

## 摘要

### 基于双目视觉的手持式结构光测量技术研究

目前,三维测量技术在高速列车、航空航天等精密制造领域应用广泛,其中手持式结构光测量技术因具备操作灵活、测量范围广、测量精度高等优点而受到欢迎。但受限于国外对技术垄断等原因,国内对该项技术的研究起步较晚,发展缓慢,并且针对箱体、机架等大纵深被测物测量结果差强人意,难以达到高精度三维测量的要求。因此本文对基于双目视觉的手持式结构光测量技术进行研究,具体内容如下:

(1) 构建手持式结构光测量系统。系统由双目相机、平面靶标、结构光传感器等所组成,利用双目相机对刚性连接的平面靶标和结构光传感器进行位姿求解,从而将结构光传感器测量得到的被测物局部轮廓数据变换至统一的世界坐标系下,系统的建立为进行高效的测量工作打下基础。

(2) 提出一种针对多景深目标的高精度视觉成像模型及其标定方法。利用该方法求解得到不同深度下相机参数真值并应用于实际测量活动中,有效解决了高精度大纵深三维测量领域内视觉测量精度难以进一步提升的问题,并设计验证实验以证明算法效果。

(3) 根据平面靶标及结构光光条的图像特点设计了对应的图像处理方法。首先利用灰度变换、图像滤波等方法进行预处理以去除噪声干扰,其次在传统目标检测、圆形标志点轮廓及中心坐标提取等算法分析工作基础上,综合选用了YOLO神经网络、霍夫圆变换算法提取有效信息。

(4) 进行系统测量方法研究。建立相机坐标系、平面靶标坐标系、结构光平面坐标系并逐一求解任意两者间变换关系,其中在分析经典结构光标定方法后,提出了一种改进的凸台型立体靶标用于求解相机坐标系——结构光平面坐标系间刚体变换矩阵。最后将联合标定结果应用于实际三维测量活动中,通过对测量结果的精度分析证明本系统的可靠性及优越性。

实验结果表明,利用本文提出的相机标定方法求得参数对平面靶标进行位姿求解时,精度较经典相机标定方法提升接近1倍,且本文提出的图像处理方法可快速且精确的提取ROI区域、圆形标志点轮廓及中心坐标,当将系统联合标定

求解的刚体变换矩阵应用于实际三维测量活动中时，多次测量平均精度可达0.03mm，满足工业测量要求。总体来说，本系统可以快速、精准、高效的对大尺寸被测物进行整体测量。

**关键词：**

双目视觉，相机标定，相机光心，三维测量

## Abstract

### **Research on handheld structured light measurement technology based on binocular vision**

At present, three-dimensional measurement technology is widely used in high-speed trains, aerospace and other precision manufacturing fields, in which handheld structural light measurement technology is welcomed because of the advantages of flexible operation, wide measurement range, measurement accuracy and so on. However, due to foreign monopoly of technology and other reasons, the domestic research on this technology started late, the development is slow, and for the box, frame and other large depth measured object measurement results are poor, it is difficult to achieve the requirements of high-precision three-dimensional measurement. Therefore, this paper studies the handheld structured light measurement technology based on binocular vision as follows.

(1) A handheld structured light measurement system is constructed. The system consists of a binocular camera, a planar target, and a structured light sensor, etc. The binocular camera is used to solve the positional solution of the rigidly connected planar target and the structured light sensor, so that the local contour data of the object measured by the structured light sensor can be transformed to a unified world coordinate system, laying the foundation for efficient measurement work.

(2) A high-precision visual imaging model for multi-depth-of-field targets and its calibration method are proposed. The method is solved to obtain the true values of camera parameters at different depths and applied to actual measurement activities, which effectively solves the problem that it is difficult to further improve the visual measurement accuracy in the field of high-precision large-depth 3D measurement, and designs verification experiments to prove the algorithm effect.

(3) The corresponding image processing methods are designed according to the image characteristics of planar targets and structured light bars. Firstly, we use grayscale transformation and image filtering methods for pre-processing to remove noise interference, and secondly, based on the analysis work of traditional algorithms for target detection, circular marker point contour and center coordinate extraction, YOLO neural network and Hough circle transformation algorithms are integrated and

selected to extract effective information.

(4) The systematic measurement method is studied to establish the camera coordinate system, the plane target coordinate system, and the structured light plane coordinate system and solve the transformation relationship between any two one by one. Among them, after analyzing the classical structured light calibration method, a modified tab-type stereo target is proposed for solving the rigid body transformation matrix between the camera coordinate system - structured light plane coordinate system. Finally, the joint calibration results are applied to the actual 3D measurement activities, and the reliability and superiority of this system are proved by the accuracy analysis of the measurement results.

The experimental results show that the accuracy of solving the attitude of the planar target with the parameters obtained by the camera calibration method proposed in this paper is nearly 1 times better than that of the classical camera calibration method. The image processing method proposed in this paper can quickly and accurately extract the ROI area, circular marker point contour and center coordinates. When the rigid body transformation matrix solved by the joint calibration of the system is applied to the actual 3D measurement activities, the average accuracy of multiple measurements can reach 0.03mm, which meets the industrial measurement requirements. Overall, the system can measure the whole object quickly, accurately and efficiently.

**Key words:**

Binocular vision, Camera calibration, Camera light center, Three-dimensional measurement

## 关于学位论文使用授权的声明

本人完全了解吉林大学有关保留、使用学位论文的规定，同意吉林大学保留或向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权吉林大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。

（保密论文在解密后应遵守此规定）

论文级别：☒硕士 ☐博士

学科专业： 电子信息

论文题目： 基于双目视觉的手持式结构光测量技术研究

作者签名：侯永光

指导教师签名：刘长英

2023 年 5 月 28 日

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 摘 要.....                    | I   |
| Abstract.....               | III |
| 第 1 章 绪论.....               | 1   |
| 1.1 研究背景及意义 .....           | 1   |
| 1.1.1 课题来源 .....            | 1   |
| 1.1.2 研究背景 .....            | 1   |
| 1.1.3 研究意义 .....            | 2   |
| 1.2 国内外技术研究现状 .....         | 3   |
| 1.2.1 手持式结构光测量技术国外研究现状..... | 3   |
| 1.2.2 手持式结构光测量技术国内研究现状..... | 4   |
| 1.3 论文主要研究内容 .....          | 5   |
| 第 2 章 手持式结构光测量系统的设计 .....   | 7   |
| 2.1 系统组成及测量原理 .....         | 7   |
| 2.1.1 系统组成 .....            | 7   |
| 2.1.2 系统测量原理 .....          | 9   |
| 2.2 系统硬件设计 .....            | 17  |
| 2.2.1 视觉传感器选型 .....         | 17  |

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 2.2.2 结构光传感器选型 .....              | 18 |
| 2.3 平面靶标结构设计 .....                | 20 |
| 2.3.1 标志点类型 .....                 | 20 |
| 2.3.2 标志点数量及分布 .....              | 21 |
| 2.4 本章小结 .....                    | 24 |
| 第 3 章 手持式结构光测量系统的相机标定 .....       | 25 |
| 3.1 经典相机标定方法及后续研究 .....           | 25 |
| 3.1.1 经典相机标定方法 .....              | 25 |
| 3.1.2 经典相机标定方法的后续研究 .....         | 26 |
| 3.2 相机光学系统中心位置分析 .....            | 27 |
| 3.3 针对多景深目标的高精度视觉成像模型及其标定方法 ..... | 29 |
| 3.3.1 标定板深度信息计算 .....             | 31 |
| 3.3.2 标定板图像分组聚类 .....             | 33 |
| 3.3.3 特定深度相机内参真值估计 .....          | 34 |
| 3.3.4 任意深度物点对应相机内参计算 .....        | 35 |
| 3.3.5 精度评估 .....                  | 35 |
| 3.4 本章小结 .....                    | 37 |
| 第 4 章 手持式结构光测量系统测量方法研究 .....      | 38 |
| 4.1 系统各坐标系的建立 .....               | 38 |

---

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 4.2 平面靶标标定 .....                | 39 |
| 4.2.1 图像预处理 .....               | 39 |
| 4.2.2 目标检测 .....                | 40 |
| 4.2.3 标志点提取 .....               | 42 |
| 4.2.4 相机坐标系与平面靶标坐标系间关系求解 .....  | 46 |
| 4.3 结构光标定 .....                 | 47 |
| 4.3.1 经典结构光标定方法 .....           | 47 |
| 4.3.2 基于凸台型立体靶标的结构光标定方法 .....   | 48 |
| 4.3.3 相机坐标系与结构光平面坐标系间关系求解 ..... | 49 |
| 4.4 系统测量方法研究 .....              | 50 |
| 4.5 本章小结 .....                  | 50 |
| 第 5 章 实验与分析 .....               | 51 |
| 5.1 实验平台搭建 .....                | 51 |
| 5.2 相机标定实验 .....                | 52 |
| 5.2.1 稠密拍摄标定板图像并聚类 .....        | 52 |
| 5.2.2 相机内参真值估计 .....            | 53 |
| 5.2.3 相机参数精度分析 .....            | 57 |
| 5.3 系统实际测量实验 .....              | 61 |
| 5.4 本章小结 .....                  | 63 |

|                   |    |
|-------------------|----|
| 第 6 章 总结与展望 ..... | 64 |
| 6.1 论文总结 .....    | 64 |
| 6.2 研究展望 .....    | 65 |
| 参考文献.....         | 66 |
| 作者简介及科研成果 .....   | 71 |
| 致 谢.....          | 72 |

# 第 1 章 绪论

## 1.1 研究背景及意义

### 1.1.1 课题来源

本课题来源于吉林省科技发展计划项目“高速动车组车轴划痕视觉检测关键技术研究”，项目编号 20200201059JC。

### 1.1.2 研究背景

随着现代制造业的快速发展，精密制造技术受到了人们越来越多的关注。在高速列车、航空航天等精密制造领域中利用计算机技术实现数字化测量，特别是以三维形貌数据为基准的三维测量技术发展迅猛，已逐渐成为精密制造技术研究的一个重要方向<sup>[1]</sup>。

现代制造业中实际应用的三维测量方法可大致分为两类：接触式测量与非接触式测量。接触式主要以三坐标测量机、光笔式测量系统等为代表，其中三坐标测量机作为现代的精密测量仪器，于 1960 年发展至今，在科学技术的推动下愈加自动化、智能化<sup>[1]</sup>。其上安装的测头可在工作空间范围内运动并实时获取测量数据和包含测头位置的三维空间数据，进一步利用软件对被测零件的几何数据进行推导。三坐标测量机因其精度高、稳定性强、通用性强等特点在模具制造、汽车航空等行业应用广泛，但该测量方法高昂的测量成本、复杂的操作步骤等缺点限制了其应用场景，一般只适用于对零件部分表面进行检测等测量数据较少的情况。



