



南京航空航天大学

本科毕业设计（论文）

题 目

基于图像法的管道安装应力检测方法
及试验验证

学生姓名	况伟
学 号	071950722
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	2021202
指导教师	陈果 教授

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）所涉及的研究工作做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：

况伟

日期： 2025 年 5 月 18 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：

况伟

导师签名：

况伟

日期： 2025 年 5 月 18 日

日期： 2025 年 5 月 18 日

摘 要

随着航空技术的高速发展,飞机管道系统面临的复杂应力环境对安装精度提出了更高要求。传统应力测量方法(如超声波法、应变片法)受限于空间狭小、操作复杂等问题,难以满足航空管道的精密测量需求。本文提出一种基于数字图像相关法(DIC)的管道安装应力检测方法,设计紧凑型四目相机系统,实现高精度非接触式应力测量。本文主要工作包括:

(1) 系统分析国内外应力测量技术,提出基于多相机阵列的图像法改进方案,采用棱镜组反射光路实现单目相机模拟四目视场,显著提升测量精度(理论应变分辨率达 $8.8\mu\epsilon$); (2) 设计 3D 打印外壳集成棱镜、补光及调节模块,构建便携式测量装置; (3) 通过 SolidWorks 仿真验证标定算法,优化计算后重投影误差降至 0.455 像素,标尺长度测量误差仅 $0.097\mu\text{m}$; (4) 搭建试验平台对比应变片与图像法测量结果,实测 5025 铝合金板平均误差 $33\mu\epsilon$ (相对误差 2.09%), 1Cr18Ni9Ti 不锈钢管平均误差 $9.91\mu\epsilon$ (相对误差 0.59%), 验证了该方法的可行性与工程适用性。

研究表明,本文设计的图像法测量系统在保证与传统方法同等精度的前提下,兼具便携性和环境适应性,为航空管道安装应力检测提供了新的技术思路。

关键词: 数字图像相关法(DIC); 管道应力测量; 多相机标定; 光路设计; 航空安全。

ABSTRACT

With the rapid advancement of aviation technology, aircraft pipeline systems face increasingly complex stress environments that demand higher installation precision. Conventional stress measurement methods (e.g., ultrasonic testing, strain gauge techniques) are often inadequate for aviation pipeline applications due to spatial constraints and operational complexity. This study proposes a digital image correlation (DIC)-based pipeline installation stress detection method, featuring a compact quad-camera optical system for high-precision non-contact measurement. The main contributions include:

(1) A comprehensive review of stress measurement techniques leading to an innovative multi-camera array solution, utilizing prism assemblies to simulate quad-view fields from a single camera, achieving superior measurement accuracy (theoretical strain resolution: $8.8 \mu\epsilon$);(2) Development of an integrated portable device with 3D-printed housing incorporating prism modules, auxiliary lighting, and adjustment mechanisms;(3) SolidWorks-validated calibration algorithms demonstrating 0.455-pixel reprojection error and $0.097 \mu\text{m}$ scale measurement error after optimization;(4) Experimental verification showing $33 \mu\epsilon$ mean error (2.09% relative) for 5025 aluminum alloy plates and $9.91 \mu\epsilon$ (0.59% relative) for 1Cr18Ni9Ti stainless steel pipes when compared with strain gauge references.

The results confirm that this imaging system maintains comparable accuracy to conventional methods while offering superior portability and environmental adaptability, establishing a novel technical approach for aviation pipeline stress monitoring.

KEY WORDS:Digital Image Correlation (DIC); Pipeline Stress Measurement; Multi-Camera Calibration; Optical Path Design; Aviation Safety.

目录

第一章 绪论	- 4 -
1.1 背景和意义	- 4 -
1.2 国内外研究现状	- 6 -
1.2.1 应力测量现状	- 6 -
1.2.2 图像应力测量现状	- 8 -
1.2.3 相机标定现状	- 9 -
1.2.4 小结	- 10 -
1.3 本文主要工作	- 11 -
第二章 应力测量相机设计与标定原理	- 12 -
2.1 相机光路设计	- 12 -
2.2 相机棱镜设计	- 15 -
2.3 相机外壳设计	- 16 -
2.4 标定板设计	- 18 -
2.5 单目相机标定原理	- 18 -
2.6 相机位置计算原理	- 23 -
2.7 参数优化	- 24 -
2.8 标定流程及软件使用	- 26 -
第三章 应力测量相机的标定仿真试验	- 28 -
3.1 仿真拍照原理	- 28 -
3.2 自动化仿真程序	- 30 -
3.2.1 位置参数化	- 30 -
3.2.2 程序完整流程	- 31 -
3.3 仿真拍照数据范围	- 32 -
3.4 仿真试验计算及验证	- 33 -
第四章 应力测量相机的试验验证	- 36 -
4.1 试验设计	- 36 -
4.2 试验结果	- 40 -
4.3 试验分析	- 44 -
4.4 小结	- 46 -
第五章 结论与展望	- 47 -
5.1 结论	- 47 -
5.2 展望	- 47 -
参考文献	- 49 -
附录 A	- 52 -
附录 B	- 54 -
致谢	- 55 -

第一章 绪论

1.1 背景和意义

在飞机制造与维护领域，应力问题一直是影响飞机管道系统性能与安全的核心因素，而其中，安装过程中的不合理装配，更是应力产生的关键源头。早期飞机的设计制造，所需的性能要求不高。因为当时飞机飞行速度、高度及机动性能有限，管道工况简单，同时，装配工艺不需要特别精密，单凭基础技术经验能满足飞机运行需求。然而，现代航空技术飞速发展，飞机性能指标大幅提升，为实现更好操纵性与减重，飞机设计与材料选用发生巨大变革。一方面，大量新型轻质高强度材料用于飞机管道系统，虽减轻重量，但对装配精度要求极高。另一方面，飞机飞行速度、高度和机动性能提升，使管道运行时应力环境复杂。如先进战斗机高速飞行与高机动时，管道承受高瞬间应力可能导致管道损伤。同时飞机结构也在复杂化，管道尺寸向小型化发展，管道结构向复杂化发展。不合理装配产生的应力，是飞机管道故障主因，它会导致管道裂纹、过度应力致管道变形、密封处应力异常致泄漏等问题。例如图 1.1 (a) 中管道由于疲劳导致破损并直接断裂、图 1.1 (b) 中的管道由于疲劳使得接口损坏、图 1.1 (c) 中的管道因为疲劳和恶劣环境出现损坏，同时体现了机管道的复杂性、图 1.1 (d) 中的管道因为受压而导致出现裂缝。以上管道破损都可能导致其有关功能出现故障，我们绝对有必要杜绝这类可解决的安全隐患。



(a) 因为疲劳而损坏的管道



(b) 因为疲劳而损坏的管道



(c) 飞机的复杂管道



(d) 因为压力而损坏的管道

图 1.1 受损管道

现今广泛用于管道应力测量的方法例如超声波与、应变片法，它们各自的局限性，由于飞机管道所处环境较为复杂，可使用的测量空间狭小，同时管道的重要性以及飞机对管道精密性的要求，使得上述测量方法均难以应用到实际的飞机管道安装应力检测中。研索仪器科技（上海）有限公司生产的 VIC-3D 非接触全场应变测量系统如图 1.2 所示，该设备具有高精度、高稳健性、环境适用性、功能扩展性和极高的计算效率，广泛应用于各行业的研究领域，在管材等材料的全场应变和变形测量中也具有突出优势。但是商用的数字图像测量设备体积较大，难以便携使用，以研索仪器科技（上海）有限公司生产的 VIC - 3D 非接触全场应变测量系统为例，其相机难以直接用于飞机管道安装应力检测。



图 1.2 VIC-3D

目前经过综合研究调研，本文计划使用多相机模组扩展测量范围，棱镜组紧凑测量设备反射光线以单目相机达到四目相机效果，定制标定板进行高精度相机组标定，以实现飞机管道安装应力的精确测量。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 应力测量现状

常见的应力测量方式有：钻孔切削法^[1]、压痕法^[2]、拉曼光谱分析^[3]、扫描电子声显微镜^[4]、衍射法^[5]、全息干涉^[6]、基于铁磁性的方法^[7-8]、几何云纹法^[9]、应变片法、导电涂层法、曲率法^[10]、云纹干涉^[11]、超声法、涡流法。以上方法因存在对被测部件有损伤、环境适应性差、精度不足、效率低、成本高等问题，使得它们在航空飞机上应力的测量上不适用。以上应力测量方法大致可分为五类即：机械法、光学测量法、电磁测量法、声波测量法、图像测量法。

机械测量法中，钻孔切削法以微小的部件损伤盲孔法因其作简单且结构损伤最小而被广泛用于测量焊接残余应力。李传熙等人^[12]基于钻孔切削法（盲孔法），提出了一种能高效测量 T 形接头残余应力的方法，该方法可以通过实测应变直接预测焊接残余应力，有效提高盲孔法测试的准确性。压痕法是近几十年来发展起来的一种相对较新的技术，因为它使用简单但直接测量每种应力状态的真实接触面积很麻烦，并且仅限于原位使用。彭伟等人^[13]开发了一种便携式压痕仪器来实现基于压痕法的应力测量，适用于现场测量。曲率测量方法是一种用于预测残余应力的非破坏性策略，它是由线性和非线性方程开发的，通过测量反射光线的角度得到曲率，再通过曲率变化计算应力应变。在 Ahmad Reza Ghasemi 等人^[14]的论文中曾详细比较过以上三种方法的优劣。

20 世纪初，光学方法开始应用于应力测量。例如，偏振光法通过观察材料在偏振光下的光程差变化来测量应力。前苏联学者 Akcehob 首次提出 X 射线衍射法用于应力测量，该方法通过测量材料的晶格间距变化来计算应力，具有高精度和无损检测的特点。戴福隆等人^[15]使用高温云纹干涉仪测量了定向结晶材料在 1000℃ 环境下的全场位移，使用云纹干涉方测了材料在高温环境下的弹性模量和泊松比。2001 年，Y. T. Im 等人^[16]基于激光束在曲面上反射的原理，通过测量曲率半径并随后进行粘弹性分析来估计聚酰亚胺薄膜的松弛模量和残余应力。光学测量法因为其不会损害部件的特性而广泛应用于应力测量领域。

超声波法通过测量声波在材料中的传播速度和衰减变化来评估应力。20 世纪 40 年代末至 50 年代初，Hughes 利用超声波测量晶体的三阶弹性常数，奠定了超声波应力测量技术的基础。此后基于声波法的应力测量的相关技术不断涌现。李作华等人^[17]提出了一种改进的超

声阵列传感器测量钢构件非均匀绝对应力场的方法，设计了超声阵列传感器的结构和布局，提高空间分辨率，相比于现有 sup 测量方法，大大提高了效率。2025 年李小婧等人^[18]提出了基于超声法的盆式绝缘子表面应力检测方法，并设计仿真试验完成了应力测试试验，建立了盆式绝缘子表面应力计算模型。

2017 年，Zili Yu 等人^[19]基于 MOSFET 压阻效应的应力传感技术测得的应力随施加的位移线性变化，显示出正确的趋势，其拉伸应力和压缩应力测量均能得到一致的结果。2024 年，2023 年，Gang Huang 等人^[20]采用基于磁振应力消除处理的新方法进行一系列实验研究，并对其减少机制进行深入研究，揭示了磁振应力消除处理增强效果的机制。

20 世纪 80 年代末，数字图像相关法被提出用于测量物体的位移和应变。该方法通过比较变形前后的图像，计算出物体表面的位移场和应变场。2021 年杨栋^[21]等人并提出了一种简单实用的高温散斑制作方法，基于数字图像相关方法搭建了一套可以测量 700℃ 以内高温全场热变形的测试系统。

应力测量技术从早期的机械法和光学法，发展到现代的无损检测技术乃至基于图像的测量方法，随着技术的不断进步，应力测量方法将更加精确、高效，并在更多领域得到应用。

表 1.1 为传统有损式应力测量方法，表内方法在测量过程中会不可避免的对管道原本的结构造成损伤或者改变其原本结构，可适用于某些对于要求不高的一般管道，但对于飞机上特殊的细小，精细管道，这些测量法本身就会带来对管道的破坏。

表 1.1 有损式测量

局限性	方法	原理	弊端
有损伤	压痕法	根据赫兹接触理论，分析加载卸载曲线，计算残余应力。	对部件明显损伤。
有损伤	钻孔切削法	通过钻孔释放被测试件的内应力，小孔周围的应变片测量应变变化，反推被测点应力。	对部件明显损伤。
有附加物	应变片法	基于金属或半导体材料的电阻应变效应。	单点单向测量、有附加物。
有附加物	导电涂层法	利用导电涂层的电阻随涂层变形而改变的特性测量应力。	易受环境影响，有附加物。
有附加物	几何云纹法	依据光栅几何干涉原理，分析被测物体表面较大变形量，计算出应变。	条形光栅干涉图样形成附加物、精度低。

伴随各领域对应力测量要求的提高，依据光线、声波、电磁特性的无损测量法应运而生，其更加精确、高效，并已经在工业生产、航空航天与医学等领域得到应用，无损测量法势必成为未来主流应力测量方式。上述的无损测量法，不会对管道本身结构造成损伤，但其在平常测量过程中会有诸多限制。

表 1.2 无损测量法

方法	原理	弊端
拉曼光谱分析	检测被测物受激发后发出的拉曼光谱，依据分子结构振动频率与所受应力有关，分析内应力。	精度不达标。
扫描电子声显微镜	分析应力波特性及相关参数反演应力。	对样品要求高，测量环境要求苛刻，设备及操作复杂。
涡流法	依据压阻效应，用电涡流测量被测物的电导率，反演应力应变。	仅适用于导电材料，对航空领域常用的部分绝缘材料无法检测、空间分辨率度低。
曲率法	通过测量反射光线的角度得到曲率，再通过曲率变化计算应力应变。	过程易受环境因素干扰，被测物表面要求较高
超声波	表面波速度受传播方向应力影响，计算两个探头间表面波的波速即可得到应力大小。	对复杂形状及结构的航空部件难以测量，空间分辨率底。

超声波法、涡流法和图像法是现今针对飞机管道应力测量的适用方法，可实现高精度、非接触式的无损测量。但是，超声波法受限于飞机管道的复杂结构，导致测量难度增加；而涡流法对于飞机上一些常用的绝缘材料无法有效测量。因此，图像法将成为飞机管道应力测量中的主流方法。

1.2.2 图像应力测量现状

数字图像法（DIC）是通过对参考图像和变形图像的变形信息进行一一匹配，从而得到其中的位移场，然后利用位移和应变的关系来求出应变场。1980 年代由美国南卡罗来纳州立大学的 Peters 和日本的 Yamaguchi^[22]同时独立提出图像测量法，此后，该方法经过一系列的研究和改进，逐渐应用于多种材料的力学性质测试，包括岩石、金属、航空材料和复合材料等。1983 年，W.H.Peter 等人首次通过数字图像相关方法测试到了物体的刚体变形，这标志着该原理的第一次正式实践测试。1990 年，Kahn Jetter 和 Chu^[23]将数字图像相关方法从二维平面发展到了三维立体。他们利用两个固定在特定位置的相机同时采集试件变形前后的散斑图，通过对两组数字图像进行对比分析，根据双目视觉的原理求解出了离面位移。1995 年，Zink^[24]等人将数字图像相关方法应用于测量木材和木基复合材料的应变分布，并揭示了试件逐渐被

破坏的过程，最终得到了材料的泊松比。1998年，Y. J. Chaop 等人^[25]将数字图像相关方法与高速相机相结合，对冲击载荷作用下裂纹的扩展过程中裂纹尖端周围的变形场进行了分析研究。2003年，天津大学的王静^[26]等人应用数字图像相关方法测试了桥梁裂缝在各种载荷作用下的变形量，为桥梁裂缝变形监测提供了新的技术手段。2006年，清华大学的金观昌^[27]使用 DIC 技术测量了碳纤维复合材料压力容器的应变场，得到了试样表面的应变云图。2007年，陆鹏等人^[28]将数字图像相关系统与长距离工作的显微观测结合起来，分析得到了焊点在热载荷下的准确和稳定的微应变信息。2014年，Passieux 等人^[29]提出基于自定义插值函数的二维数字图像相关技术，并用于气枪装置中速冲击实验，在二维图像技术方面取得进步。2017年，Mamand 等人^[30]将距离变换算法与数字图像相关法结合，研究混凝土多尺度损伤映射。2020年，北京航空航天大学潘兵^[31]搭建单相机立体偏振 DIC 系统，经高温测试验证其有效性与准确性，他利用镜面反射光线使得单相机同时取得两区域图像实现单相机取得多目相机的拍摄效果。2020年，顾筠等人^[32]提出三维 DIC 应变场计算方法，可测任意自由曲面试件应变场，将二维图像应力测量扩展到三维实体工件的测量上。2021年，孟蒙等人^[33]用 MATLAB 程序，得出提高 DIC 精度需子区尺寸大于 50 像素的结论。2022年，程杰等人^[34]依 DIC 原理搭建高温应变测量实验平台，优化光学系统实现高分辨率成像，提升高温环境测量精度。

