

编号 071951302



南京航空航天大学

# 本科毕业设计（论文）

题目 管道安装应力测试方法及试验验证

学生姓名 李宿诚

学号 071951302

学院 通用航空与飞行学院

专业 交通运输（民航维修工程）

班级 0720502

指导教师 陈果

二〇二四年六月



# 南京航空航天大学

## 本科毕业设计（论文）诚信承诺书

本人郑重声明：所提交的毕业设计（论文）是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的内容外，本设计（论文）不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本设计（论文）所涉及的研究工作作出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

作者签名：\_\_\_\_\_

日期： 20 年 月 日

# 南京航空航天大学

## 毕业设计（论文）使用授权书

本人完全了解南京航空航天大学有关收集、保留和使用本人所送交的毕业设计（论文）的规定，即：本科生在校攻读学位期间毕业设计（论文）工作的知识产权单位属南京航空航天大学。学校有权保留并向国家有关部门或机构送交毕业设计（论文）的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅，可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编论文。保密的论文在解密后适用本声明。

论文涉密情况：

- 不保密
- 保密，保密期（起讫日期：\_\_\_\_\_）

作者签名：\_\_\_\_\_

导师签名：\_\_\_\_\_

日期： 20 年 月 日

日期： 20 年 月 日



## 摘 要

本文针对数字图像法测量管道安装应力进行仿真与试验验证。基于飞机管道安装应力及检测的工作需要，要求检测设备可便携，快速检测，对人体无害。为不影响管道使用，尽量不使用耦合剂或附加物。以 1Nr18Nie98Ti 为例检测分辨率要达到 50MPa 或更小。针对残余应力的检测现有诸多方法可用，但这些方法有各种限制和缺陷不适用于飞机管道的安装应力检测，飞机管道安装应力的检测要求精度高，检测过程为无损，且不能改变飞机内部环境即不能有附加物或者残留物，检测设备能够小型化。目前，关于可应用在管道安装应力测量的设备较少，其中数字图像法经过改进可用于管道安装应力检测，测量精度与测量相机设计、标定精度和位移识别有关，因此两区域的测量相机外壳的设计有应用价值。

(1) 对相机原理进行分析，了解相机成像原理。新型测量相机使用 Solidworks 仿真设计，对相机系统精度分析，进度分析完成后，对棱镜组进行设计，采用镜面反射原理使相机能获取两区域图像，实现了单目相机能够获得四目相机的效果。

(2) 通过标定优化程序对相机外部参数进行优化，减小了重投影误差。获得了高精度的相机外部参数后可以实现相机的准确定位，为测量管道形变量奠定了基础。标定程序主要包含相机外参标定和外参标定优化这两部分。获得相机外参即可相机空间位置关系，为后续长度测量提供基础。外参标定优化能够提高标定精度，进而提高测量精度。

(3) 通过鞍点匹配和三角化获得统计测量的长度数据，接下来通过已知弹性模量和应变能够求出应力。

本文中的相机标定程序的标定精度能达到 0.01 像素，长度测量程序的长度检测精度能达到  $0.01\mu\text{m}$ ，应变精度能达到 0.02 微应变，结合实际应用，精度能够满足检测需求。

**关键词：**管道，安装应力，图像，非接触测量，相机标定，应力测量

## ABSTRACT

This paper focuses on the simulation and experimental verification of pipeline installation stress measurement using digital image methods. Based on the requirements for measuring and detecting the installation stress of aircraft pipelines, the detection equipment must be portable, capable of rapid detection, and harmless to humans. To avoid affecting the use of the pipeline, the use of coupling agents or additional materials is minimized. For instance, using 1Nr18Nie98Ti, the detection resolution needs to reach 50MPa or less. The primary method described in this paper is obtaining the external parameters of the camera through camera calibration techniques. The calibration technique is based on the spatial constraint relationship of the calibration plate and nonlinear optimization, achieving regional calibration in non-overlapping fields of view.

(1) The external parameters of the camera are optimized through a calibration optimization program, reducing the reprojection error. With high-precision external camera parameters obtained, accurate camera positioning can be achieved, laying the foundation for measuring pipeline deformation.

(2) Using the calibration optimization program to optimize external parameters of the camera reduces the reprojection error. Obtaining high-precision external camera parameters enables accurate camera positioning, laying the foundation for measuring pipe deformation. The calibration program mainly includes camera external parameter calibration and external parameter calibration optimization.

(3) Obtain statistical measurement length data through saddle point matching and triangulation. Then, based on the known elastic modulus and strain, the stress can be calculated.

The calibration precision of the camera calibration program in this paper can reach 0.01 pixels, the length detection precision of the length measurement program can reach 0.01 micrometers, and the strain precision can reach 0.02 microstrain. Combined with actual applications, the precision meets the detection requirements.

**KEY WORDS:** Pipeline, Installation Stress, Imaging, Non-Contact Measurement, Camera Calibration, Stress Measurement

## 目录

第一章 绪论	1
1.1 背景和意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 国内外应力测量现状	2
1.2.2 图像法测应力研究现状	3
1.2.3 相机标定现状	4
1.3 论文组织结构	5
第二章 相机外壳设计与仿真	6
2.1 相机原理及数字图像法测量原理	6
2.1.1 相机测量原理	6
2.2 新型应力测量相机设计	7
2.2.1 相机系统精度分析	7
2.2.2 反射棱镜设计	8
2.3 相机外壳设计	10
2.4 本章小结	11
第三章 相机标定与标定优化	12
3.1 图像矫正	12
3.2 内参标定	13
3.2.1 张友正标定法	13
3.3 非重叠视场的区域标定	15
3.3.1 PnP 求解单目定位	15
3.3.2 2 组图片求解多目间外参	16
3.4 标定优化	19
3.5 本章小结	23
第四章 管道安装应力测量	24
4.1 应力计算原理	24
4.1.1 数字图像法	24
4.1.2 管道安装形变情况	25
4.2 长度测量程序	28
4.3 本章小结	32
第五章 测量相机的标定及应力测量试验	33
5.1 仿真拍照	33
5.2 标定结果和分析	35
5.3 长度测量结果	37
5.4 本章小结	38
第六章 结论与展望	39
6.1 结论	39
6.2 展望	39
参考文献	40
致谢	42



## 第一章 绪论

### 1.1 背景和意义

在飞机管道的安装过程中，由于装配偏差而引起的装配应力是影响飞机管道安装是否合格的重要影响因素之一。合理的装配应力能够促进管道与管接头之间的过盈配合，保证管路的密封性能，不合理的装配应力则是导致飞机管路泄露的一个主要原因。随着现代飞机性能的提高以及操纵、减重等性能指标的要求，飞机液压系统逐渐向高压发展，管路结构强度储备很低，同时，飞机管道所处的安装环境和工作环境与其他产品相比工况更为恶劣，因此存在故障率高、失效模式多、可靠性差等严重问题。据统计，民航飞机中 20% 的机械故障源于液压系统，液压系统工作性能的优劣直接影响飞行安全；且在民用飞机制造的诸多环节之中，液压导管之间的装配环节又最为关键。通过对典型导管的故障分析认为，管接头装配应力过大是造成液压导管渗漏的一个主要原因，而系统附件、支架等不能准确定位，装配不稳定是造成导管带应力装配的主要原因。

传统的检测技术大多数用于飞机管道表面检测，非接触式检测技术少。现如今，制造业和制造技术都在迅速发展，工业设备制造的速度和精度被要求高效率和高标准。同时，它也需要准确无误。随着测量技术的进步和发展，需要与被测量物体表面精确接触的传统测量工具逐渐被取代，例如千分尺、游标卡尺等。在这种效率和稳定性都很低的情况下，我们需要的非接触测量技术已经逐渐发展起来，并且越来越受关注。

智能诊断实验室初步设计了一种两区域测量相机，用以测量管道安装应力，计划测量精度为： $\pm 0.01\text{mm}$ 。当前工作主要需要完成测量相机的标定，完成测量精度试验。基于数字图像技术，可以通过比对图片中特征点的方式来获得管件的形变量。飞机管道结构件大多数都采用铝合金或不锈钢材料，其弹性模量分别为 70GPa 和 140Gpa，通过已知弹性模量和应变能够求出应力。

管道系统作为工业领域中常见的重要设施，其安装过程中的应力分布直接影响着管道系统的稳定性和安全性。而数字图像法作为一种高精度、全场、非接触式的测量技术，为探究管道安装应力提供了新的研究途径。

管道在安装和运行过程中可能会受到各种应力的作用，包括热应力、机械应力等。测量应力可以帮助识别潜在的安全隐患，防止管道因应力过大而发生破裂或泄漏，保障工厂和管道的安全运行。通过对管道的应力测量和监控，可以及时发现应力集中和疲劳点，进行必要的维护和加固，从而延长管道的使用寿命。减少管道的故障和事故，不仅可以避免

直接的经济损失，还可以减少因停产、维修等造成的间接损失，提高整体经济效益。通过对应力的分析和测量，可以为管道的设计和安装提供数据支持，优化管道布局 and 材料选择，提高工程质量和效率。

通过数字图像法可以全面、高精度地获取管道表面的形变和应变信息。在管道安装过程中，由于管道本身的重量、安装方式、连接件的紧固等因素，会导致管道表面产生复杂的形变和应变分布。传统的测量方法往往只能得到局部区域的信息，而数字图像法可以通过多组图片的拍摄对整个管道表面的全场测量，准确地反映出管道安装过程中的应力状态。

非重叠视场相机的标定能够实现多个相机的协同工作，扩展整体的视场覆盖范围，适用于大面积监控。通过精确的标定，可以校正相机的几何畸变和光学失真，提高测量的精度和一致性，为后续的图像处理和分析提供可靠的数据基础。在多相机系统中，单个相机的失效不会影响整体系统的工作，通过合理的标定和校准，可以增强系统的鲁棒性和可靠性。

基于数字图像法测量管道安装应力可以为管道设计和工程实践提供重要参考，通过对管道安装过程中应力分布的深入分析，可以为管道设计提供更加精准的边界条件，优化管道结构设计，提高管道系统的稳定性和安全性。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 国内外应力测量现状

安装应力是构件安装前后，构件应力的变化量，属于内应力的一种。内应力<sup>[1]</sup>是指当没有外力作用时，物体维持内部平衡存在的应力，又称固有应力、初始应力、残余应力。飞机管道在加工过程中需要进行固溶处理、弯折、接头组装等工序。管道加工过程会使管道产生残余应力，装配过程会产生装配应力。飞机管道的应力水平直接影响飞机管道的机械性能、疲劳强度、抗应力腐蚀能力、尺寸稳定性与使用寿命。如何尽早诊断并延长飞机管道的生命周期是目前摆在工程人员面前的一项难题。随着飞机飞行时间的增长。飞机的维护成本逐年上升，航空部件发生损坏的主要原因是各种微观和宏观机械应力集中，在应力集中区域，疲劳、腐蚀和蠕变过程的发展尤为剧烈。因此，有效地评价应力变形状况，特别是导致损伤的临界应力变形状况，成为评价飞机管道结构强度、可靠性及寿命预测的一个重要依据。

对于上述管道的安装应力检测，要求检测设备可便携，快速检测，对人体无害。为不影响管道使用，尽量不使用耦合剂或附加物。精度可分辨 50MPa 或更小。

针对上述应力测量需求查阅汇总现有应力测量方法，依据是否适用于管道安装应力检测对测量方法分类如表 1 所示。

表 1 应力检测方法针对非铁磁性管道适用性分类

应力检测方法	是否适用于非铁磁性管道
钻孔切削法、压痕法、拉曼光谱分析、扫描电子声显微镜、衍射法、全息干涉、基于铁磁性的方法、几何云纹法	不适用
应变片法、导电涂层法、曲率法、云纹干涉	局限适用
超声法、涡流法、数字图像法	适用

不适用的方法中，钻孔切削法<sup>[2]</sup>压痕法<sup>[3]</sup>纳米压痕法<sup>[4]</sup>为有损检测，拉曼光谱分析<sup>[5]</sup>扫描电子声显微镜法<sup>[6]</sup>几何云纹法<sup>[7]</sup>精度低，衍射法<sup>[8]</sup>对人体有害，全息干涉<sup>[9]</sup>要求被测物无刚体位移，基于铁磁性的方法主要应用应力的磁弹性效应<sup>[10]</sup>和巴克豪斯噪声效应<sup>[11]</sup>材质不适用非铁磁性材料的飞机管道。有一定局限性的方法中应变片法存在测量附加物，曲率法<sup>[12]</sup>对管道表面有要求，云纹干涉<sup>[13]</sup>需要在管道表面制备栅格，导电涂层法要求管道表面导电。

### 1.2.2 图像法测应力研究现状

随着工程技术的发展和应用需求的不断增加，对材料和结构的应力状态进行准确、全面的检测变得尤为重要。数字图像法作为一种非接触的测量技术，逐渐成为应力检测领域的研究热点。

数字图像法在航空航天、材料科学、土木工程等领域得到了广泛应用。在航空航天领域，数字图像法被用于监测飞机结构的应力状态，以及航天器的变形情况。在材料科学领域，数字图像法被应用于研究材料的力学性能和断裂行为。在土木工程领域，数字图像法被用于监测桥梁、隧道等工程结构的变形和应力状态。

在国外，数字图像法在应力检测方面的研究已有较为深入的探讨。Sutton<sup>[14-15]</sup>等人提出了基于数字图像相关技术的全场应变测量方法，通过比较不同加载条件下的图像来获取物体表面的形变信息，并推断应力分布。这为数字图像法在应力检测中的应用奠定了基础。近年来，国内学者对数字图像法在应力检测中的研究也逐渐增多。研究方向主要包括应变测量技术、数字图像处理算法以及应力分析方法等。国内研究者在建筑工程、地铁隧道、材料力学等领域开展了一系列应力检测的应用研究。例如，通过数字图像法监测混凝土结构的变形和裂缝<sup>[16]</sup>，以及地铁隧道的应力状态<sup>[17]</sup>。

随着数字图像技术的不断发展，全场光学测量技术、高速相机技术等<sup>[18]</sup>的应用使得数字图像法在应力检测中具有更高的精度和分辨率。同时，数字图像处理算法的改进也为应力检测提供了更多的可能性。