图 1.1 光笔式测量系统

光笔式测量系统如图 1.1 所示, 主要由视觉传感器、包含一定数量标志点的光笔和计算机所组成, 因其体积小、操作灵活、测量范围广等特点受到了广泛欢迎<sup>[2]</sup>, 但该系统的问题在于逐点测量的方式效率较低, 测量范围有限, 不适合对被测物进行整体测量。

非接触式主要以结构光测量技术、激光雷达测量系统等为代表, 其中结构光测量技术根据被测物不同可分为点结构光、单线结构光、多线结构光等, 工作原理如图 1.2 所示, 通过其内部激光发射器发射激光束, 在被测物表面发生漫反射后再被内部接收器所接收, 从而得到被测物三维轮廓数据<sup>[3-5]</sup>。结构光测量技术因实时性和抗干扰能力强、单次测量范围广等特点被广泛应用, 但在实际测量活动中, 其面对大尺寸被测物时仍无法一次得到全部表面轮廓信息, 测量精度及效率有待进一步提升。激光雷达测量系统自 1965 年研究至今, 在机器人自主导航、逆向工程、文物保护等领域广受欢迎, 特别是在工业生产中通过获取零件的三维点云数据, 大大缩短产品的设计周期, 从而提高研发效率<sup>[6]</sup>。但由于激光雷达测量系统对大尺寸被测物的测量精度较低, 因此不适用于精密制造行业。

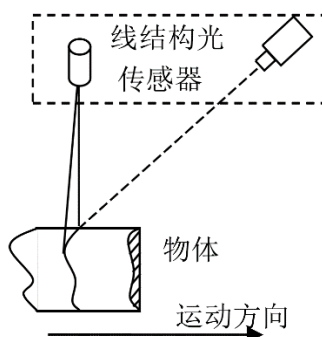


图 1.2 结构光测量工作原理

### 1.1.3 研究意义

传统三维测量方法已逐渐不能满足精密制造技术的需要, 人们愈加追逐一种针对大尺寸被测物快速、便携、高精度的三维测量方式。通过融合传统三维测量方法中各自优点, 同时规避自身缺陷, 国内外学者开始研究基于视觉传感器的手持式结构光测量技术: 在结构光传感器上安装包含一定数量标志点的靶标构成结构光测量单元, 通过由视觉传感器所构成的视觉测量单元识别和定位标志点, 计算结构光测量单元的位置及位姿变化, 从而将其采集到的被测物局部三维轮廓数

据整合至统一坐标系下。如图 1.3 所示，基于视觉传感器的手持式结构光测量技术既具备接触式测量方法中光笔式测量系统操作灵活、测量范围广的特点，又具备非接触式测量方法中结构光测量技术单次测量效率高的特点，在精密制造领域尤其是对大尺寸被测物进行整体测量活动中具有重要的研究意义和广泛的市场应用价值。

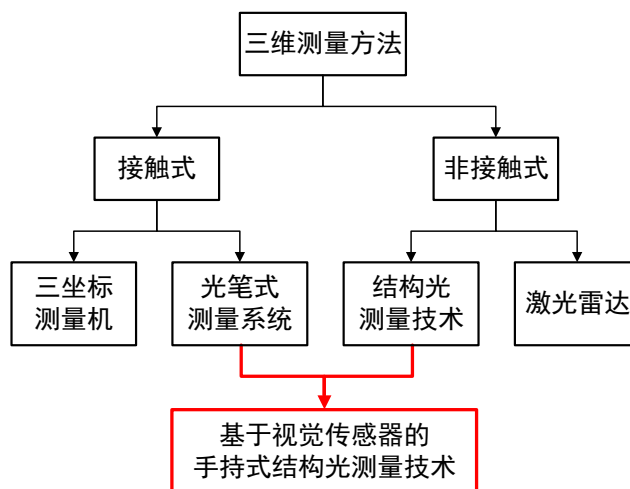


图 1.3 基于视觉传感器的手持式结构光测量技术特点

## 1.2 国内外技术研究现状

### 1.2.1 手持式结构光测量技术国外研究现状

基于视觉传感器的手持式结构光测量技术早期就被国外发掘了应用价值，经过长时间研究已然发展的相对成熟，相应的成型产品也被畅销全球。其中由德国 GOM 公司研制的 Atos 系列三维测量系统利用先进的相机定位技术，大大提升了被测物三维轮廓数据拼接精度及测量效率，方便后续点云处理工作<sup>[7]</sup>。其中新一代 Atos-Q 型三维扫描系统如图 1.4 所示，测量范围高达 10m，点云精度提升至 0.01mm/0.5m，单次扫描时间提升至 8s。



图 1.4 德国 GOM 公司研制的 Atos-Q 三维测量系统

加拿大 Polhemus 公司研制的 FastSCAN 三维测量系统如图 1.5 所示,通过操作人员手持对被测物进行不同角度的自由测量,以获得被测物的三维轮廓数据<sup>[8]</sup>。该系统所测得的三维轮廓数据误差可缩小至 0.015mm 以内,并在动画人物制作及多媒体等领域应用较广,可针对人的面部信息进行三维重建工作。



图 1.5 加拿大 Polhemus 公司研制的 FastSCAN 三维测量系统

加拿大 CreaForm 公司研制的新一代 MetraSCAN 3D 三维测量系统由多线结构光传感器、球形靶标、双摄像机和计算机所组成,如图 1.6 所示。由多线结构光传感器和球形靶标组成的结构光测量单元对被测物进行测量,双摄像机构成的视觉测量单元实时识别和定位球形靶标,计算结构光测量单元的位置信息及姿态变化,并将其采集到的被测物局部三维轮廓信息统一至世界坐标系下<sup>[9]</sup>。该系统测量速度高达 480000 点/s,测量精度高达 0.02mm,整机质量轻便,操作简单,操作人员可随意改变测量角度而不影响测量质量,真正完美实现了动态测量。



图 1.6 加拿大 CreaForm 公司研制的 MetraSCAN 3D 三维测量系统

## 1.2.2 手持式结构光测量技术国内研究现状

由于国外对技术垄断等原因,国内针对手持式结构光测量技术的研究开始于本世纪初,由部分国内企业自主研发的产品逐渐走向市场。华朗三维公司研制的手持式三维测量系统由 635mm 的红色线结构光和两个 CCD 相机所组成<sup>[10]</sup>,如图 1.7 所示。操作简单,拥有自校准技术,且可根据被测物的大小调节测量范围。



图 1.7 华朗三维公司研制的 A22 三维测量系统

成立于 2002 年的北京天远三维公司是国内另一家较早开始自主研发手持式三维测量系统的公司，经过漫长的技术攻关，如今其设计的 FreeSCAN UE 已然达到世界先进水平<sup>[4]</sup>，如图 1.8 所示。



图 1.8 北京天远三维公司研发的 FreeSCAN UE 三维测量系统

### 1.3 论文主要内容

本论文针对精密制造领域大尺寸被测物高效、快速、高精度的三维测量要求，学习了国内外相关学者的技术研究成果，对基于双目视觉的手持式结构光测量技术进行了研究，具体内容包括：首先，通过对手持式结构光测量系统的硬件选型和对平面靶标的结构设计，完成了对该三维测量系统的平台搭建工作；其次，针对视觉测量单元对处于不同深度的平面靶标测量结果存在差异、测量精度有待提升的问题，提出了一种针对多景深目标的高精度视觉成像模型及其标定方法；最后，通过对系统各个坐标系的建立以及平面靶标、结构光光平面标定工作，完成对手持式结构光测量系统的测量方法研究，将结构光传感器在不同角度下获取的被测物轮廓信息转换至统一的世界坐标系下，从而获得完整的被测物轮廓信息。

本文结构安排如下：

第1章是绪论。这一章首先介绍了三维测量技术在精密制造领域的重要性；对传统三维测量方法和现代手持式结构光测量技术进行了阐述和分析，并通过对该技术国内外研究现状的汇总，引申出本文的研究意义；最后简要叙述了本文的研究内容。

第2章是手持式结构光测量系统的设计。这一章首先介绍了该测量系统的组成及双目视觉、结构光三维测量原理；然后对系统硬件部分的视觉传感器和结构光传感器进行选型；最后通过参考相关研究成果，对用于计算结构光传感器位置及姿态信息的平面靶标进行结构设计。

第3章是手持式结构光测量系统的相机标定。这一章首先介绍了经典相机标定方法及国内外学者的后续研究；然后通过对相机光学系统中心位置的分析，总结了视觉测量单元在对大纵深目标时测量精度偏低的原因，并提出一种针对多景深目标的高精度视觉成像模型及其标定方法<sup>[12]</sup>。

第4章是手持式结构光测量系统测量方法研究。这一章首先建立相机坐标系、平面靶标坐标系、结构光光平面坐标系；然后通过灰度变换和图像滤波进行预处理消除噪声、YOLO神经网络检测感兴趣区域、霍夫圆变换算法提取标志点轮廓及中心坐标，进而完成对平面靶标的标定工作；进一步的分析传统结构光标定方法并加以改进<sup>[13]</sup>，以完成对结构光光平面标定工作；最后进行系统测量方法研究，计算相机坐标系、平面靶标坐标系与结构光光平面坐标系间的转换关系并应用于实际三维测量活动中。

第5章是实验与分析。这一章首先完成实验软硬件平台的搭建；然后根据第3章所述进行相机标定实验并利用计算相对误差的方式验证相机参数精度；最后进行系统实际测量实验，分别计算第一、第二、第三转换关系并应用于实际测量，通过计算测量精度证明该系统的可靠性及优越性。

第6章是总结与展望。这一章总结了本文的全部内容，并在未来改进及研究方向上提出了展望。

## 第2章 手持式结构光测量系统的设计

本文提出了一种基于双目视觉的手持式结构光测量系统,通过将平面靶标和结构光传感器刚性连接组成手持式结构光测量单元,利用双目相机计算其位置及姿态信息,从而将结构光传感器扫描得到的被测物局部三维轮廓数据整合至统一的世界坐标系下,实现高效、快速、高精度的三维测量。在手持式结构光测量系统中,硬件性能将决定设备的整体质量,视觉传感器、结构光传感器、平面靶标的合理选型和设计对提高系统精度有着重要的意义,因此本章将对系统组成及测量原理、系统硬件的选型及设计工作进行介绍。