经过多年的技术沉淀该方法已经在材料力学与行为分析，土木工程，航空航天，生命科学等多个领域有应用。

在图像测量领域，相机标定是实现高精度测量的基础，同时也是决定测量结果准确性的关键因素。以上研究中，为建立图像坐标与现实世界坐标之间的精确关系，运用了多种不同的相机标定方式，从而实现二维图像测量和三维场景的重建。其中有运用多相机扩展视场法通过多个相机协同工作取得更广阔视场并获得了更高分辨率图像。而如何做到更加精准，便捷的标定方式是现今图像测量法不可忽视的一大难点，同时也诸多学者共同研究的重点。下面整理汇总相关研究现状。

1.2.3 相机标定现状

单目相机标定其目的是通过一系列的图像处理和计算步骤，确定相机的内部参数（如焦距、主点位置、畸变系数等）和外部参数（如相机的位置和方向），从而建立图像坐标与现实世界坐标之间的精确关系。经典的张正友标定法，利用相机多角度拍摄棋盘格图像，借助 OpenCV 函数检测并优化角点位置，通过最小二乘法计算相机内参、外参及畸变系数，再用 undistort 函数校正图像，其核心优势在于其简单易用，仅需使用一张打印的棋盘格标定板即

可完成标定。现今随着时代发展，双目视觉与多视觉传感器等技术的应用使得单目相机标定逐渐走向历史。

在此基础上，多视觉传感器（MVS）全局标定成主流。其先标定单视觉传感器，再求解局部与全局坐标系外部参数，可整合多传感器数据测量大型或复杂物体^[35]。如今已应用于电机、钢轨、无缝钢管检测及场景监控等领域。2014年，Ramanpreet Singh Pahwa 等人^[36]利用PMD器件的噪声特性来对深度测量进行去噪，并使用去噪深度作为额外的测量集来执行相机校准，验证了深度去噪和基于深度的校准方案比传统校准方法更好。2018年，夏仁波^[37]等人提出基于摄影测量技术和可重构目标的无重叠视场多相机全局标定法，先固定两个平面目标制成适应相机距离的长目标，用摄影测量获其相对位置作不变约束，同时计算目标特征点在两相机坐标系重投影误差，用Levenberg - Marquardt算法优化找到变换矩阵最优解，最后转换到参考坐标系实现全局校准。该方法精度高（RMS误差0.04mm）、成本低，适用于现场标定，可重构目标尺寸可调整，每台相机只需一张图像，减少图片与计算量。2019年，“未加权双侧约束法（Liu）、加权双侧约束法（Wgt - Liu）、未加权单侧约束法（Unwgt - 1）、加权单侧约束法（Wgt - 1）”^[38]被提出，通过给图片加权优化处理方法，提升标定抗噪声能力，适用于复杂环境。2019年，潘晓等人^[39]提出了一种高精度、灵活的铁路多视觉传感器标定方法，有效降低室外环境的影响，提高标定和测量精度。2020年，冯明迟等人^[40]基于SLAM的多相机标定方法，使用多相机系统采集的图像与3D模型之间的2D-3D对应关系对每个相机进行校准，最后，对多相机系统的外部参数进行校准，提高了标定精度。2024年高剑丁等人^[41]提出一种基于全相机模型的高精度相机标定方法，该方法严格区分了主点坐标和畸变中心，使相机模型更加准确，从而使相机标定更加精确。

鉴于该项技术的优越性本文将使用全局标定法进行标定计算，同时为适用于飞机上细小的管道，本文将使用0.5倍的镜头，拍摄管道表面的自然纹理，使用镜面反射实现两个区域的立体测量实现单相机的多视觉化。本文希望能够广采众学者所长，验证将数字图像法（DIC）对于管道的应力测量的可行性。

1.2.4 小结

无损测量法在管道应力测量中具有显著优势，其具有高精度与高效率、非接触性与低人工干预、适应复杂几何形状、降低成本等特点，特别是图像测量法，不仅具备上述优势，还兼具低成本、抗干扰能力强以及能够在复杂环境下作业的特点，使其在实际应用中更具竞争力，非常适合飞机上复杂，精密，环境多变的管道系统。扩展视场法通过整合多传感器数据，能够有效测量大型或复杂物体。它不仅提升了图像测量的精度和范围，还显著扩大了其适用

面。综上所述，基于图像的管道应力测量方法其诸多优势，说明该方法是一个切实可行且极具应用价值的方案。

1.3 本文主要工作

设计试验方案进行验证，确定该方法精度以及可行性，旨在研究出一套适用于航空环境即抗干扰能力强，结构简单，精度高，便携，成本低廉的方法用于给应力测量提供新的方案或者思路。

本论文的组织结构如下：

第一章 介绍了基于图像相关技术测量管道应力的研究背景和意义包括其中各内方法及其弊端，国内外的应力测量研究现状及本文主要目的；

第二章 介绍了图像相关技术原理。测量相机的设计初衷，相机设计的各项优化。简述相机三点定位，以及如何对相机重投影误差的优化处理方案及软件相关的使用；

第三章 介绍如何通过图像处理测量应力，分析管道不同类型形变的测量区别，以及对其中一种形变类型的应力测量方案；

第四章 介绍了如何设计试验，以及在特定形变的测量结果分析；

第五章 总结全文，做出总结和对未来的展望。

第二章 应力测量相机设计与标定原理

2.1 相机光路设计

相机的光路设计以光的成像原理为基础，需要满足精度与小型便携等要求。而且由于单目相机的精度问题，且为满足便携要求，本文选择使用光线反射原理，将一束光线变为四束，设计成四目相机。如图 2.1 为示意图：

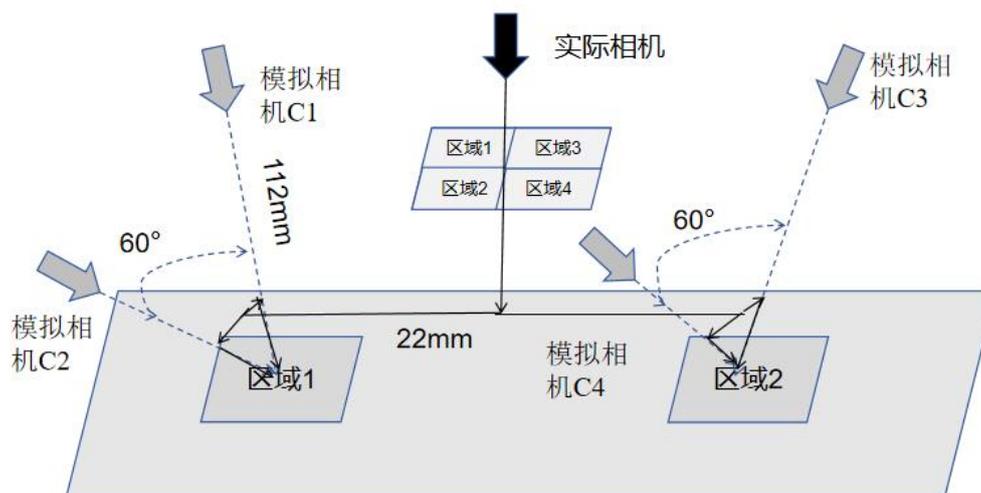
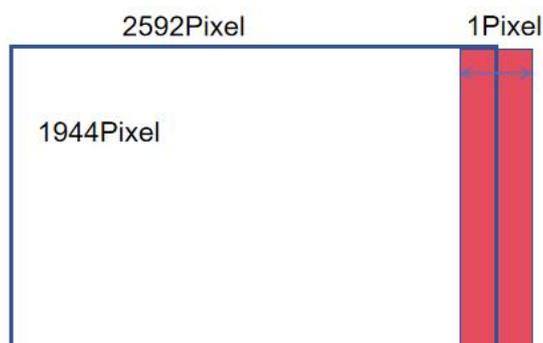
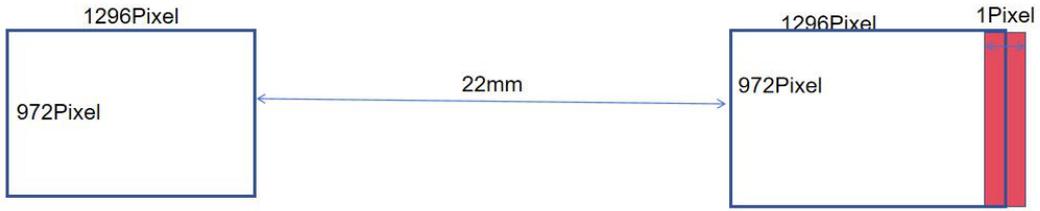


图 2.1 四目相机光路图

该相机通过反射三次光线让单目相机达到四目相机的效果。在最后拍摄结果图中出现四个区域，分别由模拟相机 C1-C4 拍摄得到。在区域 1 中，C1-C2 组成区域 1 的双目系统，两相机夹角为 60° ，在 60° 夹角下的双目相机能获得相机在 x-y 轴上的平均误差最小，且便于研究和后续试验道具加工。本文采用的相机焦距为 112mm，因此四个相机各种的光路长度均为 112mm。



(a) 未扩大视场精度示意



(b) 已扩大视场精度示意

图 2.2 精度分析

如图 2.2(a)所示在没有扩大视场时,单个区域图片能测量的应变最小单位为 $\varepsilon = 1/2592$,而试验使用的铝合金弹性模量为 205GPa, 及最小测量精度为 $\sigma = 205GPa * \frac{1}{2592} = 79.1MPa$,而铝合金材料屈服强度约为 204MPa-500MPa 很明显精度完全不够。而在扩大视场后的两区域测量下如图 2.2 (b), (该相机每个像素尺寸为 2.2 μm , 放大倍数为 0.5 倍) 应变和应力为

$$\varepsilon = \frac{1 * 4.4um}{22mm + 2 * 2592 * 4.4um} = 9.82 * 10^{-5}$$

$$\sigma = 205GPa * 9.82 * 10^{-5} = 20.131MPa$$

同时, 每组双目相机成 60° 夹角如图 2.3:

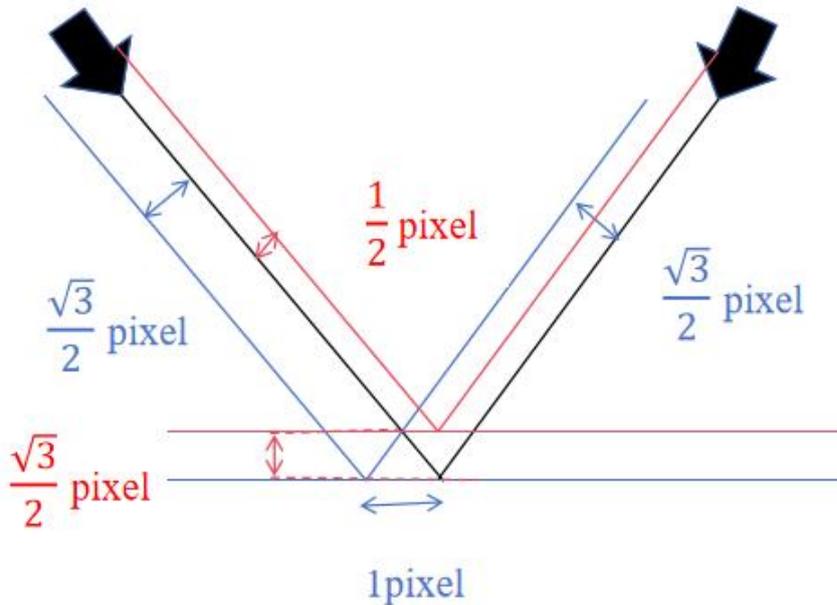


图 2.3 双目夹角分析

如图所示，当手持该相机进行测量时，考虑可能会出现相机位置浮动，将相机每组双目设计为 60° 夹角可使得当相机视场变化水平变化 1pixel 时，在左右视场变化 $\frac{\sqrt{3}}{2}$ pixel，当在 Z 轴变化 $\frac{\sqrt{3}}{2}$ pixel 时，左右视场变化 $\frac{1}{2}$ pixel。该设计能达到在手持使用时，相机位置水平变化和纵深变化时达到拍摄到照片的误差均衡。

由于飞机上狭窄复杂空间限制使得装置应该尽可能的小型，便携。所以在已知相机焦距为 112mm，两组双目相机间隔 22mm 条件下，需要设计光路使得相机结构尽可能紧凑。如图 2.4 所示：

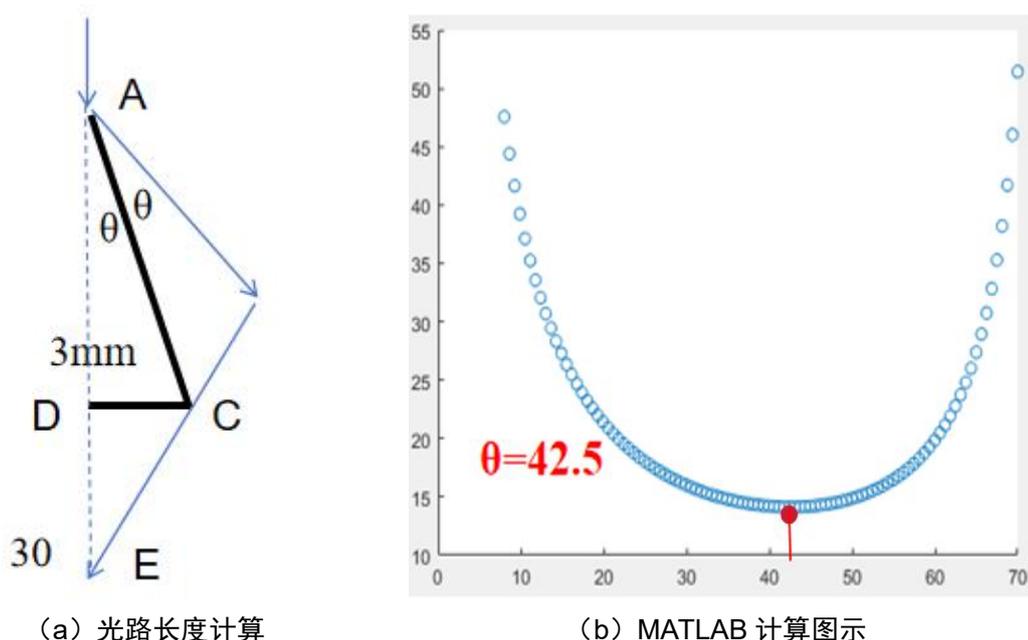


图 2.4 棱镜夹角分析

在图 2.4 (a) 中定量为 $DC=3\text{mm}$ ，半场视角 $\angle DEC = 30^\circ$ （由上述可得半场视角 30° ，三角形 DCE 各边长已被约束，故仅需求 A 到 C 的光路长度（蓝色线条）），而变量 θ 需要满足光线光路最短，通过以上条件可得到光线光路长度与角度 θ 的变化曲线如图 2.4 (b)，最低点 $\theta = 42.5^\circ$ ，再考虑到加工精度条件与便捷性限制，最终决定将角度 θ 设计为 45° 。

四目相机可以获得更大视场，通过最小二乘法优化技术，可降低噪声影响，提高参数估计的鲁棒性，同时多相机之间的交叉验证相机外参，使得标定收敛到最优解。而以光路反射原理，可在仅仅以一目相机达到四目效果，不仅大大节省了相机的标定的所需的空间，还使

得四个模拟相机之间的位姿关系更加简单（模拟相机全由棱镜反射光路模拟得到），在实际相机的位置发生变动时，四目相机相应变动。

该相机能在满足在有限的空间内，取得四目相机拍摄的效果，可以满足在狭小空间使用的需求，和飞机管道应力测量所需的精度要求，充分发挥了基于图像法的管道应力测量的优点。

2.2 相机棱镜设计

相机棱镜设计需要满足 2.1 中所述的光路设计要求，应该设计三个反射面使光线进行三次反射，同时利用棱镜安装角度使得能满足图 2 的角度需求。如图 2.5 所示为各棱镜模型。

