i - u'_i)^2 + (v_i - v'_i)^2}, i = 0, 1, 2, \dots, N \quad 2-(31)$$

位置偏差的均方差

$$E = \sqrt{\sum_{i=0}^N e_i^2 / N} \quad 2-(32)$$

根据式 2-(32) 计算得到  $E=0.2042$  像素。结果表明本文采用的标定算法精度较高, 能使已知点变换到像面坐标系后和实际像面坐标系对应点较好的重合在一起。

## 2.4 线结构光视觉测量模型

本文采用基于透视投影变换的线结构光三维视觉测量模型如图 2.11 所示。 $O_c$  为摄像机机投射中心, 像面到  $O_c$  的距离进行归一化处理;  $O_w-X_wY_wZ_w$  为世界坐标系,  $O_c-X_cY_cZ_c$  为摄像机标系,  $O_i-X_iY_i$  为像面坐标系, 其中  $O_cX_c$  和  $O_cY_c$  分别与  $O_iX_i$  和  $O_iY_i$  平行,  $O_cZ_c$  于摄像机的主光轴重合。

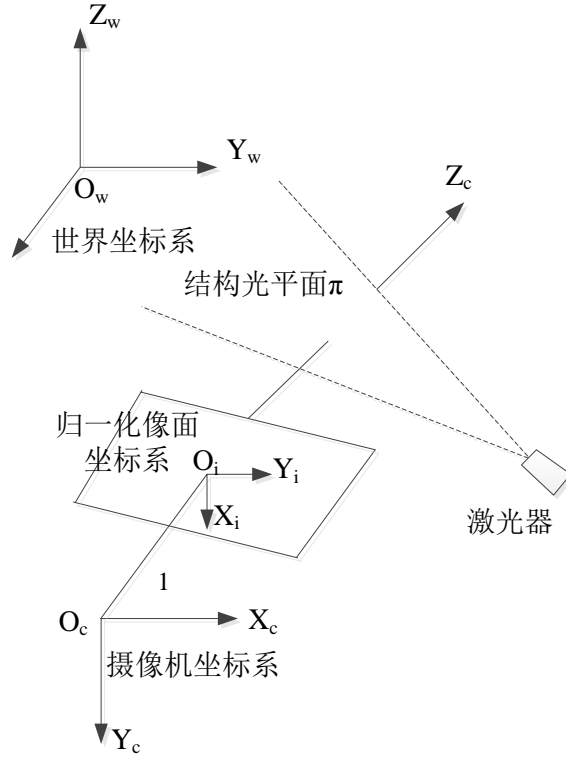


图 2.11 基于透射变换的结构光测量模型

结构光视觉测量模型主要分为两个部分：一为摄像机参数标定；另一个结构光平面方程标定。其中摄像机参数已在前面标定得出，在这里主要讨论如何标定出结构光平面方程。

摄像机像面坐标系和世界坐标系之间的关系由式 2-(2)和式 2-(3)可得

$$z_c \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad 2-(33)$$

结构光平面  $\pi$  在世界坐标系下的方程

$$ax_w + by_w + cz_w + d = 0 \quad 2-(34)$$

联立上述方程可得

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{31}x_i - r_{11} & r_{32}x_i - r_{12} & r_{33}x_i - r_{13} \\ r_{31}y_i - r_{21} & r_{32}y_i - r_{22} & r_{33}y_i - r_{23} \\ a & b & c \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} t_1 - t_3x_i \\ t_2 - t_3y_i \\ -d \end{bmatrix} \quad 2-(35)$$

上述式 2-(33)包含了摄像机的内外参数, 2-(34)包含了结构光的结构参数, 所有这些参数就共同构成了结构光视觉测量的参数, 这些参数都需要通过标定得到。最后通过式 2-(35)就可以得到工件表面的三维信息。

## 2.5 线结构光结构参数标定

标定线结构光平面方程, 即摄像机与线激光投射器的位置关系, 是线结构光视觉测量系统进行三维测量的必要前提。目前, 常用的得到结构光平面方程的方法包括:

- 1) 靶标标定法<sup>[42]</sup>: 该方法利用经过特殊设计的三维立体靶标; 但是此方法对靶标有特殊要求, 所以制作成本会很高。
- 2) 细丝散射法<sup>[43]</sup>: 该方法要求发射器投射的光线是可见光, 不然的话标定过程就无法进行。
- 3) 机械调整法<sup>[44,45]</sup>: 该方法调整步骤多并且必要时需要高精密的移动平台, 同时精度并不是很高, 所以只能适合与小测量范围的场合。

考虑到本文涉及测量范围并不是很大, 同时考虑到该方法操作简单且计算方便, 所以本文决定采用机械调整法。

### 2.5.1 机械调整法

一般当我们在使用机械调整法时, 总是将激光平面调整到一个特殊的位置, 比如与世界坐标系的某一个坐标轴平行或垂直或成一个特殊角度等。本文根据机械调整法的基本操作方法同时结合实际要求做了一些必要的调整, 使该方法更据有一定的普遍操作性, 能求出与任一轴成任一角度的平面方程。机械调整法示意图如图 2.12 所示。

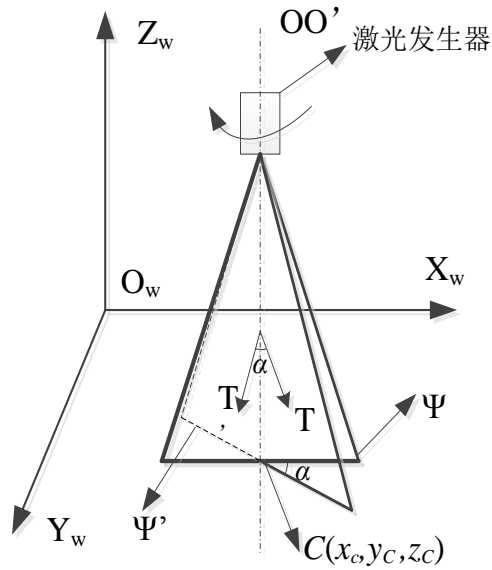


图 2.12 机械调整法示意图

机械调整法具体操作步骤如下：

- 1) 首先将激光发生器精确地安装在与世界系  $O\text{-}XYZ$  中的其中任一轴平行，如上图所示，激光发生器的中心轴  $OO'$  与世界坐标系  $Z$  轴平行；
- 2) 补充知识：根据三维空间平面的知识可知，表示空间平面的方式主要有以下几种：
  - i 一般式：  $Ax+By+Cz+D=0$ ；
  - ii 截距式：  $x/A+y/B+z/C=1$ ，  $A$ 、 $B$ 、 $C$  分别为平面和各坐标系的交点值；
  - iii 点法式：  $A(x-x_0)+B(y-y_0)+C(z-z_0)=0$ ，  $(A\ B\ C)$  和  $(x_0\ y_0\ z_0)$  分别为平面的法向量和其中一个已知点；
  - iv 法线式：  $x\cos\alpha+y\cos\beta+z\cos\gamma=d$ ；  $\cos\alpha$ 、 $\cos\beta$ 、 $\cos\gamma$  分别是平面法矢量的方向余弦，  $d$  为原点到平面的距离；

本文采用点法式，即已知平面法向量和一个已知点求出平面方程。

- 3) 该方法首先应该知道光平面的一个特殊位置，然后根据这一特殊位置推导出其他的位置；如上图所示，已知一个固定点  $(x_c\ y_c\ z_c)$ （该点务必在中心轴  $OO'$  上）并且起始光平面  $\Psi$  与平面  $X_wO_wZ_w$ （也可以是其他任意两个平面）平行即夹角为  $0$ ，且与平面的距离为  $y_c$ ；由数学知识可知，此时光平面的法向量为  $[0\ 1\ 0]$ ，则根据补充知识可得此时的光平面方程为：  $y-y_c=0$ ，即  $y=y_c$ ；由于激光平面在绕中心轴  $OO'$  转动时，点  $(x_c\ y_c\ z_c)$  保持固定不变，只是改变了光平面与平面  $X_wO_wZ_w$ （如果是其



他平面亦可)的夹角  $\alpha$ , 也可以认为是光平面的法向量在绕中心轴旋转, 改变的角度也是  $\alpha$ ; 所以此时光平面的法向量  $\mathbf{T}'$  为:

$$T' = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} T = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \alpha \\ \cos \alpha \\ 0 \end{bmatrix} \quad 2-(36)$$

上式中的转换矩阵为绕 Z 轴的旋转矩阵, 如绕其他轴旋转则转换矩阵也相应改变。

4) 由上步得到的法向量  $[-\sin \alpha \cos \alpha 0]$ , 就可以计算得到相应的光平面方程为:

$$-\sin \alpha (x - x_c) + \cos \alpha (y - y_c) = 0;$$

根据以上分析, 本文得到了一种与已知平面成不同角度的光平面方程算法, 该方法是基于机械调整法, 只需要知道一个初始位置  $\psi$  以及对应的法向量  $\mathbf{T}$  和一个位于中心轴上的中心点  $\mathbf{C}$ , 就可以根据相对于初始位置旋转的角度  $\alpha$ , 得出该位置的法向量  $\mathbf{T}'$  以及相对应的方程  $\psi'$ 。

### 2.5.2 十字线结构光平面方程标定

由于本文利用的线结构光发生器是一个能同时产生两个相互垂直交叉的十字形结构光。所以在确定两条光束的平面方程时, 只需确定其中一个光束的方程, 然后再根据这个光束方程旋转  $90^\circ$  得到另一个光束方程。

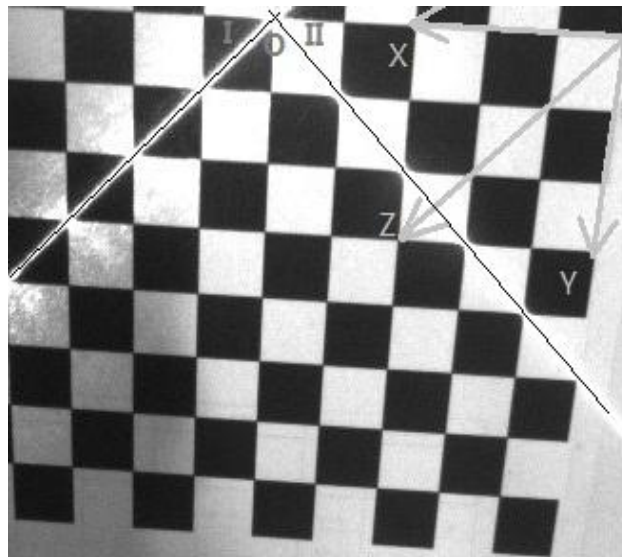


图 2.13 十字结构光机械调整示意图

为了计算的方便, 本文将其中一个结构光平面与世界坐标系中的 Y 轴成  $45^\circ$ ; 如图 2.13 所示。图中的定标板为正方形, 两条边分别与世界坐标系的 X 轴和 Y 轴重合, 靶标平面与

世界坐标系的  $Z$  轴垂直。利用测量工具测量可得此时结构光中心轴  $OO'$  到世界坐标系的  $X$  轴和  $Y$  轴距离分别为  $158\text{mm}$  和  $13\text{mm}$ ，则可以设中心轴上一个固定点为  $O(158\ 13\ 0)$ 。所以在调整结构光时，使用调整机构将其中一条结构光束与靶标的对角线重合时即与世界坐标系中的  $Y$  轴成  $45^\circ$  了。根据公式 2-(36) 可得此时 I 号结构光的方程为：

$$-0.7071x + 0.7071y + 102.5259 = 0$$

由于十字结构光的两条结构光是垂直相交的，则 II 号结构光的方程为 I 号结构光再旋转  $90^\circ$ ，则该光条的方程为：

$$-0.7071x - 0.7071y + 120.9141 = 0$$

## 2.6 本章小结

本章在线结构光三角测量法原理的基础上，对线结构光的视觉测量模型进行了分析，介绍了系统中常用坐标系之间对应的转换关系，以及摄像机模型，在透视投影变换模型中分析了光条图像坐标到世界坐标系下的转换。制作了平面棋盘式定标板，介绍了基于平面靶标非线性模型的标定方法，同时开发了一款摄像机标定软件，结果显示误差为  $0.2042$  个像素，验证了该方法具有较高的精度；然后，为了获得线结构光平面方程，利用机械调整法得到了相应的线结构光平面参数方程。

### 第三章 十字线结构光光条图像处理算法研究

本文研究的线结构光图像是十字线结构光，其由左右两条光条组成，光条处理重点在于精确提取光条中心位置的同时能判断该中心属于左右哪条光条。处理过程包括图像作用域设定、图像滤波、图像分割和中心提取。

#### 3.1 光条图像处理过程

一般光条处理包括以下几个步骤：1) 先进行图像预处理：包括图像作用域设定、图像滤波、图像分割等；2) 光条中心提取：该步骤主要提取光条的中心位置。由于本文研究的是十字线结构光，其有左右两条交叉的单光条组成，所以在得到光条中心后还需要判断该光条中心属于哪条单光条。同时当该类型结构光投射在工件表面时会产生数种不同的效果，本文将其分为“有交点”类型，“无交点”类型和“单光条”类型三种，这三类光条图像具有一定的共性但也存在不同的特点，如图 3.1 所示；且“无交叉点”类型又存在两种不一样的情况，本章下面会详细介绍各种不同情况的具体处理算法。

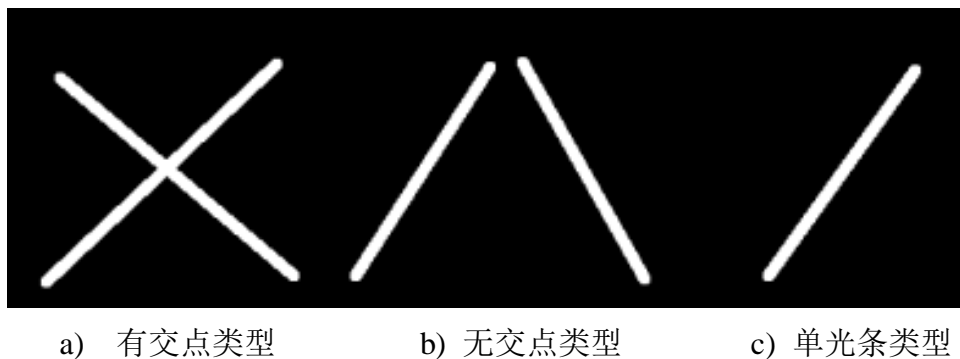


图 3.1 采集的图像三种类型示意图

图像预处理和光条中心提取对采集到的光条图像的类型没有特殊要求，但是最后的光条中心分类存在一定的差别，需要分别处理。

由于限于篇幅，无法将所有情况的处理效果图一一列出，同时考虑到“有交叉点”类型处理最为复杂，所以本章以该类型为范例进行分析，而其他类型的处理算法本章都会一一详细介绍。图 3.2 显示了采集的原始图像，图像大小为 640×480。