### 2.1 系统组成及测量原理

#### 2.1.1 系统组成

本系统主要由计算机、双目相机、结构光传感器、平面靶标等组成,如图2.1所示。其中由平面靶标和结构光传感器刚性连接组成的手持式结构光测量单元,对大尺寸被测物进行局部的三维轮廓扫描;由双目相机组成的视觉测量单元对平面靶标上的标志点进行定位和姿态识别,从而将手持式结构光测量单元在不同位置获得的被测物三维轮廓数据整合至统一的世界坐标系下。本系统通过这样的设计,既融合了传统光笔式测量系统操作灵活、测量范围广和结构光测量技术单次测量效率高的特点,又巧妙的避开了传统光笔式测量系统逐点测量效率低、不适用于大尺寸被测物和结构光测量技术测量范围有限等问题,从而实现了高效的动态测量。

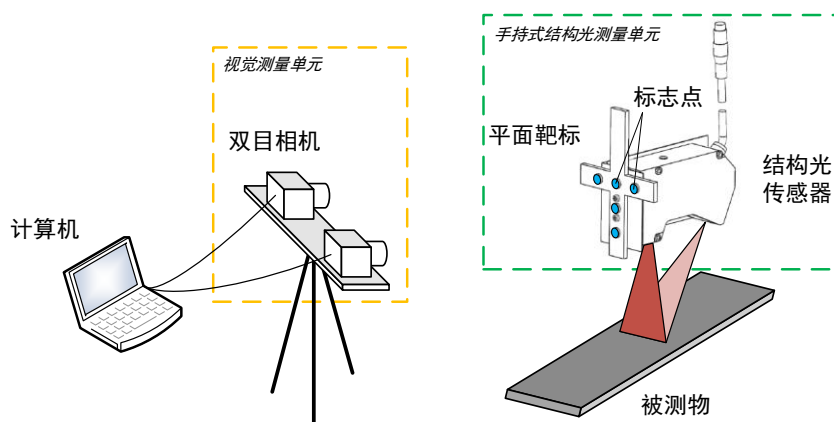


图 2.1 基于双目视觉的手持式结构光测量系统组成示意图

本系统测量流程图如 2.2 所示，共分为准备阶段和测量阶段两部分。在准备阶段中，首先将平面靶标与结构光传感器刚性连接以组成手持式结构光测量单元，固定双目相机、手持式结构光测量单元间相互位置并保证平面靶标上的标志点全部在双目相机的视野范围内；其次利用本文提出的针对多景深目标的高精度视觉成像模型及其标定方法<sup>[12]</sup>对双目相机建立成像模型，求解相机针对不同深度成像目标时的内外参数及畸变系数；然后对平面靶标、结构光光平面分别进行标定，通过双目相机捕获平面靶标标志点及结构光光条从而对其进行姿态识别，求解相机——平面靶标坐标系及相机——结构光光平面坐标系间变换关系；最后对系统进行联合标定，求解平面靶标——结构光光平面坐标系间变换关系。在测量阶段中，保持手持式结构光测量单元结构不变，固定双目相机位置并保证在测量活动中平面靶标标志点全程在双目相机的视野范围内；手持式结构光测量单元在某一角度对被测物进行三维轮廓扫描，得到被测物在结构光光平面下的局部三维轮廓数据；通过准备阶段求解出的平面靶标——结构光光平面坐标系间变换关系，可得到平面靶标坐标系下的被测物局部三维轮廓数据；进而通过双目相机拍摄当前平面靶标标志点位置，计算相机——平面靶标坐标系当前变换关系，得到相机坐标系下的被测物局部三维轮廓数据；最后如此反复，手持式结构光测量单元在不同角度对被测物进行测量，在世界坐标系中便得到被测物整体三维轮廓数据。

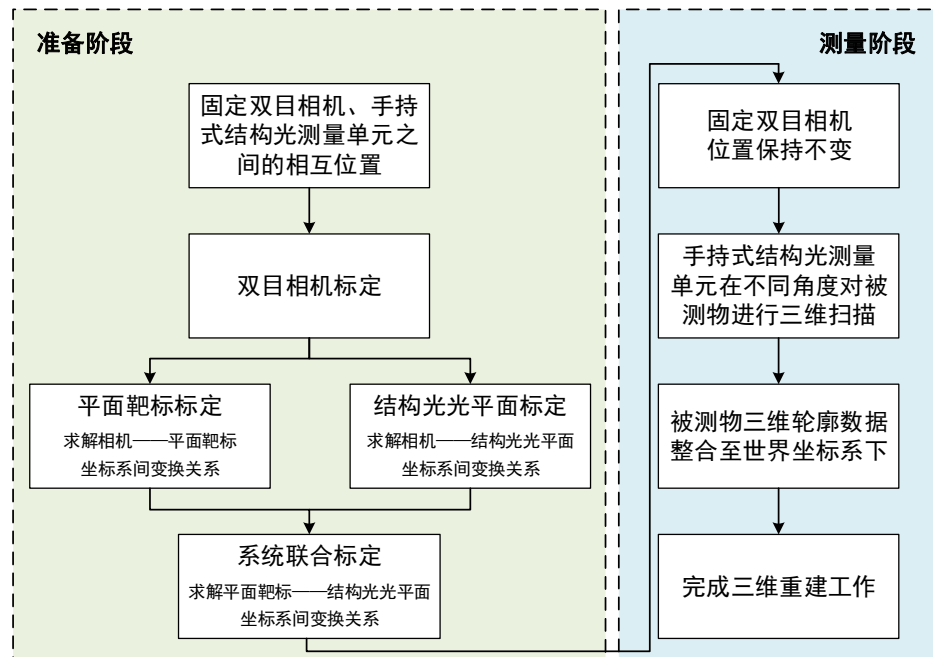


图 2.2 基于双目视觉的手持式结构光测量系统工作流程图

### 2.1.2 系统测量原理

### (1) 相机成像原理

相机成像模型是对三维空间物体成像至相机成像平面这一物理过程的数学描述。针孔成像模型是对相机光学成像模型的简化，在计算机视觉领域中被广泛使用<sup>[14, 15]</sup>。针孔成像模型如图 2.3 所示。

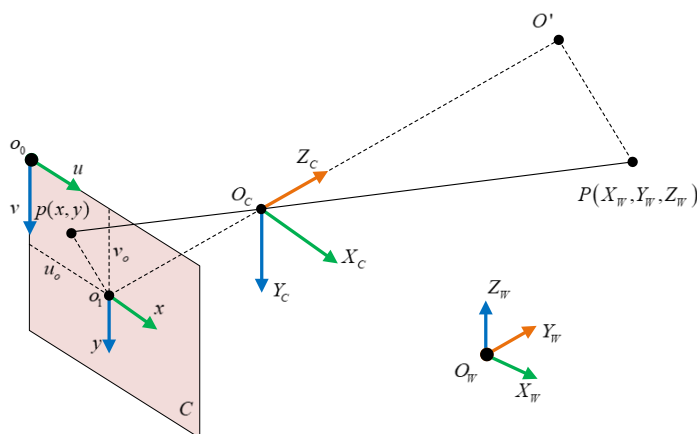


图 2.3 针孔成像模型

相机镜头是由一组透镜所组成的，图 2.3 中点  $O_c$  为相机透镜组中心，亦称为相机光心，即针孔成像模型中针孔的位置。 $C$  为相机成像平面，与直线  $o_1O'$  相互垂直。焦距  $f$  表示焦点至相机光心的距离，即为图中线段  $o_1O_c$  的长度。点  $p$  为三维空间中点  $P$  在相机成像平面  $C$  上所成的像，且线段  $o_1p$  与线段  $O'P$  相互平行。 $O_w - X_wY_wZ_w$  是以真实世界的某一物体作为参考物所建立的世界坐标系。 $O_c - X_cY_cZ_c$  是以相机光心  $O_c$  为原点， $Z_c$  轴与直线  $o_1O'$  相重合所建立的相机坐标系。 $o_1 - xy$  是建立在像平面上的二维像平面坐标系。由于在处理相机图像时，图像的单位是像素而不是实际空间中的长度单位，因此以图像左上角为原点建立图像坐标系  $o_0 - uv$ 。像平面坐标系与图像坐标系间关系如图 2.4 所示。

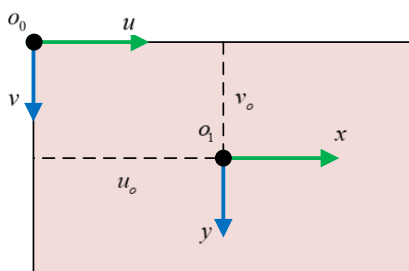


图 2.4 像平面坐标系与图像坐标系关系

图 2.4 中, 令  $d_x$  和  $d_y$  分别表示图像坐标系中每一个像素在  $u$  轴和  $v$  轴方向的物理尺寸,  $u_0$ 、 $v_0$  表示像平面中主点位置坐标,  $o_1$  在图像坐标系下坐标为  $(u_0, v_0)$ , 则像平面坐标系与图像坐标系间转换关系如下。

$$\begin{cases} u = \frac{x}{d_x} + u_0 \\ v = \frac{y}{d_y} + v_0 \end{cases} \dots\dots\dots (2.1)$$

将式(2.1)表达为矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{d_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.2)$$

此外, 从图 2.3 中由相似三角形定理不难得出, 相机坐标系下空间任意一点  $P(X_C, Y_C, Z_C)$  与其在像平面坐标系上所成像  $p(x, y)$  的关系如下。

$$\begin{cases} \frac{x}{X_C} = \frac{f}{Z_C} \\ \frac{y}{Y_C} = \frac{f}{Z_C} \end{cases} \dots\dots\dots (2.3)$$

将式(2.3)表达为矩阵形式为

$$Z_C \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.4)$$

综合式(2.2)和式(2.4)可得

$$Z_C \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{d_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{f}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.5)$$

式(2.5)中,  $K$  为相机内参矩阵, 只与相机的内部结构有关。

在针孔成像模型中,空间任意一点  $P$  在世界坐标系下的坐标可通过刚体变换转换至相机坐标系下。如图 2.3 中,空间任意一点  $P$  在世界坐标系下的坐标  $P(X_w, Y_w, Z_w)$  与相机坐标系下的坐标  $P(X_c, Y_c, Z_c)$  间变换关系如下。

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + T \quad \text{..... (2.6)}$$

式(2.6)中,  $R$  是一个  $3 \times 3$  的旋转矩阵,  $T$  是一个  $3 \times 1$  的平移矢量。综合式(2.5)和式(2.6)可得

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{f}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [R \quad T] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = K [R \quad T] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{..... (2.7)}$$