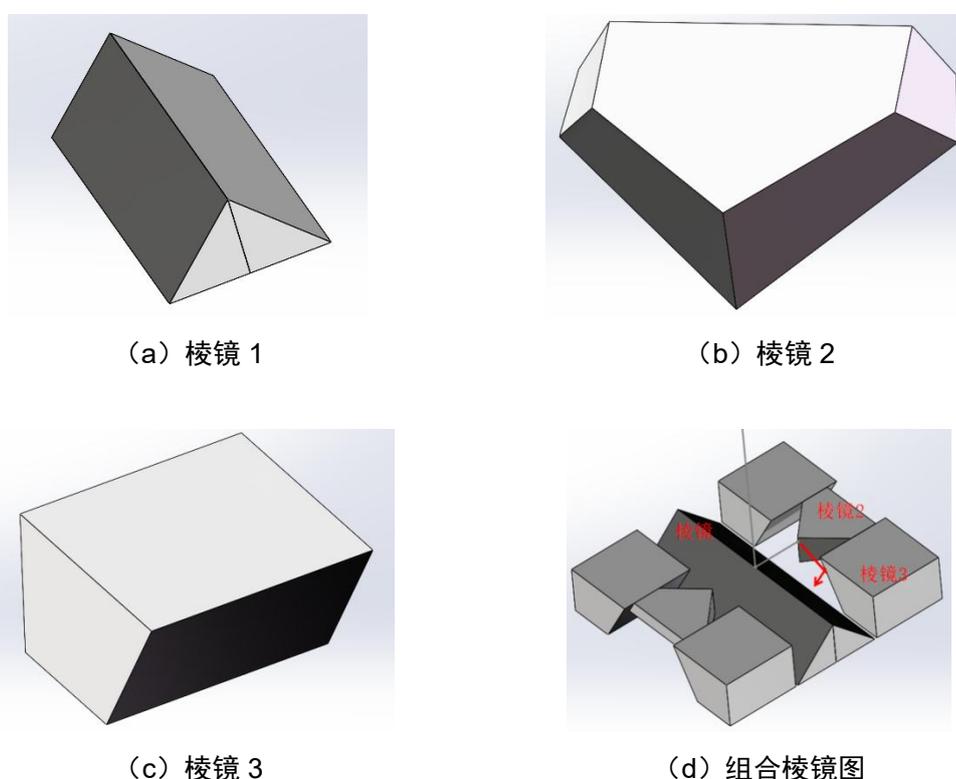


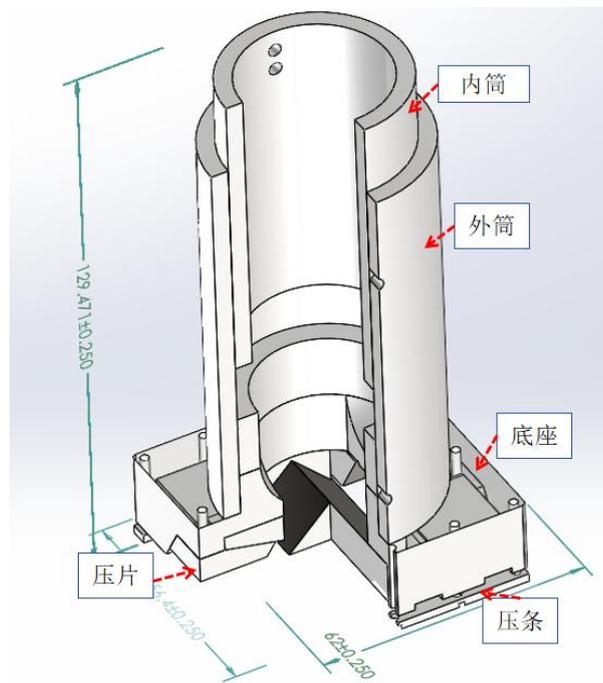
图 2.5 各棱镜部件

棱镜 1（图 2.5（a））由两个截面为等边直角三角形的棱镜组合而成，完成第一次光线反射，以 45° 棱角将光线分为两路。棱镜 2（图 2.5（b））是对称 8 面体中两深色为反射镜面，这两个镜面成 45° 夹角完成第二次反射，将光线反射到棱镜 3 上。棱镜 3 如图 2.5（c）所示，其镜面成 60° 夹角，使得每组双目系统的两目相机（如图 2.1 中 C1-C2 与 C3-C4 所示）的光路夹角形成 60° 。图 2.5（d）为棱镜组后效果及光路表现。

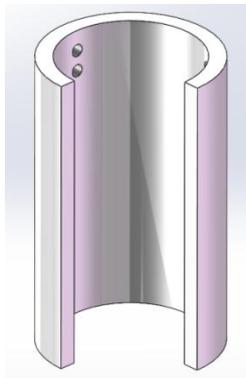
棱镜装置为该相机装置的核心部件，八块由玻璃加工的棱镜紧凑的组合在一起，能精准的将一束光线分为四束光线，使单目相机拍摄取得四目相机同时拍摄的效果，大幅增加测量精度。

2.3 相机外壳设计

相机外壳需要将各种部件集合在一起，起到连接作用，同时还需要满足密封性，保证相机光路不会受到外部环境例如灰尘等杂物影响。并且外壳还需要具有调节相机被测物距离的作用即物距，以满足固定相机的焦距需求。外壳具体模型如图 2.6 (a) 所示。组装后高度为 125mm，截面宽度为 56mm。



(a) 组合图



(b) 内筒



(c) 外筒

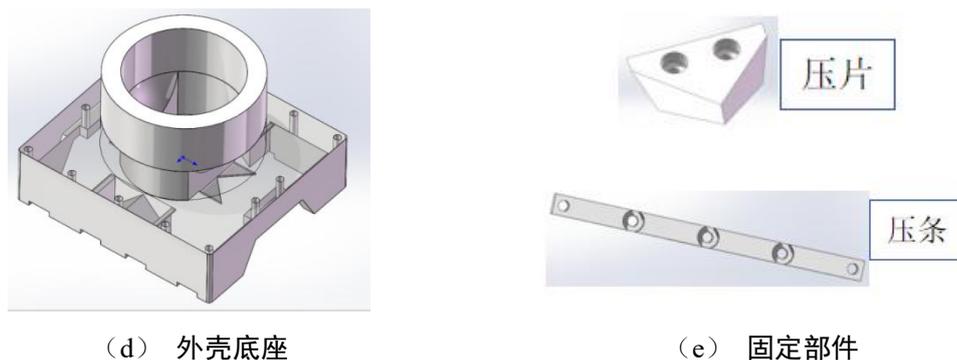


图 2.6 外壳模型

该模型整体分为四个部分：内筒、外筒、底座、固定部件。其中内筒与外筒组合套在一起，起到连接相机和调节物距作用如图 2.6 (b) 到 7 (e) 所示。

内筒上端两圈 M3 螺纹孔成 120° 夹角均匀分布用于固定相机，内筒外径与外筒内径均为 42mm，由铝合金加工制作，在考虑加工误差之后能够实现内外严丝合缝，缝隙误差在 0.05mm 以下。外筒也有两圈 M3 螺纹孔分别用于连接连接内筒与底座。在实际安装后外筒不可移动，内筒可上下移动来调节物距。图 2.6 (d) 的外壳底座全由 3D 打印制作，由褐色树脂为材料，加工误差在 0.05mm 左右。内有凹槽用于固定棱镜。其底部有 4 个 LED 灯槽用于安装 3*4 个 1.8*1.6mm 的 LED 灯用于补充光源能是装置在光线不足使用，且能消除部件上阴影起到类似无影灯的作用。图 2.6 (e) 中的固定部件（压片）前者用于固定棱镜 2，后者用于固定 LED 灯。

在实际拍摄时，可能会遇到光线不足的情况，所以需要补充光源。考虑到机构紧凑型，与光源对实际拍摄时对相机标定的影响，对相机光源设计为图 2.7 所示：



图 2.7 底部展示

图 2.7 显示为实物图，光源采用的是 9V 的 LED 灯条 3 条为一组，分四组安装到相机底座底部，该种设计能有效避免在对金属物件拍摄时造成的反光严重影响相机的拍摄效果，同

时将灯珠错开排列的设计能够使得光源提供的光更加均匀，不会导致被测工件局部反射光过大影响拍摄效果。

本文中的模型集成调节物距、保护镜头、连接各个部件、补光功能，系统的高度集成化，一定程度上防尘，能在狭小的空间内使用，特别适合飞机上管道的复杂恶劣的测量环境。

2.4 标定板设计

基于现有非重叠视场相机的标定方法研究，本文中使用长 41mm 宽 4mm 的长板，将两张标定板以距原点 13.8mm 放置两端，两图中心相距 27.6mm。如所示图 2.8 中有 16*14 个黑白格，可提供 15*13 个特征点供相机标定使用。

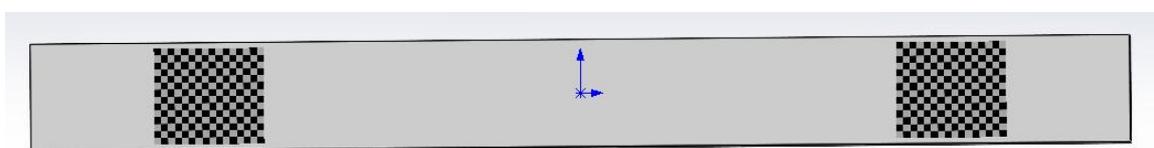


图 2.8 标定板模型

2.5 单目相机标定原理

图 2.9 为相机针孔模型，其中有四个平面即物理平面、像素平面、相机的归一化平面与相机平面，分别对应世界坐标系，像素坐标系，归一化坐标系（是相机坐标系中 $Z=1$ 的坐标系），相机坐标系。

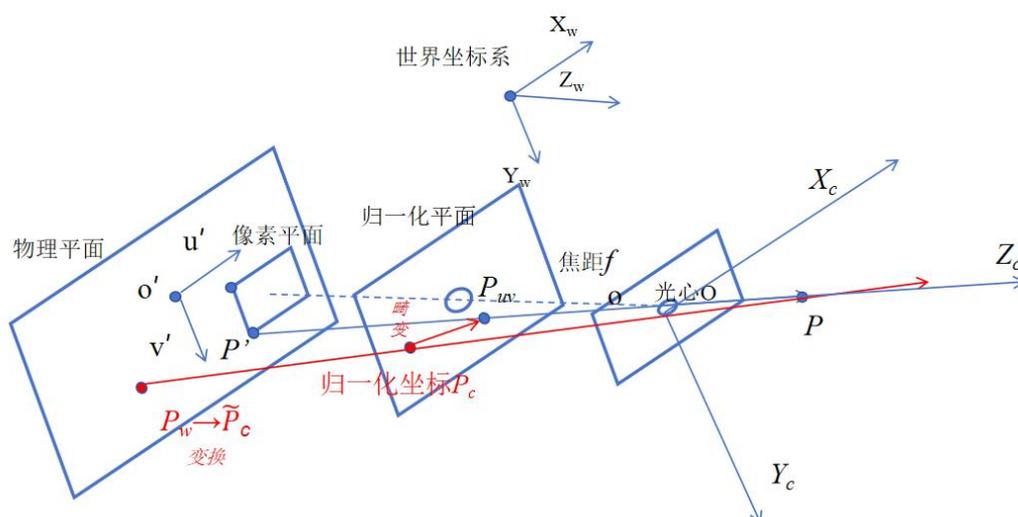


图 2.9 相机针孔模型

在图 2.9 针孔模型中, 设 P 点坐标 $[X, Y, Z]^T$, P' 点坐标 $[X', Y', Z']^T$ (物体平面到光心的距离 f 焦距)。那么, 根据三角形相似原理有:

$$\frac{Z}{f} = \frac{X}{x'} = \frac{Y}{y'} \quad (1.1)$$

在相机的像素平面 $o'-u-v$ 上得到 P' 的像素坐标 $[u, v]^T$ 。有 P 的物理坐标 $[X, Y, Z]^T$ 与像素坐标 $[u, v]^T$ 关系式:

$$\begin{cases} u = \alpha X' + c_x \\ v = \beta Y' + c_y \end{cases} \quad (1.2)$$

将 αf 与 βf 写 f_x 与 f_y 再结合(1.1)式可得:

$$\begin{cases} u = f_x X' + c_x \\ v = f_y Y' + c_y \end{cases} \quad (1.3)$$

C_x, C_y 为原点在 $x-y$ 轴上的位移。

写为矩阵可得:

$$s \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix} \stackrel{\text{def}}{=} KP \quad (1.4)$$

K 为相机内参一般相机厂家会标注相机内参, 或者使用单目棋格张正友标定法进行标定法获得 ($s = \frac{1}{Z_C}$ 为尺度因子)。 P 为相机坐标这里用世界坐标 P_w 表示。相机位姿由相机旋转

矩阵 R 和平移量 t 来描述:

$$sP_w = s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K(RP_w + t) = KTP_w \quad (1.5)$$

旋转矩阵 R 与平移量 t 为外参, 外参将会随着相机位置的变化而变化。再将世界做标转化为相机坐标再去除深度 (相机 Z 轴) 数值, 进行归一化处理得到:

$$(RP_w + t) = \underbrace{[X, Y, Z]^T}_{\text{相机坐标}} \rightarrow \underbrace{[X/Z, Y/Z, 1]^T}_{\text{归化坐标}} \quad (1.6)$$

同时由于相机透镜形状引起畸变 (失真) 成为径向畸变, 对于归一化平面上一点 P_x (存在归一平面的某一点), 其畸变表达式为:

$$\begin{cases} x_{distorted} = x \left(1 + k_2 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 \right) \\ y_{distorted} = y \left(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 \right) \end{cases} \quad (1.7)$$

其中 $[x_{distorted}, y_{distorted}]^T$ 为畸变后的归一化坐标，对于相机装机时不能使得透镜与成像平面严格平行而产生的切向畸变可使用另外两参数表示可得：

$$\begin{cases} x_{distorted} = x + 2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2) \\ y_{distorted} = y + 2p_2xy + p_1(r^2 + 2y^2) \end{cases} \quad (1.8)$$

将式(1.7),(1.8)联合可得：

$$\begin{cases} x_{distorted} = x \left(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 \right) + 2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2) \\ y_{distorted} = y \left(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 \right) + p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy \end{cases} \quad (1.9)$$

由此可通过 5 个畸变系数找到点 P 在像素平面的正确位置。将畸变后的点通过内参矩阵投影到像素平面可得：

$$\begin{cases} u = f_x x_{distorted} + c_x \\ v = f_y y_{distorted} + c_y \end{cases} \quad (1.10)$$

通过上述各式，可将世界坐标下的点 P 坐标 P_w ，经过外参变化得到相机坐标 $\tilde{P}_c = RP_w + t$ ，将 Z 归一化后得到归一化坐标 $P_c = [X/Z, Y/Z, 1]^T$ ，经过畸变变化后得到 $P_w = KP_c$ 。

在张正友标定法中单应性矩阵可以描述物体在世界坐标和像素坐标之间的变换，可得 H 为：

$$H = s \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix} = sk \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

$s = \frac{1}{Z_c}$ 为尺度因子， r_1, r_2 为旋转矩阵上 x, y 轴的变化（ Z 轴上为方便计算可忽略）。

$$\text{可以将单应性矩阵 } H \text{ 写为 } H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix}$$

两个坐标之间的表达关系式为：

$$\begin{aligned}
\mathbf{B} &= (\mathbf{K}^{-1})^T \mathbf{K}^{-1} \\
&= \begin{bmatrix} \frac{1}{f_x^2} & 0 & \frac{-u_0 f_y}{f_x^2 f_y} \\ 0 & \frac{1}{f_y^2} & -\frac{v_0}{f_y^2} \\ \frac{-u_0 f_y}{f_x^2 f_y} & -\frac{v_0}{f_y^2} & \frac{(u_0 f_y)^2}{f_x^2 f_y^2} + \frac{v_0^2}{f_y^3} + 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{1.17}$$

再将： $\begin{cases} h_1^T (\mathbf{K}^{-1})^T \mathbf{K}^{-1} h_2 = 0 \\ h_1^T (\mathbf{K}^{-1})^T \mathbf{K}^{-1} h_1 = h_2^T (\mathbf{K}^{-1})^T \mathbf{K}^{-1} h_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} h_1^T \mathbf{B} h_2 \\ h_1^T \mathbf{B} h_1 = h_2^T \mathbf{B} h_2 \end{cases}$ ，令 $h_i = [h_{1i} \ h_{2i} \ h_{3i}]^T$ (h_i 为 H