图 3.2 原始光条图像

### 3.2 光条图像自适应作用域设定

光条实际存在的区域只是图像的一部分。如果按整张图片整体处理，那么就会导致大量时间用于处理图像的背景部分，所以这样处理既造成资源浪费，又导致效率低下。同时考虑到本文采集图像种类的多样性，无法直接设定一个合理的作用域，需要根据不同的图像设定不同的作用域，所以本文采用自适应图像作用域设定。具体步骤包括：

1) 先从左向右按列扫描图像，并设定一个阈值  $K$ 。当扫描到一个像素值大于或等于阈值  $K$  时，记录该点位置  $(u, v)$ ，并继续向下扫描，如果大于等于阈值的连续点大于等于 5，则认为该列为光条左边界即为  $u_l$ ；如果连续点小于 5，则继续寻找，直到找到光条左边界  $u_l$ ；

2) 找到左边界后用同样的方法分别从右到左找到右边界  $u_r$ ，从上到下找到上边界  $v_u$ ，和从下到上找到下边界  $v_d$ ；然后根据这四个值，就可以得到光条作用域的左上点  $(u_l, u_u)$  和右下点  $(u_r, u_d)$ ；

3) 最后根据扫描得到的光条左上点和右下点，提取图像光条作用域，图像开始处理位置为  $(u_l-10, v_u-10)$ ，结束位置为  $(u_r+10, v_d+10)$ 。

图 3.3 显示了图像实际作用域。通过计算该图像的实际作用位置为  $u_l=162$ ， $u_r=500$ ， $v_u=135$ ， $v_d=415$ ，则实际作用域起始位置为  $(152, 125)$ ，结束位置为  $(510, 425)$ ，实际作用面积为  $358 \times 300$ ，为原始图像大小的 34.961%，

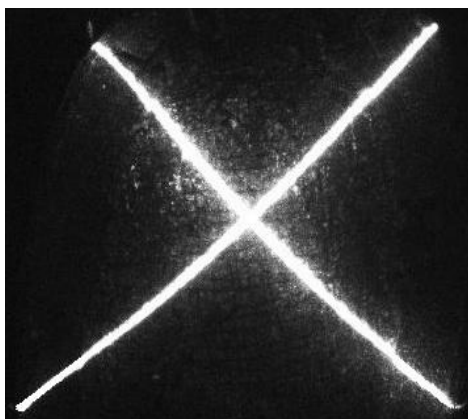


图 3.3 图像实际作用域

本方法不仅使实际处理的数据量大量减少，提高了图像处理效率，而且能根据不同的光条图像设定合理的作用域。

### 3.3 十字线结构光光条图像滤波

图像滤波的目的是为了抑制图像中存在的噪音部分，同时保留图像细节特征信息。造成图像噪音的原因主要有两类组成：一类是由于不完善的传输介质、成像系统以及记录设备，导致数字图像在形成和传输记录过程中往往会受到多种噪声的污染；另一类是外界光照的影响，在加上物体表面的反射、衍射等副作用都会导致图像噪音的产生。这些噪音在数字图像中一般表现为孤立的像素点或像素块。这些噪音的存在影响到后续图像处理分析的有效性和可靠性，因此利用图像滤波技术抑制这些噪音是必需的同时也是必要的<sup>[46]</sup>。

图像的噪音一般属于高频信息，而图像的能量大部分存在于低频段。所以滤波的作用在于去除掉图像的高频噪音同时保留图像的低频信息，通常使用的方法为低通滤波法。常使用的方法有包括均值滤波法<sup>[47]</sup>、中值滤波法<sup>[48]</sup>、高斯滤波法<sup>[49]</sup>等。本文根据处理图像的实际情况主要存在椒盐噪音，故决定采用中值滤波法。

中值滤波法是一种非线性滤波平滑技术，它的中心思想是将某像素点( $u, v$ )的灰度值设置为该点某邻域内所有像素值的中间值。

以  $3 \times 3$  模板为例，具体处理过程如图 3.4 所示。图像中心点像素值与其邻域像素值存在较大的差异即为存在的椒盐杂音，经过中值滤波处理后，该值与其邻域值相同，成功地去除了原本存在的杂音，达到了图形平滑处理效果。

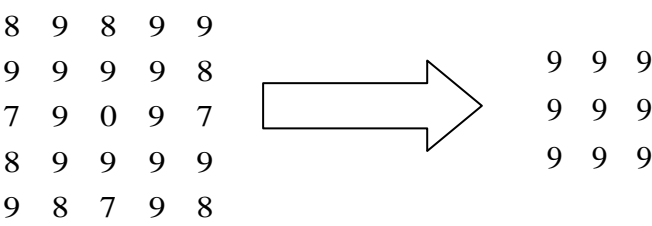
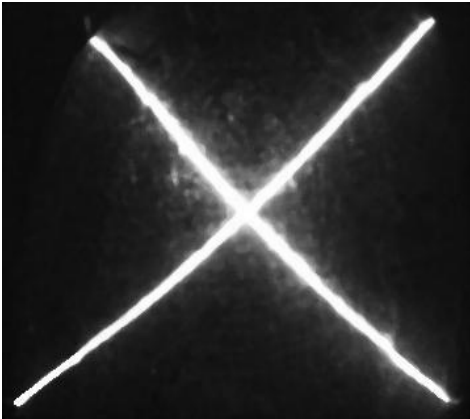


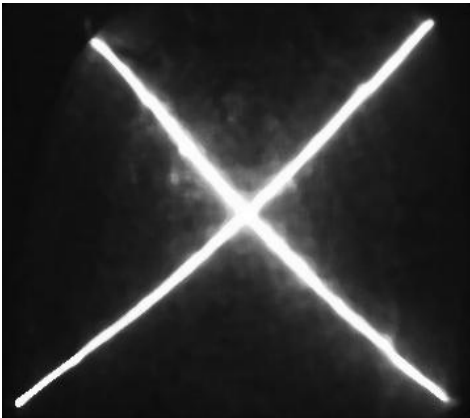
图 3.4 中值滤波处理过程图

中值滤波法对消除椒盐噪音是非常有效的。而本课题处理的光条图像存在的噪音正是属于此类噪音，所以采用中值滤波很符合本课题的实际要求。

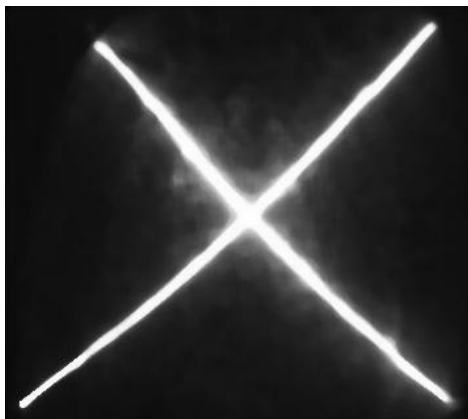
图 3.5 显示了不同模板下的中值滤波效果图。从各种模板的效果图可以分析，当使用 9×9 模板时输出的效果图更能有效地去除图像噪音同时保持光条图像的边缘，因此本文采用 9×9 模板的中值滤波法对图像进行平滑处理。



a) 5×5 模板下的效果图



b) 7×7 模板下的效果图



c) 9×9 模板下的效果图

图 3.5 中值滤波效果图

### 3.4 光条图像分割

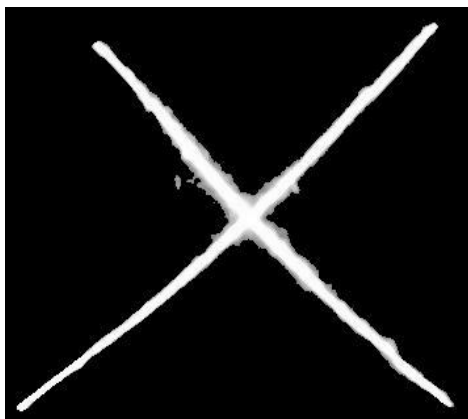
如果要对处理后的图像数据进行分析之前，要想得到图像中的光条信息，必须先经过图像分割阶段。图像分割作用在于识别目标部分和背景部分，需要将目标部分从原始图像中分离出来，并在此基础上进一步对目标进行处理同时得到有用的信息。

#### 3.4.1 二级阈值分割

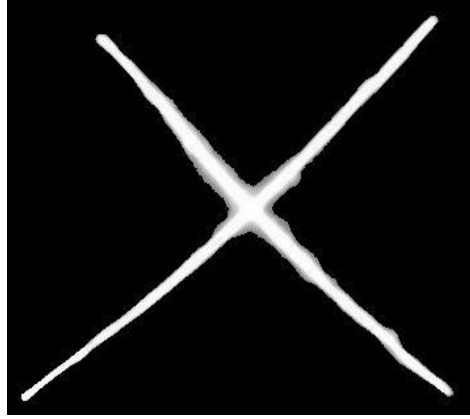
二值阈值分割主要用于图像的目标区域和背景区域存在明显差异，则此时只需选取合适的阈值  $K$ ，其图像阈值化处理的变换函数形如：

$$g(u,v) = \begin{cases} f(u,v) & f(u,v) \geq K \\ 0 & f(u,v) < K \end{cases} \quad 3-(1)$$

式中： $f(u,v)$ 为图像原始灰度值， $g(u,v)$ 为阈值化后的灰度值。



a) 二级阈值分割效果图



b) 最大类间方差法分割效果图

图 3.6 图像分割效果图

### 3.4.2 最大类间方差法

二级阈值分割只设定一个固定的阈值，但是在实际处理过程中每幅图像的灰度分布都不尽相同，如果只使用同一个阈值进行图像分割必然会导致某些图像的分割效果不理想。为了解决这一问题，本文又采用最大类间方差法进行图像分割，该方法可以根据每幅图像的实际情况得出合理的阈值。

最大类间方差法，又叫大津法，是基于最小二乘判定原则，推导出最佳分割阈值的方法。其基本思想是利用某一灰度值将图像分成背景和目标两部分，同时使这两部分的类间方差最大的灰度值即为最佳的阈值。

设图像的灰度级区间为 $[0, H]$ ，图像大小为 $M \times N$ ，设每一个灰度级的像素个数为 $n_i$ ，现随意设定一个阈值 $K$ ，记图像中灰度值小于 $K$ 的像素个数为 $N_1$ ，占整幅图像的比例 $\omega_1$ ，其平均灰度为 $\mu_1$ ；同理记大于 $K$ 的像素个数为 $N_2$ ，整幅图像的比例 $\omega_2$ ，其平均灰度为 $\mu_2$ 。则类间方差 $g$ 的表达式

$$g = \omega_1 \times \omega_2 \times (\mu_1 - \mu_2)^2 \quad 3-(2)$$

$$\text{式中: } \omega_1 = \frac{N_1}{M \times N}, \quad \omega_2 = \frac{N_2}{M \times N}, \quad \mu_1 = \frac{\sum_{i=0}^K i \times n_i}{N_1}, \quad \mu_2 = \frac{\sum_{i=K+1}^H i \times n_i}{N_2}。$$

通过上式可以求出对应阈值 $K$ 的类间方差 $g_K$ 。最后采用遍历所有灰度级的方法得到类间方差最大的阈值 $K$ ，即为最佳阈值。



本文采集的图像灰度级为[0,255]，通过计算得到的最佳阈值  $K=231$ 。

二级阈值分割的处理效果如图 3.6(a)所示，显然无法将光条成图像中分割出来。最大类间方差法处理结果如图 3.6(b)所示。将两者比较可知：二级阈值分割的处理效果不是很理想，光条边缘存在一些噪音，出现较明显的毛刺；而最大类间方差法得到了令人满意的处理效果，光条和背景很好地分离出来，光条的边缘也较为清晰。因此，本文选择采用最大类间方差法分割图像。

### 3.5 十字线结构光光条中心条纹提取

通常情况下，结构光发生器发生的光条是具有一定厚度的光平面，并且该平面是不均匀的且为结构特殊的“高斯”曲面。在实际应用中，可以将该光平面的光强分布近似看作高斯分布<sup>[50]</sup>，并且在光条中心处存在着饱和，如图 3.7 所示。

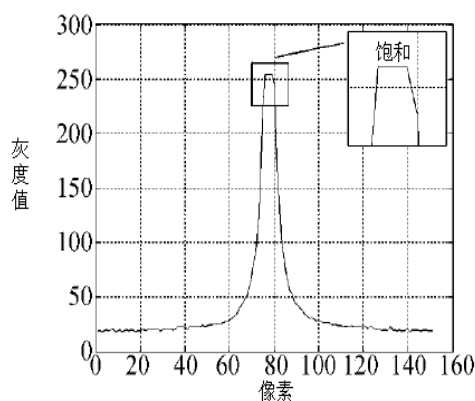


图 3.7 光条截面近似高斯分布

对于如何精确提取线结构光光条中心，常用的几种算法描述如下：

1) 极值法<sup>[51]</sup>：通过数个像素确定光条中心，以像素值最高的点作为光条中心。但是该方法易受单个像素值尤其是光条上噪声的影响非常大，故精度不高，只适用于要求精度不高的测量场合。

2) 曲线拟合法<sup>[52]</sup>：通过利用光条上的点拟合抛物线或高斯曲线，然后利用拟合出来曲线的极值作为光条中心位置。但是在实际情况下，光条上像素的灰度值分布一般不是按照严格的对称分布，故按此方法计算所得的中心为会偏离实际的中心位置。

3) 灰度重心法<sup>[53]</sup>：巧妙地结合了物理学刚体重心计算方法，把光条截面内像素灰度的类分布质心做为光条中心。该方法经过重心计算后，对噪音有一定的抑制作用，但此方法由极值法发展而来，对噪音还是存在一定的敏感。

由于上述几种方法均存在一定的缺陷, 鉴于这些不足之处, 本文采用了基于抛物线拟合的灰度重心法来提取结构光中心位置。该方法主要分为两步: 1) 先确定光条上的点, 利用这些离散点拟合为一条抛物线; 2) 然后利用光条上的起始点将该曲线分成  $n$  等分, 再运用灰度重心法原理得到该光条中心位置。

实现具体步骤包括:

i 由于图像已经进行阈值处理, 现沿图像  $v$  方向逐行扫描, 根据阈值  $k$  可以得到该行光条点, 并且是连续的;

ii 根据扫描得到的当前行  $m$  个光条点,  $v$  值固定不变, 设  $u_i$  表示在  $u$  方向上的坐标值, 同时设该点像素值为  $g_i$ , 其中  $i=1, 2, \dots, m$ ;

iii 运用上述得到的  $m$  个光条点, 利用多项式拟合成抛物线方程, 表达如下所示

$$G(u) = \sum_{i=0}^2 a_i u^i$$

iv 为了精确得到光条中心, 可以将区间  $[u_1, u_m]$  进行等距划分。假设等分成  $M$  份, 则步长为  $h = (u_m - u_1)/M$ , 则各点的坐标为  $u_j = u_1 + j \times h$ , 相应灰度值为  $G_j = G(u_j) = \sum_{i=0}^k a_i u_j^i$  ( $j=0, 1, 2, \dots, M$ );

v 最后根据灰度重心法运用这  $M+1$  个点对坐标  $v_c$  进行计算:

$$u_c = \frac{\sum_{j=0}^M G_j u_j}{\sum_{j=0}^M G_j}$$

最后计算得到的坐标值即为光条中心点坐标值  $(u_c, v)$ 。

### 3.6 十字线结构光光条中心点分类

由于本文采用的结构光为十字线结构光, 当该类结构光投射到工件表面上时, 会产生如图 3.1 所示的几种情况, 所以通过上述几个步骤, 并不能识别得到的光条中心点是属于左光条还是右光条。故本文还需要对得到的光条中心点进行分类。

