

硕士学位论文

基于机器视觉的飞机蒙皮孔几何参数检测 技术研究

THE RESEARCH OF AIRCRAFT SKIN HOLE GEOMETRY PARAMETERS DETECTION TECHNOLOGY BASED ON MACHINE VISION

邓松波

哈尔滨工业大学

2013 年 7 月

国内图书分类号: TP391.4
国际图书分类号: 004.9

学校代码: 10213
密级: 公开

工学硕士学位论文

基于机器视觉的飞机蒙皮孔几何参数检测

技术研究

(应用型)

硕 士 研 究 生: 邓松波

导 师: 赵学增教授

申 请 学 位: 工学硕士

学 科: 机械电子工程

所 在 单 位: 机电工程学院

答 辩 日 期: 2013 年 7 月

授予学位单位: 哈尔滨工业大学

Classified Index: TP391.4

U.D.C: 004.9

Dissertation for the Master Degree in Engineering

**THE RESEARCH OF AIRCRAFT SKIN
HOLES GEOMETRY PARAMETERS
DETECTION TECHNOLOGY BASED
ON MACHINE VISION**

(APPLICATION)

Candidate:	Deng Songbo
Supervisor:	Prof. Zhao Xuezeng
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Specialty:	Mechatronics Engineering
Affiliation:	School of Mechatronics Engineering
Date of Defence:	July, 2013
Degree-Conferring-Institution:	Harbin Institute of Technology

摘要

飞机蒙皮孔的加工精度对飞机机械结构的使用寿命和连接强度有很大影响, 现在我国的飞机制造厂对蒙皮孔的检测手段比较落后, 大多数情况下由人工裸眼检测, 对重要部位的孔用塞规进行简单测量, 没有采用专业检测设备对孔的尺寸进行测量, 所以检测精度不高, 效率低下。蒙皮孔直径一般都比较小, 通常为 5 或 6mm, 用一般的量具很难进行测量, 这一问题已成为飞机装配检测技术发展的瓶颈, 新一代飞机对飞机蒙皮孔的快速、精确测量提出了迫切的要求。

本文针对曲率较小的单曲面蒙皮上的蒙皮孔几何参数视觉检测技术展开研究。根据蒙皮孔的加工精度确定了测量系统的总体方案; 研究了测量系统采用的测量基准, 采用了钻孔时确定蒙皮孔轴向的方法; 对确定蒙皮孔轴向时的红外测距传感器的安装位置提出了一种自标定算法, 该方法能够使传感器安装到正确的位置。

根据测量精度和视窗大小对 CCD 相机和光学镜头进行了选型, 经过分析比较, 最后选择了光学分辨率低于理论计算结果的 CCD 相机和光学镜头, 开发了用亚像素边缘定位算法进行补偿来解决光学分辨率低于系统要求的分辨率的问题; 对测量系统的照明光源进行了分析, 选择了环形光源来消除图像中的阴影; 对测量系统的图像采集卡进行了选型, 使采集卡能和相机的型号相匹配。

研究了蒙皮孔图像的预处理算法和整像素级的边缘检测算法。用灰度值均衡化对图形进行了处理, 增强图像的对比度; 用形态学边缘检测算子和 Canny 边缘检测算子相结合的方式对图像进行了边缘检测, 获得整像素级的边缘信息; 用空间矩亚像素边缘细分算法对整像素级的边缘点进行了计算, 获得边缘点的亚像素坐标。

研究了蒙皮孔图像的数据处理方法: 对无效边缘用 ROI 方法进行了滤除; 用最小二乘法对边缘点进行了拟合计算和误差分析; 用最小二乘法计算拟合圆的圆度。用编制的图像处理程序对蒙皮孔进行了实际测量, 将测量结果与蒙皮孔的标准尺寸对比, 实验结果表明所设计的测量系统能够准确测量出蒙皮孔的几何尺寸; 最后用 MFC 和 Opencv 编制了便于用户操作的可视化界面。

关键词: 飞机蒙皮; 钻孔; 数字图像处理; 边缘检测; 亚像素; 数据拟合

Abstract

The manufacture precision of aircraft skin holes has a great impact on the service life and connection strength of the aircraft mechanical structure. In nowadays the detection means of the aircraft skin holes is relatively insufficient in China. In most cases the detection is taken by human eye or simple measuring with a plug gauge to the holes of important parts. No special testing equipment is adopted to measure the specific size of the holes, so the accuracy and efficiency can't satisfy the demands. Generally the skin holes are small, usually from 5 mm to 6 mm and they are hard to measure with common measuring tools, which had limited the development of aircraft assembly technology. Therefore it is urgent to put forward a rapid and accurate measurement system.

This paper focuses on the geometry parameters detection of aircraft skin holes in small curvature surface based on machine vision technology. The overall scheme of measurement system is designed according to the manufacture accuracy of the skin holes. Based on the study of the reference of measuring system, the axis of skin hole should be determined during the process of drilling the hole. One self-calibration algorithm is proposed for the installation of infrared distance sensor used to find the skin hole axis, which can ensure the installation position is correct.

The CCD camera and optical lens are selected according to the measurement accuracy and the size of optical window. Through compare and analysis this paper chooses the CCD camera and optical lens whose resolution is below the theoretical calculation the system requirement, and the resolution can be compensated with sub-pixel edge location algorithm. The light source of the measurement system is analyzed and the ring light is finally chosen in order to eliminate the shadow in the image. The image acquisition card is selected which can correctly match the camera model.

The preprocessing algorithm and pixel edge detection algorithm of skin holes image are studied. The grey value equalization of graphics processing is applied to the skin hole image for enhancing the image contract. The combination of morphological edge detection operator and Canny edge detection operator is used to obtain the pixel level edge of aircraft skin hole image. The spatial moment sub-pixel edge subdivision algorithm is applied to the skin hole image to get the sub-pixel edge point coordinates.

Skin hole image data processing method is studied including filtering invalid edge points using ROI method, fitting for the edge point and analyzing the fitting error using least square method and calculating the roundness of the least square

fitting circle. The skin hole is measured with the program in this paper and the measuring results are compared with the standard size of the same skin hole. The experimental results reveal the measurement system designed in this paper can give out comparatively accurate geometry size of the aircraft skin hole. Finally the visual interface convenient for user operation is complied with MFC and Opencv.

Keywords: Aircraft skin, drilling, digital image processing, edge detection, sub-pixel, data fitting

中国知网
CNKI

目录

摘要	I
ABSTRACT	II
第 1 章 绪论	1
1.1 课题的来源	1
1.2 课题研究的目的和意义	1
1.3 机器视觉测量技术的国内外研究现状与分析	2
1.3.1 机器视觉测量技术概述	2
1.3.2 小孔视觉测量的国内外研究现状	2
1.4 本文主要研究内容	4
第 2 章 蒙皮孔测量系统总体方案研究	6
2.1 蒙皮孔的特点和测量精度指标分析	6
2.2 蒙皮孔测量方式分析	8
2.3 蒙皮孔测量基准的分析	9
2.4 蒙皮孔测量基准的自标定分析	10
2.4.1 构造用于标定的基准平面	11
2.4.2 标定方法	13
2.4.3 求解	14
2.5 本章小结	14
第 3 章 蒙皮孔测量系统硬件系统的设计与分析	15
3.1 蒙皮孔测量系统的 CCD 与镜头设计	15
3.2 蒙皮孔测量系统的照明系统设计	18
3.2.1 照明系统光源的特性分析	18
3.2.2 照明系统的光源	19
3.2.3 照明系统的照明方式设计	20
3.3 蒙皮孔测量系统的图像采集卡	21
3.4 本章小结	23
第 4 章 蒙皮孔测量系统边缘检测算法研究	24
4.1 蒙皮孔图像预处理算法研究	24
4.1.1 蒙皮孔图像的直方图修正	24
4.1.2 蒙皮孔图像的滤波算法研究	25
4.2 蒙皮孔图像边缘检测算法研究	27
4.2.1 本文采用的边缘检测算法	27

4.2.2 其他边缘检测算法	32
4.3 蒙皮孔图像亚像素细分算法研究	32
4.4 本章小结	38
第 5 章 测量系统的数据处理方法研究	39
5.1 蒙皮孔的圆拟合方法研究	39
5.1.1 滤除无效边缘信息的方法	39
5.1.2 最小二乘法拟合圆	41
5.1.3 拟合圆的精度验证	43
5.2 蒙皮孔的圆度误差的研究	43
5.3 测量结果实验验证	44
5.3.1 像素当量的计算	44
5.3.2 蒙皮孔几何参数的测量结果	46
5.4 蒙皮孔测量系统的软件界面编制	47
5.5 本章小结	48
结论	49
参考文献	51
哈尔滨工业大学学位论文原创性声明和使用权限	54
致谢	55

第1章 绪论

1.1 课题的来源

本课题来源于哈尔滨工业大学与沈阳飞机制造厂的校企合作课题，研究的目的在于应用机器视觉技术测量飞机蒙皮孔的几何参数，以实现高速、高效和高精度的飞机蒙皮孔几何参数测量。

1.2 课题研究的目的是和意义

飞机目前的连接方式主要是机械连接，一架大型飞机约有 150~200 万个连接件，而要把如此多的连接件装配到一起，装配效率和装配质量显得非常重要。目前我国的飞机制造业的连接工艺以钻铆为主，据不完全统计，目前世界上飞机装配中的连接方式的 80%以上是钻铆连接^[1]。

铆接孔加工有手工式和自动两种方式，目前我国主要采取手工方式。手工钻孔的加工质量受到各种因素的制约，效率低、精度不高、质量稳定性差；自动化钻孔的效率、精度以及稳定性等都远优于手工方式。不管采取哪种方式，在钻孔完成后都需要对孔的形位误差进行测量来保证孔的加工精度^[2]。

在飞机众多连接件中，飞机蒙皮的制孔和孔位检测是难点。飞机蒙皮属于大型自由曲面，对外形误差有严格的限制，钻孔的法向精度、孔径精度等参数对蒙皮的外形以及结构安全性能有极其重要的影响^[3]。

尽管飞机蒙皮孔的精度对飞机结构性能如此重要，但对飞机蒙皮孔精度的检测方法却并不成熟。据了解，在国内某飞机制造厂，蒙皮孔的检测在大多数情况下仅限于人工肉眼识别，没有采用专业检测设备将孔的检测数据量化。对重要部位的孔，也只用塞规进行简单测量，检测精度不高，效率低，手段落后。蒙皮孔直径通常为 5 或 6mm，用一般的量具很难测量。例如，检测孔径时只是用铆钉塞入孔中判断孔是否合格，没有给出具体孔径值；在检测孔的法向时，将铆钉插入孔中，目测铆钉法向，判断孔的法向合格与否。蒙皮孔检测的低精度、低效率已成为制约飞机装配质量的瓶颈。新一代飞机对飞机蒙皮孔的快速、精确测量提出了迫切的要求。

机器视觉是指用计算机模拟人类视觉功能的科学和技术。机器视觉系统的基本任务之一是由摄像机获取的图像信息获取三维空间中物体的几何信息。目前，机器视觉测量技术广泛地应用于智能机器人、坐标测量、夜视眼镜、三维成像和坐标测量等领域^[4-6]。

视觉测量技术具有非接触、无测量力、精度高等优点，如果把视觉测量技术用到飞机蒙皮孔的在线检测中，可以极大地提高测量效率和测量精度，及时发现加工缺陷，为准确评价蒙皮孔的加工质量提供准确的依据。

1.3 机器视觉测量技术的国内外研究现状与分析

1.3.1 机器视觉测量技术概述

机器视觉（machine vision），又称为计算机视觉（computer vision），是将数字图像处理和分析、数字图像识别结合起来，试图开发出一种能与人脑的部分功能相比拟，在工业自动化领域中为设备提供类人视觉的功能。机器视觉技术是数字成像领域的尖端方向，包括数字图像处理和数字图像分析。数字图像处理是指用计算机对数字图像进行处理，对图像进行修改和增强，为图像分析做准备。数字图像分析是指对数字图像中感兴趣的目标进行检测和测量，来获得客观信息。数字图像分析通常是把一幅图像转化为非图像的抽象形式，其概念的外延包括边缘检测和图像分割、特征提取以及几何测量等^[7]。

机器视觉测量技术是把机器视觉引入到测量中，包括数字图像处理和数字图像分析两个环节，最后输出的是几何测量结果。它具有精度高、速度快、非接触、柔性等优点，已经许多领域中得到非常广泛的应用。

机器视觉测量技术的优点包括：通过计算机或数字处理器对数字图像进行处理，有较高的智能性和柔性，能够很好的适应现代企业的柔性化生产；测量速度很快，可以实现在线监测，满足对工序实时监测的要求；可以满足对微小零件部位的准确测量；由于测量是非接触式的，在不适合人工作业的危险场合或传统测量工具够不到的情况下，可以很好的发挥作用。

机器视觉测量的优点使它与传统的人工检测相比效率更高，结果更准确，并能完成特殊场合的非接触测量，具有高度的可重复性和智能性。

1.3.2 小孔视觉测量的国内外研究现状

对机器视觉技术的研究开始于上世纪 60 年代，直到 80 年代初，随着计算机技术和传感器技术的不断发展，Marr 提出计算机视觉理论之后，机器视觉技术才真正得到发展，成为高科技研究领域的热点^[8]。经过多年的发展，CCD 传感器的像素集成度、分辨率、几何精度和灵敏度得到极大提高，工作频率范围增大，可满足微小物体成像、高速运动物体成像等要求，在非接触式测量、实时测量等领域得到了广泛的应用。

国外的机器视觉测量技术起步早，经过多年发展，技术已经比较成熟，在

众多工业和民用领域有着广泛的应用，在航空制造领域中也应用。美国的 Electroimpact 公司与欧洲的空客公司联合研制的一套机器人自动钻削系统（ONCE）的钻孔平台上包括基于视觉测量技术的在线检测加工孔是否合格以及判断工位正确与否的视觉系统，为航空制造中加工孔的准确率提供了可靠的保障^[9,10]，图 1-1 是 ONCE 自动钻削系统的实物图。



图 1-1 美国 Electroimpact 公司设计的自动钻削系统

国内的视觉测量技术起步较国外晚，直到上世纪 90 年代才开始逐步发展。经过这几年的积累，我国的视觉测量技术已经取得很大进步，在小孔测量方面同样得到了较大的发展。北航的机器人研究所联合沈阳飞机制造厂研制的自动制孔机采用机器视觉引导制孔刀具准确定位，并且提供飞机零件上孔的几何尺寸信息，实现了飞机零件高度自动化制孔^[11]。

四川大学的激光技术应用研究所利用视觉测量技术配合球体转位机构实现了球面上圆孔的二维测量，用 CCD 传感器采集小孔图像，通过图像处理识别圆孔中心坐标，再通过空间位置的测量模式计算出圆孔的二维尺寸^[12]。这项研究为机械视觉测量的数字化、智能化提供了积极探索，具有重要的参考价值。

图 1-2 是球面孔测量系统的机械结构示意图。

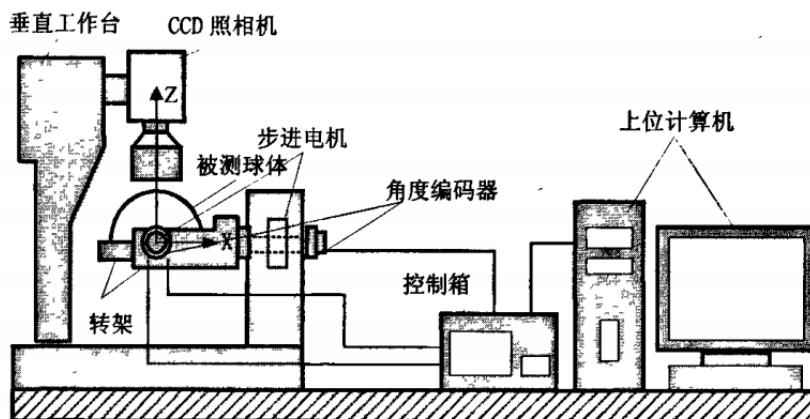


图 1-2 球面孔测量系统机械结构示意图

图 1-3 是球面孔测量系统的软件界面截图。

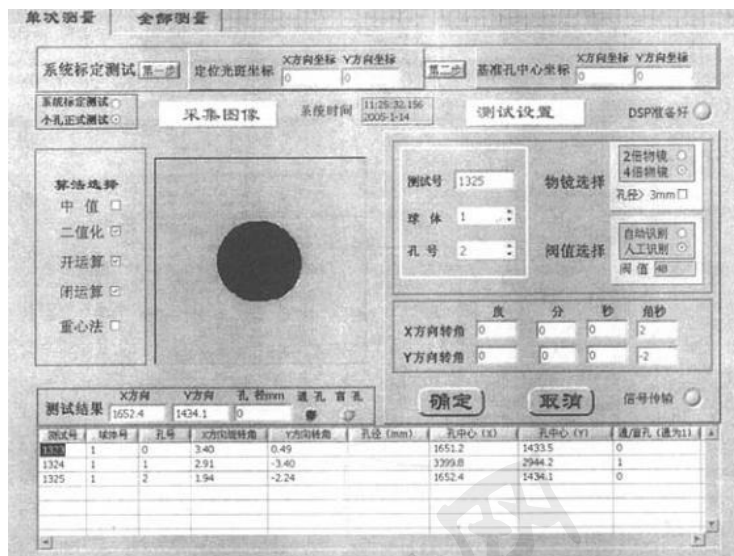


图 1-3 球面孔测量系统软件监控界面

以上仅是视觉测量技术应用的几个典型事例，远不能涵盖它在军事领域^[13]、制造业领域^[14-16]、食品加工行业^[17,18]、医药医学领域^[19,20]的应用。目前，通过二维图像信息获得被测图像的二维平面信息是较为成熟的技术，测量的精度也可以做的很高，但是通过获取三维空间的几何信息仍然是目前研究的热点和难点^[21,22]。

