



中国第一所现代大学  
FOUNDED IN 1895

# 天津大学

TIANJIN UNIVERSITY

## 全日制工程硕士学位论文

DISSERTATION OF FULL-TIME MASTERS OF ENGINEERING

领 域: 仪器仪表工程  
作者姓名: 曹 雨  
指导教师: 王向军 教授  
企业导师: 王 敏 工程师

天津大学研究生院

2016 年 12 月

## 独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，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 天津大学 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了谢意。

学位论文作者签名：曹雨

签字日期：2016 年 12 月 3 日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津大学 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，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

（保密的学位论文在解密后适用本授权说明）

学位论文作者签名：曹雨

导师签名：张德军

签字日期：2016 年 12 月 3 日

签字日期：2016 年 12 月 3 日

# 基于合作目标和单相机的空间相对位姿测量方法研究

## Research on simple monocular spatial relative position and attitude measurement of cooperative target

工 程 领 域: 仪器仪表工程

作 者 姓 名: 曹 雨

指 导 教 师: 王向军 教 授

企 业 导 师: 王 敏 工程师

天津大学精密仪器与光电子工程学院

二零一六年十二月

# 摘 要

本课题基于两自由坐标系之间的相对位姿测量问题，引入新的姿态角定义方法，提出了基于合作目标的单相机的空间相对位姿测量方法，并基于 FPGA 平台完成了图像预处理算法获得二值化图像以提取目标点的图像坐标。经过仿真分析与实验验证的方法表明本系统测量精度、速度均满足系统设计指标要求。

本课题的测量系统由 CMOS 图像采集模块、FPGA 图像预处理模块、DSP 位姿解算模块以及平面双环 LED 靶标四大部分组成。基于二维合作目标的单相机视觉位姿测量模型中，引用的新的姿态角定义方法，没有三个角度旋转顺序的限制。利用四个 LED 靶标坐标信息解算系统的平面单应矩阵，通过单应矩阵即可导出系统的三个旋转角与三维坐标。算法在保证解算精度的同时，降低了计算复杂度，减小了计算量，在一定程度上提高了系统的有效性。

本系统利用 FPGA 的高速处理与并行运行等特点，基于 FPGA 平台实现 CMOS 相机的参数配置、实时视频的中值滤波、直方图均衡以及二值化等图像预处理算法，既满足了系统的实时性要求，又可根据系统优化需要进行现场性能维护和功能扩展，增加了系统的灵活性和通用性。

通过对位姿测量算法中的像素图像坐标误差和靶标位置误差两种误差源进行误差分析，确定了系统参数的误差范围，并搭建仿真实验平台，进行室外仿真实验以及与 Fischler 的 P3P 算法的对比实验验证了本文算法的位置和姿态的测量精度；通过对 FPGA 预处理图像的效果对比，验证了图像预处理模块的有效性，并以实时测量数据说明了本系统的实时性。经过实验验证与对比分析，充分证明了本系统满足课题精度与速度要求，在基于两自由坐标系之间的相对位姿测量领域有一定的实用性和有效性。

**关键词：**单目视觉测量， FPGA， 图像预处理， 位姿测量， 二维合作目标

# ABSTRACT

Based on the problem of relative pose measurement between two free coordinate systems, a new attitude angle definition method is introduced and a plane object position and attitude solution algorithm based on monocular vision is proposed. And this paper use FPGA platform to realize the image preprocessing algorithm which is used to obtain the binarized image to extract the image coordinates of the target point. The results of simulation analysis and experimental verification show that the measurement accuracy and speed of the system meet the system design requirements.

This measurement system consists of four parts: CMOS module(image acquisition module), FPGA module(image preprocessing module), DSP module(pose solving module) and the planar double-loop LED target. In the measurement model which uses a plane object position and attitude solution algorithm based on monocular vision, a new attitude angle definition method is introduced, and the three attitude angles are not restricted by the order of rotation. The three attitude angles and position vectors of the plane model with respect to the camera coordinate system can be directly derived from the plane homography matrix which can be solved by using 4 coplanar LED light sources' coordinate information. The algorithm in this paper satisfies the system precision requirement, reduces the computational complexity and improves the effectiveness of the system to a certain extent.

This system takes use of advantages of FPGA, including high-speed processing speed and parallel operation to implement the configuration of CMOS camera parameters, median filtering algorithms, histogram equalization and binarization algorithms of the real-time video images. Through this way, this system meets the real-time requirements of the system, and we can conduct field performance maintenance and function expansion according to the needs of system optimization. Using FPGA increases flexibility and versatility of the system.

With the error analysis of two kinds of error sources which are the pixel image coordinates and target location error in object coordinate in this pose measurement algorithm, the error range of these two parameters is determined. And to verify the

accuracy of the position and attitude of the proposed algorithm, we build the simulation platform to carry out simulation experiment outdoors and compare with Fischler's P3P algorithm; we verify the effectiveness of FPGA module by the comparison of the processed image and original image, and use the real-time measurement data to illustrate the real-time performance of the system. Through the experimental verification and comparative analysis, it fully proves that this system meets the requirements of accuracy and speed, and has a certain practicality and effectiveness in the relative position and attitude measurement between two free coordinate systems.

**KEY WORDS** : Monocular vision, FPGA, Image processing,  
Pose measurement, Two-dimensional cooperation objectives

<http://www.ixueshu.com>



# 目 录

摘 要.....	I
ABSTARCT .....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题背景及意义.....	1
1.2 基于单相机的目标定位的研究现状.....	3
1.3 基于 FPGA 的图像预处理算法实现的研究现状.....	3
1.4 本文主要研究内容.....	4
第 2 章 单相机空间位姿测量解算原理.....	7
2.1 基于单相机的目标定位系统.....	7
2.2 基于单相机的空间位姿解算.....	9
2.2.1 单相机成像模型.....	9
2.2.2 单相机位姿测量解算模型.....	12
2.3 单相机标定方法.....	25
第 3 章 图像采集及预处理.....	27
3.1 基于 FPGA 设计的基本流程与原则.....	27
3.1.1 FPGA 设计的基本流程.....	27
3.1.2 FPGA 设计的基本原则.....	28
3.2 目标点图像信息提取方法.....	29
3.3 基于 FPGA 的图像采集及图像预处理实现.....	30
3.3.1 基于 FPGA 的图像采集系统设置.....	30
3.3.2 基于 FPGA 的实时图像预处理实现.....	32
第 4 章 位姿测量系统的仿真分析与实验验证 .....	37
4.1 系统测试环境介绍.....	37
4.2 基于单相机的空间位姿测量算法的误差仿真分析.....	39
4.2.1 影响测量精度的因素.....	39
4.2.2 像素坐标误差对系统测量的影响.....	40
4.2.3 靶标点位置误差对系统测量的影响.....	44
4.2.4 仿真分析结论.....	46
4.3 位姿测量系统的实验验证.....	46
4.3.1 单相机内参标定.....	46

4.3.2 姿态角测量实验 .....	48
4.3.3 三维坐标测量实验 .....	51
4.3.4 对比实验 .....	52
4.3.5 图像预处理实验 .....	55
4.3.6 算法解算速度 .....	55
4.4 实验结论 .....	56
<b>第 5 章 总结与展望 .....</b>	<b>57</b>
5.1 工作总结 .....	57
5.2 工作展望 .....	58
<b>参考文献 .....</b>	<b>59</b>
<b>发表论文和参加科研情况说明 .....</b>	<b>63</b>
<b>致 谢 .....</b>	<b>65</b>

<http://www.ixueshu.com>



## 第 1 章 绪论

### 1.1 课题背景及意义

本课题是基于两自由坐标系之间的相对位姿测量问题,提出的单相机空间靶标点的位姿解算算法以及基于 **FPGA** 的图像预处理<sup>[1]</sup>的实现。求解两自由坐标系之间的相对位置和姿态关系是空间交会对接<sup>[2][3]</sup>中的关键技术问题,在无人机自主空中加油<sup>[4]</sup>与智能化控制领域已经有了相当的研究成果和具体的应用,目前比较经典的方法主要包括基于 **GPS**、平面视觉传感器和其他辅助通信等导航定位技术手段等。

一般来说,两自由坐标系的应用环境复杂,且二者的相对运动状态可能实时改变,所以在基于 **GPS** 或者其他辅助通信等导航定位技术手段的相对位姿测量中,**GPS** 或通信信号易受干扰,造成测量系统的不稳定。而视觉传感器<sup>[5]</sup>以其在高动态环境下依然能够提供高精度数据源的特点成为两自由坐标系间相对位姿估算的最佳选择。在基于视觉传感器的位姿估算系统中,以视觉传感器系统所确定的自由坐标系为基准坐标系,以第二个自由坐标系的所在系统为目标系统,通过视觉传感器对目标系统成像,结合像点与相机成像模型即可获得目标系统相对于基准坐标系中的位置和姿态信息。

利用视觉测量系统估算空间目标点的相对位姿主要分为单目视觉测量<sup>[6][7][8]</sup>和多目视觉测量<sup>[9][10]</sup>两大类,相对于多目视觉测量视场范围小、立体匹配困难等缺点,单目视觉测量具有结构简单、测量视场大、实时性强并能够保证测量精度的特点,因此较广泛的应用于两自由坐标系间相对位姿解算的领域。单目视觉测量系统主要分为基于合作目标<sup>[11][12]</sup>和基于非合作目标<sup>[13][14]</sup>两种。由于非合作目标的特征点没有按照测量需求排列,在不同应用背景下可提取的特征不固定,所以基于非合作目标的单相机测量方法存在特征提取难度大、提取精度较低、位姿解算复杂等缺点。合作目标位姿测量中目标特征点之间的空间约束关系可控制,虽然在一定程度上限制了应用范围,但是克服了非合作目标测量存在的普遍问题。

本文设计的单相机空间位姿测量系统利用视觉传感器估算相对位姿,主要是根据单目视觉原理,完成对测量距离为 1~5m 范围内的合作靶标的位姿估算。目标系统安装有合作 **LED** 靶标盘,利用单相机对 **LED** 靶标实时成像,通过实时图像采集、图像预处理、特征点提取、位姿解算等步骤完成对目标系统的位置和姿态的实时解算。经仿真实验验证,本系统采用的基于二维合作目标的单相机空间

目标解算算法满足课题精度要求，由于算法简单，且基于 DSP 平台实现位姿解算算法，充分发挥 DSP 高速数据运算的优势，完成系统的实时位姿解算。

根据系统测量要求需要保证位置和姿态的解算精度，相机的内、外参数标定应不受系统使用环境的限制且不能影响目标系统空间位姿测量的实时数据输出。本系统中相机的内部参数标定采用 matlab 工具箱的 toolbox 方法<sup>[15]</sup>，是在相机使用之前事先标定；系统的世界坐标系定义为相机坐标系，需要解算靶标坐标系相对于相机坐标系的位置和姿态信息，所以不需标定相机的外部参数。

在单目视觉位姿测量中，通过图像预处理算法<sup>[16]</sup>获取目标点的图像坐标也是关键的技术部分，目前可以用软件或硬件来实现图像处理的算法。实时视频中图像处理<sup>[17]</sup>的应用主要是对速度的要求，一般来说，图像处理速度的提高，主要从以下两个方面考虑：

一是优化图像处理算法原理<sup>[18]</sup>，使算法在保证视频处理质量的前提下，实现方法更简单，但是目前来说，图像预处理中常用算法已经经过多次优化，在提高其处理质量且减少运算复杂度的方面已处于瓶颈时期。

二是改变实现算法的手段<sup>[19]</sup>。目前，针对不同的应用环境需求，实现图像处理算法的手段主要包括通用计算机（高级语言 C、C++等）、并行处理机、专用集成电路（ASIC）、数字信号处理器（DSP）及现场可编程门阵列<sup>[20]</sup>（FPGA）等，其中通用计算机对图像处理算法实时性的实现有较强的局限性；并行处理机处理单元负载不均衡、并行编程困难等对系统的整体性能有较大限制；基于 ASIC 实现图像处理算法速度很快，但是由于其专用性强、成本较高、灵活性差等特点限制了其在图像处理领域中的应用；DSP 擅长快速实现各种数字信号处理算法，是具有特殊结构的微处理器，但是 DSP 只是对某些固定的运算提供硬件优化，并不能满足图像预处理众多算法的需要，所以在一定程度上也限制了 DSP 的应用灵活性；FPGA（Field Programmable Gate Array），又称为可编程 ASIC，用户可以根据系统要求设计出所需的硬件逻辑，且可进行静态重复编程和动态系统的重新配置，可根据系统优化需要灵活的进行更新和继承开发，很大程度上提高了系统设计的灵活性、通用性以及继承性。

FPGA 的高速处理及并行运行等特点使其在图像预处理算法的应用中，既能满足系统的视频实时性要求，又可对系统进行现场性能维护和扩展。随着微电子技术的发展，FPGA 内部资源越来越丰富，可实现的功能也越来越强，将会越来越广泛的应用于视觉测量、自动化、智能化领域。

## 1.2 基于单相机的目标定位的研究现状

目前,单目视觉测量系统广泛应用于空间交会对接、自动检测设备等航天航空领域。单目测量利用单相机成像,根据成像模型建立空间目标点与对应像点之间的映射关系进而解算目标点相对于相机的位置和姿态信息。已知合作靶标盘中各目标点之间的相对位置关系,根据目标点的图像坐标和相机成像模型解算目标相对于相机的位姿的问题,是典型的 PNP (Perspective-n-Point) 问题,最早由 fischler<sup>[21]</sup>等于 1981 年首次提出了一种 P3P 问题的闭式解法,引起了业界的高度重视,其后 PNP 问题得到了大力发展并逐渐成熟。而在本文中测量对象为二维合作目标,因此需要解决的是平面 PNP 问题。

目前,平面 PNP 问题的求解分为线性算法和非线性算法两种。其中线性算法<sup>[22]</sup>计算代价小,速度快,但精度一般不高,如 M.A. Abid<sup>[23]</sup>提出的四面体体积法,用于求解平面四边形目标的位姿; Yubin Hun<sup>[24]</sup>提出的平面四点位姿的线性求解方法等。相对线性算法来说,非线性算法精度较高,但一般需要迭代,计算量较大,且存在稳定性问题。典型的算法有 DENIS OBERKAMP<sup>[25]</sup> 提出的 POSIT 算法; Gerald Schweighofe<sup>[26]</sup> 提出的平面目标位姿估计算法 (SP) 等。值得注意的是,采用 POSIT 算法和 SP 算法求解平面目标的位姿一般会得到两个局部最优解。另外,通用的 PNP 求解算法也可用于解决平面 PNP 问题,如 Lepeti<sup>[27]</sup>提出的 EPnP 算法, Lu<sup>[28]</sup>提出的正交迭代算法等。

## 1.3 基于 FPGA 的图像预处理算法实现的研究现状

近年来,随着微电子技术的迅猛发展以及芯片制造工艺的提高,FPGA 以其灵活性、速度快等众多优势越来越多的应用在高清电视、远程视频会议、机器视觉以及汽车电子产品等领域。FPGA 的硬件并行和流水线技术<sup>[29]</sup>,相对于利用串行执行指令完成图像处理算法的 DSP 系统来说,有更快的处理速度以及更强的应用灵活性;且 FPGA 可根据应用需求进行重构配置,开发周期短,有更强的通用性,适合于模块化设计;对数字图像数据的处理速度快,可满足系统的实时性要求。

FPGA 多用于数字视频图像处理算法以及网络接口等的方面,主要包括图像显示、图像格式转化<sup>[30]</sup>、图像压缩<sup>[31]</sup>、色彩空间转化、IEEE1394 的实现等。1997 年火星探路者中,基于 FPGA 实现了高质量的图像采集<sup>[32]</sup>、无线通信<sup>[33]</sup>等功能;中国铁道部基础设施检测中心以 FPGA 模块为核心实现高速图像的实时采集、8

通道的图像信号处理等；2005 年 6 月推出的“富士通服务机器人”使用 FPGA 开发图像处理的 LSI 进行视觉识别处理。随着 FPGA 性能的提升以及价格的下降，FPGA 将会更广泛的应用于其他领域。

目前，FPGA 主要以 FPGA 图像处理平台以及 FPGA+DSP<sup>[34]</sup>组合平台等的形式使用，由于 FPGA 具有高速的处理速度、丰富的逻辑资源、并行运行等特点，多会在应用平台中完成接口、逻辑控制、数据缓冲、图像预处理<sup>[35]</sup>以及一些高级处理等功能。对于图像数据量较大，且实时数据速度较快等应用环境要求，基于 FPGA 可以实时高效的实现图像预处理算法，如快速傅立叶变换、卷积运算、快速滤波、图像增强<sup>[36]</sup>等。

## 1.4 本文主要研究内容

本文提到的基于合作目标和单相机的空间相对位姿测量系统，实质是对两自由坐标系的相对位姿进行解算，即以相机坐标系作为基准坐标系，解算合作目标确定的靶标坐标系相对于基准坐标系的三维坐标以及三个旋转角度。其测量原理是利用单目相机的成像模型以及已知合作目标点之间的位置关系对距离 5 米以内的合作靶标进行相对位姿的实时解算，且系统中对目标点图像坐标的提取部分基于 FPGA 平台完成图像预处理功能，并能够满足系统精度及实时性要求，本文主要介绍了本系统采用的位姿解算算法及基于 FPGA 的图像预处理算法的实现。

各章节内容安排如下：

- 第一章， 围绕课题的应用背景介绍课题的来源及研究意义。主要介绍了单相机目标定位的研究现状，同时介绍了基于 FPGA 的图像处理系统的研究现状，以及本系统采用单目视觉测量以及 FPGA 实现图像处理的合理性。最后介绍了本文的主要研究内容。
- 第二章， 介绍了基于合作目标和单相机的空间相对位姿测量系统构成以及位姿测量解算模型。针对系统应用要求对系统中使用的 CMOS 模块、FPGA 模块、DSP 模块以及双环 LED 靶标进行了简要介绍。位姿测量模型部分主要介绍了本文引入的新的姿态角定义方法，根据四个 LED 靶标点求解平面单应矩阵，以及根据单应矩阵导出靶标盘中心相对于相机坐标系的三个旋转姿态角和位置信息的求解公式。同时考虑到镜头畸变等对解算结果引入的误差，对提取的图像坐标进行了二次去畸变操作，并简要介绍了本系统使用的相机内部参数标定方法。
- 第三章， 基于 FPGA 实现的实时图像采集参数设置以及图像预处理的算法。介绍了基于 FPGA 设计的基本流程与原则，然后分析了系统中用于目标

的识别与提取的二值化图像要求，确定了图像预处理算法包括中值滤波、直方图均衡增强以及二值化三部分，并介绍了基于 FPGA 实现 IIC 协议的硬件配置、以及预处理算法的具体实现等。

第四章，对系统的解算算法进行了仿真分析，确定了系统参数的允许误差范围，并搭建仿真实验系统，对测量精度进行实验验证。分析了对系统解算引入误差的误差源及其对系统测量精度的影响，并通过仿真实验验证仿真结论。精度测试实验包括在不同位置对三个旋转角度进行-30~30度的实时测量实验、在  $Z < 5\text{m}$  视场内的多个位置进行位置解算的验证实验、与 Fischler 的 P3P 算法进行的对比实验以及进行图像预处理的功能验证实验，大量的实验数据充分的验证本文算法的解算精度与稳定性，确定是否符合系统的精度要求。

第五章，对本文完成的工作进行总结和展望，并根据实验结果针对解算算法以及图像预处理实现等方面提出可以进一步优化的方向。

<http://www.ixueshu.com>

<http://www.ixueshu.com>

## 第 2 章 单相机空间位姿测量解算原理

### 2.1 基于单相机的目标定位系统

本文设计的系统是基于二维合作目标的单相机空间位姿解算模型，其中二维合作目标采用四个共面的 LED 靶标组成，利用单目 CMOS 相机采集目标点图像，并基于 FPGA 和 DSP 平台实现图像预处理、目标提取及位姿解算。

本系统主要包括 CMOS 图像采集模块、FPGA 图像预处理模块、DSP 平台的目标提取与位姿解算模块以及双环 LED 靶标四部分。图 2-1 是该系统的结构示意图，图 2-2 所示为测量系统的实物外观图，图 2-3 为仿真测试实验使用的双环 LED 靶标。



图 2-1 系统结构示意图

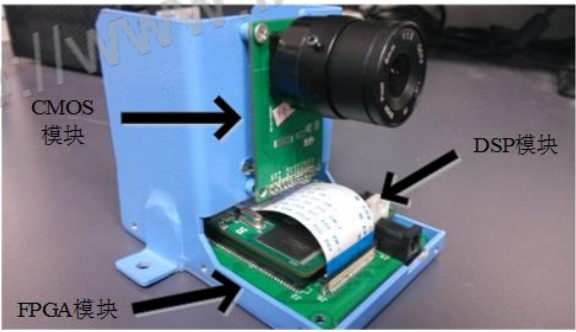


图 2-2 测量系统实物图

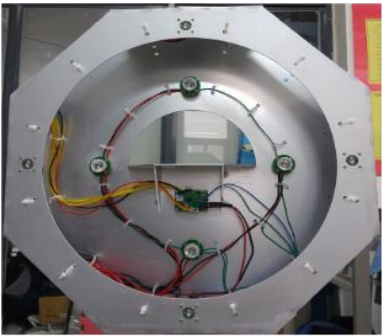


图 2-3 双环 LED 靶标盘

- 1) CMOS 模块<sup>[37]</sup>：解算两自由坐标系之间的位姿信息，需要采集目标系统上的 LED 靶标盘图像，本系统采用 Aptina 公司的 MT9M034 数字图像传感器，最大可达到 1280\*960 的有效成像像素阵列，可实现 50 帧/s 的最大帧率实时传输图像数据。且为了降低太阳光等对探测器的干扰，在 CMOS 模块镜头前安装了中心波长为 740nm 的窄带滤光片。图 2-4 是 FPGA 与 MT9M034-CMOS 模块的连接示意图，其中 MT9M034 可以将外界的光信号转为模拟信号，经过模拟信号处理电路以及 AD 转换模块，形成 12bit 的数字图像信号通过并行数据口输出，并提供场同步信号 VS，行同步信号 HS，以及像素时