式(2.7)中,  $[R \quad T]$  为相机外参矩阵, 只表示世界坐标系与相机坐标系间的转换关系。至此, 我们便得到了世界坐标系与图像坐标系之间的关系。

此外, 在实际生活中, 由于相机的生产工艺不完善, 导致其制造、安装过程中会造成参数误差, 使得相机存在非线性畸变, 因此针孔成像模型不能准确的描述最终的成像关系<sup>[16-18]</sup>。为使相机参数求取结果更加准确, 需引入非线性畸变, 主要包括径向畸变和切向畸变。径向畸变就是沿着透镜半径方向分布的畸变, 光线在透镜边缘处产生的径向畸变最为严重。我们常用  $r=0$  处的泰勒级数展开式前三项来近似描述径向畸变, 即  $k_1$ ,  $k_2$  和  $k_3$ 。

$$\begin{cases} x_u = x_d (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ y_u = y_d (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \end{cases} \quad \text{..... (2.8)}$$

切向畸变主要是由于相机透镜制造缺陷导致的, 即相机透镜与成像平面不平行, 通常由参数  $p_1$  和  $p_2$  进行描述。

$$\begin{cases} x_u = x_d + 2p_1 y_d + p_2 (r^2 + 2x_d^2) \\ y_u = y_d + p_1 (r^2 + 2y_d^2) + 2p_2 x_d \end{cases} \quad \text{..... (2.9)}$$

式(2.9)中,  $r^2 = x_d^2 + y_d^2$ 。

## (2) 基于双目视觉的三维测量原理

为了更加直观地表示成像模型中各点间关系，我们将相机成像平面  $C$  沿直线  $o_1O'$  平移至相机光心  $O_C$  的对侧，便基于相机成像模型得到了双目相机成像模型，如图 2.5 所示。

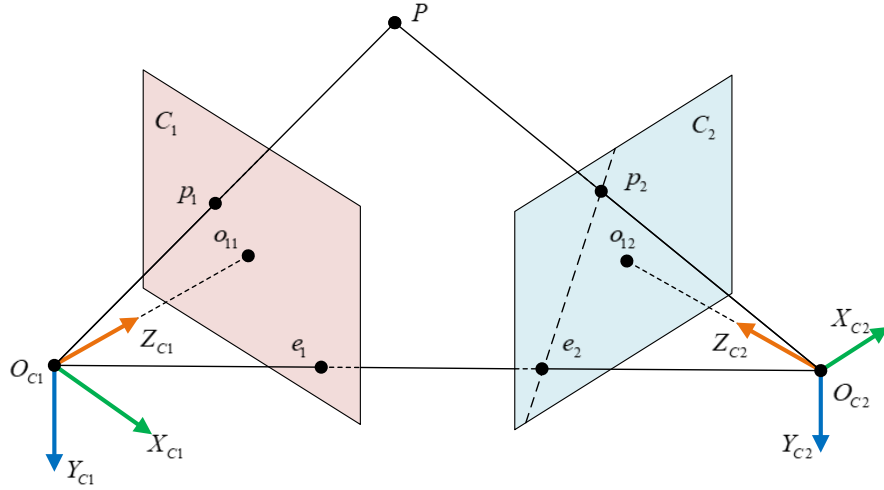


图 2.5 双目相机成像模型

图 2.5 中，分别对左右相机建立各自相机坐标系为  $O_{C1}-X_{C1}Y_{C1}Z_{C1}$  和  $O_{C2}-X_{C2}Y_{C2}Z_{C2}$ 。 $O_{C1}$ 、 $O_{C2}$  间连线被称作基线，基线与左右像平面  $C_1$ 、 $C_2$  间交点  $e_1$ 、 $e_2$  被称作极点。空间中任意一点  $P$  在左右像平面上所成像点为  $p_1$ 、 $p_2$ ，直线  $p_1e_1$ 、 $p_2e_2$  被称作极线。

在计算机视觉领域中，我们习惯性的将左侧相机的相机坐标系设定为系统坐标系，右侧相机的相机坐标系通过平移、旋转等运算变换至系统坐标系下<sup>[19]</sup>。而双目匹配的过程，就是在像平面  $C_2$  上寻找  $p_1$  的匹配点  $p_2$  的过程。若是在像平面  $C_2$  全图范围内寻找匹配点，会增加系统计算负担、匹配准确度受到影响，研究人员发现  $p_1$ 、 $p_2$  共存于三角形  $PO_{C1}O_{C2}$  且三角形  $PO_{C1}O_{C2}$  与像平面  $C_2$  交于极线  $p_2e_2$ ，因此若只在像平面  $C_2$  中极线  $p_2e_2$  上搜索匹配点  $p_2$  则会降低计算成本、节约时间。但即便如此，对像平面  $C_1$  上的点  $p_1$  求解其在像平面  $C_2$  上对应的极线仍是一个不小的工作量，并且一条斜线也不能很好的约束匹配点  $p_2$  的范围，因此极线校正的概念应运而生，如图 2.6 所示。

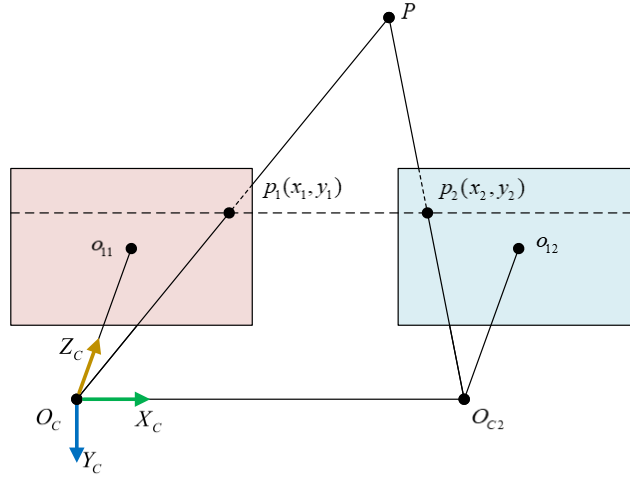


图 2.6 经极线校正后的双目相机成像模型

极线校正顾名思义为将  $p_1e_1$ 、 $p_2e_2$  两条斜线校正至同一直线，即点  $p_1$  与点  $p_2$  的横坐标相同。这样在进行双目匹配时，仅需在像平面  $C_2$  中搜索与点  $p_1$  横坐标相同的极线  $p_2e_2$  下匹配点  $p_2$  的位置即可，大大提高了运算效率。

进一步的，我们分别俯视与侧视经极线校正后的双目成像模型以计算空间点  $P$  在相机坐标系下的三维坐标，经极线校正后的双目成像模型俯视图如图 2.7 所示。

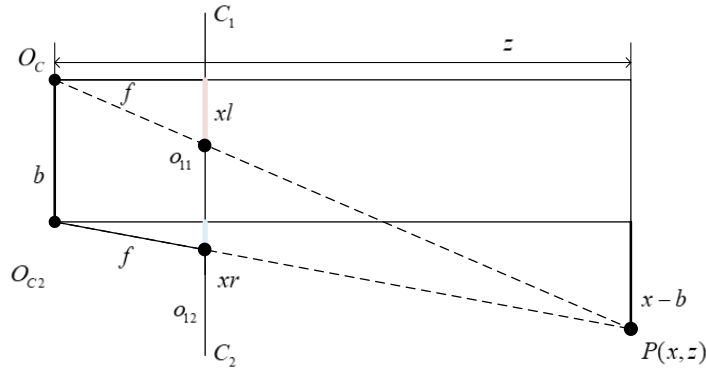


图 2.7 经极线校正后的双目成像模型俯视图

图 2.7 中，通过相似三角形定理不难得出有以下关系式。

$$\begin{cases} \frac{z}{f} = \frac{x}{xl} \\ \frac{z}{f} = \frac{x-b}{xr} \\ \frac{z}{f} = \frac{y}{yl} = \frac{y}{yr} \end{cases} \dots\dots\dots (2.10)$$

整理式(2.10), 我们便可得出空间任意一点  $P$  在双目相机坐标系下的三维坐标, 即双目视觉三维测量原理。

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \frac{xl * z}{f} \\ y = \frac{yl * z}{f} \\ z = \frac{f * b}{(xl - xr)} \end{array} \right. \dots\dots\dots (2.11)$$

### (3) 结构光测量原理

结构光传感器利用基于激光三角测量的光切法对被测物进行轮廓测量。首先结构光传感器中的激光光源在被测物表面打出一条明亮的激光线,经过在其表面发生漫反射后被结构光传感器中的 CCD 传感器接收,并转化为占据一定像素宽度的激光条纹图像信号,其中激光条纹图像信号的每一个像素点与真实三维空间点一一对应<sup>[20]</sup>。通过数学模型可将激光光源打出的激光线与 CCD 传感器接收的激光条纹建立起三角几何关系,进一步推导可得到激光条纹图像信号中像素点与被测物表面真实的三维空间点间函数关系式,人们将基于此种数学模型的测距方法称作激光三维测量法<sup>[21, 22]</sup>。

结构光传感器可按激光射入角度不同分为斜射式与直射式两种，具有不同的性能差异：斜射式能更好的适应复杂的测量环境，而直射式作为斜射式的特例，具有更高的测量精度和稳定性。其中激光直射式示意图如图 2.8 所示。