### 1.2.3 相机标定现状

基于反射镜的方法已被成功地用于利用光学反射镜的反射特性标定外部参数<sup>[19]</sup>。该方法克服了所有摄像机必须直接观察共同目标的限制，允许摄像机通过反射镜间接观察目标。Sturm 和 Bonfort<sup>[20]</sup>等人在相机无法直接看到目标的情况下，使用平面镜来估计目标相对于相机的姿态。被反射对象的视图被视为直接视图。该方法根据摄像机的标定值和给定的点对应关系计算出摄像机的姿态，然后得到虚拟摄像机相对于目标物体的姿态，然后估计出平面反射镜的位置。结果表明，重构部分的近似直径为 80 mm，重构的相对误差为 0.3%。

机器人姿态估计在无重叠视图的机器人视觉系统中起着重要的作用，相机和机器人身体之间的转换需要校准。Hesch<sup>[21]</sup>等人提出了一种估计相机与机器人本体之间六自由度变换的方法。该方法需要利用平面反射镜对相机和机器人本体进行标定。机器人在一个平面镜子前移动，允许相机从几个有利位置观察机器人的基准特征。收集的测量值在最大似然估计器中进行处理，该估计器产生相机到机器人转换的估计，以及每个图像中的镜像配置的估计。该方法的主要优点之一是易于使用。但该方法要求机器人本体框架上各点的坐标必须是已知的。

Lebraly<sup>[22]</sup>等提出了一种用于城市环境下视觉导航的车载两个非重叠摄像头的标定方法。该方法不需要知道场景的几何形状，并且使用粘贴在镜面上的视觉标记来初始化非线性方程。最小化后，重投影误差的标准差为 0.14 像素。这些结果对于移动机器人的应用是令人满意的。Xu<sup>[23]</sup>等使用平面定标板和平面反射镜对由四个不重叠的视场相机组成的系统进行定标。该方法包括标定内部和外部参数，求解其他摄像机（包括镜像虚拟摄像机）与所选全局中心摄像机之间的一组转换关系。通过该方法的全局标定，在高精度电机驱动移动平台上测量了 1100mm 的位移，标准差为 0.074 mm。Agrawal<sup>[24]</sup>等提出了一种基于已知半径球面镜单次反射的外部参数校准方法。球面反射镜的位置和外部参数可以同时求解。该方法不需要知道球面反射镜的位置，也不需要知道球面反射镜的边界在图像中是可见的，只需使用三维参考点的投影即可。

对于带有少量摄像机的小型系统，基于反光镜的方法使用起来相对简单。但是对于大规模的测量系统，这种方法面临着一些挑战。首先，随着与相机的距离增加，参考物体的

图像变小，导致精度下降。其次，反射镜的放置是一个经常被忽视的问题，有时理论上很难保证多台摄像机能够直接或间接地观察到目标。

### 1.3 论文组织结构

本论文的组织结构如下：

第一章 介绍了数字图像法检测管道安装应力的研究背景，研究含义，国内外的研究现状及本文主要工作；

第二章 介绍了相机原理以及数字图像法测量原理。如何设计出测量相机，对测量相机的系统精度做出分析，展示了渲染后的相机测量图片；

第三章 对相机拍摄所得的图片处理，简单说明了使用张氏标定法求解内参，以及如何求解非重叠视场的标定参数，最后对标定结果优化；

第四章 进行长度测量，通过分析管道安装变形情况，设计出长度测量程序；

第五章 使用 Solidworks 仿真拍照，在优化不同参数的情况下对标定结果和长度测量结果分析；

第六章 总结全文，对今后的工作做出总结和展望。

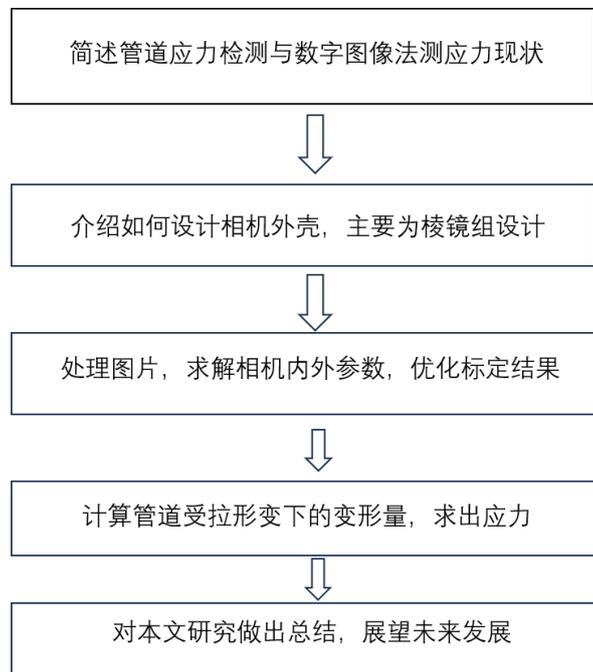


图 1-1 本文流程介绍

## 第二章 相机外壳设计与仿真

相机原理及数字图像法测量原理是现代光学和图像处理领域的核心概念之一。了解相机的成像原理，包括针孔成像模型和相机内外部参数的描述。同时，数字图像法测量原理则是一种基于图像处理的非接触式光学测量方法，广泛应用于各个领域，如测绘、力学、航空航天和机器视觉等。本文将深入探讨相机原理及数字图像法测量原理，包括相机成像原理、针孔相机模型、数字图像相关法的原理和应用。通过对这些核心概念的理解，可以更好地应用于实际场景中，实现各种光学测量和图像处理任务。

### 2.1 相机原理及数字图像法测量原理

#### 2.1.1 相机测量原理

相机的成像原理是理解相机工作机制的基础。当光线通过透镜进入相机时，会根据透镜的曲率和折射原理形成在成像平面上的实际图像。这个过程涉及到焦距、光圈、镜头畸变等光学参数，以及相机传感器的感光特性。

相机的内部参数包括焦距、主点位置、镜头畸变等，这些参数描述了相机透镜系统的光学特性。而外部参数则描述了相机在世界坐标系中的位置和姿态，通常由旋转矩阵和平移向量表示。准确确定相机的内外部参数对于实现图像测量、三维重建等视觉任务至关重要。

相机的基本原理是光沿直线传播与小孔成像，所以第一种常见的成像模型为针孔成像模型，它是一种线性相机模型，将空间中的三维信息转换为二维信息的过程，可以用此模型来近似表示。

针孔相机模型示意图如图 2-1，其中 $O_W(X_W, Y_W, Z_W)$ 为世界坐标系、 $O_C(X_C, Y_C, Z_C)$ 是相机坐标系、 $O_I(x, y)$ 是图像坐标系、 $O_S(u, v)$ 是像素坐标系。

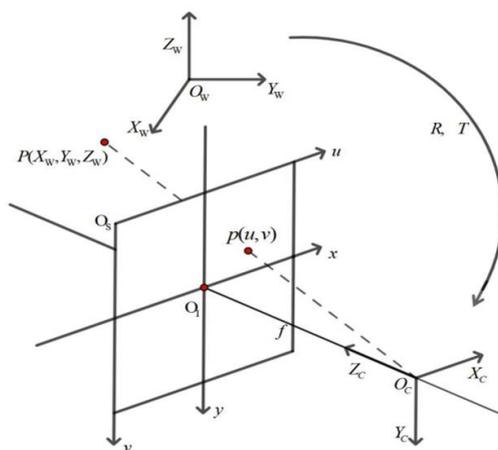


图 2-1 针孔相机模型示意图

假设空间中具有世界坐标 $(X_w, Y_w, Z_w)$ 的点 $P$ 投影到像素平面上的坐标为 $p(u, v)$ ，其成像过程分为以下几步：首先，进行刚体变换，包括旋转矩阵 $R_{3 \times 3}$ 与平移向量 $T_{3 \times 1}$ ，这两个矩阵组成相机的外部参数，只与世界坐标系的建立有关，且变换过程不改变物理的形状，用齐次坐标描述为：

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & T_{3 \times 1} \\ 0^t & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & -\frac{\cot \theta}{du} & u_0 \\ 0 & \frac{f_y}{\sin \theta} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = A[R, T] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

其中， $Z_c$ 表示缩放因子，与分别为以横向方向像元尺寸为单位的横方向上的焦距与以纵向方向像元尺寸为单位的纵方向上的焦距，矩阵 $A$ 和 $[R, T]$ 分别表示相机的内部参数和外部参数。

## 2.2 新型应力测量相机设计

### 2.2.1 相机系统精度分析

#### (1) 单目测空间位移精度分析

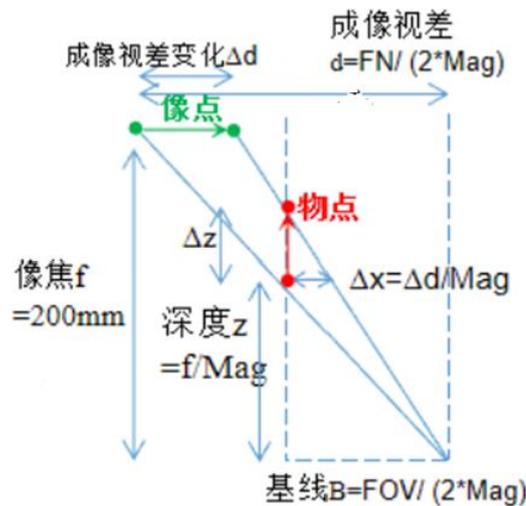


图 2-3 单目精度分析

如图 2-3 所示，相机中变量包含  $\text{Mag}$  与像元尺寸  $\text{Psize}$ ，不变量有  $\text{FOV}$  与像焦。采用  $\text{FOV}$  视场数为  $25\text{mm}$ ， $f$  像焦  $200\text{mm}$  的相机进行精度分析。

深度  $z$  可由公式表示为:

$$Z = f/Mag \quad (2.7)$$

用视差  $d$  表示视场一半, 公式为:

$$d = FOV/(2 * Mag) \quad (2.8)$$

基线  $B$  同样表示视场一半, 为理想中的最大情况, 实际中达不到, 用公式表示为

$$B = FOV/(2 * Mag) \quad (2.9)$$

在水平方向上, 水平精度可表示为:

$$\Delta x = \Delta d/Mag = Psize/Mag \quad (2.10)$$

在垂直方向上, 垂直精度可表示为:

$$\Delta z = 2 * f * Psize / (Mag(FOV - 2 * Psize)) \quad (2.11)$$

其中:

$$f = 200mm, FOV = 25mm, Psize = 0.0022mm \quad (2.12)$$

于是

$$\Delta x = 0.0022/Mag, \Delta z = 0.352/Mag \quad (2.13)$$

将垂直精度与水平精度相比得到

$$\Delta z/\Delta x = 160 \quad (2.14)$$

该精度不满足设计需求。

### 2.2.2 反射棱镜设计

为了使单目相机能有四目相机的效果, 设计了棱镜解决该问题。如图 2-5 所示为棱镜组与被测板剖面图, 棱镜组由一块  $90^\circ$  棱镜、四块  $60^\circ$  棱镜、两块  $30^\circ$  棱镜组成, 通过多次反射, 使图像能被相机顺利接收。相机与棱镜组示意图如图 2-6 所示。

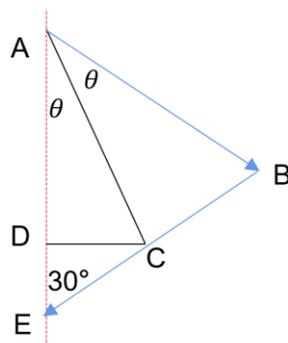


图 2-7 光路分析

如图 2-7，可以确定半视场 CD 为 3mm，半视角 DEC 为 30°，要求出第一个反射面与垂线夹角 CAD 的角度，定义 CAD 夹角为  $\theta$ 。

通过约束条件，成像距离 AE 最短，中心光路 ABCE 最短。可以确定三角形 CDE 的形状可以用  $\theta$  来表示 AD 和 AB+BC，

AD 为

$$AD = 3 / \tan \theta \quad (2.15)$$

AB+BC 为

$$AB + BC = [3 + \sin(\theta + 30^\circ)] / \sin(150^\circ - 2\theta) \quad (2.16)$$