通过对该类光条图像的分析可以得到, 对光条图像按行扫描处理时, 可能得到一个或者两个光条中心点, 并且该行光条中心点与上一行扫描得到的光条中心点存在一定的几何关系, 即如果两个中心点属于同一条结构光光条, 那么这两点之间距离肯定比不属于同一

光条的两点距离要小, 所以通过这个关系就可以将所有的光条中心点分成两组, 然后通过每组光条点的斜率判断该组属于左光条还是右光条。

该算法的具体实施步骤包括:

i 当按行扫描时, 得到光条图像首行  $v_i$  存在光条中心点, 可能存在一个点或者两个点; 如果为一个光条中心点  $(u_j, v_i)$ , 将该点保存到 **PartLine1** 中; 如果为两个点  $(u_j, v_i)$  和  $(u_{j+1}, v_i)$ , 则将  $(u_j, v_i)$  保存到 **PartLine1**,  $(u_{j+1}, v_i)$  保存到 **PartLine2** 中;

ii 当扫描下一行  $v_{i+1}$  时, 如果得到只有一个点  $(u_j, v_{i+1})$ , 且上一行也只存在一个点, 则直接将该点保存 **PartLine1** 中去; 如果该行存在两个点  $(u_j, v_{i+1})$  和  $(u_{j+1}, v_{i+1})$ , 且上一行只存在一个点, 则运用两点之间的距离作比较, 与  $(u_j, v_i)$  距离较近的保存到 **PartLine1**, 则另一点保存到 **PartLine2** 中; 如果上一行存在两个点  $(u_j, v_i)$  和  $(u_{j+1}, v_i)$ , 但该行只存在一个点  $(u_j, v_i)$ , 则方法亦然; 如果该行存在两个点  $(u_j, v_{i+1})$  和  $(u_{j+1}, v_{i+1})$ , 且上一行也存在两个点  $(u_j, v_i)$  和  $(u_{j+1}, v_i)$ , 那么分别将该行两点和上一行两点做比较, 将与点  $(u_j, v_i)$  较近的保存到 **PartLine1** 中, 则另一点保存到 **PartLine2** 中;

iii 然后, 逐行扫描各行, 按照第一和第二步的方法, 将当前行得到的光条中心点, 保存到相应的位置中去;

iv 通过上述三步, 已经将光条中心点进行了分类处理, 但是具体哪一光条属于左光条或者属于右光条还没确定, 所以还需对这些点进行处理; 由十字结构光的性质可知, 交叉的两条光条成  $90^\circ$  夹角, 即两条光条的斜率一条为正另一条为负; 那么当该光条图片通过变换转化为数字图像时, 虽然会存在一定的变形, 但是大致形状不会改变, 所以只要对两组光条点分别运用最小二乘法进行直线拟合, 得到相应的斜率, 通过斜率可以将斜率为正的保存到 **PartLine1** 中, 则斜率为负的保存 **PartLine2** 中去, 至此光条点分类完成

v 特殊处理: 如果图像类型为“有交点类型”, 那么在光条交叉区域的厚度会存在一个突变, 这里将光条厚度设置一个阈值  $k=15$ , 当光条厚度大于该值时, 就可以认为进入交叉域, 则提取的中心点  $(u_j, v_i)$  即属于 **PartLine1** 也属于 **PartLine2**; 此时, 保持  $v_i$  不变, 为了保证光条中心线的连续性, 分别根据 **PartLine1** 和 **PartLine2** 前三个点的  $u$  值线性插值算出相应  $u_{j1}$  和  $u_{j2}$ , 从而便可得到点  $(u_{j1}, v_i)$  和点  $(u_{j2}, v_i)$ , 保存到 **PartLine1** 和 **PartLine2** 中。

图 3.8 显示了运用  $9 \times 9$  模板的中值滤波和最大类间方差法分割后, 提取的光条中心条纹效果图。从提取的结果显示, 光条中心线较为平滑, 且光条中心位置基本连续, 只有在

光条交叉位置处存在少许突变的情况。最后经过基于抛物线拟合的灰度重心计算，光条的提取达到了亚像素精度。

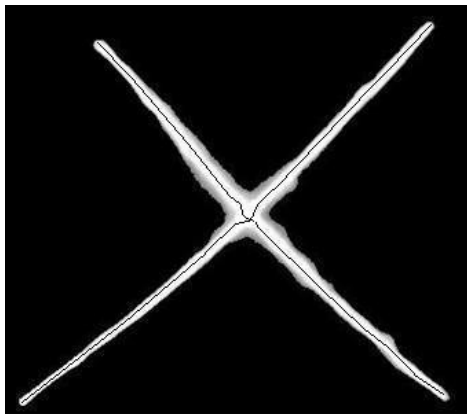


图 3.8 中心条纹提取效果图

### 3.7 本章小结

本章介绍了十字线结构光光条图像处理过程，包括图像作用域设定、图像滤波、阈值分割以及中心点提取和分类，对阈值分割的不同方法进行了比较，并根据图像处理结果选定合理的方法，然后利用基于抛物线拟合的灰度重心法得到了光条中心，最后提出了一种对提取中心进行左右光条分类的方法，提取的最终结果表明，本文采用的方法简明实用并且精度较高。

## 第四章 工件表面信息提取实验装置总体设计

本文根据实际需要进行了实验装置的总体设计。主要包括实验平台的搭建和相应的处理软件开发。实验平台主要用于连续采集表面投射有结构光光条的被扫描工件曲面的图像并将图片传输给 PC 机；软件部分主要用于处理传输回来的图像，得到光条图像的中心条纹，同时根据标定参数进行三维重建，再拟合生成连续扫描线，最终生成工件表面信息。

### 4.1 结构光工件扫描实验模型建立

系统整体框架如图 4.1 所示。硬件部分主要包括自带图像采集功能的 CMOS 摄像机、直线导轨、步进电机及驱动器卡、运动控制、线激光和 PC 机；软件部分包括运动控制模块，图像处理模块和表面和轮廓信息生成模块。

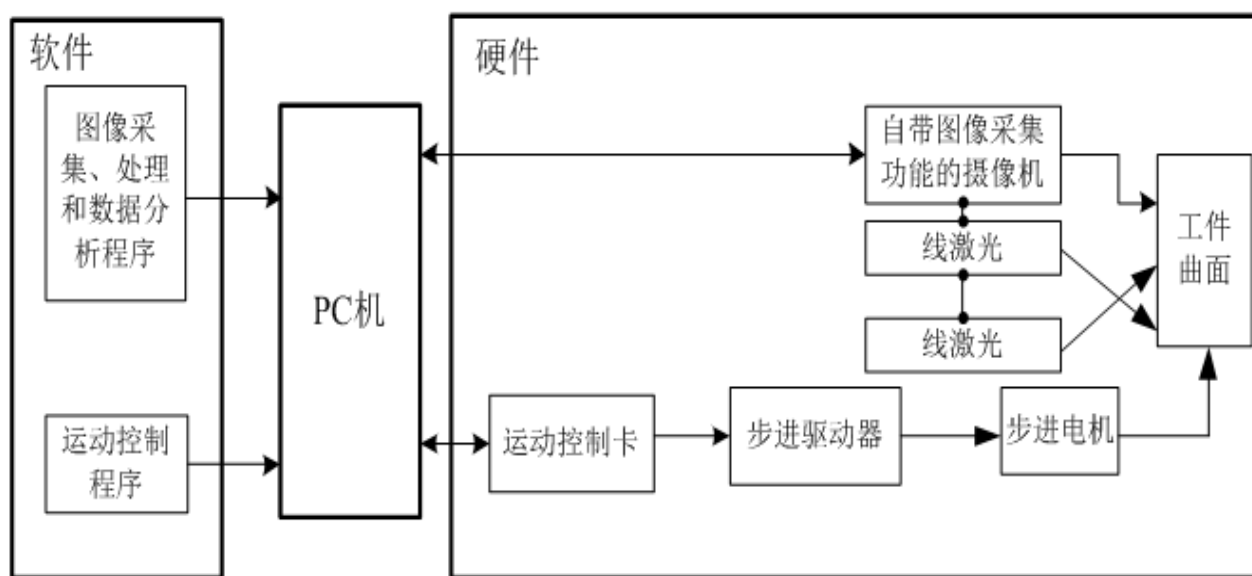


图 4.1 扫描系统整体框架图

根据结构光测量基本原理和基于透视变换测量模型构建的扫描模型，如图 4.2 所示。本文采用改变被扫描工件相对位置的测量方法。十字结构光（夹角为  $90^\circ$ ）和摄像机均安装在固定平台上，且三者之间无相对运动。同时被扫描工件安装在由步进电机驱动的传动导轨上，工件被特殊的夹具固定在工作平台上禁止不动。

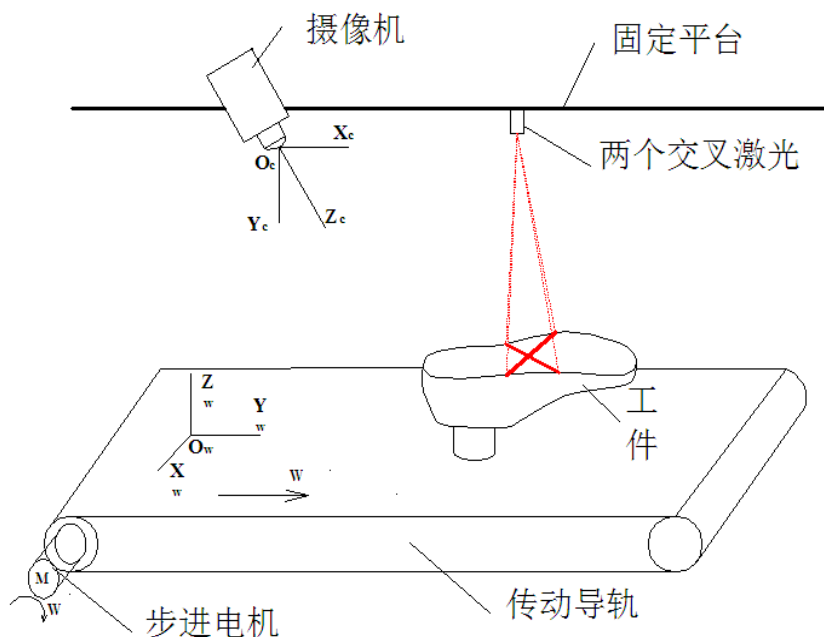


图 4.2 工件扫描实验模型

传动导轨正向移动时，十字线结构光连续同时扫描工件曲面，同时由摄像机采集结构光扫描线图像，计算光条图像中心条纹的位置，同时根据第二章得到的摄像机内外参数和结构光参数方程转换得到工件曲面的三维数据，并利用 **B** 样条曲线拟合技术生成一组三维扫描线，进而再拟合生成工件曲面的轮廓线。

## 4.2 实验平台搭建

根据上面分析得到的工件扫描实验模型，本文自行搭建了一个实验平台，如图 4.3 所示为平台实物图。该实验平台支架利用带有行程轨道的铝合金材料搭建而成；摄像机被安装在平台左侧，同时摄像机的高度和角度可以根据实际情况调节；结构光发生器被安装在行程轨道里也可以根据实际情况调节距离；平台下方是一个直线双螺距导轨，作用是带动工件直线运行；直线导轨是由步进电机带动，而步进电机是由运动控制卡间接驱动。

下面主要介绍一下本装置的光源发生器、图像采集系统和传输动力系统三大部分。

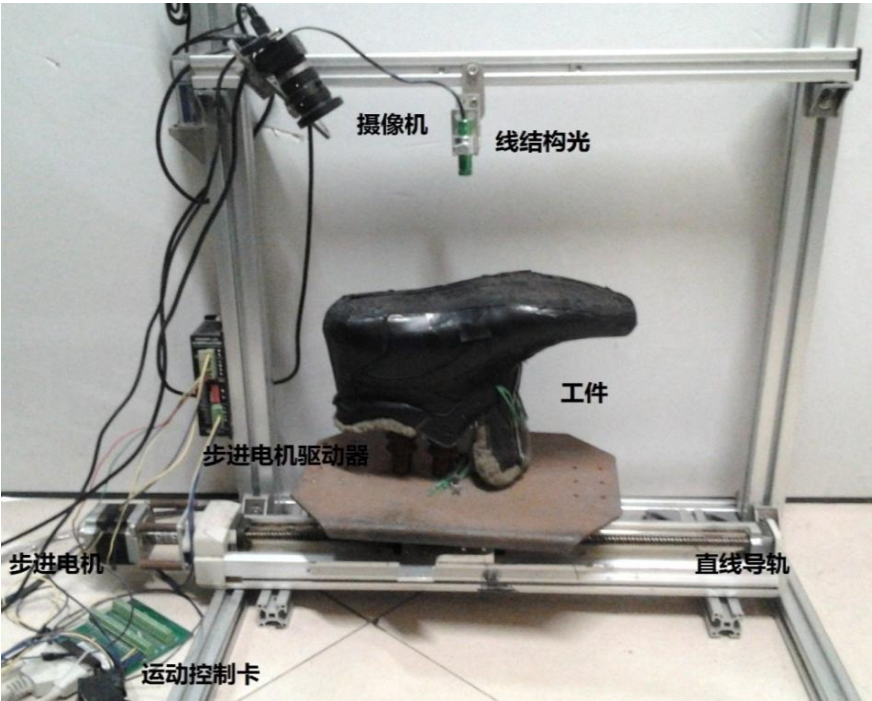


图 4.3 扫描实验平台

4.2.1 结构光发射模块

结构光具有很好的单色性、相干性、方向性和高的亮度，这些特性决定了它与普通光的本质区别。

本文采集图像的目的是通过采集到的光条图像，提取光条的中心条纹，从而得到工件的表面信息。但是由于工件表面并不是平滑的，所以要求投射到工件表面的光条不仅具有很好的收敛性，而且需要该光源能真实的反应物体表面的信息。所以结构光完全符合这些要求，采用盛钻激光公司的 SZ-MT50X 系列，表 4.1 列出了本文使用结构光的主要特性。

表 4.1 结构光发生器主要性能参数

性能	具体描述
波长	650nm
光板模式	无限极可调线宽十字线状
功率稳定	<1%(10H)
线宽	1 米处最小光斑白色物体 2mm，黑色物体 1mm
线长	1 米距离照出来 4-6 米，距离越远线更长