1.4 本文主要研究内容

针对飞机蒙皮孔几何参数测量问题，本课题致力于研发一套能准确、快速测量飞机蒙皮孔几何参数的机器视觉测量系统。机器视觉测量系统涉及测量方案的选择，测量基准的确定，相机和光学镜头的分析和选型，光源的特点分析与选取，图像信息的获得，图像处理的算法的研究，数据处理方法的研究，视觉测量系统的测量结果标定和误差计算等内容^[23-25]。

本课题具体研究内容将分以下四部分进行介绍：

(1) 根据飞机蒙皮孔的特点，设计总体测量方案，将三维测量转换到二维平面；根据飞机蒙皮孔的加工精度要求确定测量系统的测量精度；选定测量系统的测量基准，并对测量基准进行分析和标定。

(2) 根据测量系统的工作状态和测量精度，合理选取 CCD 相机和光学镜头的种类、像素、分辨率等参数；设计光学镜头的放大倍数、镜头接口、焦距等参数；设计测量系统的照明光源；对图像采集卡进行选型。

(3) 利用 VC++和 Opencv 编制测量系统的软件。根据飞机蒙皮孔图像的具体特点，采用相应的图像处理算法对图像进行处理，获得精确的蒙皮孔洞边缘

信息。

(4) 对得到的蒙皮孔边缘信息进行数据拟合、计算，最终得到蒙皮孔几何参数的测量值；计算测量系统测量误差。

中国知网
CNKI

第2章 蒙皮孔测量系统总体方案研究

2.1 蒙皮孔的特点和测量精度指标分析

本课题的研究背景是一个六自由度机械手臂上的钻孔执行平台，执行平台包括钻孔单元，视觉测量单元，压紧单元，吸屑单元，进给单元等，如图 2-1、图 2-2 所示。在钻孔单元钻完一个孔后，视觉测量单元立即对蒙皮孔的几何参数进行在线检测，将检测后的结果反馈给上位机，以便工作人员了解蒙皮孔的加工质量，及时调整加工的工艺参数。



图 2-1 六自由度机械手臂



图 2-2 执行平台

飞机曲面一般为比较平缓的大型自由单曲面，曲率较小^[26]，如图 2-3 所示。本文主要研究这类曲面蒙皮上孔的几何参数的测量问题。



图 2-3 飞机蒙皮曲面

在钻孔时，钻头轴线与蒙皮在孔圆心处的法线之间的夹角可以控制在 0.5° 以内，下面分析 0.5° 的法向偏差对用视觉方法测量蒙皮孔直径的影响。

以曲率半径为 500mm 的曲面为分析对象，由于飞机蒙皮孔多为直径是 5mm 的通孔或埋头孔，所以在曲面上钻直径为 5mm 的直孔。当 CCD 相机的光轴与孔的轴线重合时，获取的孔的图像是一个直径为 5mm 的圆，如图 2-4 法向误差分析示意图所示。当直孔的轴线与曲面的法线之间的夹角为 0.5° 时，CCD 相机获取的孔的图像不再是一个圆，而是一个椭圆，如图 2-5 法向误差分析示意图二所示。用 Pro/E 对以上模型建模，测量椭圆的长轴为 5.0002mm，法向误差对孔直径的测量误差为 $0.2\mu\text{m}$ ，对用视觉方法测量蒙皮孔直径的影响很小，所以本课题忽略由钻孔时钻头的轴线偏差带来的测量误差。

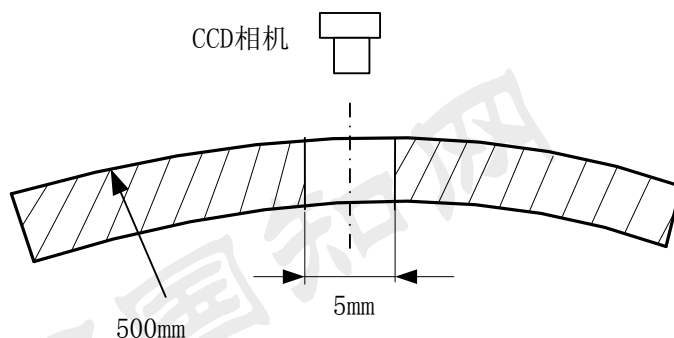


图 2-4 法向误差分析示意图一

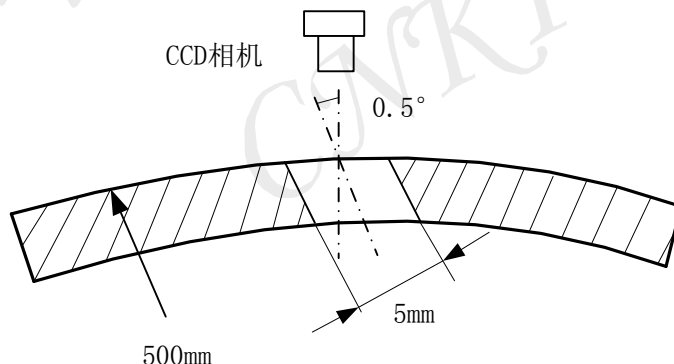


图 2-5 法向误差分析示意图二

埋头孔的几何参数测量比通孔的复杂，测量系统如果能测量埋头孔的几何尺寸，那么也能测量通孔的几何尺寸，图 2-6 和图 2-7 是埋头孔的主视图和俯视图。埋头孔的加工精度要求为：直孔孔径公差为 H8 ($d_1=5\text{mm}$ 时，公差为 $0\sim 0.018\text{mm}$)；埋头孔深度 h 的偏差为 0.05mm 。直孔内径直接由 d_1 给出，埋头孔的深度 h 由内孔直径 d_1 和外孔直径 d_2 计算出， h 的表达式如式(2-1)所示

$$h = \frac{d_2 - d_1}{2 \tan \frac{\alpha}{2}} \quad (2-1)$$

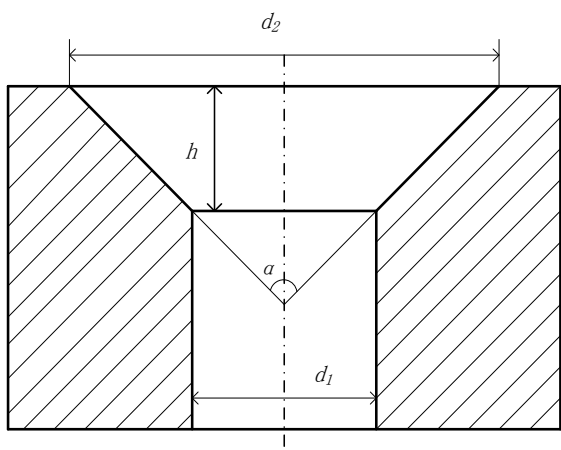


图 2-6 飞机蒙皮埋头孔剖视图

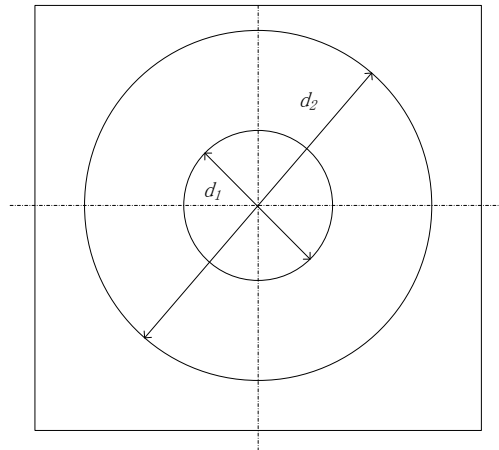


图 2-7 飞机蒙皮埋头孔俯视图

在设计测量系统的测量精度指标时,通常的做法是取加工精度的 1/2 或 1/3 作为测量精度, d_1 的加工精度为 $18\mu\text{m}$, h 的加工精度为 $50\mu\text{m}$; 本文设计 d_1 的测量精度为 $8\mu\text{m}$, 深度 h 的测量精度为 $20\mu\text{m}$ 。由于 h 由 d_1 和 d_2 计算得到, 通过 d_1 和 d_2 传递到 h 的误差要小于设计的 h 的测量精度。 h 的误差传递函数为式(2-2)

$$\partial h = \left| \frac{\partial h}{\partial d_1} \right| \partial d_1 + \left| \frac{\partial h}{\partial d_2} \right| \partial d_2 = \frac{1}{2 \tan \frac{\alpha}{2}} (\partial d_1 + \partial d_2) \quad (2-2)$$

式中 α 的值为 90 度, 当 d_1 和 d_2 的测量误差都为 $8\mu\text{m}$ 时, h 的误差是 $8\mu\text{m}$, 小于之前确定的 $20\mu\text{m}$ 的测量精度, 所以确定 h 的测量精度为 $20\mu\text{m}$ 能够满足要求。

经过以上分析, 设计蒙皮孔测量系统的测量精度为 $8\mu\text{m}$, 深度 h 的测量精度为 $20\mu\text{m}$ 。

2.2 蒙皮孔测量方式分析

使用视觉方法测量有两种备选方案。方案一是垂直测量方案, 摄像头的光轴与蒙皮孔轴向重合, 这样通过摄像头获取的图像就是蒙皮孔的特征信息, 无需对图像进行空间变换, 垂直测量方案如图 2-8 所示。方案二是倾斜测量方案, 摄像头的光轴与蒙皮孔轴向不重合, 得到的图像信息并非蒙皮孔的直接特征信息, 需要对图像进行空间变换, 将获取的图像转换到蒙皮孔的轴向上。在进行空间变换时, 需要知道摄像头光轴与蒙皮孔轴向的夹角, 在实际测量过程中获取这一夹角的准确值存在困难, 并且倾斜测量方案增加了误差传递环节和图像空间转换环节, 增大了图像处理的难度, 降低了测量的精度, 倾斜测量方案如图 2-9 所示。

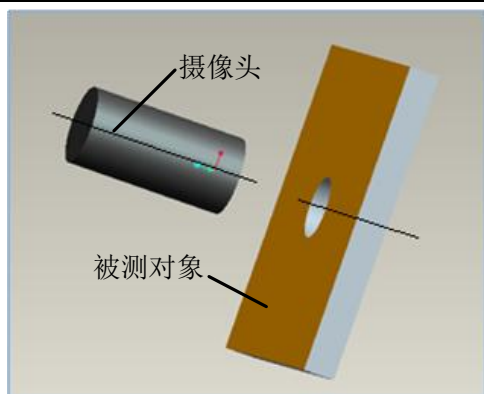


图 2-8 垂直测量方案

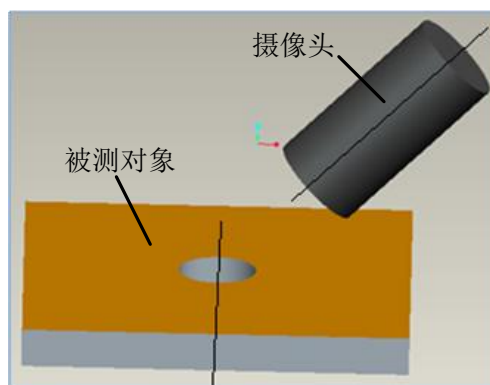


图 2-9 倾斜测量方案

经过分析，决定采用方案一。首先需要解决的问题是选定测量基准，即获取蒙皮孔的轴向，使摄像头光轴与飞机蒙皮孔的轴线重合。测量是在线检测，在钻完一个孔后立即进行测量。钻孔时确定的孔位原点和孔轴，精度高，可用作测量的基准。光学相机和钻孔执行头同在执行平台上且轴线平行，通过坐标变换可将视觉相机轴向至与蒙皮孔轴线重合。下面对飞机蒙皮孔测量系统的测量基准进行介绍。

2.3 蒙皮孔测量基准的分析

蒙皮孔测量基准是蒙皮孔的轴向，也是蒙皮在该孔圆心处的法向，本文将钻孔时测出的蒙皮在孔圆心处的法向作为蒙皮孔测量的基准，下面对这一基准进行分析。

通过曲面拟合确定蒙皮孔轴向方法，在获取曲线上的点后还要计算拟合曲面和曲面在制孔点处的曲面法向，增加了计算时间。现在考虑一种集测距和确定制孔点法向于一体的方法。

本课题的研究对象是表面平缓、曲率很小的单曲面，在蒙皮钻孔位置的小范围内近似当作平面。执行平台将钻头顶点移至钻孔点处后，通过调整执行平台的位姿找到曲面法向，位姿调整通过六自由度机械手和执行平台联合调整。执行平台上有调整法向用的四个激光式测距传感器和钻孔用的钻头，如图 2-10 所示，编号为 1、2、3 和 4 的四个激光测距传感器呈正四边形分布。

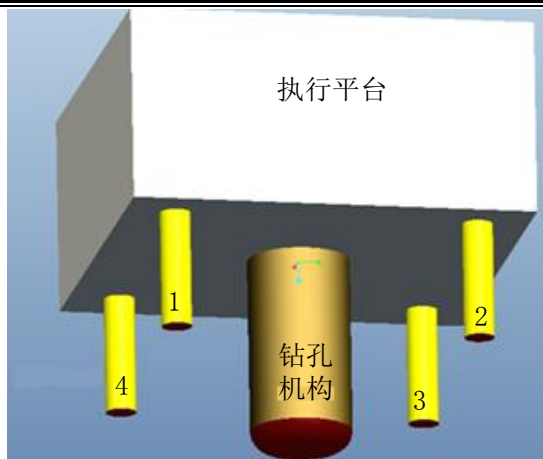


图 2-10 飞机蒙皮孔测法向装置示意图

位移传感器的布置方式有多种形式，包括直角三角形、正三角形、正四边形等，由于正四边形布置形式在两个摆角方向上调整时不存在位移耦合，所以选择正四边形布置调整时，通过让传感器 1 和 3 的测距相等、传感器 2 和 4 的测距相等，从而实现钻孔的法向调整，调整过程如图 2-11 所示。首先通过位移传感器 1 和 3 的对比和计算，获得这个方向上的法向误差修正量，调整后使位移传感器的测距相等，则认为该方向调整完成，如图 2-11 中的 a) 步骤一所示。同样，在另一方向存在偏差时，通过位移传感器 2 和 4 的测量值进行对比和计算，获得这个方向上角度的误差修正量，如图 2-11 中的 b) 步骤二所示。

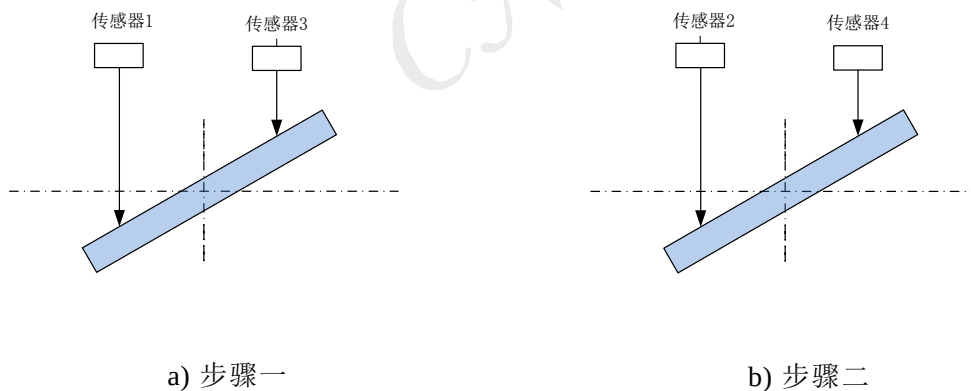


图 2-11 测法向装置调整过程

2.4 蒙皮孔测量基准的自标定分析

非接触式测量精度较高，受被测件材质、结构等外界因素的影响小，不会对被测件表面造成损伤。激光测距仪是一种常用的非接触式测距仪器，它通过激光测距模块发出的激光束照射到被测物表面，再由接收到的激光的光程差测量出距离。

激光测距仪通过螺钉与执行平台连接，定位精度不够精确，安装精度难以保证，无法确保激光束的零点位置和射出方向，必须要对激光测距仪的安装位置和姿态进行标定。本课题在这里使用一种自标定算法，实现自动标定测距传感器。

2.4.1 构造用于标定的基准平面

首先需要确定一个标定基准面，这里用特征值法建立标定基准面。

设标定基准面方程为式(2-3)

$$ax + by + cz = d \quad (2-3)$$

式中 a 、 b 、 c ——平面的单位法向量的 3 个分量，满足 $a^2 + b^2 + c^2 = 1$ ；

d ——平面所在坐标的坐标原点到该基准平面的距离， $d \geq 0$ 。

测出位于同一个平面的 n 个点的坐标值 $\{(x_i, y_i, z_i), i=1, 2, \dots, n\}$ ，点 i 到标定基准面的距离 d_i 表达式为式(2-4)

$$d_i = |ax_i + by_i + cz_i - d| \quad (2-4)$$

$\sum_{i=1}^n d_i^2$ 是所有测量点到最佳拟合平面的距离的平方和，构造拉格朗日函数

$f(a, b, c, d)$ ，如式(2-5)所示

$$\begin{aligned} f(a, b, c, d) &= \sum_{i=1}^n d_i^2 - \lambda(a^2 + b^2 + c^2 - 1) \\ &= \sum_{i=1}^n (ax_i + by_i + cz_i - d)^2 - \lambda(a^2 + b^2 + c^2 - 1) \end{aligned} \quad (2-5)$$