钟信号 PIXEL\_CLK 来控制图像输出至 FPGA 模块，而 FPGA 模块通过 I2C 总线（时钟线 I2C\_CLK、数据线 I2C\_DATA）调整其增益、曝光时间、帧率、像素时钟、有效像素数、行场同步信号的消隐数等参数。

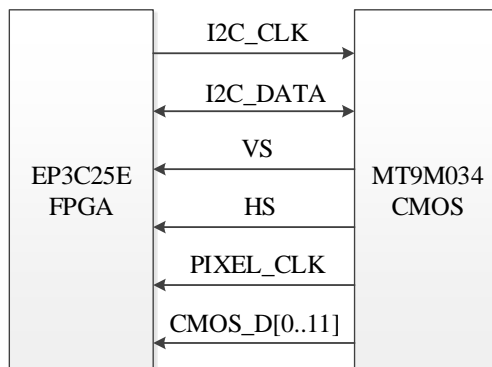


图 2-4 FPGA 与 MT9M034- CMOS 模块的连接示意图

- 2) **FPGA 模块：**基于单相机的靶标点空间位姿解算模型中已知靶标点的图像坐标，即利用 CMOS 模块对 LED 靶标实时采集图像，通过后续图像预处理以及目标识别、提取靶标点的图像坐标，FPGA 模块对 CMOS 模块实时传输的视频数据进行图像预处理操作，为后续的 DSP 模块提供二值化图像。FPGA 模块采用了 Altera 公司 CycloneIII 系列的 EP3C25E144C8 芯片，具有 24624 个基本逻辑单元，83 个 IO 口，74.25kByte 的片上存储资源，共 4 个 PLL。基于 FPGA 实现的实时视频图像预处理操作，包括中值滤波、直方图均衡以及二值化。图 2-5 是 FPGA 模块与 DSP 模块的连接示意图，其中行同步信号 FPGA\_HS、场同步信号 FPGA\_VS 信号格式与 CMOS 输出信号格式相同，12bit 有效数据信号 FPGA\_DATA 则以二值化信号格式实时输出到 DSP 模块。经过 FPGA 模块的实时视频图像预处理，整体信号相对于 CMOS 模块的输入信号延时两行像素时钟周期，并未影响视频的实时性。

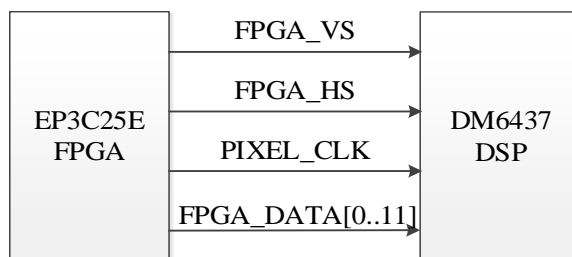


图 2-5 FPGA 模块与 DSP 模块的连接示意图

- 3) **DSP 模块：**DSP 模块主要完成目标识别、提取以及基于靶标点图像坐标与相机成像模型的空间位姿解算的功能。本模块采用基于 C64x+ 内核的 TMS320DM6437。由于 C64x+ 内核采用超长指令集技术并搭载了双 16bit 解

算功能,大大提高了 DSP 在通信及数据计算领域的处理能力。DSP 模块输入来自 FPGA 模块的视频信号(行同步信号、场同步信号以及二值化有效信号),对实时视频信号进行区域增长以及连通域标记处理,提取 LED 靶标点的质心坐标,作为解算模型的输入参数,并完成实时的基于单相机的靶标点空间位姿解算。

- 4) 双环 LED 靶标<sup>[38]</sup>: 本系统采用的是基于合作目标的位姿解算算法,因此使用形状及性能特制的光电合作靶标。图 2-3 所示为仿真实验使用的 LED 靶标盘。LED(发光二极管)具有发光功率较小、发光角度较大、响应速度快、抗干扰能力强等特点,因此本系统靶标选用 LED。特征点的个数与分布影响测量精度,一般来说,不少于三个特征点均可进行位姿解算,特征点多,精度高,但是计算复杂度或者计算量会增加,同时增加解算时间,且当特征点个数为 6 个以上时,精度的提高空间已十分有限。所以综合考虑本系统的精度要求以及算法需要,选取四个 LED 靶标的经典布局,即四个 LED 靶标位于对角线长度固定的(本系统采用 280mm)正方形的顶点位置。在不同距离的位姿测量中,相机的视场会有较为明显的变化,为了保证 LED 靶标能一直在相机视场内,采用内外两环 LED 靶标,即当测量距离为 1~5m 时,开启内环 LED(对角线长度为 280mm)完成位姿测量,大于 5m 时,开启外环 LED(对角线长度为 440mm)。

由 CMOS 模块、FPGA 模块以及 DSP 模块组成的 CMOS 传感测量模组固定在基准坐标系系统上,双环 LED 靶标固定在目标系统上。CMOS 传感测量模组由 CMOS 模块实时采集 LED 靶标图像,通过 I/O 口传输到 FPGA 模块并进行实时视频的滤波、增强与二值化处理,然后再传输到 DSP 模块进行目标识别与图像坐标的提取,以供 DSP 完成目标系统的实时位姿解算。

## 2.2 基于单相机的空间位姿解算

### 2.2.1 单相机成像模型

图像上点的位置通过相机成像模型与空间物体对应点的位置建立映射关系<sup>[39]</sup>得到,首先介绍成像模型中涉及到的三个坐标系(图像坐标系,相机坐标系与世界坐标系)以及它们之间的转换关系,三坐标系均遵守右手定则。CMOS 相机采集的图像以数字图像的形式传入位姿解算系统,一帧数字图像显示为  $M$  行  $N$  列的数组形式,其中每个元素的数值表示图像点的亮度,也称为灰度,元素即为像素。

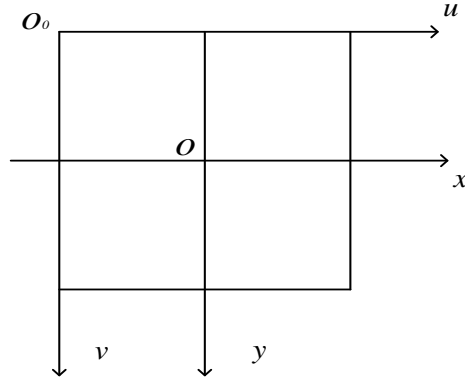


图 2-6 图像坐标系

图 2-6 所示为图像坐标系  $o_0-u-v$ ，以图像的左上角为原点，行方向向右为  $u$  轴正向，列方向向下为  $v$  轴正向，每个像素的坐标  $(u, v)$  分别表示该像素所在的行数和列数，其单位为像素。在实际应用中，一般都是以物理单位进行运算，所以将图像中的像素单位转换为物理单位（设为米）。建立一个如图 2-6 所示的以物理单位表示的图像坐标系  $O-x-y$ ，以相机光轴与图像平面的交点作为原点  $O$ ，理想情况下是在图像中心处（实际可能会因为镜头畸变或者制作工艺等引入一些偏离误差），其  $x, y$  轴分别与  $u, v$  轴平行。设  $O$  在像素坐标系中的坐标为  $(u_0, v_0)$ ，像素的物理尺寸为  $d_x, d_y$ ，则图像中任意像素在两坐标系下的坐标转换如下：

$$\begin{cases} u = \frac{x}{d_x} + u_0 \\ v = \frac{y}{d_y} + v_0 \end{cases} \quad (2-1)$$

用齐次矩阵表示为：

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{d_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

其中， $(u, v, 1)$  是像素图像坐标系的齐次坐标， $(x, y, 1)$  是物理图像坐标系的齐次坐标。

图 2-7 所示为相机的透视成像模型，其中坐标系  $O_C-X_C-Y_C-Z_C$  表示相机坐标系，坐标系原点  $O_C$  是相机光心，其  $X_C, Y_C$  轴分别与图像坐标系的  $x, y$  轴平行， $Z_C$  轴是垂直于图像平面的相机光轴。如图 2-7 所示，光轴与图像平面的交点就是物理图像坐标系的原点  $O$ ，且  $OO_C$  的距离等于相机的焦距  $f$ 。

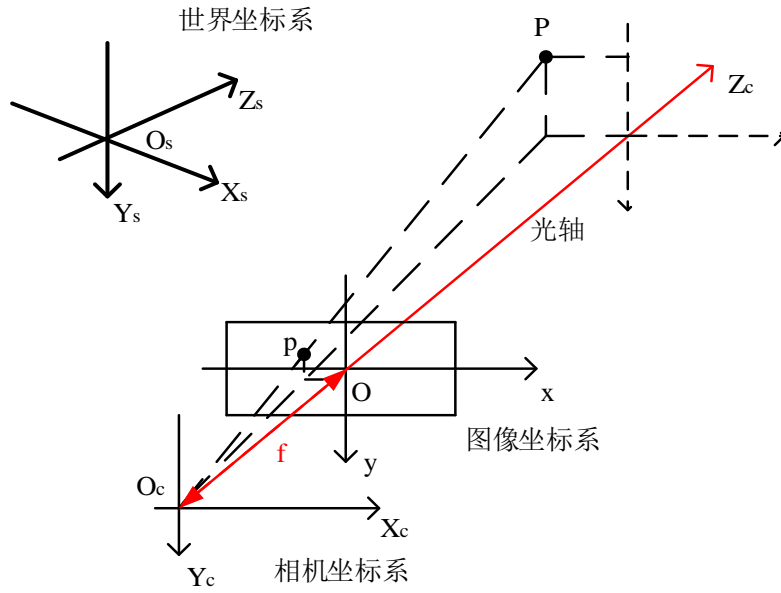


图 2-7 相机成像模型

由于相机坐标系与图像坐标系的  $X$ ,  $Y$  坐标轴平行, 且  $Z$  轴重合, 根据三角形相似性质, 则空间一点  $P$  在相机坐标系坐标  $P_C(X_C, Y_C, Z_C)$  以及在物理图像坐标系坐标  $p(x, y)$  存在如下关系:

$$\frac{x}{X_C} = \frac{y}{Y_C} = \frac{f}{Z_C} \quad (2-3)$$

转为齐次坐标矩阵形式如下:

$$s \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

其中  $s$  为比例因子。世界坐标系  $O_s-X_s-Y_s-Z_s$ , 通常作为基准坐标系来描述空间中物体的位置, 所以一般会用世界坐标系来描述相机在三维空间的位置。设空间中一点  $P$  在世界坐标系中的坐标为  $P_S(X_S, Y_S, Z_S)$ , 在相机坐标系中的坐标为  $P_C(X_C, Y_C, Z_C)$ , 两坐标系间的齐次坐标转换关系如下:

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \\ 1 \end{bmatrix} = M_2 \begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

即先通过平移矩阵  $t$  使世界坐标系原点与摄像机坐标系原点重合，再通过旋转矩阵  $R$  完成两坐标系的转换。其中：
$$R = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix},$$

用欧拉角  $\omega$ ,  $\phi$  和  $\kappa$  表示绕  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  轴旋转的三个基本量，可以根据世界坐标系各坐标轴映射到相机坐标系各坐标轴的分量来建立等式关系，此处不再赘述。

由式(2-1)到(2-5)可知，单相机成像模型由世界坐标系坐标到像素图像坐标的转换如下：

$$\rho \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/d_x & 0 & u_0 \\ 0 & 1/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

其中， $(u, v, 1)$  是在图像中提取的空间某点的图像坐标， $(X_S, Y_S, Z_S)$  是空间点在世界坐标系中的坐标。 $(u_0, v_0)$  是相机像面的主点坐标， $f$  为相机焦距， $d_x$ 、 $d_y$  是相机的像元大小，以上五个量为相机的内部参数，可以通过标定或者相机的数据手册得到。 $R$ 、 $t$  是相机外参，可通过标定得到。可将 (2-6) 化简如下：

$$\rho \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

其中  $\rho$  为比例因子， $M$  是由相机内参与外参确定的  $3 \times 4$  的矩阵。

### 2.2.2 单相机位姿测量解算模型

本文利用单相机对合作目标特征点（四个目标特征点）成像，根据单相机成像模型、靶标坐标系与图像坐标系之间的映射关系以及坐标轴在坐标系之间的投射关系解算靶标坐标系中的原点相对于相机坐标系的位置和姿态。利用 4 个目标特征点的图像坐标、靶标坐标系坐标及相机的内部参数解算目标中心点的位置  $(X_C, Y_C, Z_C)$  和姿态（偏航角，俯仰角，横滚角）。

如图 2-8 所示， $O_c$  为相机光心。设靶标盘的 4 个共面 LED 光源所确定的平面为  $\pi_2$ ，焦距归一化像平面为  $\pi_1$ ， $\pi_1$  与  $\pi_2$  上的坐标系的设置如图 2-8。根据透视成像模型式 (2-6)， $\pi_1$  上的齐次坐标点  $(X, Y, K)$  与  $\pi_2$  上的齐次坐标点  $(X', Y', K')$  之间存在一一对应的关系， $\pi_1$  到  $\pi_2$  的射影变换可表示为：

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ K' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ K \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

令  $H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix}$ , 表示从  $\pi_1$  到  $\pi_2$  的变换矩阵。

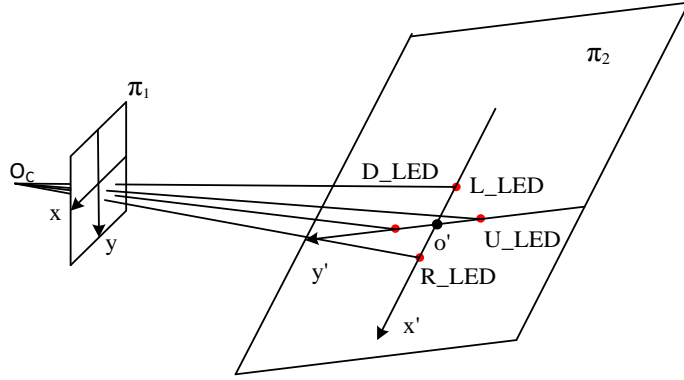


图 2-8 四共面点透视成像模型

在  $\pi_2$  中, 四个 LED 标志点分布在对角线长度为  $d$  的正方形的四个顶点上, 所以其靶标坐标系坐标固定, 且  $Z$  向坐标均为 0, 此处的平面齐次坐标只考虑  $X, Y$  两个方向的坐标。定义 4 个 LED 的靶标坐标系的齐次坐标为  $L\_LED(x'_l, y'_l, 1)$ ,  $R\_LED(x'_r, y'_r, 1)$ ,  $U\_LED(x'_u, y'_u, 1)$ ,  $D\_LED(x'_d, y'_d, 1)$ , 对应的图像坐标为  $L\_LED(x_l, y_l, 1)$ ,  $R\_LED(x_r, y_r, 1)$ ,  $U\_LED(x_u, y_u, 1)$ ,  $D\_LED(x_d, y_d, 1)$ , 代入 (2-8) 式并转换可得:

$$AX = 0 \quad (2-9)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & x_u & y_u & 1 & -x_u \cdot y'_u & -y_u \cdot y'_u & -y'_u \\ x_u & y_u & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_u \cdot x'_u & -y_u \cdot x'_u & -x'_u \\ 0 & 0 & 0 & x_d & y_d & 1 & -x_d \cdot y'_d & -y_d \cdot y'_d & -y'_d \\ x_d & y_d & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_d \cdot x'_d & -y_d \cdot x'_d & -x'_d \\ 0 & 0 & 0 & x_l & y_l & 1 & -x_l \cdot y'_l & -y_l \cdot y'_l & -y'_l \\ x_l & y_l & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_l \cdot x'_l & -y_l \cdot x'_l & -x'_l \\ 0 & 0 & 0 & x_r & y_r & 1 & -x_r \cdot y'_r & -y_r \cdot y'_r & -y'_r \\ x_r & y_r & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_r \cdot x'_r & -y_r \cdot x'_r & -x'_r \end{bmatrix}$$

令  $X = [h_{11} \ h_{12} \ h_{13} \ h_{21} \ h_{22} \ h_{23} \ h_{31} \ h_{32} \ h_{33}]^T$ , 四个 LED 标志点的靶标坐标系齐次坐标为  $L\_LED(-\frac{d}{2}, 0, 1)$ ,  $R\_LED(\frac{d}{2}, 0, 1)$ ,  $U\_LED(0, -\frac{d}{2}, 1)$ ,  $D\_LED(0, \frac{d}{2}, 1)$ , 即可线性求解平面单应性矩阵  $H$ , 用于求解目标中心点的位姿

信息。

### (一) 姿态角定义

在本文中，靶标坐标系与相机坐标系之间的 3 个姿态角的定义由图 2-9 给出：

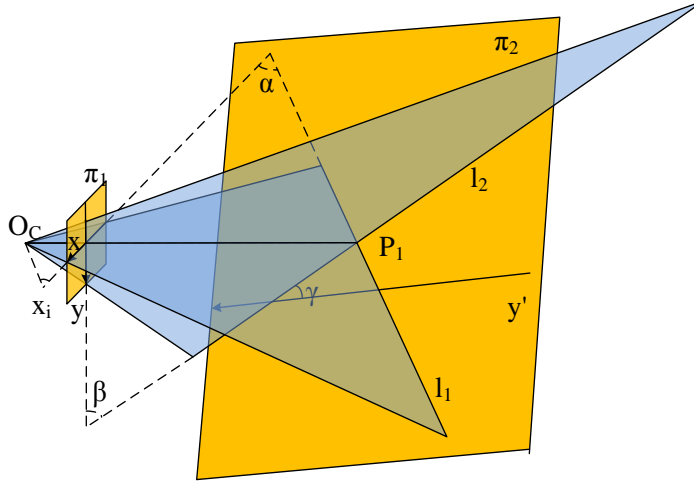


图 2-9 姿态角定义

根据透视成像模型，焦距归一化像平面 $\pi_1$ （即此处焦距为 1，图像坐标也经过了焦距归一化的转换）中的  $x$  轴被投影到靶标平面 $\pi_2$ 中直线  $l_1$ ， $\pi_1$  中的  $y$  轴被投影到靶标平面中直线  $l_2$ 。很显然  $x$  轴与  $l_1$  共面， $y$  轴与  $l_2$  共面。定义  $x$  轴与  $l_1$  的夹角  $\alpha$  为偏航角， $y$  轴与  $l_2$  的夹角  $\beta$  为俯仰角， $l_2$  与靶标平面坐标系的  $y'$  轴的夹角  $\gamma$  为滚转角。上述方法定义的 3 个姿态角满足如下几个性质：

- 1) 三个角度值不受相机平移的影响；
- 2) 三个角没有旋转顺序的限制；
- 3) 三个角度值可由透视变换矩阵直接得到；
- 4) 当  $\alpha = \beta = 0$  时，像平面与目标平面平行；
- 5) 当  $\alpha = \beta = \gamma = 0$  时，相机与目标平面之间仅存在平移变换；
- 6)  $\alpha$ ， $\beta$ ， $\gamma$  与由旋转矩阵定义的 3 个角度  $rotX$ ， $rotY$ ， $rotZ$  之间存在确定的对应关系<sup>[40]</sup>，当  $\alpha$ ， $\beta$ ， $\gamma$  已知时，可解得  $rotX$ ， $rotY$ ， $rotZ$ ，反之亦然。限于篇幅，本文直接给出结论：

设靶标平面坐标系相对于相机坐标系的旋转顺序为：先绕  $X$  轴旋转  $rotX$ ，再绕  $Y$  轴旋转  $rotY$ ，再绕  $Z$  轴旋转  $rotZ$ ，则有：

$$\begin{cases} rotX = \beta \\ rotY = \arctan[-\cos(\beta)\tan(\alpha)] \\ rotZ = \gamma \end{cases} \quad (2-10)$$



## （二）姿态角解算

偏航角：

如图 2-10 所示， $\pi_1$  中的  $x$  轴被投射到靶标平面  $\pi_2$  中的直线  $l_1$  上，即相机光心与图像坐标系  $x$  轴组成的平面与靶标所在平面  $\pi_2$  的交线为  $l_1$ ，如图 2-10 所示：