通过使用 matlab 可以确定  $\theta = 42.5^\circ$  时效果最优，此时成像距离为 8.2mm，成像光路距离为 14.2mm。

使用设计的棱镜后，实现了四目相机的功能。且棱镜组更紧凑，解决了设备便携性的问题。

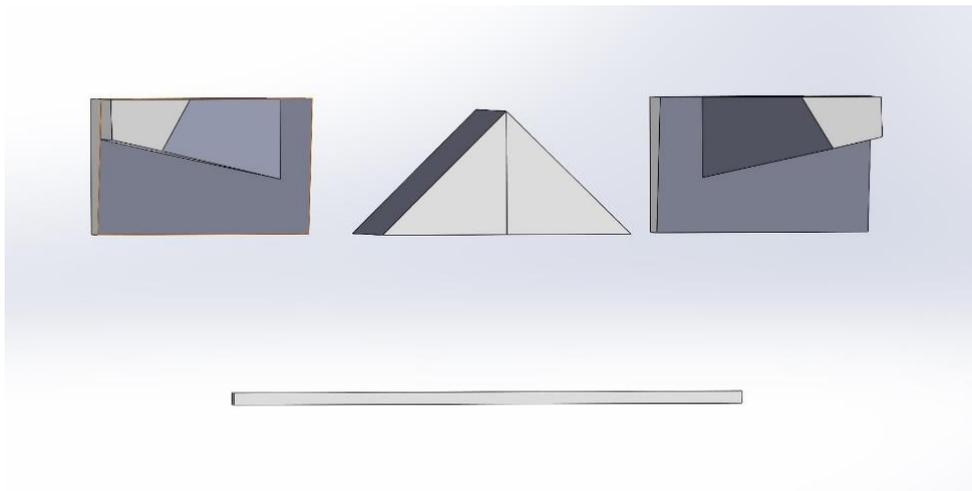


图 2-5 棱镜组与标定板示意图

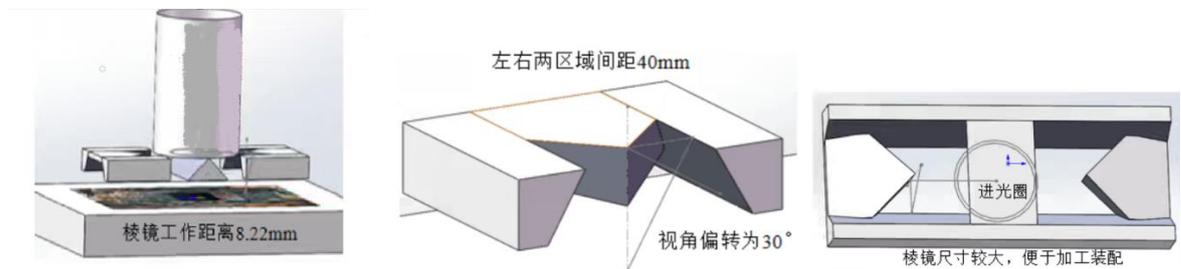


图 2-6 相机与棱镜组

如图 2-8 所示为四目相机等效位置。



图 2-8 四目相机等效位置图

如图 2-9，拍照效果与实际视场位置。渲染得到的效果图达到预想效果，使用棱镜组拍摄的照片具有更大的视场区域。

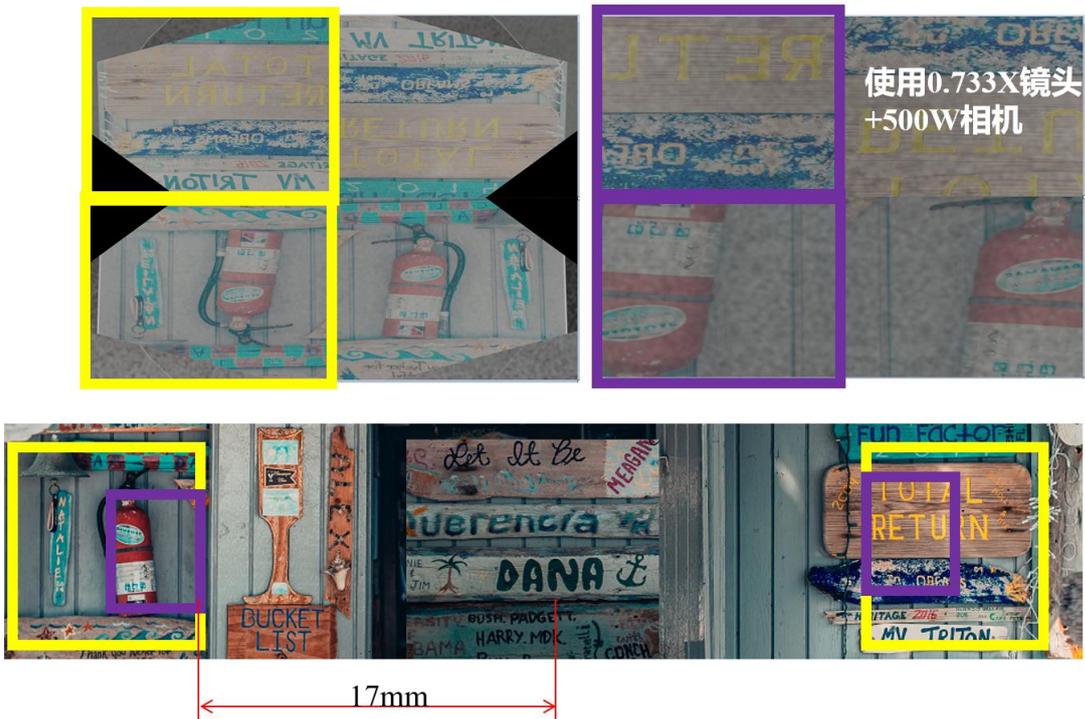


图 2-9 拍照效果与实际视场位置

### 2.3 相机外壳设计

新型相机结构示意图如图 2-10 所示，根据飞机管道检测操作环境，若在现场施工，可能面临视野亮度不够的情况，故在两侧开孔加入光纤使光源充足。

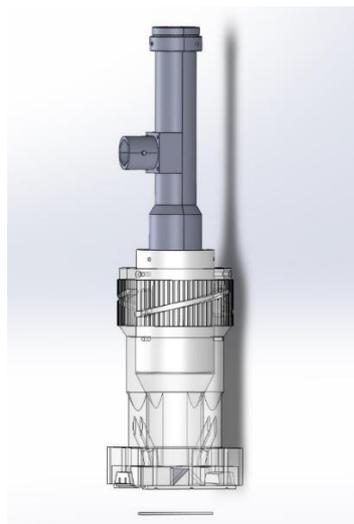


图 2-10 相机结构与标定板示意图

如图 2-11，相机主体组成部分：

- (1) 固定环：通过螺丝固定相机。
- (2) 调焦环：调节焦距，使成像清晰。
- (3) 尺寸套筒：用来更换不同倍率的相机。
- (4) 相机壳主体：连接相机，装载棱镜组。
- (5) 棱镜组：通过多次反射图像，使被摄表面能够在相机成像面成像。
- (6) 压力锁：固定棱镜。

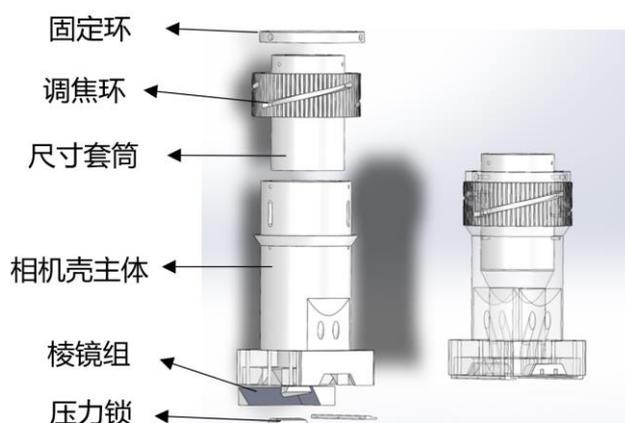


图 2-11 相机外壳装配图

## 2.4 本章小结

本章主要介绍相机测量原理，对相机系统的测量精度进行分析，单目相机不满足设计需求。使用双目相机满足精度需求，但不便捷。结合如何设计棱镜扩大视场，求解出棱镜组的最佳角度。结合棱镜组对相机外壳进行设计，并对设计的相机拍摄的图片进行渲染。

## 第三章 相机标定与标定优化

单目相机标定是一项至关重要的任务。通过标定相机的内部参数和外部参数，以及图像中物体的位置和姿态，可以实现对环境的准确理解和感知，为各种应用场景提供技术支持和解决方案。在标定过程中，张氏标定法是一种被广泛采用的方法之一。该方法通过拍摄一系列已知世界坐标下的标定板图像，利用图像处理算法提取棋盘格角点的坐标，并与靶标的三维坐标建立对应关系，从而获取相机标定的结果。本文将介绍单目相机标定的基本原理和流程，以及张氏标定法的具体步骤和数学推导过程。

### 3.1 图像矫正

如图 3-1 所示为棱镜组与被测板放大图，棱镜组由一块  $90^\circ$  棱镜、四块  $60^\circ$  棱镜、两块  $45^\circ$  棱镜组成，通过多次反射，使图像能在相机成像区域显示。

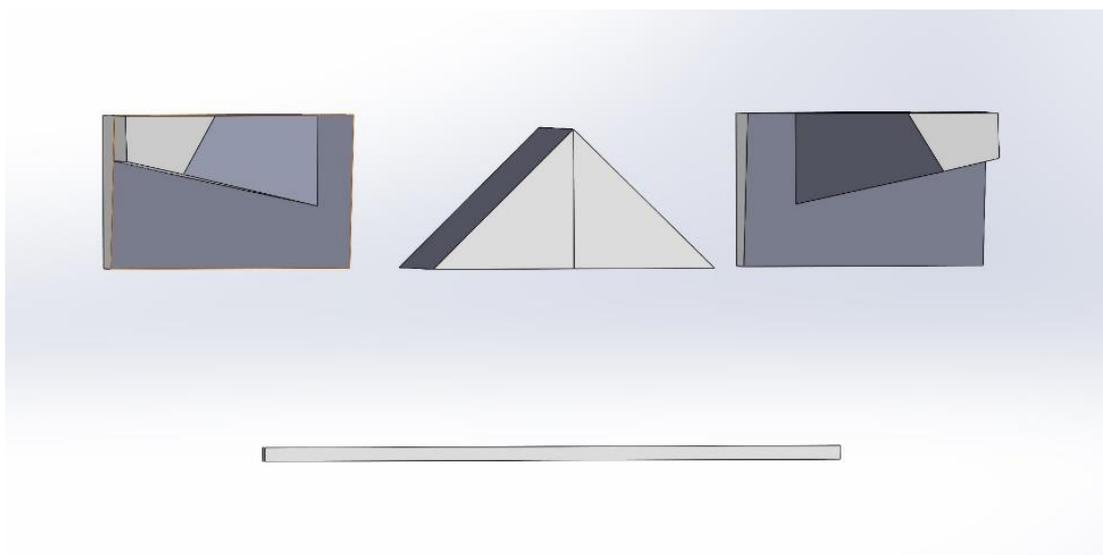


图 3-1 棱镜组与标定板示意图

通过棱镜组中的棱镜实现三次镜面反射，将图像显示在相机成像区域，使单目相机能够得到四目图像。三次镜面反射坐标系示意图如图 3-2。通过镜面反射得到的图像会与原始图像存在错误，为了得到原始图像需先通过左右翻转处理，再通过上下翻转处理。如图 3-3，流程图表明了如何处理通过镜面反射后的坐标系得到原始坐标系。通过相似的翻转后能够使拍摄的图像还原到初始状态。

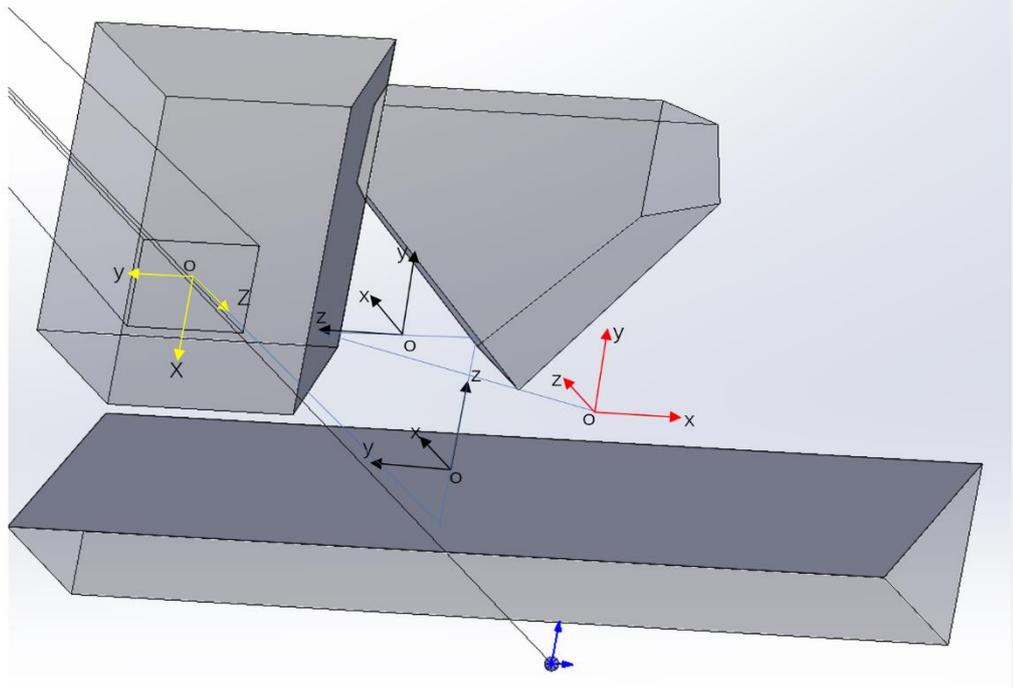


图 3-2 三次镜面反射坐标系示意图

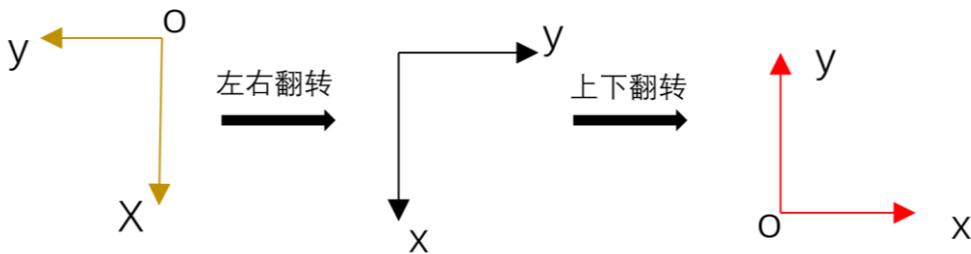


图 3-3 还原反射坐标过程图

## 3.2 内参标定

### 3.2.1 张友正标定法

单目相机标定是计算机视觉领域中的重要任务之一，它涉及到确定相机的内部参数和外部参数，以及图像中物体的位置和姿态。通过标定，可以将图像坐标转换为世界坐标，从而实现对物体的准确测量和定位。

在单目相机标定中，通过拍摄一系列已知的世界坐标下的标定板图像，来确定相机的内部参数（如焦距、主点偏移）和外部参数（如旋转和平移矩阵）。通过这些参数，可以将图像坐标转换为世界坐标，从而实现对物体的准确测量和定位。

单目相机标定的过程通常包括以下步骤：

- (1) 采集图像：使用单目相机拍摄一系列已知世界坐标下的标定板图像。

(2) 特征提取: 从图像中提取特征点, 通常是标定板的角点或者其他易于识别的特征。

(3) 特征匹配: 对标定板图像中的特征点进行匹配, 以建立图像中特征点的对应关系。

(4) 求解: 利用已知的世界坐标系和对应的图像坐标系, 通过最小化重投影误差来求解相机的内部和外部参数。

(5) 评估: 对标定结果进行评估, 检查重投影误差是否在可接受范围内, 以确保标定的准确性和可靠性。

在单目相机标定中, 最常用的方法之一是张氏标定方法。该方法基于对相机的内部参数和外部参数进行优化, 以最小化重投影误差, 从而获得最优的标定结果。张氏标定方法具有简单易行、精度高等优点, 因此在实际应用中得到了广泛的应用。

单目相机标定在计算机视觉、机器人、增强现实等领域具有广泛的应用。通过准确地确定相机的参数和物体的位置姿态, 我们可以实现对环境的理解和感知, 从而为各种应用场景提供技术支持和解决方案。