在满足 $a^2 + b^2 + c^2 = 1$ 的条件下，使 $\sum_{i=1}^n d_i^2$ 取最小值可获得最佳拟合平面。

令 $f(a, b, c, d)$ 对 d 求偏导数，并令偏导数等于零，如式(2-6)所示

$$\frac{\partial f(a, b, c, d)}{\partial d} = -2 \sum_{i=1}^n (ax_i + by_i + cz_i - d) = 0 \quad (2-6)$$

对式(2-6)进行整理得到式(2-7)

$$d = a \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} + b \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} + c \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n} \quad (2-7)$$

将式(2-7)代入式(2-4)中得到式(2-8)

$$d_i = \left| a(x_i - \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}) + b(y_i - \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}) + c(z_i - \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n}) \right| \quad (2-8)$$

$$\text{设 } \Delta x_i = x_i - \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \Delta y_i = y_i - \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, \Delta z_i = z_i - \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n}, \text{ 式(2-8)可简化为式(2-9)}$$

$$d_i = |a\Delta x_i + b\Delta y_i + c\Delta z_i| \quad (2-9)$$

式(2-5)中, 令 $f(a, b, c, d)$ 分别对 a 、 b 、 c 、 d 求偏导数, 令各偏导数为零, 得出式(2-10)

$$\begin{cases} 2\sum_{i=1}^n (a\Delta x_i + b\Delta y_i + c\Delta z_i)\Delta x_i - 2\lambda a = 0 \\ 2\sum_{i=1}^n (a\Delta x_i + b\Delta y_i + c\Delta z_i)\Delta y_i - 2\lambda b = 0 \\ 2\sum_{i=1}^n (a\Delta x_i + b\Delta y_i + c\Delta z_i)\Delta z_i - 2\lambda c = 0 \end{cases} \quad (2-10)$$

将上式写成矩阵形式, 为式(2-11)

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \Delta x_i \Delta x_i & \sum_{i=1}^n \Delta x_i \Delta y_i & \sum_{i=1}^n \Delta x_i \Delta z_i \\ \sum_{i=1}^n \Delta x_i \Delta y_i & \sum_{i=1}^n \Delta y_i \Delta y_i & \sum_{i=1}^n \Delta y_i \Delta z_i \\ \sum_{i=1}^n \Delta x_i \Delta z_i & \sum_{i=1}^n \Delta y_i \Delta z_i & \sum_{i=1}^n \Delta z_i \Delta z_i \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} \quad (2-11)$$

求解 a 、 b 、 c 的问题转化为求矩阵的特征值和特征向量的问题。作下面约定

$$A = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \Delta x_i \Delta x_i & \sum_{i=1}^n \Delta x_i \Delta y_i & \sum_{i=1}^n \Delta x_i \Delta z_i \\ \sum_{i=1}^n \Delta x_i \Delta y_i & \sum_{i=1}^n \Delta y_i \Delta y_i & \sum_{i=1}^n \Delta y_i \Delta z_i \\ \sum_{i=1}^n \Delta x_i \Delta z_i & \sum_{i=1}^n \Delta y_i \Delta z_i & \sum_{i=1}^n \Delta z_i \Delta z_i \end{bmatrix}, \quad X = (a \quad b \quad c)^T$$

则式(2-11)可写成式(2-12)

$$\lambda = \frac{(AX \bullet X)}{(X \bullet X)} \quad (2-12)$$

由 $a^2 + b^2 + c^2 = 1$ 可知 $X \bullet X = 1$ ，将其代入式(2-12)得到式(2-13)

$$\lambda = \frac{(AX \bullet X)}{(X \bullet X)} = \sum_{i=1}^n (a\Delta x_i + b\Delta y_i + c\Delta z_i)^2 = \sum_{i=1}^n d_i^2 \quad (2-13)$$

所以， $\sum_{i=1}^n d_i^2$ 的最小值即是矩阵 A 的最小特征值，最小特征值所对应的特征向量的各分量即是 a 、 b 、 c 。

由于外界环境的干扰、操作不当或测量仪器性能不稳定等导致测量数据中出现异常点，如果利用所有的测量数据拟合平面，会影响标定精度，有必要去除异常点^[27]，具体做法如下：

- (1) 根据式(2-9)计算出各测量点至拟合平面的距离 d_i ；
- (2) 利用公式(2-14)计算 d_i 的标准偏差 σ

$$\sigma = \sqrt{\frac{(d_i - \bar{d})^T (d_i - \bar{d})}{n-1}} \quad (2-14)$$

$$\text{式中 } \bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i$$

- (3) 若 d_i 超出标准偏差的 2 倍，则认为该点为异常点，需要去除；
- (4) 利用去除异常点后的其他所有点的数据重新计算 a 、 b 、 c 的值；
- (5) 重复步骤(1)至(4)，去除所有的异常点；
- (6) 利用去除异常点后的其他数据点计算出 a 、 b 、 c ，即得到平面方程。

2.4.2 标定方法

由于激光测距仪的安装位置不可避免的存在偏差，光束的光源点和方向与理想状态有偏差，因此，要根据实际测得的数据推算出光束的光源点和方向，然后再进行重新调整。下面采用自标定的方法推算激光束的出射点和方向。

设激光束 i 的出射点 P_i 的坐标为 (x_{pi}, y_{pi}, z_{pi}) ，光束方向矢量为 (m_{pi}, n_{pi}, q_{pi}) ，假设激光束的对称式方程为式(2-15)

$$\frac{x - x_{pi}}{m_{pi}} = \frac{y - y_{pi}}{n_{pi}} = \frac{z - z_{pi}}{q_{pi}} \quad (2-15)$$

式(2-15)与去除异常点的平面方程式(2-3)联立，求出直线与平面的交点 Q_i 的坐标 (x_{qi}, y_{qi}, z_{qi}) 见式(2-16)

$$\begin{cases} x_{qi} = m_{pi} \frac{d - ax_{pi} - by_{pi} - cz_{pi}}{am_{pi} + bn_{pi} + cq_{pi}} + x_{pi} \\ y_{qi} = m_{pi} \frac{d - ax_{pi} - by_{pi} - cz_{pi}}{am_{pi} + bn_{pi} + cq_{pi}} + y_{pi} \\ z_{qi} = m_{pi} \frac{d - ax_{pi} - by_{pi} - cz_{pi}}{am_{pi} + bn_{pi} + cq_{pi}} + z_{pi} \end{cases} \quad (2-16)$$

激光束的零点 P_i 到终点 Q_i 的距离 L_i 的表达式为式(2-17)

$$L_i = \|P_i Q_i\| = \sqrt{(x_{pi} - x_{qi})^2 + (y_{pi} - y_{qi})^2 + (z_{pi} - z_{qi})^2} \quad (2-17)$$

L_i 是激光测距仪的实际测得的距离, 当平面确定后, 测出的距离只取决于激光束的出射点和激光束的方向。

2.4.3 求解

式(2-16)、(2-17)联立方程组, 通过 Newton 迭代法求解。将方程组写成一下形式

$$F_j(x_{pi}, y_{pi}, z_{pi}, m_{pi}, n_{pi}, q_{pi}) = 0, j = 1, 2, \dots, 6 \quad (2-18)$$

假设方程的一组初始值为 $(x_{pi0}, y_{pi0}, z_{pi0}, m_{pi0}, n_{pi0}, q_{pi0})$, 把式(2-18)在初始值处用 TAYLOR 级数展开, 取其线性部分, 得式(2-19)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial F_j}{\partial x_{pi}}(x_{pi} - x_{pi0}) + \frac{\partial F_j}{\partial y_{pi}}(y_{pi} - y_{pi0}) + \frac{\partial F_j}{\partial z_{pi}}(z_{pi} - z_{pi0}) + \\ & \frac{\partial F_j}{\partial m_{pi}}(m_{pi} - m_{pi0}) + \frac{\partial F_j}{\partial n_{pi}}(n_{pi} - n_{pi0}) + \frac{\partial F_j}{\partial q_{pi}}(q_{pi} - q_{pi0}) \\ & = -F_j(x_{pi0}, y_{pi0}, z_{pi0}, m_{pi0}, n_{pi0}, q_{pi0}), j = 1, 2, \dots, 6 \end{aligned} \quad (2-19)$$

如果式(2-19)系数矩阵的行列式不为 0, 则迭代法有解。

2.5 本章小结

本章主要对蒙皮孔测量系统的总体方案进行了研究。首先, 根据蒙皮孔的加工精度确定测量系统的测量精度; 然后根据蒙皮孔的特点确定蒙皮孔的测量方式, 选择垂直测量方案; 接着对测量系统的测量基准进行了分析, 采用加工蒙皮孔时的确定法向的方法作为测量系统的基准; 最后对测量基准提出一种自标定算法, 使测蒙皮孔法向的测距传感器能安装到正确的位置。

第3章 蒙皮孔测量系统硬件系统的设计与分析

3.1 蒙皮孔测量系统的 CCD 与镜头设计

本节根据测量参数的检测精度来确定蒙皮孔测量系统的 CCD 和镜头的精度、分辨率以及型号，在第二章设计飞机蒙皮孔直径的测量精度为 $8\mu\text{m}$ ，测量系统的分辨率是测量精度的二分之一，所以飞机蒙皮孔测量系统的分辨率最低位 $4\mu\text{m}$ 。

CCD 的理论像素值和分辨率的关系式如下

$$\begin{cases} R_x = S_x / P_x \\ R_y = S_y / P_y \end{cases} \quad (3-1)$$

式中 R_x 、 R_y ——相机在 X、Y 方向上的分辨率；

S_x 、 S_y ——X、Y 方向上的视窗大小；

P_x 、 P_y ——CCD 在 X、Y 方向上的理论像素值。

在本课题中，要求视窗的大小为 $15\text{mm} \times 15\text{mm}$ ，CCD 在 X 和 Y 方向上的分辨率均为 $4\mu\text{m}$ ，用上面的公式计算得到 CCD 的理论像素值为 3750×3750 ，也就是 1400 万像素。目前，可用的面阵 CCD 的最高分辨率为 6600×4400 ，并且高分辨率的镜头成像面积很小，只能配合小靶面尺寸的 CCD。若想通过提高 CCD 的分辨率来提高飞机蒙皮孔测量系统的测量精度，只有通过图像拼接技术或者采用线阵 CCD，而这样又会增加系统的复杂程度，并且通过提高系统硬件设备的性能来提高系统的测量精度是很不经济的。考虑到测量系统是建立在空间有限的六自由度机械手臂的执行台上的，所以图像拼接或线阵 CCD 两种方案并不可行。

然而通过改善图像处理算法来提高蒙皮孔几何参数的测量精度是简单有效且经济可行的好方法。传统的边缘检测算法的定位精度是整像素级。实际上，图像边缘的灰度值是一个过渡区，在图像经过像素级边缘检测后，所检测出的边缘至少存在一个整像素单元的误差，导致真实的图像边缘信息丢失。而通过亚像素边缘检测算法可以在两个像素点之间增加若干采样点，即亚像素点，从而提高图像边缘位置的定位精度^[28]。如果在一个像素点内加入 9 个采样点，理论上可以将边缘位置的检测精度提高一个数量级。所以 CCD 和镜头组成的光学系统的分辨率在理论上可以降低一个数量级，即系统的分辨率可以降低至 $40\mu\text{m}$ 。在选择 CCD 相机和匹配的光学镜头时可以放宽要求。

经过综合考虑，本课题选用 JAI 公司的 CV-M4+型面阵 CCD 工业相机，

相机的详细参数见表 3-1。

表 3-1 CV-M4+型面阵 CCD 光学相机性能参数

型号	CV-M4+
分辨率	1300×1030
传感器类型	2/3" 逐行单色扫描 IT CCD
像元尺寸	6.45um×6.45um
普通帧率	24fps
最大帧率	44fps
信噪比	>55dB
灵敏度	0.1Lux
输出接口	LVDS /camera link
输出格式	8bit
快门速度	1/10,000——1/24sec
重量	250g
电源	12V DC±10% 4.5W

相机的三维图片如图 3-1 所示。



图 3-1 CV-M4+型面阵 CCD 光学相机

如图 3-2 所示为光学镜头的几何关系。

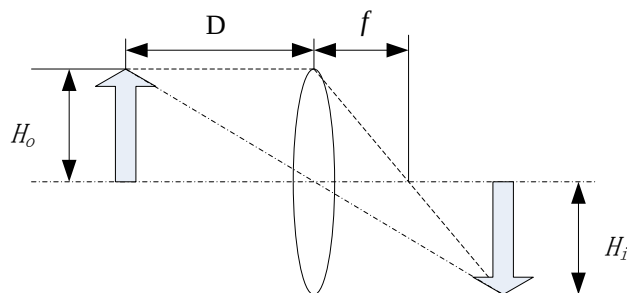


图 3-2 光学镜头几何关系

图 3-2 中的镜头焦距 f 的表达式为式(3-2)

$$f = \frac{D \times \eta}{1 + \eta} \quad (3-2)$$

式中 D ——物距，光心至物体的距离；

η ——镜头的放大倍数。

镜头放大倍数 η 的表达式见式(3-3)

$$\eta = \frac{H_i}{H_o} \quad (3-3)$$

式中 H_i ——摄像机有效成像面的高度(代表 CCD 成像面的大小)；

H_o ——视野的高度。

在本课题中，规定物距 D 的值为 20mm；CCD 的有效成像面的大小为 8.39mm×6.45mm， H_i 的值为 6.64mm；视野的大小为 15mm×15mm， H_o 的值为 15mm。由式(3-2)和(3-3)可得到焦距 f 的值为 6.14mm，所以镜头的焦距要求至少为 7mm。选择镜头的像面应该不小于 CCD 的尺寸，即光学镜头的像面尺寸至少为 2/3”。镜头的接口要求是 C 口，以便和相机配合使用^[29]。

经过分析，这里选用 AFT-1614MP 型光学镜头，其详细参数如表 3-2 所示。

表 3-2 AFT-1614MP 型光学镜头性能参数

型号	AFT-1614MP
焦距(mm)	16
视场角(°)	38°
相对通光孔径(F)	F1.4-C
接口	C
像面尺寸(inch)	2/3”
最近物距(m)	0.15
外形尺寸(mm)	φ31.0×42.5

图 3-3 是 AFT-1614MP 光学镜头的实物图。



图 3-3 AFT-1614MP 光学镜头实物图

3.2 蒙皮孔测量系统的照明系统设计

在机器视觉测量系统中,合理的光源和照明方式对后期图像处理的难度和最终的测量精度有决定作用。不同应用环境下的视觉测量系统对光源和照明方式有不同的要求。为了避免环境自然光或灯光对视觉测量系统的干扰,光路应该用自备光源,对光源的要求是光源光照均匀、稳定,亮度大且可调节,能充分抑制外界光照对采集图像质量的干扰;光源和照明方式的配合要尽可能突出特征部位和特征量,增强特征部位的对比度^[30]。

3.2.1 照明系统光源的特性分析

CCD 传感器的光谱响应和光源的波长有一个对应关系,如图 3-4 所示,常用 CCD 的光谱响应范围在 400nm 到 1100nm 之间,在 550nm 的时候达到响应峰值。选择与 CCD 相匹配的光源可以用较小的光源功率输出最佳的图像效果,节省能源,此外还能降低因为光源过热导致的热稳定性的影响。工业上用到的 CCD 对红光比较敏感,在红色光照射下获得的图像也比较清晰,所以本课题采用红光作为测量系统的照射光源。

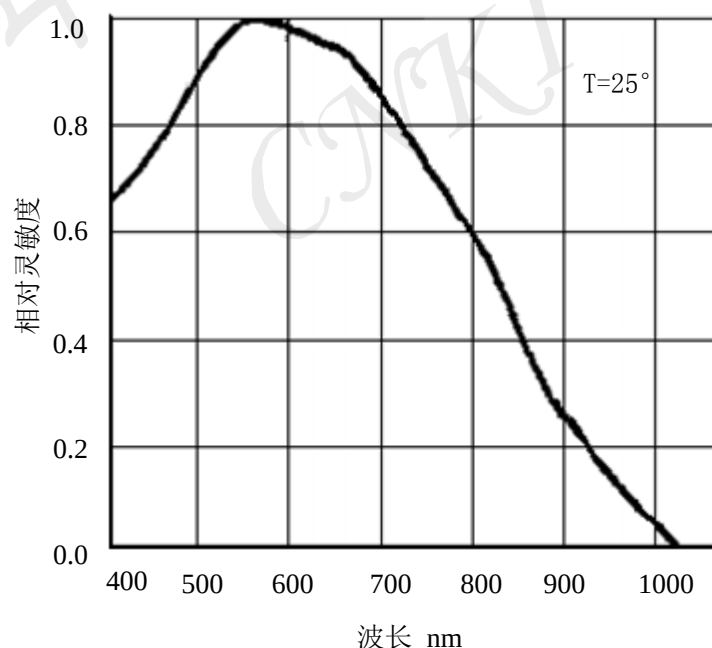


图 3-4 CCD 传感器光谱响应曲线

光源的亮度是指发光体表面发光强弱,人眼从一个方向观察光源,在该方向上的光强与人眼所能看到的光源面积之比定义为光源亮度,光源亮度的定义式如式(3-4)所示。提高光源亮度可以改善信噪,方便后续图像处理,但也会降低光源灯泡的使用寿命,所以在设计系统光源时要合理选择光源的安装位置和