4.2.2 图像采集模块

本文采用了自带图像采集功能的工业灰度摄像机。而工业摄像机传感器主要分为 CMOS 和 CCD 等两种。CCD 传感器具有灵抗强光、寿命长、畸变小、抗震动等优。CMOS 图像传感器的优点集中在其具有良好的集成性、功耗低以及宽动态范围等优点。所以，综上所述本文采用 CMOS 传感器工业摄像机，选用型号为 Point Grey 公司 Firefly MV 系列的 FMVU-03MTM。表 4.2 列出了本文采用的 CMOS 的主要性能参数。

本文采用的 CMOS 灰度摄像机是直接由 USB 串口驱动，并且自带一个 SDK，可以在 VC 等集成开发环境中轻易调用，所以具有操作简单、易于集成等众多优点。

表 4.2 CMOS 主要性能参数

性能	具体描述
传感器	CMOS 微米 MT9V0221/3 “逐行扫描”
视频数据输出	8 和 16 位数据结构
分辨率	640*480
单像素大小	6μ m
帧率	60、30 或 7.5 帧/秒

4.2.3 传输模块

装置的传输动力系统包括步进电机、步进驱动器和运动控制卡。实现过程包括运控控制卡与步进驱动器相连，步进驱动器与步进电机相连，运控控制卡通过专用 IO 口给驱动器发脉冲指令，表 4.3 显示了运动控制卡与驱动器的对应接口；然后驱动器通过与电机的专用接口给电机发脉冲指令，表 4.4 显示了驱动器与步进电机的对应接口。

本文选用步进电机作为最终的动力源，原因在于步进电机具有精度高同时操作简单，且易于集成开发，型号为 57BYG401，步距角 0.9°。而用运动控制卡作为控制器的原因在于它能和上位机进行通讯并且容易实现，同时自带有一款 SDK，能方便实现上位机软件的集成开发，选用雷赛公司的 DMC1308 系列。

表 4.3 运动控制卡与驱动器的对应输入输出端口

运动控制卡端口	功能	对应驱动器端口	功能
PULx+	X 轴脉冲正输出	CP+	步进脉冲/正向脉冲正输入端



PULx+	X 轴脉冲负输出	CP-	步进脉冲/正向脉冲负输入端
DIRx+	X 轴方向正输出	CW+	方向信号/反向脉冲正输入端
DIRx+	X 轴方向负输出	CW-	方向信号/反向脉冲负输入端

表 4.4 驱动器与步进电机的对应接口

驱动器端口	功能	对应电机接线颜色	功能
A	A 相头输出	红色	A 相头输入
/A	A 相尾输出	绿色	A 相尾输入
B	B 相头输出	黄色	B 相头输入
/B	B 相尾输出	蓝色	B 相尾输入

4.3 控制处理软件的开发

在上一节中，我们介绍了搭建的实验平台，并说明了搭建该实验平台的作用，即主要完成对光条图像的采集以供 PC 机的处理。这一节主要介绍对应的控制处理软件的开发。软件开发在 Window7 平台下采用 VC++6.0 编程软件实现工件表面信息的生成。

4.3.1 软件设计的任务和目标

控制处理软件关系到整个装置的正常运行状态。在由 PC 机、CMOS 摄像机、结构光发生器、运动控制卡、步进驱动器、步进电机、直线导轨和扫描工件等组成的工件表面和轮廓提取装置的实验平台中，以 PC 机为总控制器，且控制器中的控制处理程序操纵整个装置的正常运行。结合扫描装置的特点和扫描过程的工艺，控制处理软件程序需要完成一下任务：

- 1) 首先要实现步进电机的运动控制。电机的控制包括运动模式的设定、运动速度的设定和电机细分的设定。其中运动模式设定和运动速度通过软件设定，细分通过调节驱动器的细分设置开关设定。
- 2) 其次是图像的定时采集和处理。图像采集通过设定一个定量的脉冲量进行采集，在采集完一张图片后，运用多线程处理技术将采集到的图片载入一个工作者线程进行处理，主要的工作是图像的中心条纹提取。

3) 再次, 等光条图像采集和处理完成后, 对光条中心点进行三维转换、扫描线 B 样条曲线拟合, 最后对扫描线端点进行 B 样条曲线拟合。

4) 最后, 完成整个控制处理软件的界面设计。

### 4.3.2 软件方案总体设计

软件的总体设计方案采用面向对象设计模式, 将软件设计成相对独立、功能完善的模块化设计理念。按控制处理软件功能由上而下, 从抽象到具体, 根据软件功能和数据流流向将该款软件分为系统主控模块、运动控制模块、图像采集和处理模块、表面和轮廓信息生成模块、用户界面模块。各模块之间的关系如图 4.4 所示。

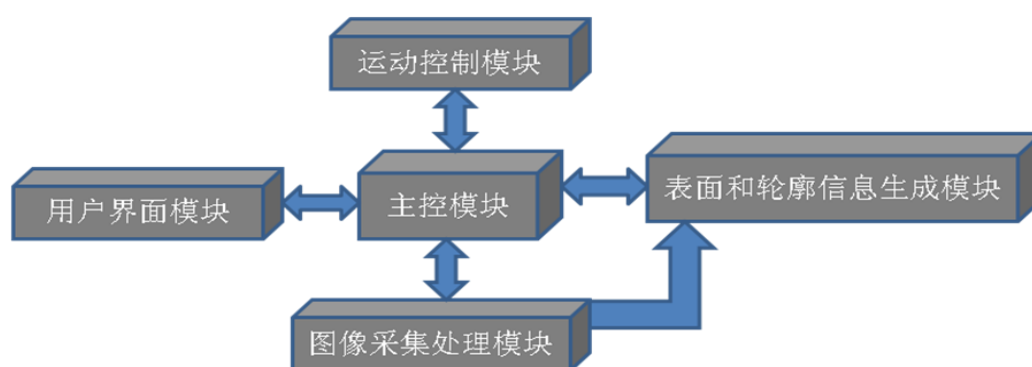


图 4.4 软件总体结构

从软件总体结构可以看出所有的其他模块都和系统主控模块进行双向交流, 同时图像采集和处理模块和表面和轮廓信息生成模块有着单向的数据流通讯。

主控模块是控制处理程序的核心部分, 主要负责系统的协调工作, 包括数据的初始化、标定参数的载入等。

运动控制模块是负责电机的运行, 包括电机运行模式设定, 速度设置, 运行状态检测以及当前位置实时显示。

图像采集处理模块主要负责光条图像的实时均匀采集, 并判断该采集图像是否有效, 如有效则再判断采集的图像属于哪种模式, 然后进行中心条纹处理, 将处理结果保存在一个数组里, 以供下一环节使用。

表面和轮廓信息生成模块主要负责对图像采集处理模块得到的数据进行下一步处理, 包括根据标定参数对光条中心点进行三维转化、然后对这些三维点进行 B 样条曲线拟合生成连续的扫描线、所有扫描线端点进行拟合生成光滑的轮廓线。

用户界面模块是控制处理软件向用户交流的直接窗口，使用户可以通过这个界面访问软件的所有功能。包括运动控制界面、图像处理界面、信息显示界面、模拟界面等。

### 4.3.3 工序流程

按照各工序的时间段，将该软件分为三个部分：光条图像采集和预处理、光条图像中心条纹提取、工件表面和轮廓信息生成。

光条图像采集和预处理部分主要包括图像的实时采集，并判断采集图像是否包括光条、图像滤波、图像作用域设定、图像分割。光条中心条纹提取包括判断光条图像属于哪种类型，然后根据类型进行中心条纹提取并保存提取的中间结果；工件表面和轮廓信息生成部分包括原始二维数据的三维化、运用样条曲线拟合技术拟合离散的数据点、对轮廓点进行样条曲线光滑拟合。

图 4.5 显示了详细的的工序流程。

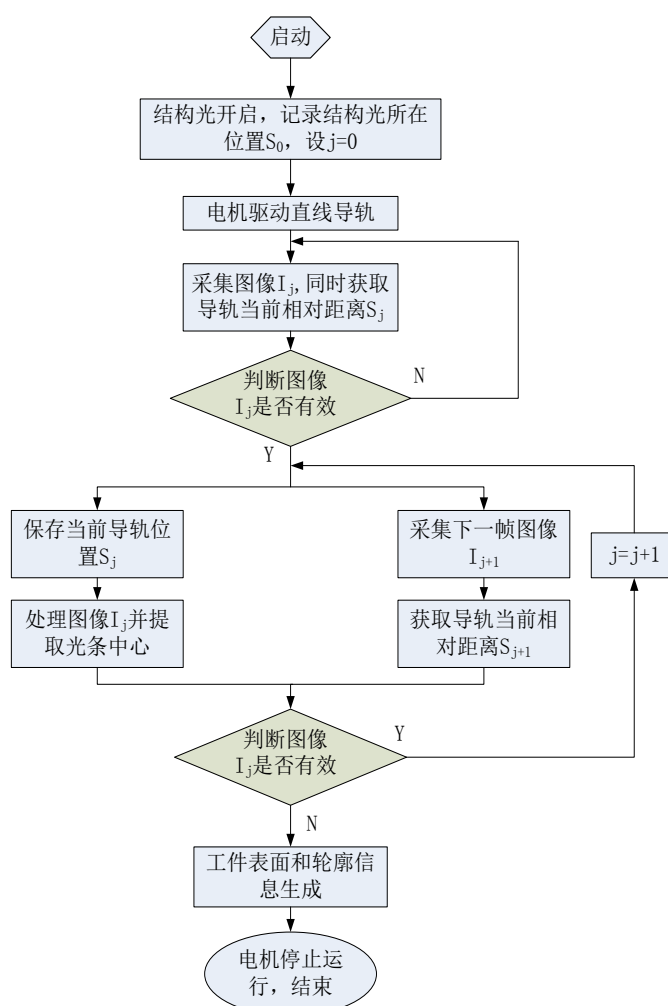


图 4.5 工序流程图

#### 4.3.4 软件功能设计

软件以 VC6.0 为开发平台, 框架为基于对话框的 MFC(Microsoft Function Class)。现在, 本文结合图 4.4 软件总体结构所示的软件结构图对控制软件进行详细的设计, 将软件分为“后台处理模块”和“用户可视化界面”两部分详细说明。

##### 4.3.4.1 后台处理模块

后台处理模块主要包括运控控制、图像采集和处理、三维坐标重建、表面信息生成。

###### 4.3.4.1.1 运动控制

运动控制部分主要运用了运动控制卡生产商雷太公司提供的 DMC1380 运动控制函数库提供的库函数。在其基础上开发应用软件很简单: 您只要用 C/C++、Visual Basic 开发用户界面, 并调用 DMC1380 函数库中的相关运动控制函数, 您就可以随心所欲的对自己的多轴自动化设备进行精确、高速、协调的控制。雷泰 DMC1380 运动控制卡的运动控制函数库共有 10 类 22 个函数。

###### 4.3.4.1.2 图像采集处理

图像采集功能是利用了 CMOS 提供的一个 SDK, 引用方式和上述引用运动控制卡 SDK 一样。

图像处理部分包括图像的滤波、图像的兴趣域设定、图像分割、中心条纹提取和光条中心点分类。为了使光条图像的信息统一便于操作, 建立了一个保存每幅图像信息的结构体, 具体形式如下:

```
typedef struct
```

```
{
```

```
    float offSet;//记录每幅图像的 Y 轴方向偏移距离, 初始值为 0
```

```
    PartLine partLine[2];//记录每条光条信息, 如果只有单光条就只需记录一条光条信息  
    具体结构下面介绍
```

```
    }XLine;
```

**Pixel2D** 结构体介绍:

```
typedef struct
```

```
{
```

```
    float u;
```

```
float v;
}Pixel2D;
Coord3D 结构体介绍:
```

```
typedef struct
```

```
{
    float x;
    float y;
    float z;
}Coord3D;
```

**PartLine** 结构体介绍:

```
typedef struct
```

```
{
    int pixelNum;//光条中心个数
    ScanData FrameData;//光条原始数据，具体结构下面介绍
    BSpline *ScaneLine;//光条对应的拟合样条曲线，该类在下节介绍
}PartLine;
```

**ScanData** 结构体介绍:

```
typedef struct
```

```
{
    Pixel2D pixel[640]//包括图像处理得到的光条中心点
    Coord3D coord3D[640]//包括三维重建得到的扫描点
}ScanData;
```

#### 4.3.4.1.3 三维坐标重建

由第二章摄像机系统标定可得摄像机坐标系在世界坐标系下的表达，其中  $\mathbf{R}$  为旋转矩阵， $\mathbf{T}$  为平移矩阵，也得到了从数字图像到实际像面坐标系的表示和从实际像面坐标系到理想坐标系的转变；再根据透视投射原理，标定得到了结构光的平面方程。故本文根据以上参数可以通过数字图像坐标 $(u, v)$ 利用摄像机内外参数和结构光平面参数反算出该点在世界坐标系下的坐标 $(x_w, y_w, z_w)$ 。

$$\begin{cases} z_c \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \\ ax_w + by_w + cz_w + d = 0 \end{cases} \quad 4-(1)$$

式中 $(x_i, y_i)$ 为理想像面坐标系坐标,  $(x_w, y_w, z_w)$ 世界坐标系坐标。

通过计算可得世界坐标系下坐标的表达式为:

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i r_{31} - r_{11} & x_i r_{32} - r_{12} & x_i r_{33} - r_{13} \\ y_i r_{31} - r_{21} & y_i r_{32} - r_{22} & y_i r_{33} - r_{23} \\ a & b & c \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} t_1 - x_i t_3 \\ t_2 - y_i t_3 \\ -d \end{bmatrix} \quad 4-(2)$$

通过以上计算可得自由工件类曲面的三维点云数据, 从而获得工件曲面的基本信息。

#### 4.3.4.1.4 工件表面信息生成

工件表面信息生成主要用到了 B 样条曲线的拟合技术。B 样条拟合技术的基本知识包括 B 样条基函数、B 样条曲线以及 B 样条曲面等理论知识, 由于这些知识已很成熟, 这里就不在赘述, 但是为了编程的方法, 本文以这些理论知识为基础建立了一个 B 样条类; 具体实现代码如下所示:

```
class BSpline{
public:
    int k;          // 样条曲线的次数
    int n;          // n+1 为控制顶点的个数
    Coord3D * CtlPts; //保存控制顶点的浮点型指针
    float * knot;    // 节点的向量空间
    BSpline( int, int, float *, Coord3D*); //构造函数, 用于初始化一个 B 样条对象
    ~BSpline(){ delete[] knot; delete[] CtlPts; }; //析构函数, 用于释放 B 样条对象的
                                                内存
    Coord3D PtsInCur( float); //得到传入参数曲线上的值
    Coord3D Derivative( float); //得到传入参数曲线上的的一阶导数值
```

```
Coord3D Derivative2rd( float); //得到传入参数曲线上的二阶导数值
};
```

为了拟合生成连续的扫描线，本文采用了肖佚军等人<sup>[54]</sup>提出的基于迭代最近点的样条曲线拟合方法，即先采用最小二乘法进行 B 样条曲线拟合，然后利用迭代法修正 B 样条曲线参数。具体算法如下所示：具体实现代码见附录。