图片切割与矫正程序执行过后依据张式标定法进行内参标定, 张氏标定法由张正友教授提出, 该方法使用的棋盘格标定相比于传统的标定方法容易加工, 并且精度更高。通过图像处理算法, 从每幅图像中提取棋盘格角点的坐标, 并与靶标的三维坐标建立对应关系来获得相机标定的结果, 是摄像机标定领域使用的主流算法之一。为了确保标定的准确性, 至少需要拍摄 3 幅以上的靶标图像, 将世界坐标系  $Z = 0$  的平面作为靶标坐标系, 原不考虑畸变的单个点的成像模型可表示为:

$$S \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = A[r_1, r_2, r_3, t] \begin{pmatrix} x \\ y \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = A[r_1, r_2, t] \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = H \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

式 (3.1) 中,  $S$  为任意的非零尺度因子;  $A$  为相机的内参数矩阵;  $r_1, r_2, r_3$  为旋转矩阵,  $t$  为平移向量,  $H = A[r_1, r_2, t]$  即为内参矩阵和外参矩阵的积。记  $H$  的三列为  $[h_1 h_2 h_3]$ , 则有

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{s} H \begin{pmatrix} U \\ V \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{s} \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U \\ V \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

消除尺度因子  $S$  可得:

$$\begin{cases} u = \frac{h_{11}U + h_{12}V + h_{13}}{h_{31}U + h_{32}V + h_{33}} \\ v = \frac{h_{21}U + h_{22}V + h_{23}}{h_{31}U + h_{32}V + h_{33}} \end{cases} \quad (3.3)$$

引入常数因子  $\lambda$ , 利用  $H = [h_1, h_2, h_3] = \lambda A[r_1, r_2, t]$ , ( $\lambda = 1/s$ ) 和旋转矩阵  $R$  的正交性, 得到两个关于摄像机内参的约束方程:

$$\begin{cases} h_1^T A^{-T} A^{-1} h_2 = 0 \\ h_1^T A^{-T} A^{-1} h_1 = h_2^T A^{-T} A^{-1} h_2 \end{cases} \quad (3.4)$$

令

$$B = A^{-T} A^{-1} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{12} & B_{22} & B_{23} \\ B_{13} & B_{23} & B_{33} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha^2} & -\frac{\gamma}{\alpha^2 \beta} & \frac{\gamma v_0 - \beta u_0}{\alpha^2 \beta} \\ -\frac{\gamma}{\alpha^2 \beta} & \frac{1}{\beta^2} + \frac{\gamma^2}{\alpha^2 \beta^2} & \frac{\gamma(\beta u_0 - \gamma v_0)}{\alpha^2 \beta^2} - \frac{v_0}{\beta^2} \\ \frac{\gamma v_0 - \beta u_0}{\alpha^2 \beta} & \frac{\gamma(\beta u_0 - \gamma v_0)}{\alpha^2 \beta^2} - \frac{v_0}{\beta^2} & \frac{(\beta u_0 - \gamma v_0)^2}{\alpha^2 \beta^2} + \frac{v_0^2}{\beta^2} + 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

由于 $B$ 为对称矩阵，根据 $B$ 的元素和摄像机内部参数 $\alpha, \beta, \gamma, u_0, v_0$ 的对应关系可得：

$$\begin{aligned} v_0 &= \frac{B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23}}{B_{11}B_{22} - B_{12}^2} \\ \alpha &= \sqrt{\frac{1}{B_{11}}} \\ \beta &= \sqrt{\frac{B_{11}}{B_{11}B_{22} - B_{12}^2}} \\ \gamma &= -B_{12}\alpha^2\beta \\ u_0 &= \frac{\gamma v_0}{\beta} - B_{13}\alpha^2 \end{aligned} \quad (3.7)$$

即可求得相机的内参矩阵为：

$$A = \begin{pmatrix} \frac{f}{dX} & -\frac{f \cot \theta}{dX} & u_0 & 0 \\ 0 & \frac{f}{dY \sin \theta} & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

### 3.3 非重叠视场的区域标定

#### 3.3.1 PnP 求解单目定位

非重叠视场的标定方法是用于确定相机或传感器在不同视野下的位置和方向，这项技术在机器人视觉、虚拟现实等领域中具有重要作用。非重叠视场的标定方法主要有基于模板匹配的标定、基于特征点的标定、基于集合投影的标定、基于标定板的标定、基于结构光的标定、基于光束测距的标定。

本文选择基于标定板的标定方法，标定板的非重叠视场标定方法的原理基于摄像机成像模型、棋盘格几何结构、特征点检测与匹配以及摄像机参数计算。摄像机成像模型描述了摄像机从三维世界到二维图像的投影过程，常用的模型为针孔相机模型。对于棋盘格标定板，其几何结构包括已知的特征点坐标，通常为格点的交叉点，在标定过程中，使用特征点检测算法检测出图像中的特征点，然后通过匹配算法将不同图像中相对应的特征点进行匹配，建立图像间的对应关系。最后基于摄像机成像模型和棋盘格的几何结构，通过特

征点在图像中的像素坐标和棋盘格上的已知特征点坐标，求解摄像机的内部参数矩阵 $K$ 以及外部参数，如旋转矩阵 $R$ 和平移向量 $t$ 。标定公式可以表示为：

$$sP_{2D} = K(RP_{3D} + t) \quad (3.9)$$

其中， $P_{3D}$ 是棋盘格上的三维特征点坐标， $P_{2D}$ 是对应的二维像素坐标， $K$ 是摄像机内部参数矩阵， $R$ 是摄像机的旋转矩阵， $t$ 是平移向量， $s$ 是尺度因子。通过这个公式，可以使用已知的棋盘格三维坐标和对应的图像中的二维像素坐标，利用摄像机的成像模型，求解摄像机的内部和外部参数。

PNP问题的基本原理是根据相机拍摄到的图像上的特征点与相机坐标系中的三维物体坐标之间的对应关系，来估计相机的位置和姿态。这个问题通常用于求解相机的外部参数，即相机的旋转和平移。假设有 $n$ 个已知的三维点 $P_i = (X_i, Y_i, Z_i)$ 和它们在相机图像上的对应点 $p_i = (x_i, y_i)$ ，PNP问题的目标是找到相机的旋转矩阵 $R$ 和平移向量 $T$ ，使得通过相机的内部参数和这些外部参数可以计算出 $P_i$ 投影到图像上的坐标 $p_i$ 。PNP问题通常使用解决线性方程组的方法，其中一个常用的方法是EPnP (Efficient Perspective-n-Point)算法，它可以高效地求解PNP问题。

PNP问题的基本公式可以表示为：

$$s \cdot \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = K \cdot [r_1 \quad r_2 \quad r_3 \quad t] \cdot \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

其中 $(u_i, v_i)$ 是第 $i$ 个特征点在图像上的坐标； $K$ 是相机的内部参数矩阵(包括焦距、主点等参数)； $(r_1, r_2, r_3)$ 是相机的旋转矩阵； $t$ 是相机的平移向量； $(X_i, Y_i, Z_i)$ 是第 $i$ 个特征点在世界坐标系中的坐标； $s$ 是尺度因子。这个公式表示了相机坐标系中的三维点 $(X_i, Y_i, Z_i)$ 投影到图像平面上的坐标 $(u_i, v_i)$ 。通过解决这个方程组，可以估计出相机的旋转矩阵 $R$ 和平移向量 $T$ 。

### 3.3.2 2组图片求解多目间外参

如图3-5所示，MT由两个平面目标(称为子目标)组成。MT在视觉传感器前方自由放置至少四次。使用MT作为中介，可以求解从每个视觉传感器到GCF的坐标变换矩阵。

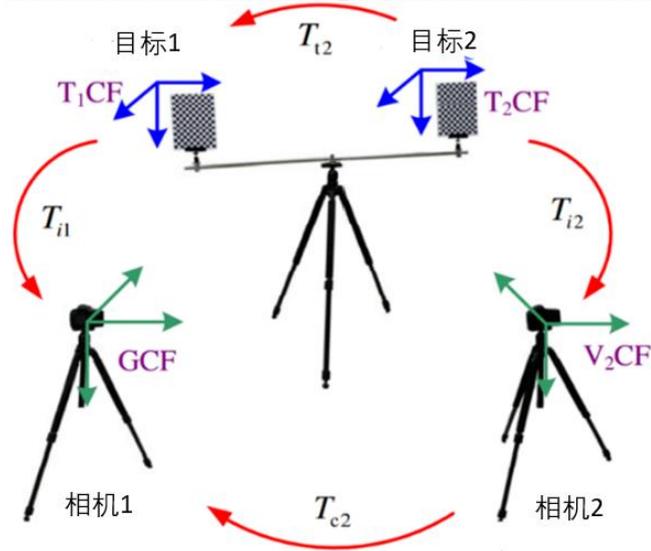


图 3-5 全局标定示意图

本文以视觉传感器中相机的坐标系作为视觉传感器的坐标系。 $V_kCF(k = 1, 2)$ 表示视觉传感器  $k$  的坐标系。视觉传感器 1 被选为参考视觉传感器，基于该传感器建立 GCF，因此在论文的其余部分使用 GCF 代替  $V_1CF$ 。 $I_kCF$  表示视觉传感器  $k$  的图像坐标系， $T_kCF$  表示子目标  $k$  的坐标系， $T_1CF$  被选为 MT 的坐标系，命名为 MCF。

其中  $R$  是  $3 \times 3$  旋转矩阵， $t$  是  $3 \times 1$  平移向量。 $0$  是  $1 \times 3$  零矩阵。在  $T$  的下标中， $t$  表示子目标之间的转换， $c$  表示视觉传感器之间的转换， $k$  是视觉传感器的索引。例如， $T_{t2}$  表示从  $T_2CF$  到 MCF 的转换矩阵。 $T_{c2}$  表示从  $V_2CF$  到 GCF 的转换矩阵。 $T_{ik}(k = 1, 2)$  表示在第  $i$  个 MT 位置从  $T_kCF$  到  $V_kCF$  的转换矩阵。

#### (1) 求解 $T$

每个视觉传感器的固有参数可以通过张氏标定法使用视觉传感器捕获的相应子目标的图像进行校准。然后，使用校准的固有参数对所有图像进行不失真处理。根据相机模型，有方程 (3.11)，从中可以使用张氏标定法算法求解  $T$ ，

$$\begin{aligned}
 s_k \tilde{p}_k &= \mathbf{A}_k \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} T_{ik} q_k \\
 &= \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{ik} & \mathbf{t}_{ik} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \mathbf{q}_k
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

$(k = 1, 2),$

其中  $q_k$  是  $T_kCF(k = 1, 2)$  中子目标  $k$  上特征点的齐次坐标。 $p_k$  表示  $I_kCF(k = 1, 2)$  中子目标  $k$  上特征点的齐次图像坐标。 $s_k$  是比例因子。 $A_k$  是相机固有矩阵。 $(u_0, v_0)$  是主点的坐标。 $\alpha$  和  $\beta$  是沿图像平面的  $u$  轴和  $v$  轴的比例因子。参数  $\gamma$  表示两个图像轴的偏斜。

(2) 求解  $R$ 

每个平面目标都定义了一个坐标系，目标平面为  $xy$  平面，目标特征点为原点，这里我们选择目标上左上角的特征点。 $n_{ik}^x, n_{ik}^y, n_{ik}^z$  表示  $V_kCF(k=1,2)$  中平面目标坐标系的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴的单位向量。它们可以使用  $R_{ik}$  计算，即在第  $i$  个 MT 位置从  $T_kCF$  到  $V_kCF$  的旋转，

$$\begin{cases} n_{ik}^x = R_{ik}n_{Ox} \\ n_{ik}^y = R_{ik}n_{Oy} \\ n_{ik}^z = R_{ik}n_{Oz} \end{cases} \quad (k=1,2) \quad (3.12)$$

其中  $n_{Ox} = (1,0,0)^T, n_{Oy} = (0,1,0)^T, n_{Oz} = (0,0,1)^T$  是表示  $T_kCF(k=1,2)$  中平面目标的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴的单位向量。

利用两个子目标的相对位置不变的事实，对于第  $i$  个和第  $j$  个 MT 位置，有

$$\begin{cases} n_{i1}^x \cdot (R_{c2}n_{i2}^x) = n_{j1}^x \cdot (R_{c2}n_{j2}^x) \\ n_{i1}^y \cdot (R_{c2}n_{i2}^y) = n_{j1}^y \cdot (R_{c2}n_{j2}^y) \\ n_{i1}^z \cdot (R_{c2}n_{i2}^z) = n_{j1}^z \cdot (R_{c2}n_{j2}^z) \end{cases} \quad (3.13)$$

作为等式 (3.13) 的一组三个方程可以从两个 MT 位置获得。从四个 MT 位置可以得到三组方程，形成  $R_{c2}$  的九个元素的线性系统。

 (3) 求解  $t$ 

当 MT 放置在第  $i$  个位置时，设  $v_{i1}$  是  $V_1CF$  中子目标 1 上特征点的空间坐标。类似地，当 MT 放置在第  $i$  个位置时，设  $v_{i2}$  是  $V_2CF$  中子目标 2 上的特征点的坐标。它们可以通过相应子目标和视觉传感器之间的旋转和平移来计算：

$$\begin{cases} v_{i1} = R_{i1}q_1 + t_{i1} \\ v_{i2} = R_{i2}q_2 + t_{i2} \end{cases} \quad (3.14)$$

设  $\hat{v}_{i2}$  是  $V_1CF$  中同一要素点的空间坐标。可以通过使用  $R_{c2}$  和  $t_{c2}$  将  $v_{i2}$  转换成  $V_1CF$  获得：

$$\hat{v}_{i2} = R_{c2}v_{i2} + t_{c2} \quad (3.15)$$

由于两个子目标的相对位置是不变的，因此特征点与两个子目标之间的距离也是不变的。由于两个特征点之间的距离在第  $i$  个和第  $j$  个 MT 位置没有变化，因此得到

$$\|v_{i1} - \hat{v}_{i2}\| = \|v_{j1} - \hat{v}_{j2}\| \quad (3.16)$$

方程 (3.16) 可以简化为  $t_{ck}$  的线性方程：

$$2(M_a - M_b)^T t_{c2} = M_a^T M_a - M_b^T M_b \quad (3.17)$$

其中

$$M_a = v_{i1} - R_{c2}v_{i2}, M_b = v_{j1} - R_{c2}v_{j2} \quad (3.18)$$

$t_{c2}$ 可以通过将三个方程组合为三个点对的方程（3.17）来求解。当有三个以上的方程时，可以计算  $t_{c2}$  的最小二乘解。

从等式（3.13）和（3.17）中可以看出， $R_{c2}$ 分别使用两个视觉传感器捕获的两个空间矢量之间的角度不变性求解，而  $t_{c2}$ 分别使用两个视觉传感器捕获的两个特征点之间的距离不变性来计算。因此，算法只需要每个视觉传感器测量一个点和一个空间矢量，就可以由共线点形成，我们只需要多次改变视觉传感器的方向和位置，就可以获得足够的方程，如方程（3.13）中的三个方程之一来求  $R_{c2}$ ，如方程（3.17）来求解  $t_{c2}$ 。如果存在两个以上的视觉传感器，则可以通过将上述方法应用于每个视觉传感器和参考视觉传感器来计算从每个视觉传感器的坐标系到参考视觉传感器 GCF 的转换。