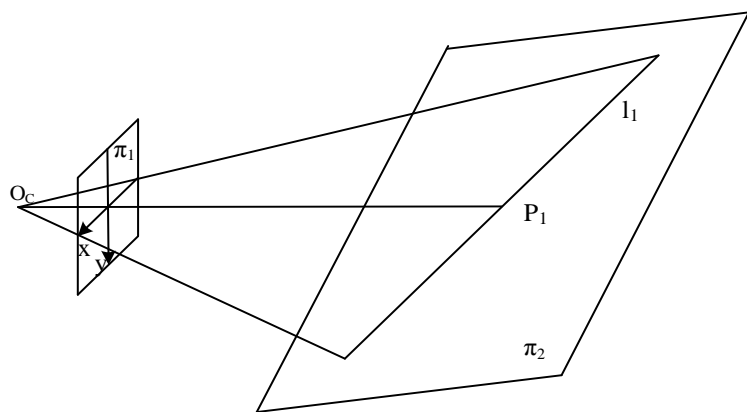


图 2-10 焦距归一化像平面  $x$  轴的投影

图 2-10 的俯视图如图 2-11 所示：

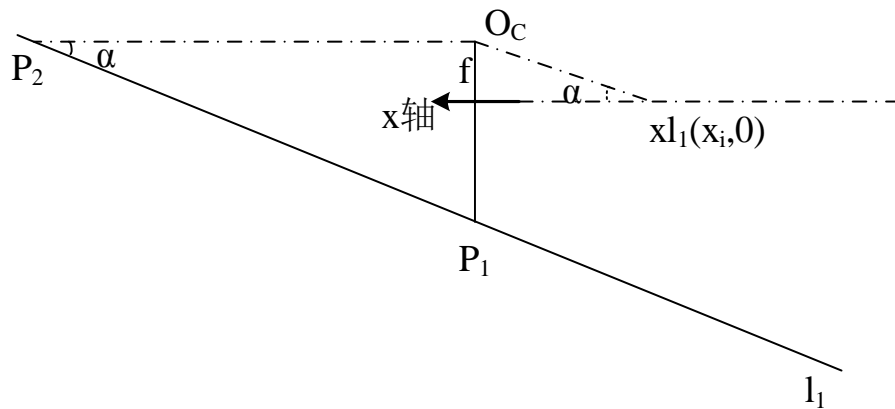


图 2-11 俯视图

设  $x$  轴上一点  $x_{l_1}(x_i, 0)$  被投影到直线  $l_1$  上的无穷远点，即  $x_{l_1}$  和光心  $O_c$  的连线与  $l_1$  平行。  $x_i$  可由 (2-11) 式解算：

$$\begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

从而：

$$x_i = -\frac{h_{33}}{h_{31}} \quad (2-12)$$

x 轴与投影直线  $l_1$  之间的夹角  $\alpha$  可以表示为：

$$\alpha = \arctan\left(\frac{f}{x_i}\right) \quad (2-13)$$

此处为焦距归一化平面，所以焦距为 1，当 x 轴与  $l_1$  接近平行时， $x_i$  的值将趋向于  $\infty$  而变得无法计算，为避免无解的情况出现，我们令

$$r_{xi} = \frac{f}{x_i} = \frac{1}{x_i} = -\frac{h_{31}}{h_{33}} \quad (2-14)$$

则，

$$\alpha = \arctan(r_{xi}) \quad (2-15)$$

实际测量过程中用（2-14）式和（2-15）式计算偏航角  $\alpha$ 。即图像坐标系的 x 轴与靶标点所在平面  $\pi_2$  的锐角夹角。

俯仰角：

同理，如图 2-12， $\pi_1$  中的 y 轴被投射到  $\pi_2$  中的直线  $l_2$  上，如图 2-12 所示：

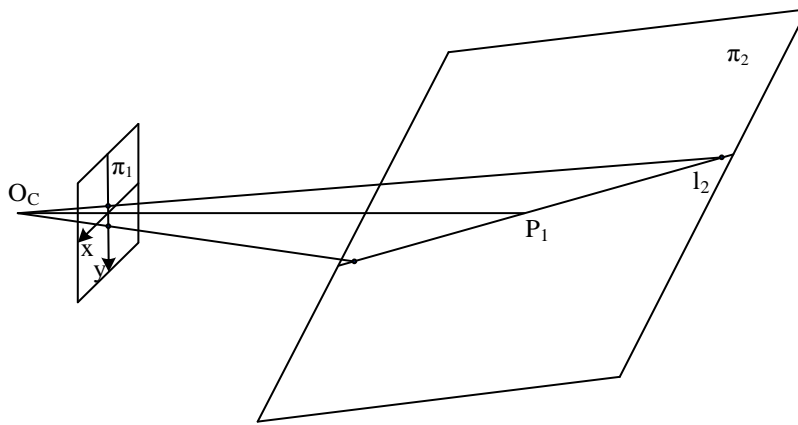


图 2-12 焦距归一化像平面 y 轴的投影

图 2-12 的侧视图如下图所示：

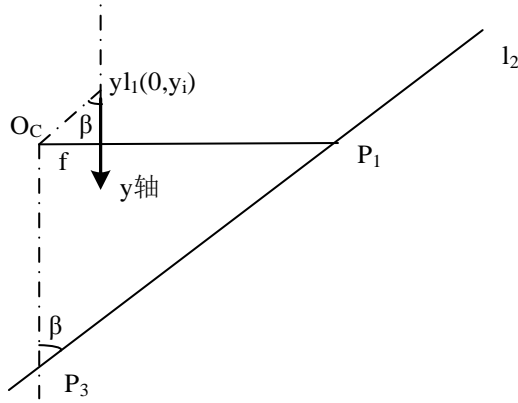


图 2-13 侧视图

设  $y$  轴上一点  $y_{l_1}(0, y_i)$  被投影到直线  $l_2$  上的无穷远点，即这个点和光心  $O_c$  的连线与  $l_2$  平行。 $y_i$  可由 (2-16) 式解算：

$$\begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

从而：

$$y_i = -\frac{h_{33}}{h_{32}} \quad (2-17)$$

$y$  轴与投影直线  $l_2$  之间的夹角  $\beta$  可以表示为：

$$\beta = \arctan\left(\frac{f}{y_i}\right) \quad (2-18)$$

同样的，当  $y$  轴与  $l_2$  接近平行时， $y_i$  的值将趋向于  $\infty$  而变得无法计算。我们令

$$r_{yi} = \frac{f}{y_i} = \frac{1}{y_i} = -\frac{h_{32}}{h_{33}} \quad (2-19)$$

$$\beta = \arctan(r_{yi}) \quad (2-20)$$

实际测量过程中用 (2-19) 式和 (2-20) 式计算俯仰角  $\beta$ 。

横滚角：

如图 2-14 所示,  $\pi_1$  中的  $y$  轴被投射到  $\pi_2$  中的直线  $l_2$  上, 目标平面  $\pi_2$  中的  $y'$  轴与  $l_2$  的夹角即为横滚角:

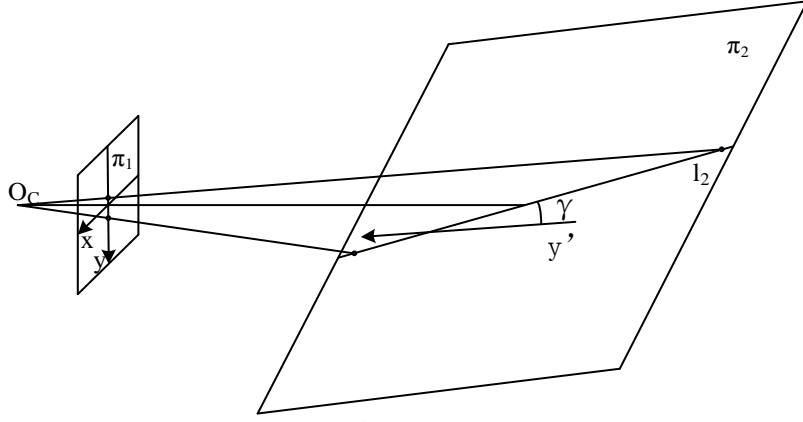


图 2-14 目标平面  $x'$  轴投影

由于目标平面  $\pi_2$  中的点  $\vec{x}'$  与  $\pi_1$  中的对应点  $\vec{x}$  之间的变换关系为:

$$\vec{x}' = H \vec{x} \quad (2-21)$$

不难得到  $\pi_2$  中投影直线  $l_2$  和  $\pi_1$  中的  $y$  轴的变换关系为:

$$l_2 = H^{-T} y \quad (2-22)$$

其中,

$$H^{-T} = \begin{bmatrix} h'_{11} & h'_{12} & h'_{13} \\ h'_{21} & h'_{22} & h'_{23} \\ h'_{31} & h'_{32} & h'_{33} \end{bmatrix},$$

$\pi_1$  中的  $y$  轴可以表示为齐次形式:

$$y = (1 \quad 0 \quad 0)^T \quad (2-23)$$

则  $\pi_2$  中投影直线  $l_2$  可以由 (2-22) 式求得:

$$l_2 = H^{-T} y = \begin{bmatrix} h'_{11} & h'_{12} & h'_{13} \\ h'_{21} & h'_{22} & h'_{23} \\ h'_{31} & h'_{32} & h'_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h'_{11} \\ h'_{21} \\ h'_{31} \end{bmatrix} \quad (2-24)$$

横滚角  $\gamma$  由  $l_2$  和  $y'$  轴之间的夹角来度量, 由 (2-24) 式获得:

$$\gamma = \operatorname{arccot} \left( -\frac{h'_{11}}{h'_{21}} \right) \quad (2-25)$$

### (三) 三维坐标解算

平面 $\pi_2$ 中的 $x'$ 轴被投影到焦距归一化像平面 $\pi_1$ 中的直线 L，如图 2-15 所示：

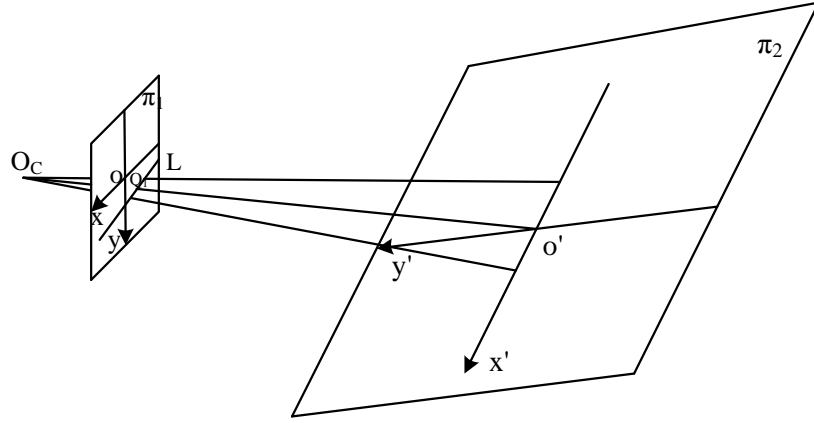


图 2-15  $x'$ 轴投影

$O_cL$  确定的平面如图 2-16 所示：

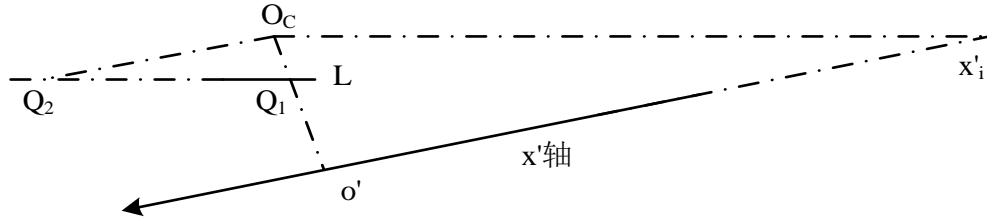


图 2-16 平面  $O_cL$

$\pi_2$ 中的坐标系原点 $o'$ 被投影到 L 上的 $Q_1$ 点。令：

$$H^{-1} = \begin{bmatrix} h'_{11} & h'_{12} & h'_{13} \\ h'_{21} & h'_{22} & h'_{23} \\ h'_{31} & h'_{32} & h'_{33} \end{bmatrix} \quad (2-26)$$

则有：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ K \end{bmatrix} = H^{-1} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ K' \end{bmatrix} \quad (2-27)$$

$Q_1$ 点在 $\pi_1$ 中的坐标可由（2-28）式求得：

$$\begin{bmatrix} X_{Q1} \\ Y_{Q1} \\ K_{Q1} \end{bmatrix} = H^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h'_{13} \\ h'_{23} \\ h'_{33} \end{bmatrix} \quad (2-28)$$

从而：

$$\begin{bmatrix} x_{Q1} \\ y_{Q1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{h'_{13}}{h'_{33}} \\ \frac{h'_{23}}{h'_{33}} \end{bmatrix} \quad (2-29)$$

$Q_2$ 点与 $x'$ 轴上的无穷远点相对应，因此：

$$\begin{bmatrix} X_{Q2} \\ Y_{Q2} \\ K_{Q2} \end{bmatrix} = H^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h'_{11} \\ h'_{21} \\ h'_{31} \end{bmatrix} \quad (2-30)$$

从而：

$$\begin{bmatrix} x_{Q2} \\ y_{Q2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{h'_{11}}{h'_{31}} \\ \frac{h'_{21}}{h'_{31}} \end{bmatrix} \quad (2-31)$$

由于  $O_c$  点是相机的光心，因此  $O_c$  和  $Q_1$  之间的距离  $d_{O_c Q_1}$  可由（2-32）式求得：

$$d_{O_c Q_1} = \sqrt{f^2 + x_{Q1}^2 + y_{Q1}^2} \quad (2-32)$$

同理  $O_c$  和  $Q_2$  之间的距离  $d_{O_c Q_2}$  可由（2-33）式求得：

$$d_{O_c Q_2} = \sqrt{f^2 + x_{Q2}^2 + y_{Q2}^2} \quad (2-33)$$

直线  $L$  上的无穷远点与  $x'$  轴上的  $(x'_i, 0)^T$  相对应，因此有：

$$H^{-1} \begin{bmatrix} x'_i \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-34)$$

解得：

$$x'_i = -\frac{h'_{33}}{h'_{31}} \quad (2-35)$$

根据三角形的相似关系有：

$$d_{o_c o'} = |x'_i| \frac{d_{o_c Q_1}}{d_{o_c Q_2}} \quad (2-36)$$

根据（2-36）式可解出 $d_{o_c o'}$ 。

当 $x'$ 轴与 L 接近平行时，即 $\frac{1}{x'_i} \approx 0$ 时， $d_{o_c o'}$ 由如下方法求解：

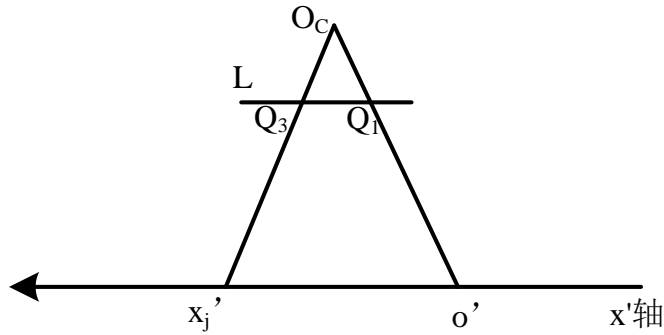


图 2-17 平面  $O_C L$  ( $x'$ 轴与 L 接近平行)

在 $x'$ 轴上任取一点 $(x'_j, 0)$ ，它在 L 上的投影点  $Q_3$  的坐标为：

$$\begin{bmatrix} X_{Q_3} \\ Y_{Q_3} \\ K_{Q_3} \end{bmatrix} = H^{-1} \begin{bmatrix} x'_j \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h'_{11}x'_j + h'_{13} \\ h'_{21}x'_j + h'_{23} \\ h'_{31}x'_j + h'_{33} \end{bmatrix} \quad (2-37)$$

由于  $Q_1$  点坐标已知， $Q_3$  和  $Q_1$  之间的距离 $d_{Q_1 Q_3}$ 可解出，根据三角形的相似关系，有：

$$\frac{d_{o_c o'}}{d_{o_c Q_1}} = \frac{|x'_j|}{d_{Q_1 Q_3}} \quad (2-38)$$

根据(2-38)式可解出 $d_{o_c o'}$ ，根据 $d_{o_c o'}$ 可进一步求出 $o'$ 在摄像机坐标系下的坐标。

摄像机坐标系如图 2-18 中的虚线所示：



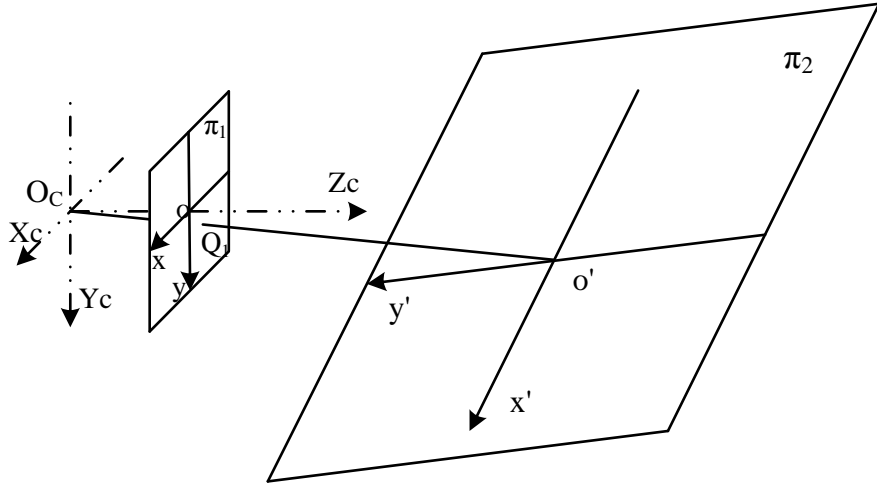


图 2-18 摄像机坐标系

$o'$  在摄像机坐标系  $Z$  轴方向的坐标  $Z_C$  可根据 (2-39) 式直接求出:

$$Z_C = \frac{d_{O_C o'}}{d_{O_C Q_1}} \quad (2-39)$$

根据透视成像模型:

$$\rho \begin{bmatrix} x_{Q1} \\ y_{Q1} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-40)$$

可解得:

$$X_C = \frac{Z_C x_{Q1}}{f} \quad (2-41)$$

$$Y_C = \frac{Z_C y_{Q1}}{f} \quad (2-42)$$

此处,  $f$  为焦距归一化的焦距值, 即为 1。从位姿测量原理可知, 根据标定摄像机的内部参数, 4 个目标特征点的图像坐标以及在靶标坐标系中的坐标即可解算目标中心点相对于相机的横滚角、俯仰角、偏航角和位置  $(X_C, Y_C, Z_C)$ 。

#### (四) 图像坐标去畸变归一化

在 2.2.2 节求解转换矩阵  $\mathbf{H}$  时使用的是焦距归一化像平面  $\pi_1$  上的坐标，而在实际使用中，从图像中直接获得的是像素图像坐标系坐标，需要将其转换到焦距归一化像平面才能代入式 (2-9) 进行解算。而且，在相机实际成像中，由于镜头畸变及相机制作工艺等原因会对理想的成像图像引入径向畸变、切向畸变等，对后续的单相机目标定位引入误差，所以本文对读取的目标点图像坐标进行了去畸变处理<sup>[15]</sup>，其中畸变参数通过相机内参标定得到。设图像读取的某目标标志点像素坐标为  $(x_p, y_p)$ ，焦距归一化成像坐标为  $(x_d, y_d)$ ，待求的去畸变归一化坐标为  $(x_n, y_n)$ ，在考虑二阶径向畸变的情况下，它们的转换关系为：

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fc[1] & 0 & cc[1] \\ 0 & fc[2] & cc[2] \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-43)$$

$$\begin{cases} x_d = x_n * \{1 + kc[1] * (x_n^2 + y_n^2) + kc[2] * (x_n^2 + y_n^2)^2\} \\ y_d = y_n * \{1 + kc[1] * (x_n^2 + y_n^2) + kc[2] * (x_n^2 + y_n^2)^2\} \end{cases} \quad (2-44)$$

其中， $fc[1]$ 和 $fc[2]$ 是用像素量纲表示的  $x, y$  方向上的焦距， $cc[1]$ 和 $cc[2]$ 是用像素量纲表示的主点坐标。 $kc[1]$ 和 $kc[2]$ 分别是一阶和二阶径向畸变系数，以上六个变量均通过相机内参标定得到。

根据上述关系，在已知像素坐标  $(x_p, y_p)$ ，和摄像机内参数后，即可求得空间目标点位姿解算所需的去畸变焦距归一化成像坐标。其中去畸变归一化坐标的求解方程是二元四次非线性方程组，在本系统中采用牛顿迭代法求解<sup>[41]</sup>。对二元非线性方程组的牛顿迭代法是根据二元函数的 Taylor 公式和一元非线性方程牛顿迭代法推导得到的。其中一元函数的 Taylor 公式如下：

$$\begin{aligned} f(x) = & f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + \frac{f''(x_0)}{2!}(x - x_0)^2 + \dots \\ & + \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!}(x - x_0)^n + R_n(x) \end{aligned} \quad (2-45)$$

二元函数的 Taylor 公式为：

$$\begin{aligned}
 f(x_0 + h, y_0 + k) &= f(x_0, y_0) + \left(h \frac{\partial}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y}\right) f(x_0, y_0) + \frac{1}{2!} \left(h \frac{\partial}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y}\right)^2 f(x_0, y_0) \\
 &+ \cdots + \frac{1}{n!} \left(h \frac{\partial}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y}\right)^n f(x_0, y_0) \\
 &+ \frac{1}{(n+1)!} \left(h \frac{\partial}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y}\right)^{n+1} f(x_0 + \theta_k, y_0 + \theta_k)
 \end{aligned} \tag{2-46}$$

其中  $0 < \theta < 1$ ,  $\left(h \frac{\partial}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y}\right)^m f(x_0, y_0)$  表示  $\sum_{p=0}^m C_m^p h^p k^{m-p} \frac{\partial^m f}{\partial x^p \partial y^{m-p}} \big|_{(x_0, y_0)}$ .