投射角度，保证视场中有足够的照度

$$L = \frac{d\phi}{d\Omega \cdot ds \cos(\theta)} \quad (3-4)$$

式中 L ——光源亮度；

ϕ ——光通量；

Ω ——立体角；

θ ——给定方向与单位面积元 ds 法线方向的夹角。

3.2.2 照明系统的光源

合理使用光源可以突显特征的信息，增强不同部位之间的对比度。光源是视觉测量中的重要部分，在设计测量系统的照明光源时要考虑以下因素：

(1) 是镜面反射还是漫反射。镜面反射亮度高但不稳定，一个很小的角度变化就可能使镜面反射完全消失，一般情况下要避免使用镜面反射；漫反射亮度较暗但稳定，对角度变化不敏感。

(2) 颜色的不同，不同的发射光和反射光会显现不同的颜色。

(3) 光的传播介质和折射。

(4) 被测物表面的材质、粗糙度、向光背光等。

(5) 光源发热量要尽可能小，以减小 CCD 的热噪声影响。

可以根据飞机蒙皮孔测量的具体特点，采用不同颜色、强度、方向等光源使蒙皮孔的边缘特征和蒙皮其他部位明显区分开来。设计合适的光源需要综合考虑多方面因素^[31]：

(1) 视野要求：为了提高光照效率，要尽可能使光线集中在飞机蒙皮孔的周围；为了增大被测特征和背景之间的对比度，要调节照明光源与蒙皮孔之间的距离，使之合适。

(2) 被测特征的表面状态：根据飞机蒙皮孔的表面状态来选择照明方式；根据飞机蒙皮的材质来选择光源的颜色。飞机蒙皮材质多为铝合金或钛合金，表面光亮，光源要增大孔洞与飞机蒙皮背景之间的对比度，增强孔洞边缘特征。

(3) 要突出被测特征的细节：对蒙皮孔的测量，要尽可能突出空洞的边缘部分，弱化背景和蒙皮上其他的杂质信息。

常见的光源有 LED 光源、荧光灯和卤素灯等，它们的主要特征如表 3-3 所示。

表 3- 3 常见光源特征对比

性能	LED 灯	荧光灯	卤素灯
寿命时长	6000~10000 小时	5000~7000 小时	5000~7000 小时
光源亮度	多个可很亮	较亮	亮
响应速度	快	慢	慢
光源特点	成本低, 发热少, 根据用途选择波长, 制作形状方便, 能耗小	价格便宜, 扩散性好, 发热少, 用于大范围均匀照射	价格便宜, 发热多, 没有光亮度和色温的变化

本课题要测量飞机蒙皮上的埋头孔, 为方便后期图像预处理, 降低图像处理难度, 图像中埋头孔的边缘轮廓要清晰, 淡化金属表面的纹理和刻痕等杂质信息。基于这一要求, 本课题中决定用 LED 光源在飞机蒙皮孔周围以环形布置, 最大程度消除阴影, 同时 LED 光源还有机械性能好、强度高、单色性好、使用寿命长等优点, 实验证明可以达到较好的效果, 如图 3-5 所示为所选光源的实物图。



图 3-5 LED 环形光源实物图

所选光源的详细参数如表 3-4 光源基本参数所示。

表 3-4 光源基本参数

项目	数值
工作电压	2.8V
工作电流	20mA
光照强度	4500mcd~6000mcd
发光效率	0.95lm/v
光谱波长	632nm

3.2.3 照明系统的照明方式设计

照明系统的照明方式要根据被测特征的特性、距离、视场大小进行选择。

目前还没有一种照明方式可以适合所有机器视觉的测量场合,所以要针对飞机蒙皮孔几何参数测量,选择适当的照明方式。

照明方式大致可分为前向照明,背向照明,频闪照明和结构光照明等。光源和相机位于被测物同侧的是前向照明,特点是便于照明装置安装,如图 3-6 中的图 a)所示;被测物在相机和照明光源中间的是背向照明,获得的图像对比度高,主要用于不透明物体的识别和边缘检测,如图 3-6 中的图 b)所示;将高频光脉冲投射到被测物上的是频闪光照明,相机拍摄的频率要与光源闪烁频率同步,用来高速移动的物体;把线光源或者光栅照射到物体上的是结构光照明,可以根据结构光或光栅产生的畸变求解出被测信息,如图 3-6 中的图 c) 所示。

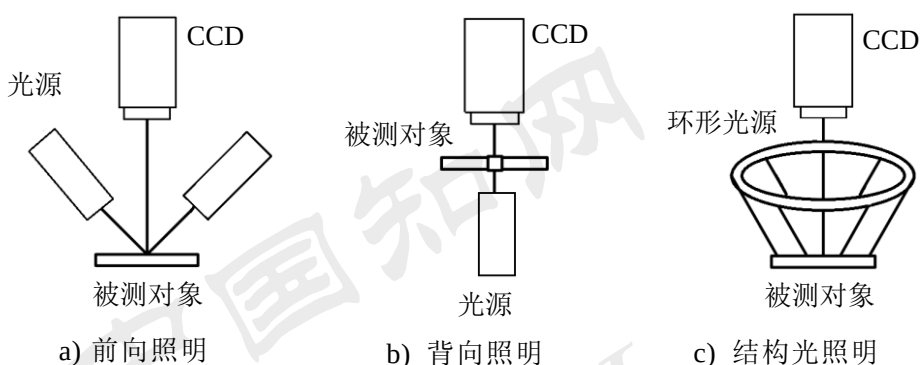


图 3-6 照明方式示意图

在飞机蒙皮孔的几何参数测量中,考虑到获取埋头孔的内圈和外圈的边缘,采用前向照明,便于安装,能满足飞机蒙皮孔的测量要求。

3.3 蒙皮孔测量系统的图像采集卡

图像采集卡是图像处理模块和图像采集模块的接口。模拟图像信息经过采样、量化之后,转换为数字图像并输入、存储到帧存储器中。通常的传输接口不能满足图像信息高速传输的要求,这时就需要图像采集卡发挥作用。

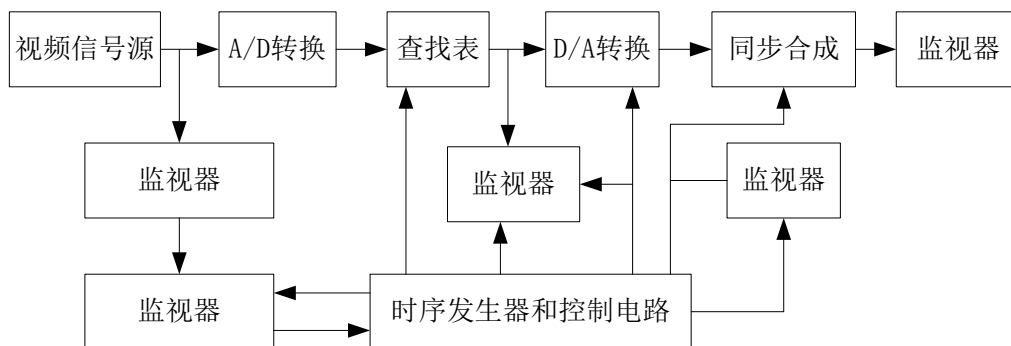


图 3-7 图像采集原理图

如图 3-7 所示为图像采集卡的原理图,光学相机采集到的模拟图像信号经过 A/D 转换后,以数字图像形式存储在图像采集卡的存储单元中,然后由上

位机发出处理指令，采集存储单元中的一帧图像。本课题要在 PC 平台上对飞机蒙皮孔的图像进行图像预处理、边缘检测及数据拟合计算，所以要选用基于 PCI 总线的图像采集卡，在选用图像采集卡时还要考虑以下几方面：

(1) **图像传输格式** 图像采集卡必须支持测量系统中相机的输出信号格式。多数相机采用 RS422 或 EIA644 (LVDS) 作为图像信号的输出格式。从系统灵活性考虑，若两种格式都支持则更好。数字相机的图像传输格式多采用 IEEE1394、USB 和其他图像传输格式。本课题所选相机的输出接口为 LVDS /camera link，故图像采集卡也必须支持 LVDS /camera link 传输格式。

(2) **图像格式** 常用的图像格式包括彩色图像格式和黑白图像格式。彩色图像也叫三通道图像，即 R、G 和 B 三色通道，每个通道的灰度值均为 8 位。黑白图像的灰度等级用 8 位二进制数表示，即 256 级。在本课题中，采用 256 级灰度的黑白图像，即 8 位灰度图像。

(3) **传输通道数** 图像采集卡应能够支持多路信号输入，以应对相机在摆设高分辨率图像时产生的高输出速率。图像采集卡的传输通道一般有 1 路、2 路、4 路、8 路等。由于本课题对图像的输出速率要求不高，所以对输出通道数没有要求。

(4) **分辨率要求** 图像采集卡支持的最高分辨率要高于图像的空间分辨率。图像的空间分辨率是指图像中每单位长度所包含的像素或点的数目，通常在没有必要对设计像素的物理分辨率进行实际度量时，通常会称一幅大小为 $M \times N$ 的数字图像的空间分辨率为 $M \times N$ 像素。目前，性能优异的数据采集卡支持的最大点阵可达 $64K \times 64K$ 。在本课题中，所选 CCD 面阵相机的分辨率为 1300×1030 ，所以图像采集卡支持的分辨率至少为 1300×1030 。

图像采集卡的各项性能要和相机的参数性能匹配，选择图像采集卡时要综合考虑测量系统对采集卡的性能要求和经济性。本课题选用的是 X64-CL Full 图像采集卡，如图 3-8 X64-CL Full 图像采集卡的实物图所示，所选图像采集卡的详细参数如表 3-5 X64-CL Full 图像采集卡的性能参数。



图 3-8 X64-CL Full 图像采集卡的实物图

表 3-5 X64-CL Full 图像采集卡的性能参数

功能	参数
摄像机接口	1Base, Medium 或 Full
摄像机格式	Base, Medium 或 Full
像素时钟	最大 85MHz
像素位数	8、10、12、14、16
摄像机 Tap 数	2 x 3 taps/8-bit 或 4 taps/8-bit
总线	PCI-64/ PCI-X 66
帧存	32 MB - 2 GB
软件	Sapera LT, IFC (32-bit)

3.4 本章小结

本章主要介绍了蒙皮孔视觉测量系统的硬件结构设计和分析。首先根据测量精度和视窗大小对 CCD 相机和光学镜头进行了设计和选型；然后对蒙皮孔测量系统的照明光源进行了分析，选择环形 LED 光源作为系统照明以消除阴影；最后对测量系统的图像采集卡的性能进行了分析，选择性能满足要求并且和相机匹配的图像采集卡。

第4章 蒙皮孔测量系统边缘检测算法研究

4.1 蒙皮孔图像预处理算法研究

在图像的形成、传输或变换过程中会受到多种因素的干扰，例如光学系统失真、系统噪声、曝光不足或过量、相对运动等，图像由此产生的改变被称作降质。降质会使图像模糊不清，所以要改善降质图像的质量。

本课题利用计算机图像处理技术对飞机蒙皮孔的二维图像进行图像预处理和图像边缘特征提取，以 VC++ 平台和 Opencv2.0 为开发环境，对蒙皮孔图像进行处理，如图 4-1 标记部分为欲提取的边缘目标信息。

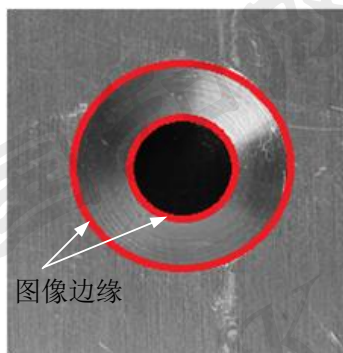


图 4-1 蒙皮孔图像边缘信息

4.1.1 蒙皮孔图像的直方图修正

直方图是数字图像常用的统计特征图，体现图像的灰度值分布特点。直方图均衡化是将已知灰度值分布的图像经过特定变换，转换成具有均匀灰度值分布的图像，它可以使图像的灰度值分布均匀，改善图像的亮度分布状态，而且可以增强图像整体的对比度，下面对蒙皮孔图像的灰度直方图分布情况进行分析。

图 4-2 为蒙皮孔图像的原图像和直方图分布，在图 a) 中的区域 B 和区域 A、C 之间的边界不够清晰，而且从图 b) 中的蒙皮孔图像直方图分布中看到灰度值主要分布在中间，两端分布较少，为了改善图像的灰度值分布，增强图像明暗区域之间的对比度，要对蒙皮孔图像进行直方图均衡化。直方图均衡化大致可分为两大类，分别为在频域上和空域上进行图像处理^[32,33]，频域处理过程如图 4-3 所示，空域处理如图 4-4 所示。这里用空域处理方法直接对图像进行操作，经过直方图均衡化的飞机蒙皮孔图像和直方图分布如图 4-5 所示，从图中可以看到，直方图均衡化之后的图像明暗对比度明显增强，灰度值分布较为均匀。

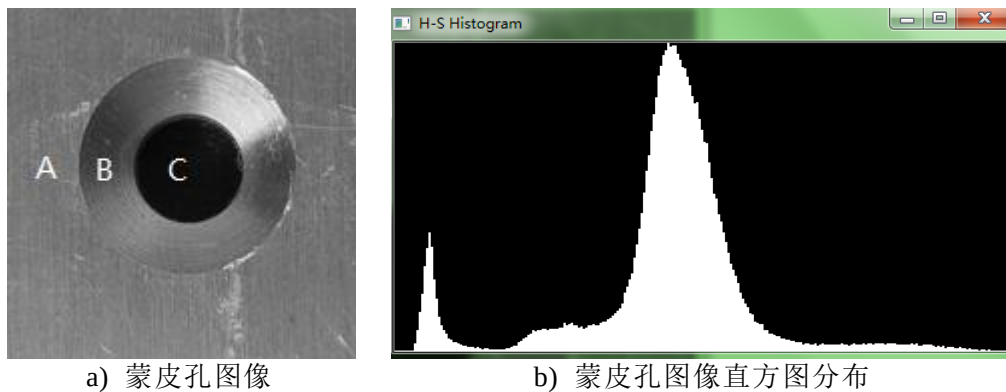


图 4-2 蒙皮孔图像直方图分布

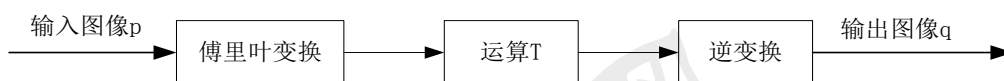


图 4-3 图像频域增强流程图

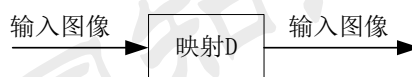


图 4-4 图像空域增强流程图

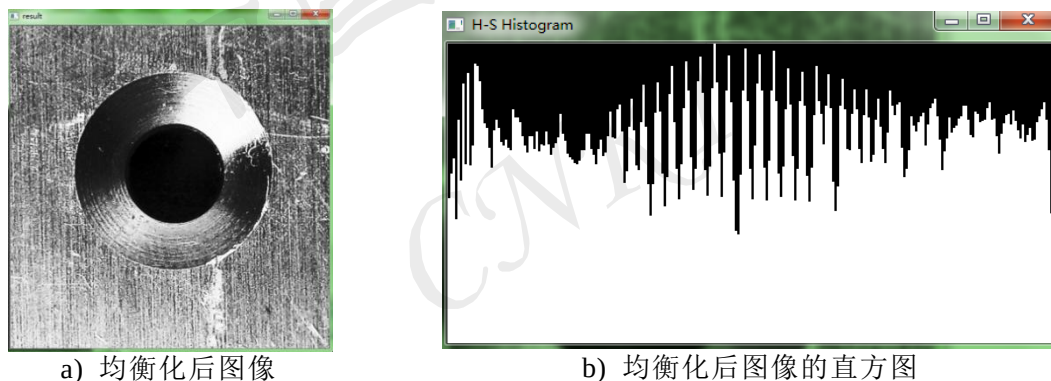


图 4-5 蒙皮孔图像直方图均衡化后的图像和直方图分布

4.1.2 蒙皮孔图像的滤波算法研究

测量系统采集到的飞机蒙皮孔图像受到的干扰包括测量现场光照干扰导致图像亮度分布不均匀、执行平台振动引起的像素抖动误差、图像在读取和传输过程中产生的随机噪声、在传输通道中产生的杂波噪声等，这些干扰中现场光照干扰是主要的影响因素。为了降低上述噪声对提取图像边缘时的干扰，在提取图像边缘之前需要用滤波算法对图像进行滤波，这样可以平滑噪声，但是也会模糊图像边缘信息。中值滤波是常用的图像滤波算法，中值滤波可以在平滑噪声的同时尽可能避免图像边缘过渡模糊，并且中值滤波算法程序比较简单，图像处理时间短^[34-36]，本文采用中值滤波对蒙皮孔图像进行滤波。

中值滤波属于空域滤波，是在待处理的图像中逐步移动模板，通过滤波器

事先定义的关系来计算每个像素点的响应，在图 4-6 所示的 3×3 模板中， (x, y) 处的灰度值响应 R 如式(4-1)所示为

$$R = \omega(-1, -1) f(x-1, y-1) + \omega(-1, 0) f(x-1, y) + \dots + \omega(1, 1) f(x+1, y+1) \quad (4-1)$$