#### 1) 利用最小二乘法进行 B 样条曲线逼近

##### (1) 最小二乘法需要解决的问题

已知数据点列  $Q_j=\{q_j;j=0,1,2,...m\} \in R^3$  和节点向量  $U_i=\{u_i;i=0,1,2,...n+k+1\}$ ，根据曲线的定义域和端点的插值要求，本文决定采用定义域端点节点为  $k+1$  重节点的端点条件，并求以  $U$  为节点向量的  $k$  次 B 样条曲线  $C(t)$ ，同时使所有数据点到曲线的距离之和为最小，即

$$d(q_j, C) = \sum_{j=0}^m dist(C(t), q_j)^2 \quad 4-(3)$$

的值最小。式 4-(3) 中  $dist(C(t), q_j)$  表示点  $q_j$  到曲线  $C(t)$  的垂直距离。

##### (2) 节点向量参数化

假设数据点集  $Q$  在 B 样条曲线  $C(t)$  上，则点  $q_i$  应存在如下关系：

$$q_i = \sum_{i=0}^n d_i N_{i,k}(u_j'), j=1,2,...,m \quad 4-(4)$$

式中  $u_j'(j=0,1,...m)$  为已知数据点  $q_j$  相对应的参数，这该参数可以采用规范累积弦长法决定。令

$$s_j = \|q_j - q_{j-1}\|, (j=1,2,...,m), S = \sum_{j=1}^m s_j, \text{ 则有}$$

$$\begin{cases} u_0' = 0 \\ u_j' = \sum_{i=0}^j \frac{s_i}{S}, j=1,2,...,m \end{cases} \quad 4-(5)$$

但是为了决定 B 样条基函数  $N_{i,k}(u)$ ，这里必须给出相应的节点矢量  $U_i=[u_0, u_1 \dots u_{n+k+1}]$ 。这里我们根据固支原理。于是就存在  $u_0=u_1 \dots u_k=0$ ， $u_{n+1}=u_{n+2} \dots u_{n+k+1}=1$ 。其他  $n-k+1$  个节点可以根据如下步骤决定：

先设定一个实数  $c$ ，再令  $i=\text{round}(c)$  表示了  $i \leq c$  的最大整数。则

$$c = \frac{m+1}{n-k+1} \quad 4-(6)$$

所以定义域内的节点为

$$\begin{cases} i = \text{round}(j \times c), a = j \times c - i \\ u_{k+j} = (1-a)u'_{i-1} + au'_i \end{cases}, j = 1, 2, \dots, n-k \quad 4-(7)$$

按式 4-(7)可以保证该定义域每个节点区间至少包括一个  $u'_j$ 。

### (3) 求解 $B$ 样条曲线

先将式 5-(10)写成矩阵形式有

$$Q = NI \quad 4-(8)$$

其中  $Q$  是包含  $m$  个数据点的  $m \times 3$  矩阵， $N$  是  $m \times n$  的  $B$  样条基函数矩阵， $D$  是包含  $n$  个未知控制点的  $n \times 3$  矩阵。

当  $k < n < m$  时，式 4-(8)为一个超限定方程，可以运用最小二乘法求得近似解

$$D = (N^T N)^{-1} N^T Q \quad 4-(9)$$

从而得到  $B$  样条曲线  $C^0(u)$ 。

### 2) 迭代法修正 $B$ 样条曲线参数

虽然最小二乘  $B$  样条曲线拟合技术能保证拟合曲线上参数为  $u'_j$  的采样点到曲线  $C$  的均方距离最小，但是参数为  $u'_j$  的采样点并不一定是  $B$  样条曲线上距离已知数据点最近的点，也即数据点集到  $B$  样条曲线的均方距离并不一定是最小的。因此，必须对  $C_0(u)$  进行迭代修正：

(1) 初始化迭代次数  $v=1$ ，同时设定误差极限  $\varepsilon$ 。

(2) 计算数据点集在  $C^v$  中对应的最近点集，同时将对应最近点的参数作为该数据点的参数  $U^v = \{u^v_i; i=0, 1, 2, \dots, m\}$ ，然后在根据式 4-(7)计算当前节点矢量

$$U^v = \{u^v_i; i=0, 1, 2, \dots, n+k+1\}。$$

(3) 接着再根据式 4-(9)解得当前样条曲线的控制点集  $D^v = \{d^v_j; j=0, 1, \dots, m\}$ ，从而得到相应的修正  $B$  样条曲线  $C^v(u)$ 。

(4) 然后计算与参数  $U^v = \{u^v_i; i=0, 1, 2, \dots, m\}$  对应的修正的样条曲线上的点集  $P^v = \{p^v_j;$



$j=0, 1, \dots, m\}$ , 进一步计算与数据点集  $Q$  之间的均方差  $e^v$ 。

(5) 返回至第二步, 直到  $\Delta e = |e^v - e^{v-1}| < \varepsilon$ 。

注: 最近点算法定义如下:

$$d(q, C(u)) = \min_{c_i \in C} \|q - c_i\| \quad 4-(10)$$

式中  $C(u)$  为一条  $B$  样条曲线,  $q$  为其中一个已知数据点, 通过上式计算可以得出点  $q$  在  $C(u)$  上距离最近的点  $c_i$ 。

得到了扫描线, 现在需要得到轮廓线, 本文决定采用封闭式非均匀三次  $B$  样条插值算法加以实现, 具体算法如下所述: 详细实现代码见附录。

轮廓曲线  $C(t)$  将会利用  $n+1$  个控制点  $d_i (i=0, 1, \dots, n)$  和相应的节点向量  $U=[u_0, u_1, \dots, u_{n+4}]$  来定义。其中  $n=m+2$ , 即控制点数比数据点数多出 2 个, 共存在  $m+2$  个未知顶点。同时要求封闭曲线首末端点重合且  $C^2$  连续。

#### 1) 节点向量 $U$ 的计算

在定义域  $[u_3, u_4, \dots, u_{n+1}]$  内节点向量可根据已知数据点集取规范累积弦长参数化计算得到, 即  $u_{i+3} = u'_i (i=0, 1, \dots, m)$ 。其中  $U'$  的计算方法如下所示:

(1) 令  $s_i = \|q_i - q_{i-1}\| (i=1, 2, \dots, m)$ ,  $S = \sum s_i$ ;

(2) 则  $U'_i = s_i / S (i=1, 2, \dots, m)$ 。

在定义域之外的节点可以通过这样计算得到:  $u_0 = u_{n-2} - 1$ ,  $u_1 = u_{n-1} - 1$ ,  $u_2 = u_{n-1}$ ,  $u_{n+2} = 1 + u_4$ ,  $u_{n+3} = 1 + u_5$ ,  $u_{n+4} = 1 + u_6$ 。

#### 2) 控制顶点集 $D$ 计算

对于需要插值的  $m+1$  个数据点集  $Q$  的三次  $B$  样条曲线方程可表示为

$$\begin{cases} Q(u_i) = \sum_{j=i-3}^i d_j N_{j,3}(t_i) = q_{i-3}, i=3, 4, \dots, n \\ Q(u_{n+1}) = \sum_{j=n-3}^n d_j N_{j,3}(t_{n+3}) = q_m \end{cases} \quad 4-(11)$$

上式中共含有  $m+1=n-1$  个方程, 由于首末数据点相重合, 故减少几个方程, 故剩下  $m=n-2$  个方程。又因为首末 3 个控制点都重合, 故未知顶点也相应减少 3 个, 也只剩下  $n-2$  个。因此  $m=n-2$  个方程构成线性方程组求解出  $n-2$  个未知控制点。线性方程组

$$\begin{bmatrix} N_{1,3}(u_3) & N_{2,3}(u_3) & \dots & N_{0,3}(u_3) \\ N_{1,3}(u_4) & N_{2,3}(u_4) & N_{1,3}(u_4) & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ N_{n-1,3}(u_{n+1}) & \dots & N_{n-3,3}(u_{n+1}) & N_{n-2,3}(u_{n+1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \dots \\ d_{n-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \dots \\ q_{n-3} \end{bmatrix} \quad 4-(12)$$

求解上述方程即可得到对应的控制顶点，最后便可得到相应的封闭轮廓曲线  $C(t)$ 。

#### 4.3.4.2 用户可视化界面

软件整体设计界面如图 4.6 所示。

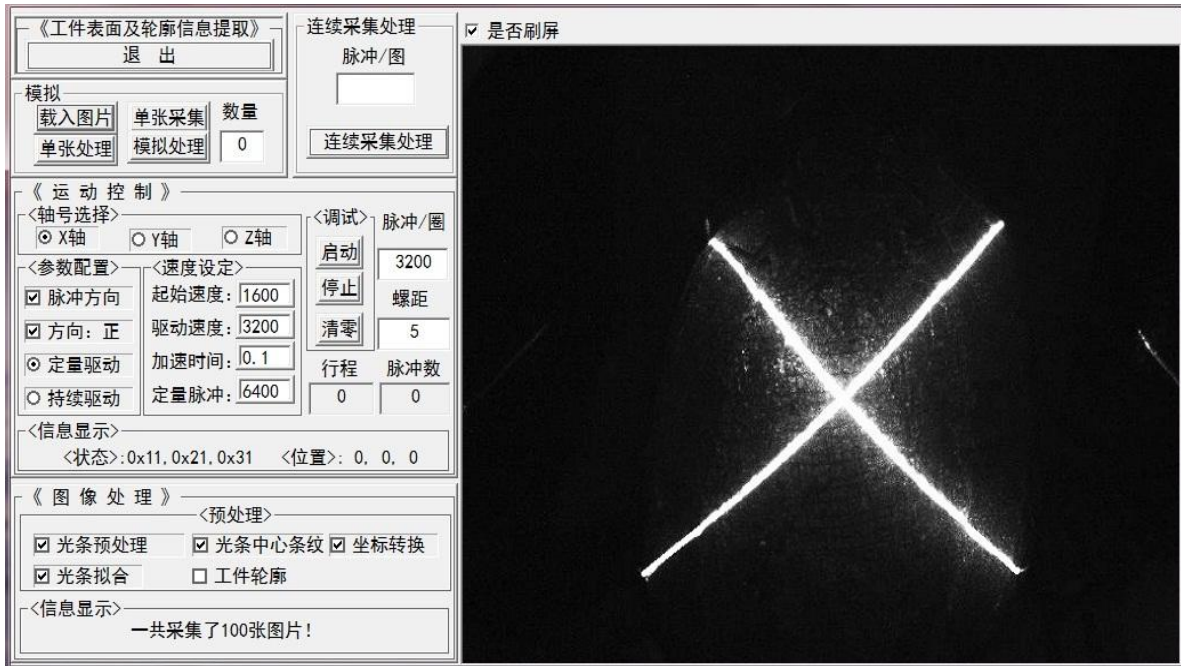


图 4.6 软件整体设计界面

该软件主要包括运控控制界面，图像采集处理、显示界面等两大板块，下面将一一详细介绍。

##### 4.3.4.2.1 运动控制

此模块主要用于对步进电机的控制，根据实际情况调整步进电机的参数。调整的参数包括：轴号的选择、参数配置、速度设置等。如图 4.7 所示。

(1) 轴号选择：由于本款运动控制卡可以同时驱动三个电机，而在本实验中只需用到一个电机，所以这里默认选择  $X$  轴；

(2) 参数配置：包括脉冲输出模式选择：脉冲+方向或脉冲+脉冲两种方式，这里默认选择脉冲+方向；如果选择脉冲+方向则在下一个复选框里继续选择是正向还是反

向；最后两个单选来决定驱动方式：定量驱动（就是指定脉冲数，电机就运行这些脉冲数）；持续脉冲（就是电机一直运行直到遇到一个急停信号）；

(3) 速度设定：包括起始速度设定、最终驱动速度设定、加速时间设定；还有如果你在参数配置里选择定量脉冲模式则还需指定“定量脉冲”的值，否则可以忽略该项；



图 4.7 运动控制界面示意图

同时为了调试的需要，本软件还增加了一个调试模块，包括：启动、停止和位置清零等功能；还有为了能使步进电机的脉冲数和实际距离相对应，本软件增加了脉冲/圈和螺距这两个输入项：脉冲/圈表明电机每转一圈需要多少个脉冲；螺距表明了电机每转一圈直线导轨运行的实际距离，所以螺距/（脉冲/圈）即为每个脉冲引起直线导轨运行的实际距离，也就是本装置的实际传动精度，如上图所示的精度为 5/3200mm 脉冲。

为了实时了解电机和直线导轨的运行状态，本运动控制界面还包括了信息显示框，用于显示电机实时的运行状态和位置状态，以及直线导轨的实际行程数的显示和实际脉冲数的显示。

#### 4.3.4.2.2 图像采集处理及工件表面信息生成

此模块的作用主要包括对十字光条图像的采集、十字光条交叉心的提取、十字光条中心提取、坐标转换、光条拟合以及工件轮廓生成。如图 4.8 所示。

- (1) 图像采集：用于待处理原始图像的采集，只有得到了原始图像才能继续进行下一步操作；
- (2) 图像预处理：包括图像滤波、图像兴趣域设定、图像分割等步骤；
- (3) 光条中心提取：先根据采集图像判定属于哪类图像，然后根据具体的类型调用具体算法进行中心提取；
- (4) 坐标转换：由于上步得到了光条图像的中心，接下去就可以根据系统标定的结果得到光条图像点对应的世界坐标系下的三维点；
- (5) 光条拟合：由于上步得到的光条三维点个数是离散的且数量有限，所以为了更

好的表达工件的表面信息，可以运用 B 样条曲线拟合技术，将这些离散的点拟合成连续的光滑曲线；

(6) 工件轮廓生成：上步基本得到了工件表面的信息，则此步可以根据每条光条的端点信息得到工件的轮廓信息，具体操作也是利用 B 样条曲线将这些光条端点拟合生成光滑的曲线；

(7) 信息显示：为了直观的看到所采集处理的图片数，本界面还包括了“信息显示”，用于实时显示采集处理的图片数；

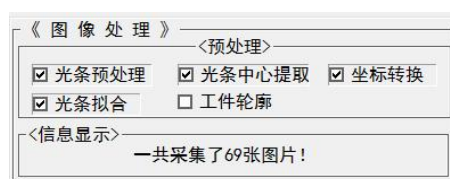


图 4.8 图像处理界面

由于图像采集处理是一个繁琐的过程，所以为了调试的需要，本系统提供了一个模拟的界面，具体功能包括：手动载入一张图片、单张在线采集图片、单张处理还有综合模拟处理。如图 4.10 所示。