一元非线性方程求根的牛顿迭代法原理如下, 设已知方程(2-47)有近似根  $x_k$ ,

$$f(x) = 0 \tag{2-47}$$

将函数在点  $x_k$  处展开得到线性方程式 (2-48),

$$f(x) \approx f(x_k) + f'(x_k)(x - x_k) = 0 \tag{2-48}$$

则  $x_{k+1}$  的计算公式如 (2-49) 所示, 其中  $k = 0, 1, \dots$

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)} \tag{2-49}$$

则由文献[41]可得,

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k + \frac{f g_y - g f_y|_{(x_k, y_k)}}{g_x f_y - f_x g_y|_{(x_k, y_k)}} \\ y_{k+1} = y_k + \frac{g f_x - f g_x|_{(x_k, y_k)}}{g_x f_y - f_x g_y|_{(x_k, y_k)}} \end{cases} \tag{2-50}$$

其中,  $f g_y - g f_y|_{(x_k, y_k)} = f(x_k, y_k) g_y(x_k, y_k) - g(x_k, y_k) f_y(x_k, y_k)$ ,  
 $g f_x - f g_x|_{(x_k, y_k)} = g(x_k, y_k) f_x(x_k, y_k) - f(x_k, y_k) g_x(x_k, y_k)$ ,  
 $g_x f_y - f_x g_y|_{(x_k, y_k)} = g_x(x_k, y_k) f_y(x_k, y_k) - f_x(x_k, y_k) g_y(x_k, y_k)$

在本文中,

$$\begin{cases} f(x_n, y_n) = x_n * \{1 + kc[1] * (x_n^2 + y_n^2) + kc[2] * (x_n^2 + y_n^2)^2\} - x_d & (2-50) \\ g(x_n, y_n) = y_n * \{1 + kc[1] * (x_n^2 + y_n^2) + kc[2] * (x_n^2 + y_n^2)^2\} - y_d & (2-51) \end{cases}$$

设 $(x_n, y_n)$ 的初值为 $(0, 0)$ 代入(2-50)式进行迭代计算 $(x_k, y_k)$ ，再将 $(x_k, y_k)$ 代入(2-51)式计算 $f, g$ ，理论上 $f = g = 0$ ，设置误差控制项为0.001%，当满足式(2-52)时，则停止迭代，认为此时的 $(x_k, y_k)$ 为非线性方程组的解。

$$\begin{cases} |f(x_k, y_k)| < 0.001\% \\ |g(x_k, y_k)| < 0.001\% \end{cases} \quad (2-52)$$

如下图所示，是基于VC++6.0实现的去畸变归一化坐标的求解结果。

```
一次畸变参数kc1=-0.4352,二次畸变参数kc2=0.26448
带有畸变的焦距归一化坐标: xd=0.40595, yd=-0.00226
畸变校正后的焦距归一化坐标: xn=0.43713, yn=-0.00243
f(xn, yn)=-0.000001
g(xn, yn)=0.000000
迭代次数:
4
```

图 2-19 去畸变归一化求解结果

## 2.3 单相机标定方法

在图像测量及机器视觉应用中，相机标定的精度及标定方法的稳定性直接影响相机工作的准确性。相机标定方法主要分为传统标定法<sup>[42]</sup>、自标定法<sup>[43]</sup>、主动视觉标定方法<sup>[44]</sup>三种。

自标定技术不需要标定靶标，是基于主动视觉系统的摄像机标定技术，控制摄像机作特殊的运动，然后通过不同位置上所拍摄的多幅图像来标定摄像机内参。自标定法灵活性强且方便，其潜在应用范围也广，但是自标定方法的鲁棒性不足。

主动视觉摄像机标定方法主要是基于平面单应矩阵和外极点的正交运动方法两种，即把摄像机固定在一个精确控制的平台上，根据平台的运动参数，直接求解摄像机的5个内参数，实现相机标定，主动视觉标定法对标定装置要求较高，不易实现。

本仿真实验系统选择的标定方法是MATLAB工具箱calib\_toolbox中所用的含有图像校正的摄像机标定四步法<sup>[15]</sup>，这种方法是由RAC两步法扩展而来的四步标定程序，同两步法所述，先由线性转换法求解初始参数，然后进行非线性的参数估计，增加的两步分别是第三步校正标定中的畸变，第四步关于图像校正的

问题。

Matlab 工具箱标定方法通过线性参数估计与非线性参数优化相结合的方法，既保证参数精度，又简化了整体的运算量，而且增强了标定的实时性。四步法在两步法的基础上，增加了对投影误差引起的畸变的校正以及图像的校正来准确的补偿径向和切向畸变，以此得到精度更高，误差更小的最优化参数解，且此标定方法简单易操作，符合本系统的实验应用要求。在本系统中，只需要标定相机的内部参数焦距、主点、畸变参数即可，由于本系统中选取世界坐标系为相机坐标系，只需要确定靶标坐标系相对于相机坐标系的旋转角度与平移向量，所以本系统不需标定相机的外参。关于 Matlab 工具箱的具体标定方法在 4.3.1 节介绍。

## 第 3 章 图像采集及预处理

### 3.1 基于 FPGA 设计的基本流程与原则

FPGA 是不同于专用集成电路 (ASIC) 的一种半定制半导体设备, 可根据系统优化需要灵活的进行更新和继承开发, 其在很大程度上提高了系统设计的灵活性、通用性以及继承性。本系统中的图像采集与预处理部分基于 FPGA 平台实现, 利用其高速处理速度及并行运行等特点, 既能满足系统的视频实时性要求, 又可对系统进行现场性能维护和扩展。本节将主要介绍基于 FPGA 实现的图像处理功能部分所涉及到的 FPGA 设计的基本流程与原则。

#### 3.1.1 FPGA 设计的基本流程

本课题的 FPGA 开发环境是 Altera 公司的 QuartusII 11.0, 仿真环境是第三方仿真软件 Modelsim, 行为仿真软件采用 Matlab, 板级调试借助逻辑分析仪完成。基于 FPGA 开发流程如图 3-1 所示, 完整的 FPGA 设计主要包括需求分析、模块划分、行为仿真、代码设计、综合优化、功能仿真、布局布线、时序仿真、板级调试等步骤。需求分析与模块划分将在 3.2 节进行详细介绍, 即利用 FPGA 实现 CMOS 芯片配置及图像预处理功能, 划分为 IIC 配置视频参数、中值滤波、直方图均衡和二值化四个模块, 并利用 Matlab 对图像预处理部分完成行为仿真, 验证选择的图像处理算法的可行性与有效性; 使用 Verilog 语言基于 QuartusII 11.0 平台完成各模块的代码设计, 并经过 Quartus 自带软件的综合优化映射到网表级; 基于 Modelsim 平台完成对 RTL 级代码的功能仿真。完成以上各步之后, 即可进行板级调试, 由于本系统中只有 AS(active serial configuration mode)型下载接口, 所以借助逻辑分析仪完成了设计的板级调试, 如果支持 JTAG 下载接口, 可以采用 Signaltap 的在线调试方式。

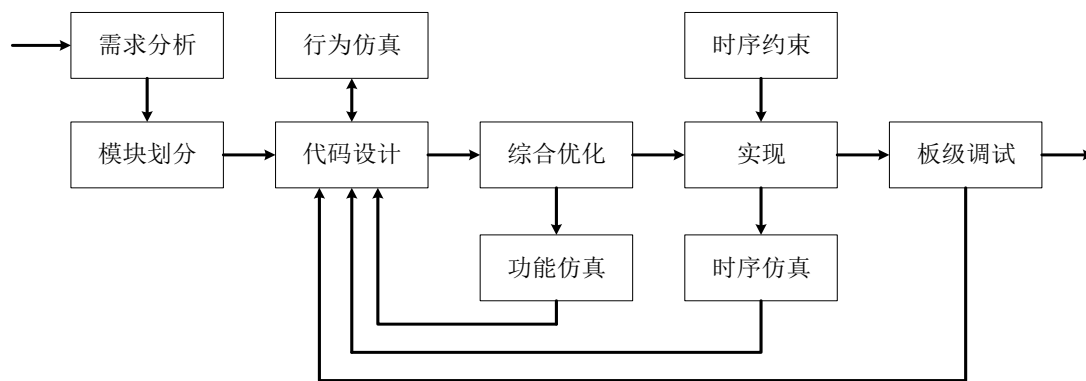


图 3-1 FPGA 开发流程

### 3.1.2 FPGA 设计的基本原则

为了提高硬件资源的利用率，使 FPGA 应用于更复杂的工程中，且在不断提高系统速率的同时满足时序约束，需要遵循设计开发的原则，才能更高效、更高质量的设计出功能强大、性能良好的系统。基于 FPGA 设计的基本原则如下：<sup>[45]</sup>

#### 1) 面积与速度互换原则

对于 FPGA 来说，“面积”是指系统设计消耗的 FPGA 的硬件资源（触发器和查找表）数量；“速度”是指系统设计在芯片上稳定运行时能够达到的最高频率，该频率取决于设计的时序状况，与各寄存器的建立时间、保持时间，线路延迟，外部延迟，时钟延迟以及时序约束等密切相关。面积和速度是衡量一个设计质量的终极标准，一个高质量的系统设计的目标是在规定的面积下，令设计的时序余量更大，频率更高，或者在占用最小的芯片面积前提下，满足设计时序要求。面积与速度是对立统一的，所以一般应平衡面积与速度的要求，如果设计的时序余量较大，则可以考虑通过模块复用来减少芯片面积，或者如果一个设计对时序的要求很高，则可以通过串并转换、乒乓操作、并行复制模块等用面积复制来换取速度的提高。但是若面积与速度二者冲突时，应采用速度优先的原则。

#### 2) 同步设计原则

在系统设计中，异步逻辑设计的时序分析相对困难，设计的继承性较低，且容易产生亚稳态，即在规定时间内，寄存器的输出端不能达到确定态，而在 0、1 之间变化，或者稳定在一个随机态，会影响系统的正确逻辑性能，而且亚稳态在系统中有传递性，甚至会造成系统的崩溃。因此在系统设计中，尽量避免使用异步逻辑，多采用同步设计，既能减少毛刺的出现，有利于进行时序分析，又能提高系统设计的可继承性。对于异步时钟域问题，可以采用数据同步操作，如通过增加异步 FIFO 或 RAM 对数据进行缓存延时，或多级触发操作、增加容错机制避免亚稳态对系统的影响等。

#### 3) IP 核的使用



IP 核，即知识产权核（intellectual property core），是由某一方提供的、经过反复验证、稳定可用的、形式为逻辑单元、芯片设计的可重复调用的宏功能模块，主要可分为逻辑运算 IP 核、数学运算 IP 核、存储器类 IP 核、数字信号处理类 IP 核、输入/输出 IP 核、芯片接口 IP 核以及图像处理 IP 核等几大类。随着 FPGA 应用系统的复杂度越来越高，完成整个系统设计从无到有的开发非常消耗开发人员精力，而如果开发人员在 FPGA 设计开发过程中调用 IP 核，既可以大大缩短开发周期，又能降低开发成本，保证更有效的逻辑综合和实现。在本系统设计中多次使用双口 RAM，异步 FIFO，除法器，Altera 公司提供的 IP 核资源，高度优化的 IP 核有助于开发进程，降低开发成本。

#### 4) 模块划分

当基于 FPGA 实现的项目工程巨大时，模块划分关系到能否最大程度上实现系统设计的继承扩展性，也直接决定着设计的综合、实现步骤所消耗的时间及效率。在 FPGA 设计中，采用的一般是顶层设计原则，自上而下设计。合理分配模块规模，可以平衡处理模块资源共享以及对综合器配置的要求，包括寄存器分割同步时序模块、时序约束较松的逻辑归入同一模块、异步同步逻辑分模块设计等模块划分原则。

### 3.2 目标点图像信息提取方法

目标点图像信息的获取精度直接决定了系统的解算模型是否能正常执行以及测量结果的误差大小。系统上电启动，FPGA 通过 IIC 协议对 CMOS 设置视频输出格式，然后 CMOS 模块实时传输视频信息，后续 FPGA 模块对视频图像进行预处理增强目标特征，DSP 模块根据 FPGA 模块的实时处理结果进行目标识别与提取，获得目标点的质心坐标等信息。

根据 LED 靶标在不同背景环境下的亮度特性以及图像处理算法实时性的要求，FPGA 模块的实现的功能算法主要包括 IIC 配置视频参数、中值滤波、直方图均衡增强以及二值化四个部分。

- 1) IIC 配置视频参数，基于 FPGA 的图像采集系统参数设置即对 CMOS 进行初始化，主要包括配置 CMOS 成像器内部寄存器及控制 CMOS 图像数据输出格式，本设计采用 IIC 控制总线完成内部寄存器参数的数据读写，且在本系统中，只进行内部寄存器的写操作即可。对 CMOS 配置完成后输出特定周期与占空比的同步信号及有效的图像数据。
- 2) 中值滤波，在对系统进行不同背景环境下的仿真测试实验时发现，由于 CMOS 模块采集的实时视频图像存在孤立的噪声点（椒盐噪声），对后续的

目标点识别与提取造成一定的干扰，所以系统采用中值滤波算法去除噪声，综合考虑图像处理的实时性以及噪声剔除质量的要求，选择 3\*3 中值滤波模板在图像有效区域内平移滤波。

- 3) 直方图均衡增强：系统中为了降低太阳光等对 LED 靶标提取的干扰，在 CMOS 传感器模组上安装了窄带滤光片，在一定程度上降低了实时图像的整体亮度，为了方便有效的提取目标点图像坐标，对实时视频图像进行了直方图均衡增强处理，有效提高了目标区域的特征信息。
- 4) 二值化处理：通过实验分析，由于 LED 靶标亮度固定且 CMOS 传感器的曝光时间、增益等参数设置为固定值，虽然不同应用环境下的 LED 靶标图像亮度会发生变化，但是经过滤波和增强后靶标的图像亮度都在固定的亮度区域内，且与其它干扰物体亮度有明显不同，所以采用经验阈值对实时视频图像进行有效分割，最大程度的简化目标识别与提取难度。

经过 FPGA 模块处理输出的二值化图像实时输出至 DSP 模块，DSP 模块对二值化图像进行区域增长及连通域标记操作，剔除误区域后提取各有效连通域的质心作为空间位姿解算模型的输入图像坐标。

### 3.3 基于 FPGA 的图像采集及图像预处理实现

#### 3.3.1 基于 FPGA 的图像采集系统设置

本系统的 CMOS 芯片采用 IIC（Inter-Integrated Circuit）两线通信，其通信协议与实现方式如图 3-2 所示，FPGA 作为主设备，配置 CMOS 的输出时钟信号 SCL，并通过 SDA 数据线向 CMOS 寄存器写入信号，CMOS 作为从设备<sup>[46]</sup>，CMOS 通过拉低 SDA 向 FPGA 传输数据和响应 FPGA 的数据通信。

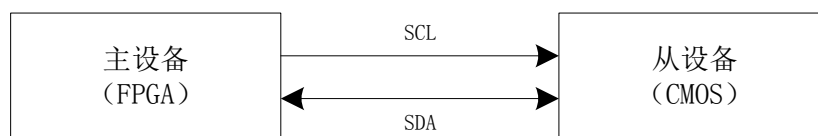


图 3-2 IIC 总线连接方式

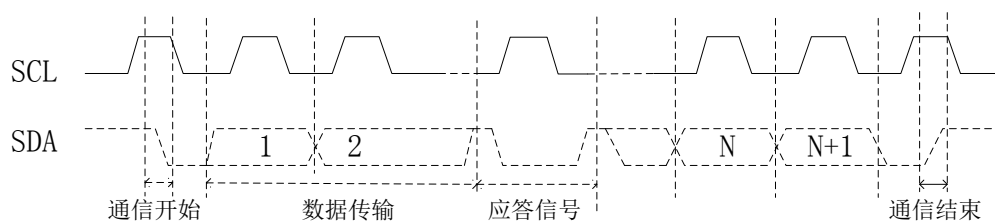


图 3-3 IIC 通信协议图

如图 3-3 所示是 IIC 协议的通信协议图，当 SCL 保持高时，SDA 由高变为低为通信开始标志，由低变为高时为通信结束标志，且 SDA 线上的数据必须是稳定的；SCL 为低时，SDA 的数据才可以改变。SDA 线上是 8 位字节，每个字节都会有一个应答 ACK。如图 3-4 所示是 IIC 的一次传输的数据格式。

设备地址 8bit	X 1bit	寄存器地址 [15: 8]	X 1bit	寄存器地址 [7: 0]	X 1bit	数据 [15: 8]	X 1bit	数据 [7: 0]	X 1bit
--------------	-----------	------------------	-----------	-----------------	-----------	---------------	-----------	--------------	-----------

图 3-4 IIC 数据传输协议

基于 FPGA 的寄存器配置程序设计利用 CMOS 寄存器参数配置与 IIC 协议输出两个模块完成，本系统选用的 CMOS 的设备地址为 0x30，其中内部有 115 个寄存器用于参数配置，如下表所示：

表 3-1 CMOS 寄存器参数配置表

寄存器地址	值	功能	值	寄存器地址	值	功能	值
0x3002	0x0002	行开始	2	0x3056	0x0020	Gr_GAIN	/
0x3004	0x00A0	列开始	160	0x3058	0x0020	BLUE_GAIN	/
0x3006	0x03C1	行结束	1025	0x305a	0x0020	RED_GAIN	/
0x3008	0x045F	列结束	927	0x305c	0x0020	Gb_GAIN	/
0x300A	0x03DE	场长度	990	0x302C	0x0001	像素时钟	60Mhz
0x300C	0x0672	行长度	1650	0x302A	0x0008		
				0x302E	0x0008		
				0x3030	0x0050		
0x3012	0x0019	曝光	/				

CMOS 初始化模块接口如图 3-5 所示，SCL、SDA 连接 CMOS 图像传感器，clk、rst 分别连接系统时钟和全局复位信号，done 信号作为 CMOS 初始化模块的完成标志信号，当 CMOS 成像器配置完成后，done 输出高电平信号，开始图像采集。

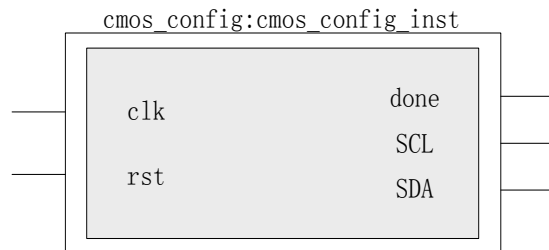


图 3-5 CMOS 初始化模块接口

### 3.3.2 基于 FPGA 的实时图像预处理实现

#### （一）中值滤波

中值滤波是对像素领域内的序列进行排序完成的一种非线性信号处理技术，既能去除脉冲噪声、椒盐噪声，又能保留图像的边缘细节，克服了均值滤波方法引起的图像细节模糊的缺陷，且算法简单。中值滤波是对以待处理像素为中心的奇数长度的窗口邻域内的所有数据进行排序，取序列的中间值代替该像素的灰度值，去除了可能存在的灰度值的粗大误差点，从而消除孤立的噪声点。

基于 FPGA 的中值滤波示意图如图 3-6 所示，主要分为输入缓存、3\*3 模板中值计算、输出缓存三个模块。

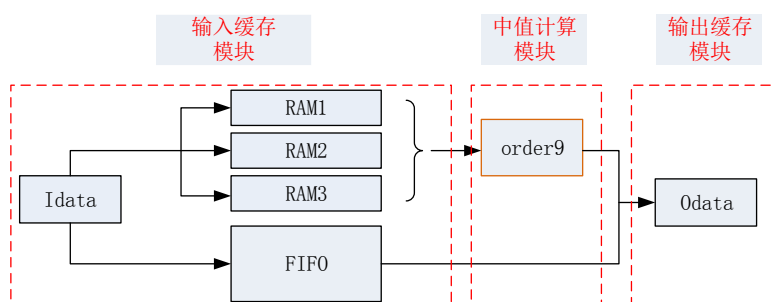


图 3-6 中值滤波示意图

- 1) 输入缓存模块主要用来缓存实时输入视频数据，并实时输出到中值计算模块。如图 3-7 是输入缓存模块示意图。视频的有效像素数为  $1024 \times 768$ ，在  $3 \times 3$  模板进行中值滤波时，只对模板的中间像素进行处理操作，帧边缘像素（首行、尾行、行首像素、行尾像素）采用原像素值输出处理，所以缓存到 FIFO 中。中值滤波模板需要  $3 \times 3$  格式的数据输入，所以采用深度为 1024 的 RAM1，RAM2，RAM3 分别缓存参与中值滤波计算的三行有效数据，为了节省数据输出时间，RAM 中的数据采用相邻 3 个数据拼接成宽度为  $12 \times 3$  的数据格式（如图 3-7 中数据 1、2、3 拼接为第一个数据，2、3、4 拼接为第二个数据，依次类推）存入。

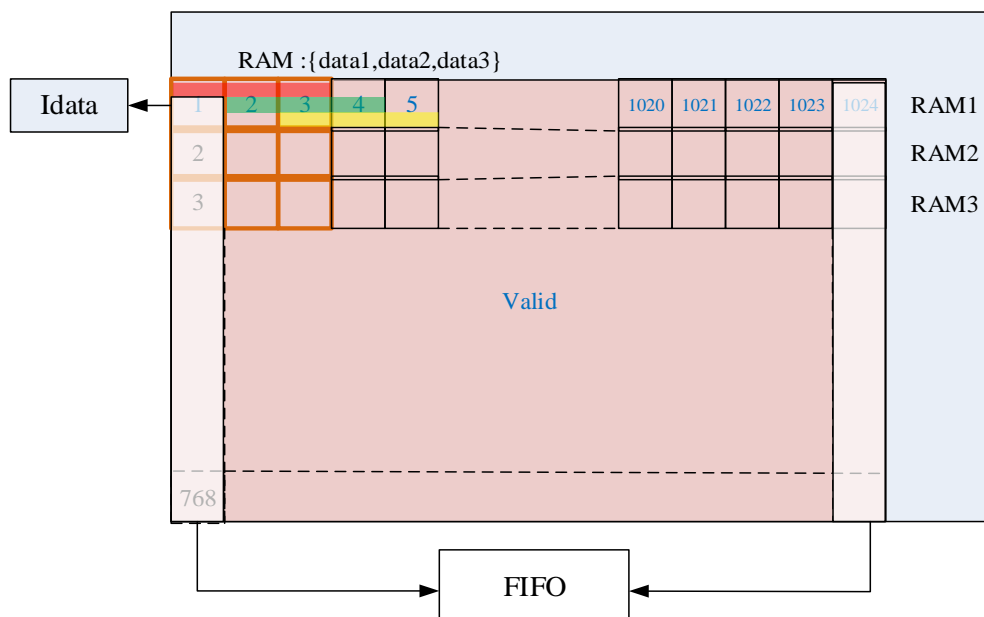


图 3-7 输入缓存模块示意图

- 2) 中值计算模块是中值滤波处理的核心模块，如图 3-8 所示，其中 order3 模块是对输入的三个数进行排序，并以最大值、中值、最小值的模式并行输出。

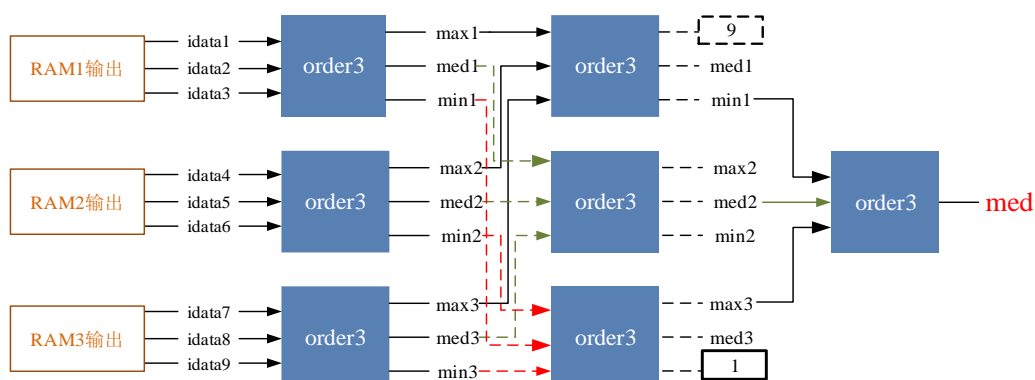


图 3-8 中值滤波模块

第一步：在输入缓存模块的三个 RAM 中存储数据宽度均为  $12 \times 3$ ，所以先分别同时从 RAM1、RAM2、RAM3 中取出一个数据，并拆分每个数据为三组 3 个宽度为 12 的灰度数据 d1,d2,d3（如 idata1,idata2,idata3），利用模块复用原则，将三组 d1,d2,d3 输入到三个 order3 模块，完成三个数据的排序输出以下三组数据：