$f(x-1, y-1)$	$f(x, y-1)$	$f(x+1, y-1)$	$w(x-1, y-1)$	$w(x, y-1)$	$w(x+1, y-1)$
$f(x-1, y)$	$f(x, y)$	$f(x+1, y)$	$w(x-1, y)$	$w(x, y)$	$w(x+1, y)$
$f(x-1, y+1)$	$f(x, y+1)$	$f(x+1, y+1)$	$w(x-1, y+1)$	$w(x, y+1)$	$w(x+1, y+1)$

图 4-6 空域滤波原理

$M \times N$ 图像用 $m \times n$ 的滤波器进行线性滤波，由式(4-2)给出

$$R = \sum_{x=-a}^a \sum_{y=-b}^b \omega(s, t) f(x+s, y+t) \quad (4-2)$$

式中 $a=(m-1)/2$, $b=(n-1)/2$ 。

中值滤波算法采用的滑动窗口大小的像素个数必须为基数，窗口中心的灰度值用窗口中所有点的中间值代替，中值滤波算法的数学表达式见式(4-3)

$$y_i = \text{Med}\{f_{i-v}, \dots, f_i, \dots, f_{i+v}\}, i \in N, v = \frac{m-1}{2} \quad (4-3)$$

式中 Med ——表示取中间值；

f_i ——窗口中心点值；

m ——窗口长度（即点数），取奇数。

常用的中值滤波窗口形状有方形、十字形、圆形和环形等，滤波窗口的尺寸一般由小至大逐渐增加，直到图像效果满意为止。蒙皮孔图像的特点是轮廓较长，不存在其他尖状物，这里都采用 3×3 的矩形窗口，对蒙皮孔图像的滤波效果如图 4-7 所示。

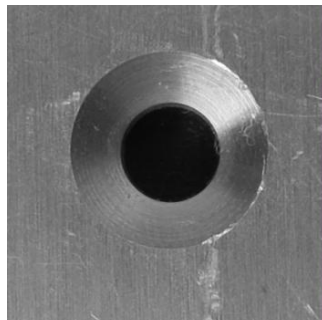


图 4-7 中值滤波后的蒙皮孔图像

本文还用均值滤波算法和高斯滤波算法对飞机蒙皮孔图像进行了滤波处理，均值滤波后的蒙皮孔图像如图 4-8 中的 a) 图所示，用高斯滤波处理后的蒙皮孔图像如图 4-8 中的 b) 图所示。经过比较可以看出，经过中值滤波和高

斯滤波的蒙皮孔图像边缘比较清晰,均值滤波输出的图像边缘比较模糊;同时,中值滤波的程序运行时间为 563ms,比高斯滤波的程序运行时间 846ms 短,证明本文采用中值滤波对蒙皮孔图像进行滤波是比较合理的。

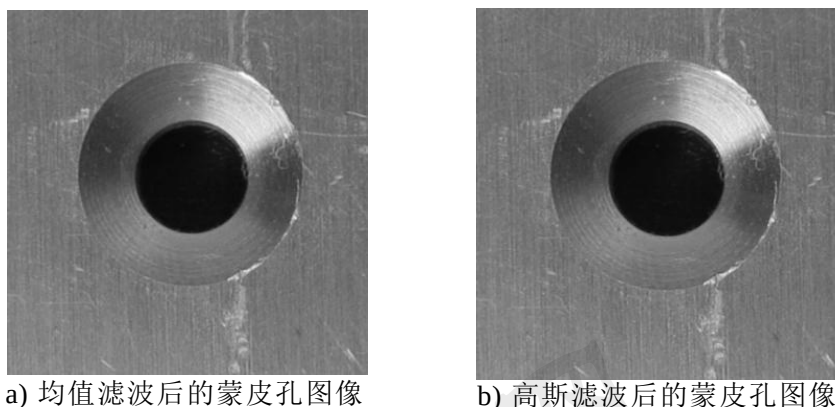


图 4-8 其他滤波算法处理后的蒙皮孔图像

4.2 蒙皮孔图像边缘检测算法研究

对蒙皮孔图像进行图像预处理之后,开始检测蒙皮孔图像的边缘。为了使获得的蒙皮孔图像边缘完整、清晰、边缘较细,需要对蒙皮孔图像的边缘检测算法进行研究。

4.2.1 本文采用的边缘检测算法

完整的蒙皮孔图像边缘使拟合圆可用的数据点增多,有助于提高后面拟合圆的精度,形态学边缘检测算法可以从多个方向上检测图像的边缘,消除细小尺寸的特征,在抗噪声和提高边缘检测精度方面优于其他边缘检测算法,下面用改进的形态学边缘检测算法对飞机蒙皮孔图像进行边缘检测。

飞机蒙皮孔图像上的边缘除了圆孔边缘之外,还有蒙皮表面刻痕、污渍、金属表面纹理等细小尺寸特征的边缘信息,传统的边缘检测算法只能在一个方向上进行边缘检测,无法区分特征尺寸的大小,并且检测出的边缘不够精细,需要对其进行改进,由于形态学是一门完整的理论,本节首先简要给出形态学基本概念,然后针对蒙皮孔图像的特点对传统的形态学边缘检测算法进行改进,用改进后的算法对蒙皮孔图像进行处理。

数学形态学以几何学为理论基础,用结构元素(structure element)对图像进行特征探测和提取。结构元素是 n 维欧式空间或其子空间的一个子集,具有一定的形状,以一个参考点作为基准,对结构元素进行移动。结构元素的大小常采用 3×3 的窗口,因为提取的边缘比较细腻而且速度快。数学形态学的基本运算包括腐蚀(erosion)、膨胀(dilation)、开(open)和闭(close)等。膨胀的定义如

下, 设 A 和 B 是整数空间 Z 中的集合, 其中 A 表示原始图像, B 表示结构元素, 则 B 对 A 的膨胀运算记为 $A \oplus B$, 可以表示为式(4-4)

$$A \oplus B = \{z | (\hat{B})_z \cap A \neq \emptyset\} \quad (4-4)$$

式中 $\emptyset$ ——空集;

$\hat{B}$ ——集合 B 的反射集, $\hat{B} = \{w | w = -b, b \in B\}$ 。

膨胀的概念图示如图 4-9 所示。

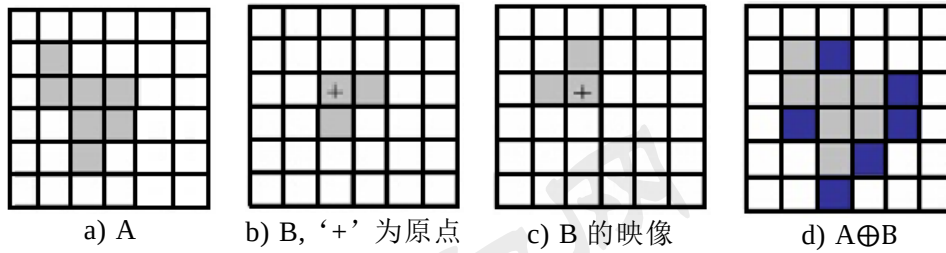


图 4-9 膨胀概念图示

同样, 腐蚀的概念如下, 设 A 和 B 是整数空间 Z 中的集合, 其中 A 为原始图像, B 为结构元素, 则 B 对 A 的腐蚀运算记作 $A \ominus B$, 定义式为式(4-5)

$$A \ominus B = \{z | (B)_z \subseteq A\} \quad (4-5)$$

腐蚀概念的示意图如图 4-10 所示。

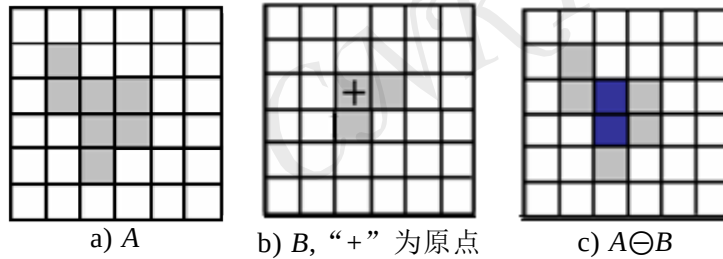


图 4-10 腐蚀概念的图示

开运算和闭运算由膨胀和腐蚀两个基本运算复合而成。开运算可以平滑图像轮廓, 去掉轮廓毛刺, 截断狭窄缝隙; 闭运算除了平滑轮廓之外, 还可以去除区域中的小孔, 填平狭窄的裂缝和轮廓的缺口, 与开的作用恰好相反。设 A 和 B 是整数空间 Z 中的集合, 其中 A 为原始图像, B 为结构元素, 则 B 对 A 的开运算记作 $A \circ B$, 表达式为式(4-6); B 对 A 的闭运算记作 $A \bullet B$, 表达式如式(4-7)所示

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (4-6)$$

$$A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B \quad (4-7)$$

开和闭的概念示意图如图 4-11 所示。

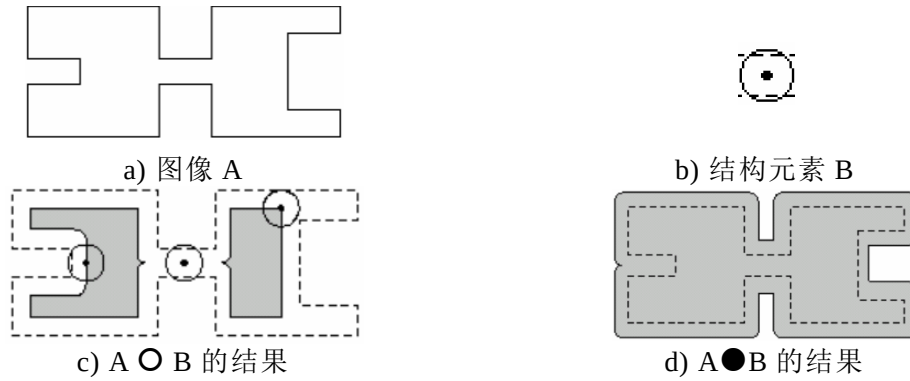


图 4-11 开和闭的概念示意图

传统的形态学灰度图像边缘检测算法如下，设 A 表示原图像， B 表示结构元， Grad_i 表示灰度图像的边缘， Grad_i 算子包括以下三种情况，如式(4-8)、式(4-9)和式(4-10)所示

$$\text{Grad}_1 = A \oplus B - A \quad (4-8)$$

$$\text{Grad}_2 = A - A \ominus B \quad (4-9)$$

$$\text{Grad}_3 = (A \ominus B) \oplus B - (A \bullet B) \ominus B \quad (4-10)$$

传统的形态学边缘检测算法只采用一个结构元，不能获得蒙皮孔图像多个方向的图像边缘信息，无法过滤掉蒙皮孔图像上小尺寸特征的边缘。在结构元素为正时，膨胀运算会使输出图像偏亮，暗处细节被删除或者被忽略；腐蚀运算会使输出图像偏暗，亮部细节被忽略^[37]，这会使输出的图像边缘模糊，下面对传统的边缘检测算法予以修正。

蒙皮孔图像的边缘是中心对称的，这里采用四个对称的结构元对图像进行边缘检测，这样可以获取比较完整的图像蒙皮孔图像边缘，也就是多结构元形态学变换^[38]，四种结构元的矩阵见图 4-12。

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad B_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

图 4-12 四种结构元矩阵

为了尽可能滤除蒙皮孔图像中小尺寸特征的边缘，这里选取两个去噪的结构元，所选取的用于去噪的结构元如图 4-13 所示。

$$a_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad a_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

图 4-13 用于去噪的结构元矩阵

改进后的形态学边缘算子为式(4-11)

$$\text{Grad}=[(A\ominus a_1)\oplus a_2] \oplus B-[(A\oplus a_1) \ominus a_2] \ominus B \quad (4-11)$$

按照上面的边缘检测算子在四个方向上检测图像的边缘,四个方向上的边缘分别为 Grad_1 、 Grad_2 、 Grad_3 、 Grad_4 , 见式(4-12)

$$\begin{aligned} \text{Grad}_1 &=[(A\ominus a_1)\oplus a_2] \oplus B_1-[(A\oplus a_1) \ominus a_2] \ominus B_1 \\ \text{Grad}_2 &=[(A\ominus a_1)\oplus a_2] \oplus B_2-[(A\oplus a_1) \ominus a_2] \ominus B_2 \\ \text{Grad}_3 &=[(A\ominus a_1)\oplus a_2] \oplus B_3-[(A\oplus a_1) \ominus a_2] \ominus B_3 \\ \text{Grad}_4 &=[(A\ominus a_1)\oplus a_2] \oplus B_4-[(A\oplus a_1) \ominus a_2] \ominus B_4 \end{aligned} \quad (4-12)$$

最后将获得的四个方向上的边缘进行加权平均,得到最后的图像边缘,算法如式(4-13)所示

$$\text{Grad}=(\text{Grad}_1+\text{Grad}_2+\text{Grad}_3+\text{Grad}_4)/4 \quad (4-13)$$

用改进后的形态学边缘检测算法对蒙皮孔图像进行处理后的结果如图 4-14 所示。从图中可以看出,改进后形态学边缘检测处理算法输出的蒙皮孔图像的边缘比较完整,间断边缘较少,小尺寸特征的边缘也比较少,能满足蒙皮孔圆的完整性的要求,但是检测出的边缘仍然比较粗,不够精细,这会影响拟合圆的拟合精度。

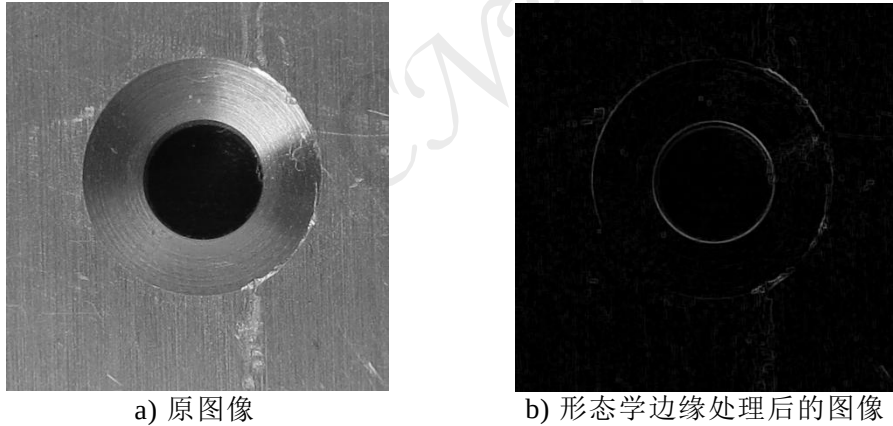


图 4-14 形态学边缘算子处理前后图片对比

下面考虑用 Canny 边缘检测算子对蒙皮孔图像进行边缘检测, Canny 边缘检测算子能在抑制噪声和边缘准确定位之间寻求最优,用两个阈值调节边缘的细度,检测出的蒙皮孔图像边缘比较清晰,而且边缘较细。用 Canny 算子检测出的边缘图像和用形态学边缘检测算法检测出的边缘图像经过“取与”运算,得到边缘完整、清晰、边缘较细的蒙皮孔图像边缘。

Canny 边缘检测算法的主要步骤如下:

- (1) 对图像进行高斯滤波;
- (2) 计算滤波之后的图像的幅度和方向;

(3) 计算幅值的极值，找到图像梯度中的局部极大值点，极大值点之外的像素点灰度值设置为零，得到细化的图像边缘；

(4) 使用双阈值算子检测和连接边缘，两个阈值用 $N1$ 和 $N2$ 表示。 $N1$ 用来寻找独立的线段； $N2$ 延伸独立的线段的两端，将边缘的断裂处连接起来。

蒙皮孔图像 $f(x,y)$ 经过高斯滤波后，得到 $f(x,y) \times G_\sigma(x,y)$ ，其梯度矢量的模为 M_σ ，矢量的方向为 A_σ ，则可得式(4-14)，图像的边缘点是使 M_σ 在 A_σ 方向上取得局部最大值

$$\begin{cases} M_\sigma = \|f(x,y) \times \Delta G_\sigma(x,y)\| \\ A_\sigma = \frac{f(x,y) \times \Delta G_\sigma(x,y)}{\|f(x,y) \times \Delta G_\sigma(x,y)\|} \end{cases} \quad (4-14)$$