的第 i 列的列向量) 令： $v_{ij} = \begin{bmatrix} h_{1i} h_{1j} \\ h_{1i} h_{2j} + h_{2i} h_{1j} \\ h_{2i} h_{2j} \\ h_{3i} h_{1j} + h_{1i} h_{3j} \\ h_{3i} h_{2j} + h_{2i} h_{3j} \\ h_{3i} h_{3j} \end{bmatrix}$ ， $b = \begin{bmatrix} B_{11} \\ B_{12} \\ B_{22} \\ B_{13} \\ B_{23} \\ B_{33} \end{bmatrix}$ 化简的： $h_i^T \mathbf{B} h_j = v_{ij}^T b$ 即： $\begin{bmatrix} v_{12}^T \\ v_{11}^T - v_{22}^T \end{bmatrix} b = 0$ 。

根据 n 张不同角度的标定图片，最终得到了一个矩阵集合 $Vb=0$ ，其中 V 是一个 $(2n \times 6)$ 的矩阵。一张图片可以得到一组 (2 个) 上述的等式。拍摄了 n 张不同角度的标定图片，可以得到 $2n$ 个等式。其中， v_{12} ， v_{11} ， v_{22} 通过前面已经计算好的单应矩阵得到，因此是已知的，而 b 中 6 个元素是待求的未知数。因此，至少需要保证图片数 $n \geq 3$ ，才能解出 b 。再根据

$$\mathbf{B} = (\mathbf{K}^{-1})^T \mathbf{K}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{f_x^2} & 0 & \frac{-u_0 f_y}{f_x^2 f_y} \\ 0 & \frac{1}{f_y^2} & -\frac{v_0}{f_y^2} \\ \frac{-u_0 f_y}{f_x^2 f_y} & -\frac{v_0}{f_y^2} & \frac{(u_0 f_y)^2}{f_x^2 f_y^2} + \frac{v_0^2}{f_y^3} + 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix} \tag{1.18}$$

可求得内参矩阵。由于旋转矩阵遵循坐标轴之间的彼此正交，可得 $r_3 = r_1 * r_2$ 可得：

$$\begin{cases} r_1 = \lambda K^{-1} h_1 \\ r_2 = \lambda K^{-1} h_2 \\ r_3 = r_1 * r_2 \\ t = \lambda K^{-1} h_3 \end{cases} \quad (1.19)$$

并且 $\|r_1\|_2 = \|r_2\|_2 = 1$ ，则 $\lambda = \frac{1}{\|K^{-1}h_1\|_2} = \frac{1}{\|K^{-1}h_2\|_2}$ 。以上都是理论求解，但实际应用中可直接

应用 OpenCV 中成熟的方法求内参以及畸变。

2.6 相机位置计算原理

图 2.10 为相机位置的计算原理图，该图介绍了通过一组三个特征点的物理坐标及重投影坐标共 6 个坐标求解相机位置的原理。

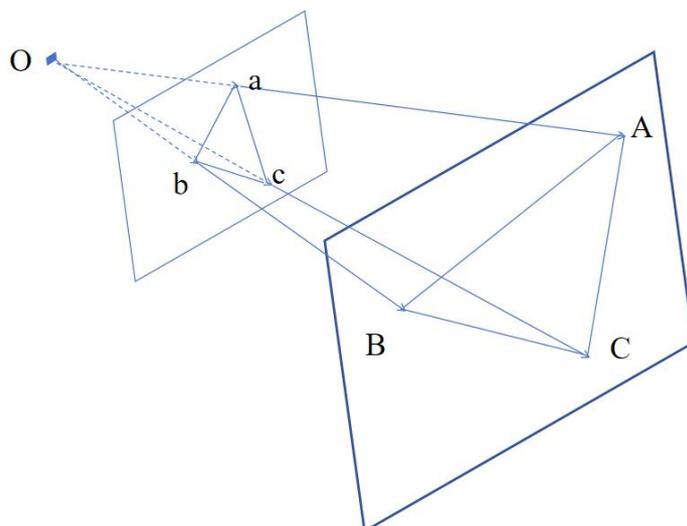


图 2.10 PnP 相机位置求解示意

首先三角形之间存在对应关系：

$$\begin{cases} \triangle Oab - \triangle OAB \\ \triangle Obc - \triangle OBC \\ \triangle Oac - \triangle OAC \end{cases} \quad (1.20)$$

由余弦定理可得： $OA^2 + OB^2 - 2OA * OB * \cos\langle a, b \rangle = AB^2$

同理联合另外两个三角可得：

$$\begin{cases} OA^2 + OB^2 - 2OA \cdot OB \cdot \cos\langle a, b \rangle = AB^2 \\ OB^2 + OC^2 - 2OC \cdot OB \cdot \cos\langle b, c \rangle = BC^2 \\ OA^2 + OC^2 - 2OC \cdot OA \cdot \cos\langle a, c \rangle = AC^2 \end{cases} \quad (1.21)$$

上式全部除以 OC^2 , 并且记 $x = OA/OC, y = OB/OC$, 可得:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 - 2xy \cos\langle a, b \rangle = AB^2/OC^2 \\ y^2 + 1 - 2y \cos\langle b, c \rangle = BC^2/OC^2 \\ x^2 + 1 - 2x \cos\langle a, c \rangle = AC^2/OC^2 \end{cases} \quad (1.22)$$

记 $v = AB^2/OC^2, uv = BC^2/OC^2, wv = AC^2/OC^2$, 有

$$\begin{cases} x^2 + y^2 - 2xy \cos\langle a, b \rangle - v = 0 \\ y^2 + 1 - 2y \cos\langle b, c \rangle - uv = 0 \\ x^2 + 1 - 2x \cos\langle a, c \rangle - wv = 0 \end{cases} \quad (1.23)$$

将式子整理可得到:

$$\begin{cases} (1-u)y^2 - ux^2 - \cos\langle b, c \rangle y + 2uxy \cos\langle a, b \rangle + 1 = 0 \\ (1-w)x^2 - wy^2 - \cos\langle b, c \rangle x + 2wxy \cos\langle a, b \rangle + 1 = 0 \end{cases} \quad (1.24)$$

在式子 (1.23) 中三个余弦角 $\cos\langle a, b \rangle$, $\cos\langle b, c \rangle$, $\cos\langle a, c \rangle$ 是已知的。同时 $u = BC^2 / AB^2$, $w = AC^2 / AB^2$ 可以通过 A, B, C 在世界坐标系中的坐标计算得出, 变换到相机坐标系下后比值不变, 所以仅 x, y 未知。因此得到一个二元二次方程有解可以解得相机位姿。

2.7 参数优化

由于存在镜头畸变和噪声, 精度会受到影响。这些因素对校准结果有很大影响。如图 2.11, 在多次进行拍摄后每次拍摄都会产生相机的重投影误差, 这些导致相机的坐标位置在每次拍摄时都会产生变化。其中取左边相机为基准, 获得内参 $K1$, 再求解出下一个相机的位置。但是第二次拍摄与内参 $K2$, 重复上面错误做再取得一组相机位置, 这样形成的各个相机不同时间拍摄时位置变化范围, 取最小重投影误差的位置, 进行非线性优化。

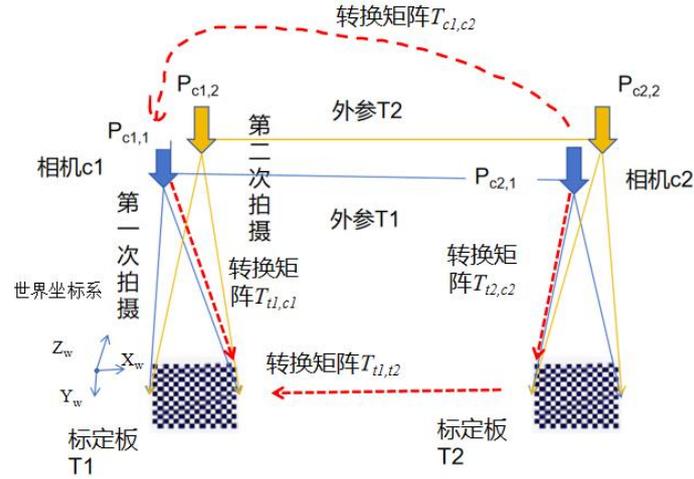


图 2.11 重投影误差示意

如图 2.11 为重投影误差优化示意图，该图仅以双目相机拍摄两次为例进行误差优化的分析。首先初始标定以标定板 1 左上角作为世界坐标系原点，相机 C2 相对于标定板 1 的位姿 $T_{t1,c2}$ 即为相机 2 的世界系坐标，可由式(1.24)计算。式(1.25)描述由两相机在世界系坐标的坐标可算出两相机系间的外参 $T_{c1,c2}$ 。同理不同次测量得到不同相机外参以下用 $T1$ 、 $T2$ 代表第一第二次拍摄时相机外参。 $p_{c1,1}$ 、 $p_{c1,2}$ 分别为相机 1 第一、第二次拍摄时相机的位置， $p_{c2,1}$ 、 $p_{c2,2}$ 分别为相机 2 第一、第二次拍摄时的位置，不同次拍摄时数两相机间的相对位置 $T1$ 、 $T2$ ，则存在变量 $p_{c1,1}$ 、 $p_{c1,2}$ 、 $p_{c2,1}$ 、 $p_{c2,2}$ 与 $T1$ 、 $T2$ 。

$$T_{t1,c2} = T_{t1,t2} T_{t2,c2} \quad (1.25)$$

$$T_{c1,c2} = T_{t1,c1}^{-1} T_{t1,c2} = T_{t1,c1}^{-1} T_{t1,t2} T_{t2,c2} \quad (1.26)$$

其中为了选取误差最小的一组相机相对位置，则建立目标函数：

$$f(x) = \min(g(p_{c1,1}) + g(p_{c1,2}) + g(p_{c2,1}) + g(p_{c2,2})) \quad (1.27)$$

公式 (1.24) 中 $g(p_{c1,1})$ 表示在 $p_{c1,1}$ （相机 1 第一次拍摄时）相机 1 拍摄时标定板面所有特征点的重投影误差，其他同理代表各自不同次拍摄的重投影误差之和。变量为：

$$x = \{p_{c1,1}, p_{c1,2}, p_{c2,1}, p_{c2,2}, T1, T2\} \quad (1.28)$$

因为实际相机相对位置相同即： $T1=T2$ 。则实际上变量为： $p_{c1,1}$ 、 $p_{c1,2}$ 、 $p_{c2,1}$ 、 $p_{c2,2}$ 、 T 。

实际优化公式为 $T = \arg \min_x \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left\| x_{ij} - x \left(M, k_1, k_2, R_i, t_i, X_j \right) \right\|_2^2$ 其中 n 表示为

标定板数量， m 表示为标定板中特征点数量， X_j 第 j 特征点的空间坐标点， x_{ij} 为在第 i 张图上第 m 个特征点的像素坐标， M 为内参， k_1, k_2 为畸变， R_i, t_i 为第 i 张标定板的位姿。通过最小二乘法可优化取得最小的重投影误差。

2.8 标定流程及软件使用

本文中使用实验室内的标定计算软件 Calibrationtool 进行相机标定计算软件界面如图 2.12 所示，该软件集成了相机初始标定，内参优化等功能。该软件可调取 Ceres 与 OpenCV 等数据库提供所需的计算支持。



图 2.12 软件界面

表 2.1 软件功能示意

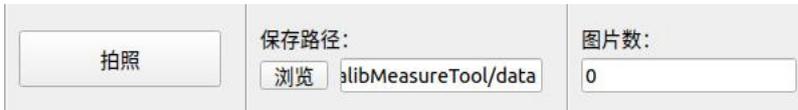
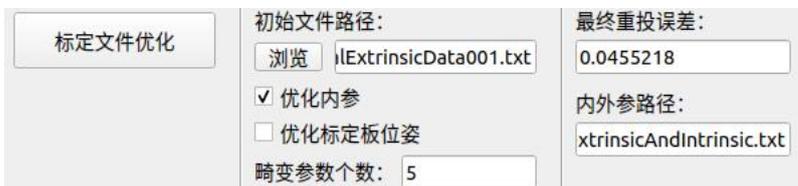
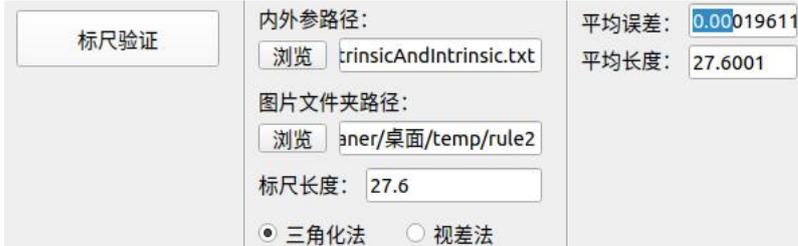
图示	解释
	<p>本文使用电脑连接摄像头后点击拍照可将拍摄所得图片保存至所示路径。</p>
	<p>参数设计窗口中设置标定顶板特征点数量与标定板尺寸,后浏览标定板图片文件点击生成初始文件几分钟后得到初始重投影误差并生成初始标定文件。</p>
	<p>浏览初始标定文件进行非线性误差优化后,输出优化后的重投影误差文件。</p>
	<p>使用仅含 1 个特征点且标尺长度已知的标定板拍照图片输入可验证重投影误差计算效果。</p>
	<p>该功能定位图像上的两特征点并通过三角测量法计算其位置关系,经前后对比后可求得长度变化率即物体表面应变。</p>

表 2.1 中显示各个部分的功能及当前计算数据。如图所示该次试验直接输出由仿真试验得到的标定板图片 76 张进行初始重投影误差计算后得到初始重投影误差 2.1107（该参数窗口数据为 13*15 个特征点，尺寸为 0.2mm）。

第三章 应力测量相机的标定仿真试验

3.1 仿真拍照原理

在 SolidWorks 里有插件 photos360 如图 3.1 所示,该插件拥有模拟相机拍照和拍照图片渲染的功能,该功能能仿真模拟本文的设备进行四目相机拍照。通过该插件本文能实现理想条件下拍照仿真试验,获得最佳的理想条件下的拍照效果,以验证该套方案的可行性和理想最佳精度。为模拟真实相机拍摄效果。本文使用的软件为 SolidWorks2022 版本,可以选择安装 photos360 插件 (SolidWorks2024 以后版本不再支持 photos360 插件)。

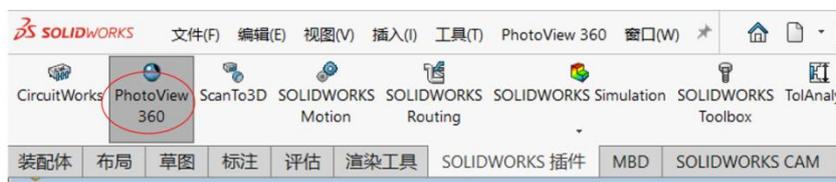


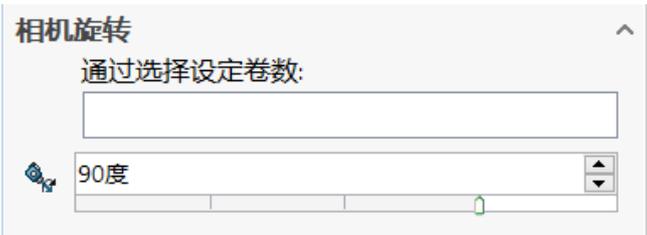
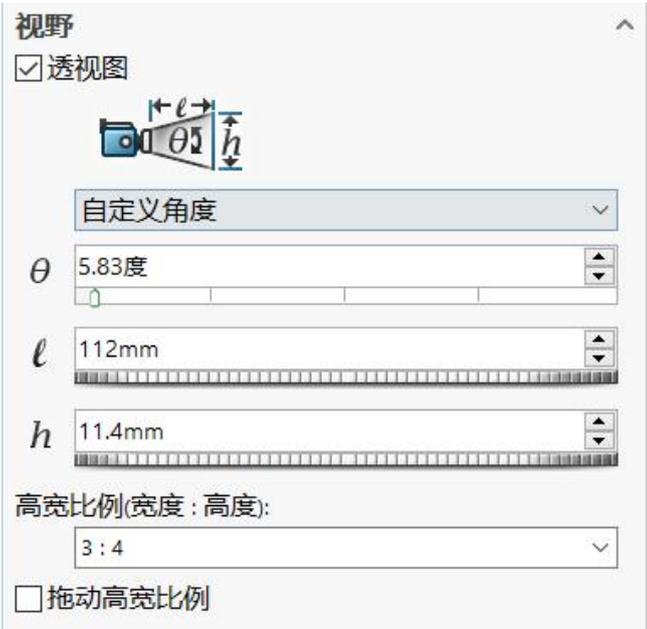
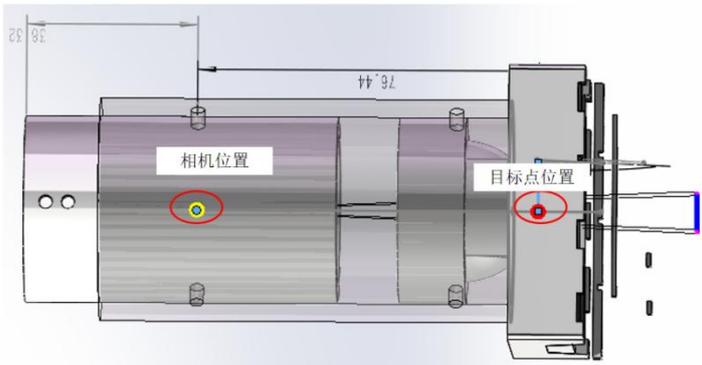
图 3.1 相机设置