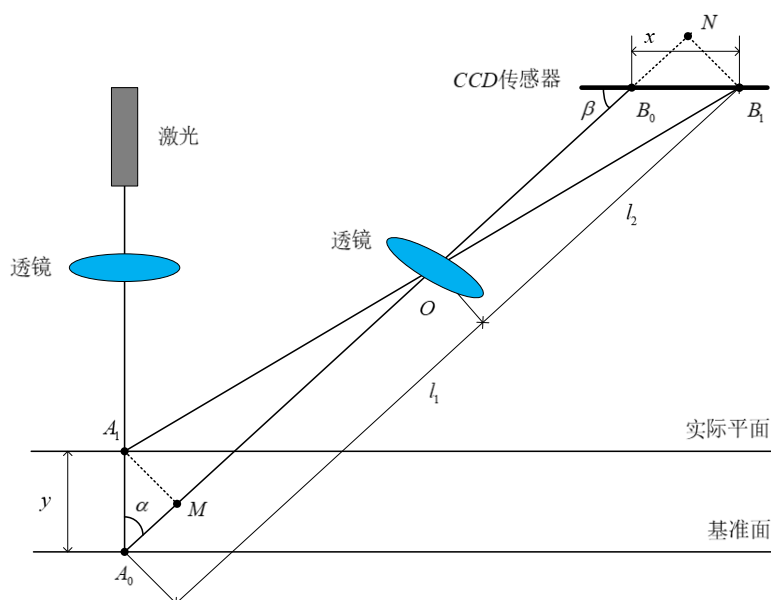


图 2.8 结构光传感器激光直射式示意图

图 2.8 中, 激光器发射出的激光经过透镜垂直打在基准面上并在  $A_0$  点处形成亮斑, 激光在发生表面漫反射后以  $\alpha$  角经另一透镜被 CCD 传感器接收、以  $\beta$  角打在  $B_0$  点处。当进行实际测量活动时, 入射激光打在被测物实际平面  $A_1$  点处,  $y$  为实际平面与基准面间垂直距离, 经另一透镜折射后成像在  $B_1$  点处, 此点即为  $A_1$  点对应的成像点,  $x$  表示 CCD 传感器平面  $B_0$  与  $B_1$  点间水平距离。进一步的, 我们过  $A_1$  点作直线  $A_0B_0$  的垂线并交直线  $A_0B_0$  于点  $M$ , 过  $B_1$  点作直线  $A_0B_0$  的垂线并交直线  $A_0B_0$  于点  $N$ 。  $A_0O$  意为物体到透镜光心间距离, 即为光学中的物距, 长度记为  $l_1$ ,  $B_0O$  意为像点到透镜光心间距离, 即为光学中的像距, 长度记为  $l_2$ 。这样以来我们便得到了一对相似三角形  $\Delta A_1MO$ 、 $\Delta B_1NO$ , 并有以下关系式。

$$\frac{A_1M}{B_1N} = \frac{MO}{NO} \dots\dots\dots (2.12)$$

$$\begin{cases} A_1M = A_1A_0 * \sin \alpha = y * \sin \alpha \\ B_1N = B_1B_0 * \sin \beta = x * \sin \beta \\ MO = A_0O - A_0M = l_1 - y * \cos \alpha \\ NO = B_0O + B_0N = l_2 + x * \cos \beta \end{cases} \dots\dots\dots (2.13)$$

综合式(2.12)和式(2.13)可得

$$y = \frac{x l_1 \sin \beta}{l_2 \sin \alpha + x \sin(\alpha + \beta)} \dots\dots\dots (2.14)$$

进一步的, 我们从图 2.9 所示的凸透镜成像中可得透镜成像高斯公式。

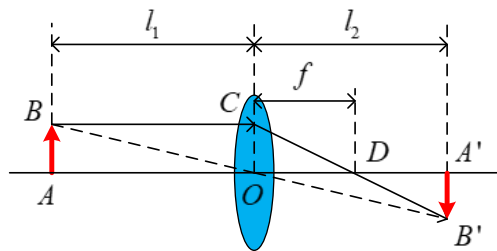


图 2.9 凸透镜成像示意图

$$\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} = \frac{1}{f} \dots\dots\dots (2.15)$$

式(2.15)中,  $f$  表示凸透镜焦距。整理式(2.15)可得

$$l_2 = \frac{fl_1}{l_1 - f} \dots\dots\dots (2.16)$$

综合式(2.14)和式(2.16)可将位移  $y$  表示为

$$y = \frac{x(l_1 - f) \sin \beta}{fl_1 + x(l_1 - f) \sin(\alpha + \beta)} \dots\dots\dots (2.17)$$

式(2.17)即为所求的直射式激光条纹图像信号中像素点与被测物表面真实的三维空间点间函数关系式。

激光斜射式与直射式类似，区别在于入射激光以  $\alpha$  角打在基准面  $A_0$  处形成亮斑，在表面发生漫反射后打在 CCD 传感器  $B_0$  点处、与 CCD 传感器平面呈  $\beta$  角。激光斜射式示意图如图 2.10 所示。

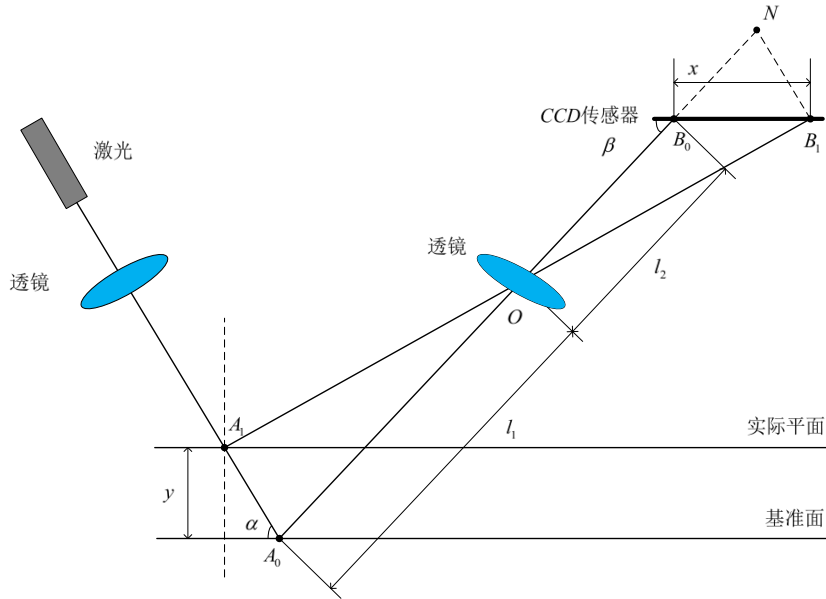


图 2.10 结构光传感器激光斜射式示意图

图 2.10 中通过一对相似三角形  $\Delta A_1A_0O$  和  $\Delta B_1B_0O$ ，我们可得以下关系式。

$$\frac{A_0A_1}{B_1N} = \frac{A_0O}{NO} \dots\dots\dots (2.18)$$

$$\begin{cases} A_0A_1 = \frac{y}{\sin \alpha} \\ B_1N = x * \sin \beta \\ A_0O = l_1 \\ NO = l_2 + x * \cos \beta \end{cases} \dots\dots\dots (2.19)$$

综合式(2.18)和式(2.19)可得

$$\frac{\frac{y}{\sin \alpha}}{x * \sin \beta} = \frac{l_1}{l_2 + x * \cos \beta} \dots\dots\dots (2.20)$$

进一步的, 代入式(2.15)可得

$$y = \frac{x l_1 * \sin \alpha * \sin \beta}{l_2 + x * \cos \beta} \dots\dots\dots (2.21)$$

式(2.21)即为所求的斜射式激光条纹图像信号中像素点与被测物表面真实的三维空间点间函数关系式。综上, 利用激光三角测量法, 测得 CCD 传感器上像点的位移量后即可求得对应的物点位移量, 从而完成结构光传感器三维测量工作。

## 2.2 系统硬件设计

手持式结构光测量系统硬件部分主要包括视觉传感器和结构光传感器, 其中由视觉传感器构成的视觉测量单元在系统中主要起到计算结构光测量单元位姿信息、从而整合被测物三维轮廓数据的作用, 其上例如感光芯片、镜头分辨率等参数决定了视觉传感器性能好坏; 而结构光传感器作为结构光测量单元乃至手持式结构光测量系统的核心组成部分, 起到直接测量被测物局部三维轮廓的作用, 其捕捉点云质量及密度能力强弱等性能直接影响着整个系统的精度。因此针对其二者的选型工作至关重要。

### 2.2.1 视觉传感器选型

视觉传感器感光芯片中的电荷耦合器件 (Charge Coupled Device, CCD) 常被业界广泛使用, 其实质是一种半导体器件, 表面上排列着许多能够感应光线的电容, 将光学影像转化为数字信号。像素 (Pixel) 作为 CCD 上植入的微小光敏物质, 其数量越多, 提供的画面就愈加清晰。CCD 相机由于其信号输出的一致性非常好, 相比传统 CMOS 相机来说噪声大大降低, 而且体积小、重量轻、不受磁场影响、具有抗震的特性而广受欢迎。CCD 相机工作时, 光线在其上被转化为电荷, 光敏元件由于受到的光照强度不同而呈现出不同的电荷量。当快门按下, CCD 将各个光敏元件的信息传送到模数转换器 (A/D) 上, 模拟量被转化为数字量, 得到的数字信号以一定格式压缩后存入缓存, 此时就得到了我们常见的一帧图像<sup>[23]</sup>。

镜头分辨率决定了拍摄图像的清晰度，通常而言对于相同的测量场景，视觉传感器的分辨率越高，保留的场景信息越完整，进而使得测量精度更加准确。由于本系统在面对大尺寸被测物时力求得到更高精度的三维轮廓数据，因此所选用的相机分辨率应达到 $1920 \times 1080 \text{ pixel}$ 以上。

综上，本系统选用的双目相机由杰瑞微通 HY-800 工业摄像机所组成，如图 2.11 所示。其搭载 CCD 传感器规格为  $1/2.5 \text{ inch}$ ，像素尺寸  $1.62 \mu\text{m} \times 1.62 \mu\text{m}$ ，最高可达  $3840 \times 2160 \text{ pixel}$  的分辨率与 30fps 的帧速有效保证了测量精度及效率，USB 2.0 免驱接口使其具备良好的适应性。



图 2.11 杰瑞微通 HY-800 工业摄像机

### 2.2.2 结构光传感器选型

精度较高的结构光传感器通常能够获得稠密的被测物点云数据，但同时较大的数据量也影响了测量效率、增加了测量时间；测量范围较小的结构光传感器具有良好的实时性，但面对相同尺寸的被测物时常常需要进行多次测量才能获得完整的三维轮廓数据；同时受被测物材质的影响，根据其表面不同的反射特性，激光的波长及线宽将影响获取的三维轮廓精度。

根据本系统的测量精度、效率要求和被测物材质常为金属等因素影响，应选取单次测量范围较小、获取的点云更为稠密、激光波长较短线宽较窄的结构光传感器，其中单次测量范围小的特性不会影响系统整体的测量范围，反而提升了测量速度及效率，点云稠密的特性增加了被测物三维轮廓数据的精度。综上，本系统选用了日本基恩士公司生产的 LJ-G200 线结构光传感器作为测量系统的核心组成部分，如图 2.12 所示。