最大值组：Max = {max1, max2, max3}

中值组：Med = {med1, med2, med3}

最小值组：Min = {min1, min2, min3};

第二步：对取得的三组数据再分别输入到 order3 模块并行处理，从最大值组中提取最小值 max\_min1、中值组中提取中间值 med\_med2，最小值组中提取

最大值 min\_max3;

第三步：将第二步中提取的三个数再次输入 `order3` 模块进行排序，输出的中间值即为所求结果。

基于流水线对输入的 3\*3 的数据进行 3 次并行的三数排序对比，即可输出 9 个数的中值，作为中心元素的滤波值。由于每个 RAM 中的数据都是三个有效数据拼接的，所以每个时钟周期同时从 RAM1、RAM2、RAM3 取一个数据，则参与中值计算的 9 个数据均进入中值滤波模块，每组数据的排序需要 3 个时钟周期，根据流水线特性，从第 3 个时钟周期开始，每个时钟都会有处理结果实时输出，所以本模块对整体数据只延时 3 个时钟周期，不会破坏数据的实时性。

3) 输出缓存模块, 根据输入缓存模块以及中值计算模块对整体时钟的延时, 重新设置行同步信号、场同步信号与中值计算实时输出对应, 其中整帧数据的边缘信号均从 FIFO 中读取, 其他由中值计算模块实时输出。

如图 3-9 所示是中值滤波模块的 Modelsim 仿真图。

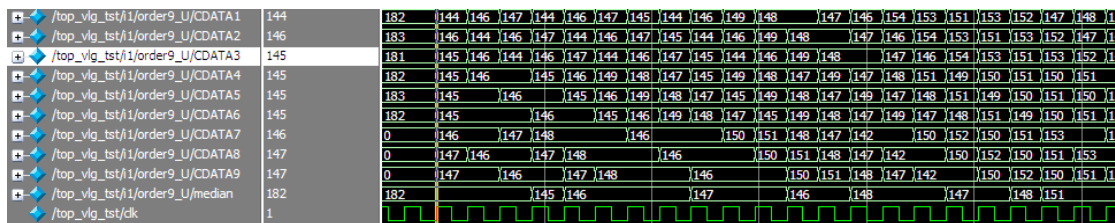


图 3-9 中值滤波模块仿真图

在传统软件设计中中值滤波的实现多采用冒泡排序法, 如果对 9 个数排序并在提取到中间值时停止, 一组数据需要进行  $8+7+6+5+4=30$  次比较排序运算, 至少需要 30 个时钟周期, 而本设计中中值计算模块利用了 FPGA 的并行处理数据和流水线设计的优势, 只需 3 个时钟周期即可完成中值提取, 且充分利用了 FPGA 的硬件资源, 大大提高了资源利用率以及图像处理效率。

## （二）直方图均衡

本文中图像预处理的目的是更易于后续目标的识别与提取,本系统相机镜头前装有滤波片,所以整幅图像的视场亮度偏暗,LED 靶标相对于背景图像较亮,但是直接利用阈值进行二值化处理仍然存在较多的干扰噪声,不利于进行目标识别与提取,所以在对图像进行中值滤波之后又进行了一次图像增强处理。图像增强是指按特定的需要突出一幅图像中的某些目标信息,同时削弱或者去除某些不需要的背景信息。考虑到需要保证视频的实时性、FPGA 资源利用有效性以及图像目标特征简单等特点,本文选择空间域直方图均衡增强方法。

直方图均衡化处理是将灰度分布较集中的图像进行直方图均衡化,使整幅图

像的灰度较均匀的分布在整個灰度级范围内，进而提高图像的对比度，增强目标区域的特征信息。基于 FPGA 实现的实时视频的直方图均衡化主要分为以下三步：

- 1) 遍历图像，设  $L$  表示图像灰度的最大值（如 8bit 图像的  $L$  为 255）统计一帧图像中  $0 \sim L$  各灰度级的像素数  $n_i$  ( $i=0 \sim n$ ,  $n$  为图像的所有像素数)；
- 2) 计算各灰度级在图像中的累积像素数  $nc_i$ ，即

$$n_{ci} = \sum_{i=0}^{ci} n_i \quad (3-1)$$

并利用以下公式完成各灰度级的灰度均衡计算：

$$y_i = n_{ci} / n * L \quad (3-2)$$

- 3) 利用 2) 计算得到的各灰度级的均衡结果对整幅图像做直方图均衡的映射。

为了保证本系统的视频实时性，直方图均衡部分采用第  $n$  帧图像的灰度均衡结果对第  $n+1$  帧图像做灰度映射处理，其中第 1 帧图像原图输出。在不影响目标点提取精度的前提下，定义本系统中待处理视频数据为 8 位（取 12 位数据的高 8 位），所以灰度级为  $0 \sim 255$  共 256 级，如图 3-10 为程序主要架构。

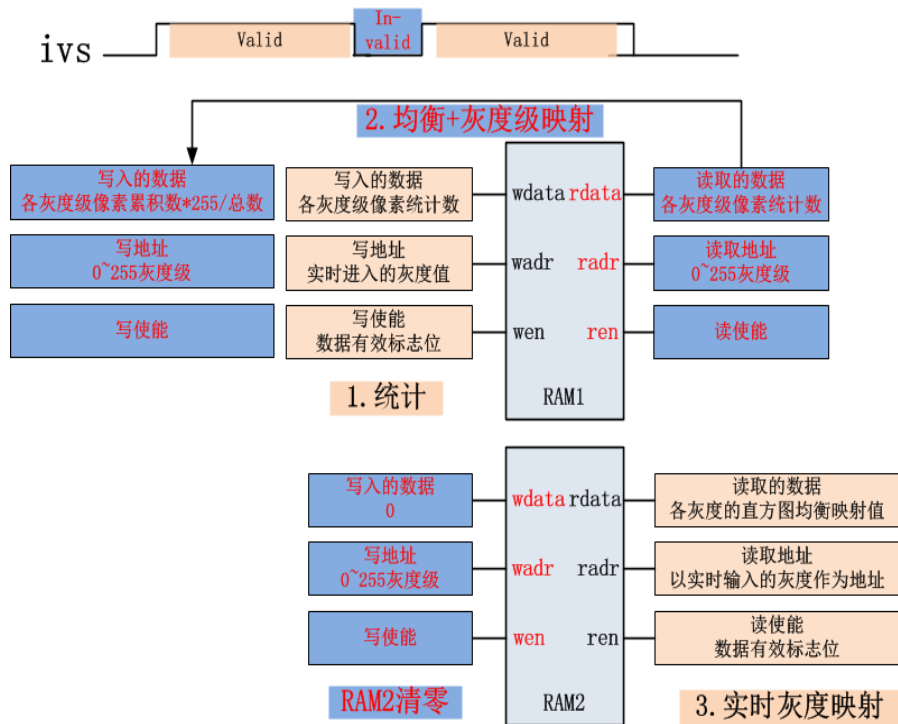


图 3-10 基于 FPGA 实现的直方图均衡算法程序架构

基于 FPGA 的直方图均衡算法的实现主要是利用两个双口 RAM 进行乒乓操作，对实时视频图像的奇偶帧轮流分别做灰度统计均衡、直方图均衡灰度映射操作。以第二帧（偶数帧）图像处理为例，如图 3-10 所示，RAM1 作为灰度统计均衡存储，RAM2 作为灰度映射值的存储，RAM1、RAM2 宽度均为 20 位（在灰度值统计期间，最大像素数为  $1024 \times 768$ ），深度均为 256。

- 1) 在图像的场同步信号有效期间（高电平有效），随着图像有效数据的输入，以像素灰度值（0~255）为 RAM1 的写地址对各灰度级的像素数进行计数操作；
- 2) 同时，以像素灰度值（0~255）为 RAM2 的读地址读取相应位置的直方图均衡映射值（上一帧的直方图均衡值）并作为该像素的输出灰度值；
- 3) 在图像的场同步信号消隐期间，对 RAM1 各地址的存储值进行累积、均衡计算，并存入相应位置作为下一帧的映射存储 RAM 使用；
- 4) 在图像的场同步信号消隐期间，对 RAM2 各地址进行清零操作，在下一帧中 RAM2 作为灰度值统计存储使用。

由于对双口 RAM 写入读地址后，两个时钟周期才能从 RAM 输出端读取存储值，所以在直方图均衡模块对整个视频的延时时间为 2 个时钟周期。

### （三）二值化处理

本系统中的目标识别与提取是基于 DSP 实现的区域增长与连通域标记的方法，所以在预处理部分对视频图像进行二值化处理。二值化就是将图像上的像素点的灰度值根据其于阈值的大小关系设置为 0 或 255。在实验中发现，LED 靶标在各应用环境中经过图像增强处理后图像亮度都较稳定，所以二值化的阈值设为定值，在程序中，随着图像有效数据输入二值化处理模块，经过阈值比较部分，对图像灰度值进行 0 或 255 的设置，完成图像二值化处理。本模块不会对实时视频引入延时。



## 第4章 位姿测量系统的仿真分析与实验验证

第二、三章主要介绍了基于合作目标和单相机的空间相对位姿测量方法、相机内部参数标定方法以及图像预处理的实现。本章首先介绍了仿真实验系统，然后对位姿测量算法中的误差源进行了误差分析，并在系统测量距离范围内进行多点位置和姿态的解算实验完成对系统解算算法的精度验证。

### 4.1 系统测试环境介绍

系统测试环境如图 4-1 所示，主要由上位机、CMOS+DSP+FPGA 传感测量模块、双环 LED 靶标三部分组成，其中上位机用来实时显示视频信息并保存实时测量结果；如图 4-2 所示是 CMOS+DSP+FPGA 的传感测量模块，为了更好的图像处理效果并简化图像处理流程，在镜头前端装有 730nm~750nm 波长范围（中心波长为 740nm）的窄带滤光片，有效地滤除了 LED 靶标以外的大部分干扰；如图 4-3 所示是双环 LED 靶标实物图，本次实验测试近段算法的精度，所以使用内环的四个 LED 靶标（波长为 740nm 的红色 LED），放在 LED 靶标盘中心的是 LE-30 倾角传感器，测量靶标盘相对于相机的旋转角度，作为角度实时测量中的基准值，精度为 0.01 度。其中双环 LED 靶标相对于传感测量模块的纵向移动距离最大为 5m。



图 4-1 系统测试环境

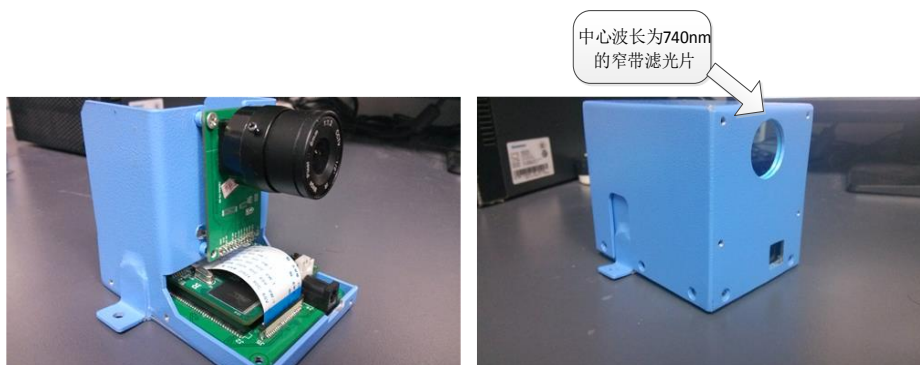


图 4-2 CMOS+DSP+FPGA 传感测量模块

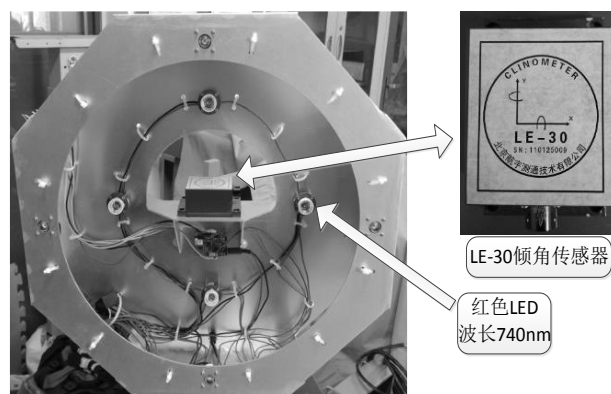


图 4-3 双环 LED 靶标实物图

如图 4-4 所示是本算法的测量系统示意图，靶标盘上固定四个共面 LED 灯标志点 R\_LED, L\_LED, U\_LED, D\_LED，定义靶标坐标系  $O_s-X_sY_sZ_s$  的中心  $O_s$  为四个 LED 所在正方形的对角线交点，即本文算法的目标解算点。  $X_s$ 、 $Y_s$  轴方向如图 4-4 所示, L\_LED 指向 R\_LED 的方向为  $X_s$  轴正向, U\_LED 指向 D\_LED 的方向为  $Y_s$  轴正向,  $Z_s$  轴垂直于 LED 标志点所在平面并指向远离相机的方向。本系统中，相机模块视场角为  $53^\circ$ ；四个 LED 靶标点所在正方形对角线长度为 280mm，4 个 LED 目标点的共面误差对算法的解算精度影响可以忽略。

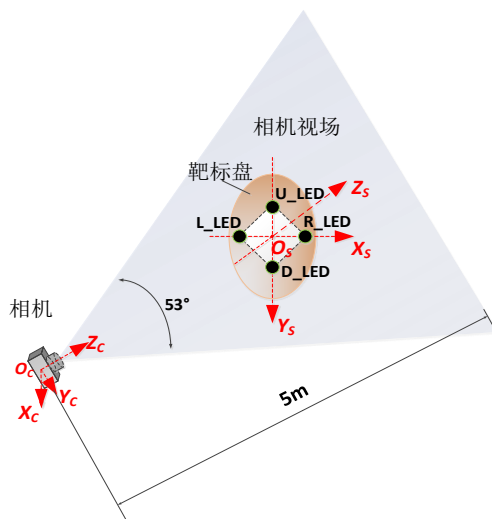


图 4-4 测量系统示意图

## 4.2 基于单相机的空间位姿测量算法的误差仿真分析

在第 2 章主要介绍了本课题基于二维合作目标与单相机对目标飞行平台进行实时位置和姿态测量的数学模型以及单相机的内参标定方法、对图像坐标的去畸变操作算法。为了满足系统的应用要求,并验证算法对系统参数误差的敏感度,本节对测量模型各误差因素对测量精度的影响进行逐一分析并判断本系统是否能满足课题的应用要求。

### 4.2.1 影响测量精度的因素

对基于单目视觉测量原理构建的测量系统进行全面的误差仿真分析,是研究各系统参数对测量精度影响程度的关键环节,可以确定测量模型对系统参数的误差大小的容忍度,进而为验证系统的可行性、有效性以及进一步优化系统设计有一定的指导作用。从第二章推导的位置和姿态原理出发,认为影响系统测量精度的因素主要分为三个方面:相机标定获得的内部参数误差、图像坐标提取误差以及靶标盘共面靶标的位置误差。

相机内部参数误差,内部参数包括:相机焦距、主点、像面大小、像元尺寸、镜头畸变参数,其中像元尺寸、像面大小是相机的出厂设定参数,相机焦距、主点以及镜头畸变参数是通过相机标定得到的。由于相机标定方法的局限性以及在标定过程中不可避免的操作误差等都会对标定结果引入误差,进而影响位姿解算的精度,其中焦距、主点以及畸变参数对解算模型引入误差都可以转化为图像坐标的形式,因此需要确定在课题要求的位姿解算精度范围内所允许的相机标定参数所引入的图像像素坐标的误差。

图像坐标的提取误差,图像坐标是指系统中的 LED 靶标在图像中的像点位置,误差来源主要分为两种,一种是由于镜头本身的畸变,在靶标点成像时就引入了图像坐标的误差;另一种是提取误差,由于对靶标的像点的提取需要通过图像预处理、目标识别、提取质心位置的步骤,不能保证在每一步中都精确的选择到靶标理想像点的坐标,所以会引入误差。由于图像坐标决定了目标的成像视线,对确定目标在世界坐标系中位置有决定性的作用,所以需要确定本系统测量模型对图像坐标误差的敏感度,以保证系统的精度及稳定性。

靶标盘共面靶标点的位置误差,本系统采用二维的合作靶标,认为靶标盘上四个 LED 靶标共面,且位于对角线固定的正方形顶点上,即在世界坐标系的坐标已知。由于靶标盘的机械制作工艺等原因,可能会引进靶标面上的位置误差,即对四个 LED 的位置在 X,Y 方向上存在偏离误差,四个 LED 靶标的世界坐标系坐标用来计算系统的单应性矩阵,而目标点相对于相机坐标系的位置和姿态信

息的解算都是从单应矩阵导出，所以靶标盘共面靶标点的位置误差会直接影响系统的解算精度，所以需要对其进行误差分析，以确定现系统中的靶标盘是否满足精度要求。

根据上述分析，对本文的系统解算模型进行误差分析时，主要考虑以下几个因素的影响：焦距，主点位置，图像坐标以及靶标点在靶标盘平面上的位置。因为在相机的成像模型中，焦距、主点位置、图像坐标的误差，都会引起位姿解算中的像素图像坐标的误差，进而影响系统的解算精度，所以在做仿真分析时，综合三个因素的影响，分析像素图像坐标的误差对系统精度的影响程度。各仿真模型参数的设置如下。

#### 1) 测试点选择

对测试点的选择主要分为两部分，一是固定测试点的三维坐标以及两个旋转角度，变换第三个角度（如从-30 读到 30 度）作为一系列的仿真测试点，以测试系统在不同角度下对误差源的敏感度，本次仿真中选用横滚角作为变化量；二是固定三个旋转角度以及 Z 向坐标，选择系统测量视场内的某 X-Y 平面的矩形区域点作为仿真测试点，以测试系统在视场的不同位置对误差源的敏感度。

#### 2) 仿真观察值：

将测试点在相机坐标系中的三个旋转角以及三个坐标轴方向的测量误差  $\Delta X_C$ ,  $\Delta Y_C$ ,  $\Delta Z_C$ ,  $\Delta \alpha$ ,  $\Delta \beta$  以及  $\Delta \gamma$  作为仿真测量值，三个坐标轴的信息以测量误差相对于标准值的百分数作为仿真观察值，三个旋转角以测量误差绝对值作为仿真观察值，其中系统的精度要求为位置精度在 1%，角度精度在 1 度以内。

#### 3) 误差源

综合考虑系统实时测量的过程，进行误差分析时考虑的误差源包括：图像坐标的像素坐标误差以及靶标点在靶标盘上的位置误差。

#### 4) 仿真模型的实验环境参数：

设定系统的测量区域为相机 Z 向 5m 内的视场范围，相对角度变化范围为-30~30 度，对应的测量环境示意图如图 4-4 所示，其中靶标盘的中心为目标测量点，且该点为设定的靶标坐标系的中心。

### 4.2.2 像素坐标误差对系统测量的影响

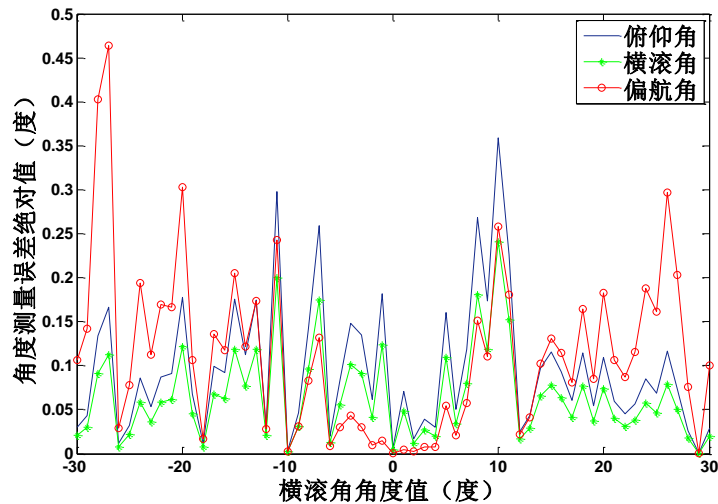
为了评定像素坐标误差对系统测量误差的影响，设定系统的其他参数为定值，通过对位姿解算中的图像像素坐标加入误差项，对测试点的测量误差进行仿真分析。