由于本文使用相机像素为 2596*1944,焦距为 112mm,倍数为 0.5 倍相机,所以在修改视野一栏将焦距 e 修改为 112mm,并设置高宽比为 3:4,即可 (其余数值插件会自动补充)。同时为满足最好成像效果,应将相机光心位置放置于视野中心。具体参数设置如表 3.1 所示:

表 3.1 软件操作示意

图示	解释
	相机类型选择对准目标,使得相机能一直对准目标点。
	设置相机目标点,使得相机对准第一次光路反射前射到棱镜上的点 (在本文中为棱镜 1 的中心位置),
	选择相机的放置位置,由于相机焦距固定为 112mm,而且底盘内部光路 (第一次反射到第三次反射后的) 的长度一定,相机位置选择应该满足总光路为 112mm。

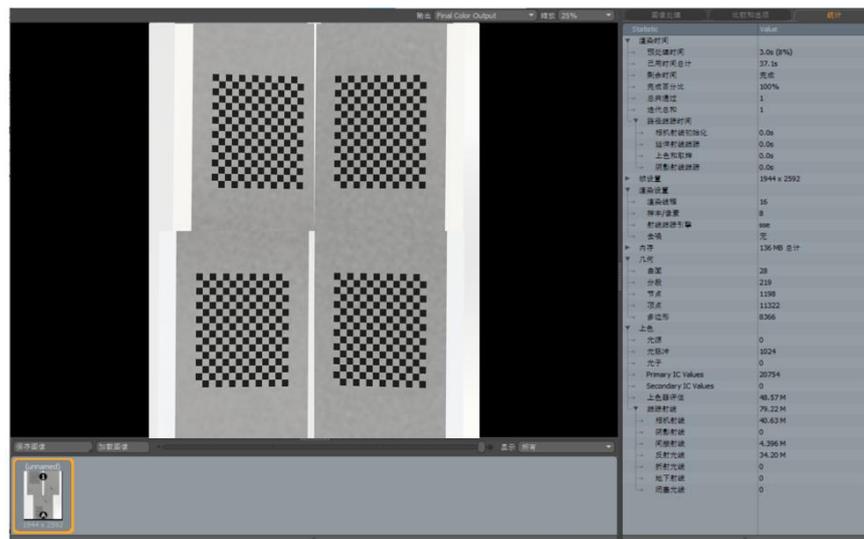
表 3.1（续）软件操作示意

图示	解释
	<p>设置相机旋转，相机拍摄图像为 2592*1944 的矩形图像，旋转相机以调整拍摄结果。</p>
	<p>在透视图图中，输入相机焦距为 $e=112\text{mm}$，高宽比为 3:4（1944:2592）后，即可，插件可以计算得到透视图其余数据。</p>
	<p>图示为上述中的相机位置与目标点位置。</p>

完成相机参数设置后即可模拟实际情况下相机的标定结果图。如图 3.2（a）所示在打开 SolidWorks 里插件 photos360 后选择渲染工具栏中整合预览，即可得到由插件 photos360 渲染界面，可以点击保存渲染完成的图像如图 3.2（b）所示。



（a）渲染工具栏



(b) 渲染结果

图 3.2 软件操作示意

3.2 自动化仿真程序

3.2.1 位置参数化

由于相机标定过程中单张图片无法得到准确的标定结果，需要重复多次的对标定板进行拍摄然后标定，期间需要不断改变标定板的姿态重新执行标定流程，如果该过程全部由人工执行会花费大量时间，试错成本也会大大提高。所以本文使用 SolidWorks2022 的宏指令进行，在完成宏指令设计后可实现图像渲染与标定板位姿调整的自动化处理。

首先如图 3.3 所示，将标定板的位姿通过与 chessboard<1>,chessboard<2>之间的配合数据化。通过六中配合关系即角度 x 、角度 y 、角度 z 、与距离 x 、距离 y 、距离 z 来改变标定板的位置与姿态。该过程原理是通过加入两个名为 chessboard<1>,chessboard<2>模型，改变标定板与各个目标名所示物之间位置与姿态关系，在固其余固定配合关系协助下，完成标定板在整个装配体的坐标系下的位置与姿态的变化。各个配合的初始数据即中心位置如表 3.2 所示

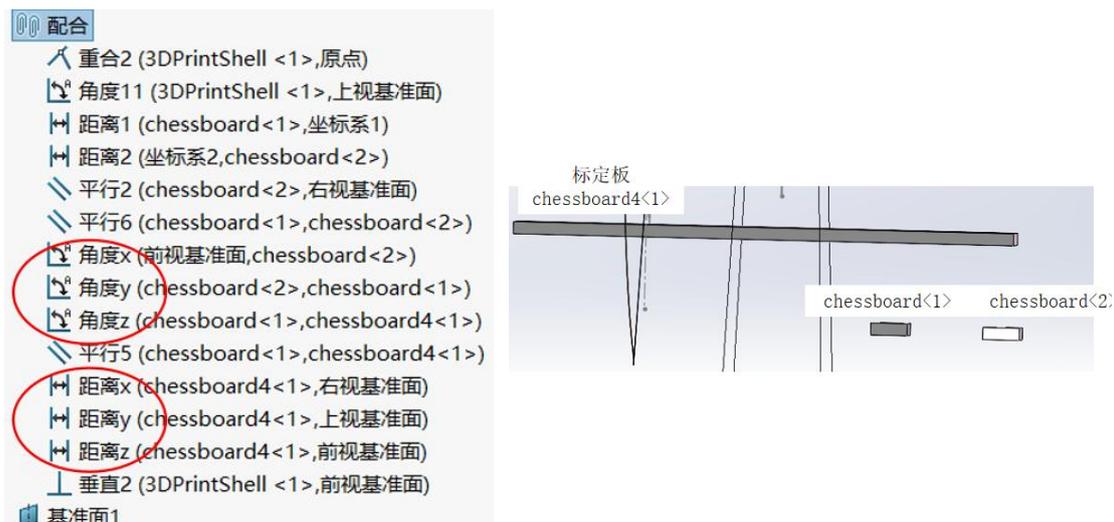


图 3.3 各配合展示

表 3.2 各配合的初始位置

角度 x	角度 y	角度 z	与距离 x	与距离 y	与距离 z
0°	0°	0°	0°	0°	4.6mm

3.2.2 程序完整流程

在完成相机位姿的数字化后，可以通过在宏设置中编写宏程序对目标名下的配合关系进行修改，即改变相机位姿。宏指令设计逻辑如图 3.4 所示：

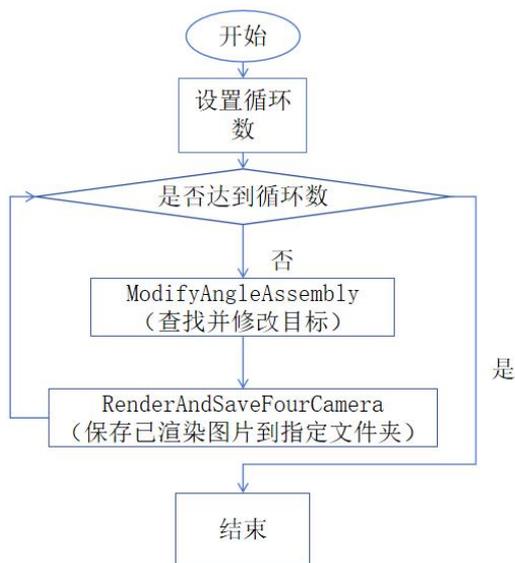


图 3.4 宏指令逻辑

宏程序支持 VB 语言编写主函数是一个循环嵌套对多个，对象是目标配合（图 3.3），通过调用子函数 `ModifyAngleAssembly` 历遍各个配合找到目标配合并修改，再调用子函数 `RenderAndSaveFourCamera` 对已渲染图片进行保存。

本文使用电脑配置如图 3.5 所示,在该配置下自动修改并渲染一张图片的时间约为 45 秒。

设备名	laner	
处理器	AMD Ryzen 7 4800H with Radeon Graphics	2.90 GHz
机带 RAM	16.0 GB (15.4 GB 可用)	
显卡	NVIDIA GeForce GTX 1650 Ti (4 GB)	
存储	954 GB SSD NV900-1T	
设备 ID	6CC2DB9B-0A69-4F4F-8425-15590DC693B0	
产品 ID	00342-36215-54912-AAOEM	
系统类型	64 位操作系统, 基于 x64 的处理器	
笔和触控	没有可用于此显示器的笔或触控输入	

图 3.5 电脑配置

3.3 仿真拍照数据范围

如上所述,该程序可以通过修改配合来改变标定板位姿,但如果某个配合修改量过大可能使得标定板图片超出图幅。因此需要寻找到一个合适的变化范围,要求尽可能使得渲染图片中标定板变化范围尽量大,且特征点不会超出图幅范围。

由于参与改变的配合数目越多,各个配合各自的变化范围越小,因为各个配合以初始位置中心的最大变化范围与其他配合并不兼容。例如在距离 x 设置为变化范围的上下极限后,一旦改变其它变量(以初始位置中心上下变化),标定板将会超出图幅范围。所以本文试验中仅使用“距离 x 、距离 y 、距离 z ”这三个配合来改变标定板位姿,使用这三个配合可以实现在变化范围尽量大的情况下,使得标定板不会超出图幅以图 3.6 为例子,这张图中标定板分布范围大且特征点未超出图幅,是可以使用的。

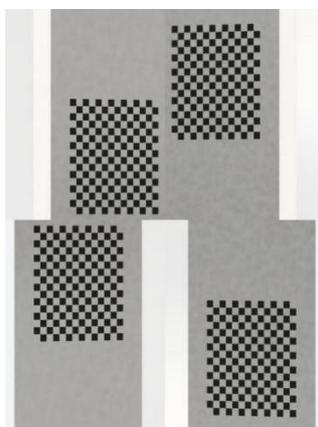


图 3.6 有效标定图像

在该过程中为得到更多符合要求的图片需要找到“距离 x 、距离 y 、距离 z ”的最佳变化范围，需要多次手动改变并渲染图片，之后再人工识别在特定数据下的图片是否可用。本文为完成该过程使用了快速修改目标配合的宏指令 `Modifyfast`。

通过快速修改“距离 x 、距离 y 、距离 z ”距离初始位置的距离获得极限情况下，可以使用的渲染图片，以此确定“距离 x 、距离 y 、距离 z ”的变化范围。本文中“距离 x 、距离 y 、距离 z ”的变化范围如表 3.3 所示：

表 3.3 变化范围表

距离 x	距离 y	距离 z
± 1	± 2	$4.6 \pm 2,5$

3.4 仿真试验计算及验证

在完成上述操作后将得到图片输入计算软件即可完成相机的标定计算。在本文中通过上述仿真试验渲染得到标定板图片 76 张，与标尺板图片 20 张。按照本文中 3.3 节所述操作 `Calibrationtool` 可以完成初始标定，初始标定后的优化以及标尺验证过程。通过 3.3 节中所展示的数据表 3.4 如下：

表 3.4 标尺验证结果

	初始标定	最终重投影误差	标尺验证
误差	2.11pixel	0.455pixel	0.00196mm

初始标定计算可得重投影误差为 2.11pixel ，同时相机参数显示在整张图幅中每个像素单位对应尺度为 $4.4\mu\text{m}$ 即说明初始尺度误差为 $2.11 \times 4.4\mu\text{m} = 9.284 \times 10^{-3}\text{mm}$ ，由此可算出应变误差为：

$$\varepsilon = \frac{2.11 \times 4.4\mu\text{m}}{2 \times 2592 \times 4\mu\text{m} + 22\text{mm}} = 2.07 \times 10^{-4}$$

应力误差为：

$$\sigma = 205\text{GPa} \times 2.07 \times 10^{-4} = 42.435\text{MPa}$$

该精度可以接受，但可以进一步提升精度，即当进行参数优化后可以将重投影误差缩小到 0.455pixel ，最终尺度误差为 $0.455 \times 4.4\mu\text{m} = 0.009284\text{mm}$ ，由此可算得应变误差为

$$\varepsilon = \frac{0.455 \times 4.4\mu\text{m}}{22\text{mm} + 2 \times 2592 \times 4.4\mu\text{m}} = 4.47 \times 10^{-5}$$

应力误差为：

$$\sigma = 205\text{GPa} \times 4.47 \times 10^{-5} = 9.163\text{MPa}$$

综合误差缩小了 4 倍有余。

在标尺验证中输出的误差数据为 0.000196mm，该数据原标尺长度 27.6mm 与测量长度的差值，换算一下，重投影误差为 $0.000196\text{mm} \div 4.4\mu\text{m} = 0.445\text{pixel}$ 与之前测得的最终重投影误差基本一致。这说明以上述标定结果条件下计算时在该种尺度测量方法下的重投影误差具有很高的可信度。

同时还可以手算验证一下在该软件标定情况下的内参与外参的部分参数的准确性。对于双目或者多目相机系统，在计算相机内参中，本文使用的相机焦距为 $f=112\text{mm}$ ，像素大小为 $4.4\mu\text{m}$ ，有公式 $f_x = f_y = \frac{112}{0.0044} \approx 25454.545$ 。相机像素为 2592×1944 ，相机为四目相机，拍摄效果如图 3.7 所示：

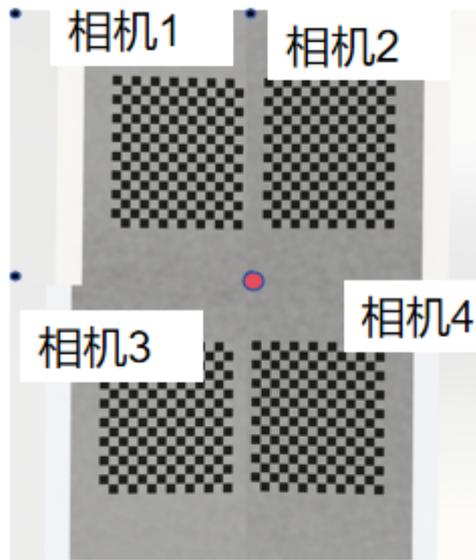


图 3.7 拍摄效果图

如图 3.7 所示，拍摄后四相机拍摄效果集成在一张图上，以各相机单独拍摄图的左上角为各相机像素坐标原点，合成图中心点为像素坐标系原点，可求得各原点在 x - y 轴上的位移即 c_x ， c_y 。理论值如表 3.5 所示：

表 3.5 相机部分内参

相机名	c_x /像素	c_y /像素
相机 1	972	1298
相机 2	0	1298
相机 3	972	0
相机 4	0	0

计算相机位置，四个模拟相机的位置位置可有 $[X,Y,Z]$ 表示。如第二章图 2.1 所示以第一目相机（C1）为原点计算第一目相机为位置为 $[0,0,0]$ ，第二目相机与第一目相机成 60° 夹角且物距 Z 等于焦距 $f=112\text{mm}$ ，得第二目相机位置 $[0,112*\cos 30^\circ,112*\sin 30^\circ]$