### 3.4 标定优化

对相机外参标定完过后需要进行标定优化，优化算法流程图如图 3-6 所示。

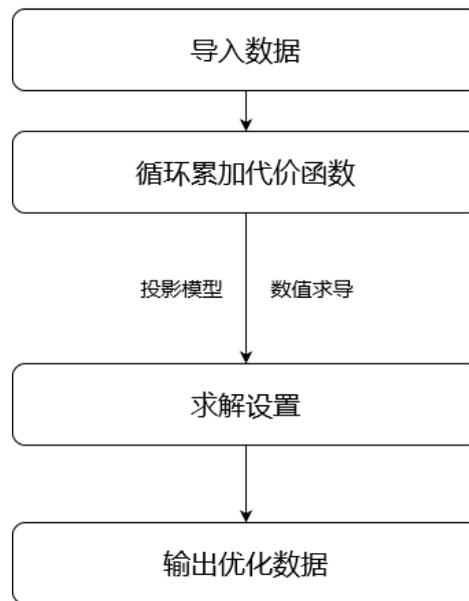


图 3-6 标定优化算法流程图

#### (1) 运动方程与观测方程

SLAM (Simultaneous Localization and Mapping, 即时定位与地图构建)问题可以通过运动方程和观测方程来描述。在从时间  $t = 0$  到  $t = N$  的过程中，假设我们有一系列的位姿  $x_0$  到  $x_N$ ，以及若干路标  $y_1$  到  $y_M$ 。根据已有的理论，运动和观测方程分别为：

$$\begin{cases} x_k = f(x_{k-1}, u_k) + w_k \\ z_{k,j} = h(y_j, x_k) + v_{k,j} \end{cases} \quad k = 1, \dots, N, \quad j = 1, \dots, M \quad (3.19)$$

其中： $x_k$ 表示在时间 $k$ 时刻的位姿。 $f$ 是描述系统运动的函数， $u_k$ 是控制输入， $w_k$ 是过程噪声。 $z_{k,j}$ 是在时间 $k$ 时刻对路标 $y_j$ 的观测值。 $h$ 是观测模型， $v_{k,j}$ 是观测噪声。在实际的SLAM过程中，并不是每次观测都能看到所有的路标。事实上，在某一位置，通常只能看到一小部分路标。这意味着观测方程的数量会远远大于运动方程，因为视觉SLAM中特征点（路标）的数量众多。在一些情况下，我们可能没有测量运动的装置，或者没有已知的运动方程。这时，可以采用几种不同的处理方式：认为确实没有运动方程，完全依赖观测方程进行优化；假设相机不动，认为在一段时间内相机保持静止；假设相机匀速运动，假设相机以恒定的速度运动。这几种方式在不同场景中都是可行的。

## (2) 卡尔曼滤波

当没有运动方程时，整个优化问题只由许多个观测方程组成，这与结构从运动(SfM)问题非常相似。不同之处在于，SLAM中的图像有时间上的先后顺序，而SfM中可以使用完全无关的图像。在SLAM过程中，每个方程都受到噪声的影响，因此位姿 $x$ 和路标 $y$ 应看作是服从某种概率分布的随机变量，而不是单独的一个数。在实际应用中，通常假设状态量和噪声项服从高斯分布。在程序中只需要存储它们的均值和协方差矩阵即可。均值可以看作对变量最优值的估计，协方差矩阵则度量了不确定性。

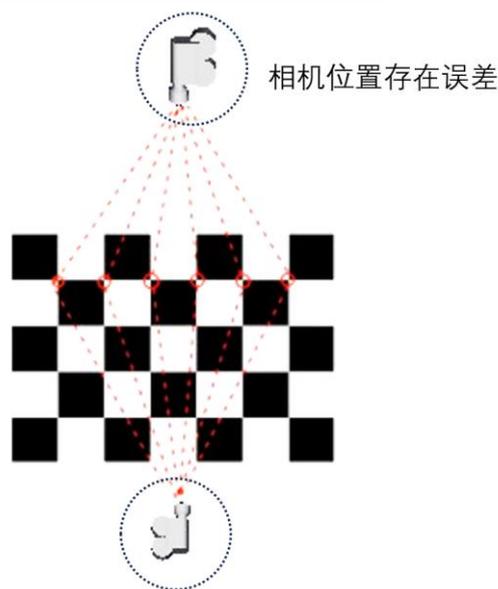


图 3-7 卡尔曼滤波

当输入数据受噪声影响时，误差是逐渐累积的。因此，对位置方差的估计会越来越大。随着时间的推移，噪声会在位姿估计中累积，导致不确定性增加。即使单次观测或运动的噪声较小，经过多次迭代后，其累积效应会变得显著。为了应对噪声累积的问题，通常使

用滤波算法，如扩展卡尔曼滤波 (EKF) 来估计系统状态，如图 3-7。这些算法能够在多次观测和运动更新中不断调整位姿，从而减小误差。

### (3) 非线性优化

运动方程和观测方程通常是非线性函数，尤其是在视觉 SLAM 中，相机模型需要使用相机内参模型及李代数表示的位姿。为了处理这种非线性，扩展卡尔曼滤波 (EKF) 将卡尔曼滤波器的结果拓展到非线性系统中。扩展卡尔曼滤波的基本思想是，在某个点附近考虑运动方程及观测方程的一阶泰勒展开，只保留一阶项，即线性的部分，然后按照线性系统进行推导。具体过程如下：令  $k-1$  时刻的均值与协方差矩阵为  $\hat{x}_{k-1}$  和  $\hat{P}_{k-1}$ 。在  $k$  时刻，我们将运动方程和观测方程在  $\hat{x}_{k-1}$  和  $\hat{P}_{k-1}$  处进行线性化(相当于一阶泰勒展开):

$$x_k \approx f(\hat{x}_{k-1}, u_k) + \frac{\partial f}{\partial x_{k-1}} \Big|_{\hat{x}_{k-1}} (x_{k-1} - \hat{x}_{k-1}) + w_k \quad (3.20)$$

记这里的偏导数为:

$$F = \frac{\partial f}{\partial x_{k-1}} \Big|_{\hat{x}_{k-1}} \quad (3.21)$$

同样，对于观测方程，亦有:

$$z_k \approx h(\check{x}_k) + \frac{\partial h}{\partial x_k} \Big|_{\check{x}_k} (x_k - \check{x}_k) + n_k \quad (3.22)$$

记这里的偏导数为:

$$H = \frac{\partial h}{\partial x_k} \Big|_{\check{x}_k} \quad (3.23)$$

在预测步骤中，根据运动方程有:

$$P(x_k | x_0, u_{1:k}, z_{0:k-1}) = \mathcal{N}(f(\hat{x}_{k-1}, u_k), F\hat{P}_{k-1}F^T + R_k) \quad (3.24)$$

这些推导和卡尔曼滤波是十分相似的。为方便表述，记这里的先验和协方差的均值为:

$$\check{x}_k = f(\hat{x}_{k-1}, u_k), \quad \check{P}_k = F\hat{P}_{k-1}F^T + R_k \quad (3.25)$$

然后，考虑在观测中我们有:

$$P(z_k | x_k) = \mathcal{N}(h(\check{x}_k) + H(x_k - \check{x}_k), Q_k) \quad (3.26)$$

最后，根据最开始的贝叶斯展开式，可以推导出  $x_k$  的后验概率形式。我们略去中间的推导过程，只介绍其结果。可以仿照卡尔曼滤波器的方式，推导 EKF 的预测与更新方程。简而言之，我们会先定义一个卡尔曼增益  $K_k$ :

$$K_k = \check{P}_k H^T (H\check{P}_k H^T + Q_k)^{-1} \quad (3.27)$$

在卡尔曼增益的基础上，后验概率的形式为:

$$\hat{x}_k = \check{x}_k + K_k(z_k - h(\check{x}_k)), \quad \hat{P}_k = (I - K_k H)\check{P}_k \quad (3.28)$$

卡尔曼滤波器给出了在线性化之后状态变量分布的变化过程。在线性系统和高斯噪声下，卡尔曼滤波器给出了无偏最优估计。而在 SLAM 这种非线性的情况下，它给出了单次线性近似下的最大后验估计。扩展卡尔曼滤波在处理非线性系统时，通过局部线性化来近似原始的非线性方程，虽然引入了一定的近似误差，但在实际应用中仍然表现出较高的有效性。

投影过程始于将世界坐标系中的点 $p$ 转换为相机坐标系中的点 $P'$ ，这需要利用相机的外参数 $R$ 和 $t$ 。具体来说

$$P' = Rp + t = [X', Y', Z']^T \quad (3.29)$$

接下来，将 $P'$ 投影到归一化平面，得到归一化坐标 $P_c$ ，即

$$P_c = [u_c, v_c, 1]^T = \left[ \frac{X'}{Z'}, \frac{Y'}{Z'}, 1 \right]^T \quad (3.30)$$

考虑到归一化坐标的畸变，这里先暂时只考虑径向畸变，即

$$\begin{cases} U'_c = U_c(1 + k_1\gamma_c^2 + k_2\gamma_c^4) \\ v'_c = v_c(1 + k_1r_c^2 + k_2\gamma_c^4) \end{cases} \quad (3.31)$$

其中

$$r_c^2 = u_c^2 + v_c^2 \quad (3.32)$$

最后，根据相机的内参模型，计算最终的像素坐标 $u_s$ 和 $v_s$ ，即

$$\begin{cases} u_s = f_x u'_c + c_x \\ v_s = f_y v'_c + c_y \end{cases} \quad (3.33)$$

以最小二乘的角度考虑，针对单次观测，可以定义误差为

$$e = z - h(T, p) \quad (3.34)$$

考虑到多次观测的情况，引入下标 $i$ 和 $j$ ，代表在位姿 $T_i$ 处观察路标 $p_j$ 产生的数据。整体的代价函数可以表示为：

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \| e_{ij} \|^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \| z_{ij} - h(T_i, p_j) \|^2 \quad (3.35)$$

其中， $z_{ij}$ 表示观测数据， $e_{ij}$ 表示误差。

标定算法流程图如图 3-4 所示。

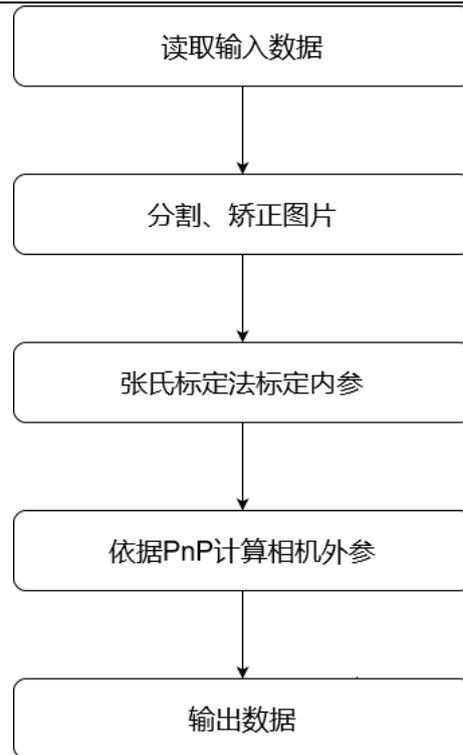


图 3-4 标定算法流程图

### 3.5 本章小结

本章详细介绍了单目相机标定以及利用多目标(MT)进行视觉传感器全局标定的方法。在单目相机标定中，通过拍摄一系列已知世界坐标下的标定板图像，利用张氏标定法提取棋盘格角点的坐标，与靶标的三维坐标建立对应关系，从而确定相机的内部参数和外部参数，实现图像坐标到世界坐标的转换。这一过程对于计算机视觉、机器人和增强现实等领域的应用至关重要。

在视觉传感器全局标定中，MT 由两个平面子目标组成，通过在视觉传感器前方自由放置 MT，可以求解从每个视觉传感器到全局坐标系(GCF)的坐标变换矩阵。具体步骤包括：通过张氏标定法校准视觉传感器的固有参数，利用不失真的图像，建立图像坐标与世界坐标之间的关系，求解转换矩阵；通过目标平面的单位向量与旋转矩阵建立关系，利用子目标之间的相对位置不变性，构建方程求解旋转矩阵；计算特征点的空间坐标，利用特征点之间的距离不变性，构建方程求解平移向量。

此外，标定优化是确保标定结果精确性的关键步骤。通过 SLAM 技术，采用扩展卡尔曼滤波(EKF)处理非线性系统，进行状态估计和最小二乘法优化，从而减小噪声累积效应，提高标定精度。

## 第四章 管道安装应力测量

在现代工程领域中，准确测量物体的形变和应力情况对于确保结构安全、优化设计以及预防性维护至关重要。而数字图像相关法作为一种非接触式光学测量方法，为我们提供了一种高效、准确地获取物体形变信息的途径。本文将深入探讨数字图像相关法在应力计算中的原理及其应用。

### 4.1 应力计算原理

#### 4.1.1 数字图像法

数字图像相关法，也有少数称数字散斑相关法，是一种基于图像处理的非接触式光学测量方法，广泛地应用于测绘、力学、航空航天和机器视觉等领域。由于其装置简单、非接触、全场测量、非干涉等优点，一直是目前光测力学的研究热点。数字图像相关法的核心思想就是通过变形前后特征区域的变化进而推算出物体变形过程中的位移信息和应变信息。位移信息和应变信息的计算需要依据形变理论，而如何判断两幅图像是否具有相关性则要通过相关函数来进行处理和计算，下面会对这两方面进行详细的展开说明。数字图像相关法的形变模型如下图 4-1 所示。图中的参考图像为形变发生前相机所拍摄的原始图像，而变形图像则是在形变产生后相机所拍摄的图像。数字图像相关法的关键问题在于找到与形变后图像中的点 $P'(x'_0, y'_0)$ 、 $Q'(x'_1, y'_1)$ 对应的形变前图像中的点 $P(x_0, y_0)$ 、 $Q(x_1, y_1)$ 。这种点的信息是依据像素的灰度值来体现的，像素的灰度值在 0-255 中变化。如果只考虑单一的像素点，像素灰度的重复概率会很大，所找的点的错误匹配率会很高。因此会在参考图像中选取一块子集区域，通过相关算法对每一个形变后的图像进行相关系数计算，找到相关系数最大的位置，进而实现高精度的相关匹配。