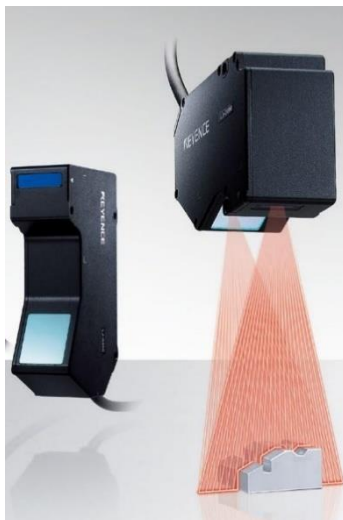


图 2.12 日本基恩士 LJ-G200 线结构光传感器

基恩士 LJ-G200 线结构光传感器由半导体激光、柱面物镜、2D Ernostar 物镜和 E<sup>3</sup>-CMOS 影像传感器所组成。由半导体激光发射器发射激光，经柱面物镜后光速扩大为条状，随后激光在被测物表面发生漫反射，反射光被聚焦在 E<sup>3</sup>-CMOS 影像传感器上，籍此测量被测物轮廓。其特有的多重灵活逻辑单元（MFL）透过被测目标物表面来优化激光功率，根据被测物的形状、颜色及材质等应用不同功率的激光以改变反射系数，优化后的激光功率可在任何条件下截取目标物。光接收物镜单元与同系列产品不同，经过重新设计后可以 2D 方式无错的捕获反射激光束，由四个镜片组成的 Ernostar 物镜大大减少影像失真，从而获得更高精度的 2D 轮廓。此外专门为机器影像而设计的 E<sup>3</sup>-CMOS 影像传感器动态范围是传统传感器的 300 倍，并具备可靠的 S/N 比率，这样无论被测物反射率高低都能精准测量。LJ-G200 内部结构示意图与性能指标如图 2.13 和表 2.1 所示。

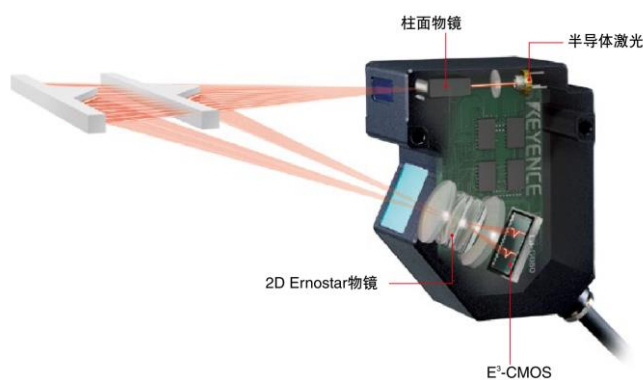


图 2.13 LJ-G200 线结构光传感器内部结构示意图

表 2.1 LJ-G200 线结构光传感器性能指标

| 参 数  |      |      | 参 考 值   |
|------|------|------|---------|
| 参考距离 |      |      | 200 mm  |
| 测量距离 | X 轴  | 近端   | 51 mm   |
|      |      | 参考距离 | 62 mm   |
|      |      | 远端   | 73 mm   |
|      | Z 轴  |      | ±48mm   |
| 光源   | 类型   |      | 红色半导体激光 |
|      | 波长   |      | 655 nm  |
|      | 输出功率 |      | 0.95 mW |
| 光点直径 |      |      | 180 μm  |
| 线性度  |      |      | ±0.1%   |
| 触发间隔 |      |      | 3.8 ms  |

## 2.3 平面靶标结构设计

平面靶标在手持式结构光测量系统中起到了方便双目相机求解结构光传感器位姿信息的作用，其主要原理是将平面靶标与结构光传感器刚性连接，通过双目相机针对平面靶标上粘贴的标志点进行成像并解算图像坐标，从而由二维的标志点图像坐标信息求解三维的平面靶标空间姿态信息。在这个过程中，标志点的成像质量好坏、数量及分布是否合理都会对空间姿态信息求解精度造成影响。本文将从标志点类型确定、标志点数量及分布设计两个方面分别进行研究。

### 2.3.1 标志点类型

#### (1) 发光二极管

发光二极管 LED (Lighting Emitting Diode) 是一种由磷化镓 (Gap) 等半导体材料所制成的、能够直接将电能转化为光能的发光器件<sup>[24]</sup>。LED 光源优点在于能够节约空间、响应速度迅速、工作电压低、使用寿命长，当有一定电流通过时即可发出鲜明颜色的光线。发光二极管可根据使用材料的不同和发光颜色的不同分为多种类型，常被使用的类型有普通单色发光二极管、高亮度及超高亮度发光二极管、红外发光二极管等。前三者的发光颜色与强度主要与使用的半导体材料有关，普通单色发光二极管使用的是磷化镓 (Gap) 等材料，而高亮度及超高亮度发光二极管使用的是砷铝化镓 (GaAlAs)、磷铟砷化镓 (GaAsInP) 等材料；红外发光二极管的工作原理与普通发光二极管类似，不同点在于其直接将电能转化为不可见光的红外光，在各类光控部件中应用广泛。

当 LED 用作标志点时，最大的问题在于其产生的散射现象及眩光效应将大大影响相机拍摄图像质量，进而降低针对三维平面靶标的位姿求解精度，因此已逐渐被其他光源所取代。

## (2) 回光反射标志点

近年来，欧美发达国家发明的一种由新型回光反射材料制得的标志点在高精度摄影测量等领域受到追捧，其本质是由直径约为 $50\mu\text{m}$ 的高折射率玻璃微珠或微晶立方体组成，通过将大部分入射光线按照原光路反射回光源处，从而达到回光反射的效果<sup>[25]</sup>。回光反射标志点的反射亮度要比普通漫反射标志点高出上百倍，被粘贴的被测物在图像处理时可以被更加快速且精准的捕获，“准二值图像”的特点使得处理精度大大提高。回光反射标志点在精密工业测量领域已广泛应用，例如 3M 公司生产的由平顶型玻璃微珠材料制成的工程级、微晶立方角体材料制成的超强级与钻石级回光反射标志点已被应用于各种交通标志的制作。高折射率玻璃微珠与微晶立方体如图 2.14 所示。

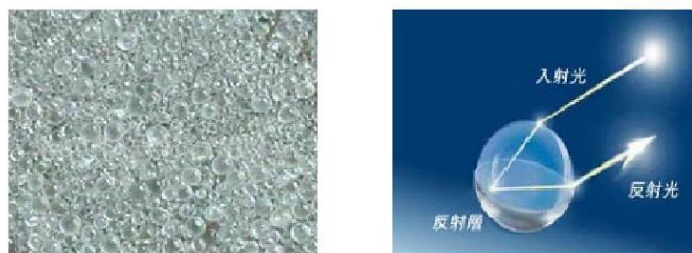


图 2.14 高折射率玻璃微珠与微晶立方体

回光反射标志点的成像质量突出，成本低廉，且易于安装在平面靶标表面，仅需粘贴在合适位置即可，同时大大降低了平面靶标的加工难度，因此最终将回光反射标志点作为平面靶标上的标志点安装在本系统上。

## 2.3.2 标志点数量及分布

平面靶标上标志点的数量及布局是影响双目相机求解结构光测量单元位姿精度的另一个重要因素，如果平面靶标上标志点数量过少、呈线性分布，则容易出现因标志点遮挡或识别失败而导致无法定位的问题；如果标志点数量过多，分布过于无序，则会造成系统复杂、平面靶标加工难度大等问题。国内外学者在平

面靶标应用最为广泛的领域——传统光笔式测量系统中研究较为深入，下面将一一作出分析。

天津大学的黄风山博士等设计了一种如图 2.15 所示的光笔式单摄像机三维坐标视觉测量系统<sup>[26]</sup>。其经过对单摄像机“ $n$  点透视问题 ( $P_nP$ )”做出详细推理和计算，并创造性的提出“共线三点透视问题 ( $P3nP$ )”，总结得出只有当标志点的数量大于或等于 3 时， $P_nP$  问题才能够得到有限数量的解，并最终确定系统由一支装有三个 LED 点光源作为标志点的光笔、单摄像机、专用标定附件和计算机所组成。该光笔的设计需保证三个标志点与测头中心在一条直线上且相邻两个中心间位置关系已知，通过实验证明系统在一米的测量范围内被测点精度高达 0.365mm (Z 方向)、0.05mm (Y 方向)、0.072mm (X 方向)。

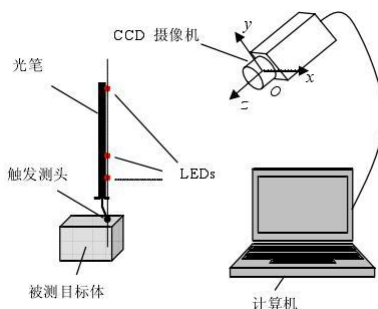


图 2.15 光笔式单摄像机三维坐标视觉测量系统

北京长城计量测试技术研究所的孙佳星等设计了一种如图 2.16 所示的双摄像机光笔式三维坐标测量系统<sup>[27]</sup>。该系统利用双目相机立体视差的原理有效的弥补了单摄像机测量时系统转向轴误差较大的缺点，并针对标志点数量问题作出详细分析：通过空间中与光笔测头中心已知的三个标志点光源，根据两点间距离公式可建立三个非线性方程，其中方程数量与测头坐标未知量相同，即可求得唯一解。但在真实的测量活动中，测头中心到各标志点中心间距离很难准确获得，使得系统精度大大降低。因此若选择增加标志点个数，即可构成冗余系统，进而增加了系统精度及可靠性<sup>[28]</sup>。因此最终该系统选用了五个点光源结构。

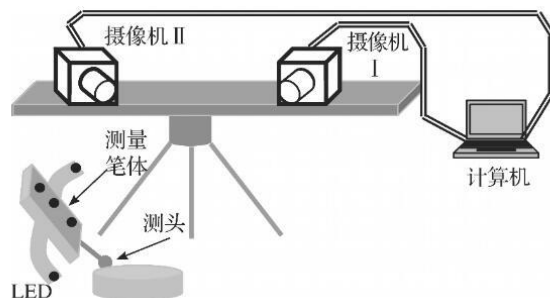


图 2.16 双摄像机光笔式三维坐标测量系统

齐鲁科技大学的 DONGRI S 等研究了光笔标志点离散度对于测量精度的影响<sup>[29]</sup>，系统构成如图 2.17 所示。该系统选取了八个标志点并按照矩形和线性等分布进行排列，并基于标志点数量和分布结构不变的前提下根据离散度不同而设计了五种光笔，同时提出了对应的匹配标志点及其图像算法。实验结果表明当标志点的分布程度不超过一定范围时，增加离散度有助于提高系统测量精度，但总体而言，标志点离散度与测量精度之间的关系并不是单调增加的趋势。