表 4-1 仿真模型关键参数设定

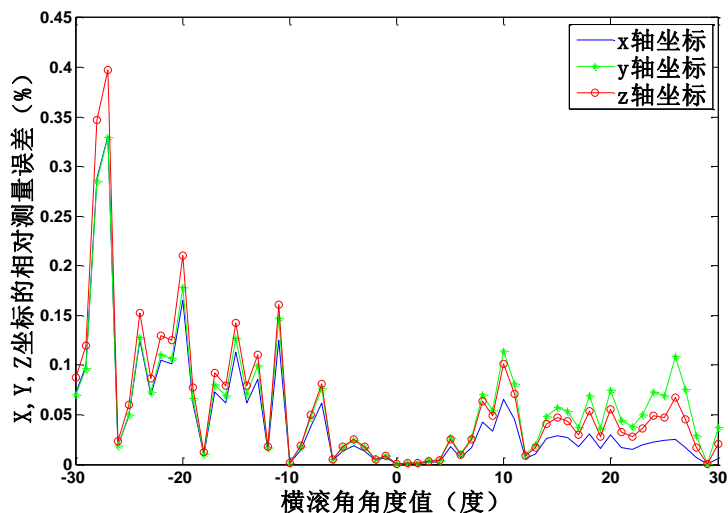
参数名称		设定值
固定参数	主点坐标 (像素)	(600 ; 469)
	焦 距 (像素)	1642
	像元大小 (um)	3.75
第一种测试点 姿态选取方法	旋转角度 (度)	横滚角
		俯仰角
		偏航角
	目标点坐标 (mm)	X
		Y
		Z
第二种测试点 姿态选取方法	旋转角度 (度)	横滚角
		俯仰角
		偏航角
	目标点坐标 (mm)	X
		Y
		Z
误差项	对目标点图像像素坐标加入高斯白噪声 (像素)	均值为 1, 方差为 0.5
		均值为 2, 方差为 0.5

注：目标点坐标的参考坐标系为相机坐标系

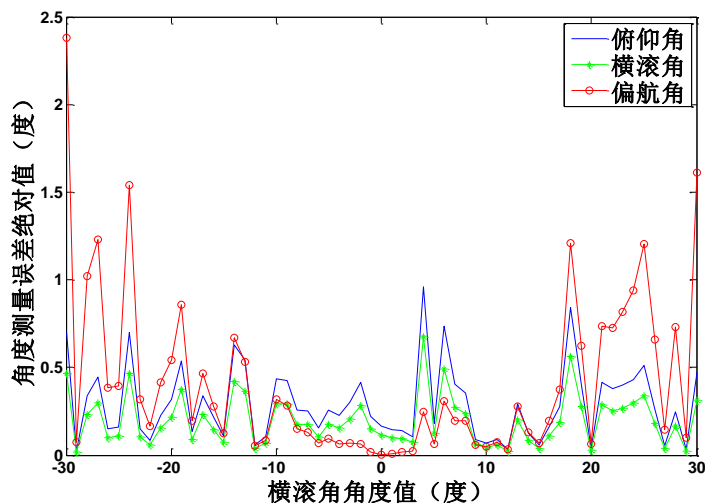
表 4-1 是本节仿真模型关键参数值的设定以及测试点的选取方法，其中对目标点的图像像素坐标加入的噪声为高斯噪声，选择均值为 1 和 2，方差均为 0.5 的两种高斯噪声随机添加到四个 LED 靶标点的像素图像坐标中，以第一种测试点选择方法分别完成两组位姿测量的仿真结果如图 4-5,4-6,所示，



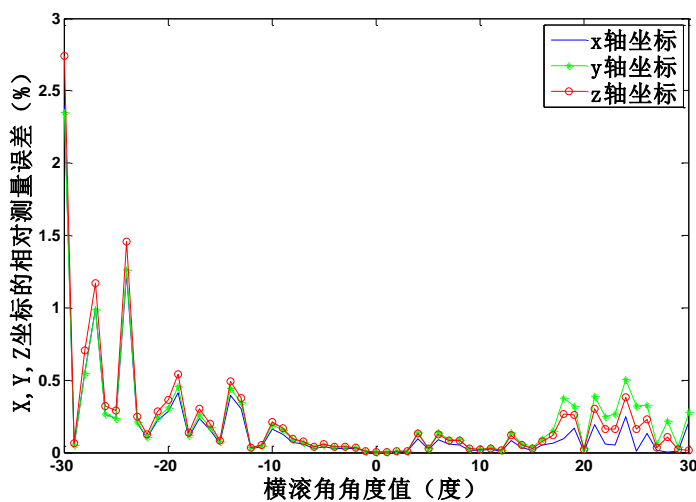
4-5 (a) 均值为 1 的像素图像坐标误差随着横滚角变化引起的系统角度测量误差变化曲线



4-5 (b) 均值为1的像素图像坐标误差随着横滚角变化引起的系统坐标测量误差变化曲线



4-6 (a) 均值为2的像素图像坐标误差随着横滚角变化引起的系统角度测量误差变化曲线



4-6 (b) 均值为2的像素图像坐标误差随着横滚角变化引起的系统坐标测量误差变化曲线

其中, 4-5 对四个 LED 靶标点的像素图像坐标随机添加均值为 1 个像素, 方差为 0.5 个像素的高斯噪声误差的误差分布曲线, 4-5(a)、4-5(b)分别是随着横滚角的变化, 对系统测量的三个旋转角度和三个坐标轴坐标的仿真测量误差变化曲线; 4-6 是对四个 LED 靶标点的像素图像坐标随机添加均值为 2 个像素, 方差为 0.5 个像素的高斯噪声误差的误差分布曲线, 图 4-6(a)、4-6(b)同样分别是随着横滚角的变化, 对系统测量的三个旋转角度和三个坐标轴坐标的仿真测量误差变化曲线。

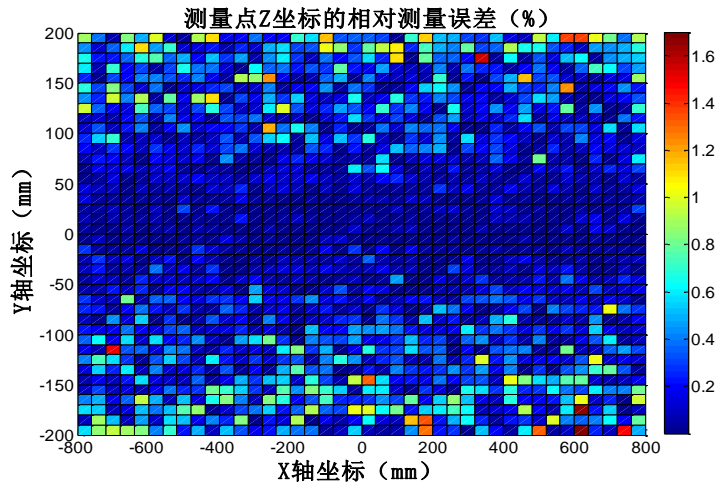
结合图 4-5、4-6 的误差数据分布曲线可知:

①当图像像素坐标引入均值为 1 个像素, 方差为 0.5 个像素的高斯噪声误差时, 随着横滚角角度变化测试点的仿真测量中, 三个旋转角及三个坐标轴坐标的测量误差均满足系统精度要求; 而当引入的高斯噪声均值为 2 个像素, 方差为 0.5 个像素时, 出现了超出系统精度要求的测试点, 在横滚角变化选取的测试点中, 以偏航角仿真测量误差超过 1 度的测试点所占比例最大, 达到了 5%, 通过数据观察发现, 对这些测试点的图像像素坐标引入的误差都在 3.2 像素以上。

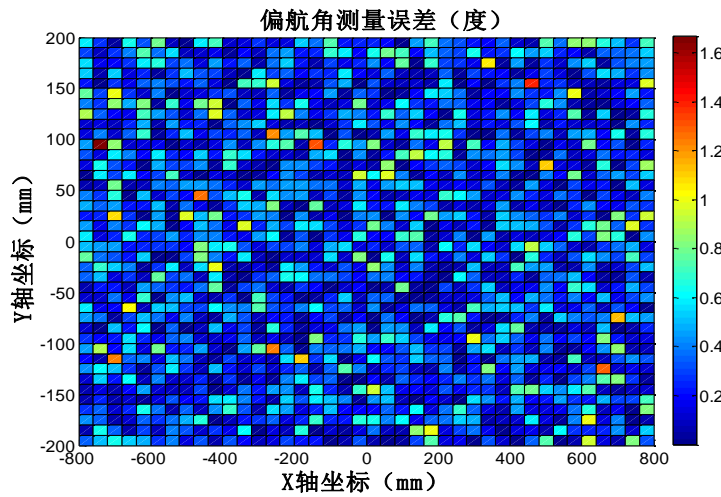
②在横滚角角度变化中选取的测试点的仿真分析中发现, 随着横滚角的变化, 三个旋转角度的测量误差变化趋势一致, 即图像像素坐标的误差对三个角度的测量误差影响一致, 其中偏航角的测量对图像像素坐标误差的引入最敏感; 三个坐标轴坐标的测量误差变化趋势也一致, 且相对误差变化幅度相差不大, 其中 Z 轴坐标误差更大一些。

③针对 4-5、4-6 的误差仿真曲线, 利用第二种测试点选取方法对上述仿真中误差最大的两个量, 即偏航角与 Z 向坐标测量误差进行仿真分析, 对图像像素坐标引入的误差为均值为 2 个像素, 方差为 0.5 个像素的高斯噪声, 如图 4-7(a)、4-7(b)所示, 由图可知, 图像像素坐标误差对 X-Y 平面上监测区域的测试点引入的 Z 像坐标相对误差也出现了超出系统精度要求的较大误差点, 通过对引入的图像像素坐标误差的数据分析看出, 在较大误差点处引入的图像像素坐标误差均在 3.0 个像素以上; 而图 4-7(b)中偏航角的测量误差在图像像素误差为 2.8 像素左右的测试点中也出现了超过系统精度要求的较大误差点, 因此可得出如下结论:

- 1) 本系统对图像像素坐标的误差较敏感, 以 Z 向坐标与偏航角的测量较为明显;
- 2) 从三个坐标轴坐标和三个旋转角度的误差仿真曲线可知, 在满足系统精度要求的前提下, 本系统能够容忍的图像像素坐标的最大误差为 2.5 个像素误差;



4-7 (a) 像素图像坐标误差在 X-Y 平面引起的系统 Z 坐标测量误差变化曲线



4-7 (b) 像素图像坐标误差在 X-Y 平面引起的系统偏航角测量误差变化曲线

### 4.2.3 靶标点位置误差对系统测量的影响

为了评定靶标点在靶标盘上的位置误差对系统测量误差的影响，设定系统的其他参数为定值（见表 4.1），通过对位姿解算中的四个 LED 靶标的世界坐标系中的坐标随机加入均值为 5mm，方差均为 1mm 的高斯噪声误差，对测试点的测量误差进行仿真分析如图 4-8 所示。



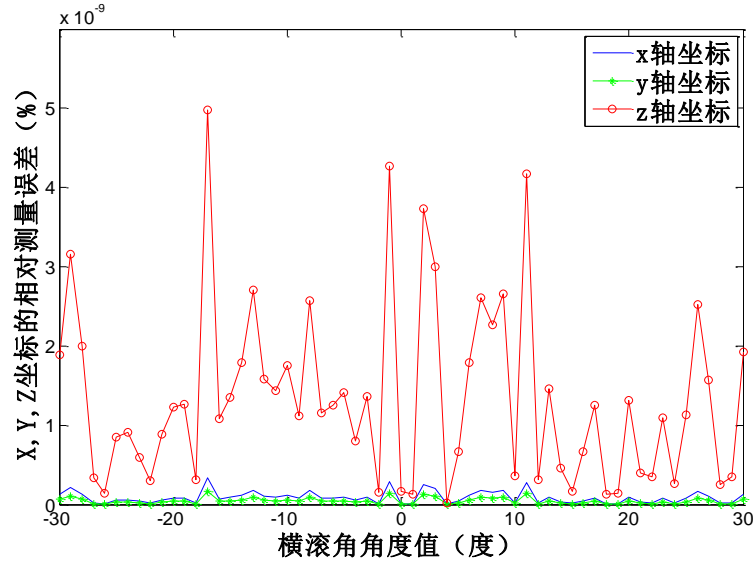


图 4-8(a) 靶标点的位置误差随着横滚角变化对系统坐标测量误差的影响

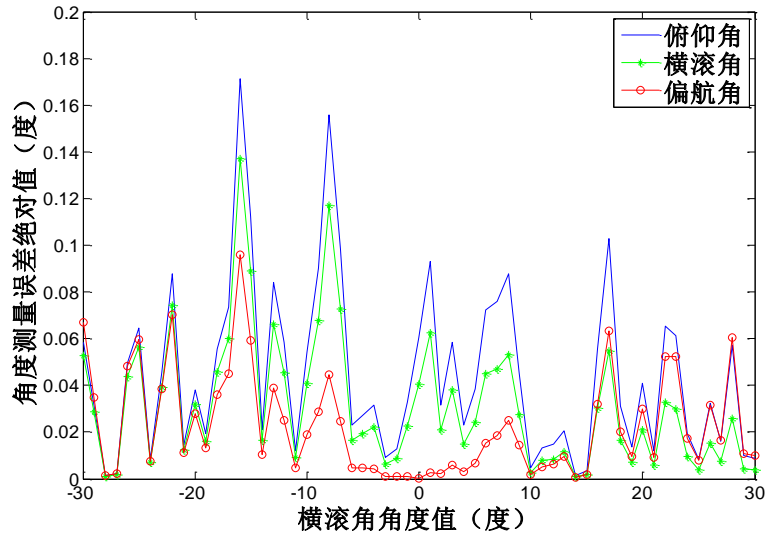


图 4-8(b) 靶标点的位置误差随着横滚角变化对系统角度测量误差的影响

由 4-8(a)可知,靶标点的位置误差对系统的三个坐标轴的测量基本没有影响,而 4-8(b)图中,随着横滚角的变化,三个旋转角的误差最大值小于 0.18 度,对误差最大的俯仰角进行第二种测试点选取仿真分析如图 4-9 所示,在 1600\*400 的测量区域内,靶标点的位置误差对俯仰角引入的最大误差为 0.35 度,且只有不到 3%的点达到了 0.2 度以上,因此可得出以下结论:

- 1) 靶标点的位置误差对系统的三个坐标轴坐标的测量误差影响很小,基本为 0;
- 2) 靶标点的位置误差对系统的三个旋转角度的测量误差影响较小,其中对俯仰角的影响最大,但最大误差只有 0.35 度,且大部分误差在 0.1 度左右。因此本系统能够容忍的靶标点的位置误差大于 5mm。

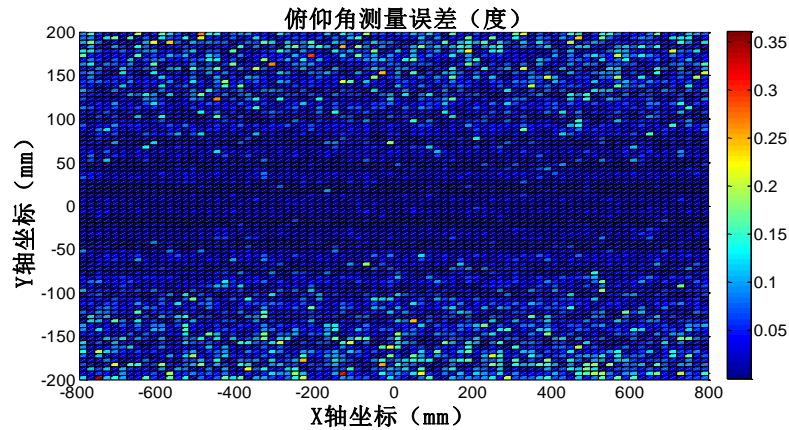


图 4-9 靶标点的位置误差在 X-Y 平面对系统俯仰角测量误差的影响

#### 4.2.4 仿真分析结论

通过对图像像素坐标误差与靶标点的位置误差两个误差源的仿真分析，以两种测试点的选取方法分别验证误差源随着角度变化以及在位置变化测量中对系统六个测量量（三个坐标轴坐标以及三个旋转角）的影响，可得出以下结论：

- 1) 图像像素坐标误差对 Z 向坐标与偏航角的测量影响较大；靶标的位置误差对俯仰角的测量影响较大，且对坐标测量基本没有影响；
- 2) 本系统对由焦距、主点、靶标点图像坐标引入的图像像素坐标的最大容忍误差为 2.5 个像素；本系统选取的相机内参标定方法中，焦距与主点对图像像素坐标引入的误差最大为 1 像素，且理论上对靶标点图像坐标提取误差在 1 个像素以内，因此本系统中引入的图像像素坐标误差满足系统精度要求；
- 3) 对靶标的位置误差容忍度在 5mm 以上，且在本系统中，靶标盘的平面制作精度（即四个 LED 靶标的位置）误差小于 3mm，因此靶标的位置误差对最后测量结果的影响在系统的精度要求范围内。

### 4.3 位姿测量系统的实验验证

#### 4.3.1 单相机内参标定

相机标定是本系统实验的准备内容，标定的相机内部参数作为测量中的已知条件。标定过程是首先用相机对棋盘格靶标（如图 4-10 所示）采集至少 20 张图像，然后利用 matlab 中的 `calib_toolbox` 工具箱进行相机内参标定，具体标定步骤如下。

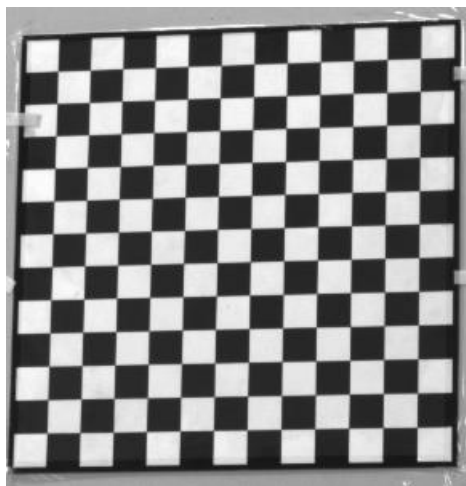


图 4-10 棋盘格靶标

首先，通过在 matlab 命令窗口输入 `calib` 启动标定工具箱，如图 4-11，

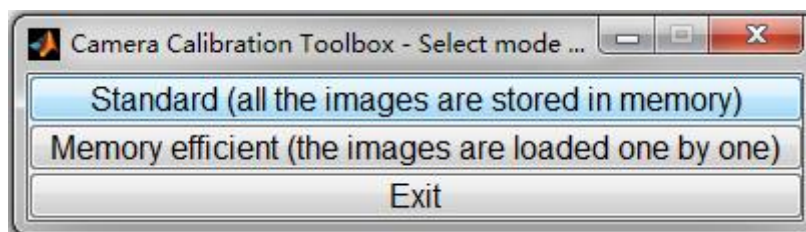


图 4-11 calib 工具箱操作

选择 `Standard(all the images are stored in memory)`，如图 4-12

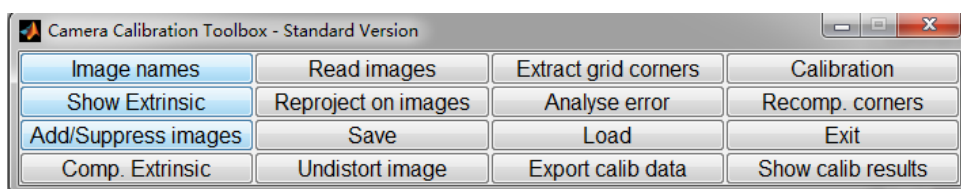


图 4-12 calib 工具箱操作

先通过 `Read images` 读取目前工作路径下的图片，并通过选择图片的名称与类型来确定参与标定的图片。然后使用 `Extract the grid corners`，选择角点提取窗口的大小 ( $x,y$  两个方向)，再依次对每幅图像手动提取四个边界角点的坐标，其中第一个提取点作为图像坐标原点，根据标定棋盘格中横向与纵向的角点个数，计算机自动提取其余角点，如果整个棋盘格图像的角点提取存在较明显的畸变，可以通过改变畸变参数  $kc$  来校正图像，直到整幅图像的角点位置均较为准确。对所有进行标定的图像进行完上述步骤后，使用 `calibration` 进行标定，输出相机的焦距、主点与畸变参数，如表 4-2 所示。此种方法的标定结果是包含不确定度的优化结果，即对图像畸变校正后进行的标定结果。其中，标定结果中的数据单位均是

像素,  $fc$  的两个元素分别表示相机的横向和纵向焦距,  $cc$  表示相机的主点坐标,  $\alpha_c$  表示坐标轴倾斜系数,  $kc$  为畸变参数。

表 4-2 相机标定结果整理

	焦距 $fc(fc1,fc2)$	主点坐标 $cc$	畸变参数 $kc (kc1,kc2)$
相机参数	(1642, 1642)	(600, 469)	(-0.4352, 0.2645)

### 4.3.2 姿态角测量实验

在本系统中, 需要实时解算靶标盘相对于相机坐标系的旋转角度, 本节主要是验证在相机的测量视场范围内对角度测量的精度, 以精度为 0.01 度的 LE-30 倾角仪作为横滚角、俯仰角的角度测量标准量, 重复性误差判断偏航角的测量精度。由于装置有限, 本次实验对三个角度(横滚角、俯仰角、偏航角)的测试范围为-30 度~30 度, 且为了保证倾角仪的精度, 实验中在测量某一变化角度(如横滚角)时, 需要保证另外两个角度(俯仰角、偏航角)尽量保持在 0 度附近。在进行角度实时测量实验之前, 需要先对相机及靶标盘的相对姿态进行调零操作。