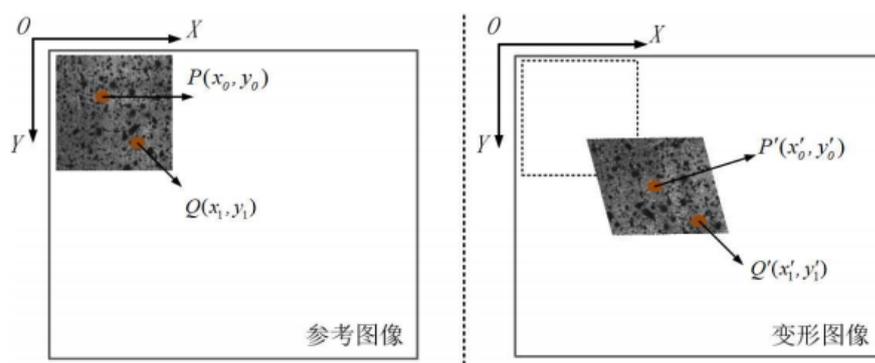


图 4-1 数字图像相关法变形模型示意图

如图 4-1 所示，参考图像中的  $P(x_0, y_0)$ 、 $Q(x_1, y_1)$  经过变形后，所对应的新点为  $P'(x'_0, y'_0)$ 、 $Q'(x'_1, y'_1)$ 。如果只考虑刚体位移的话，那么对于  $P$  点而言，变形前后所产生的水平坐标差  $u$  和垂直坐标差  $v$  分别可以表示为：

$$\begin{aligned} u &= x'_0 - x_0 \\ v &= y'_0 - y_0 \end{aligned} \quad (4-1)$$

而对于  $Q$  点来讲，它与  $P$  点的相对水平位置关系  $\Delta x$  和相对垂直位置  $\Delta y$  关系可以由如下公式 4-2 来表示：

$$\begin{aligned} \Delta x &= x_1 - x_0 \\ \Delta y &= y_1 - y_0 \end{aligned} \quad (4-2)$$

因此对于  $Q$  点而言，变形后的坐标可以表示为：

$$\begin{aligned} x'_1 &= x_0 + \Delta x + u \\ y'_1 &= y_0 + \Delta y + v \end{aligned} \quad (4-3)$$

公式 4-3 展示了只发生刚体位移的情况下，形变所产生的位移变换结果。但是在实际应用领域中，物体受到外部载荷时，不仅会发生刚体位移，还会存在拉伸、剪切或者扭曲形变等非线性情况，因此除了考虑待测物体某一点上坐标变换本身产生的位移之外，同时还需要引入导数项，即在公式(4-3)中，可以利用  $P$  点的坐标位移和位移的一阶导数近似地表示  $Q'$  位置，如下公式(4-4 所示：

$$\begin{aligned} x' &= x_0 + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y \\ y' &= y_0 + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \end{aligned} \quad (4-4)$$

公式 4-4 可以很好的表示平移、拉伸、扭曲和剪切等大部分的变形情况。针对一些更加复杂的形变情况，一阶导数有可能满足不了测量的模型需求，所以需要引入二阶导数，二阶导数不仅考虑了一阶形变的情况，同时也考虑了应变的梯度，其变形参数会成倍增长。但在实际使用中，一阶函数模型绝大多数情况都能处理，因此对于二阶或者更高阶的模型在此不再过多分析讨论。

#### 4.1.2 管道安装形变情况

##### (1) 管道安装航标内容

轴向偏差是指扩口管喇叭口端面与管接头锥面配合位置的相对长度，如 4-2 所示，标准 GJB3054-97 规定“导管每 100mm 长其偏差不得超过 0.3mm，对每根导管的总长偏差应控制在 0.8mm 以内”。因此，为了方便分析轴向偏差对扩口管连接件密封性能的影响，本文

绘制的扩口管有限元模型长度为 100mm。并且使用位移载荷来模拟轴向偏差，偏差范围为-0.4mm 到 1mm，其中负号表示扩口管与管接头靠近，正数表示扩口管与管接头远离。

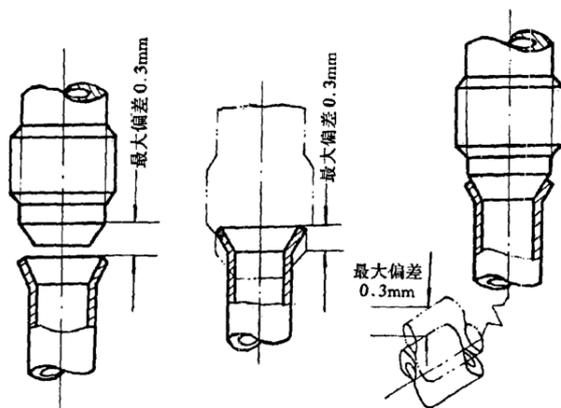


图 4-2 轴向偏差示意图

径向偏差是指扩口管轴线与管接头锥轴线的相对距离，如图所示，标准 GJB3054-97 规定“导管自由端须与接头或附件管嘴在同一直线上，其偏差按导管每 100mm 长（从最近的支承件算起）不超过 0.3mm”。因此，为了方便分析径向偏差对扩口管连接件密封性能的影响，本文设置的扩口管 CAD 模型长度为 100mm。并且在扩口管另一个端面上施加位移载荷来模拟轴向偏差，偏差范围为 0mm 到 1mm，由于偏差为相对值，正负值的实际效果是一样的，故没有计算负值。

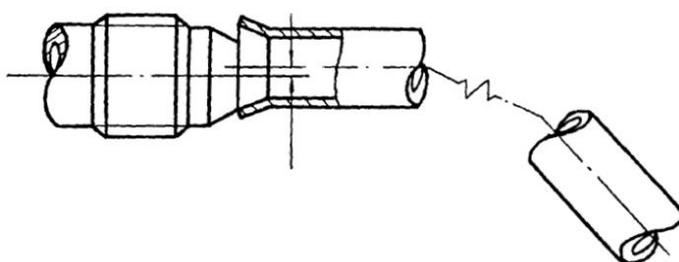


图 4-4 径向偏差示意图

角度偏差是指扩口管轴线与管接头锥轴线的相对角度，如图 4-5 所示，标准 GJB3054-97 规定“导管自由端须与接头或附件管嘴平行，允许的偏差不超过 2°”。因此，为了方便分析角度偏差对扩口管连接件密封性能的影响，本文对正常装配的管道连接件中的扩口管的端面施加一个绕扩口管扩口面的转动载荷，其转动的角度即为角度偏差的角度。并设置其范围为 0°到 8°。

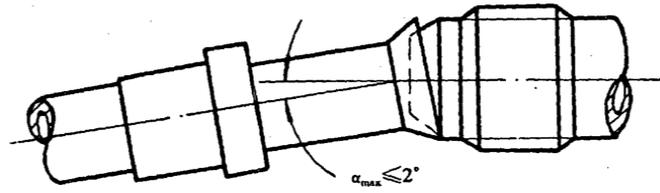


图 4-5 径向偏差示意图

## (2) 管道形变分析

受拉（拉伸）形变是指管道在轴向拉力作用下的形变。这种形变会导致管道沿其长度方向伸长

计算公式：

$$\delta = \frac{FL}{AE} \quad (4-5)$$

其中  $\delta$  为管道的伸长量， $F$  为作用在管道上的拉力， $L$  为管道的原始长度， $A$  为管道的截面积， $E$  为材料的弹性模量。

扭转形变是指管道在扭矩作用下的形变。这种形变会导致管道绕其轴线发生扭转。

计算公式：

$$\theta = \frac{TL}{GJ} \quad (4-6)$$

其中， $\theta$  为扭转角(弧度)， $T$  为扭矩， $L$  为管道长度， $G$  为材料的剪切模量， $J$  为管道截面的极惯性矩。

弯曲形变是指管道在横向力或弯矩作用下的形变。这种形变会导致管道在受力方向发生弯曲。计算公式：

$$\delta = \frac{FL^3}{3EI} \quad (4-7)$$

其中， $\delta$  为弯曲变形量， $F$  为作用在管道上的横向力， $L$  为管道的长度， $E$  为材料的弹性模量， $I$  为管道截面的惯性矩。

如图 4-6，通过了解管道安装形变情况，对接下来的长度测量做基础。



图 4-6 管道形变分析

## 4.2 长度测量程序

进行应力测量程序首先需输入由标定程序输出的内参、外参数据和需要测量的图片。由于测量图片也是由四目相机拍摄得来的，所以测量图片也需要经过切割、旋转。

图片处理完成过后需要提取鞍点位置，如图 4-7。



图 4-7 测量图片

提取到鞍点位置过后进行长度测量。提取鞍点首先定义两种不同的角点原型。一种用于和坐标轴平行的角，如图 4-8，另一种用于旋转 45°的角点，如图 4-9。根据实践经验可以发现，这两种简单的原型对于由透视变换引起的较大范围的变形的角点检测来说，已经足够。每个原型由 4 个滤波核 {A,B,C,D} 组成，用于后面和图像进行卷积操作。

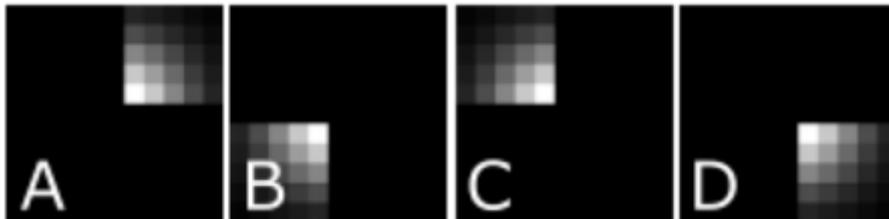


图 4-8 平行角点

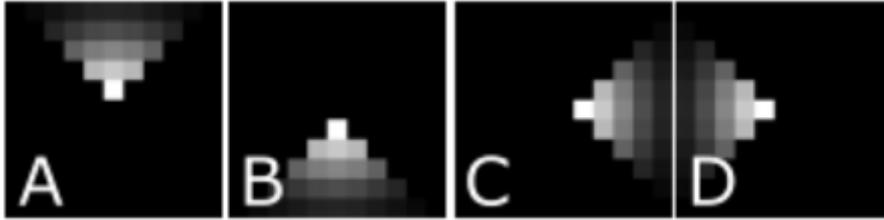


图 4-9 45°角点

下面利用这两个角点原型来计算每个像素点与角点的相似程度（Corner likelihood），下面的定义：

$$\begin{aligned}
 c &= \max(s_1^1, s_2^1, s_1^2, s_2^2) \\
 s_1^i &= \min(\min(f_A^i, f_B^i) - \mu, \mu - \min(f_C^i, f_D^i)) \\
 s_2^i &= \min(\mu - \min(f_A^i, f_B^i), \min(f_C^i, f_D^i) - \mu) \\
 \mu &= 0.25 (f_A^i + f_B^i + f_C^i + f_D^i)
 \end{aligned} \tag{4-8}$$

其中  $f_{A^i}$  表示卷积核 A 和原型  $i(i=1,2)$  在某个像素点的卷积响应。 $s_1^i, s_2^i$  表示原型的两种可能的 flippings，也就是照顾到棋盘格角点可能会出现左对角线为黑，右对角线为白；或者左对角线为白，右对角线为黑的情况，如图 4-10。

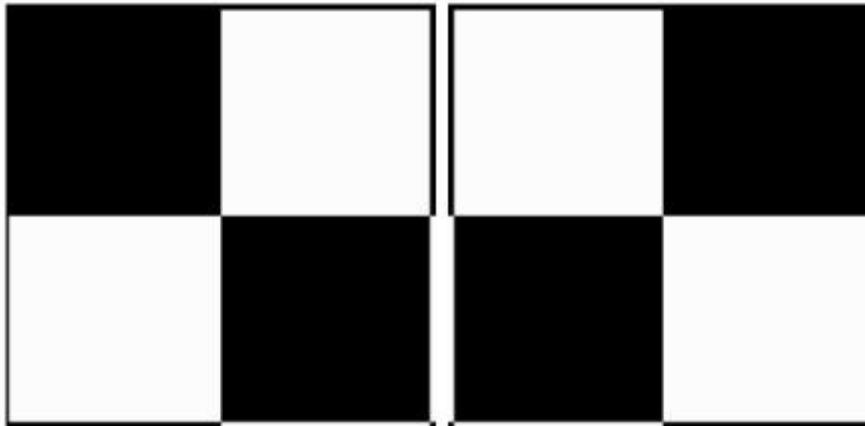


图 4-10 对角线

不难发现如果四个核中有任何一个的响应值比较小的话，Corner likelihood 的值  $c$  就会很小。这种特点对于去掉大量的非棋盘格式的角点很重要。

对每个像素点都进行上述计算后，得到了一个 Corner likelihood 图，如图 4-11。

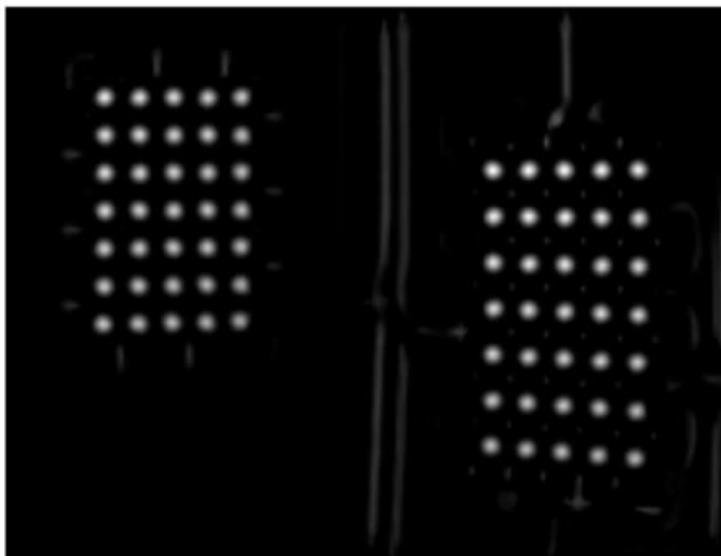


图 4-11 Corner likelihood 图

得到的 Corner likelihood 图虽然能够给出大致的角点范围，为了进一步得到角点精确的位置呢，下一步在 Corner likelihood 图上利用非极大值抑制（non-maxima-suppression, NMS）来获得候选点。