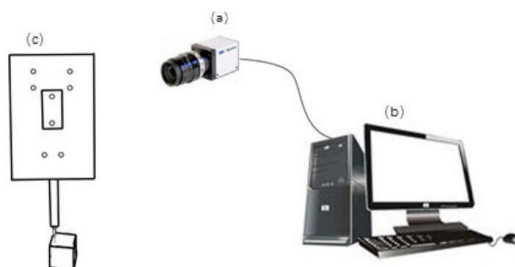


图 2.17 光笔标志点离散度对于测量精度的影响

此外，湖南工业大学的朱财升<sup>[30]</sup>、北京信息科技大学的娄小平<sup>[31]</sup>等所研究的立体靶标进一步提供了多方位的特征信息，其中朱财升在基于双目视觉的立体靶标技术研究中将靶标制作作为正方体式结构，如图 2.18 所示，其四个侧面均可安装标志点以供位姿检测，有效的提升了被测物三维信息求解的速度及精度，但同时立体靶标的设计所导致的加工成本上升、坐标系转换关系求解困难等问题不可忽视。

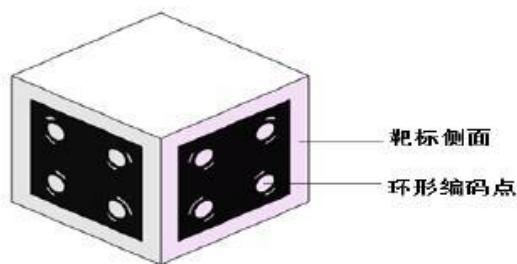


图 2.18 立体靶标结构

综上，本研究根据测量精度需要并兼顾制造加工成本，最终采用了平面靶标的结构设计以便确定标志点间相互位置关系，五个回光反射材料所制的圆形标志点呈 T 字型非线性分布，相邻两个标志点圆心间距离为 25mm，冗余系统的设计既保证了结构光测量单元位姿求解的精度和系统的可靠性，又不会使得系统计算成本过于高昂，平面靶标结构图如图 2.19 所示。

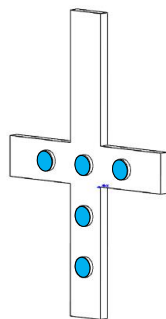


图 2.19 手持式结构光测量系统平面靶标结构图

## 2.4 本章小结

本章首先对手持式结构光测量系统的组成进行介绍，并详细分析了相机的成像原理、基于双目相机的三维测量原理和结构光测量原理；其次按照系统功能要求，分析视觉传感器及结构光传感器各项参数指标，决定选取杰瑞微通 HY-800 工业摄像机和基恩士 LJ-G200 线结构光传感器作为本系统的硬件组成部分；最后对平面靶标进行结构设计，针对其上标志点的类型、数量及分布情况对系统精度造成的影响进行研究，最终确定本系统的平面靶标标志点由回光反射材料制得、五个呈 T 字形非线性分布的结构设计保证了系统的精度及可靠性，同时易于加工节约成本且不会增加系统复杂性。

## 第3章 手持式结构光测量系统的相机标定

相机参数标定即为根据充足的已知三维特征点坐标和对应的二维图像坐标,通过例如 Newton-Raphson、Levenberg-Marquardt、粒子群等非线性优化算法对相机内参、外参、畸变系数等参数进行求取的过程<sup>[32]</sup>。相机参数标定的结果对视觉测量精度有着决定性的影响,例如在汽车航空等精密制造领域中对箱体、机架等大纵深部件的测量精度更是要求严格,微小的装配误差也会带来巨大的安全隐患。在本文研究的手持式结构光测量系统中,相机参数精确与否对结构光测量单元位姿求解精度乃至系统精度至关重要。

### 3.1 经典相机标定方法及后续研究

#### 3.1.1 经典相机标定方法

经典相机标定方法主要有三类:主动视觉标定法、自标定法<sup>[33]</sup>和基于目标的标定法,其中基于主动视觉的相机标定法是通过控制相机做特定运动并拍摄多组图像,根据图像信息和已知的相机位移变化来求解相机参数,该方法计算简单、鲁棒性较强,但实验设备较为昂贵、对实验条件有较高要求、不适合在狭小或无法控制的场所进行应用;自标定法是通过二次曲线建立关于相机内参矩阵的约束方程进行求解,目前该算法主要是利用了相机运动及场景的约束,其中针对相机运动的约束条件较为苛刻,因此实际应用较少,针对场景的约束则是使用了消隐点等空间特征<sup>[34]</sup>,是当下研究的热点。自标定法的优点在于其灵活性强,可进行在线标定操作,但鲁棒性较差的问题阻碍了其应用范围;基于目标的标定法则使用尺寸已知的标定物,通过建立标定物上三维空间点与相机中的二维图像点对应关系,从而计算相机内外参数。标定物可根据结构不同分为二维标定物与三维标定物,二维标定物的制作成本较低,但进行标定活动时需要至少获取两张以上的图像。三维标定物的标定精度更高、操作更为简便,但具有加工维护成本高昂的问题。基于目标的标定法精度受标定物的加工质量影响较大,但仍是目前应用最为广泛的方法。以 Zhang<sup>[35]</sup>的方法为代表,其使用二维棋盘格标定板进行标定,采集标定板不同位姿图像并提取特征点像素坐标,通过单应矩阵计算相机内外参数初值,利用非线性最小二乘法估计相机畸变系数,最后使用极大似然估计法优

化参数，流程图如图 3.1 所示。

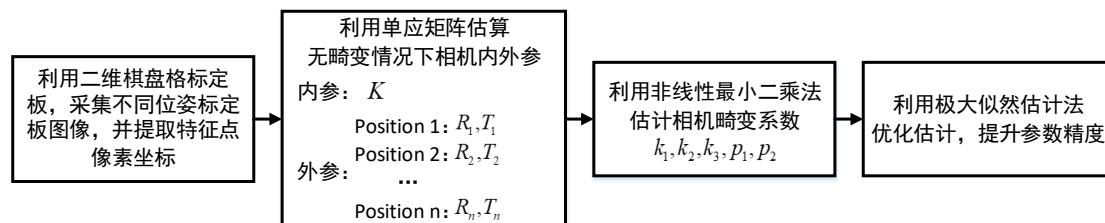


图 3.1 基于目标的标定法示意图

### 3.1.2 经典相机标定方法的后续研究

利用经典相机标定方法的视觉测量系统在针对大纵深目标进行三维测量时，不同深度的成像目标测量结果准确度存在差异，难以达到高精度测量的要求<sup>[36, 37]</sup>。因此人们为提高视觉测量系统精度，对相机标定的理论与方法展开进一步研究，以获取更加精确的相机参数。

参考文献<sup>[16, 38, 39]</sup>通过修正相机的镜头畸变来提高标定精度。其中 Tang<sup>[16]</sup>等人对五种传统畸变模型进行了研究评估，并对每种模型的不同适用环境进行了分析。Sun<sup>[38]</sup>等人提出了一种与深度相关的畸变模型，描述了畸变系数和大景深相机的空间点深度之间的关系，消除了由相机聚焦误差引起的标定误差。但由于相机透镜存在制造误差，固定形式的畸变模型无法准确的描述畸变分布，因此 Liu<sup>[39]</sup>等人提出了一种充分考虑畸变分布随机性的畸变模型，利用克里金插值法得到能够准确描述相机畸变分布的校正曲面，从而提高测量精度。

参考文献<sup>[17, 40-43]</sup>将受自然启发的群体智能优化算法应用于相机标定中。其中 Shu<sup>[40]</sup>等人为克服智能算法容易陷入局部最优解的问题，提出了一种结合散斑图和改进灰狼优化算法的相机标定方法，与棋盘格图案相比，散斑图可以提供更多特征点，但同时由于散斑图像会降低特征点的像素信息，高精度的特征点将会减少。为了提高特征点检测成功率，Chen<sup>[41]</sup>等人利用高斯尺度空间和 Harris 特征点检测算子相结合的方法进行特征点检测，并使用改进的遗传模拟退火算法以克服 BP 神经网络精度低、收敛性差的问题。而相比于遗传算法，粒子群优化算法更易于实现，因此 Deng<sup>[17]</sup>等人将差分进化粒子群算法应用在相机标定中。Gunen<sup>[42]</sup>等人对比了十一种优化算法在相机标定应用中的效果，并总结出利用加权差分进化算法（WDE）会取得更加准确且稳健的结果。应用优化算法后相机标定过程

会变得非常耗时，尤其当相机数量增加时会大大影响标定速度，因此 Zhang<sup>[43]</sup>等人提出利用单张图像来求解相机参数。

参考文献<sup>[14, 44-46]</sup>分析了在标定过程中不同外界因素对结果产生的影响。其中 Podbreznik<sup>[44]</sup>等人分析了温度带来的影响，针对特定的温度变化对参数加以补偿来保证测量精度。Zhu<sup>[14]</sup>等人针对图像强光区域难以消除而导致标定精度下降的问题，提出了一种基于最佳偏振信息的标定方法，利用该方法提取出的特征点坐标与自然光照条件下的特征点坐标相差仅约 1 个像素。Moru<sup>[45]</sup>和 Muruganantham<sup>[46]</sup>等人分析了相机焦距、特征点数目、标定板倾斜角度和图像数量等因素对标定精度造成的影响，利用统计学方法对结果进行比较分析，并给出标定工况的最佳设置条件。

但以上对相机标定技术的研究都存在一个共同的问题，即都是将针孔模型作为基本成像模型。人们将相机透镜组简化为一个没有厚度的平面，而处于该平面中的相机光心则被认为是相机固有属性，其位置固定不变<sup>[43]</sup>。然而 Yusoff<sup>[47]</sup>和 Oniga<sup>[48]</sup>等人通过在无人机（UAV）摄影测量的标定实验中发现，当特征点处于空间中不同深度时，与相机光心位置关系密切的相机内参求取结果会发生变化，并总结出了无人机摄影测量的最佳标定距离，但未对相机内参与空间物点深度的关系进行进一步的研究。

此外，由于相机标定本质上是基于特征检测的，和其他视觉算法一样，也会受到噪声的影响<sup>[49]</sup>。图像噪声、光照分布、非线性优化算法初值估计等因素可能导致所得的标定结果不稳定且不可重复。为了提高标定结果的鲁棒性，Semeniuta<sup>[50]</sup>和 Zhan<sup>[51]</sup>等人基于极限中心定理对同一相机多次求取的相机内参结果进行极大似然估计，将平均值作为相机内参真值，并得出了单次标定图像数量越多结果越稳定的结论。但在该实验中用于标定的图像不能保证覆盖相机视场，与标定工况最佳设置条件不符，因此会对高斯拟合函数的置信区间产生影响，其结果不能作为相机内参真值。

## 3.2 相机光学系统中心位置分析

相机光学中心的概念广泛应用于将针孔成像模型作为相机基本成像模型的摄影测量学、计算机视觉等领域中。A Mikš<sup>[52]</sup>等根据理论与实验对相机光学中心