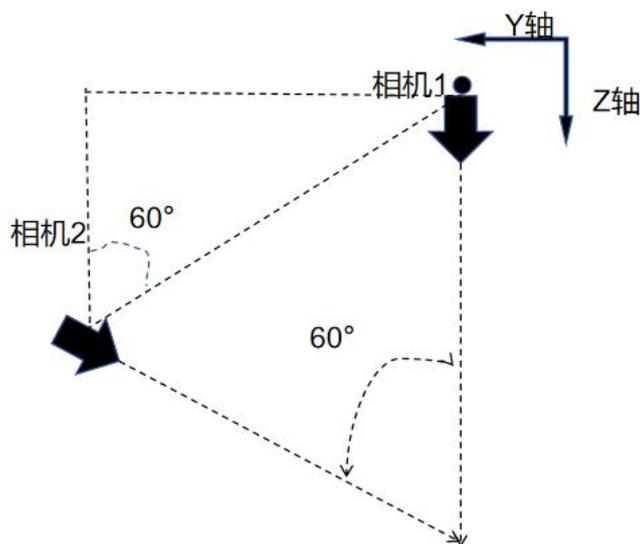


图 3.8 位置计算示意图

第三目相机距离第一目相机距离 x 轴向上距离为 22mm ，可得第三目相机位置 $[22,0,0]$ ，同理得第四目相机为位置为 $[22,112*\cos 30^\circ,112*\sin 30^\circ]$ 。整理得到理论值位置表 3.6 如下

表 3.6 相机理论位置

相机名	X	Y	Z
C1	0	0	0
C2	0	$112*\cos 30^\circ$	$112*\sin 30^\circ$
C3	22	0	0
C4	22	$112*\cos 30^\circ$	$112*\sin 30^\circ$

在标定软件中可以将标定软件计算的内相机位置及内参导出如表 3.7 所示

表 3.7 相机位置及内参

参数	X	Y	Z	f_x	f_y	c_x	c_y
相机 1	0	0	0	25454.54	25454.54	972	1296
相机 2	-6.8334e-05	-96.997	56.003	25454.54	25454.54	0	1296
相机 3	-21.997	-0.001	0.0004	25454.54	25454.54	972	0
相机 4	-21.997	-96.991	56.003	25454.54	25454.54	0	0

通过数值计算可以发现 $112*\cos 30^\circ = 96.995$ ， $112*\sin 30^\circ = 56$ ，表 3.6 与表 3.7 中参数基本相同，可以验证标定软件的标定的内参及相机位置位置参数具有可信性。

第四章 应力测量相机的试验验证

4.1 试验设计

图 4.1 所示，该图为试验示意图，整体试验主要由相机、被测物（管道）、应力加载装置、应力数据采集器、图像数据采集器、应变片、NI9237 采集卡等部件组成。其中相机为上述介绍设计的相机，其顶端通过数据线连接到图像数据采集器，将拍摄的照片实时传输到图像数据采集器中。图像数据采集器使用 Linux 系统，运行上述介绍的标定计算软件，试验中可通过数据线获取相机实时拍摄画面并进行调整，用来将相机拍摄中心正对于棱镜 1 中心，以达到仿真试验所展示的效果，同时电脑将保存不同加载应力情况下相机所拍摄的图片保存至目标文件夹为后续试验使用。应力数据采集器连接 NI9499 桥路模块-应变片-NI9237 采集卡-NI9188 数据采集板组成一套完整的应变片应力测量系统，应变片贴于被测物（管道）表面，将管道表面的应变经过 NI9499 桥路模块与应变片转化为电信号由 NI9237 采集卡所收集传输到 NI9188 数据采集板，再通过网线传输到电脑上。数据采集后在实验室的电脑中显示，该电脑使用 Windows 系统搭载了应力测量软件，可将管道表面应变电信号转化为实时图形显示。应力加载装置放置一端用于固定被测物（管道），一端通过精密丝杠加载轴向应力，通过记录旋转精密丝杠次数作为加载载荷单位（步）。

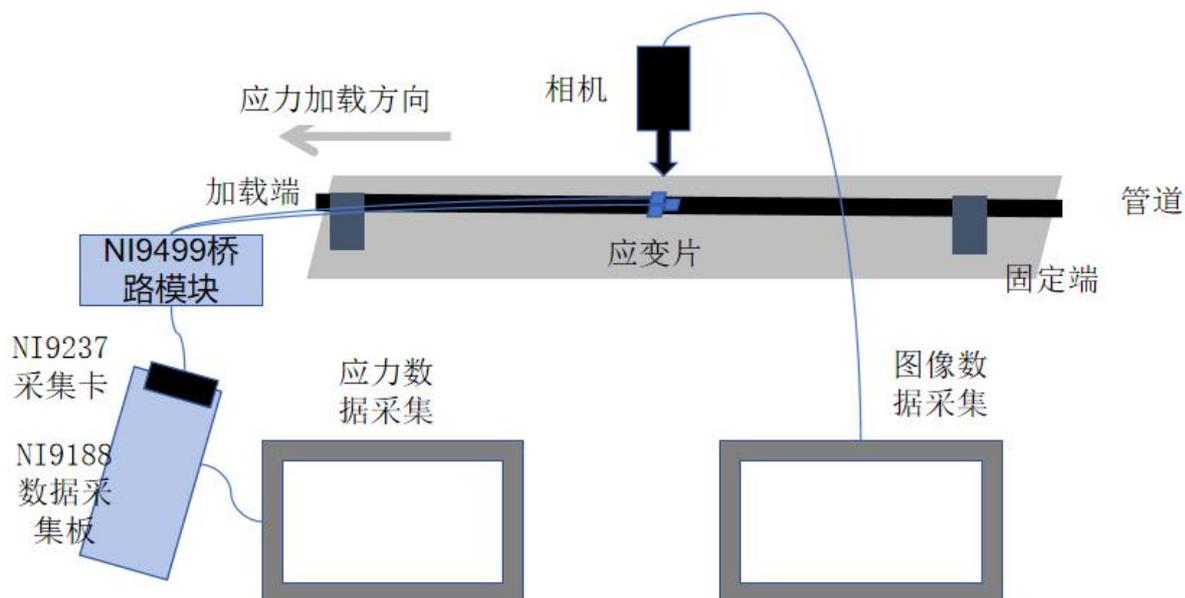


图 4.1 试验示意图

试验旨在通过应力数据采集器与图像数据采集器二者所采集的数据进行对比，以验证该套试验装置的可行性以及精准度。

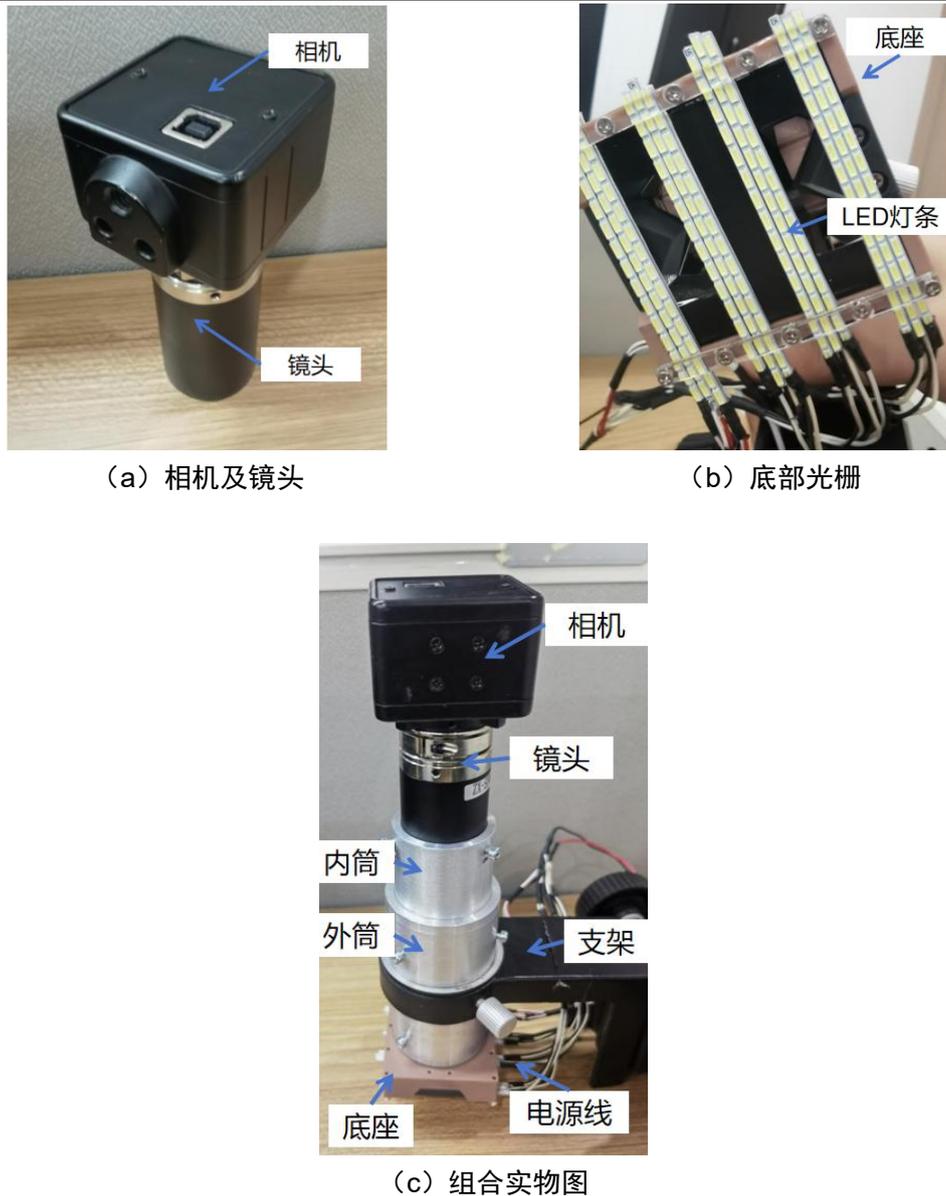
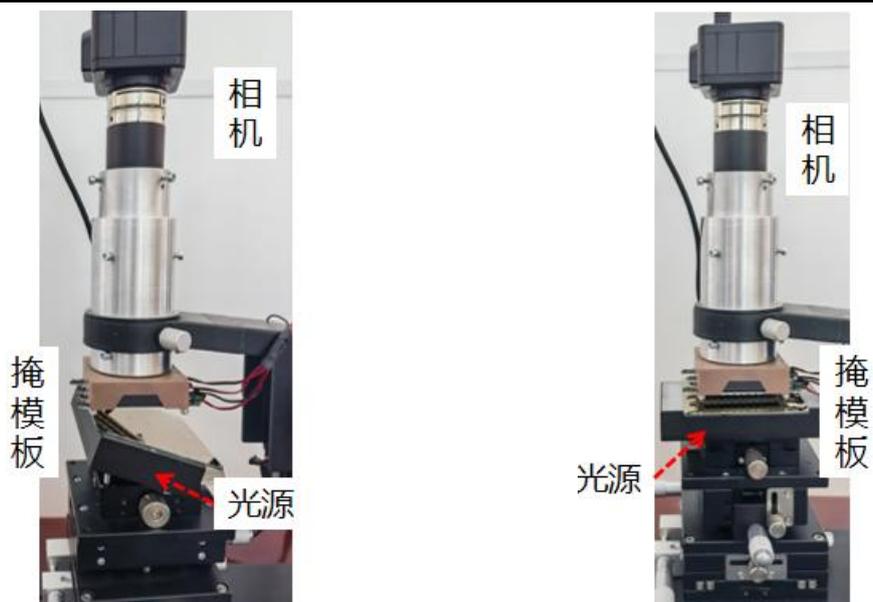


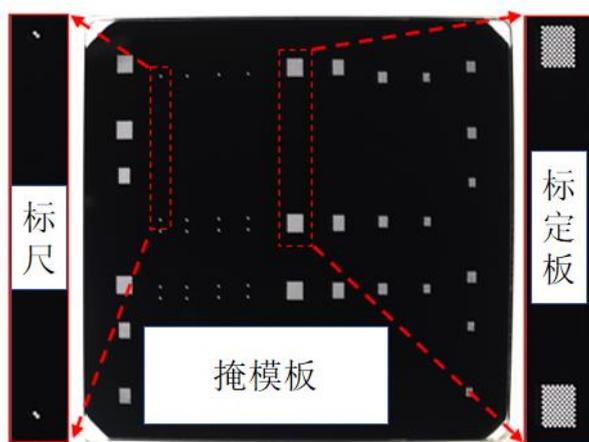
图 4.2 应力相机展示

图 4.2 为应力测量相机的组装及其支架。在进行试验前需要对相机进行标定，在标定过程中使用图 4.3 (c) 所示的标定板进行标定（图 4.3 (a) 为 16×14 特征点，尺寸 0.2mm 标定板）。该过程将拍摄 76 张不同位姿的标定板图像（图 4.3 (d)），这些图像将会保存至电脑中使用本文提到的 Calibrationtool 软件通过张正友标定法求得相机内参及其畸变数。在拍摄采集 40 张四目同步图像进行相机位置计算，同时进行全局标定优化（图 4.3 (b)）。之后再拍摄标尺部分对标定精度进行验证，拍摄得到 20 组标尺图像（图 4.3 (e)），保存至电脑中使用软件计算通过重投影误差分析验证系统测量的可靠性。