1) 载入图片：该功能可以让操作者手动载入一张已经存在的图片，以供接下去的图像处理；如图 4.9 所示。

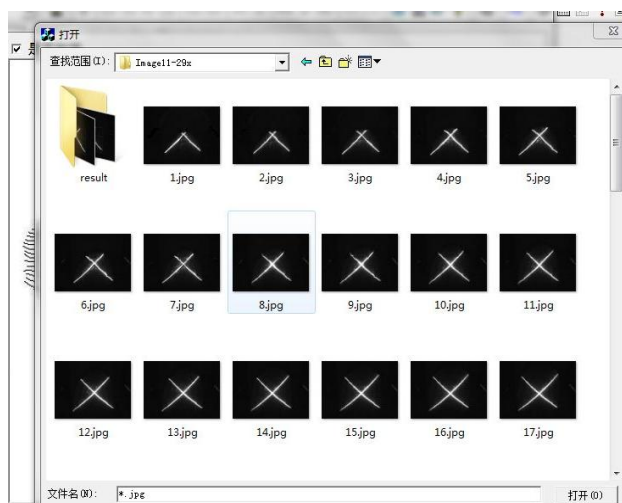


图 4.9 载入图片对话框

2) 单张采集：该功能可以让你在线采集一张图片，然后进行图像处理，然后根据处理的结果调整图像采集的环境以适应实际的要求；

3) 单张处理：该功能能处理一张光条图片，该图片可以是手动载入的，也可以是在

线采集的；

- 4) 模拟处理：该功能可以同时连续载入处理多张图片，图片数量由“数量”输入框输入的数字决定，然后根据图像处理的复选框所选选项，产生相应的处理结果；  
注：上述图像处理的具体过程都由“图像处理”界面的复选框所选项决定。

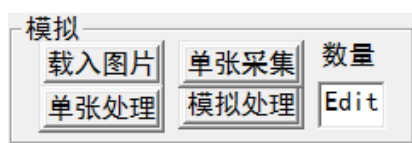


图 4.10 模拟处理界面

通过上述的模拟调试过程，基本可以实现图像的采集、图像的处理以及最终轮廓的生成，所以可以进入连续采集处理界面。如图 4.11 所示。

该界面主要包括一个输入框，用来决定采集图像的时间间隔，本系统采用每图脉冲数决定采集图像的时间间隔。当已经设定号该项参数后，点击“连续采集处理”按钮，进行在线连续图像采集处理最后生成工件轮廓信息。

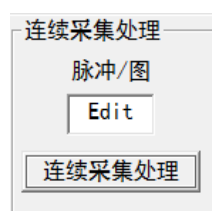


图 4.11 连续图像采集处理界面

#### 4.4 本章小结

本章主要根据建立的工件扫描模型搭建了一个实验平台，包括 CMOS 摄像机、结构光发生器、运动控制卡、步进电机、驱动器等硬件组成；同时根据实际开发需要，以 VC6.0 为软件开发平台，开发了一款相对应的控制处理软件，并详细介绍了建立该款软件的任务及目标、方案设计、工序流程及软件的功能设计，其中功能设计包括后台处理和软件界面设计，分别包括运动控制，图像采集处理，三维坐标重建和工件表面信息生成等功能。

## 第五章 鞋底表面信息提取实验及相应分析

为了验证本文方法的实用性和可行性，本章以鞋底为实验对象，进行了鞋底表面信息提取的实验，证实了该方法的正确性和通用性，同时利用一字线结构光也进行了相应的实验，通过与本文提出的方法相比较，得到了两种方法的优缺点。

### 5.1 实验目的

- 1) 采用十字和一字线结构光扫描鞋底，验证鞋底表面信息计算算法的可行性。
- 2) 一字线结构光以平行鞋底表面方式扫描时，可能会在端面处缺少有效图像帧，分析因缺少端面信息而导致的误差；
- 3) 比较十字线结构光和一字线结构光扫描鞋底曲面获取的端面的信息，验证十字线结构扫描得到的轮廓曲线更符合实际情况；

### 5.2 实验设备

工件扫描实验平台、一个一字线结构光、一个十字线结构光、带鞋楦的鞋底、PC 机、游标卡尺等。其中实验平台选用硬件和软件平台在第四章已详细介绍。所选游标卡尺精度为 0.02mm，鞋底长度约为 290mm，宽度约为 110mm。

### 5.3 实验主要步骤

- 1) 设定步进电机的细分为 2500 脉冲/圈，即 PC 机每发送 2500 个脉冲电机旋转一圈，同时导轨行程为一个螺距 20mm，也就是说此时系统的单脉冲分辨率为 0.008mm；
- 2) 先将一字线结构光安装在试验平台上，并将鞋底平稳地安放在导轨上，调整一字线结构光使它的照射方向与世界坐标系的 Y 轴垂直，导轨运行方向与世界坐标系 Y 轴平行，然后开始扫描，图像采集频率为图片/500 脉冲，最后生成鞋底表面和轮廓信息；
- 3) 完成一字线结构光扫描后，拆下一字线结构光，再装上十字线结构光，十字线结构光安装方法如第二章所述，然后开始扫描，图片采集频率一致，最后同样产生鞋底表面和轮廓信息；

以上实验都是在系统已经标定完毕的基础之上。

## 5.4 实验结论和分析

### 5.4.1 一字线结构光扫描得到的鞋底表面信息

表 5.1 一字线结构光提取鞋底部分点云数据

序号	$x_{wi}(\text{mm})$	$y_{wi}(\text{mm})$	$z_{wi}(\text{mm})$	序号	$x_{wi}(\text{mm})$	$y_{wi}(\text{mm})$	$z_{wi}(\text{mm})$
1	164.9396	3	226.8988	...	...	...	...
2	164.6698	3	226.7528	18656	164.1065	291	226.6489
3	164.3953	3	226.8645	18657	163.8313	291	226.6393
4	163.8475	3	226.8493	18658	163.5543	291	225.6234
5	163.5732	3	226.7406	18659	163.2776	291	224.5083
6	162.7513	3	226.4466	18660	162.9947	291	226.4770
7	162.4485	3	226.1892	18661	162.7117	291	224.4490
8	162.1519	3	226.0762	18662	162.4411	291	226.3247
9	161.8773	3	225.9185	18663	162.1640	291	224.3052
10	161.5956	3	225.2878	18664	161.8875	291	226.6588
11	161.3282	3	225.2619	18665	161.6069	291	224.6720
12	161.0757	3	225.1526	18666	161.3307	291	226.7705
13	159.8060	3	225.1386	18667	161.0542	291	226.7413
14	159.5361	3	225.1252	18668	160.7778	291	226.7239
15	159.2677	3	225.1028	18669	160.5013	291	226.8302
16	159.0167	3	224.9786	18670	160.2245	291	226.8499
17	158.7669	3	224.8442	18671	159.9419	291	225.8689
18	158.5150	3	224.7193	18672	159.6652	291	226.9497
19	158.2480	3	224.6837	18673	159.3929	291	226.0629
20	158.5790	3	224.5638	18674	159.1196	291	225.9078
...	...	...	...	18675	158.8407	291	226.2074



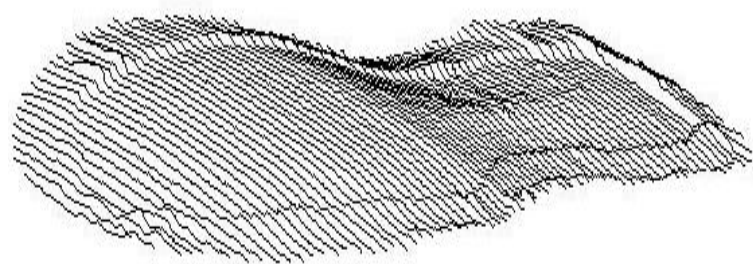


图 5.1 一字线结构光扫描提取鞋底点云数据

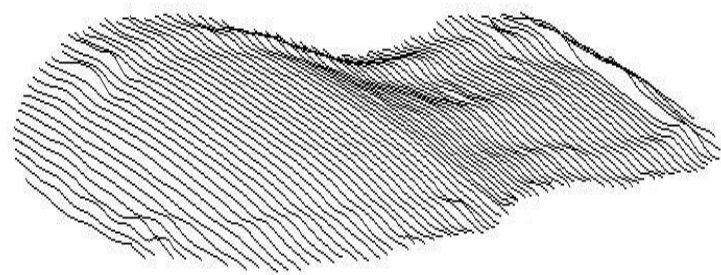


图 5.2 一字线结构光扫描鞋底扫描线拟合

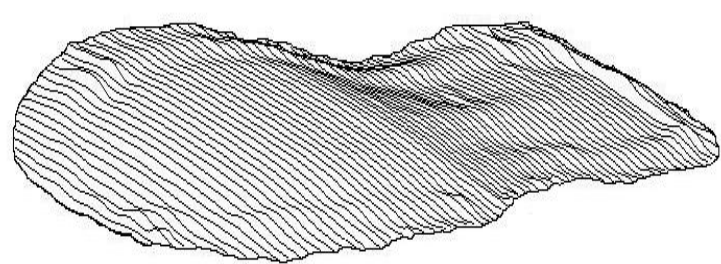


图 5.3 一字线结构光扫描鞋底轮廓线拟合

表 5.1 列出了利用一字线结构光扫描鞋底底面而得到的部分点云数据，其中由于一字线结构光扫描时，结构光平面是平行于世界坐标系的 XOZ 平面，所以每采集一帧图像的 Y 坐标值保持不变；图 5.1 显示了扫描的得到的原始点云数据；图 5.2 显示通过样条曲线拟合得到的光滑扫描线；图 5.3 显示了对扫描线端点进行拟合得到的鞋底轮廓线。根据上述数据，可以证明一字线结构光扫描鞋底可以提取鞋底表面信息。

5.4.2 十字线结构光扫描得到的鞋底表面信息

表 5.2 十字线结构光提取鞋底部分点云数据

序号	$x_{wi}(\text{mm})$	$y_{wi}(\text{mm})$	$z_{wi}(\text{mm})$	序号	$x_{wi}(\text{mm})$	$y_{wi}(\text{mm})$	$z_{wi}(\text{mm})$
1	168.6700	2.0203	225.5995	...	...	...	...
2	168.4005	2.5995	225.6323	38173	156.1042	286.1511	226.9690



3	167.8836	3.1164	225.5712	38174	155.8287	286.4185	226.1252
4	167.5820	3.4180	225.8599	38175	155.5530	287.4533	226.7656
5	167.3196	3.6804	225.8554	38176	155.2780	287.7234	226.1948
6	167.0640	3.9360	225.7959	38177	154.9964	288.7896	226.2014
7	166.7837	4.2163	225.9248	38178	154.7182	288.2823	226.1367
8	166.4994	4.5006	226.0860	38179	154.4483	288.5534	226.2183
9	165.8479	4.6262	226.1923	38180	154.1635	288.8434	225.1393
10	165.5682	4.8815	226.2223	38181	153.8784	289.1233	226.0749
11	165.2980	5.1521	226.2621	38182	153.5930	289.4144	225.0101
12	165.0261	5.4318	226.0845	38183	153.3075	289.6945	226.1736
13	165.7769	5.7020	226.0954	38184	153.0277	289.9745	226.1066
14	165.5079	5.9739	226.1464	38185	152.7508	290.2492	224.3728
15	165.2381	6.2231	226.2167	381886	152.4647	290.5353	225.5416
16	164.9577	6.4921	226.0678	38187	152.1836	290.8164	226.5250
17	164.7035	6.7619	226.0834	38188	151.9023	291.0977	226.4582
18	164.4320	7.0423	226.2336	38189	151.6183	291.3817	226.3964
19	164.2432	7.2965	226.4456	38190	151.3340	291.6660	226.4670
20	164.1479	7.3413	226.4213	38191	151.0499	291.9500	225.2996
...	...	...	...	38192	150.7685	292.2315	226.2274

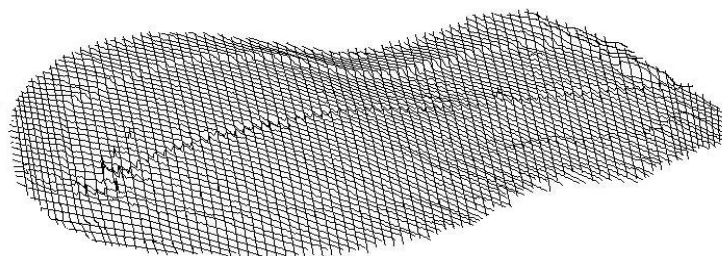


图 5.4 十字线结构光扫描提取鞋底点云数据

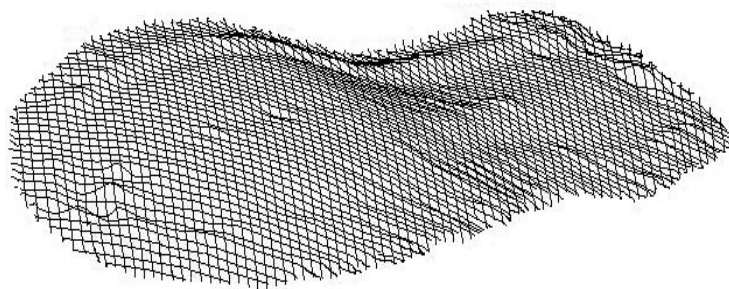


图 5.5 十字线结构光扫描鞋底扫描线拟合

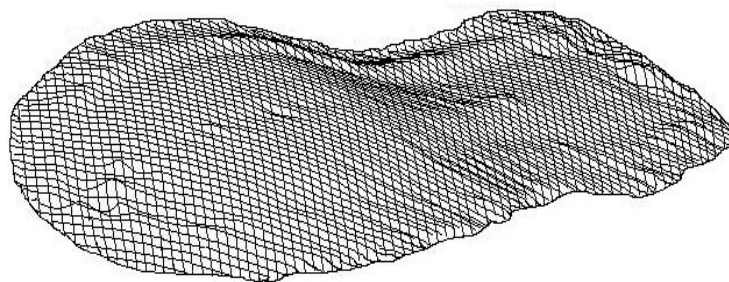


图 5.6 十字线结构光扫描鞋底轮廓线拟合

表 5.2 列出了利用十字线结构光扫描鞋底底面而得到的部分点云数据；图 5.4 显示了扫描的得到的原始点云数据；图 5.5 显示通过样条曲线拟合得到的光滑扫描线；图 5.6 显示了对扫描线端点进行拟合得到的鞋底轮廓线。根据上述数据，可以证明十字线结构光扫描鞋底可以提取鞋底表面信息。

## 5.5 两种扫描方法结果及误差分析

表 5.1 和表 5.2 分别列出了利用一字线结构光和十字线结构光扫描鞋底表面所得的部分点云数据，包括了鞋底两端的数据。从表中分析可得，两种扫描方法所得点云数据的  $Z$  坐标值基本相同，大致在 224mm-227mm 之间，符合鞋底表面实际要求；但是，观察  $Y$  坐标值可得，利用十字线结构光扫描所得  $Y$  值范围明显比利用一字线结构光所得  $Y$  值范围要大。同时，由于本实验在扫描鞋底表面时导轨运行的方向平行于  $Y$  轴，所以鞋底的长度可以通过求  $Y$  值最大值和最小值的差求得，故  $Y$  值范围的大小可以间接说明扫描精度的大小。同理，也可以通过求  $X$  值最大值和最小值的差得到鞋底的宽度，即  $X$  值范围的大小也可以间接说明扫描精度的大小。所以，从上述两表分析可粗略地得出利用十字线结构光测量的精度比一字线结构光要高。