首先, 微调靶标盘横滚角、俯仰角方向上的姿态, 直到倾角仪的横滚角和俯仰角的输出为 0 (允许浮动范围为 0.05 度), 固定靶标盘的姿态; 然后根据相机的实时解算结果调节相机的横滚角、俯仰角, 同样令两个角度基本为 0 (允许浮动范围 0.1 度), 固定相机姿态, 在后续的角度实时测量中必须保证相机姿态不变, 即可开始角度实时测量实验。

固定相机位置, 在  $Z=2m$ 、 $Z=4m$  距离处分别选取一个位置进行横滚角、俯仰角的实时测量实验, 偏航角的重复性角度测量实验。如图 4-13, 4-14 分别是在  $Z=2m$ 、 $Z=4m$  距离处倾角仪和本系统的实时角度解算结果输出曲线, 其中倾角仪只能测量输出横滚角、俯仰角两个角度。

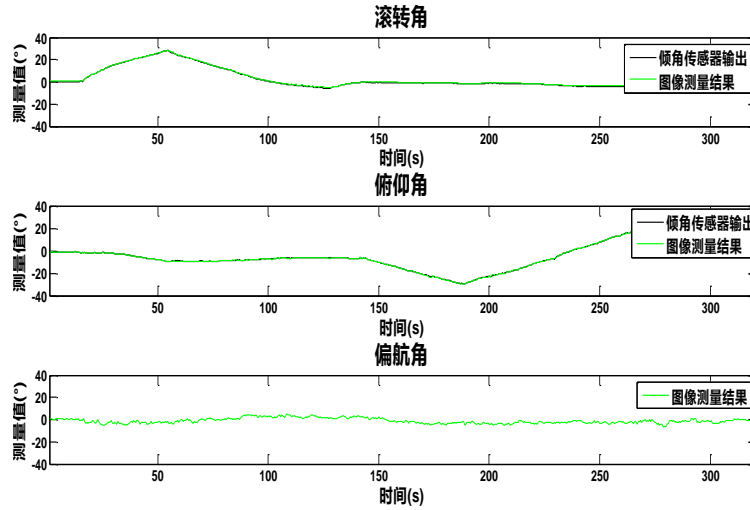


图 4-13 Z=2m 位置角度实时输出

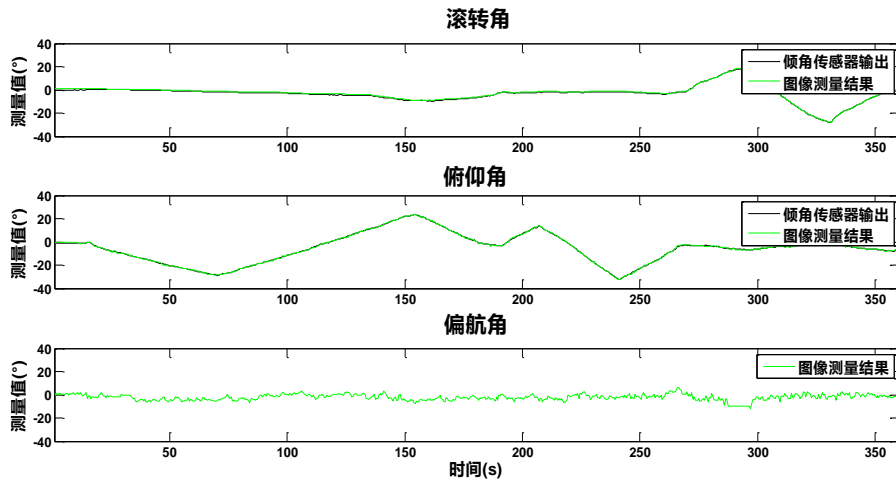


图 4-14 Z=4m 位置角度实时输出

其中，x 轴表示测量时间，y 轴是各角度的实时输出值。

对角度实时测量的误差分析采用区域误差平均值的方法，分别截取各角度测量中从-30 到 30 度变化的部分，对测量角度为  $0, \pm 1, \pm 2 \dots$  及其间距 0.5 度以内的点的误差计算平均值及平均值偏差作为该角度的测量误差分析值，如对  $Z=2\text{m}$  位置的横滚角(如图 4-13 所示)选取 0 到 150s 的部分进行区域误差平均值分析，同理对俯仰角选取 150 到 300s 的部分进行区域误差平均值分析，而且对  $Z=2\text{m}, Z=4\text{m}$  位置的同一角度测量量同时进行误差分析。如图 4-15 所示，x 轴是横滚角的区域测量角度值，y 轴为各测量角度区域内的测量误差平均值，且在每个测量角度上都标有区域内角度测量的误差标准差值。同理，如图 4-16 所示，x 轴是俯仰角的区测量角度值，y 轴为各测量角度区域内的测量误差平均值，且在每个测量角度上都标有区域内角度测量的误差标准差值。如图 4-17 所示是偏航角的重

复性测量实验分析，在  $Z = 3\text{m}$  距离选取一点固定靶标盘位置，在  $-30\sim 30$  范围内变换靶标盘的偏航角大小，在每个角度处采集 100 组以上的数据进行偏航角的重复性误差分析，如图 4-17 所示，x 轴为本系统输出的偏航角的角度值，y 轴是对每个测量角度的多组测量数据测量的误差平均值及偏差。表 4-3 列出了横滚角和俯仰角所有测量数据的误差平均值、最大误差值以及误差标准差值。

表 4-3 横滚角、俯仰角测量误差

	误差平均值（度）	误差最大值（度）	误差标准差（度）
横滚角	-0.09	0.99	0.36
俯仰角	0.07	1.00	0.35

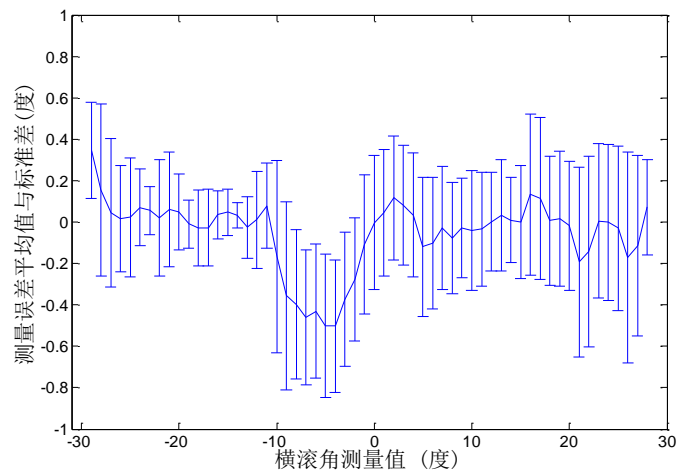


图 4-15 横滚角测量误差平均值及标准差

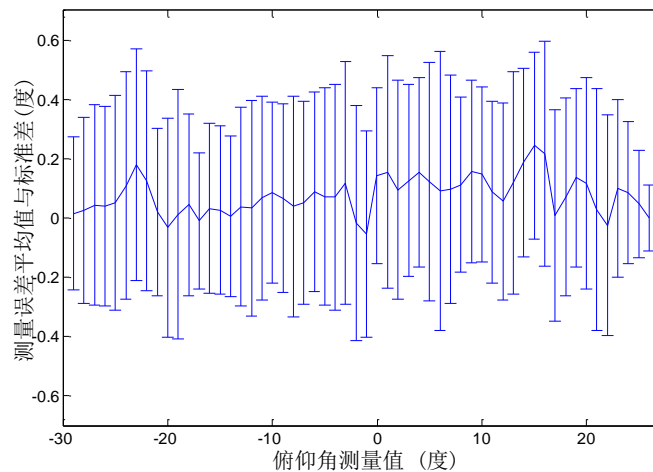


图 4-16 俯仰角测量误差平均值及标准差

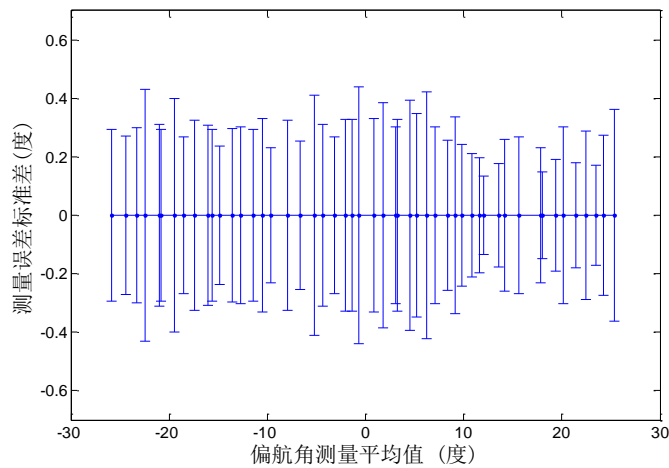


图 4-17 偏航角重复测量值及标准差

由图 4-13, 4-14, 4-15, 4-16, 4-17 可知, 横滚角与俯仰角的角度测量误差平均值在 0 度附近均出现了局部峰值, -30~30 度测量范围内整体误差平均值均在 1 度以内, 且误差最大值仅为 0.996 度, 误差标准差小于 0.36 度, 偏航角的重复性实验中, 其最大误差标准差小于 0.50 度, 且本次实验针对系统测量视场中的不同距离进行了实验, 实验数据具有重复性和可靠性。因此采用本系统可以满足项目要求的角度精度。

### 4.3.3 三维坐标测量实验

本系统中需要解算靶标盘中心相对于相机坐标系的位置信息, 由于基准装置有限, 利用两点间相对距离的误差判定算法的位置解算精度, 以精度为 2+2ppm 的 NTS-360R<sub>M</sub> 全站仪测量的距离为参考值。固定相机位置, 并在位置测量实验中保持相机位置不变, 在系统测量范围内随机选取 55 个实验点, 实验点与相机的相对位置关系如图 4-18 所示, 以点 O<sub>1</sub> (-222.1, -144.7, 2974.5) (单位: mm) 作为距离测量的基准点, 用本系统算法与全站仪分别解算、测量 55 个实验点以及基准点的位置信息, 分别计算测量点与基准点之间的相对距离并取差值作为位置测量的误差值, 相对距离测量的绝对误差分布如图 4-19 所示:



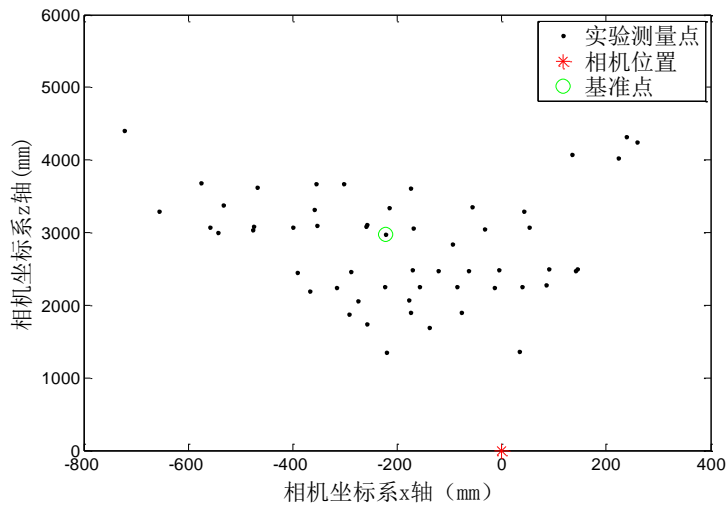


图 4-18 实验测量点分布图

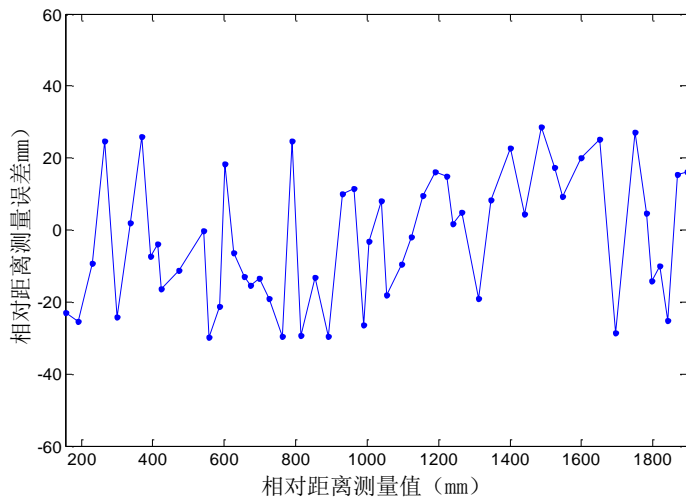


图 4-19 位置测量误差图

由误差分布曲线可知,在 5m 内的测量视场中采集的 55 个实验点相对于基准点的距离解算误差最大为 29.7mm,误差绝对值的平均值为 15.8mm,因此可以得出结论,距离解算相对误差满足系统的应用要求。

#### 4.3.4 对比实验

为了进一步验证本系统解算的精度,进行了本文算法与 Fischler<sup>[21]</sup>的 P3P 算法的对比实验,分别对姿态和位置的解算结果进行对比分析。对姿态(三个角度)的对比实验是在 Z=1m,2m,3m,4m 距离处分别选取一个位置进行横滚角和俯仰角的实时测量实验,如图 4-20,4-21 是使用两种方法解算的角度相对于倾角仪输出角度的误差绝对值曲线,其中横轴是倾角仪角度测量值,纵轴分别是两种方法在四个位置对同一角度测量的误差绝对值的平均值,表 4-4 列出了两种算法在四个位置所有测试角度值相对于倾角仪输出的误差绝对值的平均值,由实验可知,相



对于 Fischler 的 P3P 算法，本系统使用的单相机位姿解算算法的角度测量精度更高，稳定性更好。

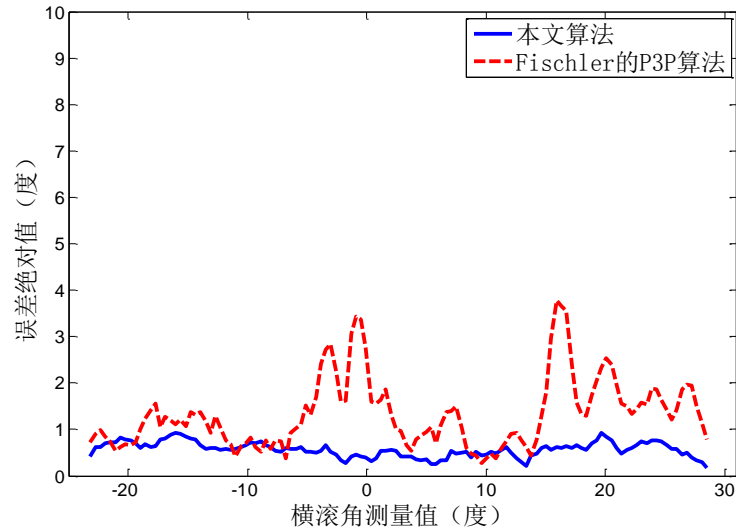


图 4-20 横滚角测量误差图

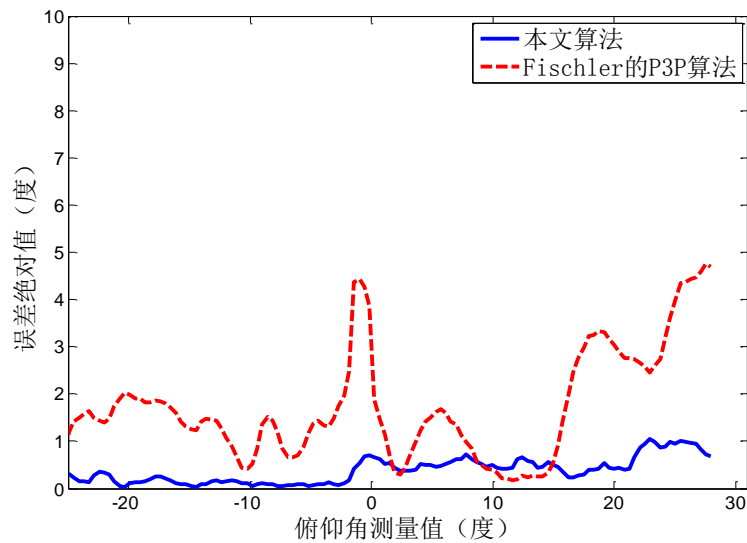


图 4-21 俯仰角测量误差图

表 4-4 横滚角、俯仰角测量误差平均值

	横滚角误差 平均值 (度)	俯仰角误差 平均值 (度)
本文算法	0.568	0.386
Fischler(P3P)	1.330	1.812

如图 4-22 所示是两种方法对系统测量范围内选取的 32 个实验点解算的相对距离相对于全站仪测量距离的误差的绝对值曲线,表 4-4 列出了实验点部分信息。由图 4-22 和表 4-4 可知,本文算法相对于 Fischler 的 P3P 算法对目标点 X, Y, Z 方向的解算值很相近,本文算法的最大误差绝对值为 29.8mm,均值为 13.08mm,

均小于 P3P 算法的最大误差 43.9mm 与均值误差 15.62mm, 因此验证了本文算法解算精度更高、更稳定。

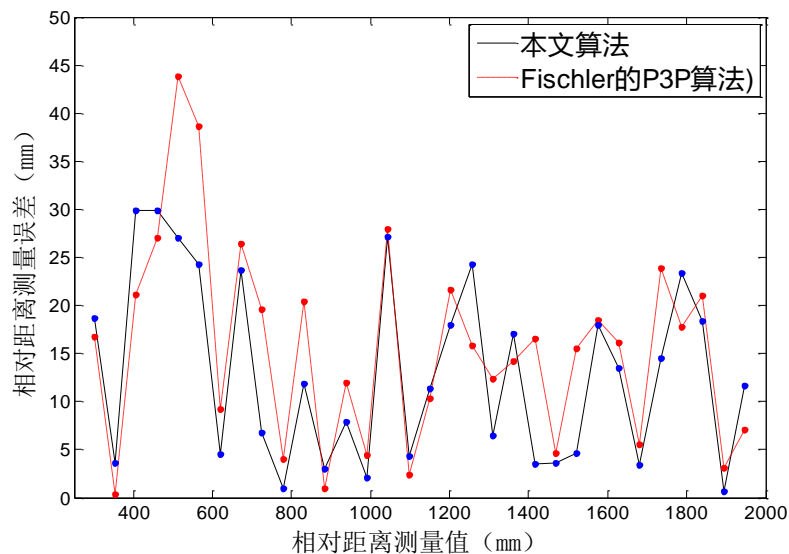


图 4-22 距离测量误差图

表 4-4 部分测量点坐标及偏距误差

D(mm)	本文算法位置解算结果					Fischler 的 P3P 算法解算结果				
	X	Y	Z	d(mm)	Err (mm)	X	Y	Z	d(mm)	Err (mm)
297	-526.7	-119.5	3303.2	278.4	18.6	-525.8	-119.6	3297.7	280.4	16.6
299	-214.1	-127.0	3315.1	303.0	-4.0	-213.4	-126.7	3306.3	299.8	-0.8
340	42.32	-134.4	3299.7	369.8	-29.8	42.6	-134.9	3320.3	361.0	-21.0
368	-174.1	-114.7	3577.4	338.2	29.8	-174.8	-115.4	3590.3	341.0	27.0
414	-299.1	-107.5	3616.0	441.1	-27.1	-300.7	-107.2	3635.8	457.9	-43.9
419	-352.3	-105.9	3629.0	394.8	24.2	-351.8	-104.0	3626.6	380.5	38.5
476	-720.3	-71.8	4074.2	471.0	5.0	-720.1	-71.39	4073.2	466.3	9.7
533	-578.2	-75.8	4097.7	556.3	-23.3	-577.8	-75.9	4094.8	559.1	-26.1
627	-504.3	-78.5	4105.0	633.9	-6.9	-501.8	-78.1	4084.9	646.8	-19.8
642	-427.6	-81.1	4086.5	643.3	-1.3	-426.7	-81.1	4078.1	638.2	3.8
674	-888.6	-35.4	4655.8	685.5	-11.5	-889.5	-34.4	4660.4	653.2	20.8
681	-667.1	-42.6	4705.0	684.0	-3.0	-667.4	-41.7	4707.4	682.0	-1.0
684	-556.8	-44.4	4691.0	675.7	8.3	-556.5	-43.3	4688.3	695.5	-11.5
699	-333.7	-50.6	4685.8	696.8	2.2	-336.4	-50.0	4724.1	694.5	4.5
925	-256.2	-51.29	4748.6	897.6	27.4	-255.9	-51.3	4743.0	896.7	28.3
990	-802.5	-77.0	3868.8	994.6	-4.6	-811.1	-77.06	3910.2	992.7	-2.7
1056	-475.4	-89.2	3905.8	1044.8	11.2	-475.2	-89.4	3903.8	1045.7	10.3
1111	-300.5	-117.1	3495.8	1093.0	17.0	-300.8	-117.5	3498.5	1132.7	-21.7
1137	-609.9	-109.7	3456.9	1161.0	-24.2	-609.0	-109.8	3451.3	1152.6	-15.6
1168	-518.1	-127.8	3106.4	1161.3	6.7	-518.8	-127.8	3111.0	1155.4	12.3
1191	-437.7	-149.6	2771.2	1208.0	-17.0	-437.2	-150.1	2767.5	1205.1	-14.1
1192	-545.6	-150.0	2721.3	1195.1	-3.1	-553.6	-151.4	2761.4	1175.1	16.9
1240	-422.2	-170.3	2291.0	1236.1	3.9	-428.9	-173.3	2327.2	1235.1	4.9
1275	-342.1	-190.2	2057.6	1270.1	4.9	-342.2	-190.0	2058.4	1259.3	15.7
1442	-169.9	-232.9	1301.6	1459.7	-17.7	-170.2	-233.2	1303.8	1460.1	-18.1
1489	-194.0	-221.6	1472.1	1475.9	13.1	-194.4	-222.2	1474.8	1473.3	15.7
1651	-209.3	-219.5	1488.0	1647.3	3.7	-209.2	-219.5	1487.6	1645.1	5.9
1761	-246.5	-209.3	1677.6	1746.1	14.9	-248.0	-210.2	1688.5	1784.5	-23.5
1782	-270.8	-204.2	1787.1	1805.5	-23.5	-271.7	-204.4	1793.0	1799.9	-17.9
1798	-285.5	-197.5	1904.3	1780.1	17.9	-285.4	-197.6	1903.4	1777.4	20.6
1817	-230.4	-177.3	2262.6	1817.7	-0.7	-230.6	-177.1	2264.6	1820.2	-3.2
1851	-299.7	-126.0	3237.8	1839.0	12.0	-299.4	-125.5	3234.5	1843.6	7.4