调节两个阈值，经过比较获得在(100,300)时边缘效果最理想，双阈值调节的 Canny 边缘检测效果如图 4-15 所示。

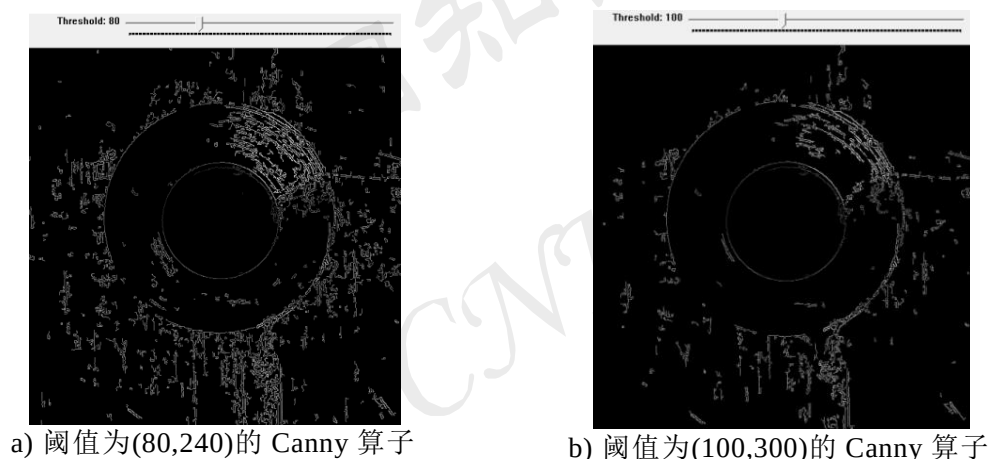


图 4-15 边缘检测算子效果对比图

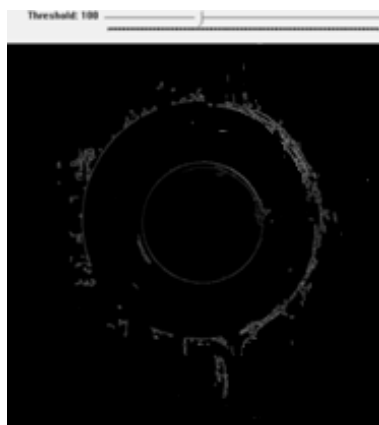


图 4-16 边缘检测算法输出的边缘图像

用 Canny 边缘检测算法和形态学边缘检测算法输出的蒙皮孔边缘图像作“取与”运算，输出的蒙皮孔图像如图 4-16 边缘检测算法输出的边缘图像所

示。从图中可以看出，蒙皮孔边缘图像比较完整，而且比单独使用形态学边缘检测算法获得蒙皮孔图像边缘清晰，而且边缘比较细，可以满足预定的要求。

4.2.2 其他边缘检测算法

本文在研究蒙皮孔图像边缘检测算法时，还研究了其他常用的边缘检测算法，包括一阶微分边缘检测算法中的 Roberts 算子、Sobel 算子和 Prewitt 算子等，二阶微分边缘检测算法中的 Laplace 算子和 Marr 算子等，用这些边缘检测算子输出的蒙皮孔图像边缘如图 4-17 所示。

从边缘检测算法输出的蒙皮孔边缘图像可以看出，从边缘的完整性、清晰度和边缘的细度、滤除杂质信息边缘等方面综合考虑，这些算法均比本文采用的边缘检测算法差。

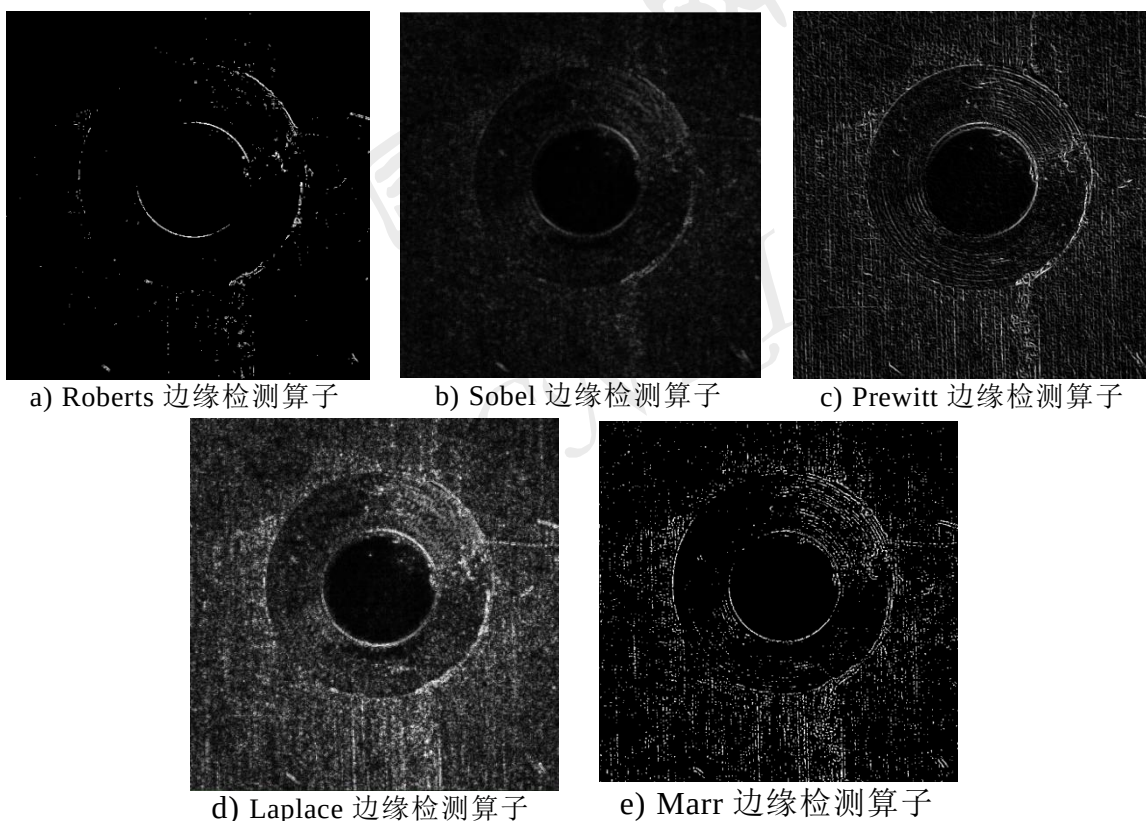


图 4-17 其他边缘检测算法

4.3 蒙皮孔图像亚像素细分算法研究

蒙皮孔图像经过本文的边缘检测算法处理之后，可以获得比较准确的图像边缘坐标信息，但是考虑到本课题设计的测量精度较高，仅仅依靠提高硬件的精度来改善蒙皮孔几何尺寸的测量精度比较困难，而且成本也很高。本课题采用图像的亚像素边缘细分算法对蒙皮孔图像的边缘进行进一步细化，提高蒙皮

孔几何参数的测量精度。空间矩亚像素边缘检测算法对图像的边缘检测精度高，检测出的边缘坐标结果稳定，能够有效提高蒙皮孔视觉测量系统的检测精度，下面对空间矩亚像素边缘细分算法进行研究^[39-41]。

空间矩亚像素边缘定位算法由 *Lyvers* 等人首先提出，它是一种用于计算灰度图像亚像素坐标位置的算法。它使用 6 个不同的空间矩，把理想状况下的阶跃模型的四个参数映射到六个空间矩中，再用这六个空间矩计算出边缘所在的直线参数。这种边缘检测方法的特点是方法简单、精度高，适合任意大小的窗口，检测精度受图像灰度的加性和乘性的影响小。

二维理想边缘模型的示意图如图 4-18 所示。

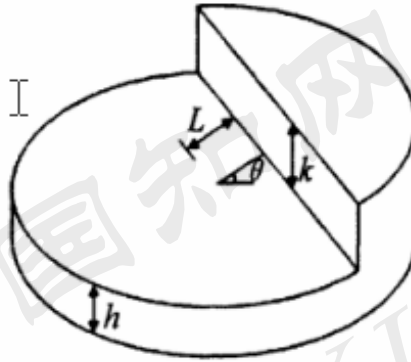


图 4-18 二维理想直线边缘模型

直线边缘将整个圆区域分为两部分，一个区域的灰度值为 h ，另一个区域的灰度值为 $h+k$ ， $L(L \in [-1,1])$ 为单位圆的圆心到直线边缘的垂直距离， $\theta(\theta \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}])$ 是边缘的法线和 x 轴的夹角。假设图像的灰度值为 $g(x,y)$ ，连续函数 $g(x,y)$ 的 $p+q$ 阶空间矩定义为式(4-15)

$$M_{pq} = \iint x^p y^q g(x,y) dx dy \quad p, q=0,1,2,\dots,\infty \quad (4-15)$$

图像的灰度值是离散的，计算各阶矩用公式(4-16)

$$M_{pq} = \sum_i \sum_j \iint_{A_{i,j}} x^p y^q g(x,y) dx dy \quad p, q=0,1,2,\dots,\infty \quad (4-16)$$

其中，积分区域 $A_{i,j}$ 是像素 (i,j) 在单位圆内部的阴影部分面积，如图 4-19 所示。假定像素的灰度值 $g(x,y)$ 是常值，则上式转化为式(4-17)

$$M_{pq} = \sum_i \sum_j g_{ij} \iint_{A_{i,j}} x^p y^q dx dy \quad p, q=0,1,2,\dots,\infty \quad (4-17)$$

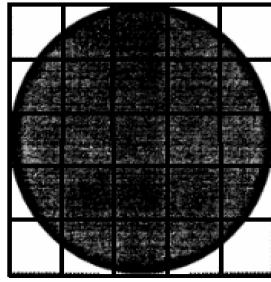


图 4-19 像素邻域的单位圆

计算上式可以得到邻域 $(p+q)$ 阶矩模板 M_{00} 、 M_{10} 、 M_{20} 、 M_{01} 、 M_{02} 、 M_{11} ，见表 4-1 至表 4-6。

表 4-1 M_{00} 模板数据

M_{00} 模板				
0.0219	0.1231	0.1573	0.1231	0.0219
0.1231	0.1600	0.1600	0.1600	0.1231
0.1573	0.1600	0.1600	0.1600	0.1573
0.1231	0.1600	0.1600	0.1600	0.1231
0.0219	0.1231	0.1573	0.1231	0.0219

表 4-2 M_{11} 模板数据

M_{11} 模板				
-0.0098	-0.0352	0.0000	0.0352	0.0098
-0.0352	-0.0256	0.0000	0.0256	0.0352
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0352	0.0256	0.0000	-0.0256	-0.0352
0.0098	0.0352	0.0000	-0.0352	-0.0098

表 4-3 M_{10} 模板数据

M_{10} 模板				
-0.0147	-0.0469	0.0000	0.0469	0.0147
-0.0933	-0.0640	0.0000	0.0640	0.0933
-0.1253	-0.0640	0.0000	0.0640	0.1253
-0.0933	-0.0640	0.0000	0.0640	0.0933
-0.0147	-0.0469	0.0000	0.0469	0.0147

表 4-4 M_{01} 模板数据

M_{01} 模板				
0.0147	0.0933	0.1253	0.0933	0.0147
0.0469	0.0640	0.0640	0.0640	0.0469
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
-0.0469	-0.0640	-0.0640	-0.0640	-0.0469
-0.0147	-0.0933	-0.1253	-0.0933	-0.0147

表 4-5 M_{20} 模板数据

M_{20} 模板				
0.0099	0.0194	0.0021	0.0194	0.0099
0.0719	0.0277	0.0021	0.0277	0.0719
0.1019	0.0277	0.0021	0.0277	0.1019
0.0719	0.0277	0.0021	0.0277	0.0719
0.0099	0.0194	0.0021	0.0194	0.0099

表 4-6 M_{02} 模板数据

M_{02} 模板				
0.0099	0.0719	0.1019	0.0719	0.0099
0.0194	0.0277	0.0277	0.0277	0.0194
0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021
0.0194	0.0277	0.0277	0.0277	0.0194
0.0099	0.0719	0.1019	0.0719	0.0099

旋转 θ 后的直线模型如图 4-20 所示。

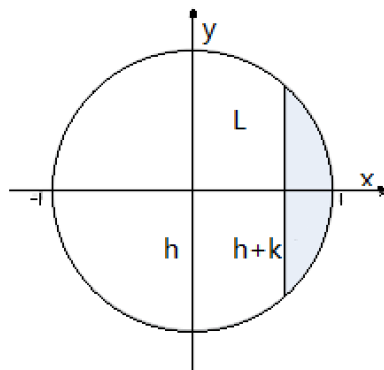


图 4-20 旋转 θ 后的直线模型

将单位圆绕原点旋转 θ 角, 使边缘垂直 x 轴, 矩 M_{pq} 旋转 θ 角后的复合矩 M_{pq}' 为式(4-18)

$$M_{pq}' = \sum_{r=0}^p \sum_{s=0}^q \left| \frac{p}{r} \right| \left| \frac{q}{s} \right| (-1)^{q-s} (\cos \theta)^{p-r+s} (\sin \theta)^{q+r-s} M_{p+q-r-s, r+s} \quad (4-18)$$

旋转后的直线边缘关于 x 轴对称, $M_{01}'=0$, 所以得到

$$\begin{aligned} \theta &= \arctan\left(\frac{M_{01}}{M_{10}}\right) \\ M_{00}' &= M_{00} \\ M_{10}' &= \sqrt{M_{01}^2 + M_{10}^2} \\ M_{20}' &= \frac{M_{10}^2 M_{20} + 2M_{01} M_{10} M_{11} + M_{01}^2 M_{02}}{M_{01}^2 + M_{10}^2} \\ M_{02}' &= \frac{M_{10}^2 M_{20} - 2M_{01} M_{10} M_{11} + M_{01}^2 M_{20}}{M_{01}^2 + M_{10}^2} \end{aligned}$$

对图积分, 得到 M_{00}' 、 M_{10}' 、 M_{20}' 的表达式, 见式(4-19)

$$\begin{cases} M_{00}' = h\pi + \frac{k}{2}\pi - k\sin^{-1}L - kL\sqrt{1-L^2} \\ M_{10}' = \frac{2}{3}k\sqrt{(1-L^2)^3} \\ M_{20}' = \frac{h}{4}\pi + \frac{k}{8}\pi + \frac{k}{2}L\sqrt{(1-L^2)^3} - \frac{k}{4}L\sqrt{1-L^2} - \frac{k}{4}\sin^{-1}L \end{cases} \quad (4-19)$$

解得边缘参数解, 见式(4-20)

$$\begin{cases} L = \frac{4M_{20}' - M_{00}'}{3M_{10}'} \\ k = \frac{3M_{10}'}{2\sqrt{(1-L^2)^3}} \\ h = \frac{2M_{00}' - h(\pi - 2\arcsin L - 2L\sqrt{1-L^2})}{2\pi} \end{cases} \quad (4-20)$$

亚像素坐标的解见式(4-21)至式(4-22)

$$\begin{cases} X = x + l \cos \theta \\ Y = y + l \sin \theta \end{cases} \quad (4-21)$$

$$\begin{cases} \cos \theta = \frac{M_{10}}{\sqrt{M_{01}^2 + M_{10}^2}} \\ \sin \theta = \frac{M_{01}}{\sqrt{M_{01}^2 + M_{10}^2}} \end{cases} \quad (4-22)$$

本课题采用宽度为 10 的矩形条阵列，对空间矩亚像素边缘检测算法进行仿真，实验用的矩形条阵列图像如图 4-21 所示，用本文设计的边缘检测算法对实验图像进行处理，得到的边缘图像如图 4-22 所示，接着用空间矩亚像素细分算法计算实验图像边缘的亚像素坐标，计算两条边缘之间的距离结果如表 4-7 所示。同时，本文用多项式插值亚像素边缘细分算法对实验图像作同样处理^[42,43]，计算出的边缘之间的距离也在表 4-7 中列出。从表 4-7 中数据看出，空间矩法和插值法的测量精度相差并不大，但是空间矩法的离散程度很小，检测结果稳定。



图 4-21 标准实验模板图

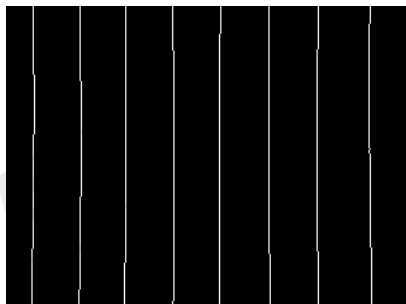


图 4-22 标准实验模板图像的边缘

表 4-7 亚像素边缘细分结果

项目	空间矩法	插值法	像素级检测
1	9.871	9.680	9
2	9.874	9.759	9
3	9.870	9.783	9
4	9.872	9.784	9
5	9.870	9.735	9
6	9.867	9.719	9
7	9.868	9.717	9
8	9.870	9.698	9
均值	9.870	9.734	9
方差	0.002	0.038	--

4.4 本章小结

本章主要介绍如何获取准确、精细的图像边缘。首先介绍了用直方图均衡化对图像进行直方图修正，增强图像的对比度；然后用中值滤波算法对图像进行滤波，以滤除外界干扰信息。在图像预处理完成后，用形态学边缘检测算法和 Canny 边缘检测算法相结合的方法对蒙皮孔图像进行边缘检测，获得整像素级的图像边缘信息；为了提高测量系统的测量精度，本文还用空间矩亚像素边缘细分算法对整像素级的边缘点进行计算，获得亚像素边缘点坐标。

中国知网
CNKI

第5章 测量系统的数据处理方法研究

前面章节对飞机蒙皮孔图像进行图像预处理、图像边缘处理和边缘的亚像素检测，获得了蒙皮孔的边缘点信息，本章要对这些点群进行圆的拟合，以获取蒙皮孔的圆心位置、圆的直径、计算埋头孔的深度以及圆的圆度误差等几何参数。

5.1 蒙皮孔的圆拟合方法研究

圆拟合常用的方法有最小二乘法拟合、多项式拟合、B 样条曲线拟合等，这些方法都可获得较高的拟合精度。其中，最小二乘法拟合圆是最常用的圆拟合方法，本课题用最小二乘法拟合圆^[44]。