为了更形象地说明测量精度问题，可以将两种方法最终拟合得到的轮廓线重叠在一起，并将重叠后的数据投影到  $XY$  平面内，如图 5.7 所示。从图中可得两种方法所得的鞋

底表面轮廓线拟合基本一致，但是在鞋底两端面处存在少许差异，十字线结构光扫描所得轮廓线范围比一字线结构光扫描所得范围要大些，即十字线结构光扫描所得的精度比一字线结构光要高。其原因在于利用一字线结构光扫描鞋底表面，当运动到鞋底端面时，可能存在缺失有效的端面关键图像帧，从而导致一定的误差，而利用十字线结构光可以避免这一状况出现。



图 5.7 两种方法拟合所得轮廓线重合效果图

为了分析两种分析方法所存在的测量误差，可以将鞋底的长和宽作为评判依据。鞋底的实际长度利用游标卡尺测量所得；结构光测量的尺寸利用拟合所得的轮廓线，通过计算得到，具体算法如上所述。为了保证测量的精度，本文分别利用十字和一字线结构光连续做十次实验求平均值，如表 5.3 所示。

表 5.3 两种方法十次实验所测结果

十字线结构光测量结果			一字线结构光测量结果		
次数	长度(mm)	宽度(mm)	次数	长度(mm)	宽度(mm)
1	290.2112	110.7121	1	288	110.6723
2	290.3123	110.6453	2	288	110.7423
3	290.3321	110.5425	3	288	110.5724
4	289.9323	110.6436	4	288	110.7426
5	289.9921	110.7311	5	288	110.5332
6	290.2321	110.5112	6	288	110.5765
7	290.1424	110.5335	7	288	110.7311
8	290.5345	110.7212	8	288	110.6432
9	290.3724	110.7123	9	288	110.5633
10	289.3212	110.4456	10	288	110.5124
平均测量值	290.1383	106.6498	平均测量值	288	106.6289

表 5.4 十字线结构光测量尺寸误差

	实际尺寸(mm)	十字线结构光测量尺寸(mm)	误差(mm)
鞋底长度(mm)	290.12	290.1383	0.0183
鞋底宽度(mm)	110.64	110.6498	0.0098

表 5.5 一字线结构光测量尺寸误差

	实际尺寸(mm)	一字线结构光测量尺寸(mm)	误差(mm)
鞋底长度(mm)	290.12	288	2.12
鞋底宽度(mm)	110.64	110.6289	0.0111

通过表 5.4 和表 5.5 可得，十字线结构光测量和一字线结构光测量的鞋底表面的宽度差不多，与实际的误差分别为 0.0098mm 和 0.0111mm，均在误差范围内。但是两种方法得到的关于长度的信息却相差很大，十字结构光测量得到的误差仅为 0.0183mm，在测量误差范围之内；而一字线结构光测量得到的误差却是 2.12mm，并结合图 5.7 可得一字线结构光扫描鞋底表面时会在鞋底端面丢失关键的图像帧，这最为关键的原因在于当一字线结构光以平行鞋底表面的方式扫面鞋底时，当结构光到达鞋底端面处时，导轨再运行一个周期

后，此时的结构光已在鞋底表面外，从而导致关键的图像帧无法采集，最终导致端面数据丢失，即使减小导轨的运行周期，此种测量误差也照样存在。

由上述分析可得十字线结构光扫描鞋底表面时不仅具有较高的测量精度，而且可以得到鞋底端面的所有数据，不会因为缺少关键图像帧而导致较大的测量误差。

## 5.6 本章小结

本章通过基于结构光提取鞋底表面信息这个实验，分别利用十字线结构光和一字线结构光扫描鞋底表面，均实现了鞋底表面信息的提取；实验结果表明利用十字线结构光测量不仅精度较高，同时与一字线结构光相比较可以保证工件端面信息不丢失，提高了测量的精度，同时验证了本文提出方法的可行性。

## 第六章 总结和展望

### 6.1 全文总结

本文研究了基于十字线结构光提取自由曲面工件表面信息，提出了一种能自动生成工件加工表面信息的方法，并通过实验验证了该方法的可行性。

本文主要的工作总结如下：

制作平面棋盘式定标板，提取了角点的子像素级坐标。根据结构光视觉测量原理，采用基于平面靶标非线性模型的标定方法，同时开发了一款摄像机标定软件，标定误差为 0.2042 个像素，验证了该方法具有较高的精度；然后，为了获得结构光传感器的参数，通过调整线结构光平面位置得到了相应的线结构光平面参数方程。

对阈值分割的不同方法进行了比较，最后选用最大类间方差法进行图像分割，然后利用基于抛物线拟合的灰度重心法得到了光条中心，最后提出了一种对提取中心进行左右光条分类的方法。

建立了工具扫描模型，并根据这一模型搭建了一个实验平台；同时根据实际开发需求，以 VC6.0 为软件开发平台，开发了一款相对应的控制处理软件，实现了图像采集处理、光条中心提取、三维坐标重建、工件表面信息生成。

为了验证本文提出方法的可行性，通过提取鞋底表面信息实验，分别利用十字线结构光和一字线结构光扫描鞋底表面，均实现了鞋底表面信息的提取；结果表明利用十字线结构光测量的精度达到 0.018mm，不仅测量精度较高，同时与一字线结构光相比较可以保证工件端面信息不丢失，提高了测量的精度，同时验证了本文提出方法的可行性。

### 6.2 研究展望

本文主要研究了基于十字线结构光的自由曲面工件表面信息提取方法研究，并通过实验加以了验证，但是整个系统还存在着一定的误差，技术上还有待进一步完善。所以下一步改进工作的重点在于：

1) 本文在标定结构光方程时使用了一般的机械调整法，但是该方法调整环节多同时还具有一定的盲目性，故而标定的精度不高，这样不利于最终三维坐标的转换。故而下一步要

开展的工作是基于靶标的结构光平面方程标定研究，该方法具有较高的标定精度，同时有利于提高整个系统的测量精度。

## 参考文献

- [1] Commean, P. K, etc. Geometric design of a multisensory structured light range digitizer[J]. Optical Engineering, April 1994, 33(4): 1349—1355.
- [2] 周伦彬. 逆向非接触测量技术浅析[J]. 中国测试技术, 2005, 31(5): 264—268.
- [3] S. Kurada, C. Bradley. A review of machine vision sensors for tool condition monitoring. Computers in Industry, 1997, 34(1): 55—72.
- [4] Y. Zhang, R. Kovacevic. Real-time sensing of sag geometry during GTA welding. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1997, 119(2): 151—160.
- [5] 孙长库, 何明霞, 王鹏. 激光检测技术[M], 天津大学出版社, 2001.
- [6] 王岩, 郝颖明. 基于结构光的三维测量及重建技术[J]. 现代计算机, 1999, (1): 4—6.
- [7] 王阿川, 付雪婧. 光学三维测量技术在原木三维重建中的应用[J]. 林业机械与木工设备, 2008, 36(4): 52—54.
- [8] 刘保华, 李兵, 崔希君等. 一种多线结构光测头的误差补偿方法[J]. 西安交通大学学报, 2007, 1(41): 50—54.
- [9] P. M. Will, K. S. Pennington. A preprocessing technique for robot and machine vision[J]. Artificial Intelligence, 1971, 2(34): 319—329.
- [10] Bremner . J. F. Automatic vision inspection system for the inspection of shapes cut in sheet material[C]. Second International Conference on Image Processing and Its Applications, 1986: 40—43.
- [11] Dahle. O , Sommerfelt. A , McLeod. A . On-line inspection of extruded profile geometry[C]. Vision90-Conference Proceedings, 1990: 1—17.
- [12] Richard Kowarschik, Peter Kühmstedt, Jorg Gerber, etc. Adaptive optical three-dimensional measurement with structured light[J]. Optical Engineering, 2000, 39(1): 150—158.
- [13] Song Zhang. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010(40): 149—158.
- [14] Muammer Ozbeka, Daniel J. Rixena. Optical Measurements and Operational Modal Analysis on a Large Wind Turbin: Lessons Learned[C]. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series, 2011: 257—276.



- [15] Julio Molleda, Rubén Usamentiaga, Daniel F. García, etc. Real-time flatness inspection of rolled products based on optical laser triangulation and three dimensional surface reconstruction[J]. Journal of Electronic Imaging, 2010, 19(3): 1—14.
- [16] 余飞鸿. 用于结构光分布图采集的图像帧存储器设计[J]. 半导体光电, 1993, 14(4): 362—366.
- [17] 李中伟, 史玉升, 钟凯等. 结构光测量技术中的投影仪标定算法[J]. 光学学报, 2009, 29(11): 3061—3065.
- [18] 许丽, 张之江. 结构光测量系统的误差传递分析[J]. 光学精密工程, 2009, 17(2): 306-313.
- [19] 边琰, 郭彤, 张国雄. 基于线结构光的工件台阶特征尺寸测量方法研究[J]. 机床与液压, 2009, 37(6): 129-134.
- [20] 贾倩倩, 王伯雄, 赵博华等. 基于液晶靶标的多 CCD 线结构光测量系统全局标定[J]. 光学精密工程, 2009, 17(12): 2990—2996.
- [21] 张勇斌, 卢荣胜, 费业泰等. 多台阶零件的视觉测量[J]. 工业计量, 2004, 14(1): 19—21.
- [22] 武传宇, 贺磊盈, 李秦川等. 鞋底曲面数据提取与喷胶轨迹的自动生成方法. 机械工程学报, 2008, 44(8): 85—90.
- [23] 邓志东, 牛建军, 张竞丹. 基于立体视觉的三维建模方法[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(14): 3258—3262.
- [24] 罗先波, 钟约先, 李仁举. 三维扫描系统中的数据配准技术[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(8): 1104—1106.
- [25] 陆国栋, 彭群生. 三维重建新方法及新技术研究[J]. 高技术通讯, 2001(3): 58—61.
- [26] 余飞鸿. 结构光三维物体面形实时测量系统[J]. 光子学报, 1994, 23(6): 521—529.
- [27] Stephen T. Barnard, Martin A. Fischler. Computational stereo[J]. ACM Computing Surveys, 1982, 14(4): 553—572.
- [28] V. Srinivasan, H. C. Liu, M. Halioua. Automated phase measuring profilometry of 3-D diffuse object. Applied Optics, 1984, 23(18): 3105—3108.
- [29] Takeda Mitsuo, Mutoh Kauhiro. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3D object shapes. Applied Optics, 1983, 22(24): 3977—3982.
- [30] 刘金桥, 吴金强. 机器视觉系统发展及其应用[J]. 机械工程与自动化, 2010(1): 215—216.
- [31] 李树杰. 中国机器视觉的发展趋势[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2010, 26(1): 161—162.

- [32] 贾云得. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [33] 马颂德, 张正友. 计算机视觉—计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [34] Corke. P I. Visual control of robots: high-perfoemance servoing[M]. England: Research Studies Press Ltd, 1996.
- [35] Tsai, Roger. Y. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision [C]. Proc of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami Beach, FL, USA, 1986: 364—374.
- [36] 张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [37] Faugeras. O. D, Toscani G. The calibration problem for stereo[C]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Minmi Beach, Florida, June 22—26, 1986: 15—20.
- [38] 陈凯歌, 韩晓军, 张宇等. 基于 OpenCV 的 Harris 角点检测. 河南工程学院学报(自然科学版), 2011. 23(4): 53—56.
- [39] 刘瑞祯, 于仕琪. OpenCV 教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007.
- [40] 梅迎春, 王朝立, 廖勤武. 基于 OpenCV 的摄像机标定的应用研究. 计算机工程与设计[J], 2009, 30(16): 3856—3858.
- [41] 李健, 陈长明. 基于 OpenCV 的改进两步法摄像机标定. 计算机应用于软件[J], 2010, 3(27): 104—109.
- [42] 张波, 贺庚贤, 沈湘衡. 可编程动态旋转靶标标定方法. 光学精密工程, 2003, 2(11): 176—180.
- [43] James. K. W. Noncontact Machine Vision Metrology within a CAD Coordinate System[C]. Autofact 88 Conf. proceedings, 1988, 9-17.
- [44] 王春和, 邹定海, 叶声华. 三维视觉检测与结构光传感器的标定[J]. 仪器仪表学报, 1994, 15(4): 119—123.
- [45] 林娜, 马孜, 胡英等. 基于机器人系统的线结构光视觉传感器标定新方法[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(9): 101—103.
- [46] 何岳, 蔡轶珩, 刘长江等. 一种基于内容的图像自适应滤波算法[J]. 测控技术, 2008, 27 (5): 13—14.
- [47] 吴朋波, 王志巍, 郭晓文等. 自适应六边形窗口加权均值滤波[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(36): 177—180.

- [48] 张文攀, 吴军辉, 朱震等. 基于准十字窗口的中值滤波法在红外图像处理中的应用[J]. 电光与控制, 2006, 13(1): 83—86.
- [49] 赵慧敏, 李卫军, 刘扬阳等. 基于三高斯滤波的低质指纹图像增强方法[J]. 智能系统学报, 2012, 7(6): 489—493.
- [50] 陈伟飞. 光切法三维面型自动测量系统的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 1994.
- [51] 吴剑波, 赵宏, 谭玉山. 一种解决光刀断线问题的新方法[J]. 光学技术, 2001, 27(2): 189—191.
- [52] 贺俊吉, 张广军. 结构光三维视觉检测中光条图像处理研究方法研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(7): 593—597.
- [53] 李中伟, 王从军, 史玉升. 一种结合梯度锐化和重心法的光条中心提取算法[J]. 中国图像图形学报, 2008, 13(1): 65.
- [54] 肖佚军, 丁明跃, 彭嘉雄. 基于迭代最近点的 B 样条曲线拟合方法研究[J]. 中国图像图形学报, 2000, 5(A)(7): 585—588.