非极大值抑制顾名思义就是抑制不是极大值的元素，搜索局部的极大值。这个局部代表的是一个邻域，邻域有两个参数可变，一是邻域的维数，二是邻域的大小。这里用 NMS 来选取那些邻域里分数最高的极大值像素点，同时抑制那些分数低的像素点。

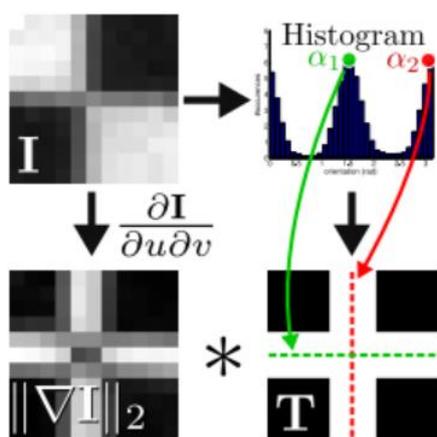


图 4-12 候选点

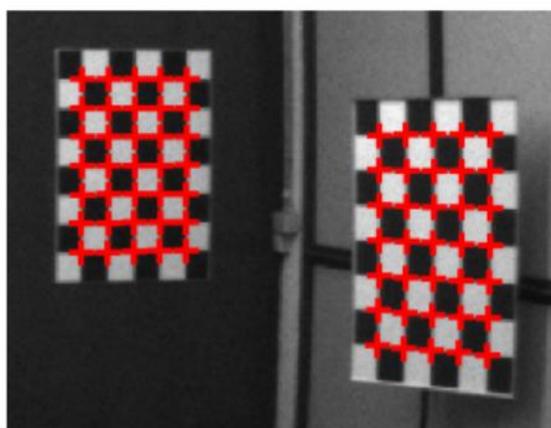


图 4-13 角点

然后用梯度统计的方法在一个局域的  $n \times n$  邻域内验证这些候选点，如图 4-12。先对局域灰度图进行 sobel 滤波，然后计算加权方向直方图(32bins),用 mean shift 算法找到其中的两个主要的模态  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ 。根据边缘的方向，对于期望的梯度强度  $\|\nabla I\|_2$  构造一个模板 T。

$T^*||\nabla I||_2$  (\*表示互相关操作符)和 Corner likelihood 的乘积作为角点得分 (Corner score),然后用阈值进行判断就得到了角点,如图 4-13。

在单目 SLAM 中,由于单张图像无法提供像素的深度信息,我们需要通过三角测量的方法估计地图点的深度,如图 4-14。三角测量是通过不同位置对同一个路标点进行观察,从观察到的位置推断路标点的距离。

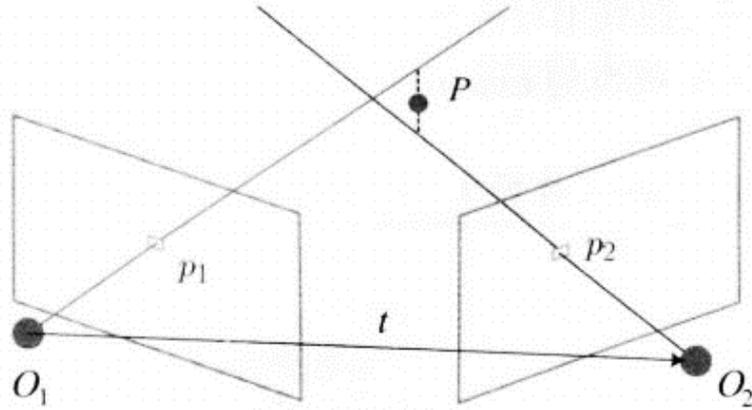


图 4-14 通过三角测量的方法获得地图点的深度

在 SLAM 中,我们主要使用三角化来估计像素点的距离。假设有图像  $I_1$  和  $I_2$ ,以  $I_1$  中的特征点  $P_1$  为参考在  $I_2$  中有对应的特征点  $p_2$ 。根据对极几何的定义,设  $x_1$  和  $x_2$  分别为两个特征点的归一化坐标,它们满足以下关系:

$$s_2 x_2 = s_1 R x_1 + t \quad (4-9)$$

其中,  $R$  和  $t$  是相机的旋转矩阵和平移向量,  $s_1$  和  $s_2$  是两个特征点的深度。为了求解  $s_1$  和  $s_2$ ,我们可以在射线  $O_1 p_1$  上寻找三维点,使其投影位置接近  $p_2$ ,然后通过最小二乘法求解。例如,我们希望计算  $s_1$ ,可以对上述方程两侧左乘一个  $x_2^{\wedge}$ ,得到:

$$s_2 x_2^{\wedge} x_2 = 0 = s_1 x_2^{\wedge} R x_1 + x_2^{\wedge} t \quad (4-10)$$

该式左侧为零,右侧可看成  $s_2$  的一个方程,可以根据它直接求得  $s_2$ ,然后进一步求解  $s_1$ 。这样就可以得到两帧下的点的深度,从而确定它们的空间坐标。

应力测量算法流程图如图 4-15 所示。

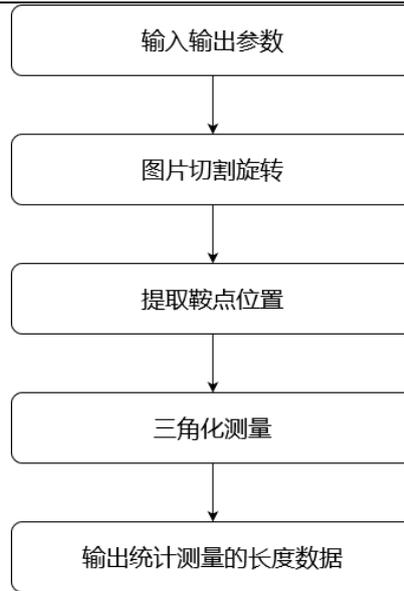


图 4-15 测量程序流程图

### 4.3 本章小结

本章介绍了数字图像相关法的基本概念和核心思想，即通过变形前后特征区域的变化来推算物体变形过程中的位移信息和应变信息。接着详细解释了形变模型及相关计算原理，包括如何找到变形前后图像中对应的点以及如何考虑不同形变情况下的位移计算。随后，结合管道安装形变情况，分析了受拉、扭转和弯曲形变，并给出了相应的计算公式。最后，介绍了应力测量程序的具体流程，包括图片处理、角点提取、长度测量和三角测量等步骤，以实现物体形变的准确测量。

## 第五章 测量相机的标定及应力测量试验

本章主要说明如何通过使用 SolidWorks 中的渲染功能得到标定以及测量需要的图片。以通过得到的图片为基础运行标定、优化和测量程序，通过对比不同情况下的试验数据得出最优结果。

### 5.1 仿真拍照

本小节使用 Solidworks 的 API(应用程序编程接口)，允许通过编程方式与 SolidWorks 进行交互。宏命令的流程图如图 5-3 所示。

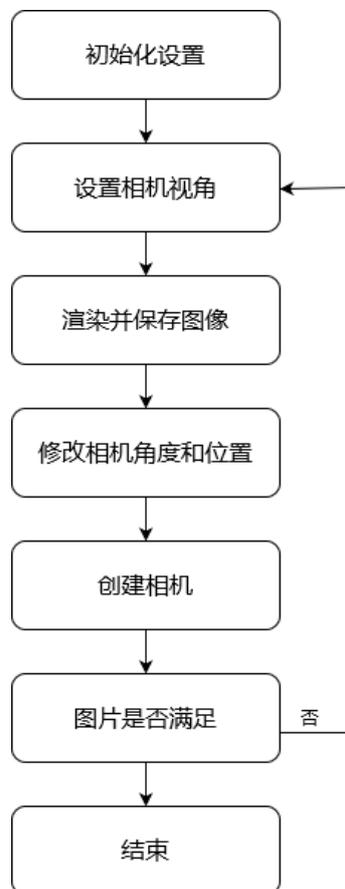


图 5-3 图片获取宏命令流程图

该部分代码实现了渲染并保存图片，通过调整标定板角度，获得多组图片进行试验。

相机仿真拍照的整体图如图 5-1 所示。使用 Solidworks 渲染的整体图如图 5-2 所示。

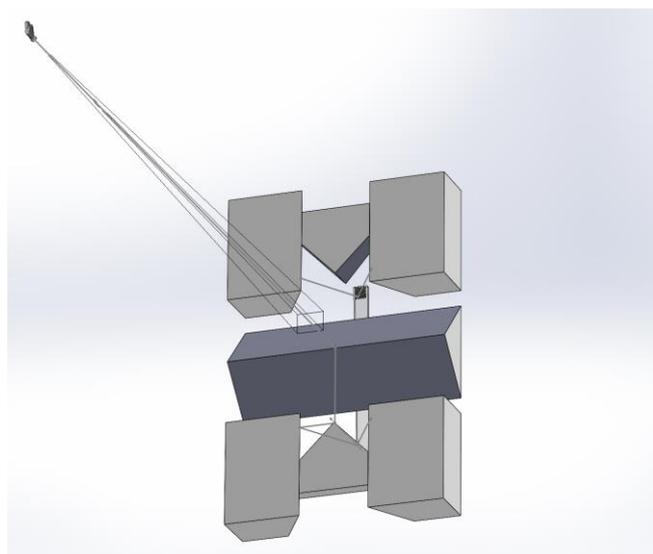


图 5-1 相机仿真拍照

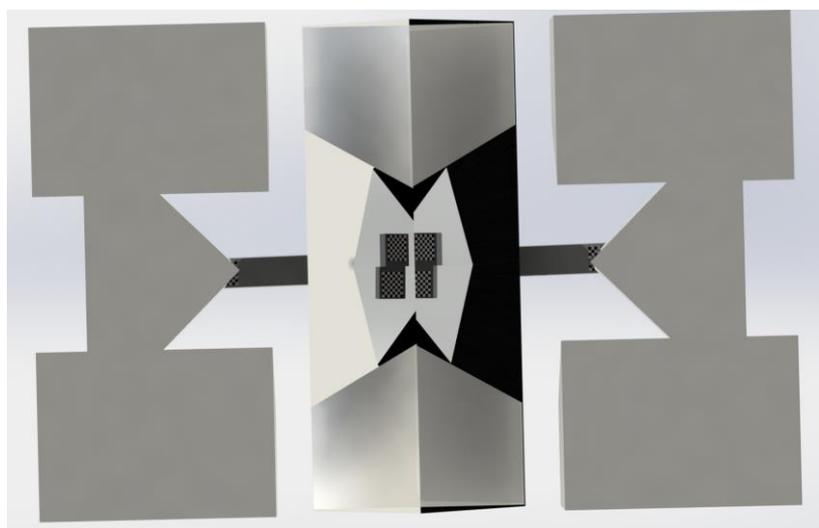
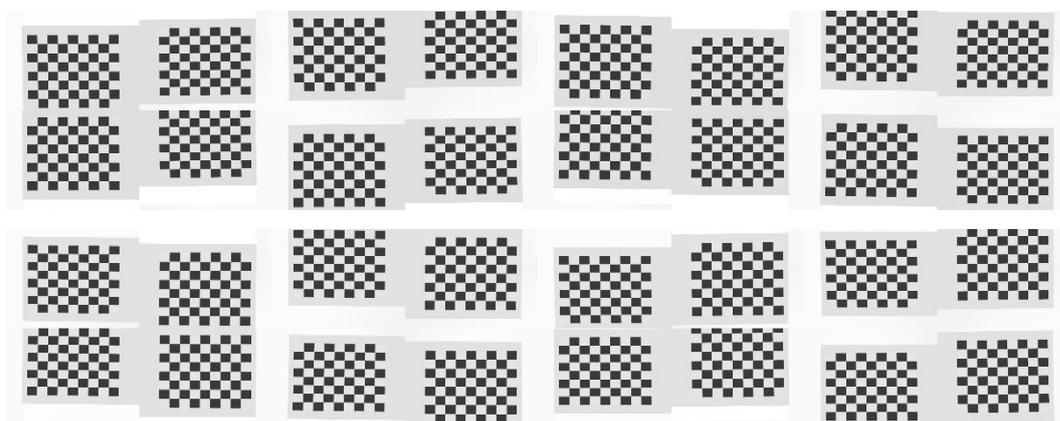