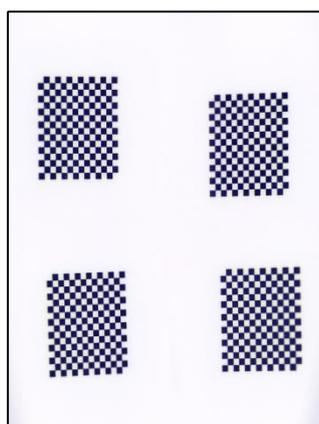


(a) 单目标定

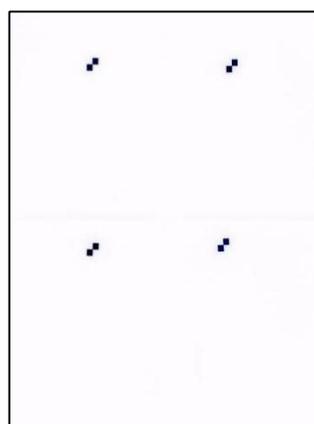
(b) 四目全局标定



(c) 标定板与标尺



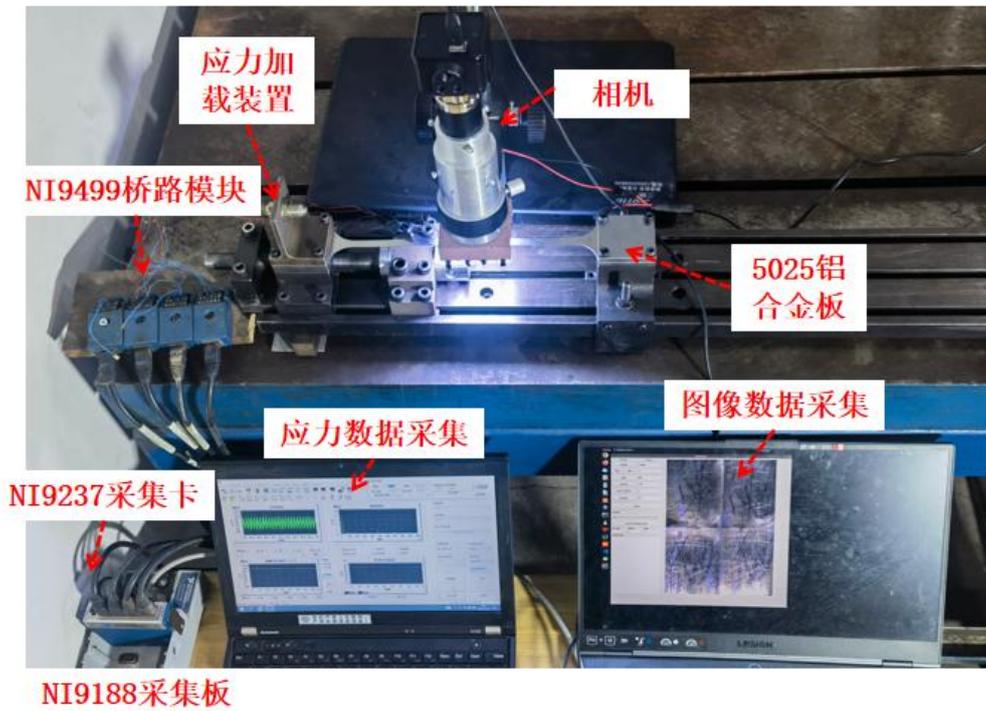
(d) 标定板拍摄图像



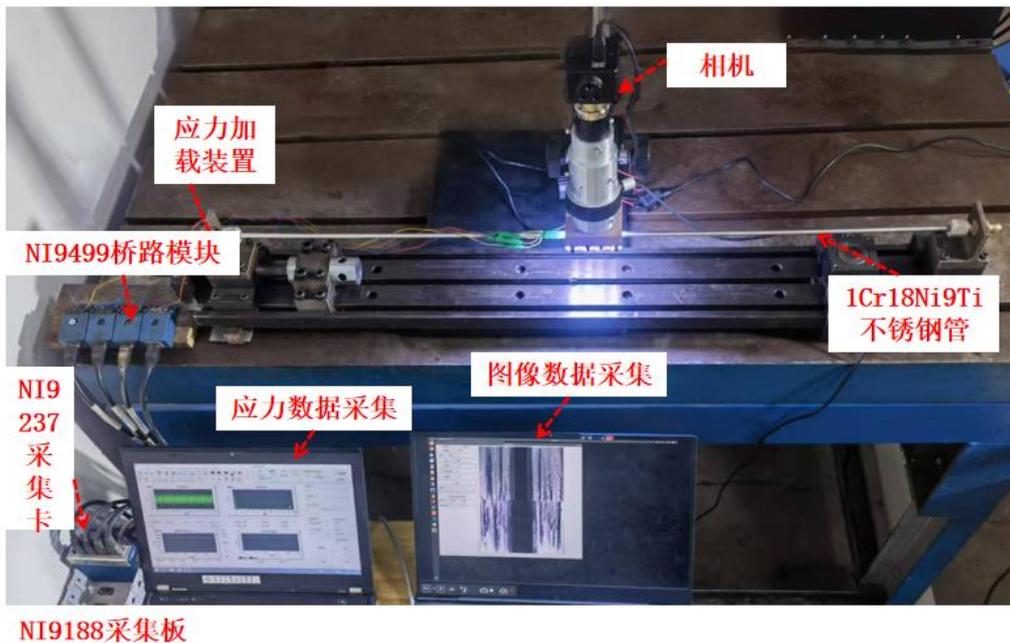
(e) 标尺拍摄图像

图 4.3 标定过程

通过上述操作可以完成相机标定过程，之后按照试验示意图所示搭建试验平台（图 4.4（a）（b））。分两次对试件 5025 铝合金板（ $200 \times 8 \times 0.5 \text{mm}$ ，弹性模量 $E=69 \text{GPa}$ ）（图 4.4（c））和 1Cr18Ni9Ti 不锈钢管（ $\Phi 6 \times 1 \text{mm}$ ， $E=205 \text{GPa}$ ）（图 4.4（d））进行试验。试验中试件上都贴有应变片作为传感器测量试件表面的应变，在试件表面发生形变时将会使得引起应变片电阻变化以达到应变测量效果。



(a) 板件试验



(b) 管道试验



(c) 5025 铝合金板



(d) 1Cr18Ni9Ti 不锈钢管

图 4.4 现场试验图示

4.2 试验结果

经过标定板标定过程后得到全局优化后的重投影误差值为 0.441pixel，相机标定时优化前后重投影误差散点图 4.5 如下：

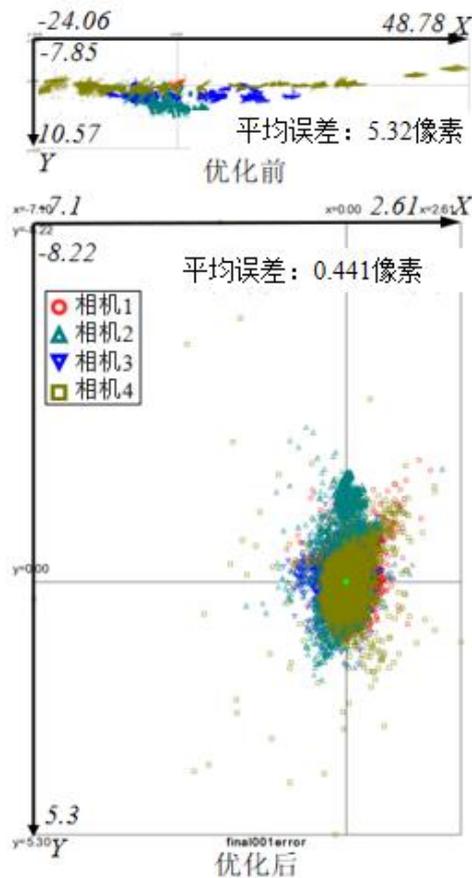


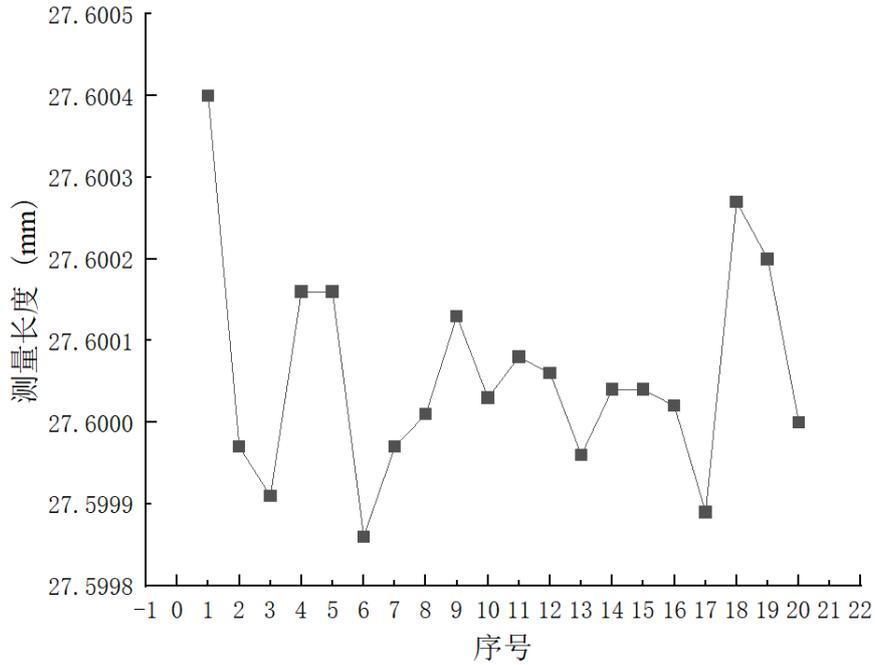
图 4.5 前后重投影误差散点图

在图 4.5 中，红圆圈为相机 1，绿正三角为相机 2，蓝倒三角为相机 3，棕色方框为相机 4。优化前图像里显示“红色”相机 1 的重投影误差最小，距离中心点最近；“绿色”相机 2 重投影误差分布范围稍大于相机 1；“蓝色”相机 3 重投影误差更大，分布更广；“棕色”相机重投影分布范围最大，重投影误差最大。

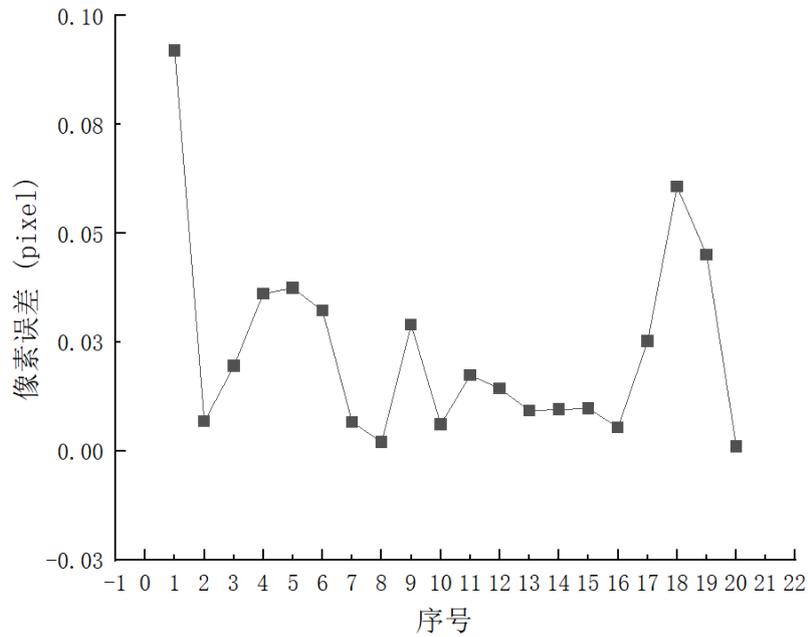
进行标尺验证后，验证试验数据表 4.1 及误差分析图 4.6 如下：

表 4.1 标尺试验数据表

单位/测量序号	测量长度 <i>mm</i>	像素误差 <i>pixel</i>	误差 μm
1	27.6004	0.09197	0.40467
2	27.59997	0.00677	0.02978
3	27.59991	0.0195	0.08579
4	27.60016	0.03617	0.15916
5	27.60016	0.03742	0.16463
6	27.59986	0.0322	0.14168
7	27.59997	0.00666	0.02932
8	27.60001	0.00206	0.00907
9	27.60013	0.02898	0.12749
10	27.60003	0.00608	0.02673
11	27.60008	0.0174	0.07658
12	27.60006	0.01436	0.0632
13	27.59996	0.00931	0.04097
14	27.60004	0.00952	0.04189
15	27.60004	0.00978	0.04305
16	27.60002	0.00542	0.02387
17	27.59989	0.0252	0.11089
18	27.60027	0.0607	0.26709
19	27.6002	0.04499	0.19794
20	27.6	0.00102	0.00451



(a) 测量长度折线图



(b) 测量误差折线图

图 4.6 测量长度及误差图

表 4.1 中标尺测量结果均在准确值 27.6mm 的左右分布，误差最大值为 0.40467 μm ，最小为 0.00907 μm ，平均像素误差为 0.0218165pixel，平均尺度误差为 0.097594 μm 。

为管道试验数据表 4.2 及误差图 4.7 如下：

表 4.2 管道试验数据

名称	应变片应变	图像应变	绝对误差
加载量	$\mu\epsilon$	$\mu\epsilon$	$\mu\epsilon$
4	485	483.2	1.8
5	542.75	545.55	2.7
6	600	630.37	30.37
7	695.81	700.58	4.77
8	748	769.23	21.23
9	-73.6	-152	78.4

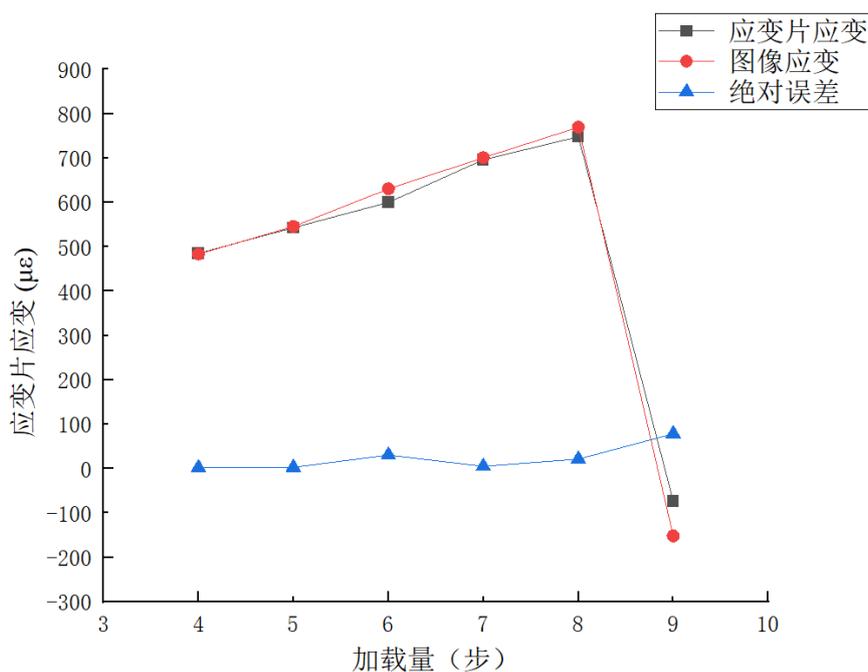


图 4.7 管道数据图

表 4.2 中管道应变测量结果显示，图像法测量结果误差平均为 $23.21\mu\epsilon$ ，最大值为 $78.4\mu\epsilon$ ，最小值为 $1.8\mu\epsilon$ 。图 4.7 显示应变片应变测量结果与图像应变测量结果曲线几乎重合。

为板件试验及板件试验数据表 4.3 及误差图 4.8 如下：

表 4.3 板件试验数据

名称	应变片应变	图像应变	绝对误差
加载量	$\mu\epsilon$	$\mu\epsilon$	$\mu\epsilon$
0	0	0	0
1	490	476.91	13.09
2	918.7	875.5	43.2
3	1101	1077.12	23.88
4	1339	1343.76	4.76
5	1666.63	1671.4	4.77
6	1947	2023.52	76.52

表 4.3 (续) 板件试验数据

名称	应变片应变	图像应变	绝对误差
加载量	$\mu\epsilon$	$\mu\epsilon$	$\mu\epsilon$
7	2078	2131.19	53.19
8	2375.31	2347.42	27.89
9	2541	2539.13	1.87
10	2671.5	2751.81	80.81
11	2818	2762.1	55.9
12	-177.32	-449	271.68

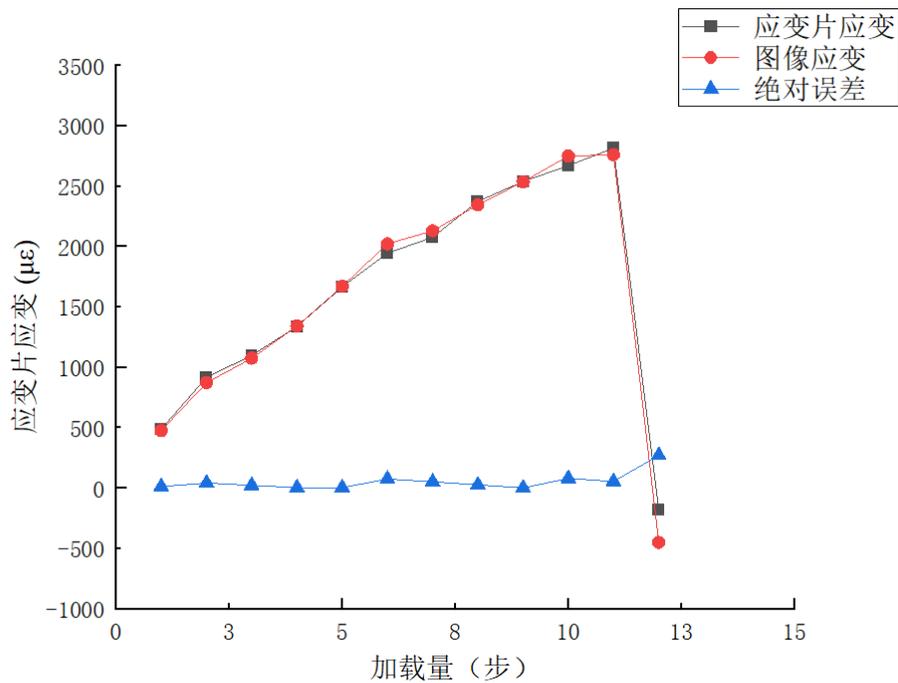


图 4.8 板件数据图

表 4.3 显示在板件应变测量结果的平均误差 $56.64\mu\epsilon$, 最大值为 $76.52\mu\epsilon$, 最小值为 $1.87\mu\epsilon$ 。图 4.8 显示在板件的应变测量过程中, 应变片测量结果曲线与图像法测量结果曲线几乎重合。

4.3 试验分析

在标定相机部分, 相机重投影误差为 0.441pixel , 区别于仿真试验中标定达到的 0.0455pixel 的高精度, 实际试验中存在以下原因可能导致试验误差增大: 1. 相机拍摄中心与目标中心位置无法精准重合, 2. 标尺板制作设计时不可避免存在精度误差, 无法达到仿真试验中标定板的制作精度, 3. 试验使用的相机为普通相机, 其芯片制作精度无法达到工业级相机水平, 4. 棱镜与底座安装时导致的实际安装位置无法与仿真试验中棱镜位置完全相同。但试验结果在重投影误差为 0.441pixel 的情况下依旧属于可接受范围内, 同样能达到高精度应力测量的目的。

在标尺验证过程中, 试验全程误差上下幅度不超过 0.09095pixel, 平均误差为 0.46551pixel, 中位数为 0.01588pixel。从图 4.6 (b) 中可以发现在图片为第 11-16 组时误差范围明显减小且误差浮动幅度明显减弱, 整体误差趋于稳定, 与之相对的第 1-2 组与第 16-20 组图片中误差幅度很大, 出现这种现象, 本人推测是相机拍摄效果即拍摄图片中标定板位姿变化幅度不够, 拍摄时相机底座设计不合理导致棱镜安装出现偏差的原因。但在全程误差上下幅度不超过 0.09095pixel, 平均值为 0.0212965pixel, 中位数为 0.01588pixel 的精度下仍然可以达到高精度标定效果, 标定误差仅为 0.37%。