## 致 谢

在论文的结束部分，我对于在过去两年研究生学习期间给过我帮助的所有人，表达诚挚的感谢！

深深感谢我的导师武传宇教授。武老师在我的课题开展和论文撰写方面给予了悉心的指导，老师的态度和学识使我受益匪浅，在此表示诚挚的感谢！

真诚地感谢张雷老师的耐心指导，张老师传授的学习方法和为学的严谨态度，给了我很多启发，使我学习更为深入。非常感谢我的博士师兄贺磊盈对我在科研上的帮助，他在学习上给予我的巨大信任，推动着我不断开拓进取、求是创新。感谢师兄张华君、窦争宝等人的热情指导和照顾，尤其感谢全体 339 实验室同窗，包括杨蒙爱、邹鹏达、师弟金海龙、师妹陈晨等的帮助和鼓励。另外，特别感谢一路上助我成长的马泽、朱兵斌、张吉峰、金建冲等对我在生活学习上的帮助，感谢你们带给我无穷力量。

路漫漫其修远兮，吾将上下而求索。在我校园生活即将告一段落之际，衷心的感谢含辛茹苦哺育我成长的父母，感谢亲人朋友对我无微不至的关爱。

## 附 录

### 样条曲线拟合程序代码:

//扫描线拟合

```
void CAutoE xtractwithVcDlg::DoubleTipSpline(int ith, UINT flag)
{
    int i,j;

    const int k = 3;    //三次 B 样条

    int n;              //n 为控制点个数

    float L,a,c;

    float *U,*T,*l,*d,**N;

    Coord3D *ctlpts;

    //确定控制顶点数

    if(xLine[ith].partLine[flag].pixelNum>105) n = xLine[ith].partLine[flag].pixelNum/15;
    else if(xLine[ith].partLine[flag].pixelNum<8) n = xLine[ith].partLine[flag].pixelNum-2;
    else n =7;

    //

    c=(float)xLine[ith].partLine[flag].pixelNum/(n-k+1);

    ctlpts = new Coord3D[n+1];

    U = new float[xLine[ith].partLine[flag].pixelNum];

    T = new float[n+k+2];

    l = new float[xLine[ith].partLine[flag].pixelNum-1];

    d =new float[n+1];

    N = new float *[xLine[ith].partLine[flag].pixelNum];    //N*d = 1

    for(i=0;i<xLine[ith].partLine[flag].pixelNum;i++) N[i] = new float[n+1];

    //规范积累弦长参数化

    L = 0.0;

    for(i=0;i<xLine[ith].partLine[flag].pixelNum-1;i++){
```

```

l[i]
Dis_ptop(xLine[ith].partLine[flag].FrameData.coord3D[i],xLine[ith].partLine[flag].FrameData.coord3D[i+1]);
L += l[i];
}
//u'<j>(j=0,1,...,m)是数据点 q<j>对应的参数值
U[0] = 0.0;
for(i=1;i<xLine[ith].partLine[flag].pixelNum-1;i++) U[i] = U[i-1]+l[i-1]/L;
U[xLine[ith].partLine[flag].pixelNum-1] = 1.0;
//定义域的内节点
for(i=0;i<=k;i++) T[i] = 0.0;
for(i=n+1;i<=n+k+1;i++) T[i] = 1.0;
for(j=1;j<=n-k;j++){
    i = floor(j*c);      a = (float)(j*c-i);
    T[k+j] = (1-a)*U[i-1]+a*U[i];
}
//控制顶点的 x 值
for(i=1;i<xLine[ith].partLine[flag].pixelNum-1;i++){
    l[i-1] = xLine[ith].partLine[flag].FrameData.coord3D[i].x-Basic(0,k,U[i],T)*
        xLine[ith].partLine[flag].FrameData.coord3D[0].x-Basic(n,k,U[i],T)*

xLine[ith].partLine[flag].FrameData.coord3D[xLine[ith].partLine[flag].pixelNum-1].x;
    for(j=1;j<n;j++)
        N[i-1][j-1] = Basic(j,k,U[i],T);
}
d = SolveOLE(N,l,xLine[ith].partLine[flag].pixelNum-2,n-1);
for(i=1;i<n;i++) ctrlpts[i].x = d[i-1];
//控制顶点的 z 值

```

```

for(i=1;i<xLine[ith].partLine[flag].pixelNum-1;i++)

    l[i-1] = xLine[ith].partLine[flag].FrameData.coord3D[i].z-Basic(0,k,U[i],T)*
        xLine[ith].partLine[flag].FrameData.coord3D[0].z-Basic(n,k,U[i],T)*

xLine[ith].partLine[flag].FrameData.coord3D[xLine[ith].partLine[flag].pixelNum-1].z;

d = SolveOLE(N,l,xLine[ith].partLine[flag].pixelNum-2,n-1);
for(i=1;i<n;i++) {ctlpts[i].z = d[i-1]; }

//控制顶点的 y 值
ctlpts[i].y = xLine[ith].partLine[flag].FrameData.coord3D[i].y;
for(i=1;i<xLine[ith].partLine[flag].pixelNum-1;i++)

    l[i-1] = xLine[ith].partLine[flag].FrameData.coord3D[i].y-Basic(0,k,U[i],T)*
        xLine[ith].partLine[flag].FrameData.coord3D[0].y-Basic(n,k,U[i],T)*

xLine[ith].partLine[flag].FrameData.coord3D[xLine[ith].partLine[flag].pixelNum-1].y;
d = SolveOLE(N,l,xLine[ith].partLine[flag].pixelNum-2,n-1);
for(i=1;i<n;i++) ctlpts[i].y = d[i-1];

//
ctlpts[0].x = xLine[ith].partLine[flag].FrameData.coord3D[0].x;
ctlpts[0].y = xLine[ith].partLine[flag].FrameData.coord3D[0].y;
ctlpts[0].z = xLine[ith].partLine[flag].FrameData.coord3D[0].z;

ctlpts[n].x =
xLine[ith].partLine[flag].FrameData.coord3D[xLine[ith].partLine[flag].pixelNum-1].x;
ctlpts[n].y =
xLine[ith].partLine[flag].FrameData.coord3D[xLine[ith].partLine[flag].pixelNum-1].y;
ctlpts[n].z =
xLine[ith].partLine[flag].FrameData.coord3D[xLine[ith].partLine[flag].pixelNum-1].z;

//
xLine[ith].partLine[flag].ScaneLine = new BSpline(k,n,T,ctlpts);

```

```

//释放动态开辟的空间

delete []U; delete []T; delete []ctlpts; delete []l; delete []d;

for(i=0;i<xLine[ith].partLine[flag].pixelNum;i++) delete []N[i];

delete []N;

}

//轮廓线生成

void CAutoE xtractwithVcDlg::CloseSpline()

{

//以下 B 样条封闭曲线拟合算法，即数据点不经过样条曲线

int i,j; const int k = 3;

int n = 80; //n+1 is the number of control points

int m = 2*FrameNo;//数据点，原点数 2*FrameNo

float L=0.0,c,a;

float *T = new float[n+k+2];

float *U = new float[m+1];

float *l = new float[m];

float *d = new float[n-k+1];

Coord3D *ctlpts = new Coord3D[n+1];

Coord3D *datapts = new Coord3D[m+1];

float **N = new float *[m]; //N*d = 1

for(i=0;i<m;i++) N[i] = new float[n-k+1];

//修改开始

Coord3D mid; int g;

for(i=0;i<FrameNo;i++){

    datapts[2*i]= xLine[i].partLine[0].FrameData.coord3D[0];

    datapts[2*i+1]= xLine[i].partLine[1].FrameData.coord3D[0];

}

//左边 2*FrameNo 点按 y 轴值从小到大排列

```



```

for (i=0;i<(2*FrameNo-1);i++)
{
    g=i;
    for (j=i+1;j<2*FrameNo;j++)
    {
        if (datapts[g].y>datapts[j].y)
            g=j;
    }
    mid=datapts[i];
    datapts[i]=datapts[g];
    datapts[g]=mid;
}
for(i=FrameNo;i<2*FrameNo;i++){
    datapts[2*i]=
xLine[i-FrameNo].partLine[0].FrameData.coord3D[xLine[i].partLine[0].pixelNum-1];
    datapts[2*i+1]=
xLine[i-FrameNo].partLine[1].FrameData.coord3D[xLine[i].partLine[1].pixelNum-1];
}
//右边 2*FrameNo 点按 y 轴值从大到小排列
for (i=2*FrameNo;i<(4*FrameNo-1);i++)
{
    g=i;
    for (j=i+1;j<4*FrameNo;j++)
    {
        if (datapts[g].y<datapts[j].y)
            g=j;
    }
    mid=datapts[i];

```

```

    datapts[i]=datapts[g];
    datapts[g]=mid;
}
datapts[m].x = datapts[0].x; datapts[m].y = datapts[0].y; datapts[m].z = datapts[0].z;
//修改结束
for(i=0;i<m;i++){
    l[i] = Dis_ptop(datapts[i],datapts[i+1]);
    L += l[i];
}
U[0] = 0.0;
for(i=1;i<=m;i++) U[i] = U[i-1]+l[i-1]/L;
T[k] = 0.0; T[n+1] = 1.0; c = (float)(m+1)/(n-k+1);
for(j=1;j<=n-k;j++){
    i = floor(j*c);
    a = (float)(j*c-i);
    T[k+j] = (1-a)*U[i-1]+a*U[i];
}
for(i=0;i<k;i++){
    T[i] = T[n-k+1+i]-1;
    T[n+2+i] = T[k+1+i]+1;
}
for(i=0;i<m;i++){
    for(j=0;j<k;j++)
        N[i][j] = Basic(j,k,U[i],T)+Basic(n-k+1+j,k,U[i],T);
    for(j=k;j<=n-k;j++)
        N[i][j] = Basic(j,k,U[i],T);
}
//控制顶点的 x 值

```

```

for(i=0;i<m;i++) l[i] = datapts[i].x;

d = SolveOLE(N,l,m,n-k+1);

for(i=0;i<=n-k;i++) ctlpts[i].x = d[i];

//控制顶点的 y 值

for(i=0;i<m;i++) l[i] = datapts[i].y;

d = SolveOLE(N,l,m,n-k+1);

for(i=0;i<=n-k;i++) ctlpts[i].y = d[i];

//控制顶点的 z 值

for(i=0;i<m;i++) l[i] = datapts[i].z;

d = SolveOLE(N,l,m,n-k+1);

for(i=0;i<=n-k;i++) ctlpts[i].z = d[i];

for(i=0;i<k;i++){

    ctlpts[n-k+1+i].x = ctlpts[i].x;

    ctlpts[n-k+1+i].y = ctlpts[i].y;

    ctlpts[n-k+1+i].z = ctlpts[i].z;

}

//得到对应轮廓线

Contour = new BSpline(k,n,T,ctlpts);

//释放动态开辟的空间

for(i=0;i<m;i++) delete []N[i];

delete []N; delete []U; delete []T; delete []ctlpts; delete []l; delete []d;

delete []datapts;

}

```

## 攻读硕士学位期间的研究成果

### 发表论文:

- 1) **Yeqin Shen**, Chuanyu Wu, Shifu Xu, Lei Zhang. Isomorphism Identification Of Planar Kinematic Chains Based On Characteristic Arrays And Computation[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 201-202: 263-266.

### 申请专利（除导师外）:

- 1) 杨蒙爱, 张路, 马晓阳, 方鹏飞, **沈烨钦**, 余克龙, 张雷. 一种管道栽培生菜的收割装置: 中国, **201120446254.8**[P].
- 2) 余克龙, 马晓阳, **沈烨钦**, 张路. 生菜收割机的夹持装置: 中国, **201120446497.1**[P].
- 3) 贺磊盈, **沈烨钦**, 倪勇. 基于线结构光传感器自动获取鞋楦侧面信息的系统: 中国, **201220300213.2**[P].
- 4) **沈烨钦**, 贺磊盈, 倪勇. 基于线结构光传感器生成鞋底打磨喷胶轨迹的系统: 中国, **201220304101.4**[P].
- 5) 顾益楠, 贺磊盈, **沈烨钦**, 倪勇. 基于两个线结构光传感器生成鞋底打磨喷胶轨迹的系统: 中国, **201320114835.0**[P].

### 参与项目:

- 1) 基于线结构光自动喷胶装置的研究（浙江理工大学科研创新项目）
- 2) 自动翻袜装置的研究（浙江理工大学科研创新项目）



知网查重限时 7折 最高可优惠 120元

本科定稿，硕博定稿，查重结果与学校一致

立即检测

免费论文查重: <http://www.paperyy.com>

3亿免费文献下载: <http://www.ixueshu.com>

超值论文自动降重: [http://www.paperyy.com/reduce\\_repetition](http://www.paperyy.com/reduce_repetition)

PPT免费模版下载: <http://ppt.ixueshu.com>

## 阅读此文的还阅读了:

1. [基于二代小波的表面粗糙度信息提取](#)
2. [基于NURBS技术的自由造型曲面修改方法](#)
3. [自由曲面工件多点连续成形方法](#)
4. [基于像素的土地利用现状信息提取方法研究](#)
5. [讨论控制工件表面质量的方法](#)
6. [基于遥感影像和DLG的面状植被信息提取方法研究](#)
7. [基于二代小波的表面粗糙度信息提取](#)
8. [基于特征知识的TM影像湿地信息提取方法研究](#)
9. [基于等参数线采样的自由曲面优化测量方法](#)
10. [基于十字线结构光的自由曲面工件表面信息提取方法研究](#)
11. [基于模拟退火遗传算法的二次曲面提取方法](#)
12. [基于单目视觉的工件位姿六自由度测量方法研究](#)
13. [基于Nurbs曲面的自由曲面检测方法](#)
14. [自由曲面铣削表面形貌仿真方法研究](#)
15. [基于曲面展开的自由曲面网格划分](#)
16. [基于傅里叶变换自由曲面测量技术研究](#)
17. [曲面工件近表面缺陷的磁粉检测](#)
18. [基于机器学习的车辆信息自动提取方法](#)
19. [基于新颖曲面测量下的自由曲面建模方法](#)
20. [基于 Supporting-Ellipsoid 方法的自由曲面构造](#)
21. [基于多尺度多源遥感信息的水体提取方法对比研究](#)
22. [基于面向对象的遥感影像空间信息提取方法研究](#)
23. [基于CART方法的果园信息提取研究](#)
24. [基于遥感的森林资源动态信息提取方法研究](#)
25. [基于光谱和纹理特征的速生桉信息提取方法研究](#)

- [26. 基于TM图像的芜湖市绿地信息提取方法研究](#)
- [27. 基于遥感影像的城市植被信息提取研究方法综述](#)
- [28. 高速铣削曲面工件表面粗糙度的仿真](#)
- [29. 基于ETM+影像的绿地信息提取方法研究](#)
- [30. 基于遥感的滨海湿地信息提取方法比较研究](#)
- [31. 一种基于信息熵的web信息提取的方法研究](#)
- [32. 基于IDL的遥感影像特殊信息提取方法研究](#)
- [33. 基于遥感技术的植被信息提取方法研究](#)
- [34. 基于CATIA的自由曲面的设计及数控加工研究](#)
- [35. 工件三维测量的激光线亚像素提取方法研究](#)
- [36. 自由曲面几何信息提取系统](#)
- [37. 浅谈基于逆向工程的自由曲面重构技术研究](#)
- [38. 基于Pro/E的自由曲面零件三维建模研究](#)
- [39. AutoCAD实体曲面边界信息的提取及应用](#)
- [40. 一种基于DOM的Web信息提取方法](#)
- [41. 基于知识的黑河流域居民地的信息提取方法研究](#)
- [42. 基于UGNX4.0自由曲面设计的研究](#)
- [43. 遥感影像信息提取方法研究](#)
- [44. 基于SVM方法提取植被信息的研究](#)
- [45. 自由曲面的曲面信息和特征识别](#)
- [46. 基于ALoS影像纹理特征的日光温室信息提取方法研究](#)
- [47. 基于DEFROM软件的自由曲面切削加工仿真技术研究](#)
- [48. 基于移动测量的道路信息格网化提取方法研究](#)
- [49. 基于QuickBird影像的植被信息提取研究](#)
- [50. 自由曲面工件的连续高效塑性成形方法](#)