的位置进行了分析。首先考虑在理想光学系统中光学中心的位置。图 3.2 中  $B$  为空间内任意一点， $B'$  为其在相机像平面  $C$  上所成的像。物方主点  $H$  与像方主点  $H'$  分别位于物方主平面  $Q$  与像方主平面  $Q'$  上，物方主平面、像方主平面与相机光轴  $AA'$  相互垂直且主平面间距离  $HH' = d$ 。点  $O$  为光学系统中心，位于物方主点  $H$  与像方主点  $H'$  之间， $d'$  表示光学系统中心与物方主点间距离。

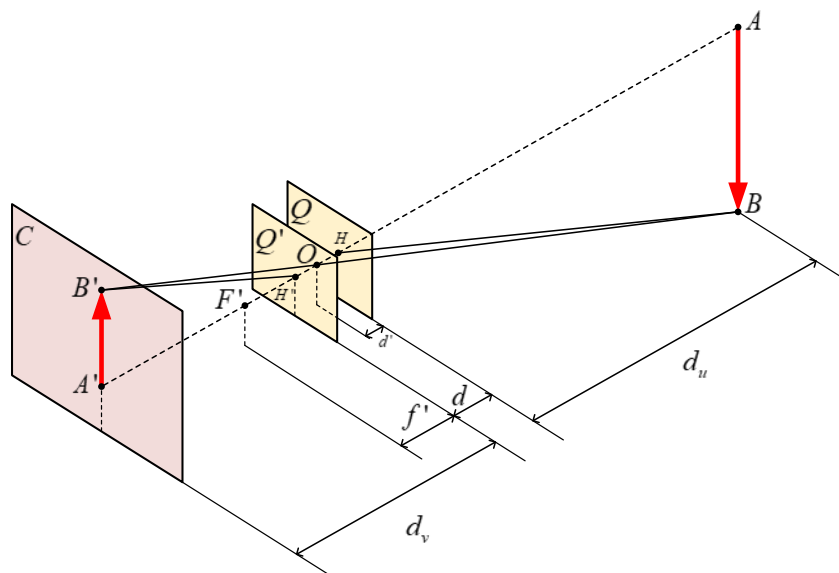


图 3.2 理想光学系统中光学中心位置分析

根据光学成像理论<sup>[53]</sup>，可得在相机线性成像模型中

$$\begin{cases} \frac{1}{d_u} + \frac{1}{d_v} = \frac{1}{f'} \\ m = \frac{A'B'}{AB} = \frac{d_u}{d_v} \end{cases} \dots\dots\dots (3.1)$$

式(3.1)中， $d_u$  表示物点  $B$  与物方主点  $H$  间的轴向距离， $d_v$  表示像点  $B'$  与像方主点  $H'$  间的轴向距离。 $f'$  表示像方焦点  $F'$  到像方主点  $H'$  间的距离。线段  $AB$ 、 $A'B'$  的长度分别表示物点  $B$  与像点  $B'$  到相机光轴  $AA'$  的距离。 $m$  表示光学系统横向放大率。根据图 3.2 与式(3.1)可得

$$\frac{AB}{d_u - d'} = \frac{A'B'}{d_v + d - d'} \dots\dots\dots (3.2)$$

$$d' = d \left( 1 - \frac{f'}{d_u} \right) \dots\dots\dots (3.3)$$

式(3.3)中可以看出，通常情况下相机光学系统中心位置并不固定，往往取决

于光学系统的设计参数及物体与相机镜头间距离远近等因素。对于一个具有固定光学系统设计参数的相机镜头，所拍摄物体远近距离不同，对应的光学系统中心位置也有所不同。

其次考虑存在像差的实际光学系统。根据光学成像衍射理论<sup>[53]</sup>，由于相机焦平面与像平面往往不能完全重合，导致空间中物点在相机中所成的像往往是一个具有特定能量分布的混沌圆，而实际在像平面上显示出来的则是混沌圆中能量值最大的点，该像点与理想光学系统中同一物点所成像点间距离被称作畸变。这种现象由光学系统的像差所决定，而光学系统的像差既取决于物点与相机镜头间距离，又取决于物点与相机光轴的距离。因此在实际光学系统中，光学系统中心位置由多种因素决定，无法定义其固定位置。

通过以上的介绍与分析，我们发现视觉测量系统存在一些问题。首先，在传统相机模型分析中，人们将相机透镜简化成一个没有厚度的平面，而光学中心的位置则被认为是固定不变的。同时，与光学中心位置关系密切的相机内参则被认为是相机的固有参数<sup>[43]</sup>，理论上也是固定不变的，例如焦距的概念即被定义为相机光学中心与焦点间的距离。但 A Mikš<sup>[52]</sup>等根据理论与实验对相机光学中心的位置进行了分析，发现无论是在理想光学系统中还是在存在像差的实际光学系统中，光学系统中心的位置取决于空间中物点深度等众多因素，无法定义其固定位置。此外相机内参也不应该是固定不变的，当物点深度发生变化时，相机内参也应该随之变化。其次，相机参数标定精度也存在问题。传统相机标定的过程往往只进行一次计算便得到了最终结果<sup>[32]</sup>。但在实际应用中，由于图像噪声、光照分布、非线性优化算法初值估计等因素，导致对同一相机进行多次标定计算，结果也不尽相同<sup>[49]</sup>。测量精度被定义为：通过在规定条件下对相同或类似物体进行重复测量计算而获得的结果与真值之间的接近程度<sup>[50]</sup>。然而，利用经典相机标定方法对同一相机进行多次参数标定估计的结果往往存在变动，无法定义某一次结果可代表相机参数标定的最高精度，因此经典标定方法是存在缺陷和局限性的。

### 3.3 针对多景深目标的高精度视觉成像模型及其标定方法

根据以上对经典相机标定方法及其后续研究方法、相机光学系统中心位置的分析，我们认为造成大纵深目标视觉三维测量误差的原因，一方面是因为利用了

传统的针孔模型作为相机成像模型,导致针对不同深度的物点使用相同的相机参数进行计算。应该建立新的视觉成像模型,针对不同深度的物点使用对应的相机内参进行高精度三维重建。另一方面是因为在实际测量活动中,受图像噪声、光照分布、非线性优化算法初值估计等因素的影响,导致对同一个相机进行多次标定计算结果存在差异,难以将某一个结果定义为真实的相机参数。

因此我们提出了一种针对多景深目标的高精度视觉成像模型及其标定方法<sup>[12]</sup>,该模型针对任意深度的物点计算其对应的相机内参,示意图如图 3.3 所示。

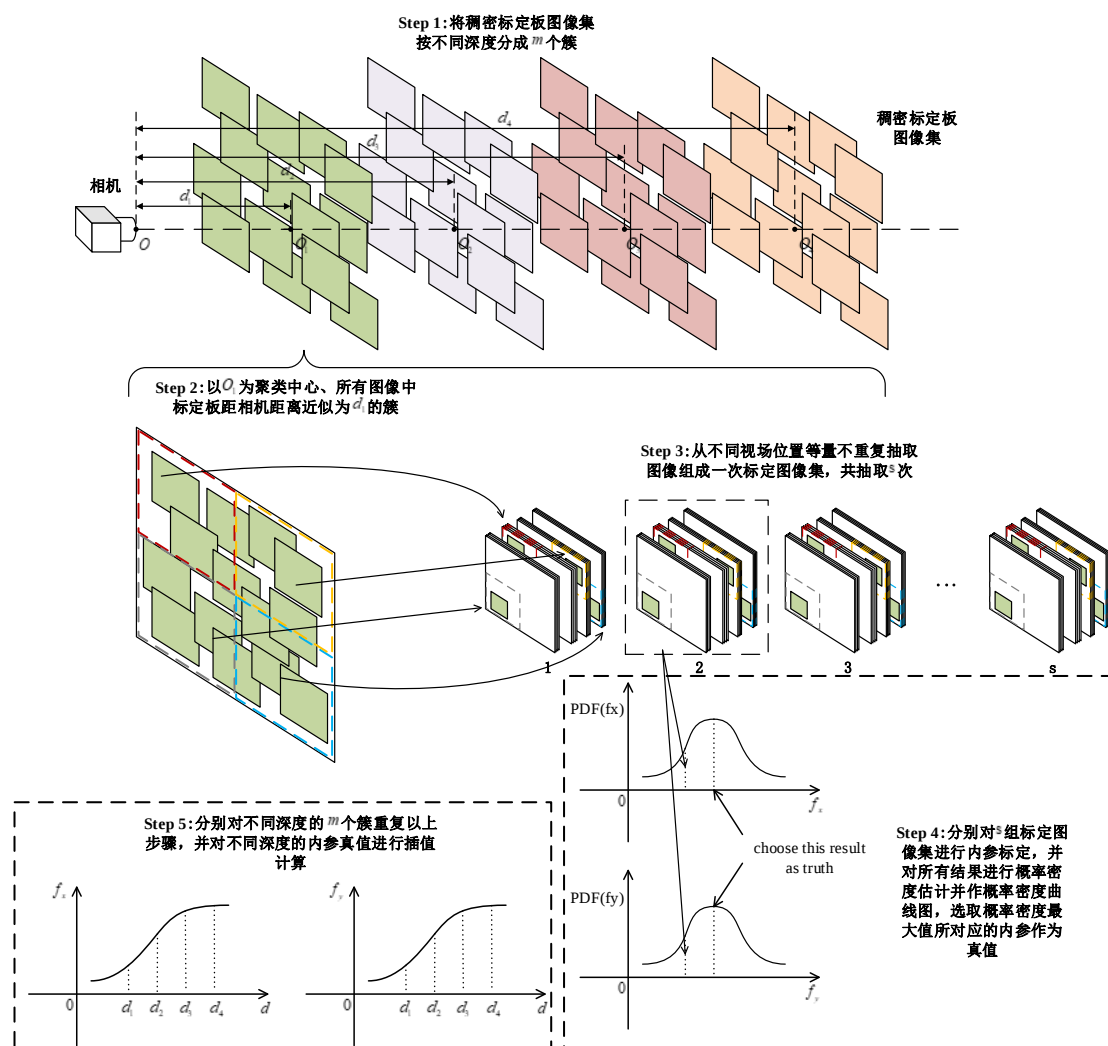


图 3.3 针对多景深目标的高精度视觉成像模型及其标定方法示意图

图 3.3 中,首先将稠密拍摄的标定板图像按照深度不同分组聚类,任意一簇的所有图像中标定板深度视为近似相等。其次将同一簇中图像按照标定板所处相机视场位置不同而进行抽取,组成同一深度下多组标定图像集,且每组图像集中标定板能够保证覆盖相机视场。对同一深度下多组标定图像集分别进行标定计算

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/056004123204010053>