5.1.1 滤除无效边缘信息的方法

图像边缘包括孔洞的边缘、蒙皮刮痕边缘、表面污渍形成的边缘等，图像滤波只能滤除微小细节的无效边缘信息，通常用到的图像处理方法很难去除尺寸较大的无效边缘信息。

本课题只对孔洞边缘感兴趣，可以设置一个感兴趣区域，称为 ROI 区域，使其仅涵盖孔洞边缘，忽略掉其他的无效边缘信息，这样就可以实现滤除无效边缘信息的目的。常用的 ROI 区域是矩形的，这里要自己编程实现圆环 ROI 区域的设置。在取孔洞边缘时可以分两次进行提取，先提取内圆边缘，再提取外圆边缘，最后将内外圆边缘合并到整体图像边缘。

首先要确定圆形 ROI 区域的圆心位置，可以根据蒙皮孔图像的特点得到圆心的近似位置。飞机蒙皮孔图像的特点是孔洞中心在水平和垂直方向的单侧灰度投影最小，接近于零。利用蒙皮孔图像的这一特点可以找到圆孔的大致圆心位置，以这个圆心为 ROI 圆环区域的圆心，以稍大于蒙皮孔直径的值为 ROI 的直径，以此确定 ROI 的定位和尺寸。图 5-1 为确定 ROI 圆心的图示。

在 ROI 区域的位置和大小确定后，对原始图像进行操作。对图像操作的 Opencv 中的函数表达式为 `cvAnd(src, res, mask)`。`cvAnd` 表示对 `src` 和 `src` 在 `mask` 区域内进行对应位作“与”运算，将结果输出到 `res` 图像中，通过上述操作可以得到较为理想的边缘图像。图 5-2 中的图 a) 至图 e) 为 ROI 去除无效边缘的图像效果。

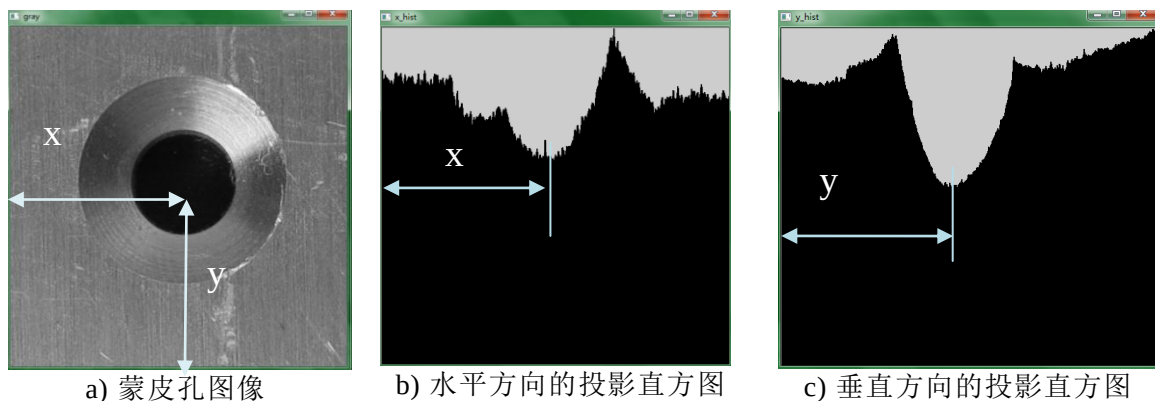


图 5-1 ROI 方法大致确定圆心位置

用 ROI 模板可以滤除大部分的无效边缘信息点，但是离蒙皮孔边缘比较近的一些点仍然无法去掉。还要通过其他的办法进行去除杂质信息。

首先对图像边缘点进行最小二乘法的圆拟合，得到圆心和半径的初始值，最小二乘法的具体方法在下一节中介绍。然后去除距离边缘点较远的点，也就是残差较大的点，再用去掉残差后的剩余边缘点进行第二次最小二乘法的圆形拟合，得到精度更高的拟合圆的参数值，图 5-2 中图 d) 经过上面方法去除无效边缘后的蒙皮孔图片效果如图 5-2 中 f) 所示。

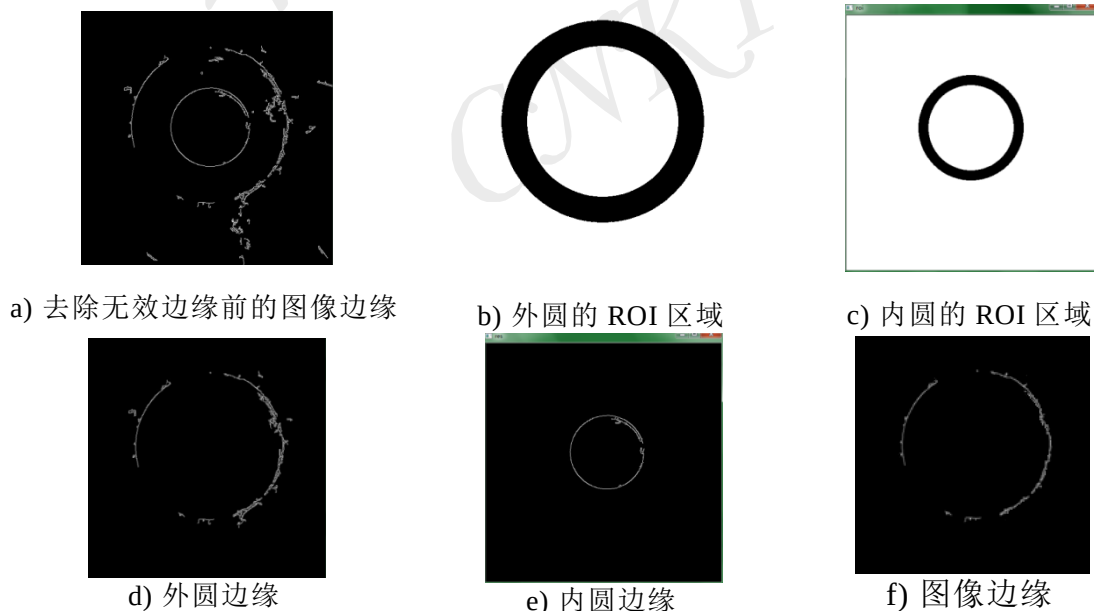


图 5-2 ROI 滤除杂质信息

以上对蒙皮孔图像进行杂质信息滤除的程序流程图如图 5-3 所示。

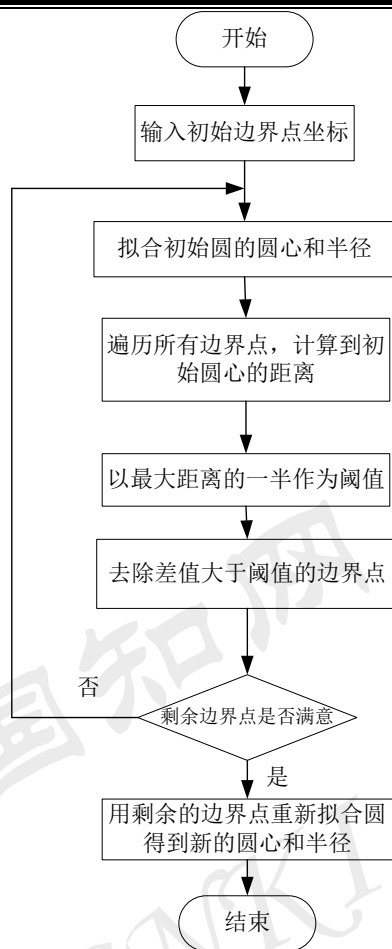


图 5-3 阈值法去噪的程序流程图

5.1.2 最小二乘法拟合圆

最小二乘法是通过使误差的平方和最小, 让最终的拟合函数最优匹配数据群。本课题采用的最小二乘法拟合圆的示意图如图 5-4 所示, 式(5-1)为图中圆方程的表达式

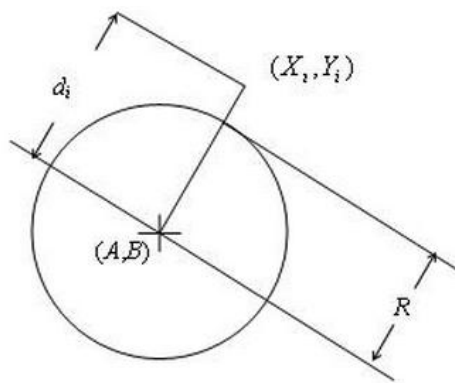


图 5-4 拟合圆示意图

$$R^2 = x^2 - 2Ax + A^2 + y^2 - 2By + B^2 \quad (5-1)$$

令 $a = -2A, b = -2B, c = A^2 + B^2 - R^2$ 得到圆曲线方程的另一种形式, 如式(5-2)所示

$$x^2 + y^2 + ax + by + c = 0 \quad (5-2)$$

只要求出参数 a, b, c , 就可以求出圆心和半径的值。样本集合 (X_i, Y_i) , $i \in (1, 2, \dots, N)$ 中的点到拟合圆心的距离为 d_i , 见式(5-3)

$$d_i^2 = (X_i - A)^2 + (Y_i - B)^2 \quad (5-3)$$

点 (X_i, Y_i) 到拟合圆边缘的距离的平方值与半径平方的差为式(5-4)

$$\delta_i = d_i^2 - R^2 = (X_i - A)^2 + (Y_i - B)^2 - R^2 = X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c \quad (5-4)$$

假设 $Q(a, b, c) = \delta_i^2$, 使其分别对 a, b, c 求偏导, 令偏导数等于零, 求得极值点, 如式(5-5)所示, 比较得到的极值点的函数值就可以得到最小值

$$\begin{cases} \frac{\partial Q(a, b, c)}{\partial a} = \sum 2(X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c)X_i = 0 \\ \frac{\partial Q(a, b, c)}{\partial b} = \sum 2(X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c)Y_i = 0 \\ \frac{\partial Q(a, b, c)}{\partial c} = \sum 2(X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c) = 0 \end{cases} \quad (5-5)$$

解这个方程组得到结果, 见式(5-6)

$$\begin{cases} C = (N \sum X_i^2 - \sum X_i \sum X_i) \\ D = (N \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i) \\ E = N \sum X_i^3 + N \sum X_i Y_i^2 - \sum (X_i^2 + Y_i^2) \sum X_i \\ G = (N \sum Y_i^2 - \sum Y_i \sum Y_i) \\ H = N \sum X_i^2 Y_i + N \sum Y_i^3 - \sum (X_i^2 + Y_i^2) \sum Y_i \end{cases} \quad (5-6)$$

解得 a, b, c 的值如式(5-7)所示

$$\begin{cases} a = \frac{HD - EG}{CG - D^2} \\ b = \frac{HC - ED}{D^2 - GC} \\ c = -\frac{\sum (X_i^2 + Y_i^2) + a \sum X_i + b \sum Y_i}{N} \end{cases} \quad (5-7)$$

由此可以得到 A, B, R 的估计拟合值, 如式(5-8)所示

$$\begin{cases} A = \frac{a}{-2} \\ B = \frac{b}{-2} \\ R = \frac{1}{2}\sqrt{a^2 + b^2 - 4c} \end{cases} \quad (5-8)$$

5.1.3 拟合圆的精度验证

新建一幅图像，在图像上画一个半径为 100，圆心坐标为(200,200)的填充圆，然后对图像进行边缘提取，用本节的最小二乘拟合进行圆心和半径的拟合，如图 5-5 所示。

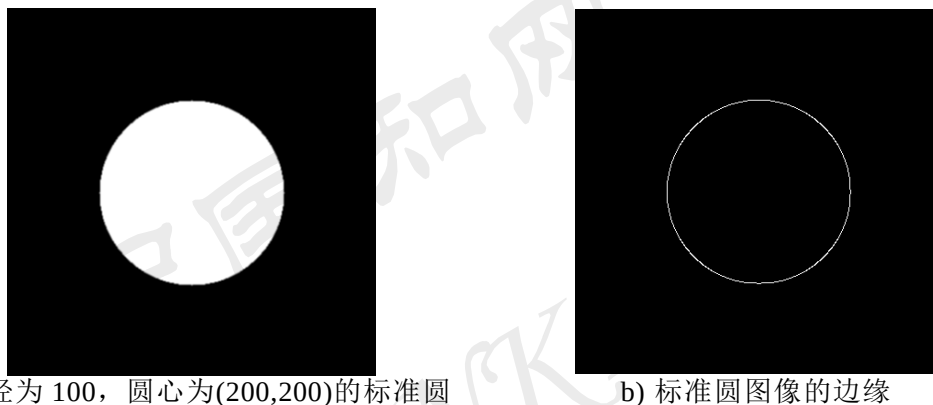


图 5-5 拟合圆精度验证模板图

拟合得到的圆的半径为 100.565，圆心坐标是（198.834，198.739）。半径的误差小于 1 个像素，圆心坐标的误差小于 2 个像素值，仿真误差满足使用要求。

5.2 蒙皮孔的圆度误差的研究

孔的圆度误差常用的处理方法有最小包容区域法、最小二乘法、最大内接圆法和最小外接圆法等多种数据处理方法，本课题用最小二乘法计算。前面已经计算出最小二乘圆的圆心和半径，只需要再计算实际孔洞边缘点到最小二乘圆的圆心的距离的最大值和最小值，然后二者差值即是圆度值。图 5-6 是蒙皮孔圆度误差计算的流程图。

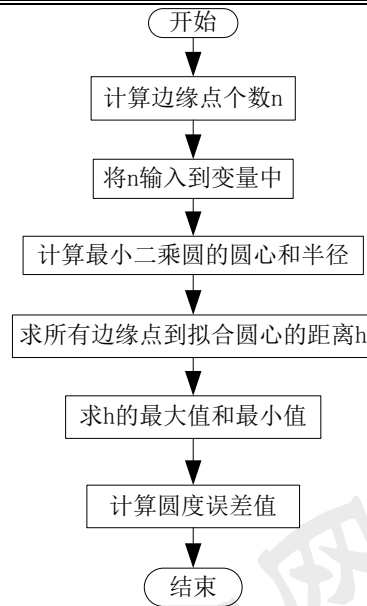


图 5-6 蒙皮孔圆度误差计算流程图

5.3 测量结果实验验证

5.3.1 像素当量的计算

在计算零件的实际物理尺寸时，需要知道图像中单位像素代表的实际物理尺寸，也称为像素当量。前面介绍到，蒙皮孔测量设备工作时，CCD 镜头到蒙皮表面的距离是固定的，也就是说像素当量是固定的，可以提前将像素当量计算出来，在后面的计算过程中直接应用。

物体的实际尺寸和数字图像像素的对应关系可以用一个正交的直角坐标系表示，如图 5-7 所示。本课题所用的相机在水平、垂直两个方向上的像素当量是相等的，所以只需要测量一个方向上的像素当量。

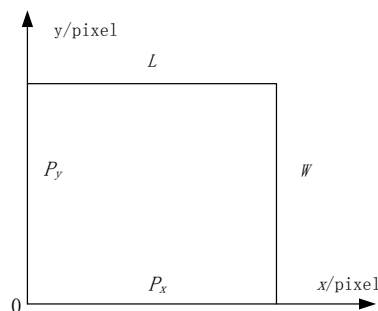


图 5-7 正交坐标系

计算像素当量所用的公式为式(5-9)

$$\begin{cases} K_x = L / P_x \\ K_y = W / P_y \end{cases} \quad (5-9)$$

式中 L ——物体的实际长度；

W ——物体的实际宽度；

P_x ——图像中物体的像素宽度，单位为像素；

P_y ——图像中物体的像素高度，单位为像素。

标定的步骤如下：

(1) 选取一个一直尺寸为 L 的标准件，当作标定样件，这里选择游标卡尺，将长度调整到 10mm。

(2) 将标定样件放置在工作台上进行测量，用 Hough 变换提取图像上的图像边缘，测得的以像素为单位的样件尺寸为 P ，如图 5-8 所示。

(3) 按照公式 $K = L / P$ 计算像素当量。

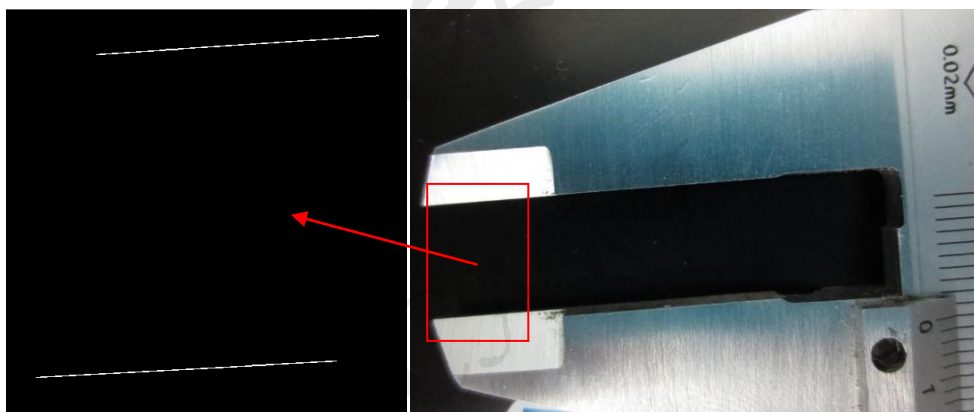


图 5-8 游标卡尺图像

像素当量计算的程序流程图如图 5-9 所示，图像中两条直线之间的像素个数统计结果见表 5-1，最后得到的像素当量为 12.495um/pixel。

表 5-1 像素当量计算结果(pixel)