管道试验中, 试验全程误差上下幅度不超过 76.6 $\mu\epsilon$, 平均误差为 23.21 $\mu\epsilon$ 中位数为 13 $\mu\epsilon$ 。加载步数为 4-7 时, 应变片应变曲线与图像应变曲线趋向于同一条直线, 当加载步数为 8-9 时应变片应变与图像应变出现大幅度下降, 经分析可能源于应变过大导致敏感栅产生塑性变形, 产生误差因此加载步数为 8-9 时的应变测量结果不具有可信度。在将加载步数为 8-9 时的应变数据去除后试验全程误差上下幅度不超过 28.57 $\mu\epsilon$, 平均误差为 9.91 $\mu\epsilon$ 中位数为 3.735 $\mu\epsilon$ 。在以应变片为对照组的前提下, 测量误差最大为 5.062%, 最小为 0.371%, 中位数为 0.59%, 说明了该测量系统对 1Cr18Ni9Ti 不锈钢管的测量精度很高。

板件试验中, 在加载量为 0 时即没有轴向载荷时, 应变片应变与图像应变均为 0, 以此试验的初始值。在载荷为 1-10 时, 应变片应变曲线与图像应变曲线近乎为一条直线且几乎重合, 说明应变片应变测量与图像应变测量结果均可靠。同时在载荷为 1-10 应变片应变与图像应变的绝对误差值浮动幅度为 78.94 $\mu\epsilon$, 平均值为 33.008 $\mu\epsilon$, 中位数为 25.885 $\mu\epsilon$ 。测量精度表 4.4 如下:

表 4.4 测量精度表

加载量 步	准确值 $\mu\epsilon$	绝对误差 $\mu\epsilon$	相对误差	测量精度排序
1	490	13.09	2.671%	6
2	918.7	43.2	4.702%	9
3	1101	23.88	2.169%	3
4	1339	4.76	0.356%	1 (最高)
5	1666.63	4.77	0.286%	2
6	1947	76.52	3.930%	8
7	2078	53.19	2.560%	5
8	2375.31	27.89	1.174%	4
9	2541	1.87	0.074%	10 (最低)
10	2671.5	80.81	.025%	7

以应变片应变为对照组可得到图像应变平均测量误差为 2.09%, 说明在板件试验中该系统对铝合金板测量精度具有可信度。

4.4 小结

上述试验显示该套应力测量装置在实验室环境下对 5025 铝合金板 1Cr18Ni9Ti 不锈钢管的测量结果非常接近应变片测量结果，可以证明该套装置的精准度与应变片测量精度相同，验证了基于图像法的管道安装应力技术可以满足实际使用时的精度要求，足以证明数字图像法（DIC）在管道的应力测量方面具有一定价值，其精度与传统方法相比并不逊色，同时其更加便携，对试件所造成的影响更小，所需的操作难度更小。综上基于图像法的管道安装应力检测法在不损失精度的情况下能更加便捷的进行应力测量，该方法具有一定优越性。

第五章 结论与展望

5.1 结论

本文基于数字图像法（DIC）旨在验证数字图像法（DIC）在飞机管道应力测量的可行性。本文中自制相机外壳及相机和棱镜组装成一套应力测量装置，该装置通过棱镜反射光线，使得可以利用单目相机拍摄得到四目相机拍摄效果，组成两组双目系统，同时扩大视场以大幅增加测量精度。以该项装置为核心结合实验室提供的标定测量软件与应变片应变测量系统搭建起一套完整的基于图像法的管道应力测量试验验证系统。

本文在进行试验前先行设计仿真试验用于保障实物试验时不会出现测量相机设计问题与软件使用问题。本文以仿真试验为基础，探究标定过程重投影误差的理论值，并不断优化试验设计寻找重投影误差最小的标定方案即标定板姿态变化的最佳范围。仿真试验为实物试验打下坚实的理论基础，验证试验理论上的可行性，同时熟悉并优化了试验流程，使得后续的实物试验未出现因操作失误而出现的误差，节省了大量时间用于仿真试验后续的实物试验。

本文选用 5025 铝合金板与 1Cr18Ni9Ti 不锈钢管作为试件，是因为这两组材料使用较为广泛且易于获取。在实物试验中本文通过上述试验装置测量得到试件应变的在两组不同测量方法下具体数据，以应变片为对照组，发现这两种方法测量得到的结果差距很小，足以验证数字图像法（DIC）在管道应力测量的可行性。

5.2 展望

由于时间有限，本文仍有很多不足以及未讨论的地方。主要体现在以下方面：

（1）本文使用的器材例如相机，棱镜与外壳等均无法达到工业标准的精度，在此条件下会出现无可避免的系统性误差，该套应力测量相机装置仍有提升空间。

（2）本文试验使用应变片的应变测量作为对照组，没有更多组其他方法的应变测量结果进行对照无法充分体现基于图像法的应力测量技术的优势，相较于其他测量方法，基于图像法的应力测量精度未必更高。

（3）本文选用的试件种类过少，仅有两种且均为金属材料，且均为实验室试验条件，无法由此推测基于图像法的应力测量技术是否适用于其他类型材料，及在其他环境下该方法是否仍可进行高精度的应力测量。

以上不足之处均可在未来通过引用精度更加的材料及更多试验器材与试验环境结合更加高效高精度的标定及优化方案进行改进，更好体现图像法测应力的高精度，便携及抗干扰力强的优势。

参考文献

- [1] 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, 154: 103715.
- [2] Jiang G U O, Haiyang F U, Bo P A N, et al. Recent progress of residual stress measurement methods: A review[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(2): 54-78.
- [3] 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, 217: 117164.
- [4] 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, 46: 102147.
- [5] Chen Y, Sun H, Li Z, et al. Strategy of residual stress determination on selective laser melted Al alloy using XRD[J]. *Materials*, 2020, 13(2): 451.
- [6] Akbarova N, Azamatov Z. Deformation measurement by digital holographic interferometry[C]//E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2023, 434: 01039.
- [7] 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, 44(7): 785-806.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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(7): 1659.
- [11] 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, 187: 1-12.
- [12] Li C, Ji B, Yao Y. Stress biaxiality-based residual stress assessment in welded T-joints using the blind-hole method [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2024, 216 108610.
- [13] Reza A G, Ali T. A unified comparative study on the classical lamination theory, hole drilling, slitting, and curvature measurement methods for assessment of residual stress in laminated polymeric composites [J]. *Mechanics of Materials*, 2022, 167

- [14] Wei P, Wenchun J, Guanghua S, et al. Biaxial residual stress measurement by indentation energy difference method: Theoretical and experimental study [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2022, 195
- [15] 戴福隆, 尚海霞, 林国松, 等. 定向结晶材料高温蠕变规律研究 [J]. *力学学报*, 2002, (02): 186-191.
- [16] Im T Y, Choi T S, Park S T, et al. Study on Residual Stress in Viscoelastic Thin Film Using Curvature Measurement Method [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2004, 18 (1): 12-19.
- [17] Li Z, Gong Y, Gong X, et al. A Modified Method for Measuring Nonuniform Absolute Stress Field of Steel Members Using Ultrasonic Array Sensor[J]. *IEEE Transactionson Instrumentation and Measurement*, 74[2025-05-09]. 2025. 3550607.
- [18] 李小婧, 焦国勋, 杨晟, 等. 基于超声纵波法的 GIS 盆式绝缘子应力测量方法研究 [J]. *高压电器*, 2025, 61 (03): 80-86+95.
- [19] Yu Z, Scherjon C, Mahsereci Y, et al. A new CMOS stress sensor ratiometric readout for in-plane stress magnitude and angle detection[C]//*Sensors*. IEEE, 2017.
- [20] Huang G, Liu R, Hu S. Investigation of the mechanism for reduction of residual stress through magnetic-vibration stress relief treatment[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2023:582.
- [21] 杨栋. 薄膜基底结构变形, 应力测试方法研究[D]. 江苏大学[2025-05-17].
- [22] Yamaguchi, Ichirou. Speckle Displacement and Decorrelation in the Diffraction and Image Fields for Small Object Deformation[J]. *Optica Acta International Journal of Optics*, 2012, 28(10):1359-1376. Kahn-Jetter Z L, Chu T C. Three-dimensional displacement measurement using digital image correlation and photogrammic analysis[J]. *Experimental Mechanics*, 1990, 30:10-16.
- [23] Zink A G, Davidson R W, Hanna R B. Strain measurement in wood using a digital image correlation technique[J]. *Wood and fiber ence: journal of the Society of Wood ence and Technology*, 1995, 27(4):346-359.
- [24] Y. J. Chao, P. F. Luo, J. F. Kalthoff. An Experimental Study of the Deformation Fields Around a Propagating Crack Tip[J]. *Experimental Mechanics*, 1998, 38(2): 79-85.
- [25] 王静, 李鸿琦, 邢冬梅, 金波, 佟景伟, 李林安. 数字图像相关方法在桥梁裂缝变形监测中的应用[J]. *力学季刊*, 2003, 24(4): 512-516.
- [26] 孟利波, 金观昌, 姚学锋, 罗敏. 数字散斑相关方法及其在碳纤维复合材料压力容器变形测量中的应用[J]. *光学技术*, 2006(02): 163-167+170.
- [27] 陆鹏, 张熹. 数字图像相关法测量芯片焊点在均匀热载荷下的变形[J]. *无损检测*, 2007(11):634-636.

- [28] Passieux J C, Navarro P, Périé J N, et al. A digital image correlation method for tracking planar motions of rigid spheres: application to medium velocity impacts[J]. *Experimental Mechanics*, 2014, 54(8): 1453-1466.
- [29] Shi L, Liu D, Umeda M, et al. Fusion-Based Digital Image Correlation Framework for Strain Measurement. 2021[2025-05-17].
- [30] 潘兵, 续伯钦, 谢惠民, 等. 面内位移测量的基于梯度的数字图像相关方法[J]. *光学技术*, 2005, 31(5): 643-647.
- [31] 顾筠. 基于子区投影和 Savitzky-Golay 滤波的三维数字图像相关法应变场计算方法研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58 (12): 393-402.
- [32] 孟蒙. 数字图像相关计算参数优化与工程应用[D]. 东南大学, 2021.
- [33] 程杰. 基于数字图像相关技术的应变测量初步研究[D]. 电子科技大学, 2022.
- [34] 孙道远, 薄煜明. 基于多视觉传感器的矿井移动机器人目标定位模型研究 [J]. *金属矿山*, 2024, (11): 199-204.
- [35] Pahwa R S. Calibration of depth cameras using denoised depth images[J]. *IEEE*, 2015.
- [36] Xia R, Hu M, Zhao J, et al. Global calibration of multi-cameras with non-overlapping fields of view based on photogrammetry and reconfigurable target [J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29 (6): 065005-065005.
- [37] Li Z, Willert V. Subtleties of extrinsic calibration of cameras with non-overlapping fields of view [J]. *tm - Technisches Messen*, 2019, 86 (7-8): 433-442.
- [38] Pan X, Liu Z, Zhang G. High-Accuracy Calibration of On-Site Multi-Vision Sensors Based on Flexible and Optimal 3D Field. [J]. *IEEE Access*, 2019, 7 159495-159506.
- [39] Feng M, Jiang P, Liu Y, et al. Research on Calibration Method of Multi-camera System without Overlapping Fields of View Based on SLAM[J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2020, 1544:012047. D.
- [40] Ding G, Chen T, Sun L, et al. High Precision Camera Calibration Method Based on Full Camera Model[C]//2024 36th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). 0[2025-05-17].

附录 A

```

Sub main ()
    Call showtime
    Dim bValue As Boolean
    Dim pathStr As String
    Dim camPathStr As String
    pathStr = "D:\solidworksfiles\"
    Dim angleOrDist As Integer
    '1为角度
    '2为距离
    angleOrDist = 1

    Const pi As Double = 3.14159265358979
    Dim index As Integer
    index = 0
    Dim ii As Double, jj As Double, kk As Double 'XYZ轴转角
    Dim xx As Double, yy As Double, zz As Double 'xyz轴位移
    Dim iirange As Double, jjrange As Double, kkrange As Double '转
    角范围
    Dim xxrange As Double, yyrange As Double, zzrange As Double '位
    移范围

    iirange = 0.95: jjrange = 15: kkrange = 0 '转角
    xxrange = 0.8: yyrange = 1.2: zzrange = 2.1 '位移

    For xx = -xxrange To xxrange Step 2 * xxrange
        For yy = -yyrange To yyrange Step yyrange
            For zz = -zzrange To zzrange Step zzrange
                Call ModifyAngleAssembly(2, "距离x", 0.001 * (0 + x
                x + MyRnd(-0.1 * xx, 0.1 * xx)))
                Call ModifyAngleAssembly(2, "距离z", 0.001 * (-4.6
                + zz + MyRnd(-0.1 * zz, 0.1 * zz)))
                Call ModifyAngleAssembly(2, "距离y", 0.001 * (0 + y
                y + MyRnd(-0.1 * yy, 0.1 * yy)))
                bValue = RenderAndSaveFourCamera (Num2Picturename
                (index), pathStr)
                index = index + 1
                Debug.Print "第" & index & "张图"
            Next zz
        Next yy
    Next xx

```

```
For ii = 1 To 4 Step 1
    Debug.Print "程序运行结束"
Next ii

Call showtime

End Sub
```

附录 A 宏指令主函数代码

附录 B

```
Sub Modifyfast()  
    '快捷修改xyz位移以及xyz转角  
    Const pi As Double = 3.14159265358979  
    Dim angleOrDist As Integer  
    '1为角度  
    '2为距离  
  
    Dim ii As Double, jj As Double, kk As Double 'XYZ轴转角  
    Dim xx As Double, yy As Double, zz As Double 'xyz轴位移  
    ii = 0: jj = 0: kk = 0 '转角  
    xx = -1: yy = 2: zz = -4.6 - 2.5 '位移xx = 1.48: yy = 18  
    angleOrDist = 1  
    Call ModifyAngleAssembly(angleOrDist, "角度x", ii * pi / 180)  
    Call ModifyAngleAssembly(angleOrDist, "角度y", jj * pi / 180)  
    Call ModifyAngleAssembly(angleOrDist, "角度z", kk * pi / 180)  
    angleOrDist = 2  
    Call ModifyAngleAssembly(angleOrDist, "距离x", 0.001 * xx)  
    Call ModifyAngleAssembly(angleOrDist, "距离y", 0.001 * yy)  
    Call ModifyAngleAssembly(angleOrDist, "距离z", 0.001 * zz)  
End Sub
```

附录 B 快速修改函数

致 谢

本人对参与帮助该篇论文完成的所有人抱以最真挚的感激之情，感谢陈果教授对我尽心尽力的指导，您在学术上的严谨态度令我折服，值得我潜心学习；感谢张旭师兄给予我的无私帮助，感谢师兄不断包容我的过失，并且即使在百忙之中也会抽出时间给予我帮助而且不求回报；同时感谢其他各位答疑老师对我毕业设计的协助。

大学时光如白驹过隙，期间的各种事情如同昨天发生的一样。当初作为青涩的高中生出入大学的我，对未来充满期待与迷茫，期待未来新的开始，对新的开始也抱有迷茫。我很感谢在那段迷茫期帮助我，鼓励我建立人生目标及价值观的老师与同学，是他们带我走出那是我人生中至今最为迷茫的时期。特别感谢在那段时间孙献策导师提供的帮助，您严格的管理方式，正直的为人作风，令所有同学折服。之后我进入航校学习阶段，我特别感谢我的师父钱胤达，以及我的师兄弟们，是你们陪我熬过了那段令我难忘的日子，磨砺我的心性。虽然我没能完成师父期望，但我然会努力在未来的人生中活出自己的一份精彩。回到校园后，我很感激同学们对我帮助，是你们的热情带我走出了那段抑郁的时期，让我重新找回了自信，找回了自己。

我将怀有更加饱满的学习热情以及更加成熟的心态面对未来在社会上、生活中以及工作中的各种问题，争取作为一名南京航空航天大学辛勤学子为国家，为社会尽自己些许的绵薄之力。希望在外来更广阔的天地中找到能让自己持续发光发热一席之地。

在此再次感谢各位在我至今人生中最难忘的时期给予我的帮助与支持，谢谢各位。