### 4.3.5 图像预处理实验

为了提取 LED 靶标的图像坐标,本系统基于 FPGA 实现了图像预处理功能,为后续的目标识别与提取模块提供二值化图像,如图 4-23 所示是系统采集的靶标分别在顺光、逆光环境中的图像,以及经过 FPGA 图像预处理、直接对原图进行二值化处理的结果。在结果图像中存在包括太阳光、背景物体的光斑干扰,通过目标识别部分连通域的面积判据、圆形度判据以及稠密性即可消除噪声斑点的干扰,为了简化后续目标识别模块的处理算法,应尽量减少二值化图像的连通域标记数。表 4-5 列出了对直接二值化图像与经过预处理后的二值化图像进行连通域标记的数量,其中有效连通域数为 4(四个 LED 靶标图像),由表中数据可知,经过 FPGA 模块图像预处理操作,滤除了椒盐噪声等的影响,抑制了背景大部分物体的干扰,且增强了目标点的特征信息,显著的减少了干扰连通域的数量。由以上对比可看出,图像经过 FPGA 的预处理之后,更便于目标点的识别与提取,在一定程度上减少了干扰连通域的出现,增加了系统自动识别图像的有效性和可行性。

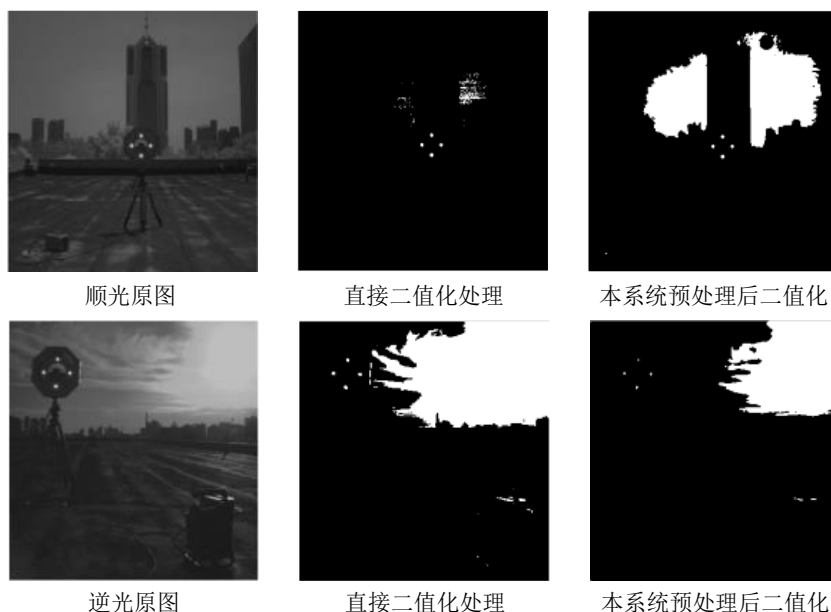


图 4-23 图像预处理算法效果图

表 4-5 连通域标记数量

	顺光图像连通域标记数	逆光图像连通域标记数
本系统算法二值化处理	11	15
直接二值化处理	22	67

### 4.3.6 算法解算速度

相对于求解 PNP 问题的其他线性算法,本文算法计算复杂度低,计算量较

小。基于 FPGA、DSP 平台的 LED 标志点提取及目标点位姿解算可实现 35 帧率的逐帧实时解算，其中算法解算时间仅为 0.25ms，图 4-13,4-14 是利用本测量系统实时测量角度的跟踪曲线。

#### 4.4 实验结论

本章对系统误差源进行了仿真分析，并搭建仿真实验系统，对系统的位置、姿态的解算精度进行实验验证，以及对基于 FPGA 实现的图像预处理算法进行了效果对比。通过在系统测量区域内不同距离的位置进行角度测量实验，选取多组点进行位置解算实验，并与 Fischler 的 P3P 算法解算结果进行对比，可知本文算法满足系统的角度、位置解算精度要求，且角度解算精度高于 Fischler 的 P3P 算法，位姿解算稳定性要高于该 P3P 算法，且仿真实验中，偏航角、俯仰角以及 Z 向坐标误差均未超过系统的精度要求，证明本系统的像素图像坐标误差与靶标点的位置误差均在误差限制范围内；经过系统的图像预处理后的图像，更利于目标的识别与提取。另外，通过多次不同环境下的仿真实验，对实验数据进行分析与总结，系统在多次不同环境下的实验均能够保证较高的精度，进一步验证了系统的可行性与算法的有效性。

## 第 5 章 总结与展望

### 5.1 工作总结

本文针对两自由坐标系中的相对位姿测量问题，设计了以 CYCLONEIII 系列 FPGA-EP3C25E、C64x+ 系列 DSP 以及单目 CMOS 为主体的位姿测量系统，充分利用了 FPGA 的并行运行、高速处理的优势实现图像预处理算法、DSP 的高速数据处理的优势完成位姿解算的基础上，较高精度地实现了空间目标点实时位姿测量功能。本文主要介绍了基于合作目标的单相机位姿解算算法以及基于 FPGA 实现的实时视频的图像预处理功能两部分内容。通过对解算算法的误差仿真分析，并在多种应用环境下的大量实验数据表明，本系统能够实时解算目标点位姿信息，且能够满足位姿解算的精度，具有一定的实用性。

主要完成的工作包括：

1. 分析了单目视觉测量以及基于 FPGA 实现图像预处理的应用前景，并对二者当前的国内外研究现状进行了介绍，阐述了本课题的实际意义；
2. 简要介绍了基于单相机的目标定位系统的构成，并结合单相机成像模型，设计了基于二维合作靶标的单相机空间目标位置和姿态的测量算法。引入了新的姿态角定义方法，此方法定义的三个姿态角可以作为平台姿态调整的反馈量且不受旋转顺序的限制，通过平面单应矩阵直接导出平面靶标模型相对于相机坐标系的三个姿态角和位置向量。采用 matlab 工具箱的标定方法标定相机的内部参数，并对图像坐标进行了二次去畸变计算，减小了镜头畸变等引入的误差。
3. 针对本系统的应用要求，基于 FPGA 实现了视频参数配置以及图像预处理算法。基于 IIC 协议完成 CMOS 输出视频的参数设置实现实时视频的采集，根据系统在多种应用环境下的成像特点，确定了利于后续目标识别与提取模块实现的图像预处理算法，并基于 FPGA 实现了中值滤波、直方图均衡以及二值化的模块设计，利用 Modelsim 完成各模块的功能仿真；
4. 对系统位姿解算算法中各误差源进行了仿真分析，并进行了仿真实验验证，且对基于 FPGA 实现的图像预处理算法进行了效果对比实验。通过对图像像素坐标误差、靶标位置误差两种误差源对系统位姿测量的误差影响进行仿真分析，确定本系统对两种误差源的容忍度；在系统测量视场内，改变靶标盘位置（Z 向最大距离 5m）以及三个偏转角度（-30~30 度），通过全站仪和倾角仪验证系统的测量精度；通过在顺光、逆光两种应用环境的实验，验证基于 FPGA 的图像处理

算法是否达到预期效果；并设置了与 Fischler 的 P3P 算法的对比实验，进一步验证系统测量的精度及有效性。

## 5.2 工作展望

基于 FPGA 与 DSP 的单目 CMOS 位姿测量系统的精度能满足当前的使用需求，但随着应用环境的扩展，且对精度要求的提高，系统在位姿解算算法、图像处理等方面也需要做进一步的完善：

1. 位姿解算算法的优化。本文提出的基于合作目标的单相机位姿测量算法中，对空间靶标点的位置和姿态的解算都是通过平面单应矩阵直接导出，对单应矩阵的依赖性很强，但是在求解平面单应性矩阵时没有加入正交化的约束，在一定程度上限制了解算结果的精度的提高，所以在求解平面单应性矩阵时，可以考虑加入对正交化的约束，进一步提高解算精度；

2. 完善实验环境。目前实验中采用双轴倾角仪验证系统测量靶标横滚角和俯仰角的精度，但无法验证偏航角的精度；且在位置验证实验中，利用全站仪测量的相对距离来间接验证本系统算法的位置解算精度。因此在条件允许的情况下，需要使用能够直接验证偏航角和位置解算精度的测量装置，来进一步完成系统测量精度的测试；

3. 图像预处理的优化。目前系统中采用的图像预处理算法针对测试实验环境中都有较好的处理结果，但是随着系统应用环境越来越复杂，会引入更多的干扰噪声，所以需要目前的图像预处理算法做进一步的优化；

## 参考文献

- [1] 黄艳军. 基于 FPGA 的数字图像预处理算法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [2] 林来兴. 四十年空间交会对接技术的发展[J]. 航天器工程, 2007, 04: 70-77.
- [3] 马婷婷, 魏晨曦. 空间交会对接测量技术的发展[J]. 中国航天, 2004, 07: 31-35.
- [4] 董新民, 徐跃鉴, 陈博. 自动空中加油技术研究进展与关键问题[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2008, 06: 1-5.
- [5] 张铁毅, 薛建平, 孙超姣, 等. 航天器空间对接位置视觉测量方法[J]. 飞行力学, 2016, 01: 68-71.
- [6] 赵连军. 基于目标特征的单目视觉位置姿态测量技术研究[D], 四川: 中国科学院研究生院: 光电技术研究所, 2014.
- [7] 黄桂平, 李广云, 王保丰, 等. 单目视觉测量技术研究[J]. 计量学报, 2004, 04: 314-317.
- [8] 张子淼, 王鹏, 孙长库. 单目视觉位姿测量方法及数字仿真[J]. 天津大学学报, 2011, 05: 440-444.
- [9] 徐培智, 徐贵力, 王彪, 等. 基于立体视觉的非合作目标位姿测量[J]. 计算机与现代化, 2013, 08: 85-91.
- [10] 沈洪宇, 柴毅. 计算机视觉中双目视觉综述[J]. 科技资讯, 2007, 34: 150-151.
- [11] 李波睿, 慕春棣, 吴波涛. 基于视觉的自动空中加油近距相对位姿估计[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2012, 12: 1664~1669.
- [12] 叶东, 解邦福, 刘博. 一种基于共面特征点的单摄像机姿态测量方法研究[J]. 宇航计测技术, 2009, 06: 1~5.
- [13] 张劲锋, 蔡伟, 孙承启. 基于单目视觉的空间非合作目标相对运动参数估计[J]. 空间控制技术与应用, 2010, 02: 31~35.
- [14] 张世杰, 曹喜滨, 陈闽. 非合作航天器间相对位姿的单目视觉确定算法[J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2006, 05: 564~568.
- [15] Heikkila J, Silvén O. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction[C]. Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition in

1997.IEEE Computer Society Conference on. IEEE, 1997:1106~1112.

[16] 郭相凤, 贾建芳, 葛中峰. 图像序列的预处理与目标检测技术综述[J]. 传感器世界, 2012, 04.

[17] Batlle J, J. Martí, Ridao P, et al. A New FPGA/DSP-Based Parallel Architecture for Real-Time Image Processing[J], Real-Time Imaging, 2002, 8(5):345~356.

[18] 冈萨雷斯. 数字图像处理(第二版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007, 59~113.

[19] Athanas P M, Abbott A L. Addressing the Computational Requirements of Image Processing with a Custom Computing Machine: An Overview1[J], 2001.

[20] 黄智伟. FPGA 系统设计与实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005, 1~32.

[21] Fishler M A, Bolles R C. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. Communications of the ACM, 1981, 24(6): 381~395.

[22] 王鹏, 孙长库, 张子淼. 单目视觉位姿测量的线性求解[J]. 仪器仪表学报, 2011, 05: 1126~1131.

[23] M.A. Abidi, T. Chandra. A New Efficient and Direct Solution for Pose Estimation Using Quadrangular Targets: Algorithm and Evaluation[J]. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 1995, 17(5): 534~538.

[24] Hung Y, Yeh P S, Harwood D. Passive ranging to known planar point sets[C]. Robotics and Automation. Proceedings. 1985 IEEE International Conference on. IEEE, 2012:80-85.

[25] Oberkampf D, Dementhon D F, Davis L S. Iterative Pose Estimation Using Coplanar Feature Points[J]. Computer Vision & Image Understanding, 1996, 63(3):495-511.

[26] Schweighofer G, Pinz A. Robust Pose Estimation from a Planar Target[J]. Pattern Analysis & Machine Intelligence IEEE Transactions on, 2006, 28(12):2024-2030.

[27] Lepetit V, Moreno-Noguer F, Fua P. EP n P: An Accurate  $O(n)$  Solution to the P n P Problem[J]. International Journal of Computer Vision, 2009, 81(2):155-166.

[28] Lu C P, Hager G D, Mjolsness E. Fast and Globally Convergent Pose Estimation from Video Images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2000, 22(6):610-622.



- [29] Uwe Meyer-Baese. 数字信号处理的 FPGA 实现[M]. 刘凌, 译. 北京: 清华大学出版社, 2003, 49~135.
- [30] 杨华, 佟首峰. 基于 FPGA 的 Bayer 到 RGB 图像格式转换设计[J]. 现代电子技术, 2010, 02: 122~124.
- [31] 李开宇, 张焕春, 经亚枝. 基于 FPGA 动态可重构的高速、高质量的图像放大[J]. 中国图象图形学报, 2005, 01: 69~74.
- [32] 龚涛. 基于 FPGA 的图像采集处理系统[D]. 湖北: 华中科技大学, 2005.
- [33] 刘龙申, 沈明霞, 孙玉文, 等. 基于 FPGA 的农田图像采集与 3G 无线传输系统设计[J]. 农业机械学报, 2011, 12: 186~190.
- [34] Tomasi M, Pundlik S, Luo G. FPGA–DSP co-processing for feature tracking in smart video sensors, *Journal of Real-Time Image Processing*, 2014, 11(4):1~17
- [35] 赵釜. 基于 CycloneII 系列 FPGA 的图像实时采集与预处理系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [36] 余锦华, 范宏波, 郑智捷. 红外视频图像实时二维增强算法与实现[J]. 红外技术, 2005, 03: 227~231.
- [37] 冯禹. 基于 DSP 平台的位姿解算算法研究[D]. 天津: 天津大学精仪学院, 2016.
- [38] 吕博. 空中位姿测量中光电合作靶标作用机理研究[D]. 天津: 天津大学精仪学院, 2016.
- [39] 张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 14~32.
- [40] Richard Hartley. *Multiple View Geometry in Computer Vision*[M]. United Kingdom: Cambridge University Press, 2003.
- [41] 徐瑞民. 二元非线性方程组求根的牛顿迭代法[J]. 山东轻工业学院学报: 自然科学版, 2009, 04: 89~91.
- [42] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2000, 22(11):1330-1334.
- [43] Xu G, Sugimoto N. Algebraic derivation of the Kruppa equations and a new algorithm for self-calibration of cameras[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1999, 16(10):2419-2424.
- [44] Luong Q T, Faugeras O D. Self-Calibration of a Moving Camera from Point Correspondences and Fundamental Matrices[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 22(3):261-289.
- [45] 吴继华, 王诚. 设计与验证 Verilog HDL 北京[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006, 102~140.

- [46] 林琳. 一拖 N 个 CMOS 成像器同步影像传感系统研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.

## 发表论文和参加科研情况说明

### 发表的论文:

- [1] 王向军, 曹雨, 二维合作目标的单相机空间位姿测量方法, 《光学精密工程》, 2016 年 10 月 (EI, 已录用)

### 参与的科研项目:

本人作为骨干技术人员主要参与了如下科研项目:

- [1] 航空重点实验室的空中位姿测量系统中的位姿解算算法工作
- [2] 自动变焦成像器件的软件设计工作
- [3] 远程物点坐标测量系统的算法开发工作



## 致 谢

本论文的工作是在我的导师王向军教授的悉心指导下完成的。在硕士两年半的求学生涯中，王老师严谨的治学态度、渊博的知识以及对工作的热情一直影响着我，当我在项目工作和课题研究中遇到问题时，王老师给予我认真的指导，使我受益匪浅。王老师还给我提供了在多个领域学习的机会与支持，并让我有机会参加学术会议等活动，这些都将影响着我今后的生活态度与工作发展。在此，由衷的感谢王老师的培养和关心！

感谢实验室的刘峰老师在生活及科研中给予我的指导和帮助，刘老师认真的科研态度与工作热情一直影响着我的学习生活。感谢实验室的周鑫玲老师、武屹老师在研究生期间对我的关心和帮助。感谢王敏工程师在校外实践期间对我的指导和帮助。

感谢周凯师兄对我科研与课题中的帮助，他对待学术问题严谨的态度一直是我学习的目标，使我能更快、更好的上手实验室项目，并养成良好的学习、科研习惯。感谢李洋师兄、万子敬师兄、吴凡路师兄、阴雷师兄、邓子贤师兄、王晓青师姐等博士师兄姐们在生活与科研中对我的关心与指导。感谢已参加工作的卞越新师姐、韩晓健师兄等在我学术研究中及找工作过程中提供的宝贵的建议与帮助。感谢王思博、张佳丽、于潼、程卫亮、关印在项目及实验中对我的帮助。

特别感谢张龙祥，感谢他在生活中对我的包容，在科研及找工作期间给予我的多方面的帮助与支持。感谢同届的鲁亚楠、乐兵、邢峰在研究生的工作生活中对我帮助，这段共同奋斗、共同成长的人生经历将会是最珍贵的回忆。感谢我的室友刘圆圆、秦国花和陈曦同学两年半以来在学习及生活中带给我这么多的快乐及对我的鼓励。

最后，感谢我的父母，在我求学期间给予我的支持和无私的付出，你们是我在遇到困难时能够撑下去的动力，感谢你们一直以来对我的包容和理解，感谢我的家人和朋友，谢谢你们一直以来的鼓励。

天津大学  
全日制工程硕士学位论文

TIANJIN UNIVERSITY  
DISSERTATION OF FULL-TIME MASTERS OF ENGINEERING



\*2014202177\*



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. [基于视觉技术的非合作航天器相对位姿测量方法](#)
2. [基于NX MCD的对运动物体位姿测量方法的研究](#)
3. [非合作航天器相对位姿测量方法研究](#)
4. [空间合作目标单目视觉位姿测量技术研究](#)
5. [基于特征跟踪的空间交会接近目标位姿测量研究](#)
6. [基于全光场相机的非合作目标位姿测量](#)
7. [国外空间目标操控相对位姿测量技术比较研究](#)
8. [基于合作目标和单相机的空间相对位姿测量方法研究](#)
9. [一种基于多合作点对距离的大部件相对位姿跟踪测量方法](#)
10. [空间非合作目标位姿光学测量研究现状](#)
11. [基于单目视觉的工件位姿六自由度测量方法研究](#)
12. [非合作航天器的相对位姿测量](#)
13. [基于SoftPOSIT算法的非合作目标相对位姿估计](#)
14. [空间非合作目标三维形状与位姿成像测量技术研究](#)
15. [基于物体表面形貌的单相机视觉位姿测量方法](#)
16. [空间非合作目标超近距离位姿测量技术研究](#)
17. [基于CCD的空间目标光度测量方法研究](#)
18. [空间翻滚非合作目标相对位姿估计的视觉SLAM方法](#)
19. [GEO非合作目标超近距相对位姿视觉测量](#)
20. [高轨非合作慢旋失稳空间目标位姿测量方法研究](#)
21. [单相机位姿测量精度仿真分析](#)
22. [大尺寸非合作目标的相对位姿测量方法](#)
23. [基于单目相机的空间非合作目标姿态测量](#)
24. [基于激光雷达的航天器相对位姿测量技术研究](#)
25. [一种空间目标三维位姿视觉测量方法](#)

26. 空间目标的单目视觉位姿测量方法研究
27. 基于视觉和激光的空间非合作目标相对位姿测量技术研究
28. 测量笔式单相机位姿测量系统研究
29. 基于物体表面形貌的单相机视觉位姿测量方法
30. 高轨失稳目标单载荷相对位姿测量方法
31. 目标动态位姿激光跟踪测量方法研究
32. 基于特征点的空间目标三维位姿单目视觉确定算法
33. 一种空间非合作目标相对导航三维匹配估计方法
34. 基于单PSD的目标空间位姿测量方法
35. 一种基于标志点位置信息的相对位姿计算方法
36. 面向空间非合作目标捕获的位姿测量方法研究
37. 一种空间多目标位姿测量方法
38. 一种基于标志器的非合作目标位姿测量方法
39. 二维合作目标的单相机空间位姿测量方法
40. 基于单目三维重构的空间非合作目标相对测量
41. 基于SLAM的非合作目标相对位姿测量研究
42. 基于特征光流信息的空间非合作目标相对位姿估计
43. 基于PMD相机的位姿测量方法研究
44. 空间非合作目标位姿光学测量研究现状
45. 基于视觉/惯导的掘进机实时位姿测量方法研究
46. 基于相对坐标的机器人末端位姿测量方法
47. 基于视线测量和轨道预报高轨非合作目标相对导航方法
48. 空间非合作目标的近距离相对位姿测量技术研究
49. 基于HALCON的单目视觉工件位姿测量方法研究
50. 基于单目视觉的微平台位姿测量方法研究