测量次数	结果
1	797.671
2	799.780
3	800.889
4	802.999
均值	800.335

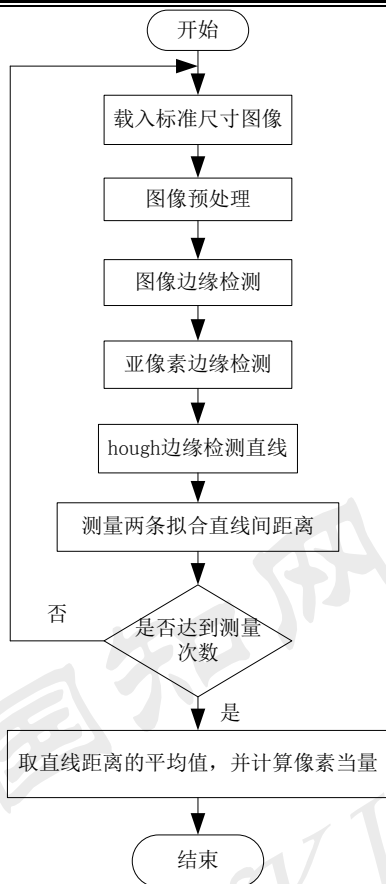


图 5-9 像素当量计算流程图

5.3.2 蒙皮孔几何参数的测量结果

用本课题前面设计的测量方法对蒙皮孔样件的一个孔进行测量, 得到内孔和外孔的直径, 然后通过计算得出埋头孔的深度, 埋头孔的角度是 90° 。测量结果如表 5-2 所示。

表 5-2 蒙皮孔几何参数测量结果

项目	内孔直径	外孔直径	埋头孔深度
像素个数 (pixel)	403.762	737.175	—
实际长度 (mm)	5.045	9.211	2.083

为了对视觉测量系统测量得到的结果进行评价, 需要有一种测量精度更高的工具给出蒙皮孔几何参数的标准尺寸, 这里用具有图像测量功能的光学显微镜对蒙皮孔的内孔直径进行多次测量, 取平均值作为蒙皮孔直径的标准值, 测量准确度为 $1.1\mu\text{m}$, 如图 5-10 所示; 用测深千分尺对埋头孔深度进行多次测

量,取平均值作为蒙皮孔埋头孔深度的标准值,测量准确度为 10 μ m,如图 5-11 所示。



图 5-10 具有图像测量功能的显微镜



图 5-11 测深千分尺

对蒙皮孔内孔直径和埋头孔深度的误差计算结果如表 5-3 所示。

表 5-3 误差计算结果

项目	标准值	软件测量结果	测量误差
孔径	5.044	5.045	0.001
埋头孔深度	2.068	2.083	0.015

经过多次实验表明,蒙皮孔的内孔直径的测量结果满足测量误差要求,与标准测量值相差不多;蒙皮孔埋头孔深度与标准测量值相差较大,但仍然在误差允许范围内。根据以上实验结果分析可以得出结论,本课题设计的飞机蒙皮孔几何参数视觉测量系统可以准确、有效的测量出飞机蒙皮孔的几何尺寸,满足实际测量要求。

5.4 蒙皮孔测量系统的软件界面编制

本课题的软件界面是在 VS 2008 MFC 和 Opencv2.3.1 环境下进行开发的,系统需要在安装 VS2008 和 Opencv2.3.1 环境下才可以运行,操作系统是 windows7。软件对运行环境的要求比较低,现在一般的计算机硬件都能达到要求,由于软件运行时需要对图形信息进行快速计算,因此系统的内存不小于 1GB。飞机蒙皮孔几何参数视觉测量系统的界面如图 5-12 所示。

由蒙皮孔几何参数视觉测量系统的软件界面可以看到,软件包括图像显示区域、参数设定区域、检测结果显示区域、处理进度条等,各部分介绍如下:

(1) 图像显示区域:可以将 CCD 相机拍摄到的蒙皮孔图像显示到界面当中,对图像处理时也会实时显示各个阶段对图像的处理结果。

(2) 参数设定:在参数设定区域,可以设置蒙皮孔的类型、埋头孔的斜角、对图像进行放大或者缩小等。

(3) 处理进度：进度条实时显示图像处理进行到什么阶段。



图 5-12 飞机蒙皮孔几何参数视觉测量界面

5.5 本章小结

本章主要介绍蒙皮孔边缘点的拟合方法、误差计算、实验验证和软件界面。首先介绍了拟合之前对无效边缘点用 ROI 方法进行滤除；然后用最小二乘法对边缘点进行了拟合计算和拟合误差分析；接着对蒙皮孔圆度的计算方法和误差进行了分析；用编译的软件程序对蒙皮孔图像进行处理，得出了蒙皮孔的几何尺寸，并对其进行了误差计算，实验结果表明本课题研发的测量系统能比较准确测量出蒙皮孔的几何参数尺寸；最后介绍了用 MFC 和 Opencv 编制的便于用户操作的可视化界面。

结论

通过飞机蒙皮孔的加工精度确定了蒙皮孔视觉测量系统的测量精度,对蒙皮孔测量系统提出了总体测量方案,研究了测量系统的测量基准,并对测量基准的标定提出了一种自标定算法;其次对测量系统的硬件系统进行了设计,对 CCD 相机、光学镜头、照明光源、图像采集卡进行了分析和选型;然后对采集到的蒙皮孔图像进行了图像预处理算法研究、整像素级边缘算法研究、亚像素级边缘定位算法研究;接着对取得的图像边缘信息进行了无效边缘滤除,对边缘点进行最小二乘拟合圆,得出拟合圆的圆心位置和直径,计算了埋头孔的深度,并根据实验验证了飞机蒙皮孔视觉测量系统的有效性;最后基于 MFC 编译了方便用户操作的可视化图形界面。

通过本课题的研究得出以下结论:

(1) 根据蒙皮孔的特点和加工精度,确定出孔的测量精度为 0.008mm ,埋头孔深度的测量精度为 0.018mm ;测量系统采用垂直测量方案,这样可以简化数据处理步骤,提高测量精度;采用制孔时确定的孔位轴向位置作为蒙皮孔测量系统的测量基准,对测轴向时的激光测距传感器的安装位置提出一种自标定的算法,可以确保激光测距传感器安装到正确的位置。

(2) 根据测量精度和视窗大小对 CCD 相机和光学镜头进行选型,选择的相机和光学镜头组成的系统的分辨率低于要求的性能,用亚像素边缘定位算法进行精度补偿;然后对蒙皮孔测量系统的照明光源进行分析,选择了环形光源照明,以消除图像中的阴影;最后对测量系统的图像采集卡的性能进行分析,选择性能满足要求并且和相机匹配的图像采集卡。

(3) 用灰度直方图均衡化对图像进行直方图修正,增强图像的对比度;然后用中值滤波算法对图像进行滤波,滤除外界干扰信息;在蒙皮孔图像预处理完成后,用形态学边缘检测算子和 Canny 边缘检测算子相结合的方法对图像进行处理,获得整像素级的图像边缘信息;为了弥补 CCD 相机的分辨率不高的问题,进一步提高图像测量精度,用空间矩亚像素边缘细分算法对整像素级的边缘点进行计算,获得亚像素边缘点坐标,为下一步数据拟合做准备。

(4) 对无效边缘点用 ROI 方法进行滤除;用最小二乘法对边缘点进行了拟合计算和拟合误差分析;用最小二乘法计算拟合圆的圆度,给出拟合圆的圆度误差误差;用编制的图像处理软件对蒙皮孔进行测量,将测量结果与用其他工具测量出的蒙皮孔的标准尺寸对比,实验结果表明本课题设计的测量系统能够

比较准确测量出蒙皮孔的几何尺寸；最后用 MFC 和 Opencv 编制的便于用户操作的可视化界面。

本课题后续可开展的工作如下：

(1) 本课题的实验验证是在实验室环境中完成的，实际工作环境中的执行台振动、光源干扰等没有完全考虑在内，需要对复杂工作环境中的测量系统提出改进措施。

(2) 蒙皮孔边缘刮擦严重时，对最后的测量精度有较大影响，需要针对这种情况提出改进措施。

(3) 在确定蒙皮孔测量系统的测量基准时，没有考虑蒙皮的曲率变化带来的轴向误差，这会对测量结果造成一定影响，由于本论文只是针对小曲率表面上的蒙皮孔进行测量，这一因素对本论文影响可以忽略，但是在下一阶段对大曲率表面上的蒙皮孔进行测量时，应该将这一因素考虑在内。

参考文献

- [1] 袁红璇. 飞机结构件连接孔制造技术[J]. 航空制造技术, 2007, 1: 96-99.
- [2] DeVlieg R, Sitton K, Feikert E, et al. ONCE (one-sided cell end effector) robotic drilling system[C]. SAE 2002 Automated Fastening Conference & Exposition, Chester, ENGLA. SAE Technical Papers. 2002: 01-2626.
- [3] Atkinson J, Hartmann J, Jones S, et al. Robotic drilling system for 737 aileron[C]. SAE 2007 AeroTech Congress & Exhibition, Los Angeles, CA, USA. SAE Technical Papers. 2007: 01-3821.
- [4] 贾云得. 机器视觉[M]. 科学出版社, 2000.
- [5] 张广军. 机器视觉[M]. 科学出版社, 2005.
- [6] 钱竞业. 机器视觉的发展方向探讨[J]. 现代制造, 2006 (6): 36-37.
- [7] Santos Gomes, Applications of computer vision techniques in the agriculture and food industry[J]. 2012, 235: 989-1000.
- [8] 王巧华, 文友先, 刘俭英. 我国机器视觉技术的发展前沿[J]. 农机化研究, 2002, 4: 16-19.
- [9] Atkinson J, Hartmann J, Jones S, et al. Robotic drilling system for 737 aileron[C]. SAE 2007 AeroTech Congress & Exhibition, Los Angeles, CA, USA. SAE Technical Papers. 2007: 01-3821.
- [10] Ramulu M, Branson T, Kim D. A study on the drilling of composite and titanium stacks[J]. Composite Structures, 2001, 54(1): 67-77.
- [11] Liang J, Bi S. Design and experimental study of an end effector for robotic drilling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 50(1-4): 399-407.
- [12] 徐晓秋. 机器视觉球面孔位快速精密测量系统的研究[D]. 四川大学, 2006.
- [13] Kim, PyUnghyun, Rhee,Sehun. Three dimensional inspection of bell grid array using laser vision system[J]. IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, 1999, 22(2): 151-155.
- [14] Okawa Y. Automatic inspection of the surface defects of cast metals[J]. Computer vision, graphics, and image processing, 1984, 25(1): 89-112.
- [15] Perkins W A. INSPECTOR: A computer vision system that learns to inspect parts[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 1983 (6): 584-592.
- [16] W S Wilson. The role of vision in a dimensional control strategy[J]. Proc. of the Society of Manufacturing Engineers Conf, on Vision Section 7, 1985, pp: 43-55.
- [17] Schubert E, Klicker J, Schroeder A. Vision system for empty PET-bottle

- classification inside the box[C]. Photonics for Industrial Applications. International Society for Optics and Photonics, 1994: 148-156.
- [18] Bartleet T C, de Jager G. Real-time machine vision inspection of plastic bottle closures[C]. Photonics East'95. International Society for Optics and Photonics, 1995: 362-370.
- [19] 朱铭煜, 周武能. 图像处理在药片视觉检测系统中的应用[J]. 仪表技术与传感器, 2011, 5: 031.
- [20] Betrouni N, Vermandel M, Pasquier D, et al. Segmentation of abdominal ultrasound images of the prostate using a priori information and an adapted noise filter[J]. Computerized Medical Imaging and Graphics, 2005, 29(1): 43-51.
- [21] Sokolov A, Xirouchakis P. Singularity analysis of a 3-DOF parallel manipulator with RPS joint structure[J]. Robotica, 2006, 24(1): 131-142.
- [22] Jihua Z, Ahmad R, Yuqing F. Research for major-parts digital assembly system of large-scale airplane[C]. Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on Circuits, Systems, Electronics, Control & Signal Processing. World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), 2006: 337-343.
- [23] 杜兆才. 数字化钻铆的曲面法向测量方法[J]. 航空制造技术, 2011, 22: 026.
- [24] 薛汉杰, 张敬佩. 蒙皮类部件钻孔法向的测量和调整[J]. 航空制造技术, 2010, 23: 60-62.
- [25] 卜泳, 许国康, 肖庆东. 飞机结构件的自动化精密制孔技术 [J]. 航空制造技术, 2009, 1(4): 61-64.
- [26] 毕树生, 宗光华, 梁杰. 机器人技术与航空制造业[J]. 机器人技术与应用, 2009, 3: 009.
- [27] 官云兰, 程效军, 施贵刚. 一种稳健的点云数据平面拟合方法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2008, 36(7): 981-984.
- [28] Hussmann S, Ho T H. A high-speed subpixel edge detector implementation inside a FPGA[J]. Real-Time Imaging, 2003, 9(5): 361-368.
- [29] 林家明. 面阵 CCD 摄像机光学镜头参数及其相互关系[J]. 光学技术, 2000, 26(2): 183-185.
- [30] 段峰, 王耀南, 雷晓峰, 等. 机器视觉技术及其应用综述[J]. 自动化博览, 2002, 3: 59-62.
- [31] 曲兴华, 何滢, 韩峰, 等. 强反射复杂表面随机缺陷检测照明系统分析[J]. 光学学报, 2003, 23(5): 547-551.
- [32] 官理. 数字图像的灰度修正[J]. 计算机与现代化, 2003, 93(5): 40-42.

- [33] 夏良正. 数字图像处理[M]. 南京:东南大学出版社.1999:54-55.
- [34] 刘广玉, 陈明, 吴志鹤. 新型传感器技术及应用[M]. 北京航空航天大学出版社, 1995.
- [35] 于起峰, 测量学, 陆宏伟, 等. 基于图像的精密测量与运动测量[M]. 科学出版社, 2002.
- [36] 陈向伟, 王龙山, 刘庆民. 图像技术在微小零件几何尺寸测量中的应用[J]. 光电工程, 2003 (2).
- [37] 王芬芬, 白秋果, 王彪, 等. 基于多结构元素的形态学抗噪边缘检测算法[J]. 电子测量技术, 2008, 31(4): 36-37.
- [38] 陈虎, 王守尊, 周朝辉. 基于数学形态学的图像边缘检测方法研究[J]. 工程图学学报, 2004, 25(2): 112-115.
- [39] Englander A. Expanding machine vision gauging with sub-pixel techniques[J]. Sensors-J. Machine Perception, 1987, 4(5): 5-18.
- [40] Tabatabai A J, Mitchell O R. Edge location to subpixel values in digitalimagery[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 1984 (2): 188-201.
- [41] Lyvers E P, Mitchell O R, Akey M L, et al. Subpixel measurements using a moment-based edge operator[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 1989, 11(12): 1293-1309.
- [42] 吴晓波, 钟先信.应用多项式插值函数提高面阵 CCD 尺寸测量的分辨率[J]. 仪器仪表学报,1996,7(2):152-159.
- [43] 李庆利, 张少军, 李忠富.一种基于多项式插值改进的亚像素细分算法[J]. 北京科技大学报, 2003,25(3): 280-283.
- [44] 田社平, 张守愚, 李定学, 愈朴. 平面圆圆心及半径的最小二乘拟合. 实用测试技术, 1995, 5: 23-25.

哈尔滨工业大学学位论文原创性声明和使用权限

学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《基于机器视觉的飞机蒙皮孔几何参数检测技术研究》，是本人在导师指导下，在哈尔滨工业大学攻读学位期间独立进行研究工作所取得的成果，且学位论文中除已标注引用文献的部分外不包含他人完成或已发表的研究成果。对本学位论文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。

作者签字：邓松波 日期：2013年 7月 3日

学位论文使用权限

学位论文是研究生在哈尔滨工业大学攻读学位期间完成的成果，知识产权归属哈尔滨工业大学。学位论文的使用权限如下：

(1) 学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文，并向国家图书馆报送学位论文；(2) 学校可以将学位论文部分或全部内容编入有关数据库进行检索和提供相应阅览服务；(3) 研究生毕业后发表与此学位论文研究成果相关的学术论文和其他成果时，应征得导师同意，且第一署名单位为哈尔滨工业大学。

保密论文在保密期内遵守有关保密规定，解密后适用于此使用权限规定。本人知悉学位论文的使用权限，并将遵守有关规定。

作者签名：邓松波 日期：2013年 7月 3日

导师签名：赵子昂 日期：2013年 7月 3日

致谢

本课题的研究工作是在导师赵学增教授和王武义教授的悉心指导下完成的。从进入课题时的艰难至今天论文的顺利完成，我真切感觉到了自己的进步，在此向两位老师表示由衷的感谢。两位老师渊博的知识、严禁的治学态度、谦和的为人使我受益匪浅，给我留下了深刻的印象。在完成课题的过程中，我学会了研究问题和分析问题的思路和方法，老师们对学术敏锐的洞察力和实事求是的学术作风将会使我终身受益。

论文的完成还得到了王伟杰老师、陈芳老师的指导，他们对我在课题研究过程中所遇到的困难给予无私的帮助，使我顺利完成了科研工作，谨此向他们表示真挚的感谢及由衷的敬意。在课题的研究工程中还得到了潘昀路博士和李铁凡博士的帮助，在和师兄交流和讨论过程中得到了很大的启发，使我对问题的解决思路更加清晰，在此向师兄们表示由衷的感谢。

感谢传感与测控技术实验室的老师、师兄和同学们在研究课题的过程中给我的帮助和建议，同时也要感谢我的父母和亲人，是他们对我的支持和鼓励才使我能够顺利完成学业。

最后特别感谢答辩组的老师在开题和中期检查中对我的帮助和建议，他们对我的启发使我对课题的研究更加深入和透彻。