图 5-2 相机渲染

使用 Solidworks 仿真出下列 12 组图片进行标定实验。每组图片是标定板在不同角度下得到的，如图 5-4。



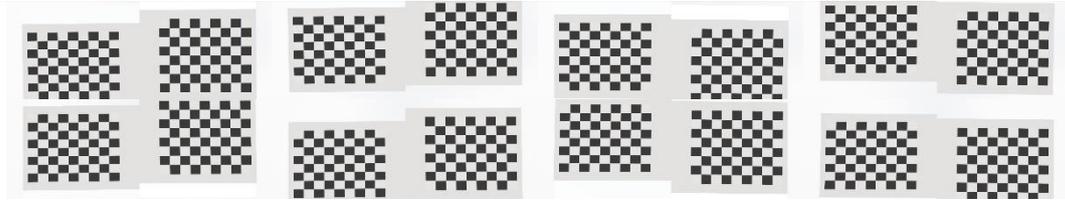


图 5-4 标定图集

使用 Solidworks 仿真出下列 8 组图片用于变形距离测量，如图 5-5。

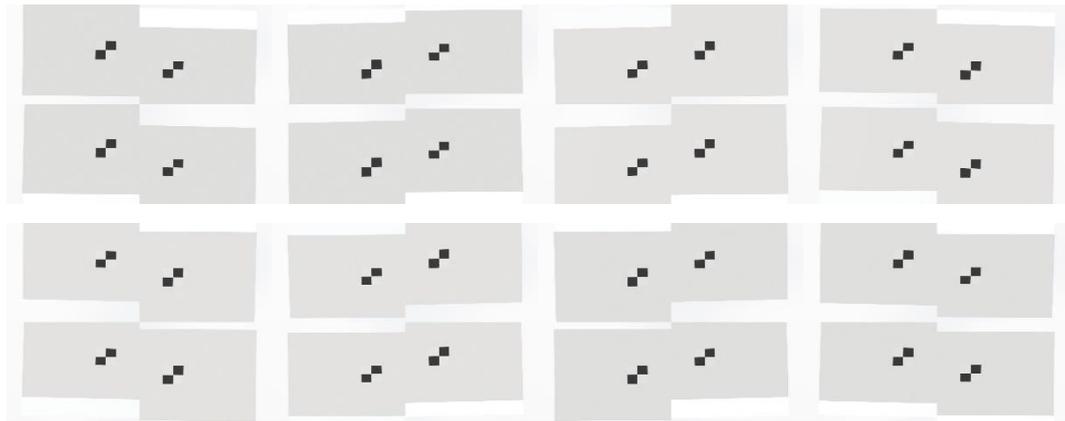


图 5-5 测量图集

## 5.2 标定结果和分析

使用标定程序和优化程序后能够得到重投影误差，程序中存在优化开关，可以选择优化相机参数和标定板参数。表 2 为初始重投影误差。表 3 为四种情况下得重投影误差。

表 2 重投影误差表

图片序号	0 号相机	1 号相机	2 号相机	3 号相机
0	2.28375	2.30236	2.26222	2.28405
1	2.18105	2.19815	2.20087	2.2202
2	1.62502	1.63908	1.60278	1.61718
3	3.85916	3.88503	3.86886	3.89152
4	3.87944	3.90064	3.86909	3.89175
5	4.36044	4.38855	4.37597	4.40141
6	2.30164	2.32135	2.27774	2.29439
7	2.20379	2.21785	2.22974	2.24905
8	1.66865	1.68906	1.63687	1.65404
9	3.87959	3.90489	3.89115	3.9148
10	3.91706	3.9401	3.90447	3.92574
11	4.39307	4.41983	4.4035	4.42979
平均误差	3.04602	3.06727	3.0436	3.06449
总误差			3.05535	

表 3 四种情况下的重投影误差

平均误差	优化相机参数 和标定板参数	优化相机参数	优化 标定板参数	不优化参数
0 号相机	0.0349748	0.0601726	0.0601726	0.0645238
1 号相机	0.0352596	0.0628842	0.0352309	0.0451907
2 号相机	0.0363922	0.0617707	0.0363835	0.0665197
4 号相机	0.0355483	0.0619776	0.035558	0.0668749
四目平均误差	0.0355437	0.0616907	0.035527	0.0661531

优化前的重投影误差点云图如图 5-6。

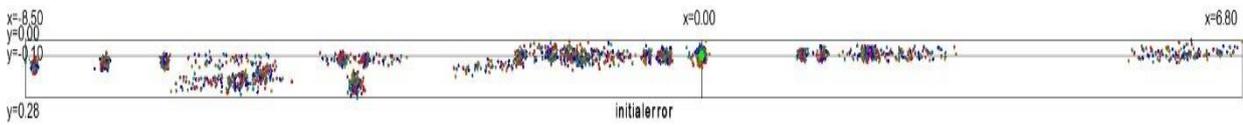
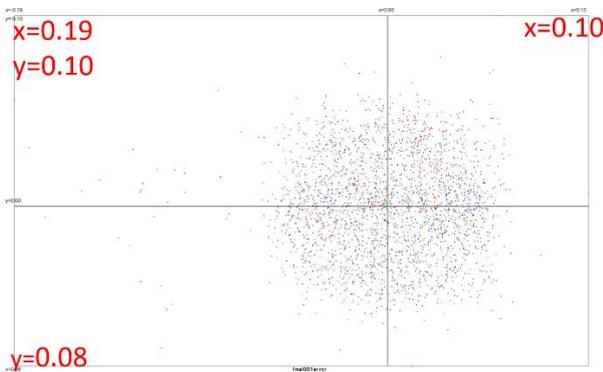
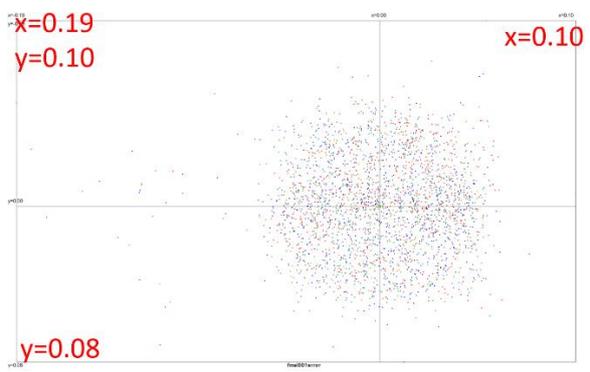


图 5-6 初始重投影误差点云图

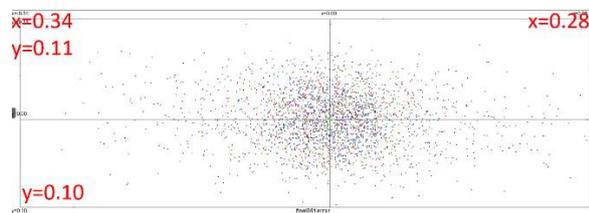
四种情况下优化后的重投影误差点云图如图 5-7。



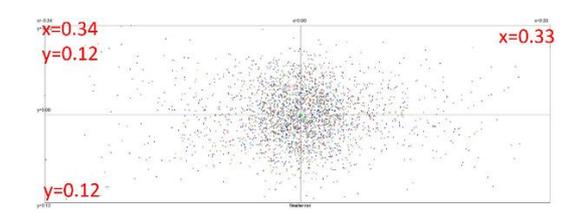
(a) 优化相机参数和标定板参数



(b) 优化相机参数



(c) 优化标定板参数



(d) 不优化参数

图 5-7 优化后的重投影误差点云图

通过比较得到的四种情况下的重投影误差总误差值，在不同情况下的重投影误差均不相同，得到的结果中优化相机参数不优化标定板参数和不优化相机参数优化标定板参数效果最好，精度均可到达 0.01 像素，满足本文需求。

### 5.3 长度测量结果

表 4 是优化相机参数和不优化标定板参数得到的长度测量结果。表 5 分别是四种情况下的长度测结果，通过对比分析，优化相机参数不优化标定板参数得到的误差最小，其测量结果也和设置的 36mm 最接近。测量程序满足本文的需求。结合不锈钢弹性模量 190GPa 和铝合金弹性模量 70GPa 计算应力。

表 4 优化相机参数和不优化标定板参数

图片序号	长度 (mm)	误差 ( $\mu m$ )
000000	36.00002397	0.023975045
000001	35.99999774	0.002258783
000002	36.00000110	0.001101449
000003	36.00005760	0.057600207
000004	35.99995582	0.044172698
000005	35.99998199	0.018001057
000006	36.00001682	0.016823030
000007	36.00002677	0.026770377
平均长度	36.00000773	0.02383783

表 5 四种情况下的长度测量结果及应变

	平均长度 (mm)	平均误差 (测量长度)	平均误差 (真实长度)	应变误差 ( $\mu\epsilon$ )	不锈钢应力 误差 (MPa)	铝合金应力 误差 (MPa)
优化相机参数和标定板参数	35.99993815	0.06184404	0.025811529	0.7169	0.136	0.050
优化相机参数	36.00007730	0.02383783	0.023562468	0.6545	0.124	0.045
优化标定板参数	35.98994751	17.70654953 6	0.051843563	1.4401	0.273	0.100
不优化参数	35.99993815	0.06184404	0.025811529	0.7169	0.136	0.050

## 5.4 本章小结

本章介绍通过对标定程序与优化程序得到的重投影误差分析，得到优化相机参数和标定板参数时得到的精度最好，优化精度达到 0.01 像素。四种情况下的长度测量程序得到的结果误差都在可接受范围内，精度达到  $0.02\mu m$ 。对不锈钢应力和铝合金计算精度能够达到 0.001MPa。

## 第六章 结论与展望

### 6.1 结论

本文对管道应力测量的方法进行研究，利用数字图像法提供了一种管道应力测量的方法。为了证明本文提出方法的有效性，对提出的方法进行了试验验证和分析。本文的主要工作内容包括以下内容：

(1) 针对本文研究的关键技术，介绍了本文研究涉及的相关技术的国内外研究现状，包括应力测量技术、相机标定技术。在第二章中介绍了相机针孔成像模型和新型应力测量相机设计。

(2) 第三章介绍了相机标定程序和标定优化程序是如何实现的，描述了关键步骤的算法原理。首先通过张氏标定法标定相机的内部参数，然后依据 PnP 原理计算得到相机的外部参数。再通过循环累加代价函数以及数值求导，实现了对相机外部参数的优化处理。得到相机具体参数后进行应力测量，测量程序运用三角化测量的方法得到的空间坐标精度高，得到的测量数据误差小。

(3) 通过试验验证和分析，结果表明本文提出方法的准确性、可行性，克服了传统管道应力测量技术的局限性。

### 6.2 展望

随着数字图像法技术的不断发展和完善，测量精度将进一步提高。未来的数字图像法可能会采用更先进的图像处理算法和更高分辨率的传感器，实现对管道表面形变和应变的更精细、更准确的测量，从而为管道安装应力的实时监测和分析提供更可靠的技术支持。

未来，数字图像法势必将与人工智能、机器学习等技术相结合，实现自动化和智能化的管道安装应力监测与分析。通过训练深度学习模型，可以实现对大量管道安装数据的自动处理和分析，识别出不同应力状态下的管道表面特征，快速准确地评估管道安装质量，并及时预警潜在的安全风险。

## 参考文献

- [1] 徐滨士. 表面残余应力检测技术[M]. 机械工业出版社, 2013.
- [2] Liu X, Wang X, Guan Z, et al. Improvement and validation of residual stress measurement in composite laminates using the incremental hole-drilling method[J]. *Mechanics of Materials*, 2021.
- [3] Jiang GUO, Haiyang FU, Bo PAN, et al. Recent progress of residual stress measurement methods: A review[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021.
- [4] Alessia G ,Emanuele S ,Franco F .A new methodology for measuring residual stress using a modified Berkovich nano-indenter[J].*International Journal of Mechanical Sciences*, 2021.
- [5] Nance J, Subhash G, Sankar B, et al. Measurement of residual stress in silicon carbide fibers of tubular composites using Raman spectroscopy[J]. *Acta Materialia*, 2021.
- [6] Zhang H, Xu M, Liu Z, et al. Microstructure, surface quality, residual stress, fatigue behavior and damage mechanisms of selective laser melted 304L stainless steel considering building direction [J]. *Additive Manufacturing*, 2021.
- [7] 杨福俊, 何小元, 陈陆捷. 现代光测力学与图像处理[M]. 东南大学出版社, 2015.
- [8] Chen Y, Sun H, Li Z, et al. Strategy of residual stress determination on selective laser melted Al alloy using XRD[J]. *Materials*, 2020.
- [9] Akbarova N, Azamatov Z. Deformation measurement by digital holographic interferometry[C]//E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2023.
- [10] Tiwari R, Misra J C, Prasad R. Magneto-thermoelastic wave propagation in a finitely conducting medium: A comparative study for three types of thermoelasticity I, II, and III[J]. *Journal of Thermal Stresses*, 2021.
- [11] 冀勋. 基于巴克豪森效应的应力检测系统的研究[D]. 中北大学, 2020.
- [12] Hajnys J, Pagáč M, Měsíček J, et al. Influence of scanning strategy parameters on residual stress in the SLM process according to the bridge curvature method for AISI 316L stainless steel[J]. *Materials*, 2020.
- [13] Pofelski A, Woo S Y, Le B H, et al. 2D strain mapping using scanning transmission electron microscopy Moiré interferometry and geometrical phase analysis[J]. *Ultramicroscopy*, 2018.
- [14] Schreier H ,Orteu, Jean-José, Sutton M A .Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. Basic Concepts, Theory and Applications[J]. 2009.
- [15] Pan B , Qian K , Xie H , et al.Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review[J]. IOP Publishing, 2009.
- [16] 黄才政.基于数字图像相关方法的混凝土断裂过程区力学特性研究[D].重庆交通大学,2016.
- [17] 郑宇轩.地铁隧道形变检测的数字图像处理技术应用[D].同济大学机械工程学院,2024.
- [18] Avril S , Pierron F , Sutton M A ,et al.Identification of elasto-visco-plastic parameters and characterization of Liiders behavior using digital image correlation and the virtual fields method[J].*Mechanics of materials*, 2008.
- [19] Peng W ,Jianmei W ,Jing X , et al.Calibration method for a large-scale structured light measurement system.[J].*Applied optics*, 2017.
- [20] Sturm P , Bonfort T .How to compute the pose of an object without a direct view[C]//Asian Conference on Computer Vision.Springer,Berlin,Heidelberg, 2006.
- [21] Hesch J A , Mourikis A I , Roumeliotis S I .Determining the camera to robot-body transformation from planar mirror reflections[C]//*Intelligent Robots and Systems.IEEE*, 2008.
- [22] Pierre Lébraly, Deymier C, Ait-Aider O,et al.Flexible extrinsic calibration of non-overlapping ca

- meras using a planar mirror: Application to vision-based robotics[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems.IEEE, 2010.
- [23] Xu Z , Wang Y , Yang C .Multi-camera global calibration for large-scale measurement based on plane mirror[J].Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2015.
- [24] Agrawal A K .Extrinsic Camera Calibration without a Direct View Using Spherical Mirror[C]//Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Computer Vision.IEEE, 2013.

## 致 谢

转眼五年时间就过去了，大学生活有快乐也有遗憾，但它的主旋律是改变和成长。

首先要感谢我的导师陈果教授，感谢您在我学业道路上的悉心指导和无私支持，您的专业知识和耐心指导让我受益匪浅，我将铭记于心。

同时，我还要感谢张旭学长对我的指导和帮助，在他的帮助下我才能快速掌握仿真软件的使用和试验仪器的操作，为毕设打下基础。

我还要感谢我的家人，特别是我的父母，感谢你们一直以来的支持和鼓励，是你们的爱和信任让我有了坚定的前行动力，我永远感激你们无私的奉献和无条件的爱。

此外，我要感谢我的同学和朋友，在这段学习生涯中，你们给予了我无尽的鼓励、理解和帮助。我们共同度过的时光将是我人生中最美好的回